



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΣΧΟΛΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ, ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΩΝ & ΔΙΕΘΝΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΒΙΟΟΙΚΟΝΟΜΙΑ, ΚΥΚΛΙΚΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ & ΒΙΩΣΙΜΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ»

ΑΠΑΝΘΡΑΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΚΛΑΔΟΥ ΤΗΣ
ΤΣΙΜΕΝΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Ευνογαλά Μυρτώ

Πειραιάς, Μάιος, 2024



UNIVERSITY OF PIRAEUS
SCHOOL OF ECONOMICS, BUSINESS AND INTERNATIONAL STUDIES
DEPARTMENT OF ECONOMICS

**MSc. in Bioeconomy, Circular Economy & Sustainable
Development**

**DECARBONIZATION OF THE GREEK CEMENT
INDUSTRY**

By Xynogala Myrto

Piraeus, May, 2024



ΤΜΗΜΑ
ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΒΕΒΑΙΩΣΗ ΕΚΠΟΝΗΣΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

«Δηλώνω υπεύθυνα ότι το έργο που εκπονήθηκε και παρουσιάζεται στην υποβαλλόμενη διπλωματική εργασία, για τη λήψη του μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών, στη «*Βιοοικονομία, Κυκλική Οικονομία και Βιώσιμη Ανάπτυξη*» με τίτλο:

ΑΠΑΝΘΡΑΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΚΛΑΔΟΥ ΤΗΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

έχει γραφτεί από εμένα αποκλειστικά στο σύνολό της. Δεν έχει υποβληθεί ούτε εγκριθεί στο πλαίσιο κάποιου άλλου μεταπτυχιακού προγράμματος ή προπτυχιακού τίτλου σπουδών στην Ελλάδα ή στο εξωτερικό, ούτε είναι εργασία ή τμήμα εργασίας ακαδημαϊκού ή επαγγελματικού χαρακτήρα.

Δηλώνω επίσης υπεύθυνα ότι οι πηγές στις οποίες ανέτρεξα για την εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας αναφέρονται στο σύνολό τους, κάνοντάς πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου.»

Υπογραφή Μεταπτυχιακού Φοιτητή

Ονοματεπώνυμο

Ξυνογαλά Μυρτώ

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής μου εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μου, Μάρκο Τσελεκούνη, για την καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια αυτού του ταξιδιού. Επιπλέον, αυτό το επίτευγμα δεν θα ήταν δυνατό χωρίς την ενθάρρυνση και την βοήθεια των φίλων μου, για τα οποία τους ευχαριστώ θερμά. Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω βαθιά ευγνωμοσύνη στην οικογένειά μου για την αμέριστη υποστήριξη και την πίστη στις ικανότητές μου, τα οποία παρείχαν κίνητρο σε δύσκολες στιγμές.

Απανθρακοποίηση του κλάδου της τσιμεντοβιομηχανίας στην Ελλάδα

Σημαντικοί Όροι: αέρια του θερμοκηπίου, τσιμεντοβιομηχανία, Ελλάδα, απανθρακοποίηση, υποκατάσταση ορυκτών καυσίμων, υποκατάσταση κλίνκερ, εξοικονόμηση ενέργειας, εναλλακτικό κλίνκερ, δέσμευση CO₂

Περίληψη

Η βιομηχανία τσιμέντου, γνωστή για τη σημαντική συμβολή της στις παγκόσμιες εκπομπές CO₂, αποτελεί έναν κλάδο στόχο για τον μετριασμό του προβλήματος της κλιματικής αλλαγής. Αυτή η μεταπτυχιακή εργασία διερευνά τις δυνατότητες απανθρακοποίησης της ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας, εστιάζοντας σε μέτρα μείωσης και πρωτοβουλίες προσαρμοσμένες στο μοναδικό πλαίσιο της χώρας και των εταιρειών που δραστηριοποιούνται σε αυτήν. Μέσα από μια ολοκληρωμένη ανασκόπηση των διεθνών πλαισίων και πρακτικών εξετάζεται μια σειρά μέτρων μείωσης, από την υποκατάσταση ορυκτών καυσίμων και κλίνκερ και την ενσωμάτωση εναλλακτικών κλίνκερ στο τελικό προϊόν έως τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και την εφαρμογή τεχνικών δέσμευσης CO₂, οι οποίες δύναται να εφαρμοστούν και σε εθνικό επίπεδο. Οι εκπομπές που περιλαμβάνονται στην μελέτη αφορούν τις άμεσες εκπομπές από την καύση καυσίμων και τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά την παραγωγή του τσιμέντου, αγνοώντας τις έμμεσες εκπομπές που έχουν σχέση με την εφοδιαστική αλυσίδα. Η μεθοδολογία βασίζεται στην σύγκριση των εκπομπών που αντιστοιχούν σε τρία σενάρια μείωσης (συντηρητικό, μέτριο και φιλόδοξο) με το σενάριο διατήρησης της υφιστάμενης κατάστασης BAU κατά το έτος στόχο και με το έτος βάσης, ήτοι το 2030 και το 2021 αντίστοιχα. Από την ανάλυση προέκυψε ότι, ιδιαίτερα στην περίπτωση ανάπτυξης του κλάδου στην χώρα η οποία συνεπάγεται αύξηση της ζήτησης του τσιμέντου, η υιοθέτηση καινοτόμων τεχνολόγων, όπως η δέσμευση άνθρακα, είναι απαραίτητη για την αποτελεσματική μείωση των εκπομπών CO₂.

Decarbonization of the Greek cement industry

Keywords: greenhouse gases, cement industry, Greece, decarbonization, fossil fuel substitution, clinker substitution, energy saving, alternative clinker, CO₂ capture

Abstract

The cement industry, known for its significant contribution to global CO₂ emissions, is a target sector for climate change mitigation. This master's thesis explores the decarbonisation potential of the Greek cement industry, focusing on reduction measures and initiatives tailored to the unique context of the country and the companies operating in it. Through a comprehensive analysis of international frameworks and practices, a range of mitigation measures are examined, from the substitution of fossil fuels and clinker and the incorporation of alternative clinkers in the final product to the improvement of energy efficiency and the application of CO₂ capture techniques, which can be applied at the national level. In the study, emissions from fuel combustion and processes that take place during the production of the cement are included, ignoring indirect emissions related to the supply chain. The methodology is based on the comparison of emissions corresponding to three reduction scenarios (conservative, moderate and ambitious) with the BAU case scenario in the target year and the base year, more specific for years 2030 and 2021 respectively. The analysis underscores the importance of adopting innovative technologies, such as carbon capture, for effectively reducing CO₂ emissions, particularly in the context of the sector's development within the country, which entails a rise in cement demand.

Περιεχόμενα

Περίληψη	iii
Abstract.....	v
Κατάλογος Πινάκων	xi
Πίνακας Διαγραμμάτων.....	xiii
Πίνακας Εικόνων	xv
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ	3
2.1. Εισαγωγή.....	3
2.2. Τι είναι η κλιματική αλλαγή.....	3
2.3. Πλαίσιο για την μείωση των εκπομπών	5
2.3.1. Διεθνές πλαίσιο.....	5
2.3.2. Σύστημα εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπών	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Ο ΚΛΑΔΟΣ ΤΗΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ	11
3.1. Εισαγωγή.....	11
3.2. Παραγωγική διαδικασία	11
3.3. Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.....	17
3.3.1. Εκπομπές καύσης	19
3.3.2. Εκπομπές διεργασιών.....	21
3.4. Πρωτοβουλίες τσιμεντοβιομηχανίας	22
3.5. Τσιμεντοβιομηχανίες στην Ελλάδα	25
3.5.1. Τιτάν	27
3.5.2. Ηρακλής.....	27
3.5.3. Χάλυψ	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΤΡΑ ΜΕΙΩΣΗΣ ΕΚΠΟΜΠΩΝ.....	29
4.1. Εισαγωγή.....	29
4.2. Ανάλυση μέτρων μείωσης εκπομπών	29
4.2.1. Υποκατάσταση ορυκτών καυσίμων.....	30
4.2.1.1. Απόβλητα	31
4.2.1.2. Βιομάζα	33
4.2.1.3. Υδρογόνο	35
4.2.2. Μείωση του λόγου κλίνκερ/τσιμέντου.....	38
4.2.2.1. Φυσικά	38

4.2.2.2.	Βιομηχανικά παραπροϊόντα.....	39
4.2.3.	Εναλλακτικό κλίνκερ	41
4.2.4.	Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης.....	44
4.2.5.	Δέσμευση CO ₂	48
4.2.5.1.	Δέσμευση πριν την καύση.....	50
4.2.5.2.	Δέσμευση μετά την καύση	50
4.2.5.3.	Καύση σε υψηλά επίπεδα συγκέντρωσης οξυγόνου.....	56
4.2.5.4.	Αποθήκευση μετά την δέσμευση	56
4.2.5.5.	Χρήσεις μετά την δέσμευση	59
4.3.	Εφαρμοζόμενες πρακτικές των ελληνικών τσιμεντοβιομηχανιών.....	62
4.3.1.	TITAN	62
4.3.2.	Ηρακλής.....	64
4.3.3.	Χάλυψ	66
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ		67
5.1.	Εισαγωγή.....	67
5.2.	Βάσεις δεδομένων.....	67
5.3.	Περιγραφή μεθοδολογίας.....	70
5.3.1.	Μοντέλο εκτίμησης εκπομπών.....	70
5.3.2.	Ζήτηση τσιμέντου	72
5.3.3.	Μοντελοποίηση μέτρων μείωσης.....	73
5.3.4.	Έτος βάσης	75
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ		77
6.1.	Εισαγωγή.....	77
6.2.	Αποτελέσματα	77
6.3.	Ανάλυση ευαισθησίας	81
6.3.1.	Σενάρια μείωσης.....	82
6.3.2.	Ετήσια ζήτηση τσιμέντου	84
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ		89
7.1.	Εισαγωγή.....	89
7.2.	Συμπεράσματα	89
7.3.	Περιορισμοί και προτάσεις για μελλοντική έρευνα	90
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		94
Ξένα.....		94
Ελληνική		103

Διαδικτυακοί Τόποι	103
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	107

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1 Προϊόντα με βάση το τσιμέντο.....	12
Πίνακας 3.2 Τύποι τσιμέντου βάσει του κανονισμού EN 197-1:2011	13
Πίνακας 3.3 Ορυκτά καύσιμα τσιμεντοβιομηχανίας	20
Πίνακας 3.4 Μονάδες παραγωγής τσιμέντου στην Ελλάδα	25
Πίνακας 4.1 Εναλλακτικά καύσιμα στην τσιμεντοβιομηχανία	33
Πίνακας 4.2 Βιομαζικά καύσιμα στην τσιμεντοβιομηχανία.....	34
Πίνακας 4.3 Ορυκτολογικές φάσεις τσιμέντου Portland.....	41
Πίνακας 4.4 Μέτρα ενεργειακής βελτίωσης και εξοικονόμηση καυσίμου	45
Πίνακας 4.5 Προϊόντα με πρώτη ύλη το CO ₂	61
Πίνακας 5.1 Βάσεις δεδομένων και αντλούμενα στοιχεία	68
Πίνακας 5.2 Σενάρια μέτρων μείωσης	74
Πίνακας 5.3 Παράμετροι έτους βάσης	76
Πίνακας 6.1 Σύγκρισή εκπομπών το 2030 με το έτος βάσης	80
Πίνακας 6.2 Σύγκρισή εκπομπών το 2030.....	80
Πίνακας 6.3 Ανάλυση ευαισθησίας ζήτησης τσιμέντου	86
Πίνακας 6.4 Ένταση εκπομπών για διάφορες ετήσιες μεταβολές ζήτησης τσιμέντου	87

Πίνακας Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 3.1 Διαχρονική εξέλιξη (2010-2022) εκπομπών EU ETS για την Ευρωπαϊκή Ένωση.....	18
Διάγραμμα 3.2 Διαχρονική εξέλιξη (2010-2022) εκπομπών EU ETS για την Ελλάδα.....	18
Διάγραμμα 3.3 Συνεισφορά εκπομπών καύσης και διεργασιών από την τσιμεντοβιομηχανία (2008-2021).....	19
Διάγραμμα 3.4 Συνεισφορά συμβατικών ορυκτών καυσίμων σε παγκόσμιο επίπεδο.....	21
Διάγραμμα 3.5 Μερίδιο αγοράς των ελληνικών τσιμεντοβιομηχανιών.....	26
Διάγραμμα 4.1 Καμπύλη ισορροπίας την αντίδρασης $\text{CaO} + \text{CO}_2 \leftrightarrow \text{CaCO}_3$	54
Διάγραμμα 4.2 Διαχρονική εξέλιξη ενεργειακού μίγματος στο κλίνκερ για την Α.Γ.Ε.Τ.....	65
Διάγραμμα 6.1 Διαχρονική εξέλιξη εκπομπών κατά το BAU.....	78
Διάγραμμα 6.2 Διαχρονική Εξέλιξη εκπομπών για κάθε σενάριο μείωσης.....	79
Διάγραμμα 6.3 Ανάλυση ευαισθησίας μέτρων μείωσης.....	83
Διάγραμμα 6.4 Ανάλυση ευαισθησίας για την δέσμευση του CO_2	84
Διάγραμμα 6.5 Ανάλυση ευαισθησίας ζήτησης τσιμέντου.....	85

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 3.1 Στάδια Παραγωγής Τσιμέντου (IEA, 2021).....	14
Εικόνα 3.2 Ροές μάζας κατά την παραγωγή κλίνκερ (WBCSD, 2011)	22
Εικόνα 3.3 Συνεισφορά εκπομπών κάθε ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας στο σύνολο του κλάδου στην Ελλάδα κατά την περίοδο 2010-2022.....	26
Εικόνα 4.1 Υποκατάσταση ορυκτών καυσίμων σε παγκόσμιο επίπεδο	31
Εικόνα 4.2 Συνεισφορά εναλλακτικών καυσίμων	32
Εικόνα 4.3 Συνεισφορά βιομαζικών αποβλήτων	34
Εικόνα 4.4 Χρωματική κατηγοριοποίηση μεθόδων υδρογόνου	36
Εικόνα 4.5 Σχηματική απεικόνιση α) καύσης ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ενέργειας β) δέσμευση μετά την καύση γ) δέσμευση πριν την καύση δ) καύση σε υψηλά επίπεδα συγκέντρωσης οξυγόνου.....	49
Εικόνα 4.6 Τεχνολογίες δέσμευσης μετά την καύση	51
Εικόνα 4.7 Επισκόπηση της αποθήκευσης σε ωκεανούς (IPPC, 2005).....	58
Εικόνα 4.8 Αξιοποίηση εναλλακτικών πρώτων υλών και καυσίμων από την TITAN A.E.	63

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η κλιματική αλλαγή δεν είναι πλέον μια μακρινή απειλή, αλλά σημερινή πραγματικότητα, με εκτεταμένες επιπτώσεις για τα οικοσυστήματα, τις οικονομίες και τις κοινωνίες παγκοσμίως. Η άνοδος της θερμοκρασίας, το λιώσιμο των παγετώνων, τα συχνότερα ακραία καιρικά φαινόμενα και η μετατόπιση των οικοσυστημάτων υπενθυμίζουν την επείγουσα ανάγκη για δράση. Στο επίκεντρο αυτής της κατάστασης βρίσκεται η ανάγκη αντιμετώπισης των εκπομπών άνθρακα που προέρχονται από διάφορους βιομηχανικούς τομείς. Στην Ελλάδα, η βιομηχανία τσιμέντου κατέχει ζωτική θέση στην εθνική οικονομία, με το τσιμέντο Portland να αποτελεί ένα από τα δέκα σημαντικότερα προϊόντα της Ελλάδας βάσει της συνολικής αξίας πωλήσεων (ΕΛΣΤΑΤ, 2023). Δεδομένου ότι ακόμα δεν έχει επιτευχθεί περιβαλλοντική αποσύνδεση του κλάδου, η ζωτικότητα αυτή μεταφράζεται επίσης σε σημαντική συνεισφορά των εκπομπών CO₂ του κλάδου σε εθνικό επίπεδο. Ο κλάδος της τσιμεντοβιομηχανίας αντιμετωπίζει αυξημένες προκλήσεις όσον αφορά την μείωση των εκπομπών όχι μόνο λόγω του πολύ έντονα ενεργειακού του χαρακτήρα αλλά επιπλέον και λόγω των ανθρακικών υλικών που χρησιμοποιούνται για τον σχηματισμό του τελικού προϊόντος και εν τέλει οδηγούν στην σε αύξηση του επιπέδου των εκπομπών, θέτοντας σημαντικούς περιορισμούς στην εφαρμογή αποδοτικών μέτρων. Ως εκ τούτου, η διερεύνηση των βέλτιστων οδών για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της βιομηχανίας τσιμέντου στην Ελλάδα καθίσταται επιτακτική. Μέσα από ολοκληρωμένη βιβλιογραφική έρευνα, αυτή η διπλωματική εργασία επιδιώκει να εντοπίσει και να αναλύσει πιθανές στρατηγικές και μέτρα για τον μετριασμό των εκπομπών CO₂ που σχετίζονται με την παραγωγή τσιμέντου που θα μπορούσαν να εφαρμοστούν σε εθνικό επίπεδο. Εμβαθύνοντας σε υπάρχουσες ακαδημαϊκές μελέτες, εκθέσεις του κλάδου, μελέτες περίπτωσης και βέλτιστες πρακτικές, στόχος είναι να αποκτηθούν επαρκείς γνώσεις σχετικά με αποτελεσματικές προσεγγίσεις για τη μείωση των εκπομπών, διασφαλίζοντας παράλληλα τη συνεχή ανάπτυξη και βιωσιμότητα του κλάδου. Αξιοποιώντας στην συνέχεια τα βιβλιογραφικά δεδομένα και τις πρακτικές που εφαρμόζονται σε παγκόσμιο επίπεδο, αυτή η εργασία θα χρησιμοποιήσει ένα μοντέλο προσαρμοσμένο στα δεδομένα των ελληνικών εταιρειών τσιμέντου για να διερευνήσει πώς τα διάφορα μονοπάτια μετριασμού μπορεί να επηρεάσουν τις εκπομπές CO₂ έως το 2030, ώστε να χαραχθεί μια πορεία προς ένα πιο βιώσιμο και ουδέτερο από άνθρακα μέλλον για την ελληνική βιομηχανία

τιμέντου. Μέσω αυτής της ανάλυσης, φιλοδοξούμε να συμβάλουμε στις συλλογικές προσπάθειες που στοχεύουν στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και την προώθηση της βιώσιμης ανάπτυξης εντός και εκτός της Ελλάδας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ

2.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, θα παρουσιαστεί το παγκόσμιο πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής και θα αναλυθεί το πλαίσιο των διεθνών προσπαθειών για την καταπολέμηση της καθώς και ο ρόλος του συστήματος εμπορίας εκπομπών στη διαμόρφωση βιώσιμων πρακτικών στις βιομηχανίες.

2.2. Τι είναι η κλιματική αλλαγή

Με τον όρο κλιματική αλλαγή περιγράφεται η σταδιακή μεταβολή των κλιματικών συνθηκών στην επιφάνεια της γης, η αλλαγή δηλαδή των μακροπρόθεσμων μοτίβων που εμφανίζουν τα καιρικά φαινόμενα, η θερμοκρασία, η υγρασία, κτλ. Η κλιματική αλλαγή μπορεί να προκληθεί από φυσικά φαινόμενα, εντούτοις, η επιστημονική κοινότητα έχει αναγνωρίσει την ανθρώπινη δραστηριότητα ως βασικό αίτιο και επιταχυντή της αλλαγής του κλίματος που παρατηρείται από τα μέσα του 20ου αιώνα (UN, n.d.).

Η καύση ορυκτών καυσίμων (για παράδειγμα άνθρακα, πετρελαίου, φυσικού αερίου) που συνδέεται με πολυάριθμους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας απελευθερώνει στην ατμόσφαιρα τα λεγόμενα αέρια του θερμοκηπίου. Τα βασικότερα εξ αυτών είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), το μεθάνιο (CH_4), το υποξείδιο του αζώτου (N_2O) και οι φθοροχλωράνθρακες (CFCs). Οι αέρια αυτές εκπομπές παραμένουν στη γήινη ατμόσφαιρα, παγιδεύοντας την ηλιακή ακτινοβολία και οδηγώντας σε αύξηση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια της γης. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται “φαινόμενο του θερμοκηπίου”. Πρόκειται για ένα φαινόμενο ευεργετικό για τη ζωή στη γη, καθώς διατηρεί τη θερμοκρασία σε βιώσιμα για τους έμβιους οργανισμούς επίπεδα. Όταν όμως εντείνεται λόγω των ανθρωπογενών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, οδηγεί σε υπερβολική αύξηση της θερμοκρασίας, τη λεγόμενη “υπερθέρμανση του πλανήτη”, που με τη σειρά της πυροδοτεί μία σειρά δυσμενών φυσικών φαινομένων. Βασικοί τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας που αυξάνουν τη

συγκέντρωση αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα είναι η παραγωγή ενέργειας από ορυκτά καύσιμα για την τροφοδότηση της βιομηχανικής δραστηριότητας, των μεταφορών, τη θέρμανση, την ψύξη και την ηλεκτροδότηση των κτιρίων, αλλά και οι γεωργικές και κτηνοτροφικές δραστηριότητες, καθώς και οι αλλαγές στη χρήση γης, και κυρίως η αποψίλωση δασών (UN, n.d. και NASA, n.d.).

Τα τελευταία 200 χρόνια, η ανθρώπινη δραστηριότητα έχει επιταχύνει καθοριστικά την υπερθέρμανση του πλανήτη και κατ' επέκταση την κλιματική αλλαγή. Ως αποτέλεσμα, η μέση θερμοκρασία της Γης είναι πλέον η θερμότερη που έχει παρατηρηθεί τα τελευταία 100.000 χρόνια, ενώ έχει αυξηθεί κατά 1,1°C σε σχέση με τα προ βιομηχανικής επανάστασης επίπεδα. Λόγω της αύξησης αυτής, στο φυσικό περιβάλλον προκύπτει μία σειρά αλυσιδωτών αντιδράσεων. Έντονες ξηρασίες και λειψυδρία, αύξηση των δασικών πυρκαγιών, λιώσιμο των πάγων της Αρκτικής, άνοδος της στάθμης της θάλασσας και πλημμύρες, αύξηση της θερμοκρασίας των ωκεανών, μείωση της βιοποικιλότητας, αύξηση της συχνότητας των έντονων καιρικών φαινομένων, όπως οι ραγδαίες καταιγίδες και τυφώνες, είναι μεταξύ των σοβαρότερων φαινομένων που πυροδοτούνται. Όπως γίνεται σαφές, τα φαινόμενα αυτά έχουν τέτοιο εύρος και κλίμακα, που ήδη επηρεάζουν έντονα την ανθρώπινη διαβίωση, προκαλώντας καταστροφές στις υποδομές, αναγκάζοντας πληθυσμούς σε μετακίνηση, προκαλώντας επισιτιστική ανασφάλεια και επιβαρύνοντας την υγεία (UN, n.d. και NASA, n.d.).

Στην Ελλάδα, οι συνέπειες της κλιματικής αλλαγής θα είναι ιδιαίτερα έντονες, καθώς μέχρι το 2050 αναμένεται αύξηση των ημερών καύσωνα αλλά και των ημερών υψηλού κινδύνου πυρκαγιάς. Επίσης, οι εκτιμήσεις καταδεικνύουν μείωση των βροχοπτώσεων και αύξηση της συχνότητας των ακραίων καιρικών φαινομένων. Οι αλλαγές αυτές στο κλίμα της χώρας αναπόφευκτα θα επηρεάσουν τις καλλιέργειες, ακόμα και μεταβάλλοντας το είδος των καλλιεργειών που μπορούν να αναπτυχθούν σε ορισμένες περιοχές και εδάφη. Στα μεγάλα αστικά κέντρα, οι θερμοκρασίες αναμένεται να αυξηθούν σημαντικά, οδηγώντας σε αντίστοιχη αύξηση των ενεργειακών αναγκών για ψύξη, ενώ ακόμα και η τουριστική βιομηχανία ενδέχεται να επηρεαστεί λόγω των συχνότερων καυσώνων, της υποβάθμισης του φυσικού περιβάλλοντος και της μείωσης της χιονοδρομικής περιόδου (Γεωργακόπουλος, 2021).

Η αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής περιλαμβάνει δύο βασικές συνιστώσες: αφενός, την προσπάθεια μετριασμού του φαινομένου, μέσω της μείωσης (ή και του μηδενισμού) των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα, μέσα από δράσεις και μετασχηματισμούς όπως η μετάβαση σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αφετέρου, την προσπάθεια αντιμετώπισης των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής και προσαρμογής των πόλεων, της βιομηχανίας, της γεωργίας κτλ. στα νέα δεδομένα. Καθώς και οι δύο αυτές συνιστώσες απαιτούν συντονισμένη δράση αλλά και μεγάλης κλίμακας οικονομικές επενδύσεις, έχει ήδη υπάρξει μία σειρά πρωτοβουλιών και συμφωνιών, τόσο σε θεσμικό επίπεδο, όσο και σε επίπεδο βιομηχανιών, οι οποίες θα παρουσιαστούν συνοπτικά στις επόμενες ενότητες (EEA, 2024a και 2024b).

2.3.Πλαίσιο για την μείωση των εκπομπών

2.3.1. Διεθνές πλαίσιο

Καθώς το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής έχει πλέον λάβει διαστάσεις κρίσης, ενώ η ραγδαία εξέλιξή του έχει γίνει αντιληπτή από την επιστημονική κοινότητα εδώ και δεκαετίες προκαλώντας έντονη ανησυχία, έχει υπάρξει διεθνής κινητοποίηση θεσμικών φορέων, ώστε να δημιουργηθούν πλαίσια δράσης και εφαρμογής μέτρων αντιμετώπισης.

Η σύμβαση- πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για την κλιματική αλλαγή (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) είναι η πρώτη και βασικότερη διεθνής συμφωνία για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και τη δράση για την προστασία του κλίματος της γης. Αποτελεί μία εκ των τριών συνθηκών που συνήφθησαν κατά την παγκόσμια σύνοδο κορυφής του Ρίο για τη Γη το 1992, τέθηκε σε ισχύ το 1994, και έχει υπογραφεί από όλες σχεδόν τις χώρες παγκοσμίως. Βασικός στόχος ήταν η σταθεροποίηση των ανθρακικών εκπομπών σε επίπεδα που θα απέτρεπαν επικίνδυνες ανθρωπογενείς επιπτώσεις στο κλίμα. Σημαντικό σημείο της σύμβασης είναι ότι θέτει το μεγαλύτερο βάρος για τη σταθεροποίηση ή μείωση των εκπομπών στις ήδη βιομηχανοποιημένες, οικονομικά ανεπτυγμένες χώρες, ενώ προβλέπει οικονομική ενίσχυση των αναπτυσσόμενων χωρών για τη χρηματοδότηση δράσεων σχετικών με το κλίμα. Τα μέρη

της σύμβασης συνέρχονται σε ετήσια διεθνή φόρουμ, γνωστά ως «COP» (Conference of the Parties, Διάσκεψη των Μερών), για να αξιολογήσουν την πρόοδό τους και να συζητήσουν σχετικά με τη σύμβαση, την κατάσταση και την περαιτέρω δράση τους (UNFCCC, n.d. και European Council, 2024a).

Με το Πρωτόκολλο του Κιότο, που υιοθετήθηκε το 1997, τέθηκε σε ισχύ το 2005 και έληξε το 2020, ορίστηκαν συγκεκριμένοι, νομικά δεσμευτικοί στόχοι μείωσης των εκπομπών για τις βιομηχανοποιημένες, οικονομικά ανεπτυγμένες χώρες που υπέγραψαν την UNFCCC (UNFCCC, n.d.).

Σε παγκόσμιο επίπεδο, ορόσημο αποτελεί η επίτευξη, το 2015, της Συμφωνίας των Παρισίων, κατά τη διάρκεια της Διάσκεψης των Μερών για το Κλίμα (COP21). Πρόκειται για μία νομικά δεσμευτική διεθνή συνθήκη, στην οποία συμμετέχουν 194 Μέρη (193 κράτη και η Ε.Ε.), και θέτει μακροπρόθεσμους στόχους που αφορούν τον περιορισμό της αύξησης της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη κατά τον 21ο αιώνα στους 2°C, παράλληλα με προσπάθειες για περαιτέρω περιορισμό στον 1,5°C, σε σχέση με τα προ βιομηχανικής επανάστασης επίπεδα. Το σύμφωνο θέτει το πλαίσιο για την μακροπρόθεσμη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, τη συνεργασία μεταξύ των κρατών για την προσαρμογή στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, και την υποστήριξη των αναπτυσσόμενων χωρών από τα πλουσιότερα κράτη στην προσπάθεια αυτή. Τα κράτη που συμμετέχουν στη συμφωνία καλούνται να υποβάλλουν πενταετή εθνικά σχέδια δράσης για το κλίμα, τις λεγόμενες εθνικά καθορισμένες συνεισφορές, ΕΚΣ (NDCs: nationally determined contributions), με ολοένα πιο φιλόδοξη στοχοθεσία μείωσης εκπομπών, και με αξιολόγηση του βαθμού επίτευξης των στόχων. Ταυτόχρονα, τα κράτη που συμμετέχουν στη συμφωνία ενθαρρύνονται να καταρτίσουν μακροπρόθεσμες στρατηγικές ανάπτυξης χαμηλών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (long-term greenhouse gas emission development strategies, LT-LEDS), θέτοντας προτεραιότητες για το μέλλον (UNFCCC, n.d. και UN, n.d.).

Για την αξιολόγηση της προόδου κάθε κράτους, έχει θεσπιστεί επίσης ένα πλαίσιο ενισχυμένης διαφάνειας (enhanced transparency framework, ETF). Σύμφωνα με αυτό, οι χώρες καλούνται να γνωστοποιούν τις δράσεις που πραγματοποίησαν και την πρόοδό τους στο μετριασμό της κλιματικής αλλαγής, τα μέτρα προσαρμογής, και την υποστήριξη που έλαβαν ή προσέφεραν. Το 2023 θα πραγματοποιηθεί ο πρώτος παγκόσμιος απολογισμός

(global stocktake), που θα αξιολογήσει τη συλλογική πρόοδο προς τους στόχους της Συμφωνίας.

Η Ε.Ε. προκειμένου να πετύχει τους στόχους αλλά και να εκπληρώσει τις υποχρεώσεις που ορίζει η Συμφωνία του Παρισιού, υπέβαλε το 2020 τη μακροπρόθεσμη στρατηγική της για μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, καθώς και τα σχέδιά της για το κλίμα. Συγκεκριμένα δεσμεύτηκε, στο πλαίσιο της στρατηγικής της, να μειώσει τις εκπομπές της κατά τουλάχιστον 55% σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990, έως το 2030. Ταυτόχρονα, τα κράτη-μέλη της Ε.Ε. στοχεύουν στο να καταστήσουν την ευρωπαϊκή οικονομία και κοινωνία κλιματικά ουδέτερη μέχρι το 2050.

Για την επίτευξη του πρώτου στόχου, της νομικής δηλαδή δέσμευσης για μείωση των εκπομπών κατά 55% μέχρι το 2030, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή υιοθέτησε το 2021 μία σειρά προτεινόμενων πολιτικών, το πακέτο “Fit for 55”, που στοχεύει στην ανανέωση της νομοθεσίας της Ε.Ε. και την υλοποίηση νέων πρωτοβουλιών. Συνοπτικά, στο πακέτο “Fit for 55” περιλαμβάνονται (European Council, 2023a, European Council, 2023b, European Council, 2023c και European Commission, 2021):

- Αλλαγές στην αγορά ανθρακικών εκπομπών της Ε.Ε., το σύστημα EU ETS, για το οποίο θα γίνει εκτενέστερη αναφορά στη συνέχεια. Προβλέπεται μεταξύ άλλων η επέκταση του συστήματος σε άλλους τομείς, η ταχύτερη μείωση του συνολικού αριθμού δικαιωμάτων εκπομπών, και ειδικές προβλέψεις για τον τομέα της αεροπορίας.
- Δημιουργία ενός ξεχωριστού συστήματος ανταλλαγής εκπομπών για τομείς όπως τα κτίρια και οι μεταφορές, των οποίων η απανθρακοποίηση εμφανίζει δυσκολίες, με εφαρμογή από το 2027. Συνοδευτικά, δημιουργία του Κοινωνικού Ταμείου για το Κλίμα, που στοχεύει στην υποστήριξη και τις επενδύσεις προς όφελος των νοικοκυριών, των πολύ μικρών επιχειρήσεων, και των χρηστών μέσων μεταφοράς, προκειμένου να απορροφηθεί η αύξηση κόστους που θα προκύψει από την εφαρμογή ενός συστήματος δικαιωμάτων ανθρακικών εκπομπών.
- Ο μηχανισμός συνοριακής προσαρμογής άνθρακα (CBAM: Carbon Border Adjustment Mechanism), που σκοπεύει να αποτρέψει την αναίρεση των προσπαθειών μείωσης των εκπομπών της Ε.Ε. λόγω της μετατόπισης της παραγωγικής διαδικασίας

σε χώρες εκτός των συνόρων της και της αντίστοιχης αύξησης των εκπομπών από μη ευρωπαϊκές χώρες. Βασικός στόχος του μηχανισμού, που δρα συμπληρωματικά στο σύστημα EU ETS, είναι τα εισαγόμενα προϊόντα υψηλών ανθρακούχων εκπομπών.

- Την αύξηση του συνολικού στόχου μείωσης των εκπομπών της Ε.Ε., αλλά και των αντίστοιχων εθνικών στόχων, στους τομείς των οδικών μεταφορών, των κτιρίων, της γεωργίας, της διαχείρισης απορριμμάτων και των μικρών βιομηχανικών εγκαταστάσεων, από 29% σε 40% μέχρι το 2030, σε σχέση με το 2005, στο πλαίσιο της αναθεώρησης του κανονισμού για τον επιμερισμό των προσπαθειών (“effort sharing regulation”).
- Την αναθεώρηση μιας σειράς κανονισμών και οδηγιών, με στόχο τη θέσπιση πιο φιλόδοξων στόχων. Ενδεικτικά, του κανονισμού για τη χρήση γης, την αλλαγή χρήσης γης και τη δασοπονία (land use, land use change and forestry regulation, LULUCF), της οδηγίας για την ανανεώσιμη ενέργεια, της οδηγίας για την ενεργειακή αποδοτικότητα, της οδηγίας για την ενεργειακή αποδοτικότητα των κτιρίων.
- Τη δημιουργία υποδομών για την παροχή εναλλακτικών καυσίμων, τόσο για οχήματα όσο και για πλοία, την εισήγηση οδηγίας για τη χρήση ανανεώσιμων καυσίμων χαμηλού ανθρακικού αποτυπώματος στη ναυτιλία, η οποία εξακολουθεί να βασίζεται σχεδόν εξ ολοκλήρου σε ορυκτά καύσιμα, αλλά και την προώθηση βιώσιμων αεροπορικών καυσίμων.
- Τέλος, το πακέτο Fit for 55 περιλαμβάνει προτάσεις για νέους κανόνες αναφορικά με τις εκπομπές μεθανίου στον τομέα παραγωγής ενέργειας.

2.3.2. Σύστημα εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπών

Το Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών (Σ.Ε.Δ.Ε.) της Ε.Ε. (EU Emissions Trading System – EU ETS) αποτελεί τη μεγαλύτερη αγορά εκπομπών άνθρακα παγκοσμίως. Ξεκίνησε να λειτουργεί το 2005, με στόχο την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής και τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου με οικονομικά αποδοτικό τρόπο. Το Σ.Ε.Δ.Ε. καλύπτει περισσότερες από 10.000 εγκαταστάσεις και περίπου το 40% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στην Ε.Ε. Εφαρμόζεται σε όλα κράτη μέλη της Ε.Ε., στην Ισλανδία, το

Λιχτενστάιν και τη Νορβηγία, καθώς και στη Βόρεια Ιρλανδία σε ό,τι αφορά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Υπόχρεες είναι ενεργοβόρες βιομηχανίες και ηλεκτροπαραγωγικοί σταθμοί, καθώς και αεροπορικές εταιρείες που πραγματοποιούν πτήσεις εντός του Ευρωπαϊκού Οικονομικού Χώρου, αλλά και πτήσεις με προορισμό το Ηνωμένο Βασίλειο και την Ελβετία. Από το 2024, το Σ.Ε.Δ.Ε. καλύπτει και τις εκπομπές από θαλάσσιες μεταφορές, αλλά και μεγάλες εγκαταστάσεις αποτέφρωσης αστικών αποβλήτων.

Βασική λειτουργία του Σ.Ε.Δ.Ε. είναι η θέσπιση μιας μέγιστης ποσότητας επιτρεπόμενων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου για το σύνολο των υπόχρεων εγκαταστάσεων. Το όριο αυτό μειώνεται κάθε χρόνο, προκειμένου να εξασφαλιστεί η μείωση των εκπομπών και η επίτευξη των κλιματικών στόχων της Ε.Ε. Με τη σταδιακή μείωση του ορίου εκπομπών, αναμένεται περιορισμός των εκπομπών κατά 62% έως το 2030, σε σύγκριση με το 2005.

Στις υπόχρεες εταιρείες απονέμονται δωρεάν δικαιώματα εκπομπών, κάθε ένα από τα οποία τους επιτρέπει την εκπομπή ενός τόνου ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα (CO₂eq). Το πλήθος δωρεάν δικαιωμάτων που θα λάβει μία εγκατάσταση εξαρτάται από μια σειρά κριτηρίων, όπως οι επιδόσεις άλλων εταιρειών του τομέα και οι ιστορικές εκπομπές της εγκατάστασης. Για την πρόσβαση στα δωρεάν δικαιώματα μπορεί να ισχύουν προϋποθέσεις, ανάλογα με τον τύπο της εγκατάστασης. Για παράδειγμα, προϋπόθεση μπορεί να αποτελεί η διεξαγωγή ενεργειακών ελέγχων, ή η ύπαρξη σχεδίου επίτευξης κλιματικής ουδετερότητας. Τόσο για τον κλάδο της αεροπλοΐας, όσο και για ορισμένους βιομηχανικούς τομείς, συμπεριλαμβανομένης της τσιμεντοβιομηχανίας, προβλέπεται σταδιακή κατάργηση της πρόσβασης σε δωρεάν δικαιώματα εκπομπών, ενώ έχει καταργηθεί ήδη από το 2013 για τον ηλεκτροπαραγωγικό τομέα.

Καθώς οι υπόχρεες εταιρείες υποχρεούνται κάθε χρόνο να παραδίδουν και να ακυρώνουν ισάριθμο αριθμό δικαιωμάτων με τους τόνους των εκπομπών τους, τα δικαιώματα αποτελούν αντικείμενο συναλλαγών: οι εταιρείες αγοράζουν δικαιώματα για να καλύψουν τις πλεονάζουσες εκπομπές τους, ή, αν μία εταιρεία επιτύχει μείωση των εκπομπών της, εξοικονομεί δικαιώματα τα οποία μπορεί να πουλήσει ή να κρατήσει για μελλοντική χρήση. Μέσω της αγοραπωλησίας δικαιωμάτων εκπομπών, το Σ.Ε.Δ.Ε. έχει παράξει έσοδα της τάξης των 152 δις ευρώ. Τα έσοδα από το Σ.Ε.Δ.Ε. τροφοδοτούνται σε κρατικά και ευρωπαϊκά ταμεία, προκειμένου να χρηματοδοτήσουν την ανάπτυξη τεχνολογιών μείωσης των εκπομπών και την ενεργειακή μετάβαση.

Αρχής γενομένης το 2025, οπότε και θα ξεκινήσει η φάση παρακολούθησης και καταγραφής των εκπομπών, στην Ε.Ε. θα τεθεί σε λειτουργία ένα επιπλέον σύστημα εμπορίας ρύπων, το ETS 2. Το ETS 2 θα καλύπτει εκπομπές από καύση καυσίμων σε κτίρια, οδικές μεταφορές και άλλους τομείς, κυρίως μικρές βιομηχανίες που δεν καλύπτονται από το τρέχον Σ.Ε.Δ.Ε., και θα αφορά τους προμηθευτές, παρά τους καταναλωτές, των καυσίμων αυτών. Το ETS 2 θα τεθεί σε πλήρη λειτουργία μέχρι το 2027, ενώ μέρος των εσόδων του προβλέπεται ότι θα διοχετεύονται προς το Κοινωνικό Ταμείο για το Κλίμα (Social Climate Fund) (European Commission, n.d.).

Στην Ελλάδα, την καταγραφή της εκχώρησης, κατοχής, μεταβίβασης και ακύρωσης δικαιωμάτων έχει αναλάβει το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, και συγκεκριμένα το Τμήμα Μηχανισμών Αγοράς και Μητρώου Εκπομπών της Διεύθυνσης Κλιματικής Αλλαγής και Ποιότητας της Ατμόσφαιρας (ΥΠΕΝ, n.d.).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Ο ΚΛΑΔΟΣ ΤΗΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

3.1.Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται για πρώτη φορά αναφορά στον κλάδο της τσιμεντοβιομηχανίας και της σύνδεσης της με το παγκόσμιο πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής. Αρχικά πραγματοποιείται λεπτομερής επισκόπηση της πολυσταδιακής και σύνθετης παραγωγικής διαδικασίας του τσιμέντου και στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που προέρχονται από αυτήν. Ακολουθεί παράθεση των πρωτοβουλιών που λαμβάνει ο κλάδος σε παγκόσμιο και ευρωπαϊκό επίπεδο για την απανθρακοποίηση ενώ κλείνει με την παρουσίαση των ελληνικών τσιμεντοβιομηχανιών, θέτοντας το έδαφος για την ολοκληρωμένη ανάλυση των στρατηγικών και μέτρων για την μείωση των εκπομπών στην ελληνική τσιμεντοβιομηχανία, που θα παρουσιαστεί στα επόμενα κεφάλαια.

3.2.Παραγωγική διαδικασία

Το τσιμέντο είναι ένα λεπτόκοκκο βιομηχανικό υλικό γκριζου χρωματισμού, που χρησιμοποιείται ευρέως στον κατασκευαστικό τομέα. Πρόκειται για ένα συνδετικό υλικό με υδραυλικές ιδιότητες, το οποίο σημαίνει ότι με την προσθήκη νερού αρχικά σχηματίζει μία πάστα που στη συνέχεια σκληραίνει. Το τσιμέντο χρησιμοποιείται κατά βάση ως συστατικό του σκυροδέματος, το οποίο προκύπτει από την ανάμειξη του τσιμέντου με νερό και αδρανή (άμμο, χαλίκια, θρυμματισμένες πέτρες, ανακυκλωμένο σκυρόδεμα) και ανά περιπτώσεις με μικρή ποσότητα πρόσθετων. Τα αδρανή επιλέγονται ανάλογα με τις εφαρμογές για τις οποίες θα χρησιμοποιηθεί το σκυρόδεμα, και αποτελούν το 60-70% του μίγματος. Το τσιμέντο, ως συνδετικό υλικό, αξιοποιείται κυρίως για την συνένωση των λεπτών και χονδρών αδρανών, και χάρη στις ιδιότητές του προσδίδει στο σκυρόδεμα μεγάλη αντοχή σε φορτία και σταθερότητα σε πλήθος περιβαλλοντικών συνθηκών (CEMBUREAU, n.d.). Στον Πίνακα

3.1 αναγράφονται τα προϊόντα, στην παραγωγή των οποίων χρησιμοποιείται το τσιμέντο (HCIA, n.d.).

Πίνακας 3.1 Προϊόντα με βάση το τσιμέντο

Προϊόν τσιμέντου	Σύσταση
Σκυρόδεμα / μπετόν	τσιμέντο, άμμος, χαλίκια, νερό
Οπλισμένο σκυρόδεμα / μπετόν	σκυρόδεμα, χαλύβδινες ράβδοι / πλέγμα
Τσιμεντοκονίαμα	τσιμέντου, άμμος, νερό
Συνδετικά υλικά (κόλλες)	τσιμέντο, λεπτόκοκκα αδρανή
Άλλα δομικά υλικά	τσιμεντόλιθοι, σωλήνες, προκατασκευασμένα στοιχεία, κ.ά.

Το κλίνκερ είναι ένα βιομηχανικό υλικό που παράγεται από ασβεστολιθικά, αργιλοπυριτικά και άλλα υλικά μέσω χημικών διεργασιών που πραγματοποιούνται σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 1200°C, κατά το πιο ενεργοβόρο στάδιο της τσιμεντοβιομηχανίας, το οποίο ονομάζεται έψηση.

Υπάρχουν διαφορετικά είδη τσιμέντου ανάλογα με την σύνθεση και τη αντοχή τους (Πίνακας 3.2) σύμφωνα με τον κανονισμό EN 197-1:2011 (CEN, EN 197-1: 2011). Τα διαφορετικά συστατικά που μπορεί να υπάρχουν στο μίγμα προσδίδουν και διαφορετικές ιδιότητες στο τσιμέντο επιτυγχάνοντας έτσι την χρήση τους σε μεγάλο εύρος εφαρμογών.

Πίνακας 3.2 Τύποι τσιμέντου βάσει του κανονισμού EN 197-1:2011

Main types	Notation of the 27 products (types of common cement)		Composition (percentage by mass ^a)										Minor additional constituents		
			Main constituents												
			Clinker	Blast-furnace slag	Silica fume	Pozzolana		Fly ash		Burnt shale	Limestone				
						natural	natural calcined	siliceous	calcareous		L	LL			
K	S	D ^b	P	Q	V	W	T	L	LL						
CEM I	Portland cement	CEM I	95-100	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5	
	Portland-slag cement	CEM II/A-S	80-94	6-20	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5	
CEM II	Portland-silica fume cement	CEM II/B-S	65-79	21-35	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5	
	Portland-pozzolana cement	CEM II/A-D	90-94	–	6-10	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5
		CEM II/A-P	80-94	–	–	6-20	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5
		CEM II/B-P	65-79	–	–	21-35	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	–	–	–	6-20	–	–	–	–	–	–	–	0-5
	Portland-fly ash cement	CEM II/B-Q	65-79	–	–	–	21-35	–	–	–	–	–	–	–	0-5
		CEM II/A-V	80-94	–	–	–	–	6-20	–	–	–	–	–	–	0-5
		CEM II/B-V	65-79	–	–	–	–	21-35	–	–	–	–	–	–	0-5
		CEM II/A-W	80-94	–	–	–	–	–	6-20	–	–	–	–	–	0-5
		CEM II/B-W	65-79	–	–	–	–	–	21-35	–	–	–	–	–	0-5
		Portland-burnt shale cement	CEM II/A-T	80-94	–	–	–	–	–	–	6-20	–	–	–	–
	CEM II/B-T		65-79	–	–	–	–	–	–	21-35	–	–	–	–	0-5
	Portland-limestone cement	CEM II/A-L	80-94	–	–	–	–	–	–	–	6-20	–	–	–	0-5
		CEM II/B-L	65-79	–	–	–	–	–	–	–	21-35	–	–	–	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	–	–	–	–	–	–	–	–	6-20	–	–	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	–	–	–	–	–	–	–	–	21-35	–	–	0-5
	Portland-composite cement ^c	CEM II/A-M	80-88	<----- 12-20 ----->										0-5	
		CEM II/B-M	65-79	<----- 21-35 ----->										0-5	
CEM III	Blast furnace cement	CEM III/A	35-64	36-65	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5
CEM IV	Pozzolanic cement ^c	CEM IV/A	65-89	–	<----- 11-35 ----->					–	–	–	–	0-5	
		CEM IV/B	45-64	–	<----- 36-55 ----->					–	–	–	–	0-5	
CEM V	Composite cement ^c	CEM V/A	40-64	18-30	–	<----- 18-30 ----->			–	–	–	–	–	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-49	–	<----- 31-49 ----->			–	–	–	–	–	0-5	

^a The values in the table refer to the sum of the main and minor additional constituents.

^b The proportion of silica fume is limited to 10 %.

^c In Portland-composite cements CEM II/A-M and CEM II/B-M, in pozzolanic cements CEM IV/A and CEM IV/B and in composite cements CEM V/A and CEM V/B the main constituents other than clinker shall be declared by designation of the cement (for examples, see Clause 8).

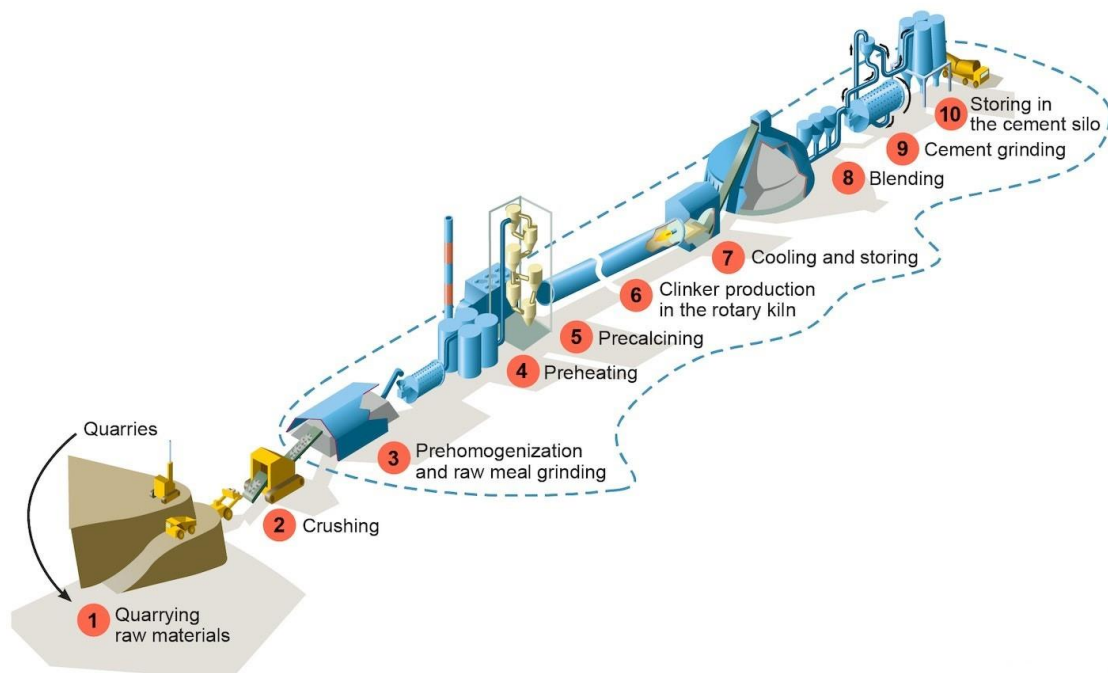
Το τσιμέντο και το σκυρόδεμα είναι το δεύτερο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό παγκοσμίως, μετά το πόσιμο νερό (Schlorke et al., 2020). Επομένως είναι φυσικό η παγκόσμια αγορά τσιμέντου να είναι ιδιαίτερα ανεπτυγμένη, με παραγωγικότητα περίπου 4.1 δις τόνους ετησίως (στοιχεία 2022) και την αξία της να εκτιμάται στα 326 δις δολάρια (στοιχεία 2021). Πέντε χώρες, η Κίνα (παραγωγή 2022: 2 δις τόνοι), η Ινδία (παραγωγή 2022: 370 εκ. τόνοι), το Βιετνάμ, οι ΗΠΑ και η Ινδονησία παράγουν το 75% του τσιμέντου παγκοσμίως. Τέλος, τσιμεντοβιομηχανία, καθ' όλο το μήκος της αλυσίδας αξίας της, συνεισφέρει στο 5.4% του διεθνούς Α.Ε.Π., και στο 7.7% της απασχόλησης παγκοσμίως (Statista, 2023 και Schlorke et al., 2020). Η αύξηση του πληθυσμού και η αστικοποίηση αναμένεται να οδηγήσει σε αύξηση της ζήτησης τσιμέντου τα επόμενα χρόνια, λόγω των αυξημένων κατασκευαστικών αναγκών που θα προκύψουν. Μία ακόμα διεθνώς

παρατηρούμενη τάση είναι η στροφή προς τις βιώσιμες, “πράσινες” κατασκευές, με αποτέλεσμα τη στροφή προς πρώτες ύλες μειωμένου περιβαλλοντικού αποτυπώματος.

Στην Ε.Ε., τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μείωση της παραγωγής τσιμέντου και αύξηση των αντίστοιχων εισαγωγών, παρόλο που στο πλαίσιο του EU ETS χορηγούνται δωρεάν δικαιώματα εκπομπών στην τσιμεντοβιομηχανία.

Στην Ελλάδα, όπου η βασική πρώτη ύλη του τσιμέντου, ο ασβεστόλιθος, βρίσκεται σε αφθονία, η παραγωγή τσιμέντου αποτελεί μία από τις βασικότερες βιομηχανικές δραστηριότητες, με δυναμικότητα 15 εκ. τόνων. Για το 2021, η παραγωγή φαιού τσιμέντου ανήλθε στους 7 εκ. τόνους, εκ των οποίων 4.1 εκ τόνοι εξήχθησαν σε τρίτες χώρες, κυρίως προς τις ΗΠΑ και την Ευρώπη (HCIA, n.d.).

Το συνηθέστερο σύγχρονο τσιμέντο είναι το κοινό τσιμέντο Portland (OPC: Ordinary Portland Cement), το οποίο κυκλοφορεί στην αγορά σε διαφορετικούς τύπους αλλά και διαφορετικές κατηγορίες βάσει αντοχής. Βασικό υλικό του OPC είναι το κλίνκερ, ένα ενδιάμεσο προϊόν της τσιμεντοβιομηχανίας που παράγεται από χημικές διεργασίες σε ασβεστολιθικά και αργιλοπυριτικά πετρώματα μέσω της διεργασίας της έψησης, σε θερμοκρασίες που φτάνουν του 1450-1500°C. Τα στάδια παραγωγής του κλίνκερ και του τσιμέντου απεικονίζονται σχηματικά στην εικόνα που ακολουθεί:



Εικόνα 3.1 Στάδια Παραγωγής Τσιμέντου (IEA, 2021)

Αναλυτικότερα, η παραγωγή του τσιμέντου πραγματοποιείται στα εξής στάδια (Τσίμας & Τσιβιλής, 2010 και CEMBUREAU, n.d.):

1. Εξόρυξη & μεταφορά πρώτων υλών: Τα εργοστάσια παραγωγής τσιμέντου τοποθετούνται συνήθως κοντά σε φυσικά ασβεστολιθικά κοιτάσματα, ώστε η λατόμευση της απαραίτητης πρώτης ύλης, του ασβεστόλιθου, να γίνεται ευκολότερα και με χαμηλότερη οικονομική αλλά και περιβαλλοντική επιβάρυνση. Πέραν του ασβεστόλιθου, που περιέχει ανθρακικό ασβέστιο, CaCO_3 , και χρησιμοποιείται σε ποσοστό 80% για την παραγωγή του κλίνκερ, κατά περίπτωση χρησιμοποιούνται σε μικρότερες ποσότητες κι άλλες ορυκτές ή ανόργανες πρώτες ύλες, όπως αργιλοπυριτικά πετρώματα (π.χ. βωξίτης, σχιστόλιθος), ή σιδηρομεταλλεύματα (π.χ. καλαμίνα) που περιέχουν απαραίτητα συστατικά όπως οξειδία του σιδήρου (Fe_2O_3), αλούμινα (Al_2O_3) και διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) και δρουν ως διορθωτικές ύλες. Η εξόρυξη πραγματοποιείται με χρήση εκρηκτικών υλών για τα πιο σκληρά υλικά όπως είναι ο ασβεστόλιθος, και με εκσκαφείς για τα πιο μαλακά υλικά όπως τα οξειδία του αργίλου. Η μεταφορά των πρώτων υλών μπορεί να γίνει είτε με μεταφορικές ταινίες - κυρίως για υλικά που εξορύσσονται από λατομεία πλησίον της τσιμεντοβιομηχανίας- είτε με φορτηγά και πλοία. Στην Ελλάδα πολλές μονάδες βρίσκονται παραθαλάσσια ώστε να διευκολύνεται η θαλάσσια μεταφορά.

2. Θραύση: Οι πρώτες ύλες, κατά βάση τα ασβεστολιθικά και αργιλικά πετρώματα, μετά τη λατόμευση μεταφέρονται αρχικά στους θραυστήρες, όπου σπάνε σε κομμάτια των 10 εκατοστών.

3. Ανάμιξη & άλεση πρώτων υλών: Η περαιτέρω λειοτρίβηση των πρώτων υλών σε μύλους παράγει τη λεγόμενη “φαρίνα” (raw meal). Ο στενός έλεγχος της χημικής σύστασης της φαρίνας αλλά και των πρώτων υλών είναι απαραίτητος για την εξασφάλιση ενός τελικού προϊόντος υψηλής ποιότητας.

Η άλεση της φαρίνας μπορεί να είναι είτε υγρή, είτε ξηρή, χαρακτηρισμός που προκύπτει από το περιεχόμενο των υλικών σε υγρασία. Πλέον, η υγρή άλεση έχει εγκαταλειφθεί, λόγω των υψηλών ενεργειακών απαιτήσεών της,

4. Προθέρμανση: Η προθέρμανση της φαρίνας είναι μία διαδικασία που προηγείται της έψησης και πραγματοποιείται μέσω της ανάκτησης της θερμικής ενέργειας των καυσαερίων που εξέρχονται από τον κλίβανο. Στο στάδιο αυτό η φαρίνα θερμαίνεται στους 900°C

περίπου, προκειμένου να μειωθεί το ποσοστό υγρασίας του μίγματος και διευκολυνθεί η διαδικασία της έψησης. Οι προθερμαντήρες αποτελούνται από σειρές κυκλώνων, από τους οποίους η φαρίνα και τα θερμά καυσαέρια διέρχονται προς αντίθετες κατευθύνσεις. Το πλήθος των κυκλώνων εξαρτάται από το ποσοστό υγρασίας της πρώτης ύλης και τις ανάγκες ανάκτησης θερμότητας, και μπορεί να φτάνουν τα 6 στάδια, με αυξανόμενη ανάκτηση σε κάθε επόμενο στάδιο.

5. Προασβεστοποίηση: Ασβεστοποίηση ονομάζεται η διεργασία μετατροπής του ασβεστόλιθου (CaCO_3) σε ασβέστη (οξείδιο του ασβεστίου, CaO) σε υψηλές θερμοκρασίες, και είναι ο βασικός μετασχηματισμός που πραγματοποιείται κατά την παραγωγή του κλίνκερ. Ο ασβέστης στη συνέχεια αντιδρά με άλλα συστατικά της φαρίνας σχηματίζοντας νέες ανόργανες ενώσεις, που συνολικά ονομάζονται κλίνκερ. Τμήμα της διαδικασίας αυτής λαμβάνει χώρα στον προασβεστοποιητή (precalciner). Πρόκειται για έναν θάλαμο καύσης τοποθετημένο εν μέρει στην κορυφή και εν μέρει στο εσωτερικό του κλιβάνου. Κατά το στάδιο αυτό, πραγματοποιείται η χημική αποσύνθεση του ασβεστόλιθου, που είναι υπεύθυνη για περίπου 60% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου της διαδικασίας παραγωγής τσιμέντου.

6. Έψηση / Συνεπεξεργασία: Η παραγωγή του κλίνκερ λαμβάνει χώρα σε περιστροφικό κλίβανο, έναν μεταλλικό σωλήνα καλυμμένο με πλίνθους, πλάτους 3-5 μέτρων και μήκους 30-60 μέτρων, που εκτελεί 3-5 περιστροφές το λεπτό και τροφοδοτείται με καύσιμα που καίγονται στους 2000°C . Η φαρίνα εισέρχεται στον κλίβανο σε θερμοκρασία περίπου 1000°C , και μετακινείται προς τον πυθμένα, όπου βρίσκεται και η φλόγα, περνώντας σταδιακά σε ζώνες ολοένα υψηλότερης θερμοκρασίας, φτάνοντας τους 1450°C . Οι υψηλές θερμοκρασίες προκαλούν μερική τήξη της φαρίνας και μετατροπή της σε κλίνκερ, που αποτελείται από σφαιρίδια διαμέτρου 10-25 χιλιοστών. Η έψηση είναι το πλέον ενεργοβόρο παραγωγικό στάδιο της τσιμεντοβιομηχανίας.

Η συνεπεξεργασία είναι μία τεχνική που χρησιμοποιείται κατά την παραγωγή τσιμέντου για την ανάκτηση ενέργειας και υλικών από απόβλητα. Συγκεκριμένα, κατά τη συνεπεξεργασία τα οργανικά συστατικά των αποβλήτων υπόκεινται σε θερμική διεργασία και αξιοποιούνται ως καύσιμα, ενώ τα ανόργανα στοιχεία μετατρέπονται σε συστατικά του κλίνκερ, σε μία διεργασία που εξοικονομεί ορυκτά καύσιμα, πρώτες ύλες, και αφήνει μηδενικά απόβλητα.

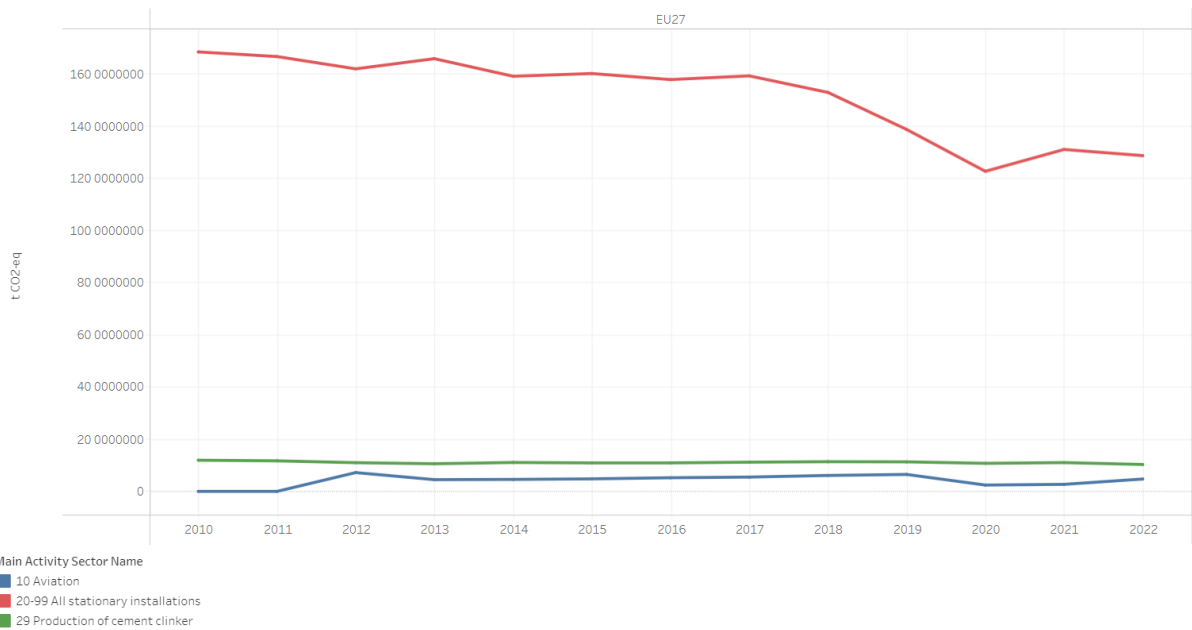
7. Ψύξη & αποθήκευση: Το κλίνκερ στη συνέχεια ψύχεται στους 100-200°C, σε μεγάλες ποσότητες αέρα, που κατόπιν χρησιμοποιούνται εν μέρει ως αέρας καύσης. Η διαδικασία της ψύξης είναι απαραίτητη για το σχηματισμό των ανόργανων συστατικών του, που καθορίζουν τις ιδιότητες του τσιμέντου.

8. Άλεση τσιμέντου: Το κλίνκερ συνήθως αξιοποιείται στις εγκαταστάσεις παραγωγής του, αλλά ενδέχεται να μεταφερθεί σε βιομηχανικές μονάδες άλεσης. Σε κάθε περίπτωση, για την παραγωγή του τσιμέντου το κλίνκερ αλέθεται με γύψο σε ποσοστό 4-5% σε κοκκομετρία μικρότερη των 90 μm, προσθήκη που βοηθά στον καλύτερο έλεγχο του χρόνου σκλήρυνσης του τσιμέντου. Στο κλίνκερ μπορεί να προστεθούν άλλα ανόργανα υλικά, προς δημιουργία άλλων ειδών τσιμέντου, όπως τα Portland Composite Cement (PCC). Επίσης, προκειμένου να επιτευχθεί περιορισμός των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, μέρος του κλίνκερ αντικαθίσταται από άλλα ανόργανα υλικά, όπως σκωρία, ιπτάμενη τέφρα, ασβεστόλιθο.

9. Αποθήκευση / Συσκευασία: Το τελικό προϊόν της παραπάνω διαδικασίας, το τσιμέντο, αποθηκεύεται σε σιλό, και κατόπιν διοχετεύεται στην αγορά, συσκευασμένο ή χύδην.

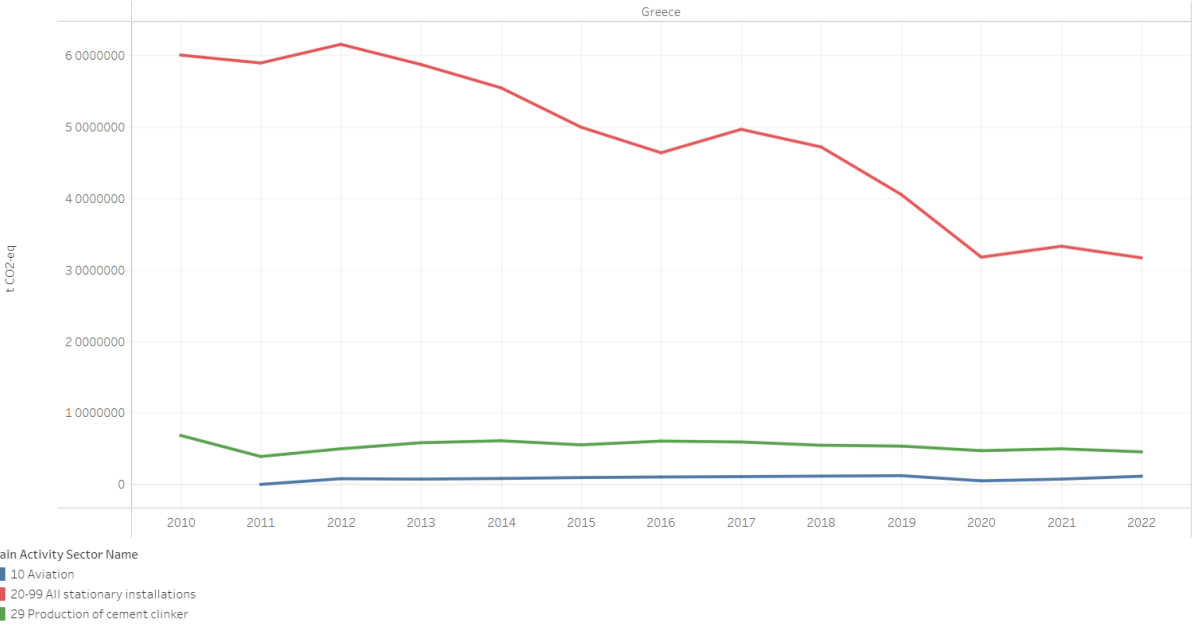
3.3. Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου

Η τσιμεντοβιομηχανία αποτελεί μία από τις βασικότερες πηγές εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου παγκοσμίως, κυρίως λόγω της διεργασίας της έψησης. Η θέρμανση των κλιβάνων είναι ιδιαίτερα απαιτητική ενεργειακά ώστε να επιτευχθούν τα κατάλληλα επίπεδα θερμοκρασιών. Ενδεικτικά, το 2021, οι παγκόσμιες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από την παραγωγή τσιμέντου ανήλθαν στους 1,7 δις τόνους διοξειδίου του άνθρακα. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, οι συνολικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από την παραγωγή κλίνκερ για το ίδιο έτος ανήλθαν στους 103,0 εκ. τόνους ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα. Πρόκειται για ιδιαίτερα υψηλές εκπομπές, αν αναλογιστεί κανείς ότι οι εκπομπές από την παραγωγή κλίνκερ ξεπερνούν τις εκπομπές από την αεροπλοΐα (47,3 εκ. τόνοι ισοδύναμου CO₂ το 2022), και ισούται με περισσότερο από το 1/10 των συνολικών εκπομπών των βιομηχανικών εγκαταστάσεων (509,5 εκ. τόνοι ισοδύναμου CO₂ το 2022) (EEA, 2023).



Διάγραμμα 3.1 Διαχρονική εξέλιξη (2010-2022) εκπομπών EU ETS για την Ευρωπαϊκή Ένωση

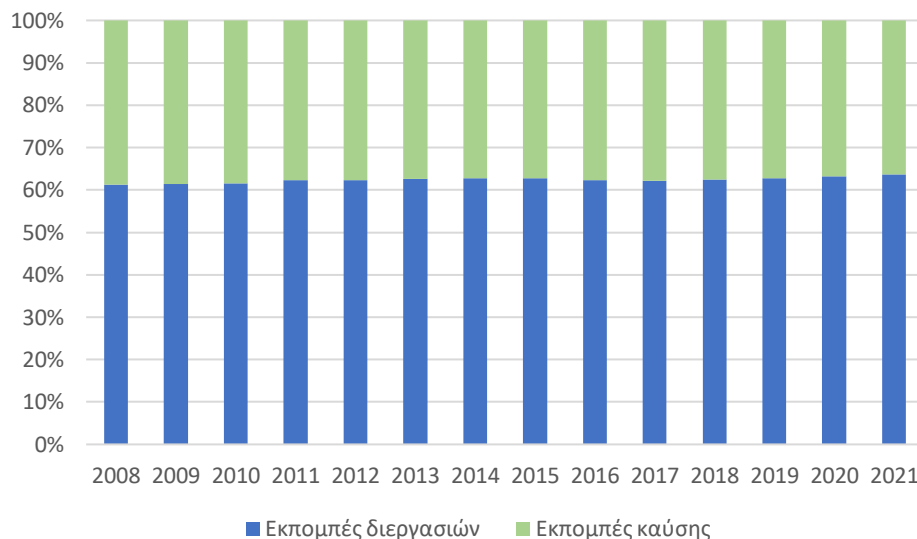
Στην Ελλάδα, οι τάσεις που παρατηρούνται είναι παρόμοιες. Συγκεκριμένα, οι εκπομπές από την παραγωγή κλίνκερ άγγιξαν το 2022 τους 4,5 εκ. τόνους ισοδύναμου CO₂, ενώ το σύνολο των εκπομπών από τις βιομηχανικές εγκαταστάσεις ανήλθε στους 31,6 εκ. τόνους.



Διάγραμμα 3.2 Διαχρονική εξέλιξη (2010-2022) εκπομπών EU ETS για την Ελλάδα

Οι εκπομπές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο βασικές ομάδες, τις εκπομπές διεργασιών και τις εκπομπές καύσης. Στο Διάγραμμα 3.3 παρουσιάζεται η συνεισφορά των

εκπομπών καύσης και εκπομπών διεργασιών για τις Ελληνικές τσιμεντοβιομηχανίες, όπως προκύπτουν από τα επαληθευμένα στοιχεία του EU ETS κατά την περίοδο 2008 έως 2021 (EEA, 2023). Από το διάγραμμα προκύπτει ότι η σχέση των δύο πηγών εκπομπής είναι περίπου 60% και 40% με το μεγαλύτερο ποσοστό να οφείλεται στις εκπομπές διεργασιών.



Διάγραμμα 3.3 Συνεισφορά εκπομπών καύσης και διεργασιών από την τσιμεντοβιομηχανία (2008-2021)

Η διάκριση μεταξύ εκπομπών καυσίμων και εκπομπών διεργασιών είναι ζωτικής σημασίας για την κατανόηση των πηγών εκπομπών και την εφαρμογή στρατηγικών μείωσης των εκπομπών.

3.3.1. Εκπομπές καύσης

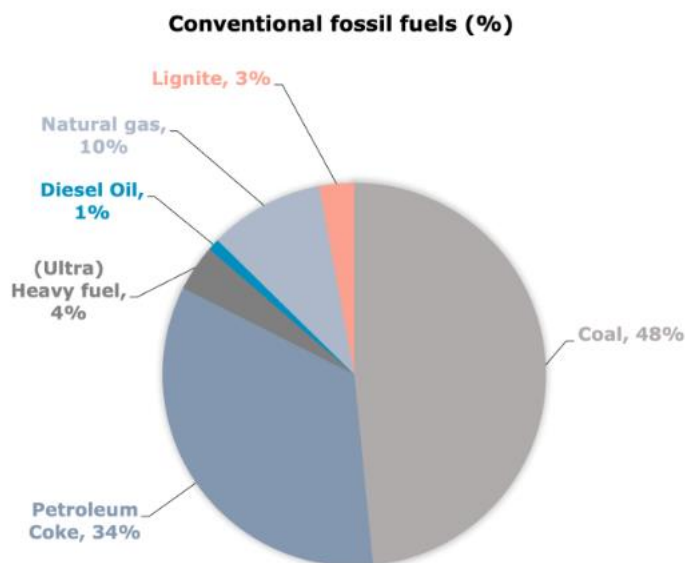
Οι ενεργειακές ανάγκες για την παραγωγή τσιμέντου είναι ιδιαίτερα υψηλές με σκοπό να λάβουν χώρα οι φυσικές και χημικές διεργασίες που θα διαμορφώσουν το τελικό προϊόν. Οι εκπομπές καύσης είναι το αποτέλεσμα της αντίδραση ενός καυσίμου με οξυγόνο, για την παραγωγή θερμικής ενέργειας. Στην περίπτωση της τσιμεντοβιομηχανίας μπορούν να χωριστούν περαιτέρω σε εκπομπές καυσίμων καμίνου και καυσίμων πλην των καυσίμων καμίνου (WBCSD, 2011). Στα καύσιμα της καμίνου συμπεριλαμβάνονται όλα εκείνα τα καύσιμα που αναμιγνύονται μαζί με τις πρώτες ύλες και εισέρχονται στην κλίβανο που πραγματοποιείται η έψηση για την σχηματισμό του κλίνκερ. Στα καύσιμα πλην των

καυσίμων καμίνου εντάσσονται αυτά που χρησιμοποιούνται για λοιπές διεργασίες κατά την παραγωγή, όπως είναι οι θερμικές διεργασίες προετοιμασίας των υλικών και η προθέρμανση του μίγματος προτού εισέλθει στον κλίβανο. Στον Πίνακα 3.3 παρουσιάζονται τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα ορυκτά καύσιμα στο κλάδο σήμερα συνοδευόμενα από τα αντίστοιχα στοιχεία τους σχετικά με την κατωτέρα θερμογόνο δύναμη και το συντελεστή εκπομπών του καθένα (Paustian et al., 2006 και Dincer et al. 2018).

Πίνακας 3.3 Ορυκτά καύσιμα τσιμεντοβιομηχανίας

Είδος	Θερμογόνος Δύναμη (TJ/kt)	Συντελεστής εκπομπής (kg CO ₂ /TJ)
Άνθρακας	28,2	87.300-101.000
Πετρελαϊκό κοκ	32,5	82.900-115.000
Λιγνίτης	11,9	90.900-115.000
Φυσικό αέριο	50,0	54.300-58.300
Μαζούτ	40,4	75.500-78.800
Πετρέλαιο	43,0	72.600-74.800

Όπως και στις περισσότερες βιομηχανίες, τα ορυκτά καύσιμα είναι αυτά που χρησιμοποιούνται κατά κόρον στον κλάδο. Πιο συγκεκριμένα, τα καύσιμα που επιλέγονται είναι ο άνθρακας, το πετρελαϊκό κοκ και το φυσικό αέριο τα οποία εμφανίζουν πολύ υψηλή θερμογόνο δύναμη και επομένως παρέχουν την απαραίτητη ενέργεια (GNR, n.d.). Όμως τα ορυκτά καύσιμα εκλύουν και μεγαλύτερες ποσότητες εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.



Διάγραμμα 3.4 Συνεισφορά συμβατικών ορυκτών καυσίμων σε παγκόσμιο επίπεδο

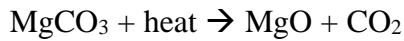
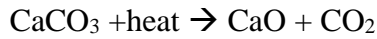
Τα τελευταία χρόνια, αναγνωρίζοντας το πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής και της συμμετοχής που έχει σε αυτό η τσιμεντοβιομηχανία, έχουν γίνει προσπάθειες υποκατάστασης των καυσίμων μέσω της χρήσης εναλλακτικών καυσίμων και βιομάζας, τα οποία εμφανίζουν χαμηλότερες έως και μηδενικές εκπομπές CO₂ κατά την καύση τους.

3.3.2. Εκπομπές διεργασιών

Οι εκπομπές διεργασιών είναι οι εκπομπές που προκύπτουν από την αντίδραση ουσιών μεταξύ τους ή ακόμα και μετασχηματισμού τους με αποτέλεσμα την δημιουργία νέων ενώσεων (Implementing Regulation 2018/2066). Στην περίπτωση της τσιμεντοπαραγωγής, σε αυτές κατατάσσονται οι εκπομπές από την πύρωση των ανθρακικών αλάτων ή του οργανικού άνθρακα που περιέχονται στις πρώτες ύλες. Η βασικότερη πηγή αυτών των ενώσεων είναι ο ασβεστόλιθος, και δευτερευόντως ο σχιστόλιθος (ο οποίος προστίθεται σε μικρότερες ποσότητες), και στις εναλλακτικές πρώτες ύλες όπως ιπτάμενη τέφρα και η σκωρία. Παράλληλα, λαμβάνει χώρα μερική ή πλήρη πύρωση της σκόνης τσιμεντοκαμίνου (CDK) και της σκόνης του παροχετευτικού συστήματος (by-pass) (WBCSD, 2011).

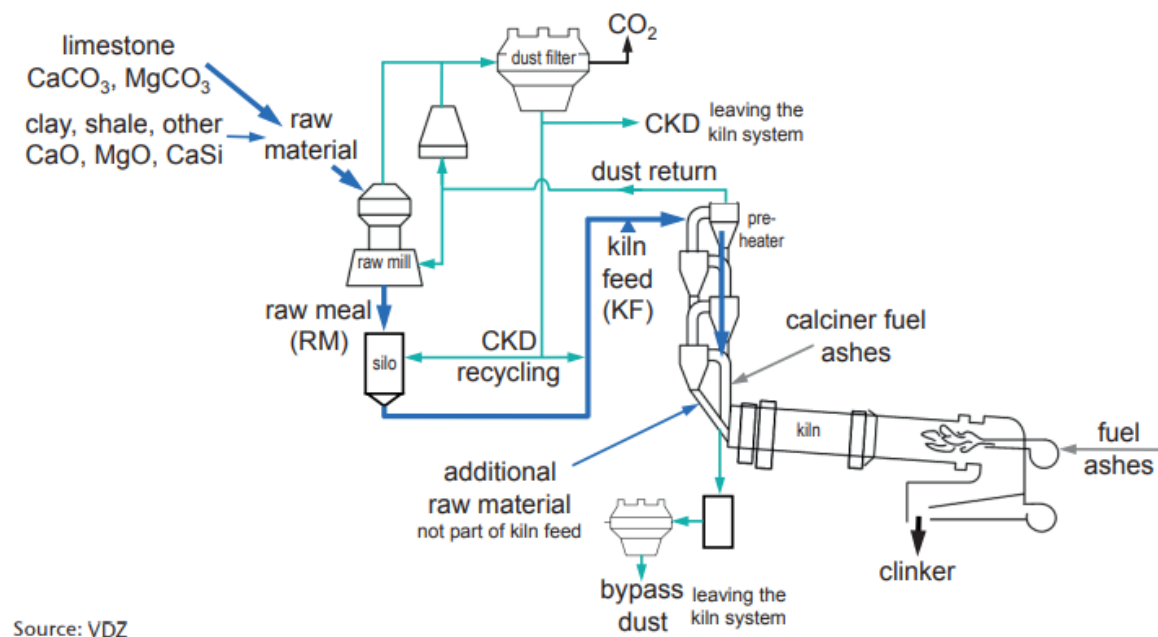
Ο ασβεστόλιθος ο οποίος αποτελείται κατά βάση από ανθρακικό ασβέστιο (CaCO₃) και δευτερεύοντος από ανθρακικό μαγνήσιο (MgCO₃) θερμαίνεται σε θερμοκρασίες 600-900°C

εντός του περιστροφικού κλιβάνου με αποτέλεσμα την μετατροπή των ανθρακικών αλάτων σε CaO και MgO αντίστοιχα με παράλληλη της εκπομπή CO₂, το οποίο θεωρείται παραπροϊόν της αντίδρασης. Οι αντιδράσεις που πραγματοποιούνται είναι οι ακόλουθες:



Βάσει στοιχειομετρίας για τις παραπάνω αντιδράσεις προκύπτει ότι για κάθε 1 kg CaCO₃ που μετατρέπεται σε CaO εκλύονται 0,44 kg CO₂ και για κάθε kg MgCO₃ που μετατρέπεται σε MgO εκλύονται 0,52 kg CO₂.

Όλες οι παραπάνω εκπομπές προκύπτουν αποκλειστικά από το στάδιο της έψησης όπου και εμφανίζονται πολύ υψηλές θερμοκρασίες επιτρέποντας την διάσπαση όλων των ανθρακικών ενώσεων.



Source: VDZ

Εικόνα 3.2 Ροές μάζας κατά την παραγωγή κλίνκερ (WBCSD, 2011)

3.4. Πρωτοβουλίες τσιμεντοβιομηχανίας

Η διεθνής προσπάθεια για μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου δεν περιορίζεται στα θεσμικά όργανα. Οι βιομηχανίες, συνολικά αλλά και ανά κλάδο, έχουν ξεκινήσει μέσω

των ενώσεων τους μία σειρά πρωτοβουλιών για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, κι από την προσπάθεια αυτή δεν απέχει ούτε ο κλάδος της τσιμεντοβιομηχανίας. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν συνοπτικά ορισμένες πρωτοβουλίες της βιομηχανίας παραγωγής τσιμέντου για την απανθρακοποίηση και την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής.

Η Διεθνής Ένωση Τσιμέντου και Σκυροδέματος (Global Cement and Association, GCCA) είναι μία παγκοσμίου βεληνεκούς ένωση τσιμεντοβιομηχανιών, της οποίας τα μέλη αντιπροσωπεύουν το 80% του κλάδου παγκοσμίως, εξαιρουμένης της Κίνας. Η ένωση έχει στόχο την ανάδειξη του σκυροδέματος ως ενός υλικού που θα εξυπηρετήσει τη βιώσιμη ανάπτυξη διεθνώς, αλλά τη μείωση των επιπτώσεων από την παραγωγή τσιμέντου, καθιστώντας την τσιμεντοβιομηχανία έναν βιώσιμο κλάδο της παραγωγής. Η GCCA, στο πλαίσιο της συνεργασίας της με το Παγκόσμιο Επιχειρηματικό Συμβούλιο για την Αειφόρο Ανάπτυξη (WBCSD: World Business Council for Sustainable Development), ανέλαβε από το 2019 τη διαχείριση των εργασιών που είχαν πραγματοποιηθεί στο πλαίσιο της Πρωτοβουλίας για τη Βιωσιμότητα του Τσιμέντου (CSI: Cement Sustainability Initiative), μιας διεθνούς προσπάθειας 24 μεγάλων παραγωγών τσιμέντου, που ξεκίνησε το 2002 με σκοπό την επίτευξη βιώσιμης ανάπτυξης στον κλάδο, συμπεριλαμβανομένης της προστασίας του κλίματος. Το μεγαλύτερο μέρος των κατευθυντήριων οδηγιών που είχαν αναπτυχθεί στο πλαίσιο της CSI έχουν πλέον αντικατασταθεί από τις αντίστοιχες της GCCA (GCCA, n.d.).

Τα μέλη της ένωσης έχουν αναλάβει την υποχρέωση συμμόρφωσης και δημοσίευσης στοιχείων σύμφωνα με τη Χάρτα Βιωσιμότητας της GCCA. Πιο συγκεκριμένα, κάθε μέλος της ένωσης πρέπει να υλοποιεί πρωτοβουλίες και να θέτει στόχους για τη βελτίωση των επιδόσεών του σε κάθε έναν από τους πέντε πυλώνες που αναγνωρίζονται από την Χάρτα: Υγεία & Ασφάλεια, Κλιματική Αλλαγή & Ενέργεια, Κοινωνική Ευθύνη, Περιβάλλον & Φύση, Κυκλική Οικονομία. Στη Χάρτα περιλαμβάνονται, μεταξύ άλλων, κατευθυντήριες οδηγίες για την παρακολούθηση και δημοσίευση στοιχείων σχετικά με τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από την παραγωγή τσιμέντου. Επιπλέον, τα μέλη της GCCA δεσμεύτηκαν το 2020 ότι έως το έτος 2050, η παραγωγή σκυροδέματος θα έχει ουδέτερο ισοζύγιο ανθρακικών εκπομπών και ανέπτυξαν, για το σκοπό αυτό, το σχέδιο δράσης “2050 Net Zero Roadmap”, για την απανθρακοποίηση της βιομηχανίας τσιμέντου και σκυροδέματος. Ως ενδιάμεσος στόχος έχει τεθεί η μείωση των εκπομπών CO₂ που συνδέονται με την παραγωγή σκυροδέματος κατά 25% μέχρι το 2030, σε σχέση με το 2020. Οι μειώσεις αυτές θα

επιτευχθούν, σύμφωνα με το σχέδιο δράσης, μέσω επεμβάσεων κατά την παραγωγή του κλίνκερ (επίτευξη μεγαλύτερης θερμικής αποδοτικότητας, χρήση εναλλακτικών καυσίμων / απορριμμάτων ή υδρογόνου, χρήση α' υλών χαμηλού ανθρακικού περιεχομένου), μέσω της βελτίωσης της αποδοτικότητας της παραγωγής σκυροδέματος αλλά και του κατασκευαστικού τομέα, μέσω της απανθρακοποίησης της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται στα εργοστάσια, μέσω της φυσικής διαδικασίας απορρόφησης του CO₂ από το σκυρόδεμα, μέσω της αντικατάστασης του κλίνκερ από άλλα υλικά, και τέλος μέσω της χρήσης τεχνολογιών δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα (Carbon Capture) στα εργοστάσια παραγωγής τσιμέντου (GCCA, n.d.).

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, η Ευρωπαϊκή Ένωση Τσιμέντου (European Cement Association, CEMBUREAU), που αποτελείται από τις εθνικές ενώσεις τσιμεντοβιομηχανίας καθώς και τσιμεντοβιομηχανίες κρατών της Ευρώπης, είναι το όργανο αντιπροσώπευσης του κλάδου στους θεσμούς της Ε.Ε., άλλων δημοσίων αρχών, καθώς και με διεθνείς οργανισμούς όπως η GCCA και ο OECD. Το CEMBUREAU δραστηριοποιείται ως προς όλες τις εξελίξεις σε ευρωπαϊκό επίπεδο που επηρεάζουν τον κλάδο του τσιμέντου, συμπεριλαμβανομένων των ζητημάτων βιώσιμης ανάπτυξης. Σε ευθυγράμμιση με τη Συμφωνία του Παρισιού και την Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία, το CEMBUREAU έχει θέσει στόχο κλιματικής ουδετερότητας κατά μήκος της αλυσίδας αξίας της ευρωπαϊκής βιομηχανίας τσιμέντου - σκυροδέματος μέχρι το 2050. Για την επίτευξη του στόχου αυτού, έχει καταρτίσει το σχέδιο δράσης “Carbon Neutrality Roadmap 2050”, κι έχει θέσει ως ενδιάμεσο στόχο τη μείωση των εκπομπών CO₂ από την παραγωγή τσιμέντου κατά 30% και από το σύνολο της αλυσίδας αξίας κατά 40%, μέχρι το 2030. Για την επίτευξη των στόχων μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, τόσο για το 2030 όσο και για το 2050, το CEMBUREAU έχει υιοθετήσει την προσέγγιση των 5C: Clinker (Κλίνκερ) - Cement (Τσιμέντο) - Concrete (Σκυρόδεμα) - Construction (Κατασκευή) - re-Carbonation (Ενανθράκωση). Πρόκειται για μία προσέγγιση που περιλαμβάνει την υλοποίηση παρεμβάσεων και τη θέσπιση στόχων μείωσης εκπομπών σε όλο το μήκος της αλυσίδας αξίας του τσιμέντου και του σκυροδέματος (CEMBUREAU, 2020).

Σε εθνικό επίπεδο, η Ένωση Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος (Ε.Τ.Ε.), με έτος ίδρυσης το 1962 κι έδρα την Αθήνα, είναι ένας μη κερδοσκοπικός οργανισμός, χρηματοδοτούμενος από τα μέλη του, τις τρεις ελληνικές τσιμεντοβιομηχανίες. Σκοπός της Ε.Τ.Ε. είναι η προώθηση, η διεύρυνση και η βελτίωση της χρήσης του τσιμέντου και του σκυροδέματος, ενώ αποτελεί και

ενεργό μέλος του CEMBUREAU. Η Ε.Τ.Ε. έχει υιοθετήσει και σε εθνικό επίπεδο τους στόχους μείωσης εκπομπών του CEMBUREAU, ενώ ταυτόχρονα υιοθετεί την προσέγγιση της GCCA για τον περιορισμό των εκπομπών CO₂. Πιο συγκεκριμένα, οι δράσεις που υιοθετεί η Ε.Τ.Ε. για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής είναι οι ακόλουθες: ενεργειακή διαχείριση και απόδοση, συνεπεξεργασία (ανάκτηση ενέργειας και ανακύκλωση υλικών κατά την παραγωγή κλίνκερ, μέσω της χρήσης εναλλακτικών πρώτων υλών), και τη μείωση του περιεχομένου των παραγόμενων τσιμέντων σε κλίνκερ (HCIA, n.d.).

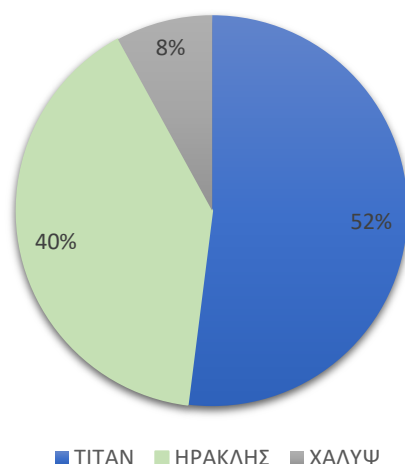
3.5. Τσιμεντοβιομηχανίες στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα δραστηριοποιούνται 3 τσιμεντοβιομηχανίες οι οποίες μάλιστα εντάσσονται στο Σ.Ε.Δ.Ε.: η Ανώνυμος Γενική Εταιρεία Τσιμέντων ΗΡΑΚΛΗΣ, μέλος του Ομίλου Holcim, η Ανώνυμη Εταιρεία Τσιμέντων ΤΙΤΑΝ, μέλος του Ομίλου ΤΙΤΑΝ, και η ΧΑΛΥΨ Δομικά Υλικά Α.Ε., μέλος του Ομίλου Heidelberg. Στον Πίνακα 3.4 παρουσιάζονται οι μονάδες παραγωγής τσιμέντου ανά Εταιρεία.

Πίνακας 3.4 Μονάδες παραγωγής τσιμέντου στην Ελλάδα

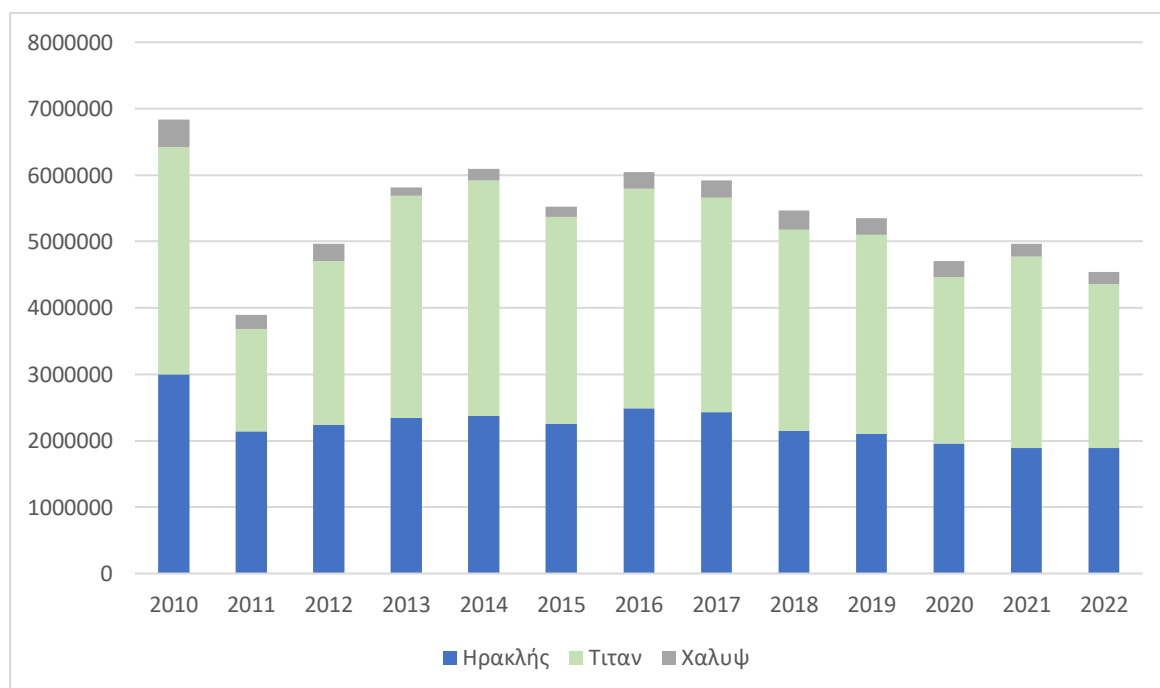
Εταιρεία	Περιοχή
Τιτάν	Καμάρι, Βοιωτία
	Δρέπανο, Αχαΐα
	Ευκαρπία, Θεσσαλονίκη
Ηρακλής	Μηλάκι, Εύβοια
	Βόλος
Χάλυψ	Ασπρόπυργος

Τα μερίδια της αγοράς, βάσει του κύκλου εργασιών κάθε εταιρείας (Α.Γ.Ε.Τ. Ηρακλής, 2023, Α.Ε. Τσιμέντων ΤΙΤΑΝ, 2023 και Χάλυψ Δομικά Υλικά Α.Ε., 2023), για το 2022 εμφανίζουν την κατανομή που παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 3.5.



Διάγραμμα 3.5 Μερίδιο αγοράς των ελληνικών τσιμεντοβιομηχανιών

Παρατηρείται ότι οι δυο κυρίαρχες εταιρείες είναι η Τιτάν και η Ηρακλής με διαφορά 12% ενώ ο Χάλυψ αποτελεί μόλις το 8% του κλάδου. Παρόμοια σχέση παρουσιάζουν και οι εκπομπές του κλάδου, με τον Χάλυψ να συνεισφέρει λιγότερο από 5% βάσει του ακόλουθου διαγράμματος (European Commission, 2023).



Εικόνα 3.3 Συνεισφορά εκπομπών κάθε ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας στο σύνολο του κλάδου στην Ελλάδα κατά την περίοδο 2010-2022

3.5.1. Τιτάν

Η Ανώνυμη Εταιρεία Τσιμέντων ΤΙΤΑΝ λειτούργησε το 1902 στην Ελευσίνα την πρώτη ελληνική μονάδα παραγωγής τσιμέντου. Σήμερα διαθέτει τρία εργοστάσια παραγωγής τσιμέντου στην Ελλάδα, στην Ευκαρπία Θεσσαλονίκης, το Καμάρι Βοιωτίας και το Δρέπανο Αχαΐας, ενώ η μονάδα της Ελευσίνας λειτουργεί ως σταθμός άλεσης. Η συνολική παραγωγική δυναμικότητα τσιμέντου της Α.Ε. Τσιμέντων ΤΙΤΑΝ ανέρχεται στους 6,5 εκ. τόνους (Titan Cement Group, 2023). Διαθέτει επίσης 5 σταθμούς διανομής τσιμέντου, 29 μονάδες έτοιμου σκυροδέματος και 25 λατομεία. Η εξαγωγική δραστηριότητα του ΤΙΤΑΝ είναι έντονη, με το 85% της παραγωγής του εργοστασίου του Καμαρίου και το 50% της παραγωγής του εργοστασίου της Θεσσαλονίκης να διοχετεύεται στις αγορές του εξωτερικού. Εκτός από κλίνκερ και τσιμέντο, ο Όμιλος ΤΙΤΑΝ στην Ελλάδα δραστηριοποιείται στους τομείς του έτοιμου σκυροδέματος, των ξηρών κονιαμάτων και των αδρανών υλικών. Τις σχετικές με το σκυρόδεμα και λατομικές δραστηριότητες έχει αναλάβει στην Ελλάδα ή έτερη θυγατρική του Ομίλου ΤΙΤΑΝ, η ΙΝΤΕΡΜΠΙΕΤΟΝ (Titan Cement Group, n.d.).

3.5.2. Ηρακλής

Η Ανώνυμος Γενική Εταιρεία Τσιμέντων ΗΡΑΚΛΗΣ (ΑΓΕΤ ΗΡΑΚΛΗΣ) είναι μέλος του Ομίλου ΗΡΑΚΛΗΣ. Το 1911, έθεσε σε λειτουργία το πρώτο της εργοστάσιο στην Δραπετσώνα, το οποίο σήμερα έχει κλείσει. Η ΑΓΕΤ ΗΡΑΚΛΗΣ εμπορεύεται χύδην και σακευμένα προϊόντα και διαθέτει δύο εργοστάσια παραγωγής τσιμέντου, ένα στον Βόλο κι ένα στο Μηλάκι Ευβοίας. Το εργοστάσιο του Βόλου, με ετήσια παραγωγική δυναμικότητα 4 εκατ. τόνων, είναι ένα από τα μεγαλύτερα στην Ευρώπη. Παράγει επτά είδη τσιμέντου (συνολική ετήσια παραγωγή: 1,9 εκ. τόνοι), κλίνκερ (συνολική ετήσια παραγωγή: 1,6 εκ. τόνοι), στερεά καύσιμα και αδρανή υλικά, ενώ ο ιδιωτικός λιμένας που διαθέτει διευκολύνει τις μεταφορές τόσο των πρώτων υλών που απαιτούνται, όσο και των προϊόντων, εντός και εκτός Ελλάδος. Λιμάνι διαθέτει και το εργοστάσιο του Μηλακίου, το 90% της παραγωγής του οποίου διοχετεύεται σε αγορές του εξωτερικού. Η ΑΓΕΤ ΗΡΑΚΛΗΣ διαθέτει ακόμη 6 κέντρα διανομής, για την κάλυψη των αναγκών της ηπειρωτικής και νησιωτικής Ελλάδας.

Εκτός από την παραγωγή τσιμέντου, ο Όμιλος ΗΡΑΚΛΗΣ δραστηριοποιείται μέσω της θυγατρικής του Lafarge Beton και στον κλάδο του σκυροδέματος και των αδρανών, διαθέτοντας 14 μονάδες έτοιμου σκυροδέματος, καθώς και 6 λατομεία. Συνολικά, ο Όμιλος διαθέτει 11 ενεργά λατομεία, από τα οποία γίνεται η εξόρυξη πρώτων υλών για τα εργοστάσιά του, ενώ μέσω της θυγατρικής του ΛΑΒΑ, έχει τη διαχείριση τριών λατομείων βιομηχανικών υλικών (γύψου, ελαφρόπετρας και ποζολάνης) (Lafarge Ελλάδα, n.d.).

3.5.3. Χάλυψ

Η ΧΑΛΥΨ Δομικά Υλικά Α.Ε. δραστηριοποιείται στην παραγωγή και εμπορία τσιμέντου από το 1943, με την εμπορική ονομασία “Τσιμέντα Χάλυψ”. Η εταιρεία δραστηριοποιείται επίσης στην Ελλάδα στον λατομικό κλάδο με την επωνυμία “Λατομεία Χάλυψ”, και στον κλάδο του σκυροδέματος με την επωνυμία “Έτ Μπετόν”. Διαθέτει ένα εργοστάσιο παραγωγής τσιμέντου στον Ασπρόπυργο, δυναμικότητας 0,9 εκ. τόνων ετησίως, τρεις μονάδες έτοιμου σκυροδέματος, ένα λατομείο κι ένα σταθμό αποθήκευσης και διανομής στο Δυρράχιο Αλβανίας με την επωνυμία Eurotech Cement SH.P.K (Heidelberg Materials Hellas., n.d.).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΤΡΑ ΜΕΙΩΣΗΣ ΕΚΠΟΜΠΩΝ

4.1.Εισαγωγή

Η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στη τσιμεντοβιομηχανία δεν είναι μόνο θέμα περιβαλλοντικής ευθύνης αλλά και στρατηγική επιταγή. Με αυξανόμενη διεθνή πίεση για επίτευξη της ανθρακικής ουδετερότητας και μια εξελισσόμενη αγορά που καθοδηγείται από περιβαλλοντική ευαισθησία, οι εταιρείες τσιμέντου που αναλαμβάνουν δράση εξασφαλίζουν μακροπρόθεσμη επιτυχία. Σε αυτό το πλαίσιο, το κεφάλαιο αυτό διερευνά τις ενέργειες που πρέπει να εφαρμόσει η βιομηχανία τσιμέντου για να μειώσει ουσιαστικά τις εκπομπές άνθρακα και να αντιμετωπίσει κατά μέτωπο την παγκόσμια πρόκληση της κλιματικής αλλαγής.

4.2.Ανάλυση μέτρων μείωσης εκπομπών

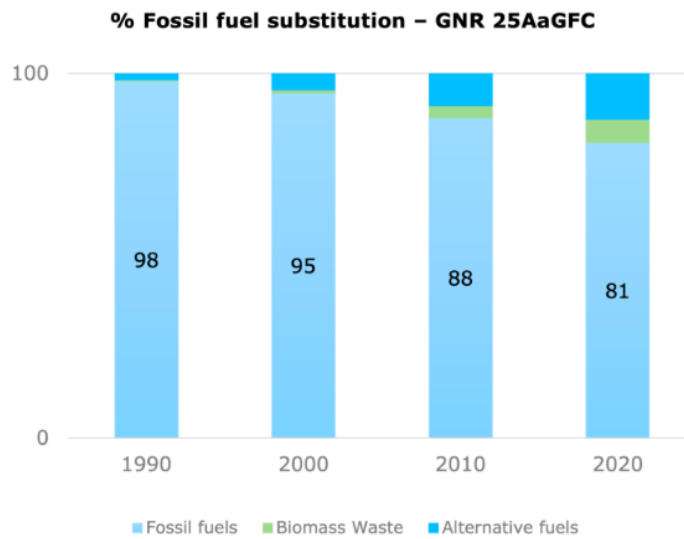
Για την αντιμετώπιση του κρίσιμου ζητήματος της κλιματικής αλλαγής, η βιομηχανία τσιμέντου πρέπει να λάβει προληπτικά μέτρα για να ελαχιστοποιήσει το ανθρακικό της αποτύπωμα, να αγκαλιάσει τις καινοτόμες τεχνολογίες και να ευθυγραμμίσει τις πρακτικές της με τους στόχους βιώσιμης ανάπτυξης προς όφελος του πλανήτη μας και των μελλοντικών γενεών.

Το πρώτο και πιο σημαντικό βήμα που πρέπει να κάνει κάθε κλάδος για την λήψη των πιο αποδοτικών μέτρων είναι η αναγνώριση των συνιστωσών που απαρτίζουν το ανθρακικό αποτύπωμα του κλάδου, με σκοπό την στόχευση των μέτρων σε αυτές. Επομένως, είναι αντιληπτό, βάσει όσων αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, ότι η στρατηγική της τσιμεντοβιομηχανίας προς την απανθρακοποίηση πρέπει να βασιστεί πρωτίστως στα υλικά που συμμετέχουν στην παραγωγική διαδικασία και δευτερεύοντος, αλλά εξίσου σε σημαντικό βαθμό, στην ενέργεια, και κατ' επέκταση στα καύσιμα. Η επιλογή και το εύρος εφαρμογής κάθε μέτρου μείωσης βασίζεται στην εφικτότητα κάθε μέτρου και στους περιορισμούς που

υπάρχουν στην παρούσα φάση. Κανένα από διαθέσιμα μέτρα σήμερα δεν μπορεί να επιτύχει μηδενισμό των εκπομπών, καθώς άλλα μέτρα επηρεάζουν τις εκπομπές διεργασιών και άλλα τις εκπομπές καύσης. Επομένως, για να επιτευχθεί η παραγωγή όσο το δυνατό λιγότερων εκπομπών απαιτείται ο συνδυασμός αυτών των μέτρων λαμβάνοντας υπόψιν οικονομικές και ποιοτικές παραμέτρους.

4.2.1. Υποκατάσταση ορυκτών καυσίμων

Η υποκατάσταση των ορυκτών καυσίμων αποτελεί την πιο συνηθισμένη και πάγια εδραιωμένη μέθοδο για την μείωση των εκπομπών του κλάδου. Τα εργοστάσια τσιμέντου διαθέτουν ήδη υπάρχουσα υποδομή για την καύση καυσίμου, γεγονός που καθιστά σχετικά απλή την τροποποίηση των κλιβάνων και του λοιπού εξοπλισμού για τη χρήση εναλλακτικών καυσίμων (Rahman et al, 2016). Επομένως, η υποκατάσταση των ορυκτών καυσίμων με εναλλακτικά δύναται να αποτελέσει έναν οικονομικά αποδοτικό τρόπο για τη μείωση των εκπομπών. Σε πρώτη φάση, η υποκατάσταση μπορεί να επικεντρωθεί σε εναλλακτικά καύσιμα που ήδη χρησιμοποιεί ο κλάδος, αυξάνοντας το ποσοστό συμμετοχής τους στο μείγμα των καυσίμων ενώ σε επόμενο στάδιο υπάρχει η δυνατότητα ενσωμάτωσης στην παραγωγική διαδικασία και πιο καινοτόμων καυσίμων, όπως είναι το υδρογόνο. Τα ποσοστά υποκατάστασης το 2020 εμφάνισαν αύξηση κατά 17 ποσοστιαίες μονάδες σε σχέση με το 1990 (GNR, n.d.).



Εικόνα 4.1 Υποκατάσταση ορυκτών καυσίμων σε παγκόσμιο επίπεδο

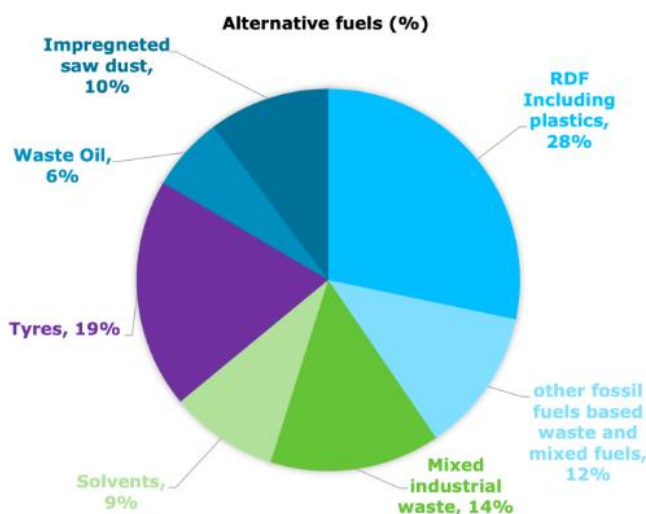
4.2.1.1. Απόβλητα

Πολλά ανακυκλώσιμα και μη απόβλητα έχουν την δυνατότητα να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ενέργειας στην τσιμεντοβιομηχανία, καθώς οι υψηλές θερμοκρασίες, οι υψηλοί χρόνοι παραμονής των καυσίμων καθώς και η περίσσεια οξυγόνου εντός του κλιβάνου εξασφαλίζουν την πλήρη διάσπαση οιασδήποτε οργανικής ένωσης (WBCSD, 2014). Η χρήση των αποβλήτων ως εναλλακτικές πηγές ενέργειας στον συγκεκριμένο κλάδο είναι ήδη διαδεδομένη πρακτική, και συναντάται στην βιβλιογραφία με τον όρο συνεπεξεργασία (co-processing). Κατά την συνεπεξεργασία, τα απόβλητα εισέρχονται μαζί με τις πρώτες ύλες στον κλίβανο που πραγματοποιείται η έψηση, επιτυγχάνοντας έτσι παράλληλα ανάκτηση ενέργειας και ανακύκλωση πόρων, συνεισφέροντας έτσι στην εκτροπή αυτών των υλικών από τους χώρους υγειονομικής ταφής και την μείωση της εξάρτησης από τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα (Blume et al, 2020). Θα μπορούσαμε να πούμε λοιπόν ότι η τσιμεντοπαραγωγή μέσω αυτής της διαδικασίας υιοθετεί μια ολιστική προσέγγιση όπου τα απόβλητα μετατρέπονται σε πολύτιμους ενεργειακούς πόρους, ελαχιστοποιώντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Benhelal et al., 2013) και ενισχύοντας ένα σύστημα κλειστού βρόχου. Εκτός από τα περιβαλλοντικά οφέλη που προκύπτουν από την συνεπεξεργασία, δεν εκλείπουν τα οικονομικά πλεονεκτήματα. Συνήθως έχουν χαμηλότερο κόστος, ακόμα και μηδενικό, δεδομένου ότι αποτελούν απόβλητο για την μονάδα που τα παράγει, αποτελώντας έναν

σημαντικό τρόπο μείωσης των λειτουργικών εξόδων της μονάδας (Rahman et al, 2013). Ωστόσο, σε πολλές περιπτώσεις είναι επιτακτική ανάγκη η προεπεξεργασία των ρευμάτων αυτών, όπως για παράδειγμα, στην περίπτωση του RDF (Refused Derived Fuel) που προκύπτουν από τα αστικά στερεά απόβλητα ύστερα από απομάκρυνση της υγρασία και των επικίνδυνων υλικών, γεγονός που μπορεί να καταστήσει την όλη διαδικασία οικονομικά ασύμφορη (IFC, 2017).

Σε Ευρωπαϊκό επίπεδο, βάσει στοιχείων του 2020, τα ποσοστά υποκατάστασης ανέρχονται σε 52% (CEMBUREAU, 2023) με την Ελλάδα να βρίσκεται στις τελευταίες χώρες με ποσοστό μόλις 23% (TITAN, 2021 και Α.Γ.Ε.Τ. 2021). Το χαμηλό αυτό ποσοστό έγκειται στην χαμηλή διαθεσιμότητα απορριμμάτων υψηλής ποιότητας για χρήση ως καύσιμο, γραφειοκρατικά εμπόδια στην έκδοση αδειών αλλά και η αρνητική στάση των πολιτών απέναντι στην καύση των απορριμμάτων (De Beer et al., 2017).

Τα απόβλητα που μπορούν αξιοποιηθούν είναι είτε αστικά είτε βιομηχανικά. Σε παγκόσμιο επίπεδο τα πιο διαδομένα απόβλητα που χρησιμοποιούνται είναι το RDF και τα λάστιχα και σε ποσοστό 28%, 19% καθώς είναι υλικά που εμφανίζουν χαμηλή υγρασία και υψηλό ενεργειακό περιεχόμενο (Rahman, 2015 και Zieri & Ismail, 2019).



Εικόνα 4.2 Συνεισφορά εναλλακτικών καυσίμων

Στον Πίνακα παρουσιάζονται τα απόβλητα που χρησιμοποιούνται στην τσιμεντοβιομηχανία και η θερμική τους ενέργεια ανά τόνο.

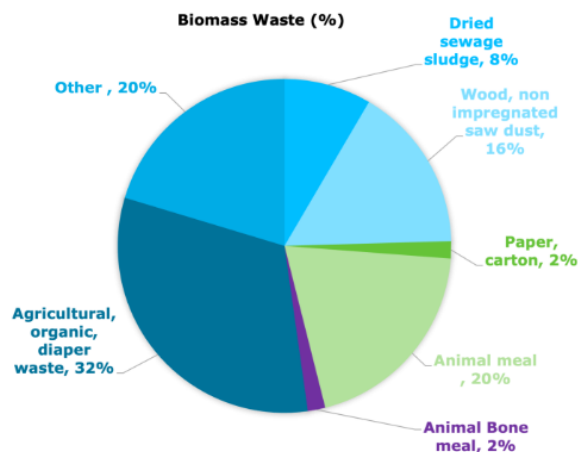
Πίνακας 4.1 Εναλλακτικά καύσιμα στην τσιμεντοβιομηχανία

Είδος αποβλήτου	Θερμογόνος Δύναμη (TJ/kt)	Συντελεστής εκπομπής (kg CO ₂ /TJ)	Πηγή
RDF	26,00	87.000	Georgiopolou et al., 2018 και Tokheim & Brevik, 2007
Χρησιμοποιημένα λάστιχα	32,00	85.000	Georgiopolou et al., 2018 και Implementing Regulation 2018/2066
Απόβλητα ελαίων	30,60	74.000	Saveyn et al., 2016 και Tokheim & Brevik, 2007
Πλαστικά απόβλητα	35,70	75.000	Saveyn et al., 2016 και Tokheim & Brevik, 2007

Η επιλογή των κατάλληλων εναλλακτικών καυσίμων είναι μία πολυκριτηριακή διαδικασία. Η ποιότητα και η ομοιογένεια του μίγματος των καυσίμων που προέρχονται από απόβλητα μπορεί να ποικίλει, γεγονός που ενδέχεται να επηρεάσει τη σταθερότητα και την αποτελεσματικότητα της παραγωγής τσιμέντου (de Lorena Diniz Chaves et al., 2021), καθιστώντας απαραίτητη την διασφάλιση ότι αυτά τα καύσιμα πληρούν συγκεκριμένα πρότυπα ποιότητας. Θα πρέπει τα υλικά που επιλέγονται να μην είναι τοξικά, να μην ξεπερνούν συγκεκριμένα επίπεδα περιεκτικότητας σε χλώριο, θείο, PCB και βαρέα μέταλλα και παράλληλα να είναι οικονομικά βιώσιμα. Εκτός όμως από τα παραπάνω χαρακτηριστικά, κατά την χρήση των εναλλακτικών καυσίμων θα πρέπει να εξασφαλίζονται χαμηλές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά την καύση τους αλλά υψηλή εκλυόμενη ενέργεια (Mokrzycki et al., 2011 και Madlool et al., 2011).

4.2.1.2. Βιομάζα

Η αξιοποίηση της βιομάζας για την παροχή ενέργειας μπορεί να οδηγήσει σε μηδενικές εκπομπές, καθώς το CO₂ που απελευθερώνεται κατά την καύση της είναι μέρος του φυσικού κύκλου του άνθρακα αφού είχε απορροφηθεί κατά το στάδιο της ανάπτυξης του φυτού (Paustian et.al, 2006). Η βιομάζα προέρχεται συνήθως από αγροτικές εργασίες ή από την βιομηχανία τροφίμων (Murray & Price, 2008).



Εικόνα 4.3 Συνεισφορά βιομαζικών αποβλήτων

Χαρακτηριστικά σημαντικά για την καύση όπως η θερμογόνος δύναμή επηρεάζονται από τον τύπο της βιομάζας καθώς και από την περιεχόμενη υγρασία. Υψηλά ποσοστά υγρασίας οδηγούν σε μείωση του θερμιδικού περιεχομένου (Abdel Aal et al., 2023). Επομένως, αντίστοιχα με τα καύσιμα από απόβλητα, η διασφάλιση σταθερής ποιότητας και απόδοσης είναι αναγκαία για αποτελεσματική καύση στους κλιβάνους.

Πίνακας 4.2 Βιομαζικά καύσιμα στην τσιμεντοβιομηχανία

Είδος αποβλήτου	Θερμογόνος Δύναμη (TJ/kt)	Πηγή
Λυματολάσπη	16.000	Georgiopolou et al., 2018
Απόβλητα ξυλείας	13.000	Saveyn et al., 2016
Ζωικά και μίγμα τροφικών αποβλήτων	17.000	Saveyn et al., 2016

Η χρήση βιομάζας, ιδιαίτερα γεωργικών υπολειμμάτων μπορεί να βοηθήσει στη μείωση των απορριμμάτων και στη διαχείριση οργανικών υλικών που διαφορετικά θα απορρίπτονταν ή θα καιγόταν με ανεξέλεγκτο τρόπο, χωρίς ανάκτηση της παραγόμενης ενέργειας. Στην περίπτωση ωστόσο που η βιομάζα προέρχεται από ενεργειακές καλλιέργειες, μια πρακτική που δεν είναι συνηθισμένη στην Ελλάδα, ένα σημαντικό ζήτημα που τίθεται όταν είναι η εξασφάλιση της βιωσιμότητας στην παραγωγή της. Δηλαδή η παραγωγή της θα πρέπει να μην βασίζεται σε μη βιώσιμες πρακτικές χρήσης γης, όπως για παράδειγμα η αποψίλωση δασών, που μπορεί να προκαλέσει σε υποβάθμιση του περιβάλλοντος. Για το λόγο αυτό, η βιομάζα

που χρησιμοποιείται πρέπει να πληροί τα κριτήρια βιωσιμότητας που παρουσιάζονται στην οδηγία της Ε.Ε. για την Ανανεώσιμη Ενέργεια (Directive 2023/2413).

Ένα σημαντικό μειονέκτημα της βιομάζας είναι ότι δεν δύναται με αποκλειστική χρήση της να παρέχεται η ενέργεια που χρειάζεται ένα εργοστάσιο τσιμέντου καθώς, όπως προκύπτει από τον Πίνακα 4.2, εμφανίζει αρκετά χαμηλή θερμογόνο δύναμη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να απαιτούνται πολύ υψηλές ποσότητες, γεγονός που καθιστά την διεργασία οικονομικά ασύμφορη αναλογιζόμενοι το κόστος της επεξεργασίας και μεταφοράς αυτών των ποσοτήτων (Rentizelas et al., 2009). Για αυτό το λόγο συνηθίζεται η βιομάζα να χρησιμοποιείται συμπληρωματικά των ορυκτών και των εναλλακτικών καυσίμων.

4.2.1.3. Υδρογόνο

Το υδρογόνο (H_2) αποτελεί μια από τις πιο ελκυστικές εναλλακτικές για την υποκατάσταση των ορυκτών καυσίμων, τόσο στην τσιμεντοβιομηχανία όσο και στους υπόλοιπους κλάδους της βιομηχανίας. Το H_2 είναι ένα μη τοξικό, άχρωμο και άοσμο αέριο, το οποίο υπάρχει σε αφθονία στην φύση (Møller et al. 2017). Ωστόσο βρίσκεται σε μορφές που δεν μπορούν να αξιοποιηθούν άμεσα για την παραγωγή ενέργειας, όπως είναι το νερό. Η ενεργειακή του πυκνότητα η οποία ανέρχεται στα 120 MJ/kg, το καθιστά έναν πολύ σημαντικό φορέα ενέργειας, καθώς παρέχει 4 φορές περισσότερη ενέργεια από τον άνθρακα (Juangsa et al., 2022). Η αξιοποίηση του υδρογόνου για την παραγωγή ενέργειας πλεονεκτεί επιπρόσθετα καθώς λόγω απουσίας άνθρακα στο μόριο του, κατά την καύση δεν προκαλεί την παραγωγή CO_2 ή CH_4 , ενώ η αντίδραση παράγει ως υποπροϊόν μόνο νερό. Εν τούτοις, για τον σχηματισμό του απαιτούνται σημαντικές ποσότητες ενέργειας, ενώ σημαντικό είναι το γεγονός ότι κατά την παραγωγή του δύναται να προκαλέσει εξίσου σημαντικές ποσότητες εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, περισσότερες από ότι θα αποφεύγονταν από την χρήση του για παραγωγή ενέργειας (Muradon et al., 2005). Επομένως, κρίσιμη παράμετρο για την υιοθέτηση της χρήσης H_2 ως καύσιμο αποτελεί ο τρόπος παραγωγής του. Ανάλογα με τον τρόπο παραγωγής του, το υδρογόνο χωρίζεται στις χρωματικές κατηγορίες που παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.4 (World Energy Council, 2021). Να σημειωθεί ότι αν και είναι η επικρατέστερη χρωματική κατηγοριοποίηση, δεν είναι διεθνής και δύναται να συναντηθεί στην βιβλιογραφία με μικρές παραλλαγές.

	Terminology	Technology	Feedstock/ Electricity source	GHG footprint*
PRODUCTION VIA ELECTRICITY	Green Hydrogen	Electrolysis	Wind Solar Hydro Geothermal Tidal	Minimal
	Purple/Pink Hydrogen		Nuclear	
	Yellow Hydrogen		Mixed-origin grid energy	Medium
PRODUCTION VIA FOSSIL FUELS	Blue Hydrogen	Natural gas reforming + CCUS Gasification + CCUS	Natural gas coal	Low
	Turquoise Hydrogen	Pyrolysis	Natural gas	Solid carbon (by-product)
	Grey Hydrogen	Natural gas reforming		Medium
	Brown Hydrogen	Gasification	Brown coal (lignite)	High
	Black Hydrogen		Black coal	

*GHG footprint given as a general guide but it is accepted that each category can be higher in some cases.

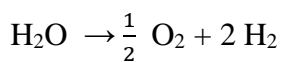
Εικόνα 4.4 Χρωματική κατηγοριοποίηση μεθόδων υδρογόνου

Η αξιοποίηση των ορυκτών καύσιμων δημιουργεί το μαύρο, το καφέ και το γκρι υδρογόνο. Η αεριοποίηση του άνθρακα και του λιγνίτη που προκαλεί ιδιαίτερα υψηλές εκλυόμενες ποσότητες CO₂ οδηγεί στην δημιουργία μαύρου και καφέ αντίστοιχα. Η χρήση φυσικού αερίου με αναμόρφωση μεθανίου, είτε ξηρή είτε με ατμό, και αεριοποίηση, δημιουργεί το γκρι υδρογόνο (Arcos et al., 2023). Μέσω των μεθόδων αυτών, είναι αναπόφευκτη η παραγωγή CO₂, με αποτέλεσμα να αποτελούν τις λιγότερες ελκυστικές μεθόδους, τουλάχιστον όσον αναφορά την παραγωγή υδρογόνου ως φορέα ενέργειας. Ωστόσο ακόμα και σήμερα αποτελούν σχεδόν το 100% της παγκόσμιας παραγωγής (IEA, 2021) δεδομένων των τεχνολογικών και οικονομικών εμποδίων που πρέπει να ξεπεραστούν.

Το γκρι υδρογόνο μπορεί να μετατραπεί σε μπλε, όταν η μέθοδος παραγωγής του συνδυαστεί με σύστημα δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα, γνωστό και ως Carbon Capture and Storage (CCS) (Noussan et al., 2021). Αν και παράγεται CO₂ κατά την παραγωγή του, μέσω των πύργων δέσμευσης μπορεί να αποτρέψει την έκλυση 75-90% των εκπομπών και στην συνέχεια είτε να αξιοποιηθεί είτε να αποθηκευτεί (Newborough & Cooley, 2020). Η μέθοδος του CCUS θα αναλυθεί εκτενέστερα σε επόμενο κεφάλαιο.

Μία λιγότερο επιβαρυντική μέθοδο αποτελεί η πυρόλυση του μεθανίου, με πιο ελκυστική τεχνολογία μέσω θερμικής αποσύνθεσης (Schneider et al., 2020) βάσει της οποίας το υδρογόνο είναι τουρκουάζ.

Για να μπορέσει το υδρογόνο να αποτελέσει μια βιώσιμη λύση στην μείωση των εκπομπών, θα πρέπει να υπερνικηθούν πολλές τεχνολογικές και οικονομικές δυσκολίες. Η χρήση του νερού ως τροφοδοσία σε συστήματα ηλεκτρόλυσης μπορεί να δώσει υδρογόνο χαμηλότερών ή ακόμα και μηδενικών εκπομπών. Κατά την ηλεκτρόλυση του νερού πραγματοποιείται με την βοήθεια ηλεκτρικής ενέργειας η αντίδραση:



Αυτό που μπορεί να καταστήσει περιβαλλοντικά επιβαρυντική αυτήν την μέθοδο είναι η πηγή ενέργειας κατά την ηλεκτρόλυση. Η πιο καθαρή τεχνολογία είναι η ηλεκτρόλυση του νερού χρησιμοποιώντας ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), το οποίο παράγει το πράσινο υδρογόνο (Zainal et al., 2024) ενώ ακολουθούν το ροζ υδρογόνο μέσω πυρηνικής ενέργειας και κίτρινο με μέσω συνδυασμού πηγών ενέργειας (Incer-Valverde et al., 2024). Αν και η χρήση πράσινου υδρογόνου στην τσιμεντοβιομηχανία αποτελεί μια ιδιαίτερα ελκυστική μέθοδο για την υποκατάσταση των ορυκτών καυσίμων και την μείωση των εκπομπών, επί του παρόντος, η παραγωγή του αντιμετωπίζει πολλά εμπόδια που εμποδίζουν την ευρεία υιοθέτησή του, με βασικά το υψηλό κόστος και την περιορισμένη διαθεσιμότητα χαμηλού κόστους ανανεώσιμης ενέργειας (Bade et al, 2023).

Συνοψίζοντας, η υποκατάσταση των ορυκτών καυσίμων με εναλλακτικά στη βιομηχανία του τσιμέντου είναι μια στρατηγική win-win που όχι μόνο βοηθά στην καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής μειώνοντας τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, αλλά προσφέρει επίσης πολλαπλά οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη. Υποστηρίζει μια πιο βιώσιμη και υπεύθυνη προσέγγιση στην παραγωγή τσιμέντου, ενώ αντιμετωπίζει διάφορες κοινωνικές και περιβαλλοντικές προκλήσεις.

4.2.2. Μείωση του λόγου κλίνκερ/τσιμέντου

Το πιο επιβαρυντικό περιβαλλοντικά στάδιο στην παραγωγή του τσιμέντου αποτελεί η παραγωγή του κλίνκερ. Οι εκπομπές διεργασίας συνδυαστικά με τις εκπομπές καύσης που λαμβάνουν χώρα κατά την έψηση αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό των συνολικών εκπομπών της παραγωγής. Για την δημιουργία του τελικού προϊόντος, το κλίνκερ αναμιγνύεται με τα υπόλοιπα υλικά, με αποτέλεσμα η επιβάρυνση αυτή να μετακυλίεται στο τσιμέντο με τρόπο ανάλογο ως προς τον περιεκτικότητα του τελικού προϊόντος σε κλίνκερ. Η μείωση του περιεχόμενου κλίνκερ στο τελικό προϊόν έχει αποτέλεσμα την μείωση των εκπομπών, καθώς παράγεται μεγαλύτερη ποσότητα τσιμέντου προκαλώντας λιγότερες εκπομπές CO₂. Η μείωση της περιεκτικότητας του κλίνκερ στο τελικό προϊόν επιτυγχάνεται με την μερική υποκατάσταση του κλίνκερ με άλλα υλικά τα οποία να εμφανίζουν παρόμοιες ιδιότητες και χαρακτηριστικά με το κλίνκερ, ώστε να οδηγήσουν σε ένα αντίστοιχης ποιότητας προϊόν. Τα υλικά αυτά ονομάζονται συμπληρωματικά τσιμεντοειδή υλικά (SCMs: Supplementary cementitious materials) και είναι λεπτόκοκκες διαλυτές σκόνες με πυριτούχες και αργιλοπυριτούχες ενώσεις (Juenger et al., 2019). Ο βασικός διαχωρισμός είναι σε φυσικά και βιομηχανικά προϊόντα. Τα βιομηχανικά προϊόντα κατά βάση είναι παραπροϊόντα διαφόρων βιομηχανιών.

4.2.2.1. Φυσικά

Σε αυτήν τη κατηγορία εντάσσονται οι φυσικές ποζολάνες και ο ασβεστόλιθος. Οι φυσικές ποζολάνες είναι ηφαιστιογενούς προέλευσης υλικά και ιζηματογενή πετρώματα αργίλου και σχιστόλιθου, με τα πιο διαδεδομένα να είναι ο ζεόλιθος, η ελαφρόπετρα και οι περλίτες (Dedeloudis et al, 2018). Τα υλικά αυτά εμφανίζουν ομοιότητες με το κλίνκερ, δεδομένου ότι περιέχουν υψηλά ποσοστά άμορφου πυριτίου και αργιλίου (αλούμινα). Όπως φανερώνει και το όνομα τους, για να επέλθει η σκλήρυνση στο τελικό προϊόν απαιτείται η παρουσία υδράσβεστου. Οι ιδιότητες που έχουν τα υλικά αυτά και που στην συνέχεια προσδίδουν στο τελικό προϊόν, διαφοροποιούνται ανάλογα με το είδος του. Επιπλέον, οι ιδιότητες που έχουν τα παραπάνω υλικά διαφοροποιούνται σημαντικά με το μέγεθος των σωματιδίων, το πορώδες καθώς και την ειδική επιφάνεια του υλικού (Juenger et al., 2019).

Σε αυτήν την κατηγορία θα μπορούσαν να υπαχθούν και οι πυρωμένες (calcined) φυσικές ποζολάνες, με πιο διαδεδομένο υλικό τον μετακαολίνη, το οποίο είναι το προϊόν της πύρωσης του καολίνη (Jaskulski et al., 2020). Ο μετακαολίνης ωστόσο λόγω της περιορισμένης του διαθεσιμότητας και της υψηλής ζήτησης του σε άλλες βιομηχανίες, αυξάνει σημαντικά το κόστος και το καθιστά οικονομικά ασύμφορο για την τσιμεντοπαραγωγή. Εμφανίζει ποζολανικές ιδιότητες, ωστόσο πλεονεκτεί καθώς επιταχύνει την διαδικασία της σκλήρυνσης του σκυροδέματος, καθώς είναι ένα ιδιαίτερα ενεργό υλικό (Seraj et al. 2015). Τα φυσικά τσιμεντοειδή εμφανίζουν ως βασικό μειονέκτημα το υψηλότερο κόστος σε σχέση με τα βιομηχανικά παραπροϊόντα που θα παρουσιαστούν στην επόμενη παράγραφο.

4.2.2.2. Βιομηχανικά παραπροϊόντα

Στο πλαίσιο αναζήτησης βιώσιμης και περιβαλλοντικά υπεύθυνης παραγωγής τσιμέντου, η χρήση βιομηχανικών παραπροϊόντων έχει αναδειχθεί ως επιτακτική λύση για τη μείωση της αναλογίας κλίνκερ προς τσιμέντο. Ως παραπροϊόντα ορίζονται τα υλικά που προκύπτουν συμπληρωματικά με τα κύρια προϊόντα μιας διεργασίας (Directive 2008/98/EC). Τα παραπροϊόντα διαφέρουν από τα απόβλητα καθώς μπορούν να αξιοποιηθούν περαιτέρω και έχουν αξία στην αγορά. Χρησιμοποιώντας αυτά τα υλικά, οι βιομηχανίες όχι μόνο μειώνουν τις περιττές εκροές τους που οδηγούνται προς ταφή, αλλά συμβάλλουν επίσης και σε μια πιο κυκλική και αποδοτική από πλευράς πόρων οικονομία, όπου η καινοτομία και η περιβαλλοντική διαχείριση συμβαδίζουν.

Στον κλάδο της τσιμεντοβιομηχανίας η συνεργία με άλλες βιομηχανίες, όπως του χάλυβα, αποτελεί σημαντικό βήμα για την επίτευξη της απανθρακοποίησης, με οφέλη και για τις δύο πλευρές. Αφενός η τσιμεντοβιομηχανία υιοθετεί ένα μέτρο για την μείωση των εκπομπών της και αφετέρου, οι λοιπές βιομηχανίες βρίσκουν έναν πιο αποδοτικό τρόπο διαχείρισης των αποβλήτων τους. Η αξιοποίηση των βιομηχανικών παραπροϊόντων πλεονεκτεί έναντι των φυσικών προϊόντων καθώς εμφανίζουν χαμηλότερο κόστος για την τσιμεντοπαραγωγή, αφού η τιμή τους συνήθως είναι χαμηλότερη λόγω ότι στην πραγματικότητα αποτελούν απόβλητο για τους παραγωγούς του παρέχοντας οικονομικό κίνητρο για την ένταξή του μέτρου αυτού στην στρατηγική των εταιρειών για την μείωση των εκπομπών (CEMBUREAU, 2016). Τα

πιο διαδεδομένα βιομηχανικά παραπροϊόντα στην τσιμεντοβιομηχανία είναι η σκωρία υψικαμίνου, η ιπτάμενη τέφρα και ο καπνός πυριτίου (Skibsted & Snellings, 2019).

Σκωρία υψικαμίνου

Η σκωρία υψικαμίνου (Furnace Slag) είναι το παραπροϊόν από την βιομηχανία χάλυβα. Είναι μη μεταλλικό υλικό το οποίο αποτελείται κατά βάσει από πυριτικά, αργιλοπυριτικά, και ασβεστοαργιλοπυριτικά οξείδια όπου η περιεκτικότητα αυτών εξαρτάται από τις πρώτες ύλες που τροφοδοτήθηκαν, από τις συνθήκες λειτουργίας του φούρνου καθώς και από το τύπο παραγωγής (Shi, 2004). Το υλικό αυτό είναι υδραυλικό και φυσικά τσιμεντοειδές το οποίο όταν αλέθεται και αναμειγνύεται με το κλίνκερ μπορεί να βελτιώσει την εργασιμότητα, την ανθεκτικότητα και την αντοχή του σκυροδέματος (Elahi et al., 2009 και Chidiac & Panesar, 2008).

Καπνός πυριτίου

Σχετικά με τον καπνό πυριτίου, είναι το παραπροϊόν από την παραγωγής κραμάτων πυριτίου και σιδηροπυριτίου σε φούρνο ηλεκτρικού τόξου. Το υλικό αυτό αποτελείται από υψηλά ποσοστά πυριτίου, άνω του 85%, το οποίο εξαρτάται από τις πρώτες ύλες που τροφοδοτούνται στο χυτήριο. Είναι ένα ιδιαίτερα λεπτόκοκκο υλικό, με διάμετρο περίπου 0.1–0.3 μm και για αυτό το λόγο ονομάζεται και μικροσίλικα (microsilica). (Fidjestøl & Lewis, 1998) Αν και είναι ένα ποζολανικό υλικό πλεονεκτεί έναντι των υπόλοιπων υλικών αυτής της κατηγορίας καθώς επιτυγχάνει την σκληρότητα του σε μικρότερους χρόνους.

Ιπτάμενη τέφρα

Όσον αφορά την ιπτάμενη τέφρα, προκύπτει από τις μονάδες παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού με οι οποίες χρησιμοποιούν λιγνίτη. Τα κύρια συστατικά της είναι οξείδια του πυριτίου (SiO_2), του αργιλίου (Al_2O_3), ενώ δύναται να περιέχουν και μικρότερα ποσοστά CaO , Fe_2O_3 , MgO αλλά ακόμα και βαρέα μέταλλα (Cho et al., 2019). Οι ιδιότητες της, όπως η αντοχή εξαρτώνται σημαντικά από την χημική της σύσταση η οποία με την σειρά της εξαρτάται από τον τύπο του άνθρακα που καίγεται. Επιπλέον, αν και είναι ένα ποζολανικό υλικό η ποζολανική του ενεργότητα ποικίλει. Η ιπτάμενη τέφρα εμφανίζει μεγάλο αριθμό πλεονεκτημάτων στην τσιμεντοβιομηχανία καθώς όταν αναμειγνύεται με το τσιμέντο μπορεί να ενισχύσει την αντοχή και την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος ενώ μειώνει την απαιτούμενη ποσότητα τσιμέντου (Khatib, 2008). Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι η στροφή

στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας με αποτέλεσμα τον περιορισμό των λιγνιτικών μονάδων παραγωγής ιδίως στην χώρα μας, θα οδηγήσει σε μείωση ή και μηδενισμό της παραγόμενης ποσότητας ιπτάμενης τέφρας. (GCCA, n.d.)

4.2.3. Εναλλακτικό κλίνκερ

Στοχεύοντας επιπλέον στην μείωση των εκπομπών διεργασιών από την ρίζα τους, από τα πιο σημαντικά μέτρα είναι η υποκατάσταση των ανθρακικών υλικών που εισάγονται στον κλίβανο και υφίστανται έψηση με αποτέλεσμα την έκλυση του CO₂. Το βασικό υλικό που εισάγεται στον κλίβανο είναι ο ασβεστόλιθος οποίος είναι υπεύθυνος για το μεγαλύτερο μέρος των εκπομπών διεργασίας. Η υποκατάσταση του πραγματοποιείται με την χρήση υλικών που δεν περιέχουν άνθρακα και άρα δεν εκλύουν CO₂.

Το τυπικό τσιμέντο Portland περιέχει τέσσερις βασικές ορυκτολογικές φάσεις οι οποίες είναι και αυτές που καθορίζουν τα τεχνικά χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος, όπως είναι η αντοχή και η ανθεκτικότητα. Οι φάσεις αυτές καθώς και η τυπική τους σύσταση στο τσιμέντο Πόρτλαντ παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3 (Van Oss, 2005):

Πίνακας 4.3 Ορυκτολογικές φάσεις τσιμέντου Portland

Περιγραφή	Χημικός τύπος	Σημειογραφία ομάδων οξειδίου	Σύντομη σημειογραφία	Τυπικό Ποσοστό
Πυριτικό τριασβέστιο (Αλίτης)	Ca ₃ SiO ₅	(CaO) ₃ SiO ₂	C3S	50-70%
Πυριτικό διασβέστιο (Μπελίτης)	Ca ₂ SiO ₄	(CaO) ₂ SiO ₂	C2S	10-30%
Αργιλικό τριασβέστιο	Ca ₃ Al ₂ O ₆	(CaO) ₃ Al ₂ O ₃	C3A	3-13%
Αργιλοσιδηρικό τετρασβέστιο	Ca ₄ Al ₂ Fe ₂ O ₁₀	(CaO) ₄ Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	C4AF	5-15%
Θεικό ασβέστιο (Γύψος)	CaSO ₄ 2H ₂ O ₁₀	(CaO) (SO ₃) (H ₂ O) ₂	-	3-7%

Οι εναλλακτικές υποκατάστασης που ακολουθούν βασίζονται στις διαφορετικές συστάσεις σε αυτές τις φάσεις.

Ενεργό πλούσιο σε μπελίτη Portland κλίνκερ

Τα ενεργά πλούσια σε μπελίτη Portland κλίνκερ (RBPC: Reactive belite-rich Portland clinker) είναι κλίνκερ που έχουν αυξημένη ποσότητα ενεργού μπελίτη σε σχέση με το κλίνκερ Portland και χαμηλότερη ποσότητα (ακόμα και μηδενική) σε αλίτη, σε ποσοστά 65-90% και μικρότερο από 35% αντίστοιχα. Τα RBPC κλίνκερ απαιτούν μικρότερες ποσότητες ασβεστόλιθου στη φαρίνα και χαμηλότερη θερμοκρασίες έψησης, περίπου 100°C, σε σύγκριση με το συμβατικό κλίνκερ Portland (Gartner & Sui, 2018). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση των συνολικών εκπομπών από την παραγωγή του τσιμέντου καθώς η μειωμένη ποσότητα ασβεστολίθου μειώνει τις εκπομπές διεργασιών ενώ η χαμηλότερη θερμοκρασία έψησης οδηγεί σε εξοικονόμηση ενέργειας και χαμηλότερες απαιτήσεις σε καύσιμα. Εκτός από τις μειωμένες εκπομπές, επιπλέον πλεονεκτήματα εντοπίζονται κατά την χρήση των τσιμέντων αυτών. Το σκυρόδεμα με RBPC κατά την ωρίμανση του παράγει λιγότερη θερμότητα, με αποτέλεσμα να υφίσταται μικρότερη συρρίκνωση και να αποκτά μεγαλύτερη αντοχή στο ράγισμα (GCCA, n.d.). Επιπλέον, το τσιμέντο αυτό απαιτεί μικρότερη ποσότητα νερού για την δημιουργία του σκυροδέματος (Sui et al., 1999).

Μπελιτικό ασβεστικό θειοαλουμινικό κλίνκερ

Το Μπελιτικό ασβεστικό θειοαλουμινικό κλίνκερ (BCSA: Belite calcium sulfoaluminate) είναι τσιμέντα που έχουν ως κύρια φάση τον μπελίτη, γελιμίτη και γύψο (ECRA, 2017). Για την παραγωγή τους απαιτούν υψηλές ποσότητες αλούμινας και υλικών που περιέχουν θείο, γεγονός που αυξάνει σημαντικά το κόστος του υλικού αυτού σε σχέση με το τσιμέντο Portland (Pimraksa & Chindaprasirt, 2018). Εμφανίζει τα ίδια πλεονεκτήματα στην παραγωγή του σε σχέση με τα RBPC, δηλαδή μειωμένο ασβεστόλιθο και χαμηλότερες θερμοκρασίες έψησης, ενώ παράλληλα είναι ιδιαίτερα ψαθυρό με αποτέλεσμα να καθιστά την άλεση του πιο εύκολη απαιτώντας εν τέλει λιγότερη ενέργεια (Quillin, 2001). Επιπρόσθετα, κατά την εφαρμογή του παρατηρείται ταχεία πήξη επιτυγχάνοντας υψηλή πρόιμη αντοχή και ταχύτερη κατασκευή, γεγονός το οποίο αν και γενικά είναι επιθυμητό, σε περιπτώσεις στις οποίες απαιτείται παρατεταμένος χρόνος εργασίας δύναται να δημιουργήσει σημαντικά προβλήματα (Adnan et al., 2022).

Κλίνκερ μπελίτη-γελιμίτη-φερρίτη

Τα κλίνκερ μπελίτη-γελιμίτη-φερρίτη (BYF: Belite-Ye'elimite-Ferrite) χαρακτηρίζονται από την παρουσία των ορυκτών φάσεων, μπελίτη, φερρίτη και τον γελιμίτη ($C_4A_3\bar{S}$). Η κύρια διαφορά στη παραγωγική διαδικασία μεταξύ OPC και BYF, η οποία δίνει και σημαντικό πλεονέκτημα του δεύτερου, αφορά τις αναλογίες των πρώτων υλών που ενσωματώνονται στην τροφοδοσία του κλιβάνου (Wang et al., 2023). Ενώ και οι δύο βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στον ασβεστόλιθο ως την κύρια πρώτη ύλη τους, τα κλίνκερ BYF απαιτούν 20-30% λιγότερο ασβεστόλιθο σε σύγκριση με το κλίνκερ Portland (Gartner & Sui, 2018). Αυτή η μειωμένη παρουσία ασβεστόλιθου είναι ο πρωταρχικός παράγοντας πίσω από τις μειωμένες εκπομπές CO₂. Τα κλίνκερ αυτά παράγονται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες μειώνοντας ακόμα περισσότερο τις εκλυόμενες εκπομπές CO₂ κατά την έψηση σε σχέση με το συμβατικό τσιμέντο Portland χαμηλότερη αντίσταση τριβής (Koga et al., 2018). Τα BYF κλίνκερ μπορούν να παραχθούν στις συμβατικές μονάδες στις οποίες παράγεται και το μειώνοντας σημαντικά το κόστος επένδυσης. Τέλος, χρησιμοποιώντας το BYF κλίνκερ το σκυρόδεμα αποκτά βελτιωμένες ιδιότητες όπως αυξημένη αντοχή σε θλίψη και βελτιωμένες πρώιμες αντοχές

Κλίνκερ τσιμέντου με βάση το μαγνήσιο

Τα τσιμέντα με βάση το μαγνήσιο, έχουν ως βασικό δομικό στοιχείο το MgO αντί για το CaO, το οποίο αποτελεί περισσότερο από το 60% της στοιχειακής σύνθεσης του τσιμέντου Portland. Το CaO κατά την παραγωγή του μέσω της διαδικασίας της έψησης προκαλεί σχεδόν 800 g CO₂ ανά κιλό. Επομένως η αντικατάσταση αυτού δύναται να μειώσει σημαντικά τις εκπομπές. Για να είναι ωστόσο μια βιώσιμη επιλογή με πραγματική μείωση των εκπομπών κατά την παραγωγή του τσιμέντου, είναι σημαντικό να εξετάζεται ο τρόπος παραγωγής του. Συνήθως, το MgO παράγεται μέσω έψησης του μαγνησίτη (MgCO₃) (Walling & Provis, 2016), μια διαδικασία κατά την οποία παράγονται μεγάλες ποσότητες CO₂, με αντίστοιχο τρόπο όπως συμβαίνει κατά την έψηση της φαρίνας που περιέχει CaCO₃. Η διαθέσιμη εναλλακτική για την παραγωγή αυτών των οξειδίων είναι από πυριτικό μαγνήσιο (ETH, 2018). Αν και η χρήση των τσιμέντων με βάση το μαγνήσιο υπάρχει από το 1889 (GCCA, n.d.), το ενδιαφέρον στην συνέχεια χάθηκε με αποτέλεσμα να μην έχουν μελετηθεί εκτενώς. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η υποκατάσταση του συμβατικού κλίνκερ με βάση το πυριτικό μαγνήσιο από εναλλακτικές πηγές απαιτεί ενδελεχής έρευνα και δοκιμές καθώς τα οφέλη άλλα και προκλήσεις διαφέρουν σημαντικά ανάλογα με τον τύπο του πετρώματος, τα χαρακτηριστικά του και την επιδιωκόμενη εφαρμογή του.

4.2.4. Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης

Η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης είναι ένα μέτρο για την μείωση των εκπομπών το οποίο βρίσκεται εφαρμογή από τις πιο μεγάλες παραγωγικές μονάδες, όπως είναι ένα διυλιστήριο, έως και ένα απλό γραφείο. Η ενεργειακή βελτίωση στην τσιμεντοβιομηχανία μπορεί να στοχεύσει τόσο στα καύσιμα που καταναλώνονται άμεσα όσο και στην ηλεκτρική ενέργεια (Talaei, 2019). Στα πλαίσια της συγκεκριμένης μελέτης και δεδομένου ότι επικεντρωνόμαστε στις άμεσες εκπομπές, τα μέτρα ενεργειακής βελτίωσης που θα παρουσιαστούν δεν θα αφορούν την εξοικονόμηση της ηλεκτρικής ενέργεια. Ούτως ή άλλως, το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας που καταναλώνεται στην παραγωγή οφείλεται στα καύσιμα που χρησιμοποιούνται στην την θέρμανσης του κλιβάνου και την πραγματοποίηση της έψησης. Η μέση απαιτούμενη θερμική ενέργεια ανέρχεται στα 3,4 GJ ανά τόνο τσιμέντου (Madlool, 2013). Η σημαντικότητα εφαρμογής αυτού του μέτρου ενισχύεται αν αναλογιστούμε ότι η ενεργειακή εξοικονόμηση συμβάλει παράλληλα στην μείωση του κόστους της παραγωγής αλλά και την αύξηση της ανθεκτικότητας της όσον αφορά την παγκόσμια ενεργειακή κρίση.

Οι υπάρχουσες υποδομές και η υφιστάμενη τεχνική κατάσταση του εργοστασίου καθορίζουν τα επίπεδα της απαιτούμενης ενέργειας για την λειτουργία και τα μέτρα που μπορούν να ληφθούν για την μείωση τους. Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζονται ορισμένα μέτρα βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης μίας μονάδας με την αντίστοιχη εξοικονόμηση καυσίμου που μπορεί να επιτευχθεί.

Πίνακας 4.4 Μέτρα ενεργειακής βελτίωσης και εξοικονόμηση καυσίμου

Μέτρο βελτίωσης ενεργειακής απόδοσης	Εξοικονόμηση καυσίμου (GJ/t)	Πηγή
Χρήση εναλλακτικών τσιμέντων	0,05–0,068	ECRA, 2017
Χρήση βελτιωμένων πυρίμαχων υλικών	0,18–0,32	Hollingshead et al., 2009
Συστήματα ενεργειακής διαχείρισης και ελέγχου διεργασιών	0,22	Martin et al., 2001
Χρήση περιστρεφόμενου ψύκτη εσχάρας	0,46–1,86	ECRA, 2007
Βελτιώσεις στο σύστημα καύσης του κλιβάνου	0,015–0,18	Sirchis, 1999
Μετατροπή κλιβάνου προθερμαντήρα σε κλίβανο προθερμαντήρα/προασβεστοποιητή	0,05–0,1	Worrel et al. , 2008

Πυρίμαχα

Το μεταλλικό κέλυφος του κλιβάνου υφίσταται θερμική, χημική και μηχανική καταπόνηση κατά την λειτουργία του κυρίως λόγω της αυξομείωσης της θερμοκρασίας. Τα πυρίμαχα, είναι υλικά με αντοχή στην θερμότητα τα οποία χρησιμοποιούνται για την επένδυση των κλιβάνων προστατεύοντας τους από τις προαναφερθείσες καταπονήσεις. Όταν το πυρίμαχο είναι υψηλής ποιότητας, εμφανίζει παρατεταμένο χρόνο ζωής, με αποτέλεσμα να παρατείνονται οι χρόνοι αντικατάστασης του που θα απαιτήσουν την διακοπή και εκκίνηση της λειτουργίας της παραγωγικής διαδικασίας που επιφέρουν απώλεια θερμότητας. Επομένως η χρήση συγκεκριμένων πυρίμαχων υλικών προσφέρει καλύτερες θερμικές αποδόσεις (Hollingshead et al., 2009).

Χρήση εναλλακτικών τσιμέντων και προσθέτων

Οι θερμικές και κατ' επέκταση ενεργειακές απαιτήσεις της παραγωγής τσιμέντου επηρεάζονται από αρκετούς παράγοντες. Οι φυσικοχημικές ιδιότητες των πρώτων υλών, συμπεριλαμβανομένης της περιεκτικότητας σε υγρασία και της χημικής σύνθεσης, παίζουν καθοριστικό ρόλο. Ομοίως, τα ορυκτολογικά χαρακτηριστικά των πρώτων υλών, όπως οι η

ικανότητα καύσης, επηρεάζουν σημαντικά την απαιτούμενη ενέργεια για την πραγματοποίηση της διάσπασης των ενώσεων που θα δώσουν το κλίνκερ (ECRA, 2017).

Συγκεκριμένα συστατικά που υπάρχουν στην πρώτη ύλη ή εισάγονται στο μείγμα των πρώτης ύλης για να διευκολύνουν το σχηματισμό κλίνκερ μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά τα χαρακτηριστικά της καύσης. Αυτά τα συστατικά, λειτουργώντας ως παράγοντες ροής, έχουν την ικανότητα να μειώνουν το ιξώδες του τήγματος σε μια δεδομένη θερμοκρασία ενώ παράλληλα συνήθως μειώνουν τη θερμοκρασία στην οποία το τήγμα του κλίνκερ ξεκινά τον σχηματισμό του. Επιπλέον, υπάρχουν ενώσεις, οι ορυκτοποιητές (mineralisers), οι οποίες προάγουν τον σχηματισμό του κλίνκερ χωρίς ωστόσο να συμμετέχουν στην αντίδραση (Raina & Janakiraman, 1998).

Συστήματα ενεργειακής διαχείρισης

Απώλεια θερμότητας από τον κλίβανο μπορεί να συμβεί λόγω μη βέλτιστων συνθηκών διεργασίας ή πρακτικών διαχείρισης. Ασταθείς συνθήκες διεργασίας μπορεί να οδηγήσουν σε αυξημένες διακοπές της λειτουργίας του κλιβάνου, γεγονός που θα αυξήσει τη ζήτηση καυσίμου για αναθέρμανση της ζώνης πυροσυσσωμάτωσης. Ο έλεγχος και η αυτοματοποίηση των διεργασιών συμβάλλουν στην ενεργειακή απόδοση βελτιστοποιώντας τη λειτουργία των κλιβάνων τσιμέντου. Τα προηγμένα συστήματα ελέγχου παρακολουθούν συνεχώς διάφορες παραμέτρους, προσαρμόζοντας παράγοντες όπως τους ρυθμούς τροφοδοσίας του καυσίμου, τη ροή αέρα και τις αναλογίες πρώτων υλών για να εξασφαλίσουν βέλτιστες συνθήκες για την παραγωγή κλίνκερ, ελαχιστοποιώντας παράλληλα τις απώλειες ενέργειας. Επιπρόσθετα, ο ενισχυμένος έλεγχος της διαδικασίας επηρεάζει θετικά την ποιότητα του προϊόντος και την ικανότητα του να αλέθεται. Τέτοιες βελτιώσεις μπορούν, με τη σειρά τους, να οδηγήσουν σε πιο αποτελεσματικές διαδικασίες άλεσης του κλίνκερ, δημιουργώντας θετικό αντίκτυπο στη συνολική απόδοση του συστήματος (Martin et al., 2001).

Χρήση περιστρεφόμενου ψύκτη εσχάρας

Ο σκοπός του σταδίου της ψύξης είναι η μείωση της θερμοκρασίας του κλίνκερ σε ένα επίπεδο κατάλληλο για περαιτέρω χειρισμό, αποθήκευση και άλεση. Κατά τη διαδικασία ψύξης, χρησιμοποιείται συνήθως αέρας του περιβάλλοντος για την ανταλλαγή θερμότητας με το θερμό κλίνκερ. Οι κύριοι τύποι ψυκτών κλίνκερ είναι τύπου κινούμενης εσχάρας,

περιστροφικού ή πλανητικού τύπου (Saidur et al., 2011). Οι πλανητικοί και περιστροφικοί ψύκτες χρησιμοποιούν με ακρίβεια την απαιτούμενη ποσότητα αέρα για την ψύξη κλίνκερ, εξυπηρετώντας τόσο τις ανάγκες ψύξης όσο και τις ανάγκες καύσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερες τελικές θερμοκρασίες κλίνκερ, που κυμαίνονται από 120°C έως 200°C πάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, σε αντίθεση με τους ψύκτες με σχάρα, οι οποίοι φτάνουν σε θερμοκρασίες έως και 80°C πάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Οι ψύκτες εσχάρας, ως προηγμένη τεχνολογία ψύξης, αντικαθιστά τους συμβατικούς τύπους ψύξης, επιτρέποντας καλύτερο έλεγχο της θερμοκρασίας κλίνκερ και βελτιωμένη θερμική απόδοση καθώς εξασφαλίζει πιο αποτελεσματική ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ αέρα και κλίνκερ. Οι ψύκτες εσχάρας, από την άλλη πλευρά, χρησιμοποιούν περισσότερο αέρα ψύξης, παράγοντας ένα ψυχρότερο ρεύμα εξαγωγής αέρα που μπορεί να ανακτηθεί και να χρησιμοποιηθεί για διαδικασίες ξήρανσης ή στον περιστροφικό κλίβανο ως δευτερεύων αέρας επιτυγχάνοντας υψηλότερα ποσοστά ανάκτησης (Okoji et al., 2022). Εν τούτοις, αν και η μετατροπή του ψύκτη εσχάρας οδηγεί σε μείωση της απαιτούμενης θερμικής ενέργειας, παράλληλα αυξάνει την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Η συνολική απώλεια θερμότητας των ψυγείων κλίνκερ τελευταίας γενιάς είναι μικρότερη από 0,42 MJ/kg κλίνκερ και η εξοικονόμηση θερμικής ενέργειας στον κλίβανο με τους σύγχρονους ψύκτες σχάρας εκτιμάται ότι είναι έως και 8% (ECRA, 2017).

Μετατροπή κλιβάνου προθερμαντήρα

Η μετατροπή ενός υφιστάμενου κλιβάνου προθερμαντήρα σε κλίβανο προθερμαντήρα/προασβεστοποιητή πολλαπλών σταδίων περιλαμβάνει την προσθήκη ενός προασβεστοποιητή και, όταν είναι εφικτό, ενός επιπλέον προθερμαντήρα. Αυτή η τροποποίηση συνήθως οδηγεί σε αύξηση της δυναμικότητας της μονάδας. Παράλληλα σε μείωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών NO_x, τα οποία αποδίδονται στις χαμηλότερες θερμοκρασίες καύσης στον προασβεστοποιητή. Έχουν αναπτυχθεί εξειδικευμένοι προασβεστοποιητές για να διευκολύνουν τη μετατροπή των υφιστάμενων εγκαταστάσεων, μεγιστοποιώντας την αξιοποίηση της υφιστάμενης υποδομής. Γενικά, ο κλίβανος και τα θεμέλια διατηρούνται, ενώ ο ψύκτης και οι προθερμαντήρες αποτελούνε στοιχεία τα οποία αντικαθίστανται (Worrel et al. , 2008).

Η βελτιστοποίηση αυτών των παραγόντων είναι απαραίτητη για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και τη διασφάλιση βιώσιμων πρακτικών στη βιομηχανία τσιμέντου.

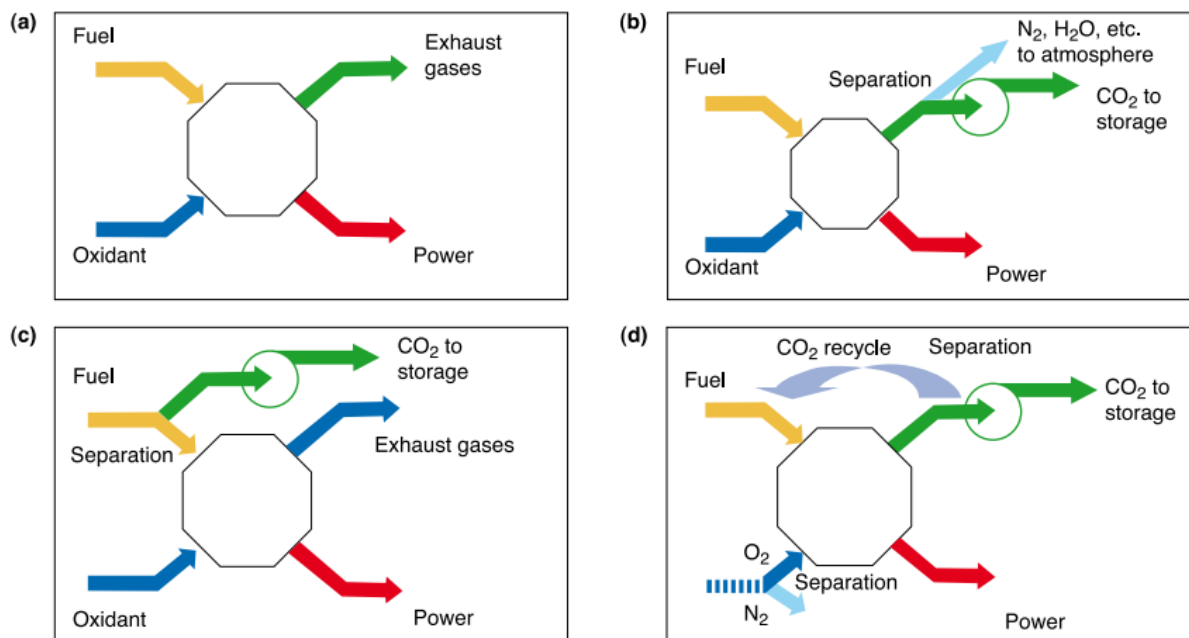
4.2.5. Δέσμευση CO₂

Η δέσμευση CO₂, ή αλλιώς άνθρακα, είναι μια τεχνολογία αιχμής η οποία βρίσκεται στην πρώτη γραμμή της παγκόσμιας μάχης κατά της κλιματικής αλλαγής, με στόχο την αντιμετώπιση των αυξανόμενων επιπέδων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα που παράγονται από τις διάφορες βιομηχανικές δραστηριότητες, μεταξύ των οποίων βρίσκεται και η παραγωγή του τσιμέντου. Αυτή η καινοτόμος προσέγγιση περιλαμβάνει τη δέσμευση και την επακόλουθη αποθήκευση ή ακόμα και χρήση του CO₂ που εκλύεται από διάφορες παραγωγικές διαδικασίες, αποτρέποντας με αυτόν τον τρόπο την απελευθέρωσή τους στην ατμόσφαιρα (IPPC, 2005). Αναχαιτίζοντας τις εκπομπές CO₂ στην πηγή τους, οι βιομηχανίες μπορούν να μετριάσουν σημαντικά το αποτύπωμα άνθρακα, συμβάλλοντας στον πρωταρχικό στόχο της επίτευξης καθαρών μηδενικών εκπομπών.

Η δέσμευση του CO₂ αντιπροσωπεύει ένα βασικό στοιχείο μιας συνολικής στρατηγικής για τη μείωση των εκπομπών άνθρακα και την ευθυγράμμιση με τις παγκόσμιες προσπάθειες για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής. Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, υπάρχει πληθώρα μέτρων τα οποία δύναται να εφαρμοστούν για την μείωση των εκπομπών, από την υποκατάσταση των καυσίμων με εναλλακτικά καύσιμα έως και την αντικατάσταση των πρώτων υλών με άλλες χαμηλότερου περιεχομένου σε άνθρακα. Ωστόσο καθένα από τα παραπάνω μέτρα εμφανίζει περιορισμούς για την εφαρμογή τους στο μέγιστο. Για παράδειγμα, λόγω της ανάγκης πρόσδοσης συγκριμένων ποιοτικών χαρακτηριστικών στα τελικά προϊόντα, δεν είναι δυνατή η πλήρης αντικατάσταση των ανθρακούχων υλικών ή του κλίνκερ, δεδομένης της τεχνολογίας που υπάρχει έως σήμερα. Παράλληλα, ακόμα και με την χρήση των εναλλακτικών καυσίμων, ναι μεν μειώνονται οι εκπομπές καύσεις, ωστόσο ένα ποσοστό συνεχίζει να εκλύεται, με εξαίρεση ωστόσο τη βιομάζα ή ο πράσινο υδρογόνο που βρίσκεται ακόμα σε πρώιμο στάδιο.

Για τον λόγο αυτό, η δέσμευση του CO₂ και στην συνέχεια είτε η αποθήκευση του είτε η χρήση του αποτελεί μια πολύ σημαντική μέθοδο για την μείωση αυτών των εκπομπών που δεν είναι δυνατό να αποφευχθούν. Μέσω αυτών των συστημάτων μπορεί να επιτευχθεί δέσμευση έως και 98% (IEA, n.d.). Οι τεχνολογίες για την αποθήκευση είναι γνωστές και ως Carbon Capture and Storage (CCS) και η χρήσεις του Carbon Capture and Utilization (CCU).

Υπάρχουν πολλές τεχνολογίες δέσμευσης, άλλες πιο ώριμες και άλλες που είναι υπό διερεύνηση. Οι τεχνολογίες δέσμευσης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με τον τρόπο καύσης ως δέσμευση πριν την καύση, δέσμευση μετά την καύση και καύση σε υψηλά επίπεδα συγκέντρωσης οξυγόνου. Η Εικόνα 4.5 αποτελεί την σχηματική απεικόνιση αυτών των τεχνολογιών (IPPC, 2005).



Εικόνα 4.5 Σχηματική απεικόνιση α) καύσης ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ενέργειας β) δέσμευση μετά την καύση γ) δέσμευση πριν την καύση δ) καύση σε υψηλά επίπεδα συγκέντρωσης οξυγόνου

Η επιλογή μιας συγκεκριμένης μεθόδου δέσμευσης άνθρακα στη βιομηχανία τσιμέντου περιλαμβάνει μια εντατική αξιολόγηση λαμβάνοντας υπόψη την πολυπλοκότητα των διαδικασιών παραγωγής τσιμέντου, τους τύπους κλιβάνων και τη συνολική δυναμικότητα της βιομηχανίας. Είναι μια σύνθετη απόφαση που απαιτεί μια ενδελεχή κατανόηση των προκλήσεων και ευκαιριών στον τομέα της παραγωγής τσιμέντου.

4.2.5.1. Δέσμευση πριν την καύση

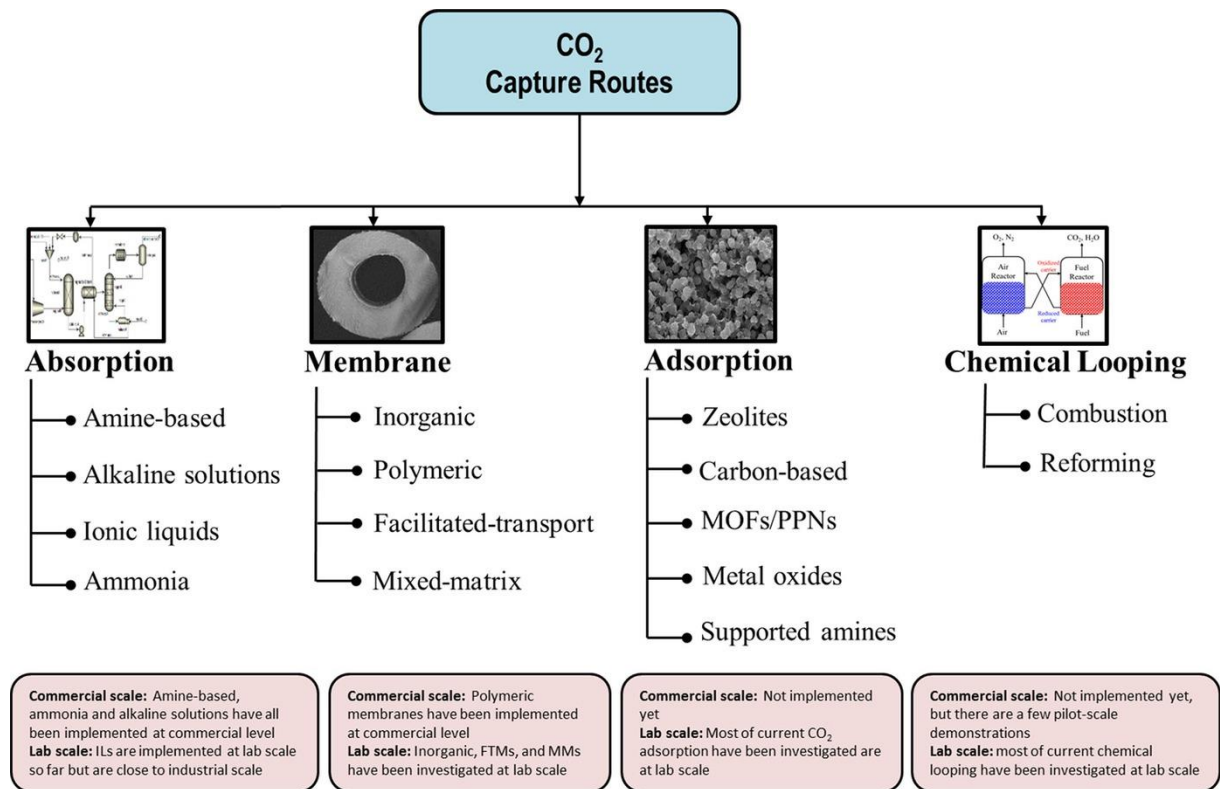
Αυτή η τεχνολογία δέσμευσης του CO₂ περιλαμβάνει την απομάκρυνση του πριν από την καύση, και βασίζεται στην μετατροπή του καυσίμου σε αέριο σύνθεσης, δηλαδή σε μίγμα υδρογόνου και μονοξειδίου του άνθρακα, και στην περαιτέρω μετατροπή του δεύτερου σε CO₂ μέσω της αντίδρασης μετατόπισης (water gas swift reaction) με την χρήση ατμού και καταλυτών (Jansen et al., 2015). Το CO₂ στην συνέχεια διαχωρίζεται από το H₂, με αποτέλεσμα την παραγωγή δύο ρευμάτων, το μεν ρεύμα CO₂ που μπορεί να αποθηκευτεί και να αξιοποιηθεί είτε άμεσα είτε να μετατραπεί σε χρήσιμες ενώσεις και το δε H₂ το οποίο στην συνέχεια καίγεται χωρίς να παράγονται επιπλέον εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (IPCC, 2005).

Αξίζει να σημειωθεί ότι αν και είναι μια τεχνολογία με σχετικά χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις, για να λάβει χώρα στην βιομηχανία του τσιμέντου απαιτεί την τροποποίηση όλου του σταδίου της έψησης και την αναδιαμόρφωση του κλιβάνου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να είναι η λιγότερο ελκυστική επιλογή για καθώς αυξάνονται οι επενδύσεις κεφαλαίου (Ali et al., 2011). Επιπρόσθετα, στην περίπτωση της τσιμεντοβιομηχανίας, αποτελεί λιγότερο ελκυστική τεχνολογία δεδομένου ότι εστιάζει μόνο στις εκπομπές καύσης και αδυνατεί να δεσμεύσει τις εκπομπές διεργασιών που προκύπτουν από τον δεσμευμένο άνθρακα των πρώτων υλών και ελευθερώνονται κατά το στάδιο της έψησης (ECRA, 2017).

4.2.5.2. Δέσμευση μετά την καύση

Η δέσμευση μετά την καύση είναι από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους καθώς δεν απαιτεί την τροποποίηση του εξοπλισμού. Κατά την καύση το ρεύμα των απαερίων που προκύπτει αποτελείται από CO₂, υγρασία, θείου (SO_x), τα νιτρικά οξείδια (NO_x) καθώς και σωματίδια. Για να γίνει η δέσμευση του CO₂, το ρεύμα των απαερίων θα πρέπει να υποστεί προεπεξεργασία ώστε να απομακρυνθούν οι προσμίξεις, όπως είναι τα (SO_x), (NO_x), τα σωματίδια αλλά και η υγρασία, τα οποία δύναται να φθείρουν τον εξοπλισμό και να παρεμποδίσουν την εύρυθμη λειτουργία του (Adam, 2010). Η δέσμευση μετά την καύση μπορεί να πραγματοποιηθεί με έναν μεγάλο αριθμό τεχνολογιών, όπως είναι η απορρόφηση,

η προσρόφηση, με την χρήση μεμβρανών, με κρυογενικό διαχωρισμό αλλά και με calcium looping (Al-Mamoori, 2017).



Εικόνα 4.6 Τεχνολογίες δέσμευσης μετά την καύση

Απορρόφηση

Η απορρόφηση περιλαμβάνει την αντίδραση του CO₂ με έναν διαλύτη σχηματίζοντας μια ασθενώς δεσμευμένη ενδιάμεση ένωση, η οποία έχει την ικανότητα να αναγεννάται παράγοντας το πρωτότυπο διαλύτη και ένα ρεύμα CO₂. Η απορρόφηση διακρίνεται σε χημική ή φυσική ανάλογα με το εάν πραγματοποιείται χημική αντίδραση ή όχι. Τα καυσαέρια τροφοδοτούνται αρχικά σε μια στήλη απορρόφησης, η οποία περιλαμβάνει τον διαλύτη. Το CO₂ των απαερίων αντιδρά με τον διαλύτη και σχηματίζει μια ασθενώς δεσμευμένη ενδιάμεση ένωση η οποία αφού οδηγηθεί στην στήλη εκρόφησης και με εφαρμογή θερμότητας αναγεννά τον διαλύτη και παράλληλα δημιουργεί ένα ρεύμα καθαρού CO₂ (Zhang et al., 2020).

Αυτή η τεχνολογία πλεονεκτεί έναντι των άλλων τεχνολογιών καθώς δεν απαιτεί σημαντική τροποποίηση του εξοπλισμού (Li et al., 2013). Αφού πραγματοποιηθεί η καύση στον ήδη

υπάρχον εξοπλισμό, εξέρχονται από την καμινάδα τα αέρια, υπόκεινται τον κατάλληλο καθαρισμό μέσω αποθέωσης, απονιτροποίησης, και στην συνέχεια οδηγούνται στην μονάδα δέσμευσης. Οι πιο χρησιμοποιούμενες μέθοδοι είναι η χημική απορρόφηση και συγκεκριμένα με αμίνες και αμμωνία (Arstad et al. 2008).

Η χημική απορρόφηση με την χρήση αμινών, η οποία ονομάζεται και έκπλυση με αμίνες (amine scrubbing) έχει κάνει της εμφάνιση της από τα μέσα της δεκαετίας του 1990 στην πετρελαιοβιομηχανία. Οι πιο διαδεδομένοι διαλύτες αμίνης που διατίθενται στο εμπόριο είναι η μονοαιθαλολαμίνης (MEA), διαιθαλολαμίνης (DEA), τριαιθαλολαμίνης (TEA) ή ποτάσα. Από αυτά, η MEA χρησιμοποιείται ευρύτερα για την απορρόφηση CO₂, λόγω της υψηλής εκλεκτικότητας, της γρήγορης αντίδρασης και του χαμηλού κόστους (Leraumier et al., 2011, Muchan et al., 2022 και Narku-Tetteh et al., 2017). Ωστόσο, είναι επίσης ευαίσθητη σε ακαθαρσίες και απαιτεί αποθείωση και απονιτροποίηση των καυσαερίων για να εξασφαλιστεί η βέλτιστη απόδοση. Παρά την αποτελεσματικότητά της, αυτή η διαδικασία αναγέννησης είναι ιδιαίτερα ενεργοβόρα, παρουσιάζοντας τόσο οικονομικές όσο και περιβαλλοντικές προκλήσεις (Goff & Rochelle, 2004).

Η δέσμευση με την χρήση αμμωνίας είναι μια αναδυόμενη τεχνολογία που χρησιμοποιεί μια διαδικασία ψυχρής αμμωνίας για την απομάκρυνση του CO₂ από τα καυσαέρια. Είναι παρόμοια με την δέσμευση με βάση την αμίνη αλλά με την προσθήκη ενός βήματος ψύξης για τα καυσαέρια. Παρέχει μια σειρά πλεονεκτημάτων σε σχέση με την πιο ώριμη τεχνολογία με βάση την αμίνη, όπως χαμηλότερο κόστος και παγκόσμια διαθεσιμότητα υδατικής αμμωνίας, υψηλότερη σταθερότητα παρουσία ακαθαρσιών καυσαερίων, όπως NO_x και Sox (Yeh & Bai, 1999) και χαμηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις (Shakeria et al, 2015). Επιπλέον, το διάλυμα αμμωνίας μπορεί στη συνέχεια να επαναχρησιμοποιηθεί εντός του συστήματος, μετά από έλεγχο για ολίσθηση αμμωνίας, χωρίς την ανάγκη καθαρισμού και συμπλήρωσης που απαιτείται με διαλύτες με βάση την αμίνη, οι οποίοι αποικοδομούνται με την πάροδο του χρόνου. Οι υψηλές συγκεντρώσεις των καυσαερίων των εργοστασίων τσιμέντου αποτελούν έναν βασικό περιορισμό εφαρμογής της μεθόδου στον συγκεκριμένο κλάδο καθώς αυξάνει σημαντικά την πιθανότητα απόφραξης λόγω του σχηματισμού στερεών εντός του εξοπλισμού. Το πρόβλημα αυτό μπορεί ωστόσο να υπερνικηθούν με ορισμένες αλλαγές στη διαδικασία, όπως υψηλότερη αναλογία ροής υγρού προς αέριο και υψηλότερη συγκέντρωση αμμωνίας στον διαλύτη (GCCA, n.d.).

Προσρόφηση

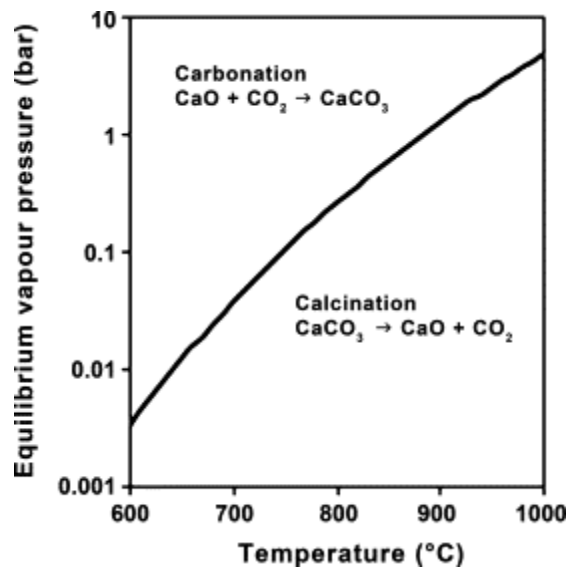
Η προσρόφηση είναι μια φυσική διαδικασία που περιλαμβάνει τη σύνδεση ενός αερίου ή υγρού σε μια στερεή επιφάνεια. Στα προσροφητικά υλικά που θα μπορούσαν να εφαρμοστούν στη δέσμευση CO₂ περιλαμβάνονται ο ενεργός άνθρακας, η αλούμινα, τα μεταλλικά οξείδια και οι ζεόλιθοι (IEA GHG, 1993 και Zhao et al, 2007) τα οποία χαρακτηρίζονται από υψηλό πορώδες. Αφού γίνει η προσρόφηση, το υλικό αυτό πρέπει να αναγεννηθεί. Η αναγέννηση μπορεί να γίνει με δύο τρόπους, είτε με την εφαρμογή θερμότητας είτε με την μείωση της πίεσης. Οι τεχνολογίες αυτές ονομάζονται προσρόφηση με μεταβολής της θερμοκρασίας (TSA) και προσρόφηση ταλάντευσης πίεσης (Pressure Swing Adsorption – PSA) (Ben-Mansour et al., 2016).

Κρυογενικός διαχωρισμός

Ο κρυογενικός διαχωρισμός του CO₂ είναι μια διαδικασία που περιλαμβάνει τη χρήση εξαιρετικά χαμηλών θερμοκρασιών για τον διαχωρισμό του CO₂ από τα μείγματα αερίων. Η αρχή πίσω από τον κρυογενικό διαχωρισμό βασίζεται στο γεγονός ότι διαφορετικά αέρια έχουν διαφορετικές θερμοκρασίες συμπύκνωσης σε συγκεκριμένες πιέσεις (Song et al., 2019). Ψύχοντας ένα μείγμα αερίων σε θερμοκρασίες κάτω από το σημείο συμπύκνωσης του CO₂ μπορεί να διαχωριστεί επιλεκτικά από άλλα αέρια. Το στάδιο της ψύξης καθιστά την συγκεκριμένη τεχνολογία ιδιαίτερα ενεργοβόρα. Επιπρόσθετα, ο κρυογενικός διαχωρισμός απαιτεί τον καθαρισμό του ρεύματος από ενώσεις που θα προκαλέσουν διάβρωση, υπερχειλίση, απόφραξη με αποτέλεσμα την μείωση του ρυθμού μεταφοράς της θερμότητας (Font-Palma et al., 2021).

Calcium looping

Η δέσμευση calcium looping αποτελεί μια προτεινόμενη μέθοδο που περιλαμβάνει την αντίδραση του CO₂ με CaO προς δημιουργία ανθρακικού ασβεστίου, το οποίο στην συνέχεια με εφαρμογή θερμότητας ανακτάται και επαναχρησιμοποιείται. Το CaO αποτελεί έναν φορέα οξυγόνου από τον αέρα στο καύσιμο (Abanades et al., 2015). Βασίζεται στην ισορροπία του ανθρακικού ασβεστίου προς το οξείδιο του ασβεστίου και το διοξείδιο του άνθρακα σε διαφορετικές θερμοκρασίες και πιέσεις (Dean et al., 2011).



Διάγραμμα 4.1 Καμπύλη ισοροπίας την αντίδρασης $\text{CaO} + \text{CO}_2 \leftrightarrow \text{CaCO}_3$

Αποτελείται από δύο στάδια, την ενανθράκωση και την έψηση. Κατά την ενανθράκωση, τα καυσαέρια από την παραγωγή τσιμέντου που περιέχουν το CO_2 έρχονται σε επαφή στο CaO σε θερμοκρασίες περίπου 600-700°C, οδηγώντας στο σχηματισμό ανθρακικού ασβεστίου (CaCO_3). Ακολουθεί το στάδιο της έψησης κατά το οποίο, το CaCO_3 που σχηματίστηκε στο προηγούμενο στάδιο υποβάλλεται σε υψηλές θερμοκρασίες, πάνω από 900°C, για να απελευθερώσει το δεσμευμένο CO_2 και να αναγεννήσει το CaO για επαναχρησιμοποίηση (Han et al, 2022). Ωστόσο το CaO υπόκειται υποβάθμιση και μειώνεται η δραστηριότητα σε κάθε κύκλο χρήσης του απαιτώντας την ενσωμάτωση φρέσκων ροφητών σε τακτά χρονικά διαστήματα για τη διατήρηση της βέλτιστης απόδοσης δέσμευσης. Το πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής σε σύγκριση με την συμβατική καύση είναι ότι το CO_2 διαχωρίζεται εγγενώς από τα άλλα συστατικά των καυσαερίων, δηλαδή το N_2 και το O_2 που δεν αντέδρασε, και επομένως δεν απαιτείται επιπλέον ενέργεια για το διαχωρισμό του (Abanades et al., 2015). Επιπλέον, το ροφητικό υλικό που χρησιμοποιείται, δηλαδή το CaO , συναντάται στον ασβεστόλιθο το οποίο αποτελεί ένα άφθονο και χαμηλού κόστους υλικό (Dean et al., 2011). Ιδιαίτερα σημαντικό είναι ότι τα απόβλητα που προκύπτουν από την διεργασία, πρακτικά ο υποβαθμισμένος ασβεστόλιθος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας στην παραγωγή του τσιμέντου ως πρώτη ύλη (GCCA, n.d).

Μεμβράνες

Το αέριο μίγμα των απαερίων της τσιμεντοβιομηχανίας δύναται να διαχωριστεί με την χρήση ημιπερατών μεμβρανών μέσω διαδικασιών όπως η υπερδιήθηση, η αντίστροφη ώσμωση, ή ηλεκτροδιαπίδυση και ή απλή διαπίδυση επιτυγχάνοντας ποσοστά ανάκτησης μεγαλύτερα του 80% (ECRA, 2017). Οι μεμβράνες χρησιμοποιούνται για τον διαχωρισμό αερίων από τη δεκαετία του 1970 και θεωρούνται πλέον ως μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για την απομάκρυνση του CO₂ από τα καυσαέρια του εργοστασίου τσιμέντου. Η τεχνολογία των μεμβρανών βασίζεται στην ιδιότητα ορισμένων υλικών να εμφανίζουν διαφορετική διαπερατότητα μεταξύ διαφορετικών αερίων (Kohl et al., 1997). Τα υλικά που θα χρησιμοποιούνται πρέπει να έχουν εκλεκτικότητα στο συγκεκριμένο αέριο που πρέπει να διαχωριστεί, στην περίπτωση μας το CO₂. Στα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά κατατάσσονται τα πολυμερικά, τα κεραμικά και υβριδικά υλικά αυτών (ECRA, 2017). Η κινητήρια δύναμη για το διαχωρισμό αποτελεί η μερική διαφορά πίεσης μεταξύ των δύο πλευρών της μεμβράνης με αποτέλεσμα σε τροφοδοσίες χαμηλής πίεσης, όπως η δέσμευση CO₂ από τα καυσαέρια, να απαιτείται η συμπίεση της τροφοδοσίας ή δημιουργία κενού στην παροχή. Συνήθως απαιτείται επίσης ένα στάδιο προεπεξεργασίας για την απομάκρυνση τυχόν υλικών (σκόνη, αερολύματα, ίχνη οργανικών) που θα μπορούσαν να επιμολύνουν τη μεμβράνη και να μειώσουν την λειτουργικότητά της. Η τυπική διάρκεια ζωής μιας μεμβράνης είναι πέντε έως επτά χρόνια (GCCA, n.d.).

Οι μεμβράνες προσφέρουν τη δυνατότητα υψηλής ενεργειακής απόδοσης δέσμευσης μετά την καύση χύδην συγκεντρώσεων διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) υψηλής καθαρότητας (70%) από καυσαέρια με περιεκτικότητα CO₂ άνω του 20%. Η τεχνολογία αυτή σε συνδυασμό με την χημική απορρόφηση ή την κρυογενική χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που απαιτείται ανάκτηση υψηλότερης καθαρότητας (Lin et al., 2022). Οι μεμβράνες προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα. Αρχικά δεν καταναλώνονται χημικά κατά τη διαδικασία και επομένως δεν παράγεται κανένα χημικό απόβλητο. Παράλληλα, η απουσία χημικών σημαίνει ότι δεν απαιτείται στάδιο αναγέννησης, όπως συμβαίνει στις άλλες τεχνολογίες, το οποίο συνήθως είναι ιδιαίτερα ενεργοβόρο. Ωστόσο, η αύξηση της απαιτούμενης ενέργειας σε αυτήν την περίπτωση έγκειται στο γεγονός ότι για να επιτευχθεί η μεγαλύτερη δυνατή απόδοση στον διαχωρισμό είναι απαραίτητο να υπάρχει υψηλή πίεση (GCCA, n.d.).

4.2.5.3. Καύση σε υψηλά επίπεδα συγκέντρωσης οξυγόνου

Αντίστοιχα με την τεχνολογία δέσμευσης μετά την καύση, και στην καύση σε υψηλά επίπεδα συγκέντρωσης οξυγόνου πραγματοποιείται δέσμευση του CO₂ από το ρεύμα των απαερίων. Η καύση ωστόσο σε αυτήν την περίπτωση δεδομένου ότι λαμβάνει χώρα σε περιβάλλον πλούσιο σε O₂, περίπου 95%, έναντι του αέρα που αποτελείται μόλις από 21% O₂ (Paltsev et al. 2021), έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ρεύματος CO₂ υψηλής καθαρότητας, δίνοντας το πλεονέκτημα καθαρισμού του ρεύματος των απαερίων με διεργασίες χαμηλού κόστους. Αυτή η διαδικασία δέσμευσης επιβαρύνεται ενεργειακά και κοστολογικά λόγω της ανάγκης εγκατάστασης και χρήσης μονάδας διαχωρισμού αέρα (Air Separator Unit – ASU), ώστε να παρέχει το ρεύμα υψηλής καθαρότητας O₂ για την πραγματοποίηση της καύσης (Rolfe et al., 2018). Επιπλέον, απαιτείται ένα σύστημα ανάκτησης θερμότητας μέσω της ανακυκλοφορίας των καυσαερίων προκειμένου να αφαιρεθεί η θερμότητα που παράγεται από την καύση του οξυγόνου (Hrdlicka et al., 2019) η οποία δύναται να προκαλέσει την έκλυση επιπλέον ποσοτήτων CO₂.

4.2.5.4. Αποθήκευση μετά την δέσμευση

Η αποθήκευση του δεσμευμένου CO₂ αναδεικνύεται ως ένα κομβικό βήμα στο ταξίδι προς τη βιώσιμη ανάπτυξη καθώς παρέχει μια καθοριστική λύση για τομείς όπου η πλήρης εξάλειψη των εκπομπών παραμένει μια τρομερή πρόκληση. Υιοθετώντας την αποθήκευση ως το θεμέλιο λίθο στη διαδικασία απαλλαγής από τον άνθρακα, οι τσιμεντοβιομηχανίες μπορούν να εγκαινιάσουν μια νέα εποχή περιβαλλοντικά υπεύθυνης παραγωγής, συμβάλλοντας ουσιαστικά σε ένα βιώσιμο μέλλον με χαμηλές εκπομπές άνθρακα. Η αποθήκευση άνθρακα περιλαμβάνει την μόνιμη και ασφαλή αποθήκευση σε υπόγειους γεωλογικούς σχηματισμούς, σε ωκεανούς και μέσω ορυκτοποίησης, αποτρέποντας έτσι την απελευθέρωσή τους στην ατμόσφαιρα.

Γεωλογικοί σχηματισμοί

Στην κατηγορία της αποθήκευσης σε γεωλογικούς σχηματισμούς υπάγονται οι ενεργοί και εξαντλημένοι ταμιευτήρες, οι αλατούχοι υδροφόροι ορίζοντες μεγάλου βάθους καθώς και τα

κοιτάσματα μη εξορυγμένου γαιάνθρακα (Klusman, 2003, Wilson M& Monea, 2004 και van der Burgt et al., 1992).

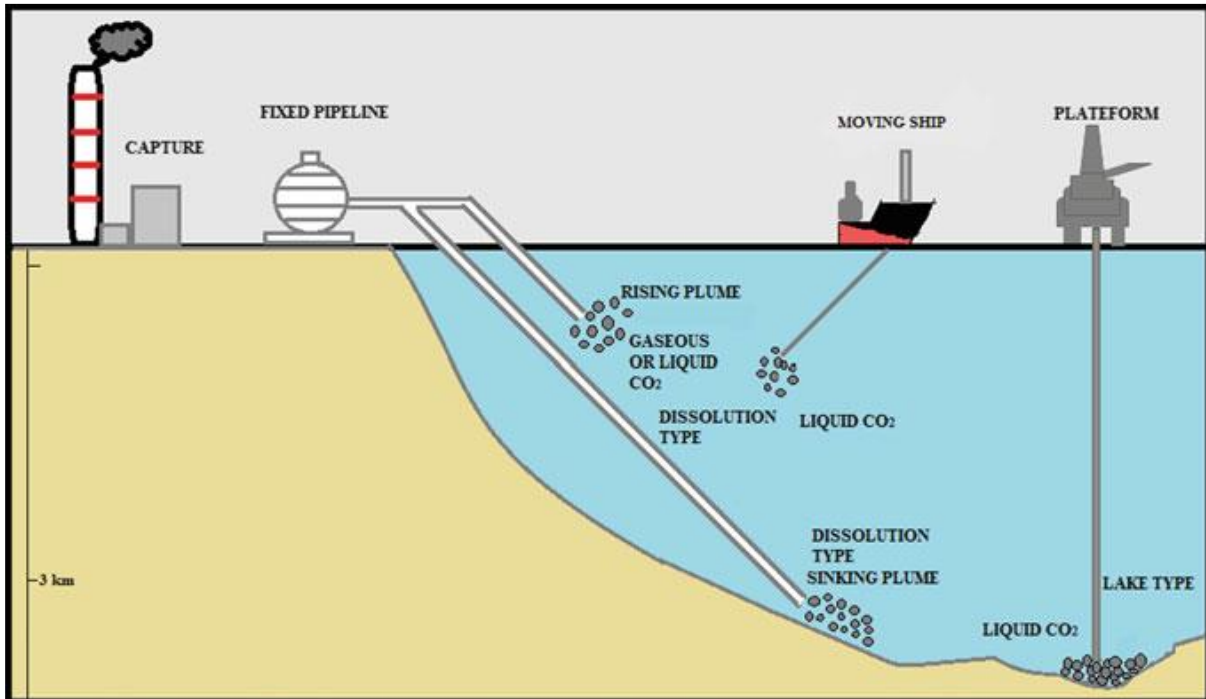
Η αποθήκευση σε ενεργούς ταμιευτήρες ονομάζεται ενισχυμένη ανάκτηση πετρελαίου/αερίου κατά την οποία το CO₂ εγχέεται σε μια δεξαμενή για την επανασυμπύεση του σχηματισμού πετρωμάτων και για την απελευθέρωση τυχόν πετρελαίου/αερίου που μπορεί να είχε παγιδευτεί κατά τον σχηματισμό. Το CO₂ που εγχέεται αναμειγνύεται με το πετρέλαιο και το απελευθερώνει από τον κατά τα άλλα δύσκολο να ανακτηθεί σχηματισμό βράχου. Αυτό το ρεύμα στη συνέχεια αντλείται στην επιφάνεια και το CO₂ που αναδύεται με το πετρέλαιο διαχωρίζεται και ένα μέρος εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα ενώ το υπόλοιπο τροφοδοτείται εκ νέου στον κύκλο για να επαναληφθεί η διαδικασία (Cuéllar-Franca et al. 2015). Με αυτή την τεχνολογία μπορεί να εξαχθεί 30-60% περισσότερο του ακατέργαστου που ήταν αρχικά διαθέσιμο στο πηγάδι, σε σύγκριση με την πρωτογενή και δευτερογενή εξόρυξη που ανακτά το 20-40% επομένως οικονομικά αντισταθμίζει μέρος του κόστους που προκύπτει για την εφαρμογή της (Kharrat et al., 2021). Αντίστοιχη είναι και η διαδικασία που ακολουθείται στους εξαντλημένους ταμιευτήρες. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου, είτε αναφερόμαστε σε ενεργούς είτε σε εξαντλημένους, βασίζεται στο γεγονός ότι οι ταμιευτήρες αυτοί έχουν μελετηθεί εκτενώς επομένως είναι γνωστή η γεωλογική μορφολογία τους και τα χαρακτηριστικά τους ενώ παράλληλα συνήθως διαθέτουν υπάρχουσες υποδομές, όπως πηγάδια και αγωγούς, οι οποίες μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν για CCS. Αυτό μειώνει το κόστος και τις υλικοτεχνικές προκλήσεις που σχετίζονται με τη δημιουργία νέων τοποθεσιών αποθήκευσης (Lifton, 2016).

Η αποθήκευση σε γεωλογικούς σχηματισμούς μπορεί να πραγματοποιηθεί επιπρόσθετα και σε πορώδεις βραχώδεις δομές κορεσμένες με αλμυρό νερό που ονομάζονται βαθιοί αλατούχοι υδροφορείς (IPPC, 2005). Η δυνατότητα αποθήκευσης αυτών των σχηματισμών είναι ιδιαίτερα αυξημένη, καθιστώντας τη μια πολύ σημαντική εναλλακτική για την μόνιμη απομάκρυνση του CO₂ από την ατμόσφαιρα μετά την δέσμευση.

Ωκεανοί

Η απορρόφηση του CO₂ από τους ωκεανούς είναι μια φυσική διαδικασία που παίζει σημαντικό ρόλο στον παγκόσμιο κύκλο του άνθρακα (IPPC, 2005). Οι ωκεανοί αποτελούν την κύρια μακροπρόθεσμη καταβόθρα για τις ανθρωπογενείς εκπομπές CO₂ προσλαμβάνοντας περίπου 2 γιγατόνους άνθρακα ετησίως (Sundquist et al., 2008). Το CO₂

που υπάρχει στην ατμόσφαιρα διαλύεται στην επιφάνεια του ωκεανού, αλληλεπιδρά με το θαλασσινό νερό και σχηματίζει ανθρακικό οξύ (H_2CO_3). Το ανθρακικό οξύ μπορεί στη συνέχεια να διασπαστεί σε διττανθρακικά ιόντα (HCO_3^-) και ανθρακικά ιόντα (CO_3^{2-}).



Εικόνα 4.7 Επισκόπηση της αποθήκευσης σε ωκεανούς (IPPC, 2005)

Η ανθρωπογενής αποθήκευση του CO_2 στον ωκεανό επικεντρώνεται στα βαθύτερα στρώματα των ωκεανών, σε βάθη κάτω από 1.000- 3.000 μέτρα, όπου οι υψηλές πιέσεις και οι χαμηλές θερμοκρασίες σε αυτά τα βάθη μετατρέπουν το CO_2 σε ένα πυκνό ρευστό που θεωρητικά θα μπορούσε να παραμείνει σε σταθερή κατάσταση για μεγάλο χρονικό διάστημα. Ωστόσο η αποθήκευση στους ωκεανούς δεν αποτελεί μια ενδεδειγμένη τεχνολογία για την μείωση των εκπομπών καθώς ενδέχεται να έχει σημαντικές οικολογικές συνέπειες, με βασικότερη την οξίνιση των ωκεανών. Καθώς το CO_2 διαλύεται στο θαλασσινό νερό, μειώνει το pH του ωκεανού, καθιστώντας τον πιο όξινο. Η οξίνιση των ωκεανών επηρεάζει άμεσα πολλούς παράκτιους θαλάσσιους οργανισμούς και υποβαθμίζει τα θαλάσσια οικοσυστήματα (Sundquist et al., 2008).

Μέσω ορυκτοποίησης

Ένας ακόμα τρόπος αποθήκευσης είναι μέσω ορυκτοποίησης (mineralization) κατά την οποία το CO_2 αντιδρά με οξείδια μετάλλων όπως μαγνησίου και ασβεστίου, τα οποία είναι άφθονα στη φύση με τη μορφή πυριτικών ορυκτών (Cuéllar-Franca et al., 2015), για τον σχηματισμό

ανθρακικών αλάτων. Χαρακτηρίζεται ως ασφαλής τεχνολογία καθώς δεν συναντώνται περιπτώσεις διαρροής όπως συμβαίνει στην γεωλογική αποθήκευση CO₂. Ο εξώθερμος χαρακτήρας της αντίδρασης συμβάλλει σε μειωμένη κατανάλωση ενέργειας, ενώ το γεγονός ότι η διαδικασία μπορεί να χρησιμοποιήσει απευθείας καυσαέρια χωρίς να αφαιρεί ακαθαρσίες όπως συμβαίνει στις άλλες τεχνολογίες, την δίνουν ένα σημαντικό προβάδισμα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η αντίδραση αυτή συναντάται στη φύση, ωστόσο με πολύ μεγάλους χρόνους αντίδρασης. Παρά τις συνεχείς προσπάθειες για επιτάχυνση της αντίδρασης, η αργή κινητική παραμένει μια κύρια πρόκληση για την κλιμάκωση της ορυκτοποίησης (Boot-Handford, 2014). Επομένως, οι έρευνες για την αποτελεσματική εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας έχουν επικεντρωθεί στην ενίσχυση της κινητικής με τη χρήση ρευστών με υψηλότερες συγκεντρώσεις CO₂ και αυξάνοντας τις θερμοκρασίες (Sanna, 2014). Η μέθοδος αυτή θα μπορούσε να θεωρηθεί και μέθοδος χρήσης του δεσμευμένου CO₂, όχι απλώς αποθήκευσης, στην περίπτωση που το προϊόν που προκύπτει χρησιμοποιηθεί περαιτέρω, όπως στον κατασκευαστικό κλάδο.

4.2.5.5. Χρήσεις μετά την δέσμευση

Το διοξείδιο του άνθρακα, αφού δεσμευθεί με μία από τις μεθόδους που παρουσιάστηκαν προηγουμένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε άμεσα ως έχει είτε να μετατραπεί σε προϊόντα υψηλής αξίας. Άμεσα χρησιμοποιείται στην βιομηχανία τροφίμων σε πληθώρα εφαρμογών όπως την παραγωγή ανθρακούχων αναψυκτικών και ποτών (Fu et al, 2022), για την διατήρηση των τροφίμων, προσδίδοντας αντιμικροβιακές ιδιότητες για διατήρηση της ποιότητας και παράταση της διάρκειας ζωής (Weng,2005) αλλά και ως διαλύτης σε διαδικασίες εκχύλισης αρωμάτων και στη αφαίρεσης καφεΐνης (Cuéllar-Franca et al., 2015 και Lin et al., 2022). Παράλληλα, το CO₂ βρίσκει άμεση εφαρμογή στους πυροσβεστήρες καθώς αποτελεί το βασικό τους συστατικό (Valluri et al, 2022) ενώ επιπλέον μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ξηρός πάγος παρέχοντας σημαντικά πλεονεκτήματα στην ψύξη έναντι του συμβατικού πάγου. Μια άλλη πολύ ενδιαφέρουσα χρήση του είναι μέσω της εφαρμογής του σε θερμοκηπιακές καλλιέργειες για εμπλουτισμό της ατμόσφαιρας με CO₂ το οποίο είναι απαραίτητο για την φωτοσυνθετική δραστηριότητα και την ανάπτυξη των φυτών (Pal & Anantharaman, 2022).

Ωστόσο, το μεγαλύτερο ποσοστό του δεσμευμένου CO₂ μετατρέπεται σε υψηλής αξίας προϊόντα όπως είναι τα καύσιμα και χημικά μέσω ηλεκτροχημικών, φωτοηλεκτροχημικών και κυρίως καταλυτικών διεργασιών (Joshi, 2014). Δεδομένου ότι το CO₂ είναι ένα θερμοδυναμικά σταθερό μόριο, η μετατροπή του απαιτεί την εφαρμογή μεγάλης ποσότητας θερμότητας και καταλυτών για να επιτευχθούν υψηλές αποδόσεις (Al-Mamoori et al., 2017).

Η μετατροπή του CO₂ σε καύσιμα αποτελεί την βέλτιστη οδό για τη χρήση του CO₂ που δεσμεύεται. Μετά τη χρήση του καυσίμου, το CO₂ απελευθερώνεται εκ νέου στην ατμόσφαιρα, όπου μπορεί να δεσμευθεί για τη σύνθεση του καυσίμου, δημιουργώντας έναν ουδέτερο κύκλο άνθρακα (Fu et al, 2022). Μπορούν να παραχθούν διάφορα καύσιμα μεταξύ των οποίων είναι το μεθάνιο, η μεθανόλη, το αέριο σύνθεσης (μίγμα H₂ και CO), ο διμεθυλαιθέρας (DME) και τα αλκάνια. Οι επικρατέστερες μέθοδοι για την παραγωγή καυσίμων μέσω από το CO₂ είναι η υδρογόνωση και η ξηρή αναμόρφωση του μεθανίου (DRM) (Al-Mamoori, 2017). Κατά την υδρογόνωση, το CO₂ αντιδρά με H₂ με την βοήθεια καταλυτών και ανάλογα τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας δύναται να παραχθεί πληθώρα προϊόντων. Ωστόσο, η πιο σημαντική πρόκληση σε αυτήν την περίπτωση σχετίζεται με την πηγή προέλευσης του υδρογόνου. Όπως αναφέρθηκε και στην περίπτωση της υποκατάστασης των ορυκτών καυσίμων μέσω χρήση υδρογόνου, η παραγωγή του υδρογόνου ενδέχεται να προκαλέσει την έκλυση μεγάλων ποσοτήτων CO₂, εάν δεν επιλεγεί συγκεκριμένη, και κατά προτίμηση πράσινη, μέθοδος παραγωγής. Στον Πίνακα 4.5 παρουσιάζονται μερικά από τα πιο διαδεδομένα προϊόντα και ορισμένες από τις χρήσεις τους (ECRA, 2017, Godin et al. 2021, Zhang & Yang, 2016, Martins et al., 2019, Li et al., 2022, Yang & Wang, 2013 και Piotrowski et al., 2003).

Πίνακας 4.5 Προϊόντα με πρώτη ύλη το CO₂

Προϊόν	Διεργασία Παραγωγής	Χρήση
Ουρία	Αμμωνόλυση	Αγροτικός τομέας - Λίπασμα
Φορμικό οξύ	Καταλυτική Υδρογόνωση	Βυρσοδεψία δέρματος Συντηρητικό στις ζωοτροφές Παραγωγή άλλων χημικών
Πολυανθρακικό	Συμπολυμερισμός	Ηλεκτρονικά εξαρτήματα – μονωτής Εξαρτήματα αυτοκινήτου Κινητά τηλέφωνα Οπτικοί φακοί
Πολυουρεθάνη	συμπολυμερισμός	Κατασκευαστικός τομέας – μονωτικό υλικό
Σαλικυλικό οξύ	Καρβοξυλίωση	Φαρμακευτική – παραγωγή φαρμάκων
Ανθρακικό διμεθύλιο	Εστεροποίηση	Παραγωγή χημικών – Διαλύτης σε βαφές, κόλλες και καθαριστικά
Ανθρακικό προπυλένιο	Εστεροποίηση	Παραγωγή χημικών – Χρώματα, Καθαριστικά, Καλλυντικά Παραγωγή μπαταριών λιθίου - Ηλεκτρολυτικός διαλύτης Απομάκρυνση CO ₂ από το φυσικό αέριο.
Οξικό οξύ	Καρβοξυλίωση	Παραγωγή χημικών – χρώματα, συγκολλητικά Τρόφιμα – πρόσθετο τροφίμων με αντιβακτηριδιακή δράση

Η μετατροπή του CO₂ σε υψηλής αξίας προϊόντα ανήκει σε ένα πολυεπιστημονικό πεδίο που διασταυρώνει τη χημεία, την επιστήμη των υλικών, τη βιολογία και τη μηχανική. Ενώ οι τεχνολογίες είναι ελπιδοφόρες, δεν λείπουν οι προκλήσεις για την ευρεία υιοθέτησή τους. Πρώτα και κύρια, η ενεργειακή απόδοση πολλών διαδικασιών μετατροπής CO₂ παραμένει ένα σημαντικό εμπόδιο. Αυτές οι τεχνολογίες απαιτούν συχνά σημαντικές ποσότητες ενέργειας (Song, 2006), εγείροντας ανησυχίες σχετικά με τη συνολική βιωσιμότητα και την οικονομική τους βιωσιμότητα. Το δεύτερο εμπόδιο βρίσκεται στον οικονομικό τομέα, όπου το κόστος που σχετίζεται με την εφαρμογή τεχνολογιών μετασχηματισμού CO₂ αποτελεί μια τρομερή πρόκληση. Η υπέρβαση αυτού του εμποδίου απαιτεί συντονισμένες προσπάθειες για την ανάπτυξη οικονομικών μεθόδων, τη μείωση της εξάρτησης από ακριβούς καταλύτες και τη βελτιστοποίηση της συνολικής οικονομικής σκοπιμότητας αυτών των μετασχηματιστικών

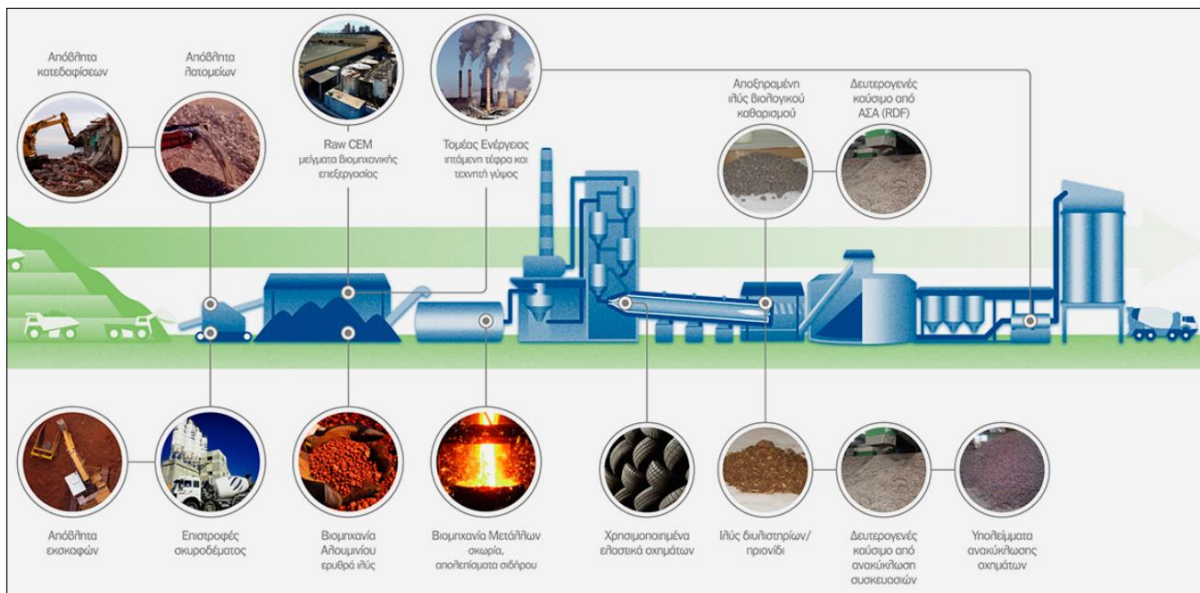
διαδικασιών (Global CO₂ Initiative, 2016). Επιπλέον, μια ακόμα πρόκληση περιστρέφεται γύρω από την ανάπτυξη καταλυτών, μια κρίσιμη παράμετρος της διευκόλυνσης και επιτάχυνσης των αντιδράσεων μετασχηματισμού CO₂. Η εύρεση καταλυτών που είναι ταυτόχρονα αποτελεσματικοί και ανθεκτικοί αποτελεί μια περίπλοκη επιστημονική πρόκληση, καθώς η σταθερότητα και η μεγάλη διάρκεια ζωής είναι πρωταρχικής σημασίας για την εμπορική επιτυχία αυτών των καινοτόμων τεχνολογιών. Τέλος, η επίτευξη υψηλής επιλεκτικότητας στη μετατροπή του CO₂ σε συγκεκριμένα καύσιμα ή προϊόντα αντιπροσωπεύει ένα πολύπλευρο εμπόδιο, καθώς πολλές διαδικασίες μετασχηματισμού παράγουν διαφορετικά μείγματα προϊόντων (Kamkeng et al, 2021). Η επίλυση αυτών των εμποδίων απαιτεί διεπιστημονική συνεργασία και εστιασμένες ερευνητικές προσπάθειες για τη δημιουργία μιας κυκλικής οικονομίας άνθρακα, όπου το CO₂ θεωρείται όχι μόνο ως ρύπος αλλά και ως πολύτιμος πόρος για βιώσιμη παραγωγή προϊόντων.

4.3.Εφαρμοζόμενες πρακτικές των ελληνικών τσιμεντοβιομηχανιών

4.3.1. TITAN

Προτεραιότητα της εταιρείας φαίνεται ότι είναι η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης. Για αυτό και επενδύει εδώ και χρόνια σε μέτρα που βελτιώνουν την θερμική απόδοση της παραγωγικής διαδικασίας, επιτυγχάνοντας μείωση κατά 18% από το 1990 μέσω χρήσης ψυκτών κλίνκερ εσχάρας και νέους καυστήρες. Επιπλέον, στην επίτευξη αυτής της βελτίωσης κύριο ρόλο διαδραματίζουν τα αυτόματα συστήματα λειτουργίας και ποιοτικού ελέγχου που έχει εγκαταστήσει. Η εταιρεία χρησιμοποιεί στα εργοστάσια της στην Ελλάδα Real-Time Optimizers (RTO) οι οποίοι, μέσω της χρήσης αισθητήρων, καταγράφουν και επεξεργάζονται πλήθος παραγωγικών και λειτουργικών δεδομένων που με την σειρά τους αξιοποιούνται για τη βελτιστοποίηση της παραγωγής σε πραγματικό χρόνο. Τέλος, εξέχουσα θέση στην στρατηγική της εταιρείας σχετικά με την μείωση των θερμικών ενεργειακών απαιτήσεων κατέχει η εγκατάσταση ενός προασβεστοποιητή (pre-calcliner) στο εργοστάσιο στο Καμάρι Βοιωτίας (RAWMATHUB.GR, 2023).

Κάνει στρατηγικές συνεργασίες με εταιρείες ώστε να έχει πρόσβαση σε εναλλακτικές πρώτες ύλες για την μείωση της συμμετοχής κλίνκερ στο τελικό προϊόν. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν οι συνεργασία της με την Δ.Ε.Η. και την Περλίτες Αιγαίου για την παροχή ιπτάμενης τέφρας και ποζολάνης αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, συνεργασίες με σκοπό την προώθηση της βιωσιμότητας της παραγωγής πραγματοποιούνται και εντός των ορίων του ομίλου μέσω της θυγατρικής της εταιρείας «INTEPMΠETON» η οποία εφοδιάζει την TITAN με επιστροφές σκυροδέματος για την αξιοποίηση τους ως εναλλακτικές πρώτες ύλες. Παράλληλα επενδύουν στη συνεπεξεργασία, αυξάνοντας το ποσοστό της θερμιδικής υποκατάστασης των ορυκτών καυσίμων με εναλλακτικά καύσιμα. Όλες οι εναλλακτικές πρώτες ύλες και καύσιμα που χρησιμοποιεί η TITAN κατά μήκος της γραμμής παραγωγής της παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.8.



Εικόνα 4.8 Αξιοποίηση εναλλακτικών πρώτων υλών και καυσίμων από την TITAN A.E.

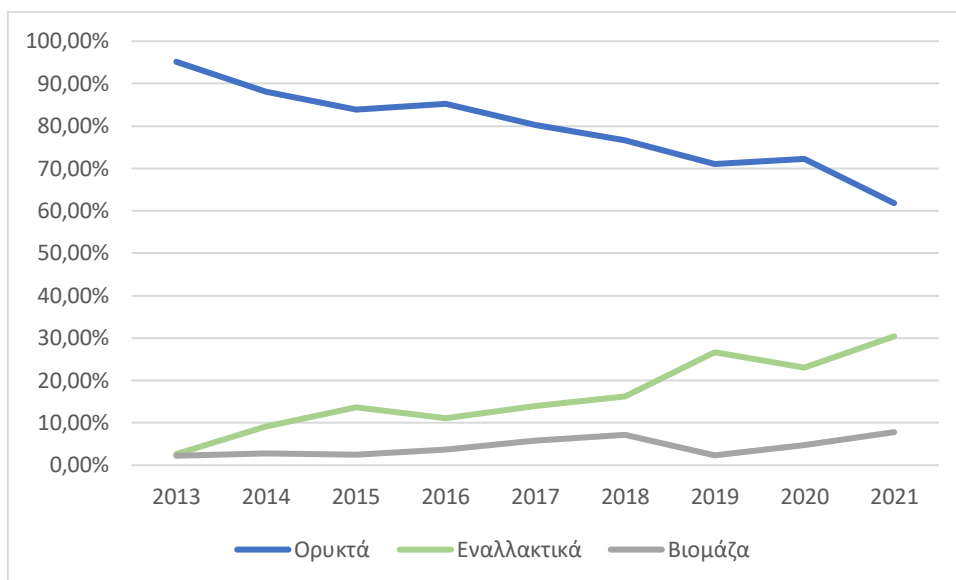
Η TITAN προχωρά και σε πιο καινοτόμες πρωτοβουλίες μέσω της συμμετοχής της σε ευρωπαϊκά προγράμματα, όπως είναι το RECODE, το οποίο σχετίζεται με έργα δέσμευσης του παραγόμενου CO₂. Το έργο RECODE επικεντρώθηκε στη δέσμευση και χρήση διοξειδίου του άνθρακα και στη μετατροπή του σε χημικές ουσίες και υλικά προστιθέμενης αξίας για την παραγωγή υψηλής αξίας προϊόντων τσιμέντου. Αυτή η νέα τεχνολογία εφαρμόστηκε πιλοτικά στο εργοστάσιο του TITAN στο Καμάρι στην Ελλάδα, το οποίο έγινε το πρώτο εργοστάσιο τσιμέντου στη Νοτιοανατολική Ευρώπη που παρουσίασε τη δέσμευση και τη χρήση άνθρακα. Ενώ το έργο RECODE ολοκληρώθηκε το 2022, η TITAN θα

συνεχίσει να χρησιμοποιεί τη μονάδα δέσμευσης για την αξιολόγηση της καινοτόμου απορρόφησης CO₂ από διάφορα υλικά.

Τέλος, αυτό που ξεχωρίζει την TITAN από τις υπόλοιπες εταιρείες του κλάδου στην χώρα είναι το πρωτοποριακό έργο H2CEM. Το έργο αυτό σχετίζεται με την παραγωγή και την χρήση υδρογόνου ως εναλλακτική πηγή ενέργειας στα εργοστάσια τσιμέντου του Δρέπανου, της Ευκαρπίας και του Καμαρίου. Πιο συγκεκριμένα, το υδρογόνο από τις μονάδες αυτές θα είναι πράσινο δηλαδή θα παράγεται μέσω ηλεκτρόλυσης, χρησιμοποιώντας ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Εφαρμόζοντας την τεχνολογία αυτή στα εργοστάσια της στην Ελλάδα ενδέχεται να μειωθούν οι εκπομπές CO₂ κατά 160.000 τόνους ετησίως. (Το 2021 οι εκπομπές από τις μονάδες του Τιτάνα ανέρχονταν στους 2.887.185 τόνους). Η σημασία αυτού του έργου και της πρωτοπορίας της εταιρείας φανερώνεται από το γεγονός ότι έχει ενταχθεί στο Σημαντικό Έργο Κοινού Ευρωπαϊκού Ενδιαφέροντος (Σ.Ε.Κ.Ε.Ε. – Important Project of Common European Interest, IPCEI), αποτελώντας το μοναδικό έργο από την Ελλάδα που κρίθηκε επιλέξιμο για χρηματοδότηση με κρατική ενίσχυση, στο πλαίσιο αξιολόγησης προτάσεων έργων τα οποία αφορούν στις τεχνολογίες υδρογόνου για βιομηχανική χρήση (IPCEI Hy2Use).

4.3.2. Ηρακλής

Η Ηρακλής, ένας εξέχων παίκτης μεταξύ των βιομηχανιών στην Ελλάδα, έχει επιδείξει σταθερή δέσμευση για την περιβαλλοντική βιωσιμότητα της εταιρείας μέσω μιας ολοκληρωμένης στρατηγικής που στοχεύει στη μείωση των εκπομπών CO₂. Βασικός πυλώνας της στρατηγικής αυτής αποτελεί η χρήση εναλλακτικών υλικών τόσο για την παραγωγή κλίνκερ όσο και για την παραγωγή τσιμέντου. Το μέτρο αυτό αποτελείται από δύο συνιστώσες. Από την μία η εταιρεία υποκαθιστά τα ορυκτά καύσιμα με την χρήση εναλλακτικών καυσίμων, συμπεριλαμβανομένης της βιομάζας, όπως είναι διάφορα αστικά και εμποροβιομηχανικά απόβλητα καθώς και παραπροϊόντα άλλων βιομηχανικών, επιτυγχάνοντας μείωση του ποσοστού συμμετοχής των ορυκτών σχεδόν 35% σε σχέση με το 2013, βάσει του ακόλουθου διαγράμματος.



Διάγραμμα 4.2 Διαχρονική εξέλιξη ενεργειακού μίγματος στο κλίνκερ για την Α.Γ.Ε.Τ.

Το 2021 μάλιστα πέτυχαν ποσοστό χρήσης εναλλακτικών καυσίμων 38,2% παρουσιάζοντας αξιοσημείωτη αύξηση σε σχέση με το 2020, όπου ίδιο ποσοστό ήταν λίγο λιγότερο από 28%. Από την άλλη, άλλα εναλλακτικά υλικά εμπλέκονται στην παραγωγή μέσω των πρώτων υλών, όπως είναι προ-επεξεργασμένα απόβλητα και παραπροϊόντα άλλων βιομηχανικών διεργασιών, υποκαθιστώντας φυσικές πρώτες ύλες (βωξίτης, σχιστόλιθος και ασβεστόλιθος), τα οποία παράλληλα παρείχαν τα βασικά οξείδια (σιδήρου, αλουμινίου, πυριτίου και ασβεστίου) που απαιτούνται για τα ενδιάμεσα και τελικά προϊόντα.

Επιπλέον, σημαντική είναι η προσπάθεια της για αύξηση της ενεργειακής της απόδοσης μέσω βελτιστοποίησης των συστημάτων παρακολούθησης, ανάκτησης της ενέργειας που εκλύεται κατά την έψηση και τα επιμέρους στάδια και χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Άλλωστε η εταιρεία εφαρμόζει ένα αποτελεσματικό Σύστημα Περιβαλλοντικής Διαχείρισης, για την ορθή διαχείριση και την αξιολόγηση της συνολικής ενεργειακής και περιβαλλοντικής της επίδοσης.

Σε παρόμοια κατεύθυνση με την TITAN, η Α.Γ.Ε.Τ. προχωράει σε καινοτόμα έργα με στόχο την μείωση των εκπομπών τα οποία χρηματοδοτούνται από την Ευρωπαϊκή Ένωση. Πιο συγκεκριμένα, έχει βάλει σε εφαρμογή το έργο OLYMPUS, το οποίο επικεντρώνεται στις μεγάλης κλίμακας τεχνολογίες δέσμευσης του CO₂ που προκαλείται κατά την παραγωγική διαδικασία. Η εταιρεία στοχεύει μέσω του έργου αυτού να δεσμεύει 1.000.000 τόνους CO₂ ετησίως. Από τα 300 εκ. ευρώ της συνολικής επένδυση, τα 124,5 εκ. ευρώ θα καλυφθούν από

ένα από τα μεγαλύτερα χρηματοδοτικά προγράμματα παγκοσμίως για την ανάπτυξη καινοτόμων τεχνολογιών μείωσης εκπομπών άνθρακα ευρείας κλίμακας, το Ταμείο Καινοτομίας της Ευρωπαϊκής Ένωσης (EU Innovation Fund).

4.3.3. Χάλυψ

Η Χάλυψ, αν και πολύ μικρότερη από τις υπόλοιπες τσιμεντοβιομηχανίες της ελληνικής αγοράς, με λιγότερα από 100 άτομα προσωπικό, ούσα σε ευθυγράμμιση με την στρατηγική της μητρικής σχετικά με την μείωση των εκπομπών, λαμβάνει σημαντικά μέτρα για τον περιορισμό των επιπτώσεων από την παραγωγή των προϊόντων της. Στον πυρήνα των πρωτοβουλιών της είναι οι βελτιώσεις της ενεργειακής απόδοσης στην παραγωγή της. Η πρωτοβουλία αυτή ενισχύεται και από την υιοθέτηση ολοκληρωμένου συστήματος διαχείρισης ενέργειας σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο για την Διαχείριση Ενέργειας ISO 50001:2011. Επιπλέον, στα επενδύει σε έργα που στοχεύουν στην αυξημένη χρήση εναλλακτικών καυσίμων και πρώτων υλών με ουδέτερο ισοζύγιο άνθρακα και διερευνά εναλλακτικές λύσεις για την μείωση του αποτυπώματος άνθρακα με παράλληλη μείωση της εξάρτησης από τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα. Ως μέλος του ομίλου Heidelberg Cement αξιοποιεί την τεχνογνωσία της και την διαθέσιμη τεχνολογία αιχμής ώστε να μειώσει όσο το δυνατόν την κατανάλωση ενέργειας και να αυξήσει της επαναχρησιμοποίησης πρώτων υλών που προέρχονται από απόβλητα. Η Εταιρεία αναγνωρίζοντας τις επιπτώσεις που προκαλεί η παραγωγή του κλίνκερ μέσω της έψησης του ασβεστολίθου διερευνά και εφαρμόζει ενεργά στρατηγικές υποκατάστασης κλίνκερ στο τελικό προϊόν τσιμέντου. Αυτό το καινοτόμο βήμα υπογραμμίζει την αφοσίωσή της στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της παραγωγής τσιμέντου και ενισχύει την ανθεκτικότητα των δραστηριοτήτων της εταιρείας σε ένα ταχέα εξελισσόμενο τοπίο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

5.1.Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθεί η μεθοδολογία που θα ακολουθηθεί για τον υπολογισμό των εκπομπών και την σύγκριση των σεναρίων με σκοπό την μείωση των εκπομπών της του κλάδου της τσιμεντοβιομηχανίας στην Ελλάδα. Θα γίνει αναφορά στις βάσεις δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και στις παραδοχές που υιοθετήθηκαν. Μέρος αυτού του κεφαλαίου αποτελεί η περιγραφή της υφιστάμενης κατάστασης που θα αποτελέσει το έτος σύγκρισης μέσω του εντοπισμός της μελλοντικής ζήτησης του τσιμέντου.

5.2.Βάσεις δεδομένων

Για τον καθορισμό της υφιστάμενης και μελλοντικής κατάστασης καθώς και των υπολογισμών των σχετικών εκπομπών απαιτήθηκε η άντληση στοιχείων από πολλές διαφορετικές βάσεις δεδομένων, με εθνική και παγκόσμια εμβέλεια. Εν τούτοις, σε όλες τις περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία που αφορούν αποκλειστικά την Ελλάδα. Τα στοιχεία που αξιοποιήθηκαν και οι αντίστοιχες πηγές τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1 ενώ οι ακριβείς τιμές τους αποτελούν μέρος του ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.

Πίνακας 5.1 Βάσεις δεδομένων και αντλούμενα στοιχεία

Βάση δεδομένων	Αντλούμενο στοιχείο
Εθνική Έκθεση Απογραφής	Συντελεστής εκπομπής διεργασιών κατά την παραγωγή κλίνκερ
	Συντελεστές εκπομπής ορυκτών καυσίμων
Εκθέσεις βιώσιμης ανάπτυξης	Ποσοστό ορυκτών καυσίμων στην παραγωγή
	Ποσοστό κλίνκερ/τσιμέντου
	Απαιτούμενη θερμική ενέργεια παραγωγής τσιμέντου
World data bank	Πληθυσμός Ελλάδας
	Πρόβλεψη πληθυσμού Ελλάδας
	Εθνικό εγχώριο προϊόν Ελλάδας
	Πρόβλεψη εθνικού εγχώριου προϊόντος Ελλάδας
Ένωση Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος	Παραγωγή τσιμέντου

Εθνική Έκθεση Απογραφής

Η Εθνική Έκθεση Απογραφής (NIR: National Inventory Report) είναι ένα έγγραφο που υποβάλλεται ετησίως από μια χώρα στη Σύμβαση Πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για την αλλαγή του κλίματος (UNFCCC) ως μέρος των υποχρεώσεών της. Η Εθνική Έκθεση Απογραφής παρέχει μια ολοκληρωμένη επισκόπηση των εκπομπών και των απομακρύνσεων των αερίων του θερμοκηπίου μιας χώρας, περιγράφοντας λεπτομερώς τις πηγές και τις καταβόθρες αυτών των αερίων καθώς και την μεθοδολογία υπολογισμού των αντίστοιχων εκπομπών. Εντός της έκθεσης για την Ελλάδα περιέχεται ένα κεφάλαιο αφιερωμένο αποκλειστικά στις εκπομπές από την τσιμεντοβιομηχανία, στο οποίο παρουσιάζονται τα επίπεδα παραγωγής του κλίνκερ στην χώρα και οι αντίστοιχες εκπομπές διεργασιών. Μέσω αυτών των στοιχείων υπολογίστηκε ο συντελεστής εκπομπής του κλίνκερ. Πέρα από τις εκπομπές διεργασιών, η έκθεση περιλαμβάνει στοιχεία σχετικά με τους συντελεστές εκπομπής των ορυκτών καυσίμων για την χώρα, δεδομένο που θα αξιοποιηθεί για τον υπολογισμό των εκπομπών καύσης.

Εκθέσεις Βιώσιμης Ανάπτυξης

Από τις πιο πρόσφατες εκθέσεις βιώσιμης ανάπτυξης των εταιρειών αντλήθηκαν στοιχεία για

- Θερμικές απαιτήσεις παραγωγής κλίνκερ
- Ενεργειακό μείγμα καυσίμων
- Ποσοστό κλίνκερ στο τσιμέντο

Σε αυτό το σημείο να σημειωθεί ότι ο Χάλυψ δεν δημοσιεύει τα παραπάνω στοιχεία, καθώς η δραστηριότητα του στην Ελλάδα είναι περιορισμένη. Οποιαδήποτε στοιχεία δημοσιεύει ο Όμιλος στον οποίο ανήκει είναι σε περιφερειακό επίπεδο, και συγκεκριμένα μέρος της Βόρειας και Ανατολικής Ευρώπης και Κεντρικής Ασίας, καθιστώντας αδυνατή την εξαγωγή των συγκεκριμένων δεδομένων για την Ελλάδα. Επομένως, λόγω και της χαμηλής συνεισφοράς στο σύνολο των εκπομπών (κάτω από 5% των ετήσιων εκπομπών του κλάδου στην χώρα) κρίνεται ότι δεν θα επηρεάσει το αποτέλεσμα. Ούτως ή άλλως από την έκθεση απογραφής της Heidelberg Cement, προκύπτει ότι η στρατηγική της εταιρείας δεν θα αποκλίνει από των άλλων ελληνικών βιομηχανιών της μελέτης.

World Data Bank

Η World Data Bank λειτουργεί ως μια ολοκληρωμένη βιβλιοθήκη παγκόσμιων δεδομένων, προσφέροντας πληθώρα πληροφοριών για διάφορους κοινωνικοοικονομικούς δείκτες, περιβαλλοντικές μετρήσεις και στατιστικές. Η εκτεταμένη αυτή βάση δεδομένων, η οποία αναπτύχθηκε από την Παγκόσμια Τράπεζα, επιτρέπει στους ενδιαφερόμενους, όπως για ερευνητές, να έχουν πρόσβαση σε αξιόπιστες και ενημερωμένες πληροφορίες που είναι απαραίτητες για την ανάλυση των τάσεων, τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων και την παρακολούθηση της προόδου προς τους στόχους βιώσιμης ανάπτυξης. Για τους σκοπούς της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας αντλήθηκαν δεδομένα σχετικά με το ακαθάριστο εγχώριο προϊόν ανά κάτοικό και τον πληθυσμό της Ελλάδας για τα προηγούμενα έτη αλλά και οι προβλέψεις αυτών για τα επόμενα.

Ένωση Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος

Η Ένωση Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, είναι ένας μη κερδοσκοπικός οργανισμός, με μέλη και τις τρεις τσιμεντοβιομηχανίες της Ελλάδος. Η Ε.Τ.Ε. δεν περιορίζεται στην παροχή τεχνικών πληροφοριών για το τσιμέντο αλλά έχει αναλάβει τον ρόλο του πληροφοριοδότη σχετικά με την παραγωγή και την κατανάλωση του

ελληνικού τσιμέντου σε εθνικό και διεθνές επίπεδο. Επομένως, από την Ε.Τ.Ε. αντλήθηκαν στοιχεία σχετικά με την παραγόμενη ποσότητα τσιμέντου στην χώρα.

5.3. Περιγραφή μεθοδολογίας

Η μεθοδολογία έχει ως αφετηρία τον καθορισμό ενός έτους βάσης και την απογραφή των εκπομπών για το συγκεκριμένο έτος, η οποία περιλαμβάνει την ποσοτικοποίηση των εκπομπών από τις διάφορες πηγές. Το έτος βάσης, στο πλαίσιο των στρατηγικών μείωσης των εκπομπών, είναι ένα σημείο αναφοράς για την αξιολόγηση και τη μέτρηση των εκπομπών. Το έτος αναφοράς είναι συνήθως ένα συγκεκριμένο ιστορικό έτος κατά το οποίο οι δραστηριότητες του οργανισμού ή του κλάδου θεωρούνται κανονικές και αντιπροσωπευτικές.

Εν συνεχεία, ορίζεται το σενάριο διατήρησης της υφιστάμενης κατάστασης (συναντάται στην βιβλιογραφία με τον όρο BAU: Business as usual), το οποίο προβάλλει τις μελλοντικές εκπομπές βάσει των τρεχουσών πρακτικών και των τάσεων του κλάδου χωρίς να λαμβάνει υπόψιν οποιαδήποτε παρέμβαση για την μείωση των εκπομπών και η μόνη παράμετρος που λαμβάνεται υπόψιν είναι η ζήτηση του τσιμέντου. Το BAU σενάριο χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς για τη εκτίμηση του αντίκτυπου των δράσεων που θα ληφθούν για την μείωση των εκπομπών.

Επόμενο στάδιο αποτελεί ο καθορισμός των μέτρων μείωσης για κάθε σενάριο που θα ακολουθηθεί, βάσει των δημοσιεύσεων των Ελληνικών τσιμεντοπαραγωγών αλλά και βάσει βιβλιογραφίας. Η μεθοδολογία αυτή βασίζεται στην σύγκριση των εκπομπών με το σενάριο διατήρησης της υφιστάμενης κατάστασης BAU κατά το έτος στόχο καθώς και με το έτος βάσης.

5.3.1. Μοντέλο εκτίμησης εκπομπών

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στην μείωση των άμεσων εκπομπών που προκύπτουν από την διαδικασία παραγωγής του τσιμέντου. Δεν λαμβάνονται υπόψιν οι

έμμεσες εκπομπές που είναι απόρροια της λειτουργίας του εργοστασίου αλλά δημιουργούνται εκτός των ορίων της εγκατάστασης. Πιο συγκεκριμένα, δεν έχουν συμπεριληφθεί εκπομπές που προκαλούνται από την αλυσίδα αξίας όπως είναι η παραγωγή και η μεταφορά των πρώτων υλών, η μεταφορά και διανομή του τελικού προϊόντος ή το τέλος ζωής του. Επιπλέον, δεν αποτελούν μέρος της μελέτης οι έμμεσες εκπομπές από την ηλεκτρική ενέργεια, δηλαδή από την παραγωγή, την μεταφορά και την διανομή της. Τα όρια της μελέτης ταυτίζονται με αυτά που καλύπτονται και από το Ευρωπαϊκό Σύστημα Εμπορίας Ρύπων. Βάσει των ανωτέρω, ο υπολογισμός των συνολικών εκπομπών είναι το αποτέλεσμα του αθροίσματος των εκπομπών καύσης και των εκπομπών διεργασιών κατά την παραγωγή του τσιμέντου.

$$Em_{Total} = Em_{fuel} + Em_{process} \quad (\text{Σχέση 3.1})$$

Όπου:

$$Em_{fuel} = Q \cdot cl \cdot (E_{th} \cdot \sum_1^i EF_{fi} w_i) \quad (\text{Σχέση 3.2})$$

$$Em_{process} = Q \cdot cl \cdot EF_c \quad (\text{Σχέση 3.3})$$

Επομένως:

$$Em_{Total} = Q \cdot cl \cdot (E_{th} \cdot \sum_1^i EF_{fi} w_i + EF_c) \quad (\text{Σχέση 3.4})$$

Όπου:

E_{th} = Ειδική θερμική απαίτηση ανά κιλό κλίνκερ

EF_{fi} = Συντελεστής εκπομπής καυσίμου i

w_i = Ποσοστό συμμετοχής καυσίμου i στο ενεργειακό μίγμα του κλίνκερ

EF_c = Συντελεστής εκπομπής κλίνκερ

cl = Ποσοστό συμμετοχής κλίνκερ στο τελικό προϊόν

Q = Παραγόμενη ποσότητα τσιμέντου

Όλες οι παραπάνω παράμετροι αναφέρονται σε ετήσιο επίπεδο.

5.3.2. Ζήτηση τσιμέντου

Η έννοια της προσφοράς και της ζήτησης είναι βάση της οικονομικής θεωρίας, υπογραμμίζοντας ότι η ποσότητα των παραγόμενων αγαθών πρέπει να ευθυγραμμίζεται με τη ζήτηση των καταναλωτών για να επιτευχθεί ισορροπία στην αγορά. Στη βιομηχανία τσιμέντου, αυτή η αρχή είναι ιδιαίτερης σημασίας, καθώς η ζήτηση οδηγεί τις αποφάσεις παραγωγής. Όταν η ζήτηση για τσιμέντο αυξάνεται, για παράδειγμα λόγω της αύξησης των κατασκευαστικών έργων ή της ανάπτυξης υποδομών, οι τσιμεντοβιομηχανίες πρέπει να αυξήσουν την παραγωγή τους για να καλύψουν αυτή τις αυξημένες απαιτήσεις. Αντίθετα, εάν η ζήτηση μειωθεί, οι παραγωγοί μειώνονται για να αποφύγουν τα προβλήματα που δημιουργούνται από την υπερπαραγωγή, όπως το υπερβολικό απόθεμα και η σπατάλη πόρων. Επομένως, με την παρακολούθηση της ζήτησης του τσιμέντου, οι παραγωγοί μπορούν να διασφαλίσουν ότι τα επίπεδα παραγωγής τους είναι σε αρμονία με τις ανάγκες της αγοράς. Η ζήτηση του τσιμέντου αποτελεί ένα μέγεθος το οποίο επηρεάζεται από πολλές παραμέτρους της οικονομίας, όπως είναι το ΑΕΠ, ο πληθυσμός, το ποσοστό αστικοποίησης και οι επενδύσεις σε πάγια περιουσιακά στοιχεία (Cao et al., 2016). Η πρόβλεψη της μελλοντικής ζήτησης του τσιμέντου αποτελείται από δυο στάδια. Το πρώτο στάδιο απαιτεί την εύρεση της συσχέτισης των προαναφερθέντων μεγεθών με την ζήτηση βάσει στοιχείων προηγούμενων ετών και το δεύτερο την εκτίμηση της ζήτησης μέσω των προβλέψεων για τα επόμενα έτη. Ωστόσο, για τις παραμέτρους αυτές δεν υπάρχουν διαθέσιμες προβλέψεις για τα επόμενα έτη.

Ένας συνηθισμένος και απλοποιημένος τρόπος για την εκτίμηση της ζήτησης του τσιμέντου είναι η σχέση του με το Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν (ΑΕΠ) (GDP: Gross Domestic Product) ανά κάτοικο. Μελέτες έχουν δείξει ότι η καλύτερη συσχέτιση για την ζήτηση του τσιμέντου με το κατά κεφαλήν ΑΕΠ της χώρας είναι μέσω μη γραμμικών αντίστροφών μοντέλων (van Ruijven et al., 2016) της μορφής:

$$C_d = a \cdot e^{\left(\frac{b}{GDP_{pc}}\right)} \quad (\text{Σχέση 3.5})$$

Όπου:

C_d = Ζήτηση τσιμέντου

GDP_{pc} = Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν ανά κάτοικο

$\alpha, b =$ σταθερές

Εν τούτοις, λόγω του μικρού δείγματος (12 ζεύγη δεδομένων από το 2010-2021) και της υψηλής διακύμανσης των δεδομένων στην παραγωγή του τσιμέντου στην χώρα δεν ήταν δυνατή η εξαγωγή της σχέσης μεταξύ της ζήτησης τσιμέντου με το ακαθάριστο εγχώριο προϊόν ανά κάτοικο μέσω αυτών των στοιχείων, καθώς ο συντελεστής συσχέτισης R^2 ήταν μικρότερος από 0,004. Για το λόγο αυτό θα τεθεί ένας σταθερός ρυθμός μεταβολής της ζήτησης, και συγκεκριμένα αύξησης λόγω της έξαρσης της αστικοποίησης που παρατηρείται. Ο ετήσιος ρυθμός αύξησης της ζήτησης ορίστηκε στο 2%, και στην συνέχεια έγινε ανάλυση ευαισθησίας για την αξιολόγηση της επιλογής αυτής και των επιπτώσεων που μπορεί να έχει στα αποτελέσματα.

5.3.3. Μοντελοποίηση μέτρων μείωσης

Σε αυτήν την ενότητα, παρουσιάζονται οι παράμετροι που υιοθετήθηκαν για τη μοντελοποίηση των διαφορετικών μέτρων απαλλαγής από τον άνθρακα. Οι τιμές που παρουσιάζονται αφορούν το 2030, το οποίο αποτελεί το έτος στόχο. Για τα ενδιάμεσα έτη, θα εφαρμοστεί ισόποση μεταβολή από το 2021, έτσι ώστε το 2030 να επιτευχθούν οι τιμές που παρουσιάζονται.

Το σενάριο MS1 αποτελεί το πλέον φιλόδοξο σενάριο, περιλαμβάνοντας καινοτομία και τις τεχνολογίες αιχμής, με στόχο να ξεπεράσει τα όρια των συμβατικών πρακτικών. Τα μέτρα αυτά ενδέχεται να αντιμετωπίσουν μεγαλύτερες προκλήσεις ή αβεβαιότητες εφαρμογής, με αποτέλεσμα να απαιτούν την συνεισφορά τη έρευνας και ανάπτυξης για την επίτευξη τους.

Το MS3 αποτελεί το συντηρητικό σενάριο εστιάζοντας σε μέτρα και στρατηγικές που θεωρούνται συμβατικές, καθιερωμένες και λιγότερο καινοτόμες. Το συντηρητικό σενάριο αντιπροσωπεύει την διαδρομή ελάχιστης αλλαγής και σταδιακών βελτιώσεων, αποφεύγοντας σημαντικές αποκλίσεις από τις υπάρχουσες πρακτικές.

Το σενάριο MS2 αποτελεί το μέσο, το οποίο περιλαμβάνει έναν συνδυασμό αποδεδειγμένων στρατηγικών και μέτρων καινοτομιών που στοχεύουν στη μείωση του αποτυπώματος άνθρακα με εύλογο και εφικτό τρόπο. Το μέσο σενάριο επιτυγχάνει μια πρακτική ισορροπία

μεταξύ φιλοδοξίας και σκοπιμότητας, επιτρέποντας ουσιαστική πρόοδο χωρίς τον υψηλό βαθμό κινδύνου που σχετίζεται με πιο καινοτόμες προσεγγίσεις.

Στον Πίνακα 5.2 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που υιοθετήθηκαν σε κάθε σενάριο μείωσης εκπομπών ενώ στην συνέχεια ακολουθεί η αιτιολόγηση των επιλογών αυτών.

Πίνακας 5.2 Σενάρια μέτρων μείωσης

Μέτρο	Παράμετρος	BAU	MS1	MS2	MS3
Υποκατάσταση ορυκτών καυσίμων	Ποσοστό ορυκτών καυσίμων	67%	45%	50%	60%
Μείωση του λόγου κλίνκερ/τσιμέντου	Ποσοστό κλίνκερ/τσιμέντου	84%	60%	70%	80%
Εναλλακτικό κλίνκερ	Συντελεστής εκπομπών διεργασίας (tnCO ₂ /kg clinker)	0,518	0,492	0,500	0,513
Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης	Απαιτούμενη θερμική ενέργεια (MJ/kg clinker)	3,04	2,89	2,97	3,03
Δέσμευση CO ₂	Ποσότητα δεσμευόμενου CO ₂	0	1 εκ.*	0	0

*Από το 2027 και έπειτα

Υποκατάσταση ορυκτών καυσίμων

Βάσει των γραφειοκρατικών θεμάτων που αντιμετωπίζει η καύση αποβλήτων στην Ελλάδα, συμπληρωματικά με την άσκηση της πίεσης των τοπικών κοινωνιών, δεν ενδέχεται να επιτευχθούν τα ποσοστά υποκατάστασης αντίστοιχα με αυτά των άλλων ευρωπαϊκών χωρών. Εν τούτοις, ακολουθώντας και την πορεία των προηγούμενων ετών θα θεωρηθεί μια μείωση κατά 20%. Κατά την μοντελοποίηση της υποκατάστασης των ορυκτών καυσίμων είναι απαραίτητη προϋπόθεση η διατήρηση του ισοζυγίου ενέργειας. Η υποκατάσταση θα γίνει κατά 75% με εναλλακτικά καύσιμα και 25% με βιομάζα. Η υποκατάσταση με H₂, και συγκεκριμένα με πράσινο H₂ για μηδενικές εκπομπές κατά την καύση του, από τις δημοσιεύσεις των ελληνικών εταιρειών παραγωγής τσιμέντου, φαίνεται ότι δεν θα είναι εφικτή πριν το 2030.

Μείωση του λόγου κλίνκερ/τσιμέντου

Η μείωση του περιεχόμενου κλίνκερ ενδέχεται να επηρεάσει ποιοτικά το τελικό προϊόν. Βάσει μελετών (ECRA, 2017), είναι τεχνικά δυνατό να μειωθεί η αναλογία κλίνκερ προς τσιμέντο

στο 50% χωρίς αλλαγή των θεμελιωδών ιδιοτήτων του τσιμέντου. Έως το 2030, ακόμα και με το φιλόδοξο σενάριο δεν αναμένεται να επιτευχθεί αυτό το ποσοστό. Επομένως, το 60% θα αποτελέσει την σύσταση του τσιμέντου σε κλίνκερ για το φιλόδοξο σενάριο. Για τα υπόλοιπα σενάρια, τα ποσοστά αυτά θα είναι υψηλότερα.

Εναλλακτικό κλίνκερ

Με την χρήση εναλλακτικού κλίνκερ, έναντι του συμβατικού, μειώνονται οι εκπομπές διεργασιών καθώς όπως αναφέρθηκε ανωτέρω τα υλικά αυτά έχουν συνήθως μικρότερο ποσοστό ασβεστολίθου και άρα κατά την έψηση εκλύεται μικρότερη ποσότητα CO₂ από την διάσπαση των ανθρακικών ενώσεων. Έχει θεωρηθεί στα τρία σενάρια μείωση του συντελεστή εκπομπής της έψησης 5%, 3,4% και 1% αντίστοιχα.

Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης

Η διαχρονική μείωση της κατανάλωσης της θερμικής ενέργεια, κατά 18% από το 1990, δηλαδή σε διάστημα τριάντα ετών, θα χρησιμοποιηθεί ως γνώμονας για την θέσπιση του μέγιστου επιπέδου μείωσης των ενεργειακών απαιτήσεων που μπορεί να επιτευχθεί. Επομένως, μείωση της απαιτούμενης θερμικής ενέργειας αγγίζει το 5% για το πιο φιλόδοξο σενάριο, ενώ τα υπόλοιπα σενάρια θα εμφανίσουν μικρότερες μειώσεις.

Δέσμευση CO₂

Η δέσμευση του CO₂ στην χώρα δεν αναμένεται να γίνει πριν το 2027 καθώς ακόμα είναι σε στάδια ερευνών και πιλοτικών εφαρμογών. Ωστόσο από την στιγμή που θα τεθούν σε πλήρη λειτουργία, θα υπάρξουν δυνατότητες δέσμευσης πάνω από 1 εκατομμύριο τόνους CO₂ σε εθνικό επίπεδο. Έτσι, αυτό το 1 εκατομμύριο θα είναι το ποσό δέσμευσης, το οποίο θα εφαρμοστεί μόνο στο φιλόδοξο σενάριο, λόγω της καινοτομίας του μέτρου αυτού.

5.3.4. Έτος βάσης

Το έτος βάσης είναι το κεντρικό σημείο που χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς για τη σύγκριση των εκπομπών σε βάθος χρόνου. Αυτό το έτος αναφοράς παρέχει ένα στιγμιότυπο των αρχικών περιβαλλοντικών συνθηκών, επιτρέποντας μια σαφή κατανόηση του βαθμού στον οποίο οι εκπομπές έχουν αυξηθεί ή μειωθεί. Έτος βάσης της μελέτης θα αποτελέσει το 2021 καθώς είναι η πιο πρόσφατη χρονιά για την οποία υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα για

όλες τις παραμέτρους του μοντέλου. Οι εκπομπές του έτους βάσης θα υπολογιστούν βάσει των τιμών που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3.

Πίνακας 5.3 Παράμετροι έτους βάσης

Παράμετρος		Τιμή
Αναλογία κλίνκερ/τσιμέντο		84%
Θερμική ενέργεια (TJ/τόνο κλίνκερ)		3,65
Συντελεστής εκπομπής διεργασιών (kg CO ₂ /τόνο κλίνκερ)		0,518
Ενεργειακό μείγμα	Άνθρακας	25%
	Πετρελαϊκό κοκ	41%
	Πετρέλαιο	0%
	Φυσικό αέριο	1%
	Εναλλακτικά καύσιμα	29%
	Βιομάζα	3%
	Μαζούτ	0%
	Υδρογόνο	0%
Δέσμευση Άνθρακα		0

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ

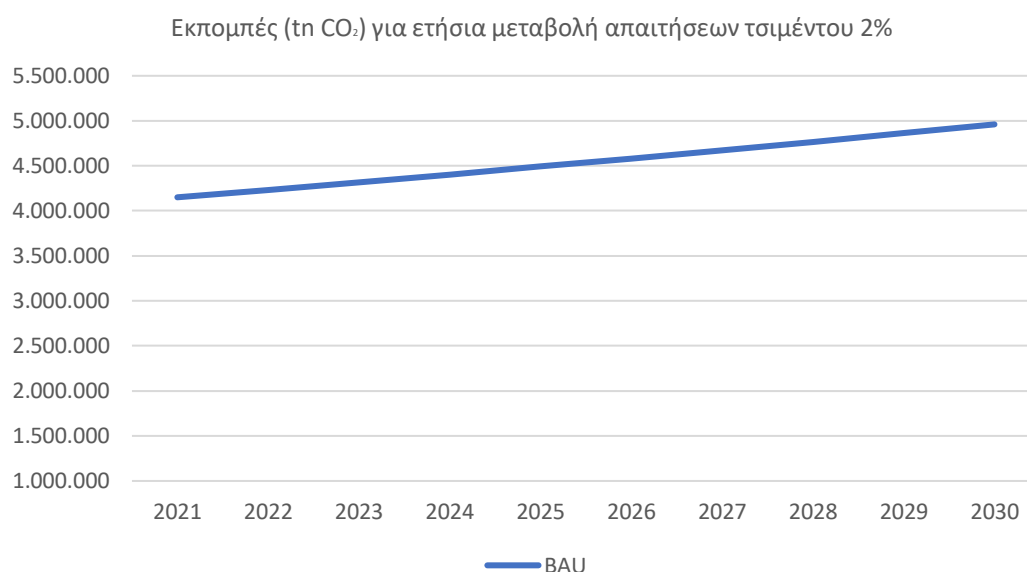
6.1.Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των εκπομπών και θα γίνει η σύγκριση τόσο με το έτος βάσης όσο και με το σενάριο BAU. Επιπλέον, θα πραγματοποιηθεί ανάλυση ευαισθησίας όσον αφορά τις διάφορες παραμέτρους που επηρεάζονται από την εφαρμογή κάθε μέτρου, καθώς και στην ετήσια αύξηση της ζήτησης που επιλέχθηκε ώστε αν αξιολογηθούν οι επιλογές του μοντέλου υπολογισμού και η επιρροή που έχουν στα αποτελέσματα.

6.2.Αποτελέσματα

Αυτή η ενότητα περιλαμβάνει τα αποτελέσματα της ανάλυσης σχετικά την πορεία των εκπομπών CO₂ από τις Ελληνικές τσιμεντοβιομηχανίες για τα διάφορα σενάρια μείωσης, σύμφωνα με τη μεθοδολογία που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 3. Τα αποτελέσματα δίνονται σε μορφή Διαγράμματος για τα έτη 2021-2030, και σε ορισμένες περιπτώσεις σε μορφή πίνακα.

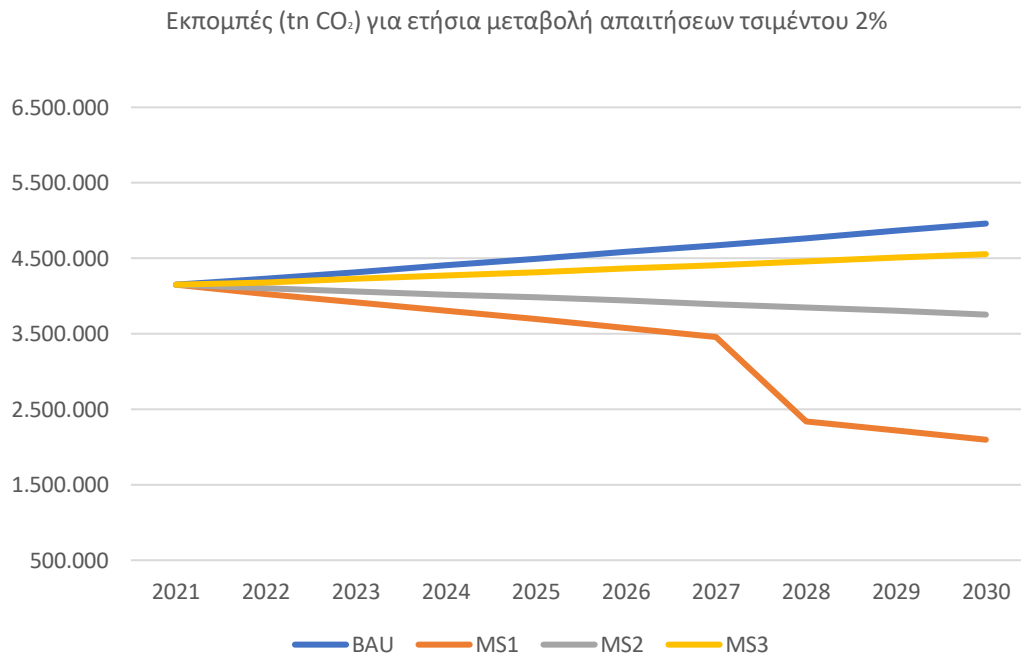
Οι συνολικές εκπομπές κατά την παραγωγή του τσιμέντου στην χώρα για το σενάριο BAU, παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 6.1.



Διάγραμμα 6.1 Διαχρονική εξέλιξη εκπομπών κατά το BAU

Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων, λόγω των περιορισμών που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο σχετικά με την πρόβλεψη της μεταβολής της ζήτησης του τσιμέντου, τέθηκε σταθερή ετήσια αύξηση της παραγόμενης ποσότητας του τσιμέντου στο 2%. Αυτό οδηγεί, κρατώντας σταθερές όλες τις παραμέτρους του μοντέλου (ήτοι ποσοστά μίγματος καυσίμων, ποσοστό περιεχόμενου κλίνκερ στο τσιμέντο, συντελεστή εκπομπών διεργασίας, απαιτούμενη θερμική ενέργεια και ποσότητα δεσμευόμενου CO₂) και βάσει της Σχέσης 3.1, σε γραμμική αύξηση των εκπομπών μέχρι το 2030, καταλήγοντας σε επίπεδα εκπομπών της τάξης των 4.960.248 τόνων CO₂, δηλαδή 16,32% υψηλότερα από τις εκπομπές του έτους βάσης που ανέρχονταν στους 4.150.513 τόνων CO₂. Η επίτευξη πραγματικής μείωσης των εκπομπών σε μια αναπτυσσόμενη βιομηχανία όπως το τσιμέντο, που συνεπάγεται από αύξηση της ποσότητας παραγωγής με την πάροδο των ετών, αποτελεί μια πραγματική πρόκληση και επισημαίνει την πολυπλοκότητα της εξισορρόπησης της οικονομικής ανάπτυξης με την περιβαλλοντική βιωσιμότητα. Καθώς αυξάνεται η ζήτηση για τσιμέντο, αυξάνεται και η εγγενής πρόκληση του μετριασμού των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που συνδέονται με την παραγωγή του. Αυτό καθιστά απαραίτητη την υιοθέτηση μέτρων που θα πρέπει για αρχή να αντιμετωπίσουν την φυσικής τροχιά των εκπομπών που συνοδεύει την ανάπτυξη της βιομηχανίας, δηλαδή την αύξησης τους, και στην συνέχεια την εφαρμογή πιο καινοτόμων τεχνολογιών και βιώσιμων πρακτικών για την περαιτέρω μείωση.

Στο Διάγραμμα 6.2 παρουσιάζεται η διαχρονική εξέλιξη των εκπομπών για όλα τα σενάρια εφαρμογής των μέτρων μείωσης, σε αντιπαραβολή με το σενάριο BAU.



Διάγραμμα 6.2 Διαχρονική Εξέλιξη εκπομπών για κάθε σενάριο μείωσης

Παρατηρείται ότι σε όλες τις περιπτώσεις η αύξηση των εκπομπών είναι γραμμική, με εξαίρεση της περίπτωση του MS1. Αυτό συμβαίνει καθώς η δέσμευση του CO₂, βάσει των διαθέσιμων τεχνολογιών αλλά και υποδομών που έχουν οι ελληνικές εταιρείες παραγωγής τιμμένου, δεν καθίσταται εφικτό να εφαρμοστεί από το πρώτο έτος της μελέτης. Αντιθέτως, ένα ρεαλιστικό σενάριο βάσει των δημοσιευμένων στοιχείων των είναι να τεθεί σε λειτουργία μετά το 2027, δημιουργώντας τελικά αυτό το σκαλοπάτι στο διάγραμμα μεταξύ των ετών 2027 και 2028. Από εκεί και πέρα επειδή, η δεσμευόμενη ποσότητα του CO₂ παραμένει σταθερή, και ίση με 1.000.000, για αυτό και η γραμμικότητα της καμπύλης συνεχίζεται μέχρι το 2030.

Πίνακας 6.1 Σύγκρισή εκπομπών το 2030 με το έτος βάσης

Έτος και σενάριο	Απόλυτες εκπομπές (τόνοι CO ₂)	Μεταβολή σε σχέση με το BY
BY	4.150.513	-
BAU ₂₀₃₀	4.960.248	16,32%
MS1 ₂₀₃₀	2.096.349	-41,41%
MS2 ₂₀₃₀	3.753.558	-8,00%
MS3 ₂₀₃₀	4.554.424	8,14%

Όπως βλέπουμε, ακόμα και με το συντηρητικό σενάριο, επιτυγχάνεται το 2030 μείωση περίπου 8% σε σχέση με το BAU₂₀₃₀ ενώ παράλληλα συγκρινόμενο το MS3₂₀₃₀ με το επίπεδο των εκπομπών το 2021, εμφανίζεται μία αύξηση περίπου στο 8%. Το φιλόδοξο σενάριο, MS1, βλέπουμε ότι επιτυγχάνει ιδιαίτερα υψηλές μειώσεις, περί τα 41% σε σχέση με τις εκπομπές του έτους βάσης. Χαμηλότερα, αλλά εξίσου σημαντικά ποσοστά μείωσης των εκπομπών εμφανίζονται και κατά την εφαρμογή του μέσο σεναρίου, MS2. Η μεταβολή των εκπομπών του σεναρίου αυτού σε σχέση με το έτος βάσεις φτάνει στο 8%. Σχετικά με το συντηρητικό σενάριο, είναι η μοναδική περίπτωση στην οποία παρατηρείται αύξηση των εκπομπών σε σχέση με το έτος βάσης, κατά 8,14%.

Πίνακας 6.2 Σύγκρισή εκπομπών το 2030

Έτος και σενάριο	Μεταβολή σε σχέση με το BAU ₂₀₃₀
MS1 ₂₀₃₀	-57,74%
MS2 ₂₀₃₀	-24,33%
MS3 ₂₀₃₀	-8,18%

Το συντηρητικό σενάριο, MS1, παρουσιάζει χαμηλότερη μείωση των εκπομπών σε σύγκριση με τα πιο φιλόδοξα σενάρια λόγω της απουσίας καινοτόμων μέτρων. Αν και αυτό το σενάριο περιλαμβάνει συμβατικές και αποδεδειγμένες στρατηγικές για τη μείωση των εκπομπών, οι οποίες μπορούν να υιοθετηθούν άμεσα, στερείται την ενσωμάτωση τεχνολογιών αιχμής που θα μπορούσαν να ενισχύσουν σημαντικά τον αντίκτυπο των συνολικών προσπαθειών

μείωσης. Τα καινοτόμα μέτρα, όπως η δέσμευση άνθρακα ή τα ιδιαίτερα υψηλά ποσοστά υποκατάστασης κλίνκερ και ορυκτών καυσίμων, έχουν τη δυνατότητα να οδηγήσουν σε αξιοσημείωτες μειώσεις. Ελλείψει τέτοιων καινοτομιών, το συντηρητικό σενάριο που βασίζεται σε πιο καθιερωμένες πρακτικές περιορίζει τον βαθμό στον οποίο οι εκπομπές μπορούν να περιοριστούν αποτελεσματικά.

Αντίθετα, το φιλόδοξο σενάριο, MS1, ξεχωρίζει θετικά από τα άλλα δύο, το συντηρητικό και το μέσο, λόγω της ενσωμάτωσης αυτών των καινοτόμων μέτρων, με κυριότερο μεταξύ αυτών την τεχνολογία δέσμευσης άνθρακα. Σε αντίθεση με τις συμβατικές στρατηγικές, η δέσμευση άνθρακα αντιμετωπίζει τις εκπομπές στην πηγή τους, δεσμεύοντας το διοξείδιο του άνθρακα πριν απελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα. Επιτυγχάνει πολύ υψηλότερα ποσοστά μειώσεων, τα οποία δεν μπορούν να επιτευχθούν με τα υπόλοιπα μέτρα. Αυτή η τεχνολογία είναι το αποτέλεσμα σημαντικών επενδύσεων στην έρευνα και ανάπτυξη, αντανακλώντας τη δέσμευση για υπέρβαση των ορίων των βιώσιμων πρακτικών στον κλάδο. Ωστόσο, είναι σημαντικό να αναγνωριστεί ότι η εφαρμογή της δέσμευσης άνθρακα συνοδεύεται από υψηλή επένδυση κεφαλαίου και αναμένεται να αυξήσει το λειτουργικό κόστος των μονάδων παραγωγής. Η περίπλοκη φύση των συστημάτων δέσμευσης άνθρακα, η εγκατάστασή τους και η σχετική υποδομή συμβάλλουν σε αυξημένες δαπάνες. Αν και οι οικονομικές επιπτώσεις είναι αναμφίβολες, είναι σημαντικό να αναγνωριστούν τα μακροπρόθεσμα οφέλη μιας τέτοιας επένδυσης, καθώς η δέσμευση άνθρακα διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην επίτευξη ουσιαστικών μειώσεων στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

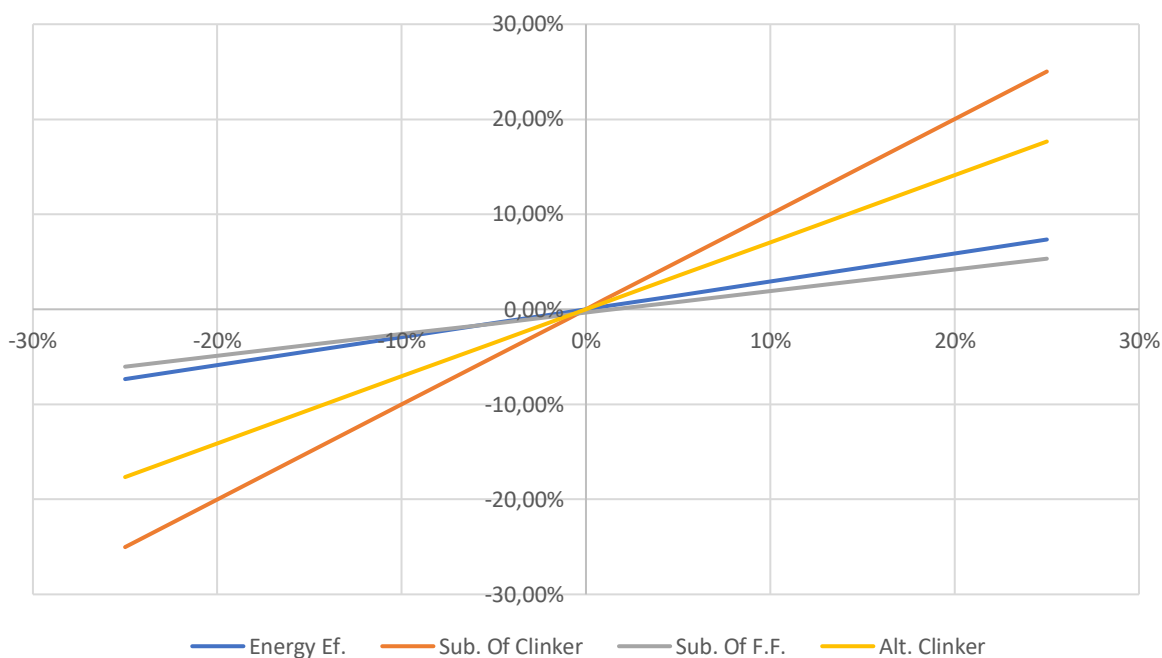
6.3. Ανάλυση ευαισθησίας

Για την ολοκλήρωση της μελέτης θα διενεργηθεί ανάλυση ευαισθησίας για να εκτιμηθεί πώς οι αλλαγές στις παραμέτρους του μοντέλου επηρεάζουν τα αποτελέσματα. Η ανάλυση ευαισθησίας είναι ένα σημαντικό εργαλείο για την ενίσχυση της αποτελεσματικότητας του πλάνου μείωσης και του περιορισμού της αβεβαιότητας. Υποβάλλοντας το μοντέλο υπολογισμού των εκπομπών σε μεταβολές των παραμέτρων του, επιτρέπεται μια ολοκληρωμένη διερεύνηση πιθανών αποτελεσμάτων στα διαφορετικά σενάρια μείωσης. Αυτή η διαδικασία βοηθάει στον εντοπισμό των παραγόντων με τη μεγαλύτερη επιρροή για την επιτυχία του σχεδίου μείωσης, επιτρέποντας έτσι στα ενδιαφερόμενα μέρη που θα λάβουν και

τις σχετικές αποφάσεις να κατανέμουν τους πόρους και τις προσπάθειες στα μέτρα που έχουν τον μεγαλύτερο αντίκτυπο. Επιπλέον, η ανάλυση ευαισθησίας παρέχει πληροφορίες για την ανθεκτικότητα του σχεδίου αποκαλύπτοντας πώς οι αβεβαιότητες στις παραμέτρους μπορεί να διαδοθούν μέσω του μοντέλου και να επηρεάσουν τους στόχους μείωσης των εκπομπών. Αυτή η ανάλυση συμβάλλει στην πληρέστερη κατανόηση των πιθανών κινδύνων και παραλλαγών, δίνοντας τη δυνατότητα στους ενδιαφερόμενους να λαμβάνουν τεκμηριωμένες αποφάσεις, να βελτιώσουν στρατηγικές και να αναπτύξουν ισχυρά μέτρα μετριασμού. Η ανάλυση ευαισθησίας θα εφαρμοστεί τόσο στις παραμέτρους του μοντέλου μέσω των σεναρίων μείωσης όπως και στην ζήτηση του τσιμέντου που επηρεάζει τόσο τις εκπομπές του σεναρίου διατήρησης της υφιστάμενης κατάστασης όσο και των σεναρίων μείωσης των εκπομπών.

6.3.1. Σενάριο μείωσης

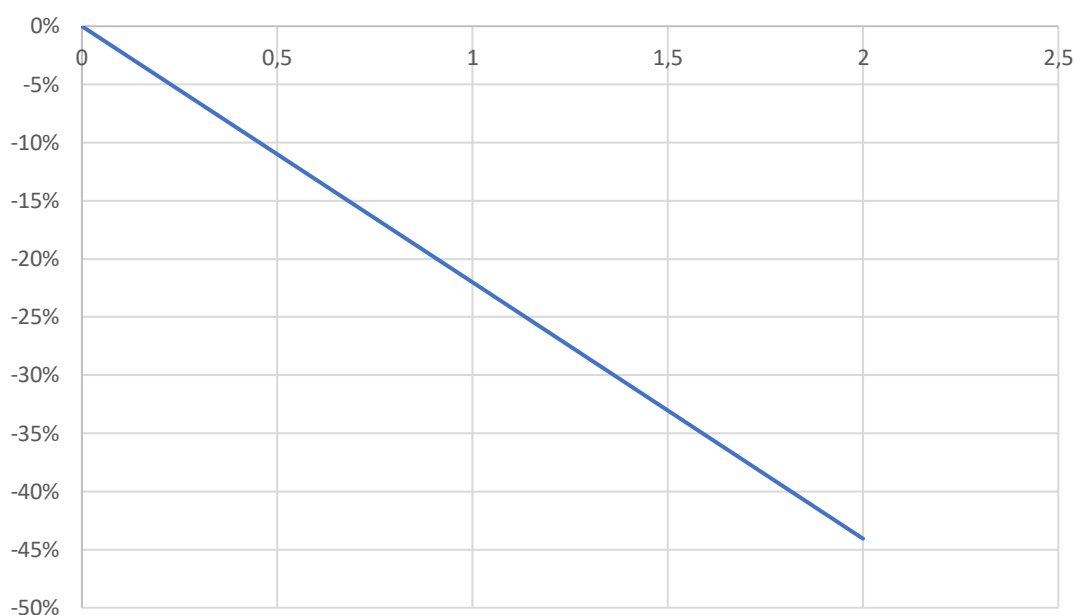
Η ανάλυση ευαισθησίας επιτρέπει την πραγματοποίηση ελέγχου της επίδρασης που έχουν τα διάφορα μέτρα μείωσης των εκπομπών που ενδέχεται να τεθούν σε εφαρμογή. Σε όλα τα μέτρα τέθηκε μεταβολή θετική και αρνητική κατά 1%, 5%, 10% και 25% σε σχέση με τις παραμέτρους του BAU₂₀₃₀, οι οποίες ταυτίζονται με του BY. Η διαδικασία αυτή ακολουθήθηκε σε όλα τα μέτρα μείωσης εκτός από το μέτρο που σχετίζεται με την δέσμευση του CO₂, καθώς στο έτος βάσης υπήρχε μηδενική δέσμευση CO₂, και δεν είναι δυνατός ο έλεγχος με αυτόν τον τρόπο. Για την επίδραση της δέσμευσης του CO₂ θα ακολουθηθεί μια διαφορετική ανάλυση.



Διάγραμμα 6.3 Ανάλυση ευαισθησίας μέτρων μείωσης

Την μεγαλύτερη επίδραση φαίνεται να έχει η συμμετοχή του κλίνκερ στην παραγωγή του τσιμέντου. Αυτό δικαιολογείται καθώς το κλίνκερ επηρεάζει και τις δύο συνιστώσες που απαρτίζουν τις συνολικές εκπομπές, δηλαδή και τις εκπομπές διεργασιών αλλά και τις εκπομπές καύσης, σε αντιδιαστολή με τα υπόλοιπα μέτρα που τα μεν, ενεργειακή εξοικονόμηση και υποκατάσταση ορυκτών καυσίμων, επηρεάζουν μόνο τις εκπομπές καύσης ενώ το δε, εναλλακτικό κλίνκερ, επηρεάζει μόνο τις εκπομπές διεργασιών. Η παραγωγή κλίνκερ συμβάλλει σημαντικά στις εκπομπές CO₂ λόγω της ενεργοβόρας φύσης της και της απελευθέρωσης CO₂ κατά τη διαδικασία πύρωσης. Εν ολίγοις, προκύπτει ότι πιο ευαίσθητα στις μεταβολές είναι μέτρα που έχουν σχέση με το κλίνκερ.

Σχετικά με την υποκατάσταση των ορυκτών καυσίμων, παρατηρείται ότι είναι από τις παραμέτρους που εμφανίζουν την μικρότερη ευαισθησία, θέτοντας αντίστοιχα ποσοστά μεταβολής. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι η υποκατάσταση των ορυκτών καυσίμων με τα εναλλακτικά και βιομαζικά, είναι δυνατόν να επιτύχει ποσοστά μεταβολής πολύ μεγαλύτερα από το 25% που έχει τεθεί στην μελέτη.

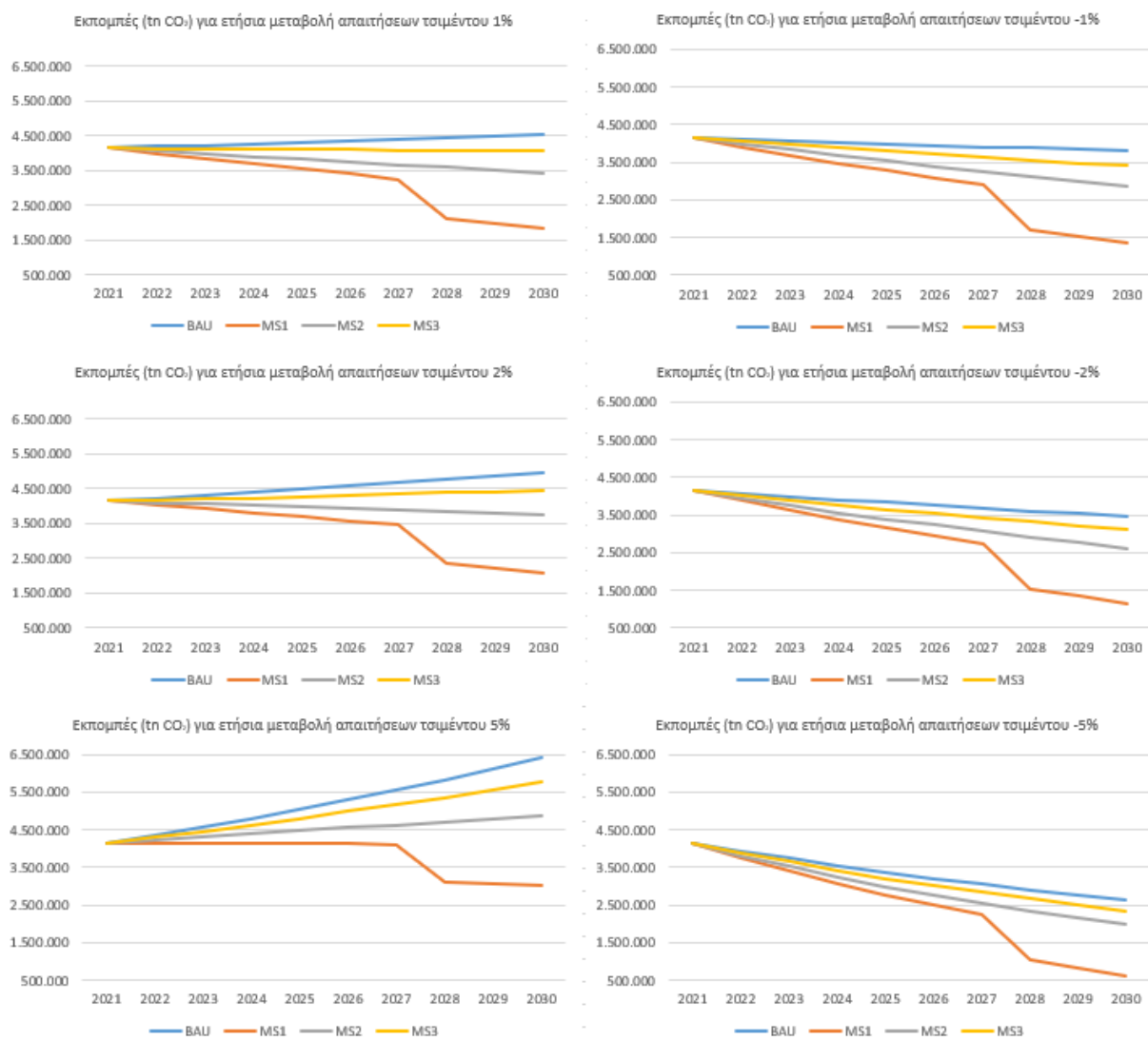


Διάγραμμα 6.4 Ανάλυση ευαισθησίας για την δέσμευση του CO₂

Σχετικά με την επίδραση που έχει η δέσμευση του CO₂, από το Διάγραμμα 6.4 προκύπτει ότι η δέσμευση ακόμα και μισού τόνου εκπομπών CO₂, χωρίς την λήψη άλλων μέτρων, δίνει την δυνατότητα μείωσης των εκπομπών κατά 5% σε σχέση με BAU₂₀₃₀.

6.3.2. Ετήσια ζήτηση τσιμέντου

Ο ετήσιος ρυθμός αύξησης τέθηκε σταθερά στο 2%, λόγω αδυναμίας εύρεσης της σχέσης με το ΑΕΠ και τον πληθυσμό. Για αυτό το λόγο, στην παράγραφο αυτή θα πραγματοποιηθεί ανάλυση ευαισθησίας, ώστε να αξιολογηθεί η επίπτωση που θα έχει στα αποτελέσματα, η επιλογή αυτή. Η ανάλυση ευαισθησίας θα πραγματοποιηθεί για μεταβολές 1%, 2%, 5% τόσο για αύξηση στην ποσότητα όσο και για μείωση.



Διάγραμμα 6.5 Ανάλυση ευαισθησίας ζήτησης τσιμέντου

Αρχικά παρατηρείται ότι όσο πιο μικρός είναι ο ρυθμός αύξησης, τόσο μικρότερες είναι οι εκπομπές που προκύπτουν στο BAU₂₀₃₀. Πολύ υψηλές αυξήσεις στην ζήτηση του τσιμέντου, δηλαδή στο 5%, έχουν ως αποτέλεσμα ιδιαίτερα υψηλές εκπομπές το έτος 2030, και σε κάθε περίπτωση, οι εκπομπές όλων των ετών και για όλα τα σενάρια μείωσης έχουν ως αποτέλεσμα εκπομπές υψηλότερες από αυτές του έτους βάσης. Εξαιρέση αποτελεί το φιλόδοξο σενάριο, MS1, όπου εμφανίζει χαμηλότερα επίπεδα εκπομπών από το έτος βάσης μετά το 2025.

Στα υπόλοιπα σενάρια, όπου δεν υπάρχει η δέσμευση του CO₂ παρατηρείται ότι το ποσοστό της ετήσιας μεταβολής δεν επηρεάζει την ένταση των εκπομπών της παραγωγής.

Αν και πάντα η σύγκριση με το BAU δίνει τα ίδια αποτελέσματα σε όλες τις ετήσιες μεταβολές, παρατηρούμε ότι όσο χαμηλότερος είναι ο ρυθμός μεταβολής τόσο πιο χαμηλά είναι τα επίπεδα των εκπομπών. Αυτό δικαιολογείται άμεσα καθώς μείωση της παραγωγής τσιμέντου συνεπάγεται σε μείωση των απόλυτων εκπομπών.

Πίνακας 6.3 Ανάλυση ευαισθησίας ζήτησης τσιμέντου

Μεταβολή	BAU₂₀₃₀	MS1₂₀₃₀	MS2₂₀₃₀	MS3₂₀₃₀
-5%	-36,98%	-84,75%	-52,31%	-43,43%
-2%	-16,63%	-72,05%	-36,91%	-25,16%
-1%	-8,65%	-67,07%	-30,87%	-18,00%
1%	9,37%	-55,82%	-17,24%	-1,83%
2%	19,51%	-49,49%	-9,56%	7,27%
5%	55,13%	-27,25%	17,39%	39,25%

Μια πιο ακριβής και αντιπροσωπευτική προσέγγιση για την αξιολόγηση της μείωσης των εκπομπών στην παραγωγή τσιμέντου δεν βασίζεται αποκλειστικά στις απόλυτες εκπομπές αλλά στις ειδικές εκπομπές. Οι ειδικές εκπομπές, η αλλιώς ένταση εκπομπών, που μετράται ως εκπομπές ανά μονάδα παραγόμενης μάζας, παρέχει μια πιο λεπτομερή και ολοκληρωμένη αξιολόγηση της περιβαλλοντικής απόδοσης μιας εγκατάστασης. Ενώ η μείωση των όγκων παραγωγής μπορεί πράγματι να οδηγήσει σε μείωση των εκπομπών, ο απώτερος στόχος είναι να επιτευχθούν μειώσεις των εκπομπών, ενώ ταυτόχρονα προωθείται η ανάπτυξη και η ανάπτυξη του κλάδου. Η απλή μείωση του όγκου παραγωγής δεν ευθυγραμμίζεται με τους στόχους του κλάδου για βιώσιμη επέκταση και οικονομική ανάπτυξη. Εστιάζοντας στην ένταση των εκπομπών, η βιομηχανία μπορεί να μετρήσει ορθότερα την αποτελεσματικότητα και τη βιωσιμότητα των διαδικασιών παραγωγής, διευκολύνοντας μια πιο ουσιαστική σύγκριση μεταξύ διαφορετικών περιόδων ή εγκαταστάσεων. Αυτή η προσέγγιση διασφαλίζει ότι οι προσπάθειες μείωσης των εκπομπών αξιολογούνται σε σχέση με την πραγματική παραγωγή, παρέχοντας μια πιο ολοκληρωμένη κατανόηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της παραγωγής τσιμέντου και επιτρέποντας πιο ενημερωμένες στρατηγικές για τη βελτίωση της βιωσιμότητας. Με την εστίαση στην ένταση των εκπομπών, δίνεται έμφαση στη βελτίωση της αποτελεσματικότητας των διαδικασιών παραγωγής, στη βελτιστοποίηση της

χρήσης των πόρων και στην υιοθέτηση καινοτόμων τεχνολογιών. Αυτό διασφαλίζει ότι οι εκπομπές μειώνονται σε σχέση με την ποσότητα του παραγόμενου τσιμέντου, διευκολύνοντας μια πιο βιώσιμη τροχιά για τη βιομηχανία που ευθυγραμμίζεται με ευρύτερους περιβαλλοντικούς και οικονομικούς στόχους.

Ως συνέχεια των ανωτέρω και βάσει του Πίνακα 6.4 προκύπτει ότι η ζήτηση του τσιμέντου δεν παίζει ρόλο στην ένταση των εκπομπών στα σενάρια MS2 και MS3 ενώ στο MS1 φαίνεται να έχει σημαντική επίδραση. Αυτό οφείλεται στην ποσότητα του δεσμευόμενου CO₂, όπου ανέρχεται στο 1 εκ. ανεξάρτητα από την παραγόμενη ποσότητα των εκπομπών. Έτσι, στις δύο ακραίες περιπτώσεις, $\pm 5\%$, όπου οι απόλυτες εκπομπές στο έτος στόχος είναι 632.905 και 3.019.315 αντίστοιχα (μετά την δέσμευση), η δεσμευόμενη ποσότητα αποτελεί το 61% και 25% των παραγόμενων εκπομπών (πριν την δέσμευση), οδηγώντας τελικά σε αυτήν την αξιοσημείωτη μείωση στην ένταση των εκπομπών.

Πίνακας 6.4 Ένταση εκπομπών για διάφορες ετήσιες μεταβολές ζήτησης τσιμέντου

Ετήσια μεταβολή ζήτησης τσιμέντου	BY	BAU₂₀₃₀	MS1₂₀₃₀	MS2₂₀₃₀	MS3₂₀₃₀
-5%	0,612	0,612	0,148	0,463	0,550
-2%	0,612	0,612	0,205	0,463	0,550
-1%	0,612	0,612	0,221	0,463	0,550
1%	0,612	0,612	0,247	0,463	0,550
2%	0,612	0,612	0,259	0,463	0,550
5%	0,612	0,612	0,287	0,463	0,550

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1.Εισαγωγή

Στο τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας αυτής θα παρουσιαστούν τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την μελέτη σχετικά με την αποτελεσματικότητα κάθε μέτρου μείωσης που δύναται να εφαρμοστεί. Επιπλέον, αυτό το κεφάλαιο διερευνά τους περιορισμούς που συναντώνται κατά τη διάρκεια της ερευνητικής διαδικασίας, επικεντρώνοντας στις παραμέτρους που απαιτείται περαιτέρω έρευνα για την αντιμετώπιση των κενών στη γνώση και την ενίσχυση της ευρωστίας των μελλοντικών προσπαθειών.

7.2.Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα της εργασίας έδειξαν ότι τα σχέδια μείωσης των εκπομπών από την παραγωγή τσιμέντου πρέπει να δώσουν μεγάλη έμφαση στη φιλόδοξη και καινοτόμο ενσωμάτωση των τεχνολογιών δέσμευσης άνθρακα. Η φιλόδοξη φύση αυτού του μονοπατιού έγκειται στην πρωτοποριακή τεχνολογία του, η οποία απαιτεί ουσιαστική έρευνα, ανάπτυξη και επενδύσεις. Η δέσμευση άνθρακα περιλαμβάνει την ανάπτυξη τεχνολογιών αιχμής ικανών να δεσμεύουν τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στην πηγή τους κατά τη διαδικασία παραγωγής τσιμέντου και ιδίως από το στάδιο της έψησης. Αυτό απαιτεί σημαντικές προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης για τη βελτίωση και τη βελτιστοποίηση της τεχνολογίας για εφαρμογές βιομηχανικής κλίμακας ειδικά για τις τσιμεντοβιομηχανίες. Η πολυπλοκότητα της δέσμευσης των εκπομπών CO₂ από τις διεργασίες υψηλής θερμοκρασίας που εμπλέκονται στην παραγωγή τσιμέντου την καθιστά τεχνολογικό σύνορο, απαιτώντας καινοτόμες λύσεις μηχανικής. Επιπλέον, η εφαρμογή της δέσμευσης άνθρακα απαιτεί σημαντική οικονομική επένδυση για τη χρηματοδότηση ερευνητικών πρωτοβουλιών, πιλοτικών έργων και την ανάπτυξη της τεχνολογίας σε κλίμακα που μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τις εκπομπές.

Η επιτυχής εφαρμογή των διαφόρων μέτρων μείωσης που παρουσιάζονται στο σχέδιο μείωσης εξαρτάται μέσω Έρευνας και Ανάπτυξης και συνεργασίας με εξωτερικούς φορείς όπως πανεπιστήμια και ερευνητικά κέντρα. Η Έρευνα και Ανάπτυξη χρησιμεύει ως η βάση για την καινοτομία, διαδραματίζοντας κεντρικό ρόλο στην ανάπτυξη και τη βελτίωση των τεχνολογιών και των μεθοδολογιών που περιγράφονται στο σχέδιο μείωσης. Παράλληλα, συνεργασία μεταξύ εταιρειών και πανεπιστημίων και ερευνητικών κέντρων είναι μια δυναμική και συμβιωτική σχέση που έχει τεράστιες δυνατότητες για την προώθηση της καινοτομίας, την αντιμετώπιση των προκλήσεων που συναντώνται κατά την εφαρμογή των και τη βελτίωση των στρατηγικών. Αυτή η συνεργασία αυξάνει την αποτελεσματικότητα του σχεδίου μείωσης αξιοποιώντας τα πιο πρόσφατα ευρήματα της έρευνας, τις τεχνολογικές εξελίξεις και τις ακαδημαϊκές γνώσεις και καλλιεργώντας μια κουλτούρα συνεχούς βελτίωσης. Η ανταλλαγή ιδεών, πόρων και γνώσεων μέσω τέτοιων συνεργασιών διευκολύνει μια ολιστική και διεπιστημονική προσέγγιση, ανοίγοντας τελικά το δρόμο για την επιτυχή εφαρμογή των περιγραφόμενων μέτρων μείωσης. Μέσω της αλληλεπίδρασης μεταξύ των επαγγελματιών του κλάδου και των ακαδημαϊκών ερευνητών δημιουργείτε μια δυναμική ανταλλαγή ιδεών, η οποία οδηγεί συχνά σε νέες προσεγγίσεις και λύσεις που μπορεί να μην ήταν νοητές εντός των ορίων ενός μεμονωμένου τομέα, επιταχύνοντας έτσι τον ρυθμό προόδου στις βιώσιμες πρακτικές.

7.3.Περιορισμοί και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Οι περιορισμοί του τρέχοντος σχεδίου μείωσης των εκπομπών αφορούν 4 βασικούς πυλώνες: τα όρια της μελέτης, την έλλειψη δεδομένων, την απλότητα μοντέλου και την έλλειψη οικονομικών παραμέτρων.

Όρια συστήματος μελέτης

Αντιμετωπίζοντας αποκλειστικά τις άμεσες εκπομπές που προκύπτουν από την παραγωγική διαδικασία του τσιμέντου, παραβλέπουμε σημαντικές πηγές περιβαλλοντικών επιπτώσεων, ιδιαίτερα εκείνες που σχετίζονται με την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και της εφοδιαστικής αλυσίδας. Οι έμμεσες εκπομπές από την ηλεκτρική σήμερα ανέρχονται περίπου στο 1/4 των άμεσων εκπομπών, το οποίο κλάσμα ενδέχεται να αυξηθεί σημαντικά βάσει του

εξηλεκτρισμού, δηλαδή της μετατροπής των υποδομών για χρήση ηλεκτρικής ενέργειας ως κύρια πηγή ενέργειας, μίας διαδικασίας που κερδίζει έδαφος τα τελευταία χρόνια. Ως εκ τούτου, η διεύρυνση του πεδίου εφαρμογής και η συμπερίληψη των έμμεσων εκπομπών που προέρχονται από τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας και ολόκληρης της αλυσίδας αξίας είναι απαραίτητη, επιτρέποντας μας να αναπτύξουμε πιο αποτελεσματικές και ολιστικές στρατηγικές για να ελαχιστοποιήσουμε το συνολικό περιβαλλοντικό μας αποτύπωμα. Η εμπάθυνση σε αυτές τις πρόσθετες διαστάσεις, στοχεύει να βελτιώσει τα σχέδια μείωσης των εκπομπών ώστε να εφαρμοστούν στοχευμένα μέτρα που αντιμετωπίζουν το σύνολο των περιβαλλοντικών μας επιπτώσεων.

Οι έμμεσες εκπομπές που σχετίζονται με την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας συχνά αντιπροσωπεύουν σημαντικό μέρος του συνολικού αποτυπώματος άνθρακα μιας εταιρείας. Επιπλέον, οι εκπομπές της εφοδιαστικής αλυσίδας καλύπτουν ολόκληρο τον κύκλο ζωής των προϊόντων ή των υπηρεσιών μας, συμπεριλαμβανομένης της εξόρυξης πρώτων υλών, της κατασκευής, της μεταφοράς και του τέλους ζωής. Η παραγωγή και η μεταφορά πρώτων υλών μπορεί να είναι ιδιαίτερα επιβαρυντική όταν βασίζεται σε υλικά που δεν εντοπίζονται τοπικά ή αν χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό. Επιπλέον, η μη συμπερίληψη του τέλους ζωής ενδέχεται να οδηγήσει σε παραπλανητικά αποτελέσματα καθώς σε περιπτώσεις όπου η κυκλικότητα της ζωής του προϊόντος είναι περιορισμένη, όπως συμβαίνει σήμερα με το τσιμέντο, δεν λαμβάνονται υπόψη οι υψηλές περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την ταφή αυτών των υλικών. Μη λαμβάνοντας υπόψη αυτές τις έμμεσες εκπομπές, μπορεί να οδηγηθούμε σε ελλιπή κατανόηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της τσιμεντοπαραγωγής και να εμποδίσει την ανάπτυξη αποτελεσματικών στρατηγικών μείωσης. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό που οι εταιρείες του κλάδου στοχεύουν στην μείωση των άμεσων εκπομπών, οι οποίες είναι και αυτές που μπορούν να ελεγχθούν και να μειώσουν, αλλά η μη υιοθέτηση πιο ολιστικής προσέγγισης ενδέχεται να οδηγήσει σε αντίθετα αποτελέσματα όσον αφορά τις συνολικές εκπομπές.

Έλλειψη δεδομένων

Ένας σημαντικός περιορισμός του τρέχοντος σχεδίου μείωσης των εκπομπών μας είναι η έλλειψη συγκεκριμένων δεδομένων για ορισμένες παραμέτρους στο μοντέλο υπολογισμού μας. Αυτά μπορεί να είναι τόσο η μελλοντική ζήτηση του τσιμέντου, τα δεδομένα από την Χάλυψ, στην χρήση γενικών συντελεστών εκπομπής από την έκθεση απογραφής της χώρας.

Η επιτυχία οποιασδήποτε στρατηγικής μείωσης εκπομπών βασίζεται σε ακριβείς και λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με διάφορες πτυχές των μέτρων, όπως η κατανάλωση ενέργειας και οι διαδικασίες παραγωγής. Ωστόσο, λόγω των κενών στα δεδομένα ή της απουσίας ακριβών μετρήσεων για ορισμένες παραμέτρους, οι τρέχοντες υπολογισμοί ενδέχεται να μην έχουν την απαιτούμενη ακρίβεια για μια διεξοδική και αξιόπιστη αξιολόγηση. Ως αποτέλεσμα, καθίσταται απαραίτητη μια περαιτέρω μελέτη για τον εντοπισμό και τη συλλογή των δεδομένων που λείπουν, καλύπτοντας αυτά τα κενά, για παράδειγμα μέσω επικοινωνίας με τις ίδιες τις εταιρείες και τους διεθνείς οργανισμούς στους οποίους ανήκουν αυτές. Αυτή η πρόσθετη έρευνα όχι μόνο θα ενισχύσει την ακρίβεια των υπολογισμών των εκπομπών μας, αλλά θα μας επιτρέψει επίσης να εντοπίσουμε συγκεκριμένες περιοχές στις δραστηριότητές μας όπου μπορούν να εφαρμοστούν στοχευμένες παρεμβάσεις για πιο αποτελεσματικές μειώσεις. Αντιμετωπίζοντας τους περιορισμούς σε σχέση με τα δεδομένα και βελτιώνοντας το μοντέλο υπολογισμού μας, δίνεται η δυνατότητα διασφάλισης μιας πιο ισχυρής και ακριβούς βάσης για τις προσπάθειές μας για μείωση των εκπομπών, προωθώντας τελικά τη δέσμευσή μας για περιβαλλοντική βιωσιμότητα.

Απλοποιημένο μοντέλο υπολογισμού

Ένας εγγενής περιορισμός του τρέχοντος σχεδίου μείωσης των εκπομπών έγκειται στη χρήση ενός απλοποιημένου μοντέλου που βασίζεται στο γεγονός ότι κάθε μέτρο επηρεάζει μόνο μια παράμετρο. Αυτή η προσέγγιση ενδέχεται να μην αποτυπώνει πλήρως τις δυναμικές αλληλεπιδράσεις στο περίπλοκο περιβάλλον της τσιμεντοπαραγωγής. Για παράδειγμα, ότι η χρήση εναλλακτικών τσιμέντων μειώνει την μόνο τον συντελεστή εκπομπής διεργασιών, γεγονός το οποίο δεν είναι απαραίτητα ορθό, καθώς μια τέτοια αλλαγή ενδέχεται να επιφέρει μείωση ή ακόμα και αύξηση στην απαιτούμενη θερμική ενέργεια. Μια περαιτέρω μελέτη είναι απαραίτητη για τη διερεύνηση των περίπλοκων αλληλεξαρτήσεων μεταξύ των διαφόρων παραμέτρων, αναγνωρίζοντας ότι οι αλλαγές σε μια πτυχή μπορεί να επηρεάσουν άλλες. Βελτιώνοντας το μοντέλο ώστε να ληφθούν υπόψη αυτές οι αλληλεπιδράσεις, μπορεί να αναπτυχθεί ένα πιο ακριβές και ισχυρό σχέδιο μείωσης των εκπομπών που προβλέπει και μετριάξει τυχόν δυσμενείς επιπτώσεις, προσφέροντας κατανόηση της δυναμικής του συστήματος εις βάθος.

Τεχνοοικονομική μελέτη

Τα τρέχοντα σχέδια μείωσης των εκπομπών αντιμετωπίζει έναν ακόμα σημαντικό περιορισμό, καθώς στερείται ενδελεχούς οικονομικής μελέτης, εμποδίζοντας μια συνολική αξιολόγηση των οικονομικών επιπτώσεων που σχετίζονται με κάθε προτεινόμενο μέτρο. Ενώ το σχέδιό μας δίνει προτεραιότητα στην περιβαλλοντική βιωσιμότητα, δεν παρέχει ολοκληρωμένη κατανόηση του οικονομικού κόστους και των οφελών που συνδέονται με την εφαρμογή διαφορετικών στρατηγικών μείωσης των εκπομπών. Αυτή η απουσία οικονομικής ανάλυσης αφήνει ένα κρίσιμο κενό στην κατανόησή μας, καθώς παραβλέπει πιθανούς δημοσιονομικούς περιορισμούς, χρονοδιαγράμματα απόδοσης της επένδυσης και τη συνολική οικονομική σκοπιμότητα της εφαρμογής διαφόρων στρατηγικών. Μια περαιτέρω μελέτη είναι επιτακτική για να γεφυρωθεί αυτό το χάσμα με τη διεξαγωγή λεπτομερούς οικονομικής αξιολόγησης για κάθε μονοπάτι μείωσης των εκπομπών. Αυτή η μελέτη θα πρέπει να εξετάσει όχι μόνο το άμεσο κόστος της εφαρμογής των πρακτικών, όπως η αρχική επένδυση και το λειτουργικό κόστος, αλλά και τα πιθανά μακροπρόθεσμα οικονομικά οφέλη, όπως η εξοικονόμηση ενεργειακού κόστους και ο μετριασμός των κανονιστικών κινδύνων, όπως είναι τα δικαιώματα εκπομπών που πληρώνουν μέσω του Σ.Ε.Δ.Ε. Η αξιολόγηση της οικονομικής βιωσιμότητας κάθε μονοπατιού θα παρέχει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων, διασφαλίζοντας ότι οι προσπάθειές για τη μείωση των εκπομπών δεν είναι μόνο περιβαλλοντικά ορθές αλλά και οικονομικά βιώσιμες και εφικτές στο πλαίσιο των ευρύτερων επιχειρηματικών στόχων των εταιρειών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξένη

- Abanades, J. C., Arias, B., Lyngfelt, A., Mattisson, T., Wiley, D. E., Li, H., Ho, M. T., Mangano, E., Brandani, S. (2015), Emerging CO₂ capture systems, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 40, 126– 166.
- Abdel, Aal, A. M. K., Ibrahim, O. H. M., Al-Farga, A. & El Saeidy, E. A. (2023), Impact of Biomass Moisture Content on the Physical Properties of Briquettes Produced from Recycled *Ficus nitida* Pruning Residuals, *Sustainability*, 15(15), 11762
- Adams, D. (2010), *Flue gas treatment for CO₂ capture*, London: International Energy Agency Clean Coal Centre.
- Adnan, T. H., Kienzle, A. & Thomas, R. J. (2022), Engineering properties and setting time of belitic calcium sulfoaluminate (BCSA) cement concrete, *Construction and Building Materials*, 352.
- Ali, M. B., Saidur, R. & Hossain, M. S. (2011), A review on emission analysis in cement industries, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2252–2261.
- Al-Mamoori, A., Krishnamurthy, A., Rownaghi, A. A. & Rezaei, F. (2017), Carbon capture and utilization update. *Energy Technology*, 5(6), 834-849.
- Arstad, B., Fjellvåg, H., Ove Kongshaug, K., Swang, O. & Blom, R. (2008), Amine functionalised metal organic frameworks (MOFs) as adsorbents for carbon dioxide, *Adsorption* 14, 755–762.
- Bade, S. O., Tomomewo, O. S., Meenakshisundaram, A., Ferron, P. & Oni, B. A. (2023), Economic, social, and regulatory challenges of green hydrogen production and utilization in the US: A review, *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Benhelal, E., Gholamreza, Z., Shamsaei, E. & Bahadori, A. (2013), Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement Industry, *Journal of Cleaner Production*, 51, 142-161.
- Ben-Mansour, R., Habib, M. A., Bamidele, O. E., Basha, M., Qasem, N. A. A., Peedikakkal, A., Laoui, T. & Ali, M. (2016), Carbon capture by physical adsorption: Materials, experimental investigations and numerical modeling and simulations - A review, *Applied Energy*, 161, 225–255, Elsevier Ltd.

- Blume, S., Hinkel, M., Mutz, D. & Hengevoss, D. (2020), Guidelines on Pre- and Co-processing of Waste in Cement Production – Use of waste as alternative fuel and raw material, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH
- Boot-Handford, M. E., Abanades, J. C., Anthony, E. J., Blunt, M. J., Brandani, S., Mac Dowell, N., et al. (2014), Carbon capture and storage update, *Energy & Environmental Science*, 7(1), 130-189.
- Cao, Z., Shen, L., Liu, L. & Zhong, S. (2016), Analysis on major drivers of cement consumption during the urbanization process in China, *Journal of Cleaner Production*, 133, 304–313.
- CEMBUREAU (2016), Cement, concrete & the circular economy, European Circular Economy Stakeholder Platform
- CEMBUREAU (2023a), 2050 Ambitions & The Role Of Biomass Waste.
- CEMBUREAU (2023b), Activity Report 2022.
- CEMBUREAU (n.d.), Towards zero carbon fuels for cement manufacture.
- Chidiac, S. E. & Panesar, D. K. (2008), Evolution of mechanical properties of concrete Containing ground granulated blast furnace slag and effects on the scaling resistance test at 28 days, *Cement Concrete Journal*, 2, 63–71.
- Cho, Y. K., Jung, S. H. & Choi, Y. C. (2019), Effects of chemical composition of fly ash on compressive strength of fly ash cement mortar. *Construction and Building Materials*, 204, 255–264.
- Cuéllar-Franca, R. M. & Azapagic, A. (2015), Carbon capture, storage and utilisation technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts, *Journal of CO₂ Utilization*, 9, 82–102.
- De Beer, J., Cihlar, J., Hensing, I. & Zabeti, M. (2017), Status and prospects of co-processing of waste in EU cement plants. *Ecofys*.
- de Lorena Diniz Chaves, G., Siman, R. R., Ribeiro, G. M. & Chang, N. (2021), Synergizing environmental, social, and economic sustainability factors for refuse derived fuel use in cement industry: A case study in Espirito Santo, Brazil. *Journal of Environmental Management*, 288.
- Dean, C. C., Blamey, J., Florin, N. H., Al-Jeboori, M. J. & Fennell, P. S. (2011), The calcium looping cycle for CO₂ capture from power generation, cement manufacture and hydrogen production, *Chemical Engineering Research and Design*, 89(6), 836–855
- Dedeloudis, C., Zervaki, M., Sideris, K., Juenger, M., Alderete, N., Kamali-bernard, S., Villagrán, Y. & Snellings, R. (2018), Natural Pozzolans, Properties of Fresh and Hardened Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials, *RILEM State-of-the-Art Reports*, 25.

Dincer, I., Rosen, M.A. & Khalid, F. (2018), Thermal Energy Production, Comprehensive Energy Systems, Elsevier, 673-706.

Directive 2008/98/EC. Directive No 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives

Directive 2023/2413. Directive (EU) No 2023/2413 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 amending Directive (EU) 2018/2001, Regulation (EU) 2018/1999 and Directive 98/70/EC as regards the promotion of energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/652

Eidgenössische Technische Hochschule (2018), A sustainable future for the European Cement and Concrete industry - Technology assessment for full decarbonisation of the industry by 2050.

Elahi, A., Basheer., P. A., Nanukuttan, S. V. & Khan, Q. U. (2009), Mechanical and durability properties of high performance concretes containing supplementary cementitious materials Construction Building Material Journal, 3, 292–299.

European Cement Research Academy. (2017), Development of State of the Art-Techniques in Cement Manufacturing: Trying to Look Ahead.

Fidjestøl, P. & Lewis, R. (1998), Lea's Chemistry of Cement and Concrete, Fourth Edition, 679-712.

Font-Palma, C., Cann, D. & Udemu, C. (2021), Review of Cryogenic Carbon Capture Innovations and Their Potential Applications, 7(3), 58.

Fu, L., Ren, Z., Si, W., Ma, Q., Huang, W., Liao, K., Huang, Z., Wang, Y., Li, J. & Xu, P. (2022), Research progress on CO₂ capture and utilization technology, Journal of CO₂ Utilization, 66, Elsevier Ltd.

Gartner, E. & Sui, T. (2018), Alternative cement clinkers, Cement and Concrete Research, 114, 27–39.

GCCA. (n.d.), Getting the Numbers Right Project

Georgiopoulou, M. & Lyberatos, G. (2018), Life cycle assessment of the use of alternative fuels in cement kilns: A case study. Journal of Environmental Management, 216, 224–234.

Global CO₂ Initiative (2016), Global Roadmap for Implementing CO₂ Utilization.

Godin, J., Liu, W., Ren, S. & Xu, C. (2021), Advances in recovery and utilization of carbon dioxide: A brief review, Journal of Environmental Chemical Engineering, 9(4).

Goff, G. S. & Rochelle, G. T. (2004), Monoethanolamine degradation: O₂ mass transfer effects under CO₂ capture conditions, Industrial & Engineering Chemistry Research, 43(20), 6400–6408.

Han, R., Wang, Y., Xing, S., Pang, C., Hao, Y., Song, C. & Liu, Q. (2022). Progress in reducing calcination reaction temperature of Calcium-Looping CO₂ capture technology: A critical review, Chemical Engineering Journal (Vol. 450). Elsevier

- Hollingshead, A. F. & Venta, G. J. (2009), Carbon Dioxide Reduction Technology Effectiveness Assessment–Initial Evaluation, Portland Cement Association.
- Hrdlicka, J., Vodička, M., Skopec, P., Hrdlička, F. & Dlouhý, T. (2019), CO₂ Capture by Oxyfuel Combustion, CO₂ Separation, Purification and Conversion to Chemicals and Fuels, Singapore: Springer Singapore, 55–78.
- Implementing Regulation 2018/2066. Implementing Regulation (EU) No 2018/2066 of the European Parliament and of the Council of 19 December 2018 on the monitoring and reporting of greenhouse gas emissions pursuant to Directive 2003/87/EC and amending Commission Regulation (EU) No 601/2012
- Incer-Valverde, J., Korayem, A., Tsatsaronis, G. & Morosuk, T. (2023), “Colors” of hydrogen: Definitions and carbon intensity, *Energy Conversion and Management*, 291, Elsevier Ltd.
- International Energy Agency (2021a), Driving Energy Efficiency in Heavy Industries.
- International Energy Agency (2021b), Global Hydrogen Review 2021.
- International Finance Corporation (2017), Increasing the use of alternative fuels at cement plants: international best practice.
- IPCC (2005). IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Cambridge University Press
- Jansen, D., Gazzani, M., Manzolini, G., Dijk, E. & Carbo, M. (2015), Pre-combustion CO₂ capture, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 40, 167–187.
- Jaskulski, R., Józwiak-Niedźwiedzka, D. & Yakymchko, Y. (2020), Calcined Clay as Supplementary Cementitious Material, *Materials*, 13 (21), 4734
- Joshi, J. B. (2014), Chemical Engineering Research and Design Catalytic carbon dioxide hydrogenation to methanol: A review of recent studies, *Chemical Engineering Research and Design*, 92(11), 2557–2567.
- Juangsa, F. B., Cezeliano, A. S., Darmanto, P. S. & Aziz, M. (2022), Thermodynamic analysis of hydrogen utilization as alternative fuel in cement production, *South African Journal of Chemical Engineering*, 42, 23–31.
- Juenger, M. C. G., Snellings, R. & Bernal, S. A. (2019), Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights, *Cement and Concrete Research*, 122, 257–273, Elsevier Ltd.
- Kamkeng, A. D. N., Wang, M., Hu, J., Du, W. & Qian, F. (2021), Transformation technologies for CO₂ utilisation: Current status, challenges and future prospects, *Chemical Engineering Journal*, 409, Elsevier B.V.
- Kharrat, R., Zallaghi, M. & Ott, H. (2021), Performance Quantification of Enhanced Oil Recovery Methods in Fractured Reservoirs, *Energies*, 14, 4739.

- Khatib, J. M. (2008), Performance of self-compacting concrete containing fly ash. *Construction and Building Materials*, 22(9), 1963–1971.
- Klusman R.W. (2003), Rate measurements and detection of gas microseepage to the atmosphere from an enhanced oil recovery/sequestration project, Rangely, Colorado, USA. *Applied Geochemistry*, 18, 1825–1838.
- Koga, G. Y., Albert, B., Roche, V. & Nogueira, R. P. (2018), A comparative study of mild steel passivation embedded in Belite-Ye’elimite-Ferrite and Portland cement mortars, *Electrochimica Acta*, 261, 66–77.
- Kohl, A.L. & Nielsen, R. (1997), *Gas Purification* (fifth ed.), Gulf Professional Publishing, Texas
- Lepaumier, H., da Silva, E. F., Einbu, A., Grimstvedt, A., Knudsen, J. N., Zahlens, K. & Svendsen, H. F. (2011), Comparison of MEA degradation in pilot-scale with lab-scale experiments. *Energy Procedia*, 4, 1652–1659.
- Li, J., Tharakan, P., Macdonald, D. & Liang, X. (2013), Technological, economic and financial prospects of carbon dioxide capture in the cement industry. *Energy Policy*, 61, 1377–1387.
- Li, X., Li, Q., Zhao, Y., Kang, M. & Wang, J. (2022), Utilization of carbon dioxide in polyurethane. *Journal of Fuel Chemical Technology*, 50(2), 195–209.
- Lifton, V. A. (2016), Microfluidics: an enabling screening technology for enhanced oil recovery (EOR), *Lab on a Chip*, 16(10), 1777–1796.
- Lin, Q., Zhang, X., Wang, T., Zheng, C. & Gao, X. (2022), Technical Perspective of Carbon Capture, Utilization, and Storage, *Engineering*, 14, 27–32.
- Liu, M., Yi, Y., Wang, L., Guo, H. & Bogaerts, A. (2019), Hydrogenation of carbon dioxide to value-added chemicals by heterogeneous catalysis and plasma catalysis, *Catalysts*, 9(3).
- Madloul, N. A., Saidur, R., Hossain, M.S. & Rahim, N. A. (2011), A Critical Review on Energy Use and Savings in the Cement Industries, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 2042.
- Madloul, N. A., Saidur, R., Rahim, N. A. & Kamalisarvestani, M. (2013), An overview of energy savings measures for cement industries, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 18–29.
- Marín, A. J. M. & Santos, D. M. F. (2023), The Hydrogen Color Spectrum: Techno-Economic Analysis of the Available Technologies for Hydrogen Production, *Gases*, 3(1), 25-46.
- Martin, G. & McGarel, S. (2001), Automation using model predictive control in the cement industry, Pavillion Technologies, Inc., Austin, TX, 66-67.

Martins, J.A., Faria, A.C., Soria, M.A., Miguel, C.V., Rodrigues, A.E. & Madeira, L.M. (2019), CO₂ Methanation over Hydrotalcite-Derived Nickel/Ruthenium and Supported Ruthenium Catalysts, *Catalysts*, 9(12), 1008.

Ministry of Environment and Energy. (2022). National Inventory Report of Greece

Mokrzycki, E. & Uliasz-Bochenczyk, A. (2003), Alternative fuels for the cement industry. *Applied Energy* 74, 95.

Møller, K. T., Jensen, T. R., Akiba, E. & Li, H. W. (2017), Hydrogen - A sustainable energy carrier, *Progress in Natural Science: Materials International*, 27(1), 34–40.

Muchan, P., Saiwan, C., and Nithitanakul, M. (2022), Carbon dioxide adsorption /desorption performance of single- and blended-amines-impregnated MCM-41 mesoporous silica in post-combustion carbon capture, *Clean. Energy*, 6(3), 424–437

Muradov, N. Z. & Veziroğlu, T. N. (2005). From hydrocarbon to hydrogen-carbon to hydrogen economy, *International Journal of Hydrogen Energy*, 30(3), 225–237.

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, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory.

Narku-Tetteh, J., Muchan, P., Saiwan, C., Supap, T., and Idem, R. (2017), Selection of components for formulation of amine blends for post combustion CO₂ capture based on the side chain structure of primary, secondary and tertiary amines, *Chemical Engineering Science*.

Newborough, M. & Cooley, G. (2020), Developments in the global hydrogen market: The spectrum of hydrogen colours, *Fuel Cells Bulletin*, 16–22

Noussan, M., Raimondi, P. P., Scita, R. & Hafner, M. (2021), The Role of Green and Blue Hydrogen in the Energy Transition—A Technological and Geopolitical Perspective, *Sustainability*, 13(1), 298.

Okoji, A. I., Anozie, A. N. & Omoleye, J. A. (2022), Evaluating the thermodynamic efficiency of the cement grate clinker cooler process using artificial neural networks and ANFIS, *Ain Shams Engineering Journal*, 13(5).

Pal, P. & Anantharaman, H. (2022), CO₂ nanobubbles utility for enhanced plant growth and productivity: Recent advances in agriculture, *Journal of CO₂ Utilization*, 61, Elsevier Ltd.

Paltsev, S., Morris, J., Kheshgi, H. & Herzog H. (2021), Hard-to-abate sectors: The role of industrial carbon capture and storage (CCS) in emission mitigation, *Applied Energy*, 300, 117322.

Paustian, K., Ravindranath, N. H. & van Amstel, A. R. (2006), 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.

- Pimraksa, K. & Chindaprasirt, P. (2018), Sulfoaluminate cement-based concrete, *Eco-Efficient Repair and Rehabilitation of Concrete Infrastructures*, 355-385, Woodhead Publishing.
- Piotrowski, K., Piotrowski, J. & Schlesinger, J. (2003), Modelling of complex liquid-vapour equilibria in the urea synthesis process with the use of artificial neural network, *Chemical Engineering Processing*, 42(4), 285–289.
- Quillin, K. (2001), Performance of belite–sulfoaluminate cements, *Cement and Concrete Research*, 31, 1341–1349.
- Rahman, A., Rasul, M. G., Khan, M. M. K. & Sharma, S. (2013), Impact of alternative fuels on the cement manufacturing plant performance: An overview, *Procedia Engineering*, 56, 393–400.
- Rahman, A., Rasul, M., Khan, M. M. K. & Sharma, S. (2016), Chapter 9 - Cement Kiln Process Modeling to Achieve Energy Efficiency by Utilizing Agricultural Biomass as Alternative Fuels, *Thermofluid Modeling for Energy Efficiency Applications*, Academic Press, 197-225.
- Rahman, A., Rasul, M., Khan, M.M.K. & Sharma, S. (2015), Recent development on the uses of alternative fuels in cement manufacturing process, *Elsevier Fuel*, 145, 84-99.
- Raina, K. & Janakiraman, L. K. (1998), Use of mineralizer in black meal process for improved clinkerization and conservation of energy, *Cement and Concrete Research*, 28(8), 1093–1099.
- Rentizelas, A. A., Tolis, A. J. & Tatsiopoulou, I. P. (2009), Logistics issues of biomass: The storage problem and the multi-biomass supply chain, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(4), 887–894.
- Rolfe, A., Huang, Y., Haaf, M., Pita, A., Rezvani, S., Dave, A. & Hewitt, N. J. (2018), Technical and environmental study of calcium carbonate looping versus oxy-fuel options for low CO₂ emission cement plants, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 75, 85–97.
- Saidur, R., Hossain, M. S., Islam, M. R., Fayaz, H. & Mohammed, H. A. (2011), A review on kiln system modeling, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2487–2500.
- Sanna, A., Uibu, M., Caramanna, G., Kuusik, R. & Maroto-Valer, M. M. (2014), A review of mineral carbonation technologies to sequester CO₂, *Chemical Society Reviews*, 43(23), 8049-8080.
- Saveyn, H., Eder, P., Ramsay, M., Thonier, G., Warren, K., Hestin, M. (2016), Towards a better exploitation of the technical potential of waste-to-energy.
- Schlorke, S., Tu, L., Stec, M., Mallagray, J. A & Kaleem, H. (2020), The Impact of COVID-19 on the Cement Industry, *International Finance Corporation*.
- Schneider, S., Bajohr, S., Graf, F. & Kolb, T. (2020), State of the art of hydrogen production via pyrolysis of natural gas, *ChemBioEng Reviews*, 7(5), 150-158.

- Seraj, S., Cano, R., Ferron, R.P., Juenger, M.C. (2015), *Calcined Shale as Low Cost Supplementary Cementitious Material, Calcined Clays for Sustainable Concrete*, RILEM Bookseries, 10, Springer, Dordrecht.
- Shakerian, F., Kim, K. H., Szulejko, J. E. & Park, J. W. (2015), A comparative review between amines and ammonia as sorptive media for post-combustion CO₂ capture, *Applied Energy*, 148, 10–22, Elsevier Ltd.
- Shi, C. (2004) *Steel Slag Its Production, Processing, Characteristics, and Cementitious Properties*. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16, 230-236.
- Siddique, R., Kunal & Mehta, A. (2020), 11—Utilization of industrial by-products and natural ashes in mortar and concrete development of sustainable construction materials, *Nonconventional and Vernacular Construction Materials*, 2nd ed.; Harries, K.A., Sharma, B., Eds.; Woodhead Publishing: Cambridge, UK, 247–303.
- Sirchis, J. (1990), *Energy efficiency in the cement industry*, 12756, CRC Press
- Skibsted, J. & Snellings, R. (2019), Reactivity of supplementary cementitious materials (SCMs) in cement blends, *Cement and Concrete Research*, 124, Elsevier Ltd.
- Song, C. (2006), Global Challenges and Strategies for Control, Conversion and Utilization of CO₂ for Sustainable Development Involving Energy, Catalysis, Adsorption and Chemical Processing. *Catalysis Today*, 115, 2–32.
- Song, C., Liu, Q., Deng, S., Li, H. & Kitamura, Y. (2019), Cryogenic-based CO₂ capture technologies: State-of-the-art developments and current challenges, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 265–278, Elsevier Ltd.
- Sui, T., Liu, K., Wang, J., Guo, S., Liu, Y. & Zhao, P. (1999), A study on properties of high belite cement, *Journal Chinese ceramic society*, 27, 488-492.
- Sundquist, E., Burruss, R., Faulkner, S., Gleason, R., Harden, J., Kharaka, Y. & Waldrop, M. (2008), *Carbon sequestration to mitigate climate change, 2008–3097*, US Geological Survey
- Talaei, A., Pier, D., Iyer, A. v., Ahiduzzaman, M. & Kumar, A. (2019), Assessment of long-term energy efficiency improvement and greenhouse gas emissions mitigation options for the cement industry, *Energy*, 170, 1051–1066.
- Tokheim, L. A. & Brevik, P. (2007), Carbon dioxide reduction by increased utilization of waste derived fuels in the cement industry, *International Conference on Sustainability in the Cement and Concrete*.
- Valluri, S., Claremboux, V. & Kawatra, S. (2022), Opportunities and challenges in CO₂ utilization, *Journal of Environmental Sciences (China)*, 113, 322–344, Chinese Academy of Sciences.
- van der Burgt, M. J., Cattle, J. & Boutkan, V.K. (1992), Carbon dioxide disposal from coal-based IGCC's in depleted gas fields, *Energy Conversion Management*, 33, 603–610.

- Van Oss, H. G. (2005) Background Facts and Issues Concerning Cement and Cement Data. U.S. Geological Survey
- van Ruijven, B. J., van Vuuren, D. P., Boskaljon, W., Neelis, M. L., Saygin, D. & Patel, M. K. (2016), Long-term model-based projections of energy use and CO₂ emissions from the global steel and cement industries. *Resources, Conservation and Recycling*, 112, 15–36.
- Walling, S. A. & Provis, J. L. (2016), Magnesia-Based Cements: A Journey of 150 Years, and Cements for the Future, *Chemical Reviews*, 116(7), 4170-4204.
- Wang, F., Long, G., Bai, M., Wang, J., Shi, Y., Zhou, X. & Zhou, J. L. (2023), A new perspective on Belite-ye'elimite-ferrite cement manufactured from electrolytic manganese residue: Production, properties, and environmental analysis, *Cement and Concrete Research*, 163.
- Weng, K.J. (2005), Application of carbon dioxide in food industry, *The light & textile industries of Fujian*, 7, 1–4.
- Wilson, M. & Monea, M. (2004), IEA GHG Weyburn CO₂ monitoring and storage project summary report 2000–2004, Petroleum Technology Research Centre, Regina, Canada.
- World Business Council for Sustainable Development (2011), CO₂ Accounting and Reporting Standard for the Cement Industry, v.3.0.
- World Business Council for Sustainable Development (2014), Guidelines for Co-Processing Fuels and Raw Materials in Cement Manufacturing.
- World Energy Council (2021), Working Paper: National Hydrogen Strategies.
- Worrell, E. Galitsky, C. & Price, L. (2008), Energy Efficiency Improvement Opportunities for the Cement Industry.
- Yang, F. & Wang, R. (2013), Current status on catalytic conversion of greenhouse gas CO₂ to value-added chemicals, *Journal of China Coal Society*, 38(6), 1060–1071.
- Yeh, A. C. & Bai, H. (1999), Comparison of ammonia and monoethanolamine solvents to reduce CO₂ greenhouse gas emissions, *The Science of the Total Environment*, 228.
- Zainal, B. S., Ker, P. J., Mohamed, H., Ong, H. C., Fattah, I. M. R., Rahman, S. M. A., Nghiem, L. D. & Mahlia, T. M. I. (2024), Recent advancement and assessment of green hydrogen production technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 189, Elsevier Ltd.
- Zhang, J. L. & Yang, T. H. (2016), Chemical Utilization of Carbon Dioxide as a Resource, *Coal Chemical Industry*, 44(3).
- Zhang, X., Song, Z., Gani, R. & Zhou, T. (2020), Comparative economic analysis of physical, chemical, and hybrid absorption processes for carbon capture, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 59(5), 2005-2012.
- Zieri, W. & Ismail, I. (2019), Alternative Fuels from Waste Products in Cement Industry. *Handbook of Ecomaterials*, Springer.

Ελληνική

Α.Γ.Ε.Τ. Ηρακλής (2023), Ετήσια Οικονομική Έκθεση της χρήσεως που έληξε την 31^η Δεκεμβρίου 2022

Α.Ε. Τσιμέντων ΤΙΤΑΝ (2023), Ετήσια Οικονομική Έκθεση Χρήσης 1.1.2021- 31.12.2021

Γεωργακόπουλος, Θ. (2021), Οι Συνέπειες Της Κλιματικής Αλλαγής Στην Ελλάδα - Μια Έρευνα. Διανέοσις

Ελληνική Στατιστική Αρχή (2023), Έρευνα παραγωγής και πωλήσεων βιομηχανικών προϊόντων (PRODCOM) έτους 2021

Όμιλος Τιτάν (2023), Έκθεση Βιώσιμης Ανάπτυξης 2022 Ελλάδα

Όμιλος Ηρακλή (2022), Έκθεση Αειφορίας 2021

Τσίμας Σταμάτης & Σωτήρης Τσιβιλής (2010), Επιστήμη και τεχνολογία τσιμέντου, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα

Χάλυψ Δομικά Υλικά Α.Ε. (2023), Ετήσιες Οικονομικές καταστάσεις για την χρήση που έληξε την 31^η Δεκεμβρίου 2022

Διαδικτυακοί Τόποι

CEMBUREAU (2020). Cementing the European Green Deal: Reaching climate neutrality along the cement and concrete value chain by 2050. Ανάκτηση από CEMBUREAU: https://cembureau.eu/media/kuxd32gi/cembureau-2050-roadmap_final-version_web.pdf

CEMBUREAU. (2021). The story of cement manufacture. Ανάκτηση από CEMBUREAU: https://cembureau.eu/media/drylkjo0/manufacturing-process-factsheet_update-jan2021.pdf

CEMBUREAU. (n.d.). The Manufacturing Process. Ανάκτηση από CEMBUREAU: <https://cembureau.eu/about-our-industry/the-manufacturing-process>

European Commission. (n.d.). On the path to a climate-neutral Europe by 2050. Ανάκτηση από European Commission: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_en

European Commission. (n.d.). EU Emissions Trading System (EU ETS). Ανάκτηση από European Commission: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_en

European Commission. (2021). Delivering the European Green Deal. Ανάκτηση από European Commission: https://commission.europa.eu/publications/delivering-european-green-deal_en

European Commission. (2023). Verified emissions 2022. Ανάκτηση από European Commission: https://climate.ec.europa.eu/document/download/8f79885d-c567-4db2-9711-71ee8a29a037_en?filename=policy_ets_registry_verified_emissions_2022_en.1.xlsx

European Council. (2023a). European Green Deal. Ανάκτηση από European Council: <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/>

European Council. (2023b). Fit for 55. Ανάκτηση από European Council: <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>

European Council. (2023c). 'Fit for 55': Council adopts key pieces of legislation delivering on 2030 climate targets. Ανάκτηση από European Council: <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2023/04/25/fit-for-55-council-adopts-key-pieces-of-legislation-delivering-on-2030-climate-targets/>

European Council. (2024a). Paris Agreement on climate change. Ανάκτηση από European Council: <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/climate-change/paris-agreement/>

European Council. (2024b). Fit for 55: reform of the EU emissions trading system. Ανάκτηση από European Council: <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2023/04/25/fit-for-55-council-adopts-key-pieces-of-legislation-delivering-on-2030-climate-targets/>

European Environmental Agency. (2023). EU Emissions Trading System (ETS) data viewer. Ανάκτηση από European Environmental Agency: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/dashboards/emissions-trading-viewer-1>

European Environmental Agency. (2024a). Climate change mitigation: reducing emissions. Ανάκτηση από European Environmental Agency: <https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/climate-change-mitigation-reducing-emissions>

European Environmental Agency. (2024b). Climate change impacts, risks and adaptation. Ανάκτηση από European Environmental Agency: <https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/climate-change-impacts-risks-and-adaptation>

Global Cement and Concrete Association. (n.d.). Clinker Substitutes. Ανάκτηση από Global Cement and Concrete Association: <https://gccassociation.org/cement-and-concrete-innovation/clinker-substitutes/>

Global Cement and Concrete Association. (n.d.). Fly ash. Ανάκτηση από Global Cement and Concrete Association: <https://gccassociation.org/cement-and-concrete-innovation/clinker-substitutes/fly-ash/>

Heidelberg Materials Greece (n.d.) Ανάκτηση από Heidelberg Materials Greece: <https://www.heidelbergmaterials.gr>

International Energy Agency (n.d.) Carbon Capture, Utilisation and Storage. Ανάκτηση από International Energy Agency: <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage>

Lafarge Ελλάδα (n.d.) Ανάκτηση από Lafarge Ελλάδα: <https://www.lafarge.gr/>

NASA. (n.d.). The Causes of Climate Change. Ανάκτηση από NASA: <https://climate.nasa.gov/causes/>

NASA. (n.d.). What Is Climate Change?. Ανάκτηση από NASA: <https://climate.nasa.gov/what-is-climate-change/>

NASA. (n.d.c). The Effects of Climate Change. Ανάκτηση από NASA: <https://climate.nasa.gov/effects/>

RAWMATHUB.GR (2023) TITAN: Επένδυση 26 εκατ. ευρώ στο εργοστάσιο Καμαρίου. Ανάκτηση από RAWMATHUB.GR: <https://rawmathub.gr/enimerosi-gia-tin-aksiaki-alytida-proton-ylon-kai-ylikon/epixeirimatika-nea-gia-protos-yles-kai-ylika/titan-ependysi-26-ekat-evro-sto-ergostasio-kamariou>

Statista. (2023). Production volume of cement worldwide from 1995 to 2022. Ανάκτηση από Statista: <https://www.statista.com/statistics/1087115/global-cement-production-volume/>

Titan Cement Group (2023) . Corporate Presentation. Ανάκτηση από Titan Cement Group: https://ir.titan-cement.com/Uploads/presentations/2023/corporate_presentation_2023.pdf

Titan Cement Group (n.d.) Ανάκτηση από Titan Cement Group: <https://www.titan-cement.com/>

United Nations Framework Convention on Climate. (n.d.). What is the United Nations Framework Convention on Climate Change? Ανάκτηση από United Nations: <https://unfccc.int/process-and-meetings/what-is-the-united-nations-framework-convention-on-climate-change>

United Nations Framework Convention on Climate. (n.d.). What is the Kyoto Protocol? Ανάκτηση από United Nations: https://unfccc.int/kyoto_protocol

United Nations Framework Convention on Climate. (n.d.). The Paris Agreement. Ανάκτηση από United Nations Framework Convention on Climate: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>

United Nations Framework Convention on Climate. (n.d.). What is the Kyoto Protocol?. Ανάκτηση από United Nations Framework Convention on Climate: https://unfccc.int/kyoto_protocol

United Nations Framework Convention on Climate. (n.d.). What is the United Nations Framework Convention on Climate Change?. Ανάκτηση από United Nations Framework Convention on Climate: <https://unfccc.int/process-and-meetings/what-is-the-united-nations-framework-convention-on-climate-change>

United Nations. (n.d.). Causes and Effects of Climate Change. Ανάκτηση από United Nations: <https://www.un.org/en/climatechange/science/causes-effects-climate-change>

United Nations. (n.d.). The Paris Agreement. Ανάκτηση από United Nations: <https://www.un.org/en/climatechange/paris-agreement>

United Nations. (n.d.). What Is Climate Change. Ανάκτηση από United Nations: <https://www.un.org/en/climatechange/what-is-climate-change>

Ένωση Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος. (n.d.). Κλίμα και ενέργεια. Ανάκτηση από Ένωση Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος: <https://www.hcia.gr/klima-kai-energeia/>

Ένωση Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος. (n.d.). Ο κλάδος στην Ελλάδα. Ανάκτηση από Ένωση Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος: <https://www.hcia.gr/o-klados-stin-ellada/>

Ένωση Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος. (n.d.). Οι παγκόσμιες τάσεις. Ανάκτηση από Ένωση Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος: <https://www.hcia.gr/oi-pagkosmies-taseis/>

Ένωση Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος. (n.d.). Το τσιμέντο. Ανάκτηση από Ένωση Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος: <https://www.hcia.gr/to-tsimento/>

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (n.d.) Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών. Ανάκτηση από Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας: <https://ypen.gov.gr/perivallon/klimatiki-allagi/systema-eborias-dikaiomaton-ekpobon/>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

1. Επαληθευμένες εκπομπές ETS για τις Ελληνικές τσιμεντοβιομηχανίες σε τόνους (European Commission, n.d.)

Έτος	Ηρακλής	Τιτάν	Χάλυψ	Άλλοι	Σύνολο
2008	5.131.026	4.218.653	528.037	3.718	9.881.434
2009	3.382.142	3.654.435	414.113	4.993	7.455.683
2010	2.996.934	3.422.968	414.597	0	6.834.499
2011	2.137.724	1.547.094	210.816	0	3.895.634
2012	2.237.674	2.469.537	262.689	0	4.969.900
2013	2.340.237	3.345.663	129.945	0	5.815.845
2014	2.368.329	3.549.215	174.123	0	6.091.667
2015	2.252.286	3.121.734	148.800	0	5.522.820
2016	2.487.128	3.305.506	254.264	0	6.046.898
2017	2.429.520	3.230.376	262.525	0	5.922.421
2018	2.148.847	3.029.520	288.778	0	5.467.145
2019	2.104.845	2.992.917	249.791	0	5.347.553
2020	1.956.689	2.506.641	245.347	0	4.708.677
2021	1.889.289	2.887.185	190.808	0	4.967.282

2. Εκπομπές διεργασίας κατά την παραγωγή κλίνκερ στην Ελλάδα (Ministry of environment and energy, 2022)

Έτος	Παραγωγή κλίνκερ (kt)	Εκπομπές CO₂ (kt)
2000	12.071,73	6.536,76
2001	12.130,78	6.565,92
2002	11.666,18	6.313,27
2003	11.754,73	6.368,13
2004	11.754,73	6.363,90
2005	12.442,36	6.791,12
2006	12.244,24	6.599,22
2007	12.035,08	6.406,63
2008	11.361,40	6.053,53
2009	8.649,32	4.581,72
2010	7.926,64	4.208,60
2011	4.569,17	2.430,43
2012	5.856,10	3.099,30
2013	6.915,19	3.638,96
2014	7.233,53	3.821,93
2015	6.554,29	3.467,28
2016	7.086,34	3.772,24
2017	7.088,09	3.685,21
2018	6.548,11	3.419,47
2019	6.429,11	3.360,21
2020	5.744,65	2.977,78
2021	6.117,16	3.166,78

3. Συντελεστές εκπομπής ορυκτών καυσίμων για την Ελλάδα (Ministry of environment and energy, 2022)

Καύσιμο	Συντελεστής εκπομπής (τόνοι CO₂/TJ)
Άνθρακας	94,93
Πετρελαϊκό κοκ	99,64
Πετρέλαιο	73,78
Φυσικό αέριο	59,44
Μαζούτ	78,4

4. Παραγωγή τσιμέντου (ETE, n.d.)

Έτος	Ποσότητα (χιλ. Τόνοι)
2011	6.110,00
2012	6.918,00
2013	7.819,00
2014	8.384,00
2015	7.569,00
2016	8.263,00
2017	7.786,00
2018	7.526,00
2019	7.219,00
2020	6.712,00
2021	7.088,00

5. Παράμετροι μοντελοποίησης έτους βάσης (Όμιλος Τιτάν, 2023 και Όμιλος Ηρακλή, 2022)

Παράμετρος		ΗΡΑΚΛΗΣ	ΤΙΤΑΝ	Σταθμισμένος μέσος όρος
Αναλογία κλίνκερ/τσιμέντο		82%	85%	84%
Θερμική ενέργεια (TJ/τόνο κλίνκερ)		3,52	3,74	3,65
Ενεργειακό μείγμα	Άνθρακας	38%	16%	25%
	Πετρελαϊκό κοκ	23%	55%	41%
	Πετρέλαιο	1%	0%	0%
	Φυσικό αέριο	1%	0%	1%
	Εναλλακτικά καύσιμα	30%	29%	29%
	Βιομάζα	8%	0%	3%
	Μαζούτ	0%	55%	0%
	Υδρογόνο	0%	0%	0%
Δέσμευση Άνθρακα		0%	0%	0