



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΕΤΑΛΛΕΙΟΛΟΓΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΥΒΡΙΔΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ  
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**



**ΧΑΡΙΛΑΟΣ.Α, ΣΑΚΕΛΛΙΟΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Επ. Καθ. Πέππας Αντώνιος**

**Αθήνα 2024**

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ ΚΑΙ ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2023-2024 στον τομέα της Μεταλλουργίας-Επιστήμης των Υλικών της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, υπό την επίβλεψη του Επίκουρου Καθηγητή κ. Αντώνη Πέππα. Η εργασία εξετάζει τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας με χρήση υλικών αλλαγής φάσης. Συγκεκριμένα, πραγματοποιείται ανάλυση κύκλου ζωής για την χρήση συστημάτων αποθήκευσης ηλιακής ενέργειας με χρήση  $\text{CaCO}_3$  σε τσιμεντοβιομηχανία που χρησιμοποιεί ηλεκτρική κάμινο, σε σύγκριση με συμβατικές μονάδες παραγωγής τσιμέντου.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα-υπεύθυνο καθηγητή κ. Αντώνη Πέππα για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το ενδιαφέρον θέμα των υβριδικών τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας με χρήση υλικών αλλαγής φάσης και να εμπλουτίσω τις γνώσεις μου γύρω από αυτό το πεδίο. Η επιστημονική του καθοδήγηση και η συνεργασία του ήταν πολύτιμη για την υλοποίηση της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Σωτήρη Κοτταρίδη, Μηχανολόγο Μηχανικό του ΕΜΠ, για την συνεισφορά του και την καθοδήγηση του στο κεφάλαιο της μοντελοποίησης Ανάλυσης Κύκλου Ζωής.

Τέλος, ευχαριστώ από καρδιάς την οικογένεια μου για την εμπιστοσύνη και την στήριξη που μου παρέχουν όλα αυτά τα χρόνια. Μαζί, θα ήθελα να ευχαριστήσω το κοντινό φιλικό μου περιβάλλον, τους συμφοιτητές μου για την συμπαράσταση και τις όμορφες στιγμές που μοιραστήκαμε μαζί κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

## Περιεχόμενα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ ΚΑΙ ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	5
ABSTRACT .....	7
1. Εισαγωγή .....	9
2. Τεχνολογίες αποθήκευσης θερμικής ενέργειας.....	12
2.1 Γενικά περί τεχνολογιών αποθήκευσης θερμικής ενέργειας .....	12
2.3. Τεχνολογίες ανάκτησης απορριπτόμενης θερμότητας στους ενεργοβόρους βιομηχανικούς τομείς .....	19
2.4. Εφαρμογές συστημάτων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας προερχόμενης από ανανεώσιμες πηγές.....	21
2.5. Τεχνολογία συστήματος χημικού βρόγχου- Chemical looping.....	22
2.6. Τεχνολογία Κύκλου Ενανθράκωσης-Ασβεστοποίησης για Αποθήκευση Θερμικής Ενέργειας και Δέσμευση Διοξειδίου του Άνθρακα.....	25
2.6.1 Αρχή λειτουργίας -Κινητική-Θερμοδυναμική του συστήματος.....	26
2.6.3 Περιορισμοί αποδοτικότητας του συστήματος .....	28
3. Ανάλυση Κύκλου Ζωής.....	29
3.1. Εισαγωγή στην ανάλυση κύκλου ζωής .....	29
3.2. Ανάλυση κύκλου ζωής- Μεθοδολογία και Πρότυπα ISO.....	30
3.2.1. Ορισμός του σκοπού και του στόχου.....	31
3.2.2 Ανάλυση της καταγραφής των δεδομένων του συστήματος .....	32
3.2.3 Εκτίμηση των επιπτώσεων .....	34
3.2.5. Ερμηνεία των αποτελεσμάτων.....	35
3.3. Πλεονεκτήματα και περιορισμοί της ανάλυσης του κύκλου ζωής.....	36
4. Ανάλυση Κύκλου Ζωής- κάλυψη ενεργειακών αναγκών τσιμεντοβιομηχανίας με ηλιακά συγκεντρωτικά κάτοπτρα και αποθήκευση θερμικής ενέργειας σε σύστημα ενανθράκωσης-ασβεστοποίησης .....	38
4.1. Διαδικασία παραγωγής τσιμέντου.....	38

4.2. Ενσωμάτωση του συστήματος CSP-CaCO <sub>3</sub> στην βιομηχανία τσιμέντου.....	41
4.3 Σκοπός και στόχος ανάλυσης κύκλου ζωής .....	42
4.4 Περιγραφή σεναρίων και όρια συστήματος .....	43
4.5. Ανάλυση Καταγραφής Δεδομένων .....	47
4.5.1 Ανάλυση καταγραφής δεδομένων για την παραγωγή τσιμέντου .....	47
4.5.2. Ανάλυση καταγραφής δεδομένων συστήματος CSP-CaCO <sub>3</sub> .....	52
4.6. Αξιολόγηση κύριων περιβαλλοντικών επιπτώσεων .....	56
5. Συμπεράσματα .....	60
6. Βιβλιογραφία.....	63

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκαν υβριδικές τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας υψηλής ενθαλπίας με χρήση υλικών αλλαγής φάσης και πραγματοποιήθηκε η ανάλυση κύκλου ζωής ενεργειακής υβριδικής τεχνολογίας ηλιακής ενέργειας CSP με σύστημα αποθήκευσης ενέργειας  $\text{CaCO}_3$ , για χρήση σε τσιμεντοβιομηχανία.

Η προσπάθεια μείωσης των ρυπογόνων αερίων του θερμοκηπίου έχει οδηγήσει τις βιομηχανίες στην αναζήτηση εναλλακτικών τρόπων παραγωγής ενέργειας. Οι τεχνολογίες θερμικής ενέργειας υψηλής ενθαλπίας μπορούν να αποτελέσουν σημαντικές λύσεις στο πολυσύνθετο πρόβλημα της απαλλαγής από τα ορυκτά καύσιμα καθώς μπορούν να μειώσουν τις απώλειες θερμότητας, να μειώσουν τη χρήση ορυκτών καυσίμων, να μειώσουν σημαντικά τις εκπομπές  $\text{CO}_2$  και να αποθηκεύσουν ενέργεια μεγάλης ενεργειακής πυκνότητας τόσο σε βραχυπρόθεσμο όσο και σε μακροπρόθεσμο επίπεδο.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκε τεχνολογία χημικού βρόγχου ασβεστίου (κύκλος ενανθράκωσης-ασβεστοποίησης). Πρόκειται για μία τεχνολογία θερμοχημικής αποθήκευσης ενέργειας που βασίζεται στην αναστρέψιμη θερμική διάσπαση του ασβεστολίθου για αποθήκευση και απελευθέρωση ενέργειας αντίστοιχα. Η τεχνολογία αυτή λειτουργεί σε υψηλές θερμοκρασίες και παρέχει υψηλή ενεργειακή πυκνότητα.

Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε ανάλυση κύκλου ζωής για ένα σύστημα συγκεντρωτικών ηλιοθερμικών συστημάτων σε συνδυασμό με κύκλο  $\text{CaCO}_3$  για την βιομηχανία τσιμέντου. Παρουσιάστηκαν 3 διαφορετικά σενάρια, προσδιορίστηκαν και υπολογίστηκαν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκαλούνται ανά τόνο παραγωγής κλίνκερ τσιμέντου για κάθε ένα από αυτά. Το πρώτο σενάριο αναλύει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις μία συμβατικής τσιμεντοβιομηχανίας με περιστροφική κάμινο που τροφοδοτείται με καύσιμα, ενώ στο σενάριο 2 και 3 γίνεται αντικατάσταση της καμίνου με ηλεκτρική που τροφοδοτείται με ηλεκτρική ενέργεια προερχόμενη από ΑΠΕ σε συνδυασμό με μονάδα αποθήκευσης κύκλου  $\text{CaCO}_3$  για να καλύψει τις ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια για όλα τα στάδια παραγωγής. Το δεύτερο σενάριο αντιμετωπίζει βραχυπρόθεσμη αποθήκευση ενέργειας και το τρίτο σε μακροπρόθεσμη.

Η μεθοδολογία ανάλυσης κύκλου ζωής ξεκινά με τον ορισμό του σκοπού και αντικείμενου της μελέτης, της λειτουργικής μονάδας (1 τόνος τσιμέντου) και των ορίων του συστήματος. Έπειτα, ακολουθεί η καταγραφή δεδομένων όπου προσδιορίζονται οι εισροές-εκροές του συστήματος και οι καταναλώσεις ενέργειας. Το τρίτο στάδιο της AKZ περιλαμβάνει την εκτίμηση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου και συγκεκριμένα γίνεται υπολογισμός των δεικτών της κλιματικής αλλαγής, της οξίνισης, του ευτροφισμού, του φωτοχημικού σχηματισμού όζοντος και του σχηματισμού λεπτών σωματιδίων.

Με την χρήση ηλεκτρικής καμίνου και του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, όλοι οι δείκτες εμφάνισαν σημαντική μείωση, ειδικότερα στον δείκτη της κλιματικής αλλαγής όπου οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα είναι 30 φορές λιγότερες συγκριτικά με τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής.

## ABSTRACT

In this thesis, high enthalpy hybrid energy storage technologies using phase change materials were studied and an extensive analysis and life cycle assessment was carried out for the hybrid concentrated solar energy CSP technology with  $\text{CaCO}_3$  energy storage system on the cement manufacturing industry.

The effort to reduce polluting greenhouse gas emissions has forced industries to look for alternative ways of producing energy. High enthalpy thermal energy technologies can be important solutions to the complex problem of reducing fuel usage as they can exploit heat losses, reduce fuel and emissions, sequester  $\text{CO}_2$ , store high energy density energy both in the short term and in long-term level.

The technology that the thesis mainly focused on is the chemical calcium looping technology or the carbonation-calcination cycle as it is known. It is a thermochemical energy storage technology based on the reversible reaction of limestone depending on the prevailing conditions for energy storage and release respectively. It operates at high temperatures and provides high energy density. A life cycle analysis was performed for a concentrated solar energy- $\text{CaCO}_3$  cycle system applied in the field of cement production. In particular, 3 different scenarios were presented, the environmental impacts caused per ton of cement clinker production were determined and calculated for each of them. Scenario 1 refers to a conventional cement industry with a rotary kiln fed with fuel for the production of cement clinker, while in scenario 2 and 3 the kiln is replaced with an electric one fed with current from renewable energy stored through the  $\text{CaCO}_3$  system to cover all energy needs. Scenario 2 addresses short-term energy storage and 3 long-term.

The life cycle assessment process begins with the definition of the goal and scope of the study, the functional unit and the boundaries of the system. Then follows the data recording where the inputs-outputs of the system and the energy consumptions are determined. The third stage of the LCA includes the assessment of the environmental impact, and in particular, the indicators of

climate change, acidification, eutrophication, photochemical ozone formation, and the formation of fine particles.

Based on the calculation of the indicators and the impact assessment, a large reduction in the environmental footprint for scenarios 2, 3 compared to 1 was found. All indicators showed a significant reduction, especially for climate change, where in scenarios 2 and 3 the carbon dioxide emissions are 30 times less compared to scenario 1. This is particularly promising as it promotes sustainability and a potentially carbon-free world.



## 1. Εισαγωγή

Ένα από τα μείζονα προβλήματα που μαστίζει την σημερινή εποχή είναι η ενεργειακή κρίση, καθώς η ανάγκη για ζήτηση ενέργειας ολοένα και αυξάνεται. Με τον όρο ενεργειακή κρίση χαρακτηρίζεται η αυξημένη ζήτηση ενέργειας σε όλο τον κόσμο και οι αλματώδεις αυξήσεις στις τιμές της. Οι παραδοσιακοί πόροι ενέργειας, όπως τα ορυκτά καύσιμα, συνεχώς εξαντλούνται τόσο λόγω της ζήτησης όσο και της μη λελογισμένης χρήσης τους, η οποία επιφέρει σοβαρές επιπτώσεις στο περιβάλλον.

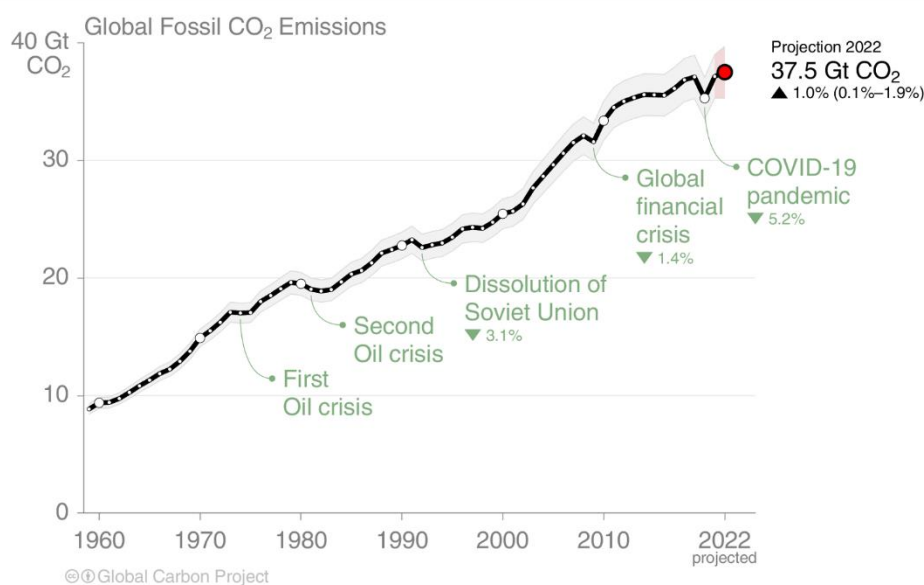
Η παραγωγή και η χρήση ενέργειας ευθύνονται για περισσότερο από το 75 % των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου της ΕΕ[1.1]. Η αύξηση των εκπομπών ευνοεί το φαινόμενο του θερμοκηπίου το οποίο με την σειρά του επιταχύνει την κλιματική αλλαγή. Η κλιματική αλλαγή ορίζεται ως η μεταβολή του παγκόσμιου κλίματος που οφείλεται κατά βάση σε ανθρώπινη δραστηριότητα. Πρόκειται για μία πολύ σοβαρή απειλή με ολέθριες συνέπειες που επηρεάζουν πολλές και διάφορες πτυχές σε περιβάλλον και άνθρωπο. Η χρήση ορυκτών καυσίμων είναι ένας από τους κυριότερους υπεύθυνους εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, ενώ παράλληλα αποτελούν πηγή γεωπολιτικών αναταραχών και συγκρούσεων μεταξύ κρατών..

Επομένως, η ανάγκη για βιώσιμες λύσεις παραγωγής ενέργειας είναι πιο επιτακτική από ποτέ. Η εισχώρηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως ο ήλιος, ο άνεμος και η υδροηλεκτρική ενέργεια στο ενεργειακό μίγμα αποτελεί κλειδί για την μείωση της εξάρτησης από ορυκτά καύσιμα [1.2]. Επίσης, ο συνδυασμός των ΑΠΕ με συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να αποτελέσει μία σημαντική λύση στο πολυπαραγοντικό και πολυσύνθετο ζήτημα της κλιματικής αλλαγής.

Στην προσπάθεια για την καταπολέμηση του φαινομένου του θερμοκηπίου, της υπερθέρμανσης του πλανήτη και της κλιματικής αλλαγής υπογράφηκε το 2015 η συμφωνία του Παρισιού από την Ευρωπαϊκή Ένωση και όλα τα κράτη μέλη της. Κατά τη συμφωνία, η Ευρώπη δεσμεύεται να έχει γίνει η πρώτη κλιματικά ουδέτερη κοινωνία και οικονομία έως το 2050, με ενδιάμεσο στόχο την μείωση των εκπομπών κατά 55% σε σύγκριση με το 1990 μέχρι το 2030 [1.3]. Η ΕΕ

έχει πρωταγωνιστικό ρόλο στον αγώνα κατά της κλιματικής αλλαγής. Εφαρμόζοντας τολμηρές στρατηγικές, καθίσταται παγκόσμιος φορέας καθορισμού προτύπων για την επίτευξη των κλιματικών στόχων. Η κλιματική κρίση αφορά όλο τον κόσμο για αυτό και επιτάσσει συνεργατικές πολιτικές από όλες τις χώρες και επίτευξη καθοριστικών στόχων.

Για την επίτευξη της κλιματικής ουδετερότητας, είναι αναγκαία η ελαχιστοποίηση των αερίων του θερμοκηπίου που απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα. Όλοι οι τομείς της οικονομίας μπορούν και έχουν χρέος να συμβάλουν στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Η βιομηχανία οφείλει να συνεχίσει να εκσυγχρονίζεται και να ρυπαίνει λιγότερο. Οι τομείς της αερομεταφορών και της ναυτιλίας, που είναι από τις ταχύτερα αναπτυσσόμενες πηγές εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, θα πρέπει να γίνουν πιο ενεργειακά αποδοτικοί και να στραφούν προς εναλλακτικά, πιο οικολογικά καύσιμα[1.2].



**Σχήμα 1.1:** Ετήσιο γράφημα εκπομπών CO<sub>2</sub> από ορυκτά καύσιμα [1.4]

Για τη μείωση των εκπομπών των ενεργοβόρων βιομηχανιών, η ΕΕ έχει θεσπίσει το ενωσιακό μητρώο που διασφαλίζει την ακριβή λογιστική καταγραφή όλων των δικαιωμάτων εκπομπής αέριων ρύπων που εκχωρούνται στο πλαίσιο του συστήματος εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπής της ΕΕ (EU ETS). Το EU ETS είναι μια αγορά για άδειες άνθρακα που καθορίζουν την ποσότητα των εκπομπών που μπορούν να απελευθερώσουν στην ατμόσφαιρα οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας, οι βιομηχανικές μονάδες και όλοι οι παραγωγικοί φορείς.

Τα επίπεδα αδειών μειώνονται σταδιακά ώστε να μειωθούν και οι εκπομπές των βιομηχανιών. Το μητρώο καταγράφει:

- Εθνικά μέτρα εφαρμογής (κατάλογο εγκαταστάσεων που καλύπτονται από την οδηγία για το ΣΕΔΕ σε κάθε χώρα της ΕΕ και τυχόν δωρεάν κατανομή σε καθεμία από τις εγκαταστάσεις αυτές κατά την περίοδο 2013-2020)
- Λογαριασμούς εταιρειών ή φυσικών προσώπων που κατέχουν τα εν λόγω δικαιώματα
- Μεταφορές δικαιωμάτων εκπομπής («συναλλαγές») που πραγματοποιούνται από κατόχους λογαριασμού
- Ετήσιες επαληθευμένες εκπομπές CO<sub>2</sub> από εγκαταστάσεις και φορείς εκμετάλλευσης αεροσκαφών
- Ετήσια συμφωνία δικαιωμάτων και εξακριβωμένων εκπομπών, όπου κάθε εταιρεία πρέπει να έχει παραδώσει επαρκή δικαιώματα για την κάλυψη όλων των επαληθευμένων εκπομπών της.

Από το 2005, το EU ETS συνέβαλε στη μείωση των εκπομπών από σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής και βιομηχανίας κατά 37%. Έτσι, δημιουργείται ένα κίνητρο από τις εταιρείες να παράγουν λιγότερους ρύπους και να αναζητούν διαρκώς ανταγωνιστικές πράσινες τεχνολογίες. Η μη συμμόρφωση έχει ως αποτέλεσμα επιβολή φόρων βάση των εκπομπών. Η φορολογία αυτή αποτελεί ένα αποτελεσματικό μέσο για την ενίσχυση της βιώσιμης ανάπτυξης και της προστασίας του περιβάλλοντος[1.3].

## 2. Τεχνολογίες αποθήκευσης θερμικής ενέργειας

### 2.1 Γενικά περί τεχνολογιών αποθήκευσης θερμικής ενέργειας

Οι τεχνολογίες αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (TES ή ΤΑΘΕ) είναι ζωτικής σημασίας για την μετάβαση σε ένα πιο βιώσιμο ενεργειακό σύστημα. Αυτό συμβαίνει επειδή επιτρέπουν την αποθήκευση της παραγόμενης θερμότητας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως ο ήλιος, για χρήση όταν δεν είναι διαθέσιμες. Οι ΤΑΘΕ μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την εξοικονόμηση ενέργειας σε κτίρια και βιομηχανικές διαδικασίες.

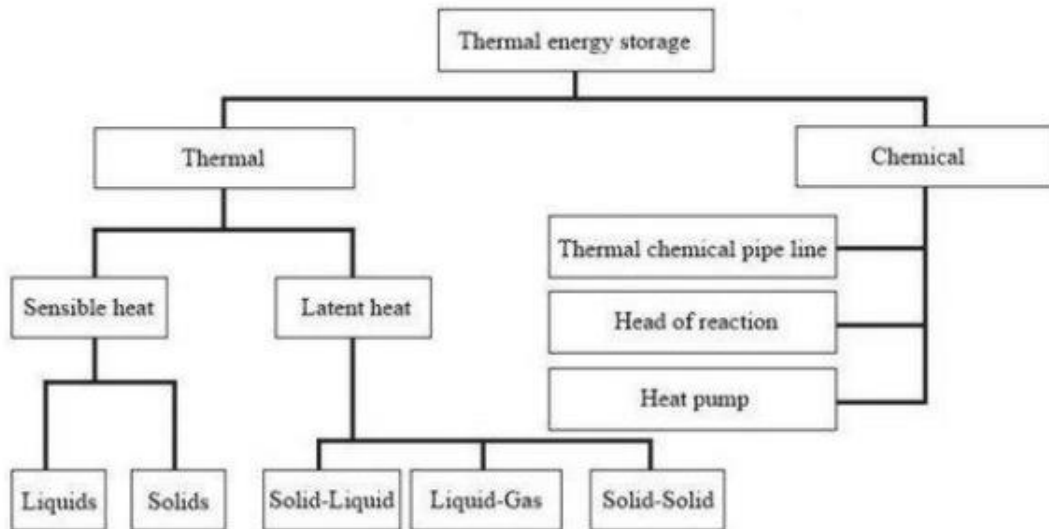
Υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες ΤΑΘΕ, καθεμία με τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Οι πιο κοινές περιλαμβάνουν:

- Αποθήκευση σε λανθάνουσα θερμότητα (LAT): Τα λανθάνοντα συστήματα αποθήκευσης θερμότητας αποθηκεύουν ενέργεια με τη βοήθεια υλικών αλλαγής φάσης (PCMs). Χρησιμοποιούν χημικούς δεσμούς για να αποθηκεύσουν και να απελευθερώσουν θερμότητα. Η αποθήκευση ή η απελευθέρωση θερμότητας συμβαίνει, όταν ένα υλικό μεταπίπτει από στερεό σε υγρό ή από υγρό σε στερεό αντίστοιχα. Όταν θερμαίνεται ένα στερεό PCM, η θερμοκρασία του αρχίζει να αυξάνεται με αποτέλεσμα να αυξάνεται η αισθητή θερμότητά του. Όταν η θερμοκρασία προσεγγίσει τη θερμοκρασία τήξης του υλικού, το υλικό αρχίζει να λιώνει, αλλάζει δηλαδή φάση από στερεό σε υγρό. Η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή μέχρι ο υλικό να λιώσει τελείως και το υλικό αποθηκεύει λανθάνουσα θερμότητα. Λανθάνουσα θερμότητα είναι, η θερμότητα που δεν ευθύνεται για την ανύψωση της θερμοκρασίας του σώματος, αλλά για την καταστροφή της κρυσταλλικής δομής της στερεάς ή της υγρής φάσης του υλικού. Η αντίστροφη διαδικασία ισχύει, όταν έχουμε πτώση της θερμοκρασίας και αλλαγή της φάσης του υλικού από υγρό σε στερεό.
- Μονάδες αποθήκευσης με βάση την αισθητή θερμότητα (sensible heat storage): Αισθητή θερμότητα καλείται το ποσό θερμότητας που απορροφάται ή απελευθερώνεται από ένα υλικό καθώς η θερμοκρασία

του αυξάνεται ή μειώνεται αντίστοιχα και ως εκ τούτου δημιουργεί αλλαγή στην τυχαία κίνηση των μορίων του υλικού. Κατά την αποθήκευση αισθητής θερμότητας, η θερμική ενέργεια αποθηκεύεται αυξάνοντας τη θερμοκρασία ενός στερεού ή υγρού υλικού. Καθοριστικός παράγοντας στα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας υπό μορφή αισθητής θερμότητας, είναι η θερμοχωρητικότητα του υλικού και η μεταβολή της θερμοκρασίας που υφίσταται αυτό κατά τη διαδικασία φόρτισης-εκφόρτισης, δηλαδή κατά τη διαδικασία απορρόφησης και απόδοσης της θερμότητας.

Η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας ΤΑΘΕ εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως την εφαρμογή, το απαιτούμενο μέγεθος αποθήκευσης, το κόστος και τη διαθεσιμότητα χώρου. Ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να χαρακτηριστεί από τις ακόλουθες ιδιότητες:

- Χωρητικότητα (capacity): ορίζει την ενέργεια που μπορεί να αποθηκευτεί στο σύστημα και εξαρτάται από τη διαδικασία αποθήκευσης, το μέσο και το μέγεθος του συστήματος.
- Ισχύς (power): αντιπροσωπεύει τον ρυθμό με τον οποίο η θερμότητα μπορεί να αποθηκευτεί ή να αποδοθεί από το σύστημα.
- Απόδοση (efficiency): ο λόγος της ωφέλιμης ενέργειας προς την ενέργεια που παρέχεται για τη φόρτιση του συστήματος. Υπολογίζει την απώλεια ενέργειας κατά την διάρκεια της περιόδου αποθήκευσης και τον κύκλο φόρτισης-εκφόρτισης.
- Περίοδος αποθήκευσης (storage period): καθορίζει τη διάρκεια του κύκλου αποθήκευσης της ενέργειας.
- Χρόνος φόρτισης-εκφόρτισης (charge and discharge time ): ορίζει πόσο χρόνο χρειάζεται για να φορτιστεί-εκφορτιστεί το σύστημα.
- Κόστος (cost): αναφέρεται είτε στην χωρητικότητα (€/kWh) είτε στην παρεχόμενη ενέργεια (€/kWh) του αποθηκευτικού συστήματος και εξαρτάται από το αρχικό κεφάλαιο και το λειτουργικό κόστος του εξοπλισμού αποθήκευσης και την διάρκεια ζωής του [2.1].

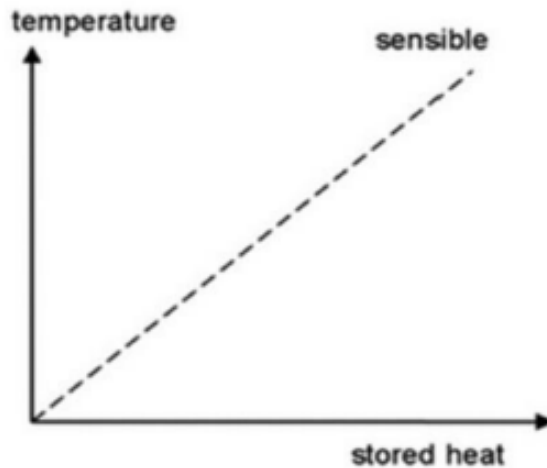


**Σχήμα 2.1:** Κατηγοριοποίηση θερμικής αποθήκευσης ενέργειας [2.2]

**Αποθήκευση αισθητής θερμότητας:** Αποτελεί την πιο ευρέως διαδεδομένη μέθοδο αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Η θερμική ενέργεια αποθηκεύεται με θέρμανση ή ψύξη ενός αποθηκευτικού μέσου χωρίς να αλλάζει η φάση του. Το ποσό της ενέργειας προς αποθήκευση είναι αναλογικό της αλλαγής θερμοκρασίας κατά την φόρτιση, εντός του εύρους λειτουργίας, και της θερμικής ικανότητας του υλικού και δίνεται από την εξίσωση:

$$Q_{SHS} = \int m C_p dT \quad T_h \quad T_l = m C_p (T_h - T_l) \quad (2.1) \quad [2.3]$$

όπου  $m$  η παροχή μάζας του μέσου,  $C_p$  η θερμοχωρητικότητα του,  $C_p^-$  η μέση θερμοχωρητικότητα βασισμένη στην υψηλή θερμοκρασία  $T_h$  και χαμηλή θερμοκρασία  $T_l$ . Η μεταβολή της θερμοκρασίας πραγματοποιείται γραμμικά σε σχέση με την θερμότητα, με την κλίση της ευθείας να εξαρτάται από την θερμοχωρητικότητα όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2.



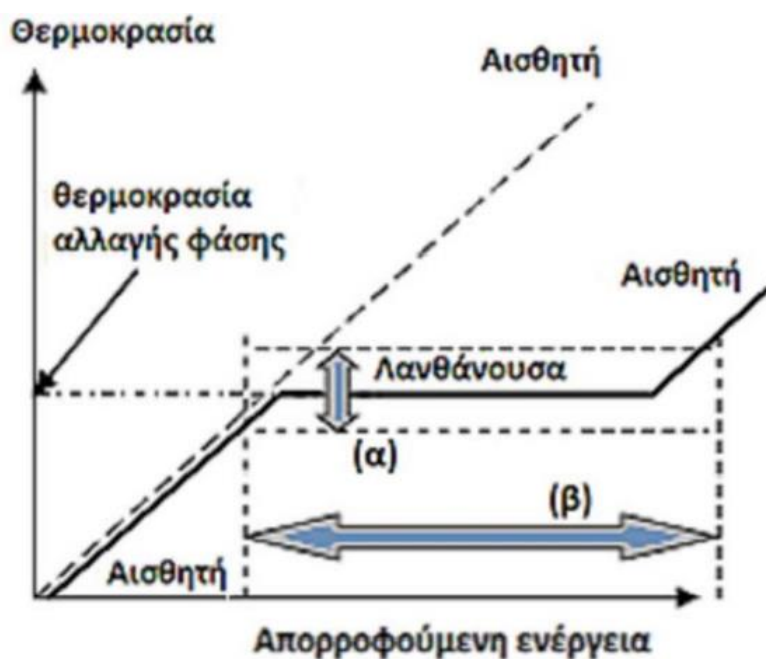
**Σχήμα 2.2:** Μεταβολή θερμοκρασίας κατά την αισθητή αποθήκευση θερμότητας[2.3]

Τα συστήματα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας έχουν δυνατότητα αποθήκευσης 10 kWh έως 50 kWh ανά τόνο αποθηκευτικού μέσου και απόδοση αποθήκευσης μεταξύ 50% και 98%, που εξαρτάται ανάλογα με την ειδική θερμότητα του αποθηκευτικού μέσου και της τεχνολογίας μόνωσης. Το εύρος θερμοκρασίας που λειτουργούν είναι από  $-160^{\circ}\text{C}$  έως και περισσότερο από  $1000^{\circ}\text{C}$ . Αποτελούν την απλούστερη και φθηνότερη μέθοδο αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, ενώ τα μειονεκτήματά τους είναι το μεγάλο περιβαλλοντικό αποτύπωμα, οι αυξημένες ανάγκες για θερμική μόνωση, οι περιορισμένοι χρόνοι διατήρησης της θερμότητας και η ανάγκη για συνεχόμενες εισροές ενέργειας, για την επιθυμητή θερμοκρασία. Εφαρμόζονται συστηματικά, στη βιομηχανία, στα κτίρια, στην τηλεθέρμανση και την ψύξη. Τέτοιου είδους τεχνολογίες αποθήκευσης αισθητής θερμότητας είναι οι εξής[2.4]:

- Δεξαμενή αποθήκευση θερμικής ενέργειας(TTES), χρησιμοποιώντας νερό ως αποθηκευτικό μέσο
- Θερμική αποθήκευση στερεάς κατάστασης (π.χ κεραμικά τούβλα, πέτρες, σκυρόδεμα, σταθερές κλίνες)
- Τηγμένα άλατα
- Υπόγεια αποθήκευση θερμικής ενέργειας(UTES).

**Αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας:** Η λανθάνουσα θερμότητα είναι η θερμότητα που απελευθερώνεται ή απορροφάται από ένα σώμα ή ένα

θερμοδυναμικό σύστημα όταν η θερμοκρασία παραμένει σταθερή. Βασίζεται στην αλλαγή κατάσταση της ύλης δηλαδή την αλλαγή φάσης του. Υλικά αλλαγής φάσης ή αλλιώς PCM (Phase Change Materials) και είναι ικανά να αποθηκεύουν και να απελευθερώνουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας. Η θερμότητα απορροφάται ή απελευθερώνεται όταν το υλικό μεταβάλλεται από στερεό σε υγρό ή αέριο και αντίστροφα. Αναλυτικότερα ,όταν θερμαίνεται ένα στερεό PCM, η θερμοκρασία του αρχίζει να αυξάνεται με αποτέλεσμα να αυξάνεται η αισθητή θερμότητά του. Όταν η θερμοκρασία προσεγγίσει τη θερμοκρασία τήξης του υλικού, το υλικό αρχίζει να λιώνει. Η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή μέχρι το υλικό να λιώσει τελείως και το υλικό αποθηκεύει λανθάνουσα θερμότητα[2.3].



**Σχήμα 2.3:** Αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας από στερεό σε υγρό

Η λανθάνουσα θερμότητα υπολογίζεται από την εξίσωση 2.2:

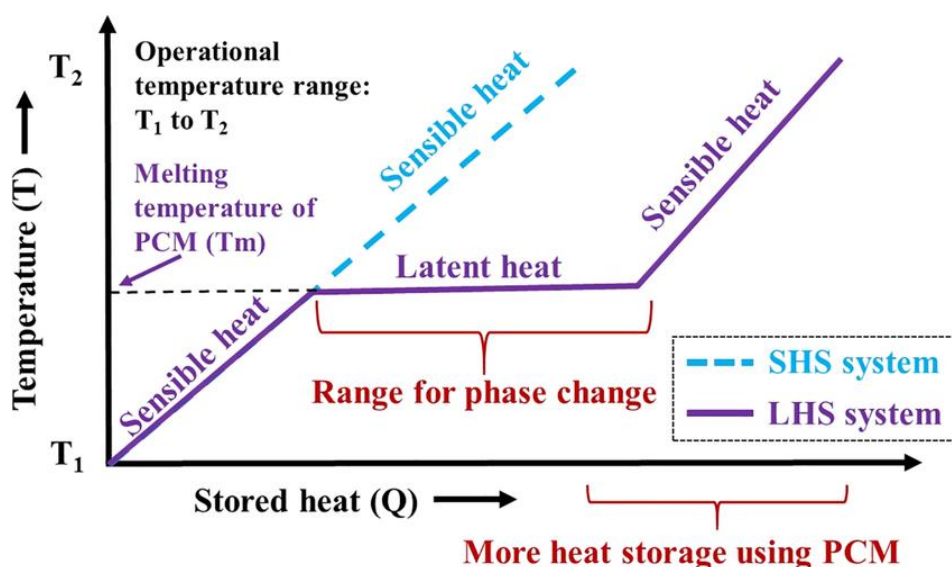
$$QLHS = mCp dT(s) + mL + mCp dT \quad (2.2) \quad [2.3]$$

όπου  $m$  είναι η μάζα του διφασικού υλικού (Phase change material: PCM),  $Cp$  η θερμοχωρητικότητα,  $L$  η ενθαλπία τήξης και  $dT$  η θερμοκρασιακή διαφορά. Ο πρώτος και ο τρίτος όρος στην εξίσωση εκφράζουν την αισθητή θερμότητα στην



στερεά και υγρή φάση ή αέρια φάση αντίστοιχα, ενώ ο δεύτερος εκφράζει την λανθάνουσα θερμότητα τήξης.

Το κύριο κριτήριο για την επιλογή ενός υλικού αλλαγής φάσης είναι το θερμοκρασιακό εύρος που χρειάζεται για την εκάστοτε εφαρμογή. Το μεγάλο πλεονέκτημα των PCM είναι η μεγάλη τους ενεργειακή πυκνότητα, δηλαδή η υψηλότερη ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας συγκριτικά με άλλες πιο φθηνές και απλές μεθόδους, καθώς και η αξιοπιστία τους. Οι τεχνολογίες αυτές παρουσιάζουν ενεργειακές πυκνότητες της τάξης των  $100 \text{ kWh/m}^3$  (π.χ. πάγος) σε σύγκριση με τυπικές επιλογές αισθητής θερμότητας των  $25 \text{ kWh/m}^3$  [2.1].



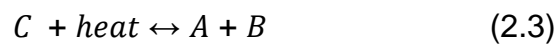
**Σχήμα 2.4:** Μεθοδολογία αποθήκευσης ενέργειας σε αισθητή και λανθάνουσα θερμότητα[2.5].

Τα υλικά αλλαγής φάσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για βραχυπρόθεσμη (καθημερινή) όσο και για μακροπρόθεσμη (εποχιακή) αποθήκευση ενέργειας. Τεχνολογίες αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας που παρουσιάζουν δυνατότητα συνέργειας με ΑΠΕ σε υβριδικές τεχνολογίες είναι οι εξής:

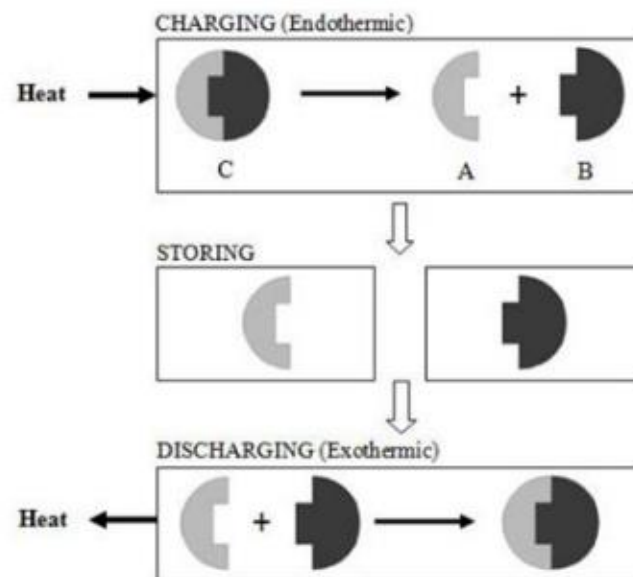
- PCMs για θερμοκρασίες μικρότερες του μηδενός
- Χαμηλής θερμοκρασίας PCMs: με θερμοκρασία αλλαγής φάσης  $0-120^\circ\text{C}$ , π.χ. κεριά παραφίνης και ένυδρα άλατα

- Υψηλής θερμοκρασίας PCMs: με θερμοκρασία αλλαγής φάσης πάνω από 120°C, π.χ. ανόργανα άλατα και τα ευτηκτικά τους μείγματα, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που είναι αποθηκευμένα σε σύνθετα PCM (cPCMs)[2.4].

**Θερμοχημική αποθήκευση θερμότητας:** Σε αυτή την μορφή αποθήκευσης λαμβάνουν χώρα χημικές αντιδράσεις όπου υποχρεωτικά πρέπει να είναι αναστρέψιμες. Συγκεκριμένα, η βασική αρχή δίνεται στην παρακάτω χημική εξίσωση:



Το υλικό  $C$  με την παρουσία θερμότητας διασπάται στα συστατικά  $A, B$  τα οποία μπορούν να αποθηκευτούν ξεχωριστά. Η αντίστροφη αντίδραση λαμβάνει χώρα όταν τα  $A, B$  ενώνονται για να σχηματίσουν το  $C$ . Σε αυτή την αντίδραση απελευθερώνεται ενέργεια η οποία αποτελεί την ανακτώμενη ενέργεια αποθήκευσης. Ουσιαστικά ένας κύκλος θερμοχημικής αποθήκευσης περιλαμβάνει τρεις φάσεις, την φόρτιση, την αποθήκευση και την αποφόρτιση όπως απεικονίζονται στο Σχήμα 2.5 [2.3].



**Σχήμα 2.5:** Φάσεις της θερμοχημικής αποθήκευσης [2.6]

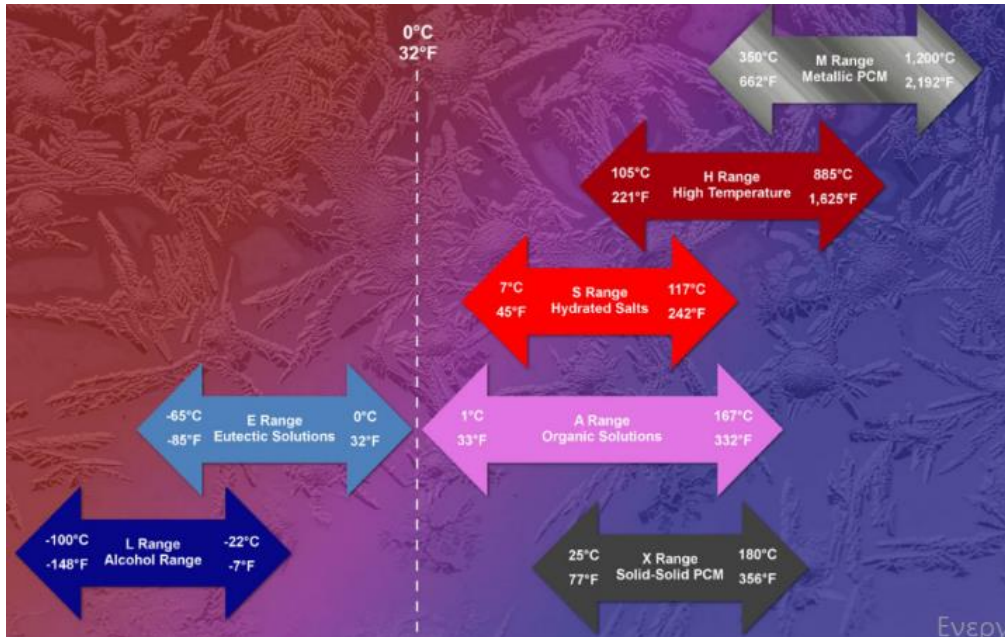
Το μεγάλο πλεονέκτημα της θερμοχημικής αποθήκευσης είναι πως μπορεί να λειτουργήσει σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες και έχει υψηλότερη ενεργειακή

πυκνότητα από την αισθητή και την λανθάνουσα θερμότητα αποθήκευσης. Η παρούσα διπλωματική επικεντρώνεται σε αυτόν τον τρόπο αποθήκευσης και συγκεκριμένα στην αντίδραση διάσπασης του  $\text{CaCO}_3$  καθώς αποτελεί μια τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την δέσμευση άνθρακα.

### 2.3. Τεχνολογίες ανάκτησης απορριπτόμενης θερμότητας στους ενεργοβόρους βιομηχανικούς τομείς

Η τεχνολογία ανάκτησης απορριπτόμενης θερμότητας (WHR) με χρήση υλικών αλλαγής φάσης είναι μία από τις πιο πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες για τους τους βιομηχανικούς τομείς με διεργασίες πολύ υψηλών θερμοκρασιών, συμβάλλοντας στην συνολική βελτιστοποίηση της παραγωγής, την μείωση των απωλειών θερμότητας, τον περιορισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και της χρήσης καυσίμων. Οι θερμοκρασίες στις διεργασίες αυτών των βιομηχανιών κυμαίνονται από 600 °C μέχρι 1650 °C, με αποτέλεσμα να υπάρχουν ροές προϊόντων και παραπροϊόντων σε μεγάλες θερμοκρασίες. Σε αυτές τις θερμοκρασίες, τα PCM που μπορούν να ενσωματωθούν είναι τα τηγμένα άλατα και τα μεταλλικά PCM.

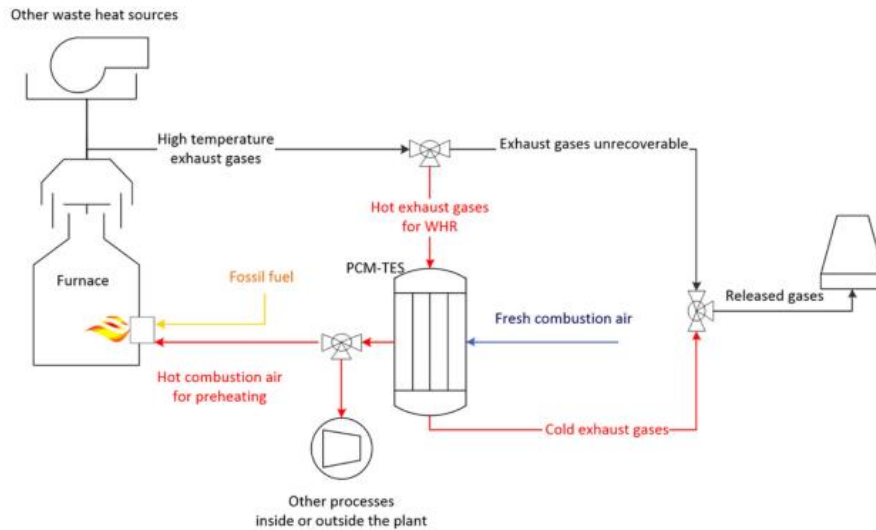
Ένα από τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν συχνά οι εφαρμογές των τηγμένων αλάτων είναι η διαβρωτικές ιδιότητές τους και η μεγάλη μεταβολή όγκου που μπορεί να φτάσει και στο 50%. Παρά τους προηγούμενους τεχνικούς περιορισμούς και τα ελαττώματά τους, τα τηγμένα άλατα είναι ένα από τα πιο χρησιμοποιούμενα PCM λόγω της διαθεσιμότητάς τους και της υψηλής ενεργειακής τους πυκνότητας. Στον αντίποδα, τα κράματα μετάλλων που λειτουργούν ως PCM χαρακτηρίζονται από υψηλή θερμική αγωγιμότητα και ογκομετρική ενεργειακή πυκνότητα. Αν και τα μεταλλικά PCM είναι ευκολότερα στον χειρισμό, καθώς δεν έχουν προβλήματα διάβρωσης, η ενσωμάτωσή τους στα συστήματα είναι πολύπλοκη εξαιτίας της θερμικής διόγκωσης [2.7].



**Σχήμα 2.6:** Διαθέσιμα PCM στο εμπόριο και τα θερμοκρασιακά τους εύρη[2.7]

Η ενσωμάτωση PCM σε καμίνους αποτελεί ένα σύστημα ανάκτησης θερμότητας που στοχεύει στην απορρόφηση θερμότητας από τα καυσαέρια που εξέρχονται και την προθέρμανση των εισερχόμενων αερίων προς καύση. Κατά τη φόρτιση, τα καυσαέρια υψηλής θερμοκρασίας μεταφέρουν την απορριπτόμενη θερμότητα στα PCM, αυξάνοντας τη θερμοκρασία τους μέχρι το σημείο αλλαγής φάσης. Κατά τη αλλαγή φάσης, η θερμότητα αποθηκεύεται σε συνάρτηση με την λανθάνουσα θερμοχωρητικότητα, ενώ τα PCM υγροποιούνται. Η απαιτούμενη θερμότητα ( $Q$ ) για την προθέρμανση των αερίων υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση  $Q=m_{\text{comb}} \cdot C_p \cdot \Delta T_{\text{comb.air}}$  προκειμένου να προσδιοριστεί η χωρητικότητα αποθήκευσης του συστήματος.

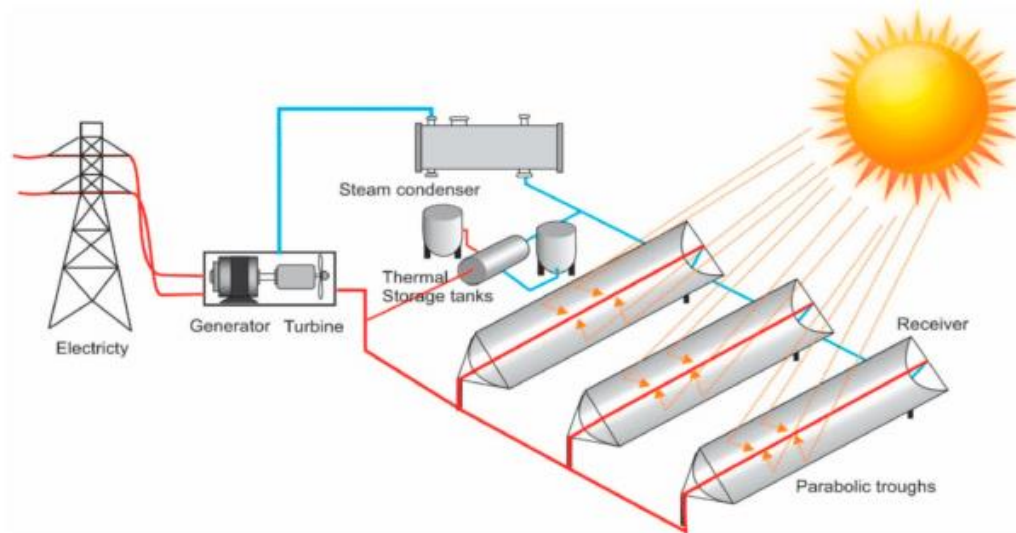
Η χρήση προθερμασμένου αέρα στους καυστήρες αυξάνει σημαντικά την απόδοση της καύσης με αποτέλεσμα να μειώνεται σε μεγάλο βαθμό η κατανάλωση καυσίμου [2.7],[2.8].



**Σχήμα 2.7:** Εφαρμογή ενσωμάτωσης της τεχνολογίας PCM-TES σε κλίβανο για την ανάκτηση θερμότητας καυσαερίων[2.8].

#### 2.4. Εφαρμογές συστημάτων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας προερχόμενης από ανανεώσιμες πηγές

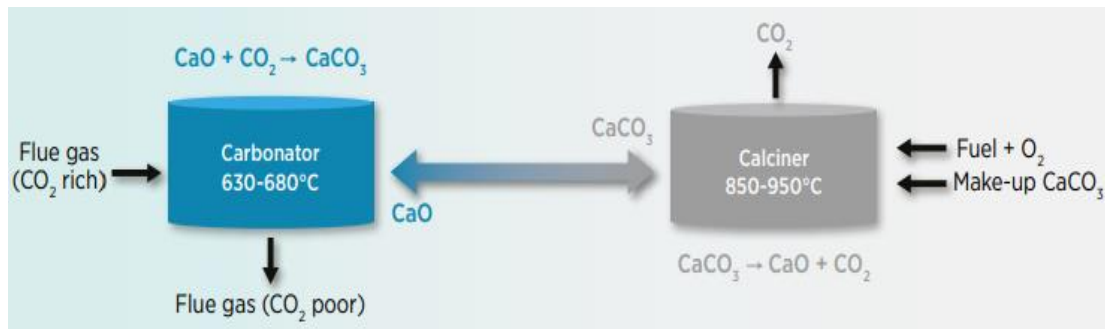
Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας PCM μπορούν να λειτουργήσουν παράλληλα με συστήματα Συγκεντρωτικής Ηλιακής Ενέργειας (CSP) για αποθήκευση θερμικής ενέργειας. Η λειτουργία του συστήματος βασίζεται στην απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω συγκεντρωτικών κατόπτρων σε ένα κοινό σημείο στο κέντρο των συλλεκτών που ονομάζεται απορροφητής [2.9]. Τα PCM απορροφούν την θερμότητα και αυξάνουν την θερμοκρασία τους, αποθηκεύοντας έτσι την θερμική ενέργεια σε δεξαμενές θερμικής αποθήκευσης την οποία μπορεί να απελευθερώσει όταν χρειαστεί για παραγωγή ατμού και παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος σε αμοστρόβιλο. Τα PCM που χρησιμοποιούνται είναι υψηλής θερμοκρασίας λιωμένα άλατα(>300°C) και κράματα μετάλλων (>500°C). Ο ρυθμός φόρτισης και εκφόρτισης παίζει πολύ σημαντικό ρόλο και εξαρτάται από την θερμική τους αγωγιμότητα[2.10]. Η αποθήκευση θερμικής ενέργειας μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της αποδοτικότητας του συστήματος CSP από 25% σε σχεδόν 70%[2.9].



**Σχήμα 2.8:** Αρχή λειτουργίας συστήματος CSP-PCM για παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος[2.10].

## 2.5. Τεχνολογία συστήματος χημικού βρόγχου- Chemical looping

Τα συστήματα χημικού βρόγχου αποτελούν μία τεχνολογία με μεγάλη προοπτική με χαρακτηριστική τεχνολογία αυτής της αναστρέψιμης αντίδρασης όπου ένα οξείδιο μετάλλου αλκαλικής γαίας αντιδρά με το διοξείδιο του άνθρακα για να σχηματίσουν τα αντίστοιχα ανθρακικά τους άλατα[2.11]. Συγκεκριμένα κατά τη παραγωγή  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  γίνεται σε υψηλές θερμοκρασίες ( $850\text{-}900^\circ\text{C}$ ) οι ανθρακικές ενώσεις διασπώνται θερμικά. Η επανένωση των οξειδίων με το  $\text{CO}_2$  απελευθερώνει μεγάλες ποσότητες ενέργειας, μετατρέποντας το χημικό βρόγχο σε τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας με μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα. Αυτή η ενέργεια είναι δυνατό να αποθηκευτεί για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα (βδομάδες ή και μήνες) και να αποδοθεί πίσω πάλι στο σύστημα όταν χρειαστεί. Για παράδειγμα η διαδικασία ενανθράκωσης-πύρωσης του ασβεστολίθου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.9 [2.3].

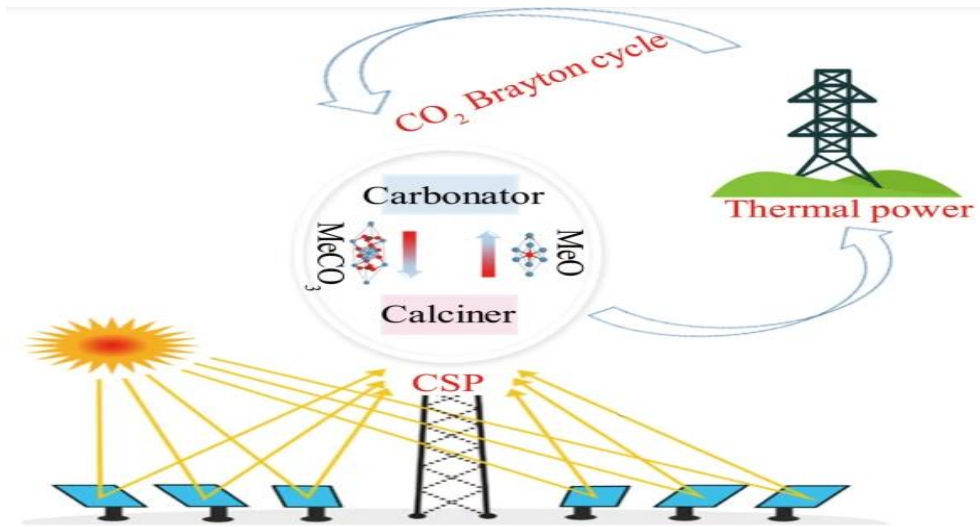


**Σχήμα 2.9:** Διαδικασία χημικού βρόχου ασβεστολίθου.

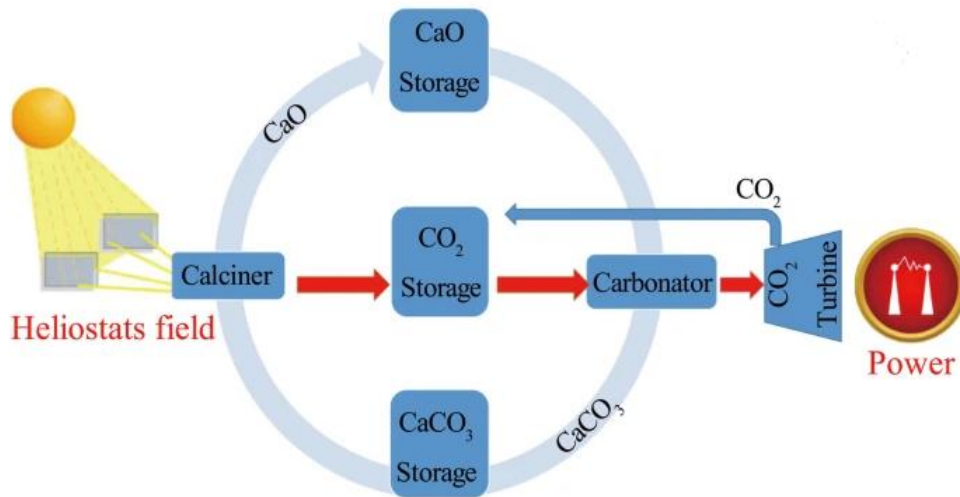
Ο ασβεστίτης CaO εξαιτίας της μεγάλης ενεργειακής του πυκνότητας καθώς και του χαμηλού του κόστους αποτελεί μία βιώσιμη λύση για την αποθήκευση ενέργειας σε χημική μορφή μέσω κύκλων ενανθράκωσης/πύρωσης. Ταυτόχρονα, η δέσμευση του διοξειδίου του άνθρακα επιτυγχάνεται μέσω της ενανθράκωσης του CaO και της αναγέννησης του σε έναν αντιδραστήρα ασβεστοποίησης που λειτουργεί υπό υψηλή μερική πίεση CO<sub>2</sub> και υψηλή θερμοκρασία[2.11],[2.12].

Επίσης, το σύστημα χημικού βρόχου ασβεστίου (Calcium looping) μπορεί να εφαρμοστεί σε τεχνολογίες συγκέντρωσης ηλιακής ενέργειας(CSP) προκειμένου να καλύψει τις ανάγκες αποθήκευσης της πλεονάζουσας θερμικής ενέργειας. Η θερμική ενέργεια συλλέγεται από πεδίο ηλιοστατών για το CSP και η θερμική αποθήκευση αποτελείται από έναν ασβεστοποιητή, έναν ενανθρακωτή, δύο δεξαμενές για αποθήκευση CaO και CaCO<sub>3</sub> και ένα σύστημα αποθήκευσης συμπίεσης CO<sub>2</sub>. Η θερμική ενέργεια που λαμβάνεται μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας οδηγεί στην πύρωση του CaCO<sub>3</sub> και την διάσπαση του σε CaO και CO<sub>2</sub>. Όταν υπάρχει ανάγκη για ενέργεια, τα μόρια CaO και CO<sub>2</sub> κυκλοφορούν στον ενανθρακωτή για να σχηματίσουν CaCO<sub>3</sub>. Η θερμότητα που παράγεται από την εξώθερμη αντίδραση ενανθράκωσης μεταφέρεται μέσω του πλεονάζοντος CO<sub>2</sub> σε έναν αμοστρόβιλο με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.





Σχήμα 2.10: Εφαρμογή CaL στην τεχνολογία CSP[2.11]



Σχήμα 2.11: Διάγραμμα ροής CaL – CSP [2.11]



## 2.6. Τεχνολογία Κύκλου Ενανθράκωσης-Ασβεστοποίησης για Αποθήκευση Θερμικής Ενέργειας και Δέσμευση Διοξειδίου του Άνθρακα

Η τεχνολογία κύκλου ενανθράκωσης/ασβεστοποίησης του CaO μπορεί να συνεισφέρει στην μείωση της συγκέντρωσης του εκπεμπόμενου διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, καθώς και να αξιοποιηθεί για την βραχυπρόθεσμη ή μακροπρόθεσμη αποθήκευση ενέργειας συμβάλλοντας στην αύξηση της απόδοσης σε διεργασίες παραγωγής ενέργειας. Παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, τα οποία είναι:

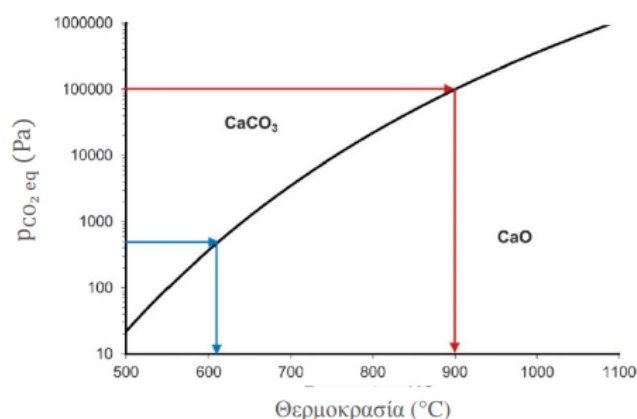
- Χρήση πρώτης ύλης χαμηλού κόστους
- Μη τοξικότητα
- Μεγάλη διαθεσιμότητα ασβεστόλιθου
- Απουσία απαίτησης επεξεργασίας απαερίων
- Υψηλή ενεργειακή απόδοση (3.2MJ/kg CaO)
- Δυνατότητα αξιοποίησης σε διαθέσιμες τεχνολογίες ρευστοαιώρησης [2.13].

Η αντίδραση που λαμβάνει χώρα είναι η παρακάτω:



Η αμφίδρομη αντίδραση του κύκλου ασβεστοποίησης-ενανθράκωσης μπορεί να δεσμεύσει το διοξείδιο του άνθρακα όταν μετατοπίζεται η ισορροπία προς τα δεξιά (ενανθράκωση) μετατρέποντας το οξείδιο του ασβεστίου σε ανθρακικό ασβέστιο όπως, επίσης, μπορεί να αποδεσμεύσει το καθαρό διοξείδιο και να αναγεννήσει το οξείδιο του ασβεστίου κατά την αντίστροφη πορεία (ασβεστοποίηση). Η πλευρά που θα μετατοπιστεί η ισορροπία εξαρτάται από την θερμοδυναμική του συστήματος. Μέσω του παρακάτω διαγράμματος προσδιορίζεται η μερική πίεση διοξειδίου του άνθρακα σε σχέση με τη θερμοκρασία για να ευνοηθεί η ενανθράκωση. Οι αντιδραστήρες που χρησιμοποιούνται για τη κυκλική διεργασία [2.13] είναι δύο διασυνδεδεμένοι

αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης που ονομάζονται ενανθρακωτής και ασβεστοποιητής αντίστοιχα.



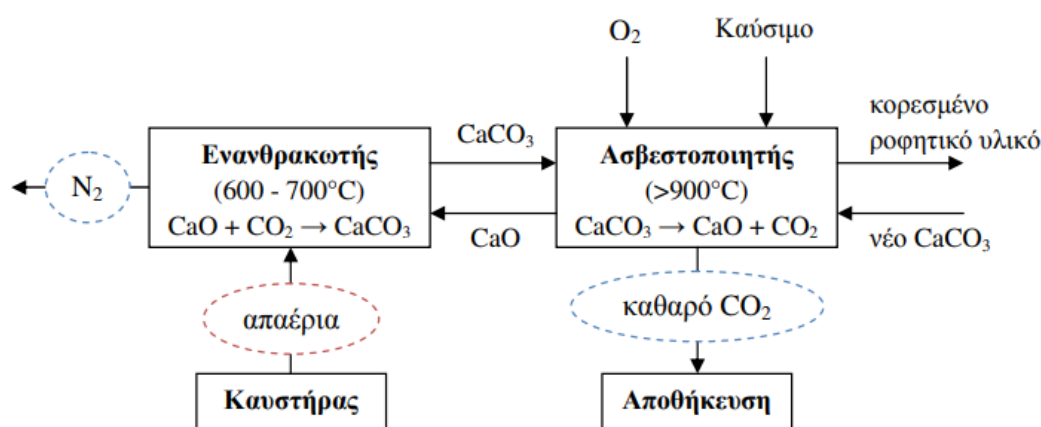
**Σχήμα 2.12:** Διάγραμμα ισορροπίας της αντίδρασης ενανθράκωσης-ασβεστοποίησης[2.13]

#### 2.6.1 Αρχή λειτουργίας -Κινητική-Θερμοδυναμική του συστήματος

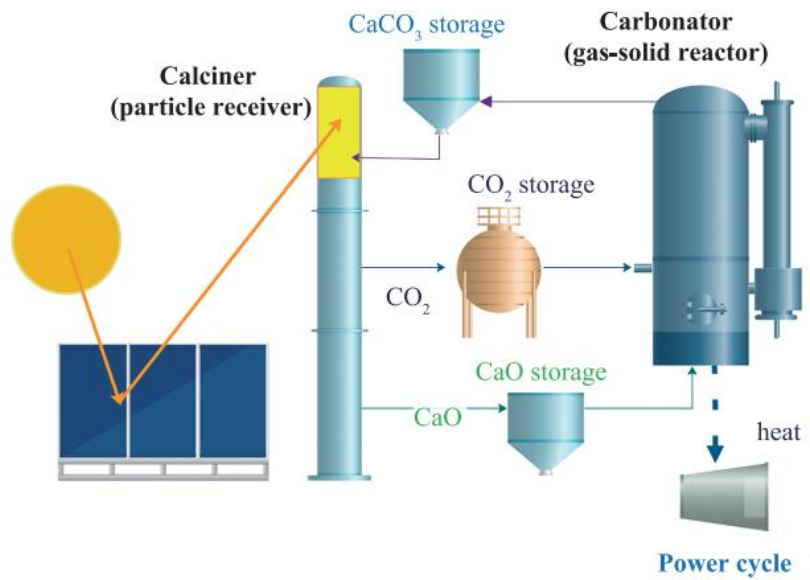
Η διαδικασία ξεκινά με την εισαγωγή των απαερίων από καμίνοους πύρωσης, όπου ένα ροφητικό υλικό με βάση το CaO αντιδρά με το CO<sub>2</sub> προς σχηματισμό CaCO<sub>3</sub>. Η αντίδραση της ενανθράκωσης, είναι μια τυπική αντίδραση αερίου-στερεού προς σχηματισμό ενός νέου στερεού προϊόντος, είναι εξώθερμη και πραγματοποιείται σε δύο διαφορετικά στάδια[2.14]. Το πρώτο στάδιο το ελέγχει η κινητική της αντίδρασης και είναι ταχύ, ενώ το δεύτερο ελέγχεται από την διάχυση του διοξειδίου του άνθρακα μέσα από το στρώμα ανθρακικού ασβεστίου που σχηματίζεται στην επιφάνεια του CaO και είναι βραδύ, διαρκώντας από ώρες έως μέρες. Η κινητήρια δύναμη της ενανθράκωσης μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, καθώς η μερική πίεση ισορροπίας του CO<sub>2</sub> ( $P_{CO_2eq}$ ) αυξάνεται. Η τιμή της  $P_{CO_2eq}$  αρχίζει να ξεπερνά την τυπική πίεση του CO<sub>2</sub> στον αέρα ( $p_{CO_2} \cong 0.035$  kPa) σε θερμοκρασίες γύρω στους 550°C. Παρ' όλα αυτά, τυπικές τιμές της  $P_{CO_2}$  στα απαέρια καύσης φθάνουν μέχρι και τα 20 kPa, τιμή που ισούται με την  $P_{CO_2eq}$  σε θερμοκρασίες κοντά στους 800°C. Η ενανθράκωση πρακτικά εκτελείται στην θερμοκρασία των 650°C καθώς αυτή η θερμοκρασία μπορεί να διασφαλίσει παράλληλα μία

χαμηλή τιμή συγκέντρωσης CO<sub>2</sub> ισορροπίας (κοντά στο 1% vol) και μία αρκετά γρήγορη κινητική για την αντίδραση ενανθράκωσης, επιτρέποντας τελικά την αποτελεσματική μείωση της συγκέντρωσης του CO<sub>2</sub> του ρεύματος που εξέρχεται από τον αντιδραστήρα [2.15].

Η αντίδραση της ασβεστοποίησης, η οποία είναι ενδόθερμη και στοχεύει στην θερμική διάσπαση του ασβεστόλιθου. Η θερμοκρασία της αντίδρασης είναι άνω των 930°C και οδηγεί σε πολύ υψηλή συγκέντρωση CO<sub>2</sub> (70-90% vol) [2.15]. Η διάσπαση του CaCO<sub>3</sub> απαιτεί η P<sub>CO<sub>2</sub>eq</sub> να υπερβαίνει την ατμοσφαιρική πίεση (p<sub>atm</sub> = 101 kPa), κάτι που συμβαίνει στους 898°C. Έτσι, η ασβεστοποίηση πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες άνω των 900°C και συνήθως διαρκεί από 0 έως 15 λεπτά για να ολοκληρωθεί [2.16], ανάλογα με την κοκκομετρία και το πορώδες του υλικού. Για την πραγματοποίηση του κύκλου που περιγράφηκε παραπάνω χρησιμοποιούνται δύο συζευγμένες (συζυγείς κλίνες, DFB) κλίνες ρευστοποιημένες ανακυκλοφορίας. Οι αντιδράσεις που περιγράφουν την θερμική διάσπαση και την ενανθράκωση του CaO είναι οι εξής:



**Σχήμα 2.13:** Απεικόνιση λειτουργίας του κύκλου ενανθράκωσης-ασβεστοποίησης για την δέσμευση CO<sub>2</sub> [2.13]



**Σχήμα 2.14:** Θερμοχημικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας χημικού βρόγχου ασβεστίου[2.17]

### 2.6.3 Περιορισμοί αποδοτικότητας του συστήματος

Το κύριο χαρακτηριστικό και ζητούμενο που επηρεάζει την αποδοτικότητα και την αποτελεσματικότητα του συστήματος είναι το κατά πόσο το CaO διατηρεί την υψηλή του αντιδραστικότητα τόσο ως ροφητής διοξειδίου του άνθρακα, όσο και ως μέσο αποθήκευσης ενέργειας. Το κύριο πρόβλημα αυτής της μεθόδου εντοπίζεται στο γεγονός ότι το CaO χάνει την ροφητική του ικανότητα μετά από πολλαπλούς κύκλους ενανθράκωσης-ασβεστοποίησης. Η ελάττωση της ενεργότητας των ροφητικών υλικών με βάση το CaO ευθύνεται κυρίως στην πυροσυσσωμάτωση που πραγματοποιείται, αλλά και στην μείωση της ροφητικής τους ικανότητας τους λόγω των τριβών που αναπτύσσονται στις κλίνες ρευστοαιώρησης.

### 3. Ανάλυση Κύκλου Ζωής

#### 3.1. Εισαγωγή στην ανάλυση κύκλου ζωής

Η περιβαλλοντική ευαισθητοποίηση των τελευταίων χρόνων έχει οδηγήσει αρκετές βιομηχανίες και επιχειρήσεις στην αξιολόγηση του τρόπου με τον οποίο οι δραστηριότητες τους επηρεάζουν το περιβάλλον με αποτέλεσμα και στην αναζήτηση μεθόδων ελαχιστοποίησης αυτών των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η διερεύνηση στρατηγικών πρόληψης της ρύπανσης καθώς και συστημάτων περιβαλλοντικής διαχείρισης για την βελτίωση των περιβαλλοντικών επιδόσεων αποτελεί προτεραιότητα για τις βιομηχανίες.

Αυτή η ανάγκη εκτίμησης και βελτίωσης των περιβαλλοντικών επιδόσεων έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη διαφόρων εργαλείων περιβαλλοντικής διαχείρισης. Μέσω αυτών των εργαλείων επιτυγχάνεται ο περιβαλλοντικός έλεγχος, η αξιολόγηση και διαχείριση των περιβαλλοντικών επιδόσεων με τελικό στόχο την ελάττωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Τα κυριότερα εργαλεία που χρησιμοποιούνται είναι ο «Καθαρός Σχεδιασμός» (clean design), η «Ανάλυση Κύκλου Ζωής» (Life Cycle Assessment), η «Βιομηχανική Οικολογία» (Industrial Ecology) και η «Παρακολούθηση Προϊόντων» (Product Stewardship). Ορισμένα από τα παραπάνω εργαλεία έχουν αναπτυχθεί και εφαρμοστεί σε μεγάλο βαθμό για την εκτίμηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος και την ανεύρεση λύσεων ελάττωσης του.. [3.1],[3.2],[3.3]

Ένα από τα βασικότερα εργαλεία περιβαλλοντικής διαχείρισης αποτελεί η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ), ή LCA. Πρόκειται για ένα εργαλείο υπολογισμού των συνολικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων από όλα τα στάδια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος ή δραστηριότητας. Στα βιομηχανικά συστήματα, η αξιολόγηση αυτή αρχίζει από την εξόρυξη-εξαγωγή των πρώτων υλών από την Γη για την παρασκευή του προϊόντος και ολοκληρώνεται στο σημείο που ολοκληρώνεται ο κύκλος ζωής του προϊόντος. Η ΑΚΖ επιτρέπει την αξιολόγηση του αθροιστικού περιβαλλοντικού αντίκτυπου, αλλά και των επιμέρους σταδίων του κύκλου ζωής του προϊόντος, συχνά συμπεριλαμβανομένων των επιπτώσεων (π.χ. εξόρυξη πρώτων υλών, υλικά μεταφορά, τελική διάθεση του προϊόντος κ.λπ.), αποτυπώνοντας μια ολοκληρωμένη, έγκυρη και ακριβή

εικόνα των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του προϊόντος ή της δραστηριότητας[3.4],[3.5].

Στην παρακάτω εικόνα παρατίθεται μια σχηματική απεικόνιση του κύκλου ζωής, για την κατανόηση των σταδίων που επιβάλλεται να ληφθούν υπόψη κατά την ΑΚΖ ενός προϊόντος. Η σαφής καταγραφή και ο διεξοδικός έλεγχος όλων των σταδίων ζωής κρίνεται απαραίτητος για την εγκυρότητα του αποτελέσματος.



**Σχήμα 3.1:** Σχηματική απεικόνιση κύκλου ζωής ενός προϊόντος.[3.5]

### 3.2. Ανάλυση κύκλου ζωής- Μεθοδολογία και Πρότυπα ISO

Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης ISO (International Standardization Organization) για την περιβαλλοντική διαχείριση η μεθοδολογία της ΑΚΖ αποτελείται από τέσσερα στάδια (ISO 14040-14044). Αυτά τα 4 στάδια είναι τα εξής[3.5,3.6]:

1. Καθορισμός σκοπού και αντικειμένου της μελέτης (Goal and scope definition - ISO 14040)
2. Απογραφή δεδομένων (LCI, Life Cycle Inventory – ISO 14041)
3. Εκτίμηση επιπτώσεων (LCIA, Life Cycle Impact Assessment – ISO 14042)
4. Ερμηνεία των αποτελεσμάτων (Interpretation – ISO 14042)

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται το μεθοδολογικό πλαίσιο της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής.



Σχήμα 3.2: Μεθοδολογικό πλαίσιο ανάλυσης κύκλου ζωής[3.5]

### 3.2.1. Ορισμός του σκοπού και του στόχου

Το συγκεκριμένο στάδιο αποτελεί το πρώτο στάδιο της μελέτης και είναι ιδιαίτερα σημαντικό συμβάλλοντας καθοριστικά στην έκβαση της μελέτης. Πρέπει να σημειωθεί πως ο στόχος και ο σκοπός της ανάλυσης υφίσταται συνεχώς αναθεώρηση και βελτίωση, λόγω των νέων πληροφοριών που προστίθενται κατά την διεξαγωγή της μελέτης LCA. Οι παράγοντες που προσδιορίζονται είναι οι εξής[3.3]:

**Σκοπός:** Κατά τον ορισμό του σκοπού, ορίζονται όλα τα στοιχεία που συμπεριλαμβάνονται στην ανάλυση και οι μέθοδοι εκτίμησης που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν, ενώ ταυτόχρονα θέτονται τα όρια της ανάλυσης [3.5].

**Στόχος:** Αποσαφηνίζοντας τον στόχο δηλώνεται ακριβώς η επιδιωκόμενη εφαρμογή της συγκεκριμένης ανάλυσης. Παράλληλα, γίνεται διευκρίνηση των αιτιών που διεξάγεται η μελέτη και το κοινό όπου απευθύνεται. Επιπλέον, ορίζεται η μελλοντική χρήση των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν, καθώς και οι χρήστες που θα τα αξιοποιήσουν.[3.3,3.5]

**Λειτουργική μονάδα:** Καθορίζει την μονάδα αναφοράς όπου γίνεται η κανονικοποίηση των εισροών και εκροών του συστήματος. Επίσης, η λειτουργική μονάδα ορίζει την κλίμακα για τη μετρήσιμη σύγκριση δύο ή περισσότερων προϊόντων. Αντικατοπτρίζει ένα μέτρο της απόδοσης του συστήματος του προϊόντος που μελετάται και αποτελεί αναφορά συσχέτισης των εισροών και εκροών, απαραίτητη για τη διασφάλιση της συγκρισιμότητας των αποτελεσμάτων[3.3,3.7].

**Όρια συστήματος:** Τα όρια του συστήματος καθορίζουν τις διεργασίες που θα συμπεριληφθούν στην μελέτη.. Επίσης, καθορίζουν τις εισροές και εκροές του κύκλου ζωής της διεργασίας/προϊόντος που μελετάται. Παραδείγματα ορίων είναι τα όρια μεταξύ τεχνόσφαιρας(προκύπτουν από την ανθρώπινη δραστηριότητα) και οικόσφαιρας(δεν προκύπτουν από την ανθρώπινη δραστηριότητα), γεωγραφικά και χρονικά όρια, όρια μεταξύ του κύκλου ζωής που μελετάται και του κύκλου ζωής άλλων συστημάτων[3.2,3.3,3.5].

**Ποιότητα δεδομένων:** Η ποιότητα των δεδομένων που εισάγονται στην ανάλυση καθορίζει και την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων που λαμβάνονται.[3.3]

**Διαδικασία κριτικής επισκόπησης:** Πραγματοποιείται για να επιβεβαιώσει την ποιότητα της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής και των αποτελεσμάτων.[3.3]

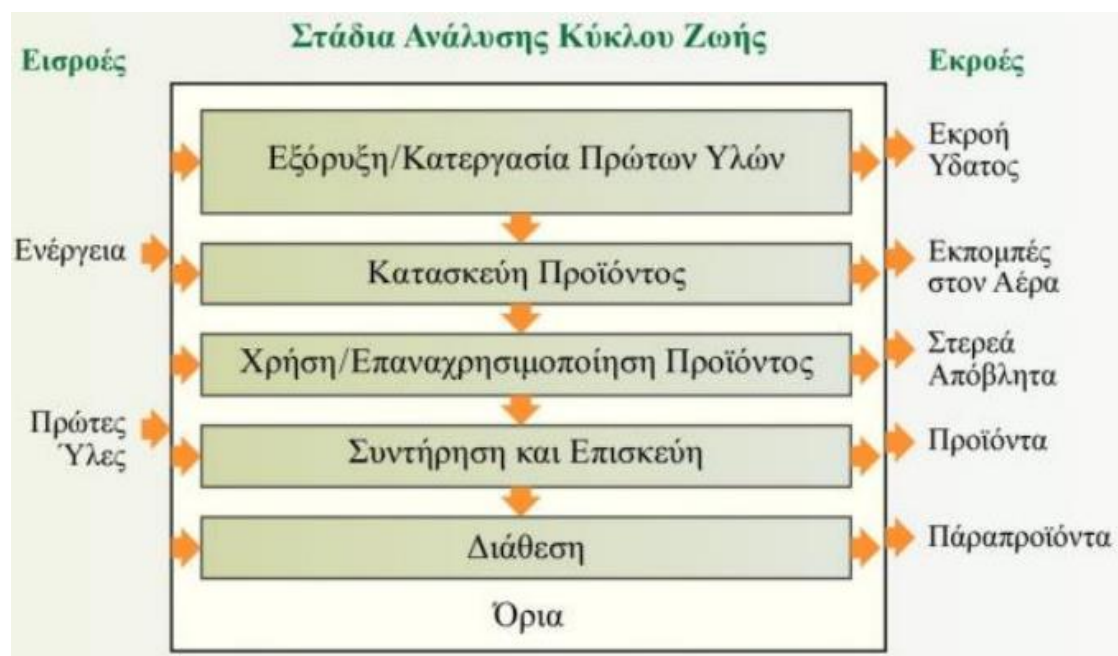
### 3.2.2 Ανάλυση της καταγραφής των δεδομένων του συστήματος

Το δεύτερο στάδιο της AKZ ενός προϊόντος, μιας διαδικασίας ή μιας δραστηριότητας αποτελεί η ανάλυση της απογραφής δεδομένων. Περιλαμβάνει τη συλλογή και επεξεργασία όλων των απαραίτητων δεδομένων με σκοπό την ποσοτικοποίηση των εισροών και εκροών ενός συστήματος. Πιο αναλυτικά περιλαμβάνει τα εξής θέματα:

**Συλλογή δεδομένων:** Η συλλογή των δεδομένων συνιστά μία από τις πιο χρονοβόρες και σημαντικές διαδικασίες της μελέτης. Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της ανάλυσης είναι φυσικό επακόλουθο της ορθής συλλογής δεδομένων. Μετά των ορισμό των σταδίων που θα θεωρηθούν στην ανάλυση, πραγματοποιείται η συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων για την



ποσοτικοποίηση των εισροών και εκροών του συστήματος. Οι εισροές περιέχουν τις εισαγόμενες πρώτες ύλες και την ενέργεια που καταναλώνεται, ενώ οι εκροές, τα προϊόντα, τα στερεά απόβλητα, τους αέριους ρύπους, τα υγρά απόβλητα και την αποβαλλόμενη ενέργεια.[3.3, 3.5]



**Σχήμα 3.3:** Διάγραμμα εισροών-εκροών και σταδίων ανάλυσης κύκλου ζωής ενός προϊόντος[3.5]

**Επανακαθορισμός των ορίων του συστήματος:** Σε αυτό το στάδιο μπορεί να γίνει, αν κριθεί αναγκαίο, επανακαθορισμός των ορίων που είχαν τεθεί προηγουμένως.

**Αναφορά δεδομένων:** Τα δεδομένα που συλλέχτηκαν κατά την ανάλυση της απογραφής δίνονται στο αρμόδιο κοινό όπου καλείται να αναδείξει μέρος των δεδομένων που χρίζει βελτίωσης ή διαφοροποίησης.

**Συσχέτιση δεδομένων:** Μετά την συλλογή των τελικών δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν, ακολουθεί η αναγωγή τους στην λειτουργική μονάδα που έχει οριστεί στο πρώτο στάδιο της μεθοδολογίας (ορισμός σκοπού και στόχου) [3.3,3.5].

**Κατανομή επιπτώσεων:** Στις περιπτώσεις εξέτασης περίπλοκων συστημάτων και δυσκολίας διαχείρισης των δεδομένων, απαιτείται συχνά η

επιλογή των πιο σημαντικών αλληλεπιδράσεων μεταξύ των επιμέρους τμημάτων του συστήματος που μελετάται.[3.5]

### 3.2.3 Εκτίμηση των επιπτώσεων

Το τρίτο στάδιο της μελέτης του κύκλου ζωής αποτελεί η διαδικασία εκτίμησης των επιπτώσεων. Σε αυτή την διαδικασία, εντοπίζονται και χαρακτηρίζονται ως θετικές ή αρνητικές οι επιπτώσεις που προκύπτουν στο περιβάλλον από το εξεταζόμενο σύστημα. Η ορθή και ποιοτική συλλογή δεδομένων που έχει αναφερθεί στο στάδιο της απογραφής παίζει πολύ σημαντικό ρόλο για την ποιότητα και την εγκυρότητα της εκτίμησης. Τα στάδια που απαρτίζουν την εκτίμηση των επιπτώσεων είναι τα εξής[3.3]:

**Επιλογή της μεθόδου και των κατηγοριών επιπτώσεων:** Η εκτίμηση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου μπορεί να αποτυπωθεί μέσω κατηγοριών ενδιάμεσου (midpoint) ή και τελικού σημείου(endpoint). Οι κατηγορίες ενδιάμεσου σημείου αφορούν επιπτώσεις που εντάσσονται σε διαφορετικές κατηγορίες, ενώ οι επιπτώσεις των κατηγοριών τελικού σημείου ταξινομούνται στα ακόλουθα τρία επίπεδα αντίκτυπων:

A) Επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία

B) Επιπτώσεις στο οικοσύστημα

Γ) Επιπτώσεις φυσικών πόρων( αναφέρεται στην εξάντληση τους)

Η μέθοδος που έχει προταθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση για τον χαρακτηρισμό του Περιβαλλοντικού Αποτυπώματος ενός Προϊόντος (EUPEF) είναι η ILCD 2011 Midpoint+ και εξετάζει τις ακόλουθες κατηγορίες:

1) Κλιματική αλλαγή (Climate change)

2) Καταστροφή του όζοντος (Ozone depletion)

3) Τοξικότητα στον άνθρωπο- καρκινογόνες επιπτώσεις (Human toxicity, carcinogenic)

4) Τοξικότητα για τον άνθρωπο -μη καρκινογόνες επιπτώσεις (Human toxicity, non-carcinogenic)

5) Αιωρούμενα σωματίδια (Particulate matter)

- 6) Ιονίζουσα ακτινοβολία (Ionising radiation)
- 7) Φωτοχημικός σχηματισμός όζοντος (Photochemical ozone formation)
- 8) Ευτροφισμός χερσαίων εδαφών ( Terrestrial eutrophication)
- 9) Ευτροφισμός γλυκών υδάτων ( Freshwater eutrophication)
- 10) Οξίνιση (Acidification)
- 11) Οικοτοξικότητα για καθαρά υδατικά συστήματα (Exotoxicity)
- 12) Εξάντληση πόρων- νερό (Depletion of sources, water)
- 13) Εξάντληση πόρων - ορυκτά, μεταλλεύματα (Depletion of sources, fossil fuels and metals)
- 14) Μετασχηματισμός της γης [3.3,3.5]

**Κατηγοριοποίηση:** σε αυτό το στάδιο της εκτίμησης των επιπτώσεων πραγματοποιείται η κατηγοριοποίηση των δεδομένων εισροών και εκροών του συστήματος στις κατηγορίες επιπτώσεων που έχουν επιλεγθεί.[3.3, 3.7]

**Χαρακτηρισμός:** σε αυτό το στάδιο γίνεται η ανάλυση, ποσοτικοποίηση και άθροιση των περιβαλλοντικών φορτίων που ανήκουν στις διάφορες επιμέρους κατηγορίες. Ο χαρακτηρισμός προσεγγίζεται από την δημιουργία μιας βάσης δεδομένων για τις συνολικές εισροές και εκροές της κάθε κατηγορίας με σκοπό την αποτύπωση του θετικού ή αρνητικού ισοζυγίου των διαδικασιών που πραγματοποιούνται στο κύκλο ζωής [3.3,3.5].

**Εκτίμηση/Αξιολόγηση:** Το βήμα αυτό αποσκοπεί στην ορθή αξιολόγηση των αποτελεσμάτων για τις διαφορετικές κατηγορίες επιπτώσεων με σκοπό την έκθεση του αντίστοιχου ποσοστού σημαντικότητας των διαφορετικών εκπομπών και διεργασιών. [3.3]

#### 3.2.5. Ερμηνεία των αποτελεσμάτων

Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων είναι το στάδιο όπου τα αποτελέσματα της ανάλυσης εξετάζονται, ερμηνεύονται και αξιολογούνται για να βγουν τα τελικά συμπεράσματα. Τα στάδια που περιγράφουν την ερμηνεία των αποτελεσμάτων είναι:

**Αναγνώριση των περιβαλλοντικά σημαντικών θεμάτων:** στο στάδιο αυτό αντλούνται πληροφορίες από τα αποτελέσματα και ορίζονται τα πιο σημαντικά περιβαλλοντικά ζητήματα με βάση τον στόχο και τον σκοπό της ανάλυσης κύκλου ζωής.[3.3,3.7]

**Αξιολόγηση:** βάση του στόχου και του αντικειμένου της εφαρμογής πραγματοποιείται γενική αξιολόγηση όλων των αποτελεσμάτων της μελέτης. Διεξάγεται έλεγχος ακρίβειας όλων των υπολογισμών και έλεγχος συνέπειας και πληρότητας. Έτσι, επιβεβαιώνεται η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων της μελέτης .[3.3,3.5]

**Συμπεράσματα και προτάσεις:** το στάδιο αυτό αφορά τα βασικά συμπεράσματα της μελέτης και τις προτάσεις-λύσεις με απώτερο σκοπό την μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος.[3.5]

### 3.3. Πλεονεκτήματα και περιορισμοί της ανάλυσης του κύκλου ζωής

Τα τελευταία χρόνια οι μελέτες ΑΚΖ αυξάνονται ραγδαία και αυτό οφείλεται στα πολλά τους πλεονεκτήματα, τα οποία ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία αφορά αλλαγές με σκοπό την βελτίωση του περιβαλλοντικού αντικτύπου καθώς δύναται να πραγματοποιηθεί σύγκριση και καταγραφή αποτελεσμάτων της απόδοσης ανάμεσα σε εναλλακτικές-καινοτόμες και συμβατικές διαδικασίες, προϊόντα, τεχνολογίες. Αναγνωρίζεται η δυνατότητα βελτίωσης διαδικασιών και προϊόντων, υπολογίζεται πόσο φιλικό ή μη είναι ένα προϊόν ή μία διαδικασία προς το περιβάλλον. Η δεύτερη κατηγορία την επικοινωνία των συμπερασμάτων μεταξύ του ενδιαφερόμενου κοινού, παρέχοντας ποσοτική πληροφόρηση και δημιουργώντας ευκαιρίες για ανάπτυξη σχέσεων εμπιστοσύνης.[3.5,3.8]

Ωστόσο, οι ΑΚΖ συχνά συναντούν περιορισμούς που μπορεί να οφείλονται σε: Ελλείψεις δεδομένων: η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων μιας ΑΚΖ εξαρτάται κυρίως από την διαθεσιμότητα και την ποιότητα των δεδομένων. Η ελλείψεις δεδομένων είναι ένα σύνηθες φαινόμενο σε νέες τεχνολογίες.

- Αδυναμία αναγνώρισης τοπικών και χρονικών επιδράσεων
- Αδυναμία συνυπολογισμού των μηχανισμών αγοράς και των δευτερογενών αποτελεσμάτων της τεχνολογικής ανάπτυξης

- Διαφοροποιήσεις αποτελεσμάτων εξαιτίας τεχνικών θεωρήσεων και υποκειμενικών επιλογών

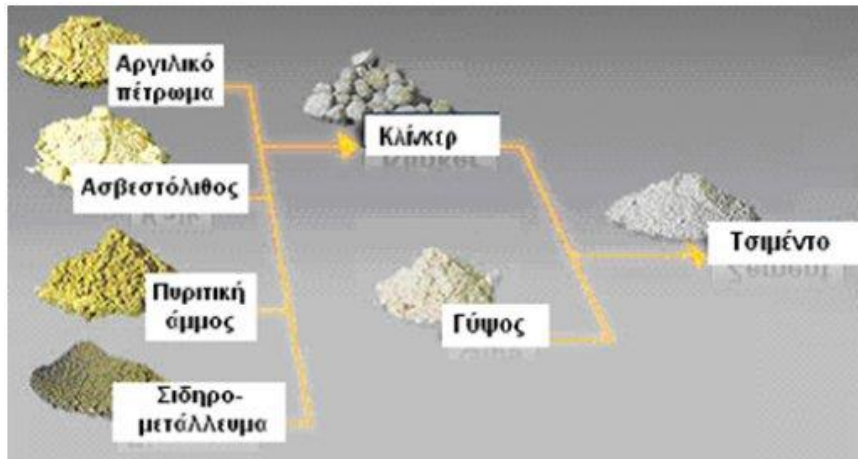
Αβεβαιότητα στις εκτιμήσεις κόστους, καθώς οι τιμές ενέργειας μεταβάλλονται μέρα με την μέρα. [3.5]

## 4. Ανάλυση Κύκλου Ζωής- κάλυψη ενεργειακών αναγκών τσιμεντοβιομηχανίας με ηλιακά συγκεντρωτικά κάτοπτρα και αποθήκευση θερμικής ενέργειας σε σύστημα ενανθράκωσης-ασβεστοποίησης

### 4.1. Διαδικασία παραγωγής τσιμέντου

Το τσιμέντο αποτελεί ένα από τα πιο χρησιμοποιούμενα δομικά υλικά στον κατασκευαστικό τομέα. Αποτελεί βασικό συστατικό για την κατασκευή κτιρίων, αυτοκινητόδρομων, γεφυρών και άλλων σημαντικών δομικών έργων. Μερικές από τις σημαντικότερες ιδιότητες του είναι η εξαιρετική αντοχή, η υψηλή ανθεκτικότητα και η ικανότητα να προσαρμόζεται σε διάφορες κατασκευαστικές ανάγκες. Για την παραγωγή του τσιμέντου χρειάζονται πρώτες ύλες, καύσιμα, ενέργεια και χημικά πρόσθετα, όπου παράγουν ρύπους ιδιαίτερα επιβλαβείς για το περιβάλλον. Αν αναλογιστεί κάποιος την ραγδαία αύξηση παραγωγής τσιμέντου με τα χρόνια, καταλαβαίνει τον μεγάλο περιβαλλοντικό αντίκτυπο της διεργασίας και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, λόγω των απαιτήσεων σε ενέργεια αλλά και πρώτες ύλες.

Η σημαντικότερη πρώτη ύλη για την παραγωγή του κλίνκερ τσιμέντου είναι τα ασβεστολιθικά πετρώματα που συνήθως εξορύσσονται επιφανειακά σε λατομεία κοντά στην τσιμεντοβιομηχανία και αποτελούν το 80% των πρώτων υλών για κάθε τόνο τσιμέντου. Οι υπόλοιπες πρώτες ύλες είναι ο άργιλος, η πυριτική άμμος, σκωρίες χαλκού, σιδηρομετάλλευμα, γύψος και ιπτάμενη τέφρα.

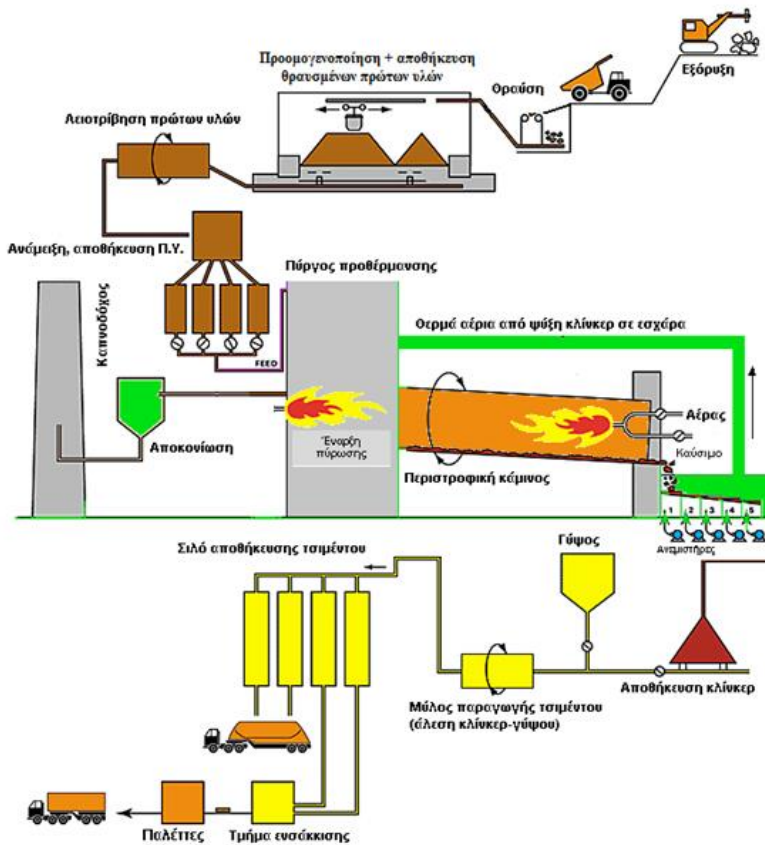


**Σχήμα 4.1:** Πρώτες ύλες, ενδιάμεσα προϊόντα και τελικό προϊόν[4.1]

Ο κύριος τύπου τσιμέντου που παράγουν οι τσιμεντοβιομηχανίες είναι το Portland II-V (non-OPC) και πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούν για την παραγωγή του είναι ο άνθρακας, η βιομάζα, το πετρέλαιο, εναλλακτικά καύσιμα και η ηλεκτρική ενέργεια[4.2].

Η διαδικασία παραγωγής τσιμέντου ξεκινάει με την εξόρυξη των πρώτων υλών( ασβεστολιθικά, αργιλικά πετρώματα) και την θραύση τους προτού ομογενοποιηθούν σε κατάλληλη αναλογία μεταξύ τους σε σωρούς. Έπειτα, αναμιγνύονται με τις υπόλοιπες πρώτες ύλες και λειοτριβούνται σε ειδικούς μύλους. Το λειοτριβημένο μείγμα πρώτων υλών ομογενοποιείται σε σιλό και τροφοδοτείται σε περιστροφική κάμινο όπου υποβάλλεται σε πυρομεταλλουργική κατεργασία.

Μέσα στην κάμινο, το μείγμα θερμαίνεται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (1400-1500°C) και ξεκινάει η διεργασία πύρωσης του ασβεστολίθου, όπου αποτελεί μια ιδιαίτερως ενδόθερμη αντίδραση και κατά συνέπεια την πιο ενεργοβόρα διαδικασία της παραγωγής. Επίσης, η ποσότητα καυσίμου που απαιτείται στην παραγωγή του κλίνκερ εξαρτάται από την μέθοδο κατεργασίας του μείγματος. Τα τεμάχια του προϊόντος έχουν σφαιροειδή μορφή διαμέτρου 10-25 mm. Το κλίνκερ μετέπειτα ψύχεται και ύστερα αναμειγνύεται με 5% περίπου κατά βάρος γύψο. Το νέο μείγμα που δημιουργείται αλέθεται σε ειδικούς μύλους μέχρι πολύ μικρό μέγεθος κόκκων (μικρότερο από 90 μm), που αποτελεί το τσιμέντο. Έπειτα, αποθηκεύεται σε σιλό, συσκευάζεται και διανέμεται.



**Σχήμα 4.2:** Διάγραμμα ροής παραγωγικής διαδικασίας τσιμέντου[4.1]

Κατά τα στάδια παραγωγής τσιμέντου εκπέμπονται ρύποι προς το περιβάλλον. Η διαδικασία καύσης άνθρακα για την παραγωγή κλίνκερ εκπέμπει αέρια του θερμοκηπίου και συγκεκριμένα CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> και σωματίδια. Το αέριο που κυριαρχεί είναι το CO<sub>2</sub>. Αυτά τα ρυπογόνα αέρια επηρεάζουν σημαντικά το φαινόμενο υπερθέρμανσης του πλανήτη ενώ παράλληλα μπορούν να προκαλέσουν σοβαρά προβλήματα υγείας στον άνθρωπο όπως βλάβη στη σύνθεση της αιμοσφαιρίνης, οξεία λοίμωξη του αναπνευστικού ερεθισμός του λαιμού, καρδιαγγειακές παθήσεις και καρκίνο. Έτσι, κρίνεται αναγκαίο από τις τσιμεντοβιομηχανίες να στραφούν προς εναλλακτικές πηγές ενέργειας για την παραγωγή των προϊόντων τους, εξασφαλίζοντας την βιωσιμότητα και την αειφορία.



## 4.2. Ενσωμάτωση του συστήματος CSP-CaCO<sub>3</sub> στην βιομηχανία τσιμέντου

Η κυκλική διεργασία θερμοχημικής αποθήκευσης ενέργειας CaCO<sub>3</sub> που βασίζεται στην αναστρέψιμη αντίδραση ασβεστολίθου μπορεί να εφαρμοστεί και στην βιομηχανία τσιμέντου ενισχύοντας την αποδοτικότητα του συστήματος με ταυτόχρονη μείωση της χρήσης καυσίμων. Στο σύστημα, η ενέργεια που θα τροφοδοτεί την κάμινο για την παραγωγή κλίνκερ τσιμέντου, την οποία σύμφωνα με τις συμβατικές τσιμεντοβιομηχανίες μέχρι τώρα παρέχει η καύση άνθρακα μπορεί να αντικαταστήσει η χρήση ρεύματος από ΑΠΕ η οποία θα είναι αποθηκευμένη σε σύστημα αποθήκευσης με CaCO<sub>3</sub>.

Το υβριδικό σύστημα αποθήκευσης CSP-CaCO<sub>3</sub> αποτελείται από τα παρακάτω μέρη[4.3]:

- 1) Ηλιακός ασβεστοποιητής: στη μονάδα παρέχεται η ενέργεια για να διασπαστεί ο ασβεστολίθος σε οξείδιο του ασβεστίου και διοξείδιο του άνθρακα. Ο σχεδιασμός του αντιδραστήρα πρέπει να εξασφαλίζει κατάλληλο χρόνο παραμονής σωματιδίων ώστε να μπορεί να πραγματοποιηθεί η αντίδραση διάσπασης. Προϋποθέτει υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας (>900°C), έλεγχο της κινητικής κατάλληλη ανταλλαγή θερμότητας και τη κατάλληλη συμπεριφορά των υλικών ως συσσωμάτωση σωματιδίων.
- 2) Ενανθρακωτής: πραγματοποιείται η αντίστροφη αντίδραση ασβεστοποίησης ή ενανθράκωση όπου ενώνεται το CaO με το CO<sub>2</sub> για να παραχθεί CaCO<sub>3</sub>, εκλύοντας θερμότητα σε ένα ρευστό μεταφοράς θερμότητας που θα χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας. Η αντίδραση ενανθράκωσης πραγματοποιείται στους 650-800°C.
- 3) Δεξαμενές αποθήκευσης υλικών: απαιτούνται δεξαμενές αποθήκευσης αερίων και στερεών. Ένα δοχείο αποθήκευσης αερίου συλλέγει το διοξείδιο του άνθρακα που παράγεται στον ασβεστοποιητή. Η πίεση που εφαρμόζεται θα επηρεάσει την κατανάλωση ενέργειας και τον όγκο των δεξαμενών. Για την αποθήκευση των στερεών απαιτούνται ξεχωριστές δεξαμενές CaCO<sub>3</sub> και CaO. Βασικές προδιαγραφές αποτελούν: η χωρητικότητα αποθήκευσης, ο ρυθμός εκφόρτισης και η

συχνότητα, η ομοιομορφία μείγματος και υλικού, η ευθρυπτότητα υλικού, οι διαφορές πίεσης και θερμοκρασίας. Οι δεξαμενές διοξειδίου του άνθρακα είναι κατασκευασμένες από ανοξείδωτο χάλυβα.

- 4) Δίκτυο εναλλάκτη θερμότητας: Οι εναλλάκτες θερμότητας αερίου/αερίου εμπλέκονται στους κύκλους ισχύος και στην προθέρμανση των ροών CO<sub>2</sub> από την αποθήκευση. Η μεταφορά θερμότητας γίνεται μέσω της ροής θερμού CO<sub>2</sub>, τόσο από τον ασβεστοποιητή όσο και από τον ενανθρακωτή. Οι εναλλάκτες θερμότητας αερίου/στερεού χρησιμοποιούνται στην διεπαφή CO<sub>2</sub>/στερεών και εξασφαλίζουν αποτελεσματική ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ αερίου και στερεών σωματιδίων.
- 5) Μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας: μετατρέπει σε ηλεκτρική ενέργεια την θερμική ενέργεια που εκλύεται από τον ενανθρακωτή.

#### 4.3 Σκοπός και στόχος ανάλυσης κύκλου ζωής

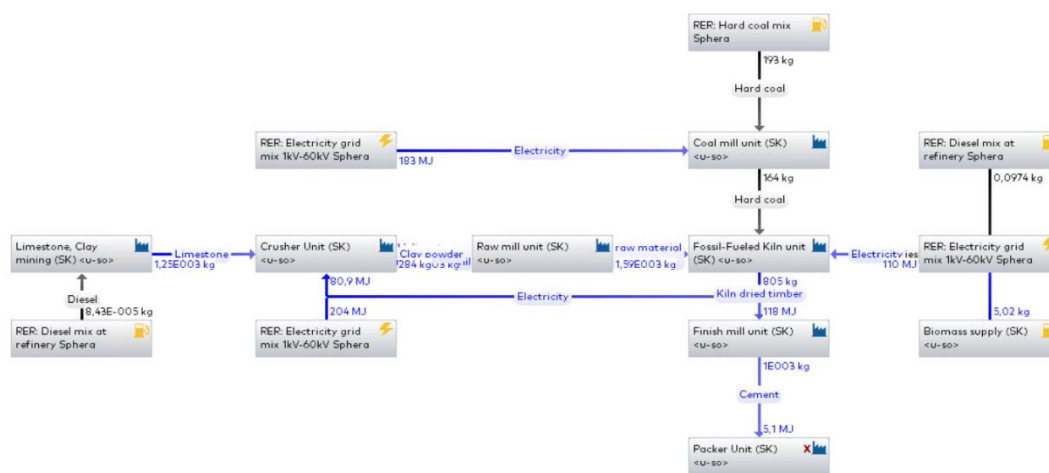
Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει η ανάλυση των τριών σεναρίων-περιπτώσεων που έχουν επιλεγεί προς μελέτη όσον αφορά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και το αντίκτυπο της κάθε τεχνολογίας. Το σενάριο 1 αφορά μια συμβατική τσιμεντοβιομηχανία με κάμινο η οποία τροφοδοτείται με ορυκτά καύσιμα και ένα ποσοστό βιοκαυσίμων. Στα σενάρια 2 και 3 θα αντικατασταθεί η συμβατική κάμινος με ηλεκτρική κάμινο. Οι ανάγκες ηλεκτρισμού τόσο για την κάμινο όσο και για τις λοιπές διεργασίες της παραγωγής θα καλύπτονται από σύστημα CSP-CaCO<sub>3</sub>, με αποθήκευση ηλιακής ενέργειας. Στο σενάριο 2 χρησιμοποιείται σύστημα βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης ενώ στην τρίτη μακροπρόθεσμης.

Ο στόχος της ανάλυσης είναι η αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της παραγωγής τσιμέντου για τις τρεις περιπτώσεις και η ποσοτική εκτίμηση της μείωσης των επιπτώσεων με τη χρήση πράσινης ενέργειας και καινοτόμων συστημάτων αποθήκευσης,

Η λειτουργική μονάδα είναι ένας τόνος παραγόμενου τσιμέντου.

#### 4.4 Περιγραφή σεναρίων και όρια συστήματος

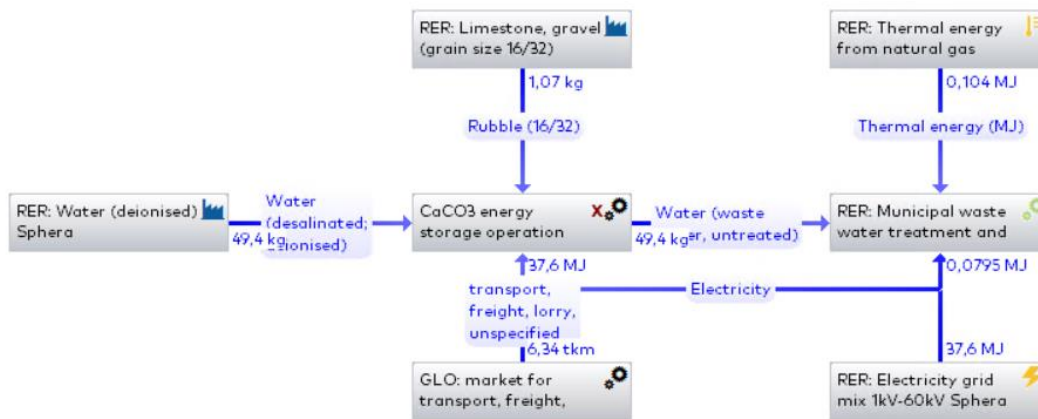
Παρακάτω παρουσιάζονται τα όρια των συστημάτων των τριών σεναρίων. Στο σχήμα 4.3 παρουσιάζονται τα όρια του σεναρίου 1. Το σενάριο αυτό προσομοιώνει τη συμβατική μέθοδο παραγωγής τσιμέντου με χρήση καυσίμων στην κάμινο (ένα ποσοστό αποτελεί βιομάζα) και ηλεκτρισμού από το δίκτυο.



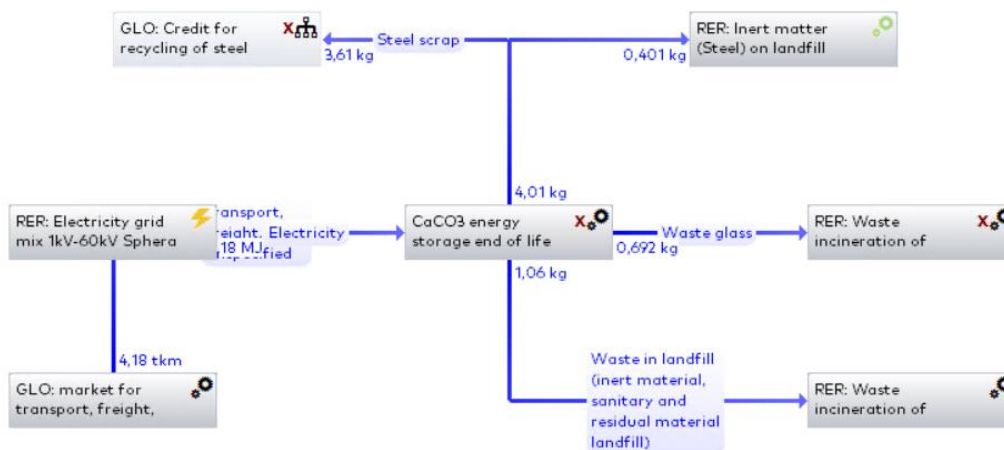
Σχήμα 4.3: Όρια συστήματος σεναρίου 1 (συμβατική κάμινος)

Στο σενάριο 2 γίνεται αντικατάσταση της καμίνου με ηλεκτρική, ενώ η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας για όλες τις διεργασίες είναι από σύστημα βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης ηλιακής ενέργειας CSP-CaCO<sub>3</sub>. Τα προϊόντα της πύρωσης αποθηκεύονται σε υψηλές θερμοκρασίες και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για περιορισμένο χρονικό διάστημα. Παρακάτω παρουσιάζεται το σχήμα ορίων του συστήματος για το σενάριο 2 καθώς και τα σχήματα εισροών-εκροών του συστήματος βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης CaCO<sub>3</sub> για την φάση κατασκευής, λειτουργίας και τέλους ζωής της εγκατάστασης. Τα όρια του σεναρίου 2 φαίνονται στο σχήμα 4.4



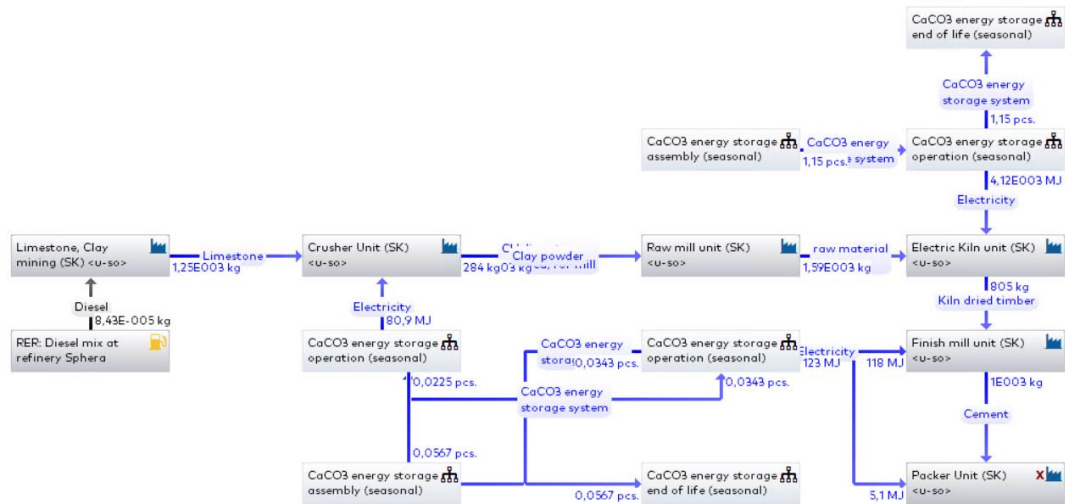


**Σχήμα 4.6:** Όρια συστήματος για την χρήση συστήματος βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας CSP-CaCO<sub>3</sub>



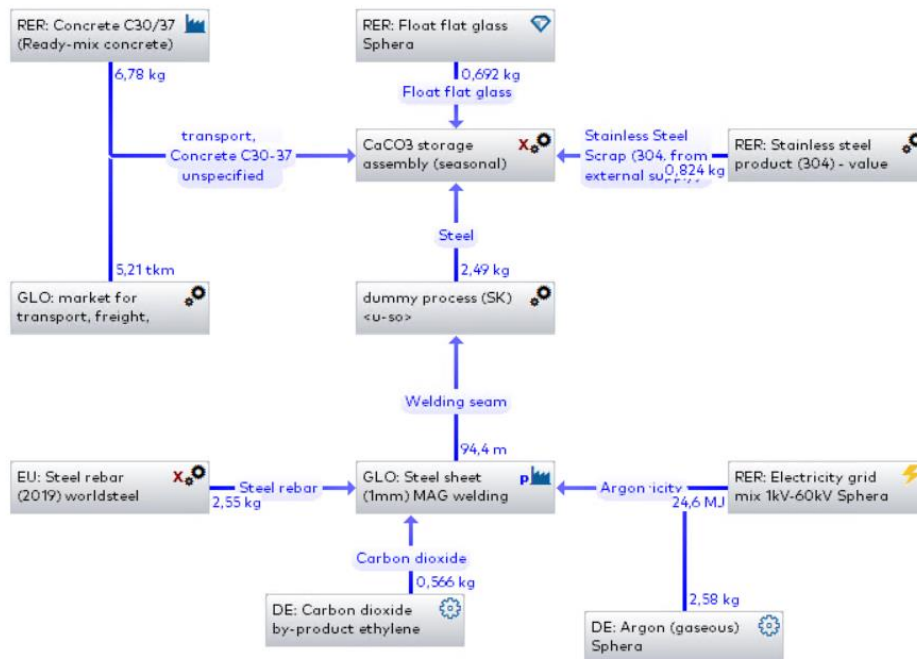
**Σχήμα 4.7:** Όρια συστήματος για τον παροπλισμό συστήματος βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας CSP-CaCO<sub>3</sub>

Το σενάριο 3 είναι όμοιο του σεναρίου 2, με μόνη διαφορά ότι χρησιμοποιείται σύστημα μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας. Το όρια του συστήματος 3 παρουσιάζονται στο σχήμα 4.8

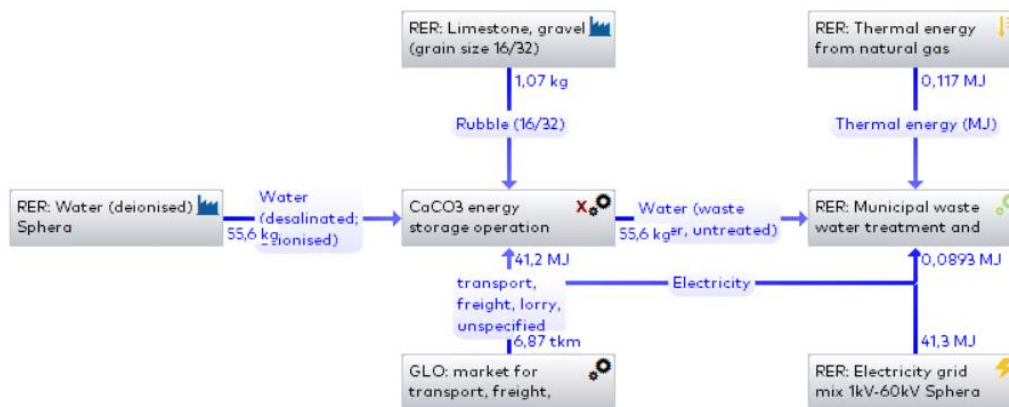


**Σχήμα 4.8:** Όρια συστήματος σεναρίου 3 (ηλεκτρική κάμινος, παροχή ηλεκτρικής ενέργειας για όλες τις διεργασίες από σύστημα μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ηλιακής ενέργειας CSP-CaCO<sub>3</sub>) [6.2]

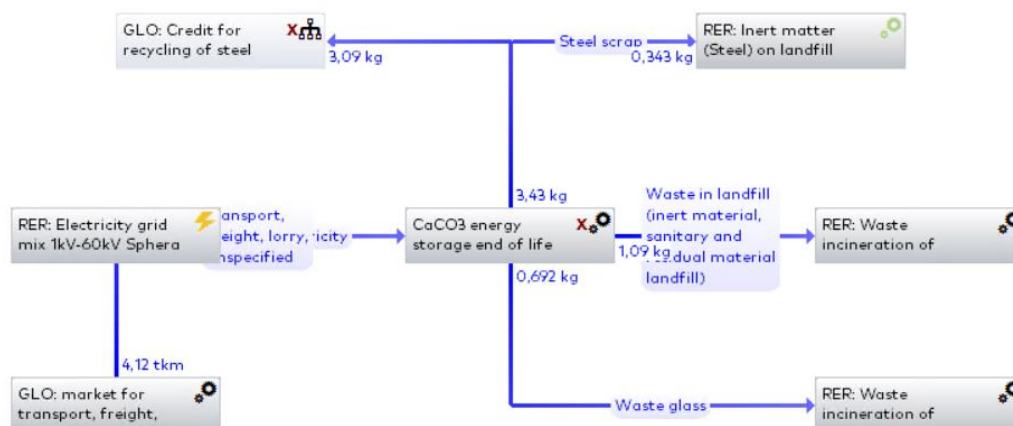
Στα σχήματα 4.9-4.11 παρουσιάζονται τα υποσυστήματα της κατασκευής, χρήσης και τέλους ζωής του συστήματος CSP-CaCO<sub>3</sub>, για μακροπρόθεσμη αποθήκευση. Η διαφορά σε σύγκριση με την βραχυπρόθεσμη αποθήκευση βρίσκεται στις ποσότητες εισροών που απαιτούνται για την παραγωγή της ίδιας ενέργειας από το κάθε σύστημα.



**Σχήμα 4.9:** Όρια συστήματος για την κατασκευή συστήματος μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας CSP-CaCO<sub>3</sub>



**Σχήμα 4.10:** Όρια συστήματος για την χρήση συστήματος μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας CSP-CaCO<sub>3</sub>



**Σχήμα 4.11:** Όρια συστήματος για τον παροπλισμό συστήματος μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας CSP-CaCO<sub>3</sub>

#### 4.5. Ανάλυση Καταγραφής Δεδομένων

##### 4.5.1 Ανάλυση καταγραφής δεδομένων για την παραγωγή τσιμέντου

Παρακάτω παρουσιάζονται τα δεδομένα εισροών/ εκροών για τις διεργασίες παραγωγής τσιμέντου για τον πλήρη κύκλο ζωής τσιμεντοβιομηχανίας ικανής να παράξει 10 εκατομμύρια τόνους κλίνκερ . Από την ανάλυση της μελέτης περίπτωσης υπολογίστηκαν οι ισοδύναμες εκπομπές ανά τη τσιμέντου.[4.2]

Μονάδα εξόρυξης: εξορύσσονται πρώτες ύλες που απαιτούνται για την παραγωγή τσιμέντου.( Ασβεστόλιθος και άργιλος)

**Πίνακας 4.1:** Απογραφή δεδομένων εξόρυξης (όλα τα σενάρια)

ΕΙΣΡΟΕΣ			ΕΚΡΟΕΣ		
Ενέργεια		Ποσότητα	Εκπομπές		Ποσότητα
1	Βιομηχανικό Πετρέλαιο	12512 kWh	1	CO <sub>2</sub>	69485 t
			2	SO <sub>2</sub>	270 t
			3	NO <sub>2</sub>	5351 t
			4	PM	431 t
			5	CO	2560 t
			<b>Προϊόν</b>		<b>Ποσότητα</b>
			1	Ασβεστόλιθος	15474525t
			2	Άργιλος	3516160 t

Μονάδα θραυστήρα: ελαττώνει το μέγεθος των τεμαχίων ασβεστόλιθου και αργίλου ώστε να μπορούν να επεξεργαστούν μετέπειτα στο μύλο.

**Πίνακας 4.2:** Απογραφή δεδομένων θραυστήρα (όλα τα σενάρια)

Εισροές			Εκροές		
Ενέργεια		Ποσότητα	Εκπομπές		Ποσότητα
1	Ηλεκτρική ενέργεια	278683246 kWh			
Πρώτη ύλη		Ποσότητα	Προϊόν		Ποσότητα
1	Ασβεστόλιθος	15474525 t	1	Θραυσμένος ασβεστόλιθος	15474525t



2	Άργιλος	3516160 t	2	Θραυσμένος άργιλος	3516160 t
---	---------	-----------	---	--------------------	-----------

Μονάδα μύλου λειοτρίβισης: πραγματοποιείται ανάμιξη, άλεση και ξήρανση της φαρίνας πρώτων υλών μέχρι να φτάσουν σε ένα ορισμένο βαθμό λεπτότητας.

**Πίνακας 4.3:** Απογραφή δεδομένων μύλου λειοτρίβισης (όλα τα σενάρια)

Εισροές			Εκροές		
Πρώτη Ύλη		Ποσότητα	Εκπομπές		Ποσότητα
1	Ασβεστόλιθος	15474525 t	1	SO <sub>2</sub>	2.73 t
2	Άργιλος	3516160 t	2	NO <sub>2</sub>	22.32 t
3	Πυριτική άμμος	353342 t	3	PM	0.41 t
4	Άμμος σιδήρου	78359 t	<b>Προϊόν</b>		<b>Ποσότητα</b>
5	Σκωρία χαλκού	230261 t	1	Φαρίνα	19668427 t
6	Σιδηρομετάλλευμα	15805 t			

Μονάδα μύλου άνθρακα: σύνθλιψη του άνθρακα που προορίζεται να χρησιμοποιηθεί για καύση.

**Πίνακας 4.4:** Απογραφή δεδομένων μύλου άνθρακα (όλα τα σενάρια)

Εισροές			Εκροές		
Υλικό		Ποσότητα	Εκπομπές		Ποσότητα
1	Άνθρακας	2396587 t	1	CO <sub>2</sub>	457 t
<b>Ενέργεια</b>		<b>Ποσότητα</b>	2	PM	2156 t
1	Ηλεκτρική ενέργεια	629705199kWh	<b>Προϊόν</b>		<b>Ποσότητα</b>
			1	Θραυσμένος άνθρακας	2029826t

Μονάδα τελικής ανάμιξης-παραγωγής τσιμέντου: στάδιο ανάμιξης-άλεσης κλίνκερ με γύψο για παραγωγή τελικού προϊόντος.

**Πίνακας 4.5:** Απογραφή μονάδας τελικού προϊόντος (όλα τα σενάρια)

Εισροές			Εκροές		
Υλικό		Ποσότητα	Εκπομπές		Ποσότητα
1	Κλίνκερ	9978633 t	1	PM	20t
2	Γύψος	467067 t			
3	Χώμα	7675 t	<b>Προϊόν</b>		<b>Ποσότητα</b>
4	Στερεό υπόλειμμα καύσης	156439 t	1	Τσιμέντο	12395563 t
5	Ιπτάμενη τέφρα	127745 t			
6	Ασβεστόλιθος	582858 t			
7	Σκουριές υψικαμίνου	304793 t			
<b>Ενέργεια</b>		<b>Ποσότητα</b>			
1	Ηλεκτρική ενέργεια	407183164kWh			

Μονάδα συσκευασίας-πακεταρίσματος: μεταφέρεται το τσιμέντο από το σιλό με ιμάντα ολίσθησης προς τη συσκευή συσκευασίας. Η διαδικασία συσκευασίας τσιμέντου χρησιμοποιεί περιστροφική μηχανή συσκευασίας.

**Πίνακας 4.6:** Απογραφή μονάδας συσκευασίας (όλα τα σενάρια)

Εισροές			Εκροές		
Υλικό		Ποσότητα	Εκπομπές		Ποσότητα
1	Τσιμέντο	12395563 t	1	PM	0.35 t
<b>Ενέργεια</b>		<b>Ποσότητα</b>			
1	Ηλεκτρική ενέργεια	17563953kWh	<b>Προϊόν</b>		<b>Ποσότητα</b>

				1	Τσιμέντο συσκευασμένο	12395563 t
--	--	--	--	---	--------------------------	------------

Οι διεργασίες παραγωγής πλυν της καμίνου είναι ίδιες σε όλα τα σενάρια, με μόνη διαφορά την πηγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Μονάδα κλιβάνου-περιστροφική κάμινο: η κύρια διεργασία της παραγωγής κλίνκερ τσιμέντου. Στον πίνακα 4.7 παρουσιάζονται εκτός των άλλων η συνολική βιομάζα που χρησιμοποιείται σε τόνους, καθώς και τα τμήματα από τα οποία αποτελείται, τα οποία έχουν εκφραστεί ως ενέργεια βάσει την ρών μάζας και της ενεργειακής τους πυκνότητας.

**Πίνακας 4.7:** Απογραφή μονάδας συμβατικής καμίνου (Σενάριο 1)

Εισροές			Εκροές		
Υλικό		Ποσότητα	Εκπομπές		Ποσότητα
1	Φαρίνα	19668427 t	1	CO <sub>2</sub>	9286647 t
<b>Ενέργεια</b>		<b>Ποσότητα</b>	2	CH <sub>4</sub>	145 t
1	Ηλεκτρική ενέργεια	1367614868MJ	3	N <sub>2</sub> O	70 t
2	Βιομηχανικό πετρέλαιο	51418200MJ	4	PM	2259 t
3	Άνθρακας	48715824000MJ			
	<b>Βιομάζα</b>	<b>62261t</b>			
4	Κέλυφος ριζιού	594630500MJ	<b>Προϊόν</b>		<b>Ποσότητα</b>
5	Κοκοφοίνικας	209064960MJ	1	Κλίνκερ	9978633 t

6	Απορρίμματα καπνού (tobacco)	83570100MJ			
7	Ρητίνη	27379800MJ			
8	Καύση αποβλήτων (refused-derive fuel)	80014500MJ			
9	<b>Συνολικές ενεργειακές απαιτήσεις</b>	<b>51129516928MJ</b>			

Στα σενάρια 2 και 3 η συμβατική κάμινος αντικαθίσταται με ηλεκτρική. Θεωρώντας τον ίδιο βαθμό απόδοσης για τις διαφορετικές καμίνους, οι συνολικές ενεργειακές απαιτήσεις είναι οι ίδιες και καλύπτονται αποκλειστικά από ηλεκτρική ενέργεια. Η χρήση αποκλειστικά ηλεκτρικής ενέργειας συνεπάγεται μηδενικές άμεσες εκπομπές.

**Πίνακας 4.8:** Απογραφή μονάδας ηλεκτρικής καμίνου (Σενάριο 2 και 3)

Εισροές			Εκροές		
Υλικό		Ποσότητα	Εκπομπές		Ποσότητα
1	Φαρίνα	19668427 t			
Ενέργεια		Ποσότητα	Προϊόν		Ποσότητα
1	Ηλεκτρική ενέργεια	51129516928MJ	1	Κλίνκερ	9978633 t

#### 4.5.2. Ανάλυση καταγραφής δεδομένων συστήματος CSP-CaCO<sub>3</sub>

Παρακάτω παρουσιάζονται τα δεδομένα εισροών/ εκροών για την κατασκευή, χρήση και παροπλισμό του συστήματος CSP-CaCO<sub>3</sub>, για βραχυπρόθεσμη (σενάριο 2) και μακροπρόθεσμη (σενάριο 3) αποθήκευση ενέργειας. Η φάση κατασκευής περιλαμβάνει την εξόρυξη, την επεξεργασία και την μεταφορά των

πρώτων υλών στο εργοτάξιο και τις διαδικασίες κατασκευής και συναρμολόγησης. Η φάση της χρήσης περιλαμβάνει τις εργασίες λειτουργίες και συντήρησης. Τέλος, ακολουθεί η φάση παροπλισμού του η οποία περιλαμβάνει την απόθεση ή ανακύκλωση των μερών/υλικών του συστήματος. Πληροφορίες για τα επιμέρους τμήματα του συστήματος, τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά τις τρεις φάσεις.

**Πίνακας 4.9:** Εισροές-Εκροές κατασκευής συστήματος CSP-CaCO<sub>3</sub> (βραχυπρόθεσμη αποθήκευση, σενάριο 2)

Εισροές	Ποσότητα	Εκροές	Ποσότητα
Επίπεδο γυαλί επικαλυμένο	0,692kg	CSP-CaL ηλιακός πύργος	1 σύστημα
Χάλυβας οπλισμού	2,55kg		
Σκυρόδεμα	0,00294m <sup>3</sup>		
Χάλυβας , χάλυβας χρωμίου 18/8	1,4 kg		
Κατεργασία μετάλλου για παραγωγή χάλυβα	2,49kg		
Κατεργασία μετάλλου για χάλυβα χρωμίου	1,4kg		
Μεταφορά εμπορευμάτων	4,18tkm		

**Πίνακας 4.10:** Εισροές-Εκροές λειτουργίας συστήματος CSP-CaCO<sub>3</sub> (βραχυπρόθεσμη αποθήκευση, σενάριο 2)

Εισροές	Ποσότητα	Εκροές	Ποσότητα
CSP-CaL ηλιακός πύργος (για χρήση)	1 σύστημα	CSP-CaL ηλιακός πύργος (τέλος ζωής)	1 σύστημα

Μεταφορά για καθαρισμό	6,34tkm	Απορριπτόμενα ρεύματα σε ΧΥΤΑ	49,427kg
CaCO <sub>3</sub>	1,0744kg	Ηλεκτρική Ενέργεια	3,600 MJ
Συνολικό νερό	49,427kg		

**Πίνακας 4.11:** Εισροές-Εκροές παροπλισμού συστήματος CSP-CaCO<sub>3</sub> (βραχυπρόθεσμη αποθήκευση, σενάριο 2).

Εισροές	Ποσότητα	Εκροές	Ποσότητα
CSP-CaL ηλιακός πύργος (για παροπλισμό)	1 σύστημα	χάλυβας και σίδηρο (επεξεργασία απορριμάτων)	3,61kg
Μεταφορά φορτίου	4,18tkm	απόρριμα γυαλιού	0,692kg
Ηλεκτρική ενέργεια	18MJ	απορρίματα χάλυβα	0,401kg
		αδρανή απόβλητα για απόθεση	1,06 kg

**Πίνακας 4.12:** Εισροές-Εκροές κατασκευής συστήματος CSP-CaCO<sub>3</sub> (μακροπρόθεσμη αποθήκευση, σενάριο 3)

Εισροές	Ποσότητα	Εκροές	Ποσότητα
Επίπεδο γυαλί επικαλυμένο	0,692 kg	CSP-CaL ηλιακός πύργος	1 σύστημα
Χάλυβας οπλισμού	2,55 kg		
Σκυρόδεμα	0,00294 m <sup>3</sup>		
Χάλυβας 18/8	0,824 kg		
Κατεργασία μετάλλου για παραγωγή χάλυβα	2,49 kg		

Κατεργασία μετάλλου για χάλυβα χρωμίου	0,824 kg		
μεταφορά εμπορευμάτων	5,21 tkm		

**Πίνακας 4.13:** Εισροές-Εκροές φάσης λειτουργίας συστήματος CSP-CaCO<sub>3</sub> (μακροπρόθεσμη αποθήκευση, σενάριο 3)

Εισροές	Ποσότητα	Εκροές	Ποσότητα
CSP-CaL ηλιακός πύργος (για χρήση)	1 σύστημα	CSP-CaL ηλιακός πύργος (για παροπλισμό)	1 σύστημα
Εκπομπές μεταφορικών μέσων για καθαρισμό	6,87 tkm	Απορριπτόμενα ρεύματα σε ΧΥΤΑ	55,575 kg
CaCO <sub>3</sub>	1,0744 kg	Ηλεκτρική Ενέργεια	3,600 MJ
Συνολικό νερό	55,575 kg		

**Πίνακας 4.14:** Εισροές-Εκροές παροπλισμού συστήματος CSP-CaCO<sub>3</sub> (μακροπρόθεσμη αποθήκευση, σενάριο3).

Εισροές	Ποσότητα	Εκροές	Ποσότητα
CSP-CaL ηλιακός πύργος (για παροπλισμό)	1 σύστημα	Ανακύκλωση χάλυβα	3,09 kg
Μεταφορά φορτίου	4,12 tkm	Απόρριμα γυαλιού	0,692kg
Ηλεκτρική ενέργεια	18 MJ	Απορριπτόμενος χάλυβας	0,343kg
		Αδρανή προς απόρριψη	1,09 kg

#### 4.6. Αξιολόγηση κύριων περιβαλλοντικών επιπτώσεων

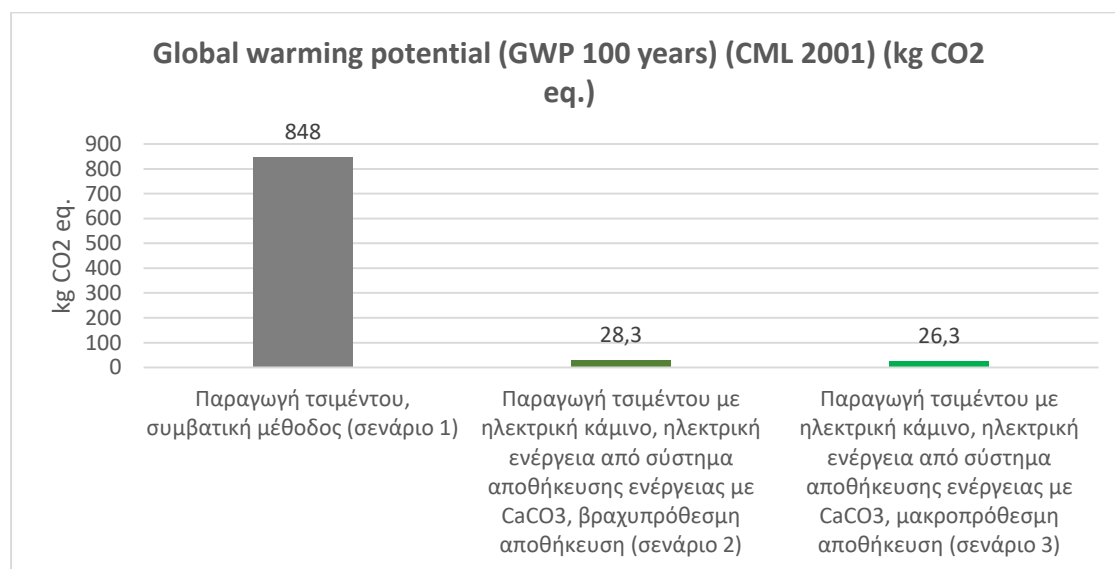
Στο στάδιο αυτό πραγματοποιείται η εκτίμηση των επιπτώσεων (Life Cycle Impact Assessment, LCIA) των παραπάνω σεναρίων. Κατά την διεξαγωγή της μελέτης, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που μελετήθηκαν ήταν η κλιματική αλλαγή, η οξίνιση του περιβάλλοντος, ο ευτροφισμός, φωτοχημικός σχηματισμός όζοντος και ο σχηματισμός λεπτών σωματιδίων. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την διαδικασία προσδιορισμού των πρώτων τριών περιβαλλοντικών επιπτώσεων είναι η CML 2001, ενώ για τις τελευταίες δύο χρησιμοποιήθηκε η ReCiPe 2016. Οι επιπτώσεις των παραγόμενων εκπομπών ομαδοποιούνται και ποσοτικοποιούνται σε έναν ορισμένο αριθμό κατηγοριών επιπτώσεων ανάλογα με το επίπεδο σημαντικότητά τους. Τα στάδια στο LCIA αποτελούνται από το χαρακτηρισμό και την κανονικοποίηση. Ο χαρακτηρισμός είναι το στάδιο όπου το λογισμικό θα εμφανίσει τη συνεισφορά κάθε διεργασίας στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η κανονικοποίηση αποτελεί μία σύγκριση των επιλεγμένων δεικτών επιπτώσεων. Τα αποτελέσματα των δεικτών κανονικοποιούνται διαιρώντας τα με την επιλεγμένη λειτουργική μονάδα. Όλες οι διεργασίες στην παραγωγή τσιμέντου από την εξόρυξη των πρώτων υλών μέχρι και το πακετάρισμα συνεισφέρουν στο περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Επομένως, ο κύριος σκοπός της αξιολόγησης επιπτώσεων είναι η διερεύνηση του κατά πόσο συνεισφέρει η κάθε διαδικασία στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Στο στάδιο της κανονικοποίησης μετατρέπονται στην ίδια μονάδα, ανάλογα την κατηγορία, οι επιπτώσεις που προέκυψαν από τις διεργασίες. Αυτό γίνεται για να μπορεί να υπάρξει σύγκριση των αποτελεσμάτων και να εντοπιστεί ο μεγαλύτερος περιβαλλοντικός αντίκτυπος. Η τιμή υπολογίζεται διαιρώντας τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο του χαρακτηρισμού προς τον δείκτη κανονικοποίησης. Οι πέντε δείκτες που θα εξεταστούν σε αυτή την εργασία αναλύονται παρακάτω και εξάγονται πίνακες αποτελεσμάτων.

Δυναμικό υπερθέρμανσης του Πλανήτη (Global Warming Potential): αποτελεί έναν από τους κύριους δείκτες για την εκτίμηση της περιβαλλοντικής απόδοσης μιας διεργασίας. Σχετίζεται με τις ρυπογόνες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και αποτυπώνει την ισοδύναμη ποσότητα CO<sub>2</sub> που εκλύεται σε βάθος 100ετίας. Σύμφωνα με τα σενάρια που μελετήθηκαν παραπάνω παρατηρούμε ότι με την συμβατική μέθοδο εκλύεται 848kg ανά τόνο τσιμέντου.

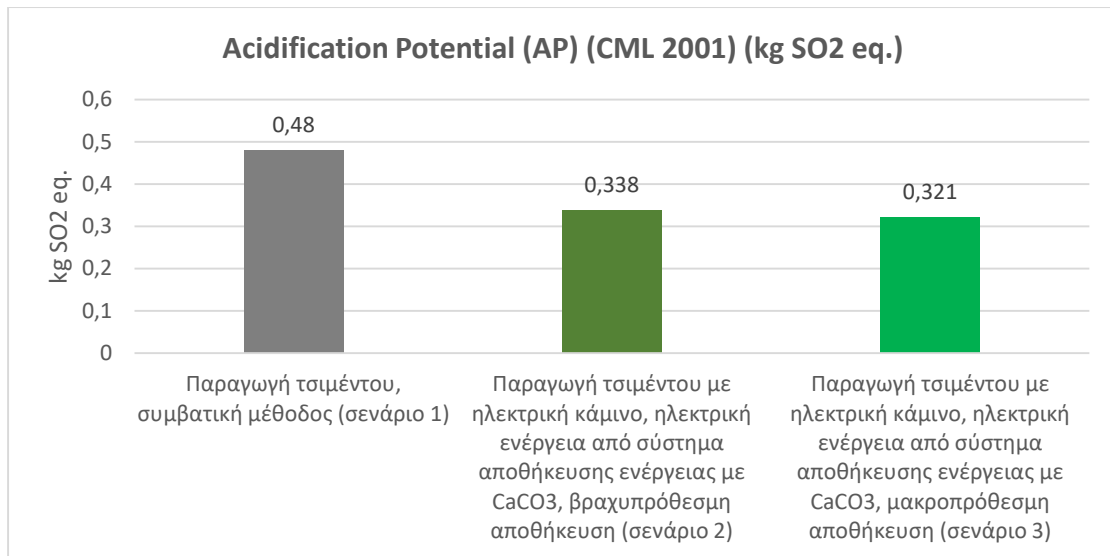


Στο σενάριο 2 και 3, με την αντικατάσταση της περιστροφικής καμίνου από ηλεκτρική και κάλυψη όλων των ηλεκτρικών αναγκών μέσω συστήματος αποθήκευσης ηλιακής ενέργειας CSP-CaCO<sub>3</sub>, παρατηρείται σημαντική μείωση των παραγόμενων εκπομπών ισοδύναμου CO<sub>2</sub>/tn τσιμέντου. Για το σενάριο 2 εκλύονται 28,3tn ισοδύναμο CO<sub>2</sub>/tn τσιμέντου και για το σενάριο 3 26,3tn ισοδύναμο CO<sub>2</sub>/tn τσιμέντου, περίπου 30 φορές λιγότεροι ρύποι συγκριτικά με το σενάριο 1.



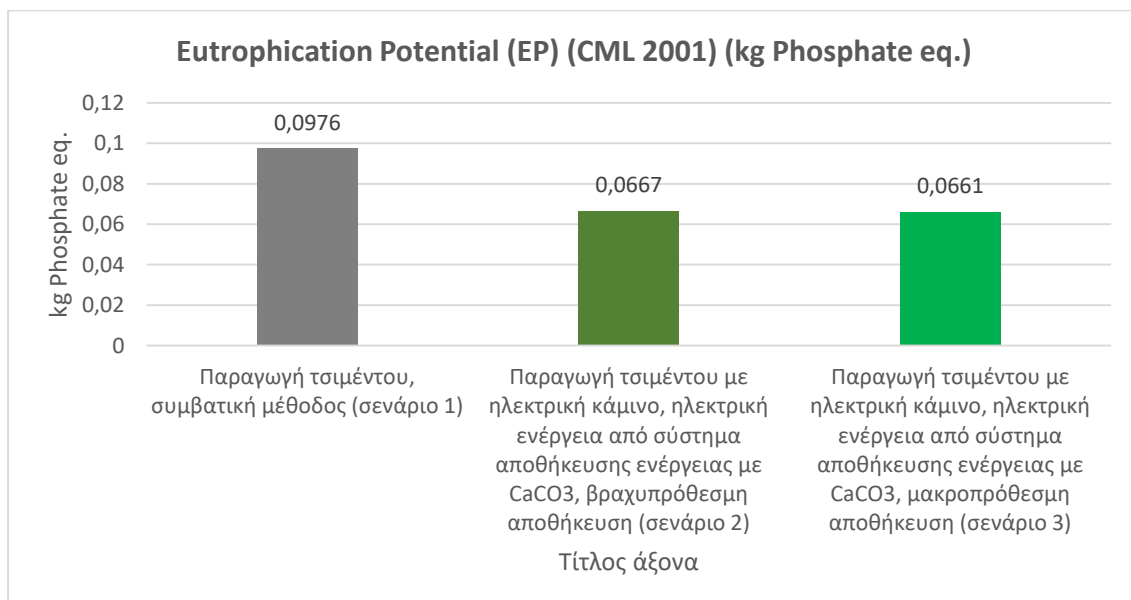
**Σχήμα 4.12:** Δυναμικό κλιματικής αλλαγής

Δυναμικό Οξίνισης (Acidification potential): Τον παράγοντα χαρακτηρισμού της οξίνισης αποτελεί το Δυναμικό Οξίνισης (Acidification Potential – AP), το οποίο προέρχεται από τη χρήση του σταθμισμένου παγκοσμίου μέσου για τον παράγοντα πορείας (fate factor) του διοξειδίου του θείου (SO<sub>2</sub>). Η μονάδα αναφοράς αφορά τις εκπομπές του ισοδύναμου SO<sub>2</sub> σε kg/MWhe. Στο σενάριο 1 εκλύεται 0,48kg ισοδύναμου SO<sub>2</sub>/tn τσιμέντου ενώ στο σενάριο 2 και 3 εκλύονται 0,338kg ισοδύναμου SO<sub>2</sub>/tn τσιμέντου και 0,321kg ισοδύναμου SO<sub>2</sub>/tn τσιμέντου αντίστοιχα. Η μείωση οφείλεται στην αντικατάσταση της καμίνου με ηλεκτρική αλλά και στην αποκλειστική χρήση ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ.



**Σχήμα 4.13: Δυναμικό οξίνισης**

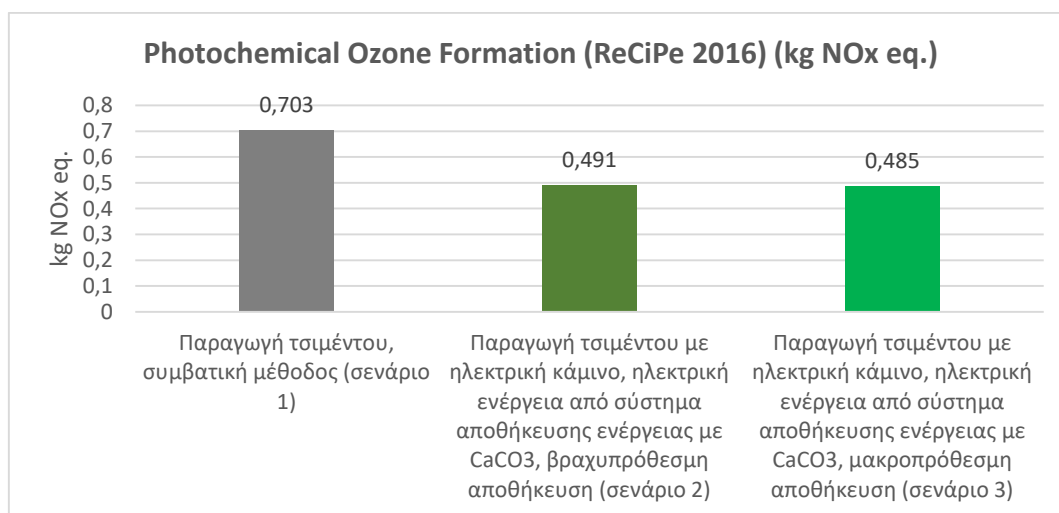
**Δυναμικό Ευτροφισμού (Eutrophication Potential):** ο ευτροφισμός αποτελεί μία ακόμη σημαντική περιβαλλοντική επίπτωση, κατά την οποία πλήθος χημικών θρεπτικών συστατικών συγκεντρώνονται σε ένα οικοσύστημα όπου και παρατηρείται μη φυσιολογική παραγωγικότητα. Στην συμβατική τσιμεντοβιομηχανία συνολικά παράγονται 0,0976 kg ισοδύναμου φωσφορικού άλατος (phosphate)/ τη τσιμέντου, ενώ στα σενάρια 2 και 3 παράγονται 0,0667 και 0,0661 kg φωσφορικού άλατος (phosphate) αντίστοιχα.



**Σχήμα 4.14: Δυναμικό ευτροφισμού**

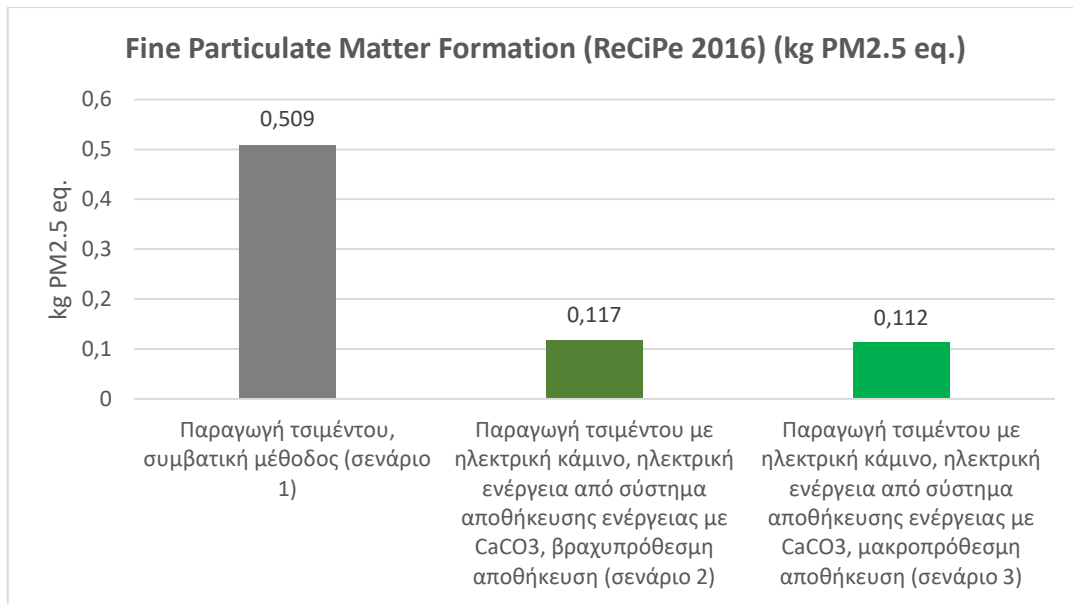
Φωτοχημικός Σχηματισμός Όζοντος (Photochemical Ozone Formation): Ο φωτοχημικός σχηματισμός όζοντος, χαρακτηρίζει το δυναμικό δημιουργίας του όζοντος που οφείλεται στην εκπομπή οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>) καθώς και πτητικών οργανικών ενώσεων εκτός του μεθανίου (NMVOC). Για το φαινόμενο του φωτοχημικού σχηματισμού οξειδωτικών υπολογίζονται οι ισοδύναμες εκπομπές NO<sub>x</sub> σε kg/MWh<sub>e</sub> κάθε σεναρίου.

Συνολικά, στο σενάριο 1 παράγονται 0,703kg ισοδύναμων Nox/tn τσιμέντου, σε αντίθεση με τα σενάρια 2 και 3 που οι εκπομπές ισοδύναμων Nox βρίσκονται χαμηλότερα, στα 0,491 και 0,485kg ισοδύναμων NO<sub>x</sub>/tn τσιμέντου για τα σενάρια 2 και 3 αντίστοιχα.



**Σχήμα 4.15:** Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος

Σχηματισμός Λεπτών Σωματιδίων (Fine Particulate Matter Formation): Η τελευταία κατηγορία επιπτώσεων που μελετάται στην παρούσα μελέτη είναι οι εκπομπές λεπτών σωματιδίων (PM<sub>2.5</sub>) τα οποία συνδέονται με αναπνευστικές και καρδιαγγειακές παθήσεις. Συνολικά, στην συμβατική τσιμεντοβιομηχανία εκλύονται 0,509 kg ισοδύναμων PM<sub>2.5</sub>/tn τσιμέντο, ενώ στα σενάρια 2 και 3 παράγονται ρύποι 0,117 και 0,112 kg ισοδύναμων PM<sub>2.5</sub>/tn τσιμέντου. Η μείωση οφείλεται στην αντικατάσταση της περιστροφικής κλίμακας με ηλεκτρική και στην χρήση ηλεκτρισμού από ΑΠΕ.



**Σχήμα 4.16:** Σχηματισμός λεπτών σωματιδίων

## 5. Συμπεράσματα

Η ανάγκη για ελάττωση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και εύρεση βιώσιμων λύσεων και τεχνολογιών κρίνεται επιτακτική, καθώς η κλιματική αλλαγή αποτελεί μία από τις σημαντικότερες απειλές για τον πλανήτη και τον άνθρωπο. Σύμφωνα με τη Διεθνή Υπηρεσία Ενέργειας το τσιμέντο είναι υπαίτιο για το 7% των παγκόσμιων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>). Παράλληλα, η έμφαση στη βιωσιμότητα θα επηρεάσει την επιλογή υλικών στα κατασκευαστικά έργα, οδηγώντας σε μεγαλύτερη ζήτηση για φιλικά προς το περιβάλλον δομικά υλικά και ενθαρρύνοντας την υιοθέτηση πιο πράσινων οικοδομικών πρακτικών. Ακόμη, το μειωμένου αποτυπώματος τσιμέντο και σκυρόδεμα θα ευθυγραμμίζονται με τα κριτήρια που ορίζουν οι πιστοποιήσεις πράσινων κτιρίων (π.χ. LEED, BREEAM), που προωθούν τη χρήση βιώσιμων υλικών, την υψηλή ενεργειακή απόδοση και τις περιβαλλοντικά συνειδητές κατασκευαστικές πρακτικές. Ως εκ τούτου, ο κατασκευαστικός κλάδος θα υιοθετεί με συνεχώς αυξανόμενους ρυθμούς τσιμέντο και σκυρόδεμα χαμηλού περιβαλλοντικού αποτυπώματος για την κάλυψη των απαιτήσεων αυτών των πιστοποιήσεων.

Η αξιοποίηση ΑΠΕ είναι μια από τις πιο διαδεδομένες στρατηγικές για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Ωστόσο, τόσο η ηλιακή όσο και η αιολική ενέργεια, εξαρτώνται από τις καιρικές συνθήκες και συνεπώς η μη σταθερή

παραγωγή τους μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα στον εφοδιασμό ενέργειας. Η αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας για χρήση κατά τη διάρκεια περιόδων ανεπαρκούς παραγωγής είναι μια σημαντική πρόκληση. Οι τρέχουσες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας είναι ακόμα σε ανάπτυξη και είναι σημαντικό να βελτιωθούν.

Τέτοια συστήματα αποτελούν οι τεχνολογίες θερμικής αποθήκευσης ενέργειας υψηλής ενθαλπίας, όπου μπορούν να ενσωματωθούν στην βιομηχανία τσιμέντου για ελάττωση των ρυπογόνων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Πρόκειται για τεχνολογίες καινοτόμες με μεγάλη προοπτική τόσο στην απόδοση όσο και στην κατεύθυνση προς μία βιώσιμη κοινωνία, πράσινη, απαλλαγμένη από επιβλαβές εκπομπές. Τα υλικά αλλαγής φάσης σε συνδυασμό με τεχνολογίες ανάκτησης απορριπτόμενης θερμότητας, όπως η υβριδική τεχνολογία συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας- χημικού βρόγχου ασβεστίου είναι μερικές από αυτές τις τεχνολογίες που μπορούν να συμβάλλουν στο ενεργειακό μείγμα, αντικαθιστώντας την χρήση καυσίμων και τους παραγόμενους ρύπους, ενισχύοντας ταυτόχρονα τη συνεισφορά των ανανεώσιμων πηγών.

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε AKZ για την διερεύνηση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου καινοτόμων συστημάτων αποθήκευσης ανανεώσιμης ενέργειας μέσω υλικών αλλαγής φάσης, και οι προοπτικές χρήσης τους για τον εξηλεκτρισμό ενεργοβόρων βιομηχανιών με μεγάλο περιβαλλοντικό αποτύπωμα όπως η βιομηχανία τσιμέντου.

Στην ανάλυση εκτιμήθηκαν τρία διαφορετικά σενάρια. Στο 1<sup>ο</sup> σενάριο αξιολογήθηκε συμβατική τσιμεντοβιομηχανία με περιστροφική κάμινο, ενώ στο 2<sup>ο</sup> και 3<sup>ο</sup> σενάριο αντικαθίσταται η περιστροφική κάμινο με ηλεκτρική και εφαρμόστηκε η υβριδική τεχνολογία αποθήκευσης ηλιακής ενέργειας CSP-CaCO<sub>3</sub> για να καλύψει όλες τις ανάγκες ηλεκτρικής ενέργειας της παραγωγής. Το σενάριο 2 αφορά βραχυπρόθεσμη αποθήκευση ενέργειας σε αντίθεση με το 3 που αναφέρεται σε μακροπρόθεσμη αποθήκευση ενέργειας. Παρουσιάστηκαν τα όρια των συστημάτων για τα 3 σενάρια καθώς και όλες οι εισροές-εκροές τόσο για την παραγωγή τσιμέντου όσο και για την κατασκευή, λειτουργία και παροπλισμό του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας.

Αποδείχθηκε, ότι αντικαθιστώντας την συμβατική κάμινο με ηλεκτρική ίδιου βαθμού απόδοσης και με την παροχή όλης της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας από το σύστημα CSP-CaCO<sub>3</sub>, μπορεί να επιτευχθεί μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα έως και περίπου 30 φορές. Επιπλέον, σε όλους τους δείκτες που μελετήθηκαν (κλιματική αλλαγή, δυναμικά οξίνισης, ευτροφισμού, σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος, εκπομπών λεπτών σωματιδίων) παρατηρήθηκε σημαντική ελάττωση των εκπομπών, γεγονός που οφείλεται στην αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων και στην αποκλειστική χρήση ηλεκτρισμού από ΑΠΕ σε όλες τις διεργασίες παραγωγής. Το σενάριο 2 παρουσιάζει ελαφρώς αυξημένες εκπομπές σε σύγκριση με το σενάριο 3 εξαιτίας των υψηλότερων ενεργειακών αναγκών και αναγκών σε πρώτες ύλες που απαιτεί η βραχυπρόθεσμη αποθήκευση ενέργειας σε υψηλές θερμοκρασίες.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης καταδεικνύουν την ανάγκη άμεσης εφαρμογής στρατηγικών απανθρακοποίησης των ενεργοβόρων βιομηχανιών όπως η τσιμεντοβιομηχανία. Ο εξηλεκτρισμός των διεργασιών σε συνδυασμό με την βέλτιστη αξιοποίηση ΑΠΕ αποδεικνύεται μια από τις πιο πολλά υποσχόμενες στρατηγικές. Σε αυτά τα πλαίσια, η προώθηση καινοτόμων συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, όπως τα συστήματα ενανθράκωσης-ασβεστοποίησης μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην διεύθυνση των ΑΠΕ στις ενεργοβόρες βιομηχανίες, συμβάλλοντας σημαντικά στους ευρωπαϊκούς στόχους περί κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050.

## 6. Βιβλιογραφία

- [1.1] European Council, Council of the European Union, “5 facts about the EU’S goal of the climate neutrality, October 23
- [1.2] European Court Of Auditors, “Energy taxation, carbon pricing and energy subsidies”, Review 2022
- [1.3] European Commission, Climate action, “What is the EU ETS?”
- [1.4] CSIRO, “Global Carbon Budget”, 11 November 2022
- [2.1] IEA-ETSAP and IRENA, “Thermal Energy Storage Technology Brief”, January 2013
- [2.2] Ioan Sarbu, Calin Sebarchievici, “A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage”, 14 January 2018
- [2.3] Σαρακατσάνης Ιωάννης-Αθανάσιος, Διπλωματική εργασία «Μελέτη καινοτόμων συστημάτων αποθήκευσης θερμότητας για ηλιακά οδηγούμενο οργανικό κύκλο Rankine», Κεφάλαιο 3, Φεβρουάριος 2021, Αθήνα
- [2.4] IRENA, INNOVATION OUTLOOK THERMAL ENERGY STORAGE, 2020
- [2.5] Bijoy KUMAR Purohit, “Inorganic salt hydrate for thermal energy storage application”, October 2020
- [2.6] Ali H. Abedin and Marc A. Rosen, “A Critical Review of Thermochemical Energy Storage Systems”, The Open Renewable Energy Journal, 2011, 4, 42-46
- [2.7] Patricia Royo , Victor J. Ferreira , Zafer Ure , Sam Gledhill , Ana M. López-Sabiróna, Germán Ferreira, “Multiple-Criteria Decision Analysis and characterisation of phase change materials for waste heat recovery at high temperature for sustainable energy-intensive industry”, 15 January 2020
- [2.8] Patricia Royo , Luis Acevedo, Victor J. Ferreira, Tatiana García-Armingol, Ana M. Lopez-Sabiron, German Ferreira, ” High-temperature

PCM-based thermal energy storage for industrial furnaces installed in energy-intensive industries”, 15 April 2019

- [2.9] Samuel C. Johnson, F. Todd Davidson, Joshua D. Rhode , Justin L. Coleman, Shannon M. Bragg-Sitton, Eric J. Dufek, Michael E. Webber, “ Selecting Favorable Energy Storage Technologies for Nuclear Power”, Chapter 5.2.7.2 Molten Salts, 2019
- [2.10] M. Mofijur ,Teuku Meurah Indra Mahlia ,Arridina Susan Silitonga , Hwai Chyuan Ong , Mahyar Silakhori,Muhammad Heikal Hasan , Nandy Putra and S.M. Ashrafur Rahman, “Phase Change Materials (PCM) for Solar Energy Usages and Storage: An Overview”, 17 August, 2019
- [2.11] Zhiwei Ge , Binlin Dou , Liang Wang, Yulong Ding, Haisheng Chen and Yimin Xuan, “Calcium-looping based energy conversion and storage for carbon neutrality –the way forward”, 2022
- [2.12] European Commision, “Solar Calcium-looping integration for Thermo-Chemical Energy Storage”, 2020
- [2.13] Γεώργιος Κοιλαρίδης, Διπλωματική εργασία “Αξιολόγηση της σταθερότητας φυσικών και συνθετικών υλικών με βάση το CaO σε κύκλους ρόφησης CO<sub>2</sub> και κινητική μελέτη της αντίδρασης ενανθράκωσης”, 3-10 ,2020
- [2.14] J.M. Valverde, “Ca-based synthetic materials with enhanced CO<sub>2</sub> capture efficiency”. *Journal of Materials Chemistry A*, 1/3, 447-468, December 2012
- [2.15] Perejón, A. . “The Calcium-Looping technology for CO<sub>2</sub> capture: On the important roles of energy integration and sorbent behavior”. *Applied Energy*, 162, 787-807, 2016
- [2.16] Tsitsi Maparanyanga, David Lokhat, “Modelling of a calcium-looping fluidized bed reactor system for carbon dioxide removal from flue gas”. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, Volume 16, Issue 3, September 2021, Pages 691–703
- [2.17] Carlos Ortiz, J. M. Valverde, Ricardo Chacartegui, Luis A Pérez-Maqueda (2021). «Scaling-up the Calcium-Looping Process for CO<sub>2</sub>



- Capture and Energy Storage». KONA Powder and Particle Journal, 3-10
- [3.1] Krozer, J. & Vis J.C. (1998). How to get LCA in the right direction? Journal of Cleaner Production, 6, 53-61
  - [3.2] Αγγελική Μητροπούλου, Ανάλυση του Κύκλου Ζωής για την παραγωγή σκόνης μίγματος άνθου αραβοσίτου, Κεφάλαιο 2, Αθήνα 2016
  - [3.3] Δερμεντζής Ιωάννης, Περιβαλλοντικό αποτύπωμα μεταλλευτικών δραστηριοτήτων με χρήση υδρογόνου στον μηχανοκίνητο εξοπλισμό, Κεφάλαιο 4, Αθήνα 2023
  - [3.4] Γιώργος Κωνσταντζος, ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ(ΑΚΖ), [https://mycourses.ntua.gr/courses/CIVIL1077/document/LCA\\_Presentation\\_2021\\_11.pdf](https://mycourses.ntua.gr/courses/CIVIL1077/document/LCA_Presentation_2021_11.pdf)
  - [3.5] Δανάη Ελένη Στρούτζα, Ανάλυση κύκλου ζωής (LCA) μονάδας επεξεργασίας υδατικών αποβλήτων ορυχείων άνθρακα – Σενάρια βελτίωσης περιβαλλοντικού αποτυπώματος, Κεφάλαιο 5, Αθήνα 2023
  - [3.6] Arjun Ram, Piyush Sharma, A study on Life Cycle Assessment, International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT), February 2017
  - [3.7] Πανταζή Ελένη, Διπλωματική εργασία με θέμα: Συγκριτική μελέτη μεθόδων εκτίμησης επιπτώσεων κύκλου ζωής, Κεφάλαιο 2, Χανιά 2014
  - [3.8] Ζουμπούλης, Α., Πελέκα, Ε., & Τριανταφυλλίδης, Κ. (2015). Ανάλυση Κύκλου Ζωής [Κεφάλαιο]. Στο Ζουμπούλης, Α., Πελέκα, Ε., & Τριανταφυλλίδης, Κ. 2015. Πράσινη χημεία και τεχνολογία στη βιώσιμη ανάπτυξη [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. <https://hdl.handle.net/11419/2324>
  - [4.1] <https://www.orykta.gr/ekmetalleusi-emploutismos/metallourgikes-diergasies/81-elliniki-tsimentobiomihania>

- [4.2] A Rosyid , R Boedisantoso , A P Iswara , Environmental Impact Studied using Life Cycle Assessment on Cement Industry, Earth and Environmental Science 506 (2020)
- [4.3]G. Colelli ,R. Chacartegui, C. Ortiz, A. Carro, A.P. Arena, V. Verda , Life cycle and environmental assessment of calcium looping (CaL) in solar thermochemical energy storage, Energy Conversion and Management , April 2022