

Τσιμεντοβιομηχανία & Πράσινες Δημόσιες Συμβάσεις

Ιούνιος 2026





Κείμενο

Σταύρος Γεννίτσαρης, Συνεργάτης Βιομηχανικής Πολιτικής, The Green Tank
Νίκος Μάντζαρης, Επικεφαλής Αναλυτής Πολιτικής & Συνιδρυτής, The Green Tank

Για αναφορά

The Green Tank (2026) «Τσιμεντοβιομηχανία & Πράσινες Δημόσιες Συμβάσεις»
Copyright © The Green Tank, 2026

Σχέδιο μορφοποίησης

Design Nature

Στοιχεία επικοινωνίας

📍 Λεωφ. Βασ. Σοφίας 50, Αθήνα 115 28

☎ 210 7233384

🌐 thegreentank.gr

✉ info@thegreentank.gr

Σύνοψη

Η τσιμεντοβιομηχανία αποτελεί μία από τις σημαντικότερες πηγές εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου παγκοσμίως, καθώς ευθύνεται για περίπου 5-8% των παγκόσμιων ανθρωπογενών εκπομπών, ενώ αν ήταν κράτος θα κατατασσόταν στην τρίτη θέση ανάμεσα στους παγκόσμιους ρυπαντές. Για την επίτευξη των κλιματικών στόχων της ΕΕ-27 –τόσο των βραχυπρόθεσμων, που προβλέπουν μείωση των καθαρών εκπομπών κατά τουλάχιστον 55% έως το 2030 σε σύγκριση με το 1990, όσο και των μακροπρόθεσμων για κλιματική ουδετερότητα έως το 2050– είναι σαφές ότι και η τσιμεντοβιομηχανία οφείλει να συμβάλει, μειώνοντας δραστικά τις εκπομπές της.

Περίπου το 40% των εκπομπών του κλάδου σχετίζεται με την καύση ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή της θερμότητας που απαιτείται για την παραγωγή κλίνκερ. Θεωρητικά αυτές οι εκπομπές μπορούν να μειωθούν σε μεγάλο βαθμό με υποκατάσταση των ορυκτών καυσίμων από καθαρότερα καύσιμα ή παρεμβάσεις βελτίωσης της ενεργειακής αποδοτικότητας. Ωστόσο, το υπόλοιπο 60% των εκπομπών προέρχεται εγγενώς από τη χημική διεργασία παραγωγής κλίνκερ και δεν μπορεί να περιοριστεί με υποκατάσταση καυσίμου, γεγονός που καθιστά τον κλάδο “δυσχερώς απανθρακοποιήσιμο” (hard to abate).

Οι τεχνολογίες δέσμευσης, αξιοποίησης και αποθήκευσης άνθρακα (CCUS) προωθούνται τα τελευταία χρόνια ως το θεμέλιο για την απανθρακοποίηση της τσιμεντοβιομηχανίας. Ωστόσο, συνοδεύονται από αυξημένη κατανάλωση ενέργειας, υψηλό επενδυτικό και λειτουργικό κόστος και πολυσύνθετες τεχνικές και οικονομικές προκλήσεις που μπορούν να περιορίσουν σημαντικά την αποτελεσματικότητά τους. Η γενικευμένη εφαρμογή τους, ακόμα και για τις εκπομπές που προκύπτουν από τις διεργασίες παραγωγής θερμότητας, ενέχει τον κίνδυνο να εξαλειφθεί το κίνητρο για εφαρμογή εναλλακτικών λύσεων που μειώνουν τις εκπομπές στην πηγή και τελικά να καθυστερήσει την πορεία απανθρακοποίησης της βιομηχανίας. Συνεπώς, η εφαρμογή των τεχνολογιών CCUS θα πρέπει να περιοριστεί στο μέρος εκείνο των εκπομπών, οι οποίες δεν μπορούν να μειωθούν με άλλους τρόπους. Οι βελτιώσεις ενεργειακής αποδοτικότητας και η ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας αποτελούν ώριμες, άμεσα διαθέσιμες και οικονομικά βιώσιμες λύσεις. Επιπλέον, σε μεσοπρόθεσμο ορίζοντα, η χρήση πράσινου υδρογόνου ως καυσίμου και ο εξηλεκτρισμός της διεργασίας παραγωγής κλίνκερ μπορούν να διαδραματίσουν καταλυτικό ρόλο στη δραστική μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος του κλάδου. Ωστόσο, η υλοποίηση και αυτού τους είδους των επενδύσεων απαιτεί σημαντικούς πόρους.

Οι δημόσιοι φορείς κατατάσσονται ανάμεσα στους βασικούς αγοραστές τσιμέντου τόσο στην Ελλάδα όσο και διεθνώς. Σε αυτό το πλαίσιο, οι Πράσινες Δημόσιες Συμβάσεις (ΠΔΣ) μπορούν να λειτουργήσουν ως κρίσιμο εργαλείο στήριξης των τεχνολογιών αυτών μέσω της δημιουργίας ζήτησης για προϊόντα τσιμέντου χαμηλού ανθρακικού αποτυπώματος. Ωστόσο, το ισχύον Ελληνικό Σχέδιο Δράσης για τις ΠΔΣ περιορίζεται σε μη δεσμευτικούς ποσοτικούς στόχους και δεν παρέχει επαρκή κίνητρα για την υιοθέτηση και ανάπτυξη τεχνολογιών απανθρακοποίησης.

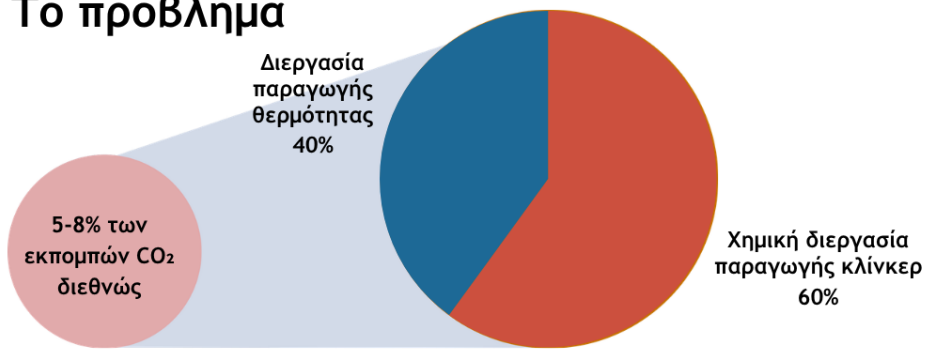
Το παρόν κείμενο πολιτικής προτείνει τον εμπλουτισμό του Εθνικού Σχεδίου Δράσης με μέτρα που στοχεύουν στην αξιόπιστη μέτρηση και πιστοποίηση του ανθρακικού αποτυπώματος

προϊόντων τσιμέντου, τη σταδιακή ενσωμάτωση δεσμευτικών περιβαλλοντικών κριτηρίων στις δημόσιες συμβάσεις και τη δημιουργία κινήτρων ενίσχυσης καθαρών τεχνολογιών για παραγωγούς και αναθέτουσες αρχές. Ειδικότερα προτείνουμε την:

1. **Ανάπτυξη εθνικού πλαισίου πιστοποίησης για προϊόντα τσιμέντου** που πληρούν συγκεκριμένα περιβαλλοντικά και ενεργειακά κριτήρια. Το πλαίσιο αυτό θα ενσωματωθεί στις δημόσιες προμήθειες και θα ευθυγραμμίζεται με αναγνωρισμένα ευρωπαϊκά πρότυπα και οικολογικά σήματα.
2. **Σταδιακή υποχρέωση προσκόμισης περιβαλλοντικής δήλωσης προϊόντος για το τσιμέντο.** Αρχικά, προτείνεται **τουλάχιστον το 40%** των δημοσίων συμβάσεων που περιλαμβάνουν τσιμέντο ή σκυρόδεμα να απαιτούν παροχή δεδομένων περιβαλλοντικού αποτυπώματος από τους παραγωγούς, ως μεταβατικό στάδιο για την ανάπτυξη αξιόπιστων συστημάτων μέτρησης. **Σε επόμενο στάδιο, η προσκόμιση περιβαλλοντικής δήλωσης προϊόντος θα γίνει υποχρεωτική** για τη συμμετοχή σε δημόσιους διαγωνισμούς προμήθειας τσιμέντου.
3. **Σταδιακή εφαρμογή αυστηρότερων ανώτατων ορίων εκπομπών CO₂** για το τσιμέντο που χρησιμοποιείται σε δημόσια έργα, με στόχο την κινητροδότηση επενδύσεων για την απανθρακοποίηση του κλάδου.
4. **Εφαρμογή συστήματος αξιολόγησης στις δημόσιες συμβάσεις που πριμοδοτεί προϊόντα τσιμέντου τα οποία υπερβαίνουν τα ελάχιστα περιβαλλοντικά όρια** και αξιοποιούν λιγότερο ώριμες τεχνολογίες, με στόχο την απανθρακοποίηση της διεργασίας παραγωγής κλίνκερ.
5. **Δημιουργία μηχανισμού οικονομικής επιβράβευσης για παραγωγούς τσιμέντου χαμηλότερων εκπομπών CO₂** σε σχέση με τον κλάδο, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποκλειστικά για χρηματοδότηση υφιστάμενων ή μελλοντικών επενδύσεων σε λιγότερο ώριμες τεχνολογίες απανθρακοποίησης στην τσιμεντοβιομηχανία.
6. **Παροχή πρόσθετης χρηματοδότησης ή αυξημένων προϋπολογισμών σε αναθέτοντες φορείς που υπερβαίνουν τους εθνικούς στόχους εφαρμογής πράσινων δημοσίων συμβάσεων.**

Τέλος, προτείνεται η ένταξη της Ελλάδας στη διεθνή πρωτοβουλία **Industrial Deep Decarbonization Initiative (IDDI)** με στόχο την ενίσχυση του ρόλου της χώρας στη διαμόρφωση πολιτικών απανθρακοποίησης σε παγκόσμιο επίπεδο.

Το πρόβλημα



Θεσμικό πλαίσιο

- Νομικά δεσμευτικοί στόχοι ευρωπαϊκού και εθνικού κλιματικού νόμου
- Αύξηση κόστους εκπομπών CO₂ λόγω της σταδιακής κατάργησης των δωρεάν δικαιωμάτων για τη βιομηχανία στο ΣΕΔΕ μεταξύ 2026-2034

Οι τεχνολογίες CCUS δεν είναι πανάκεια

- Επιλογή για εκπομπές που δεν μπορούν να μειωθούν με άλλο τρόπο
- Στέρηση πόρων από άλλες λύσεις απανθρακοποίησης
- Υψηλό κόστος αλλά και τεχνικές προκλήσεις

Εναλλακτικές λύσεις

- Βελτίωση ενεργειακής αποδοτικότητας
- Ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας
- Εναλλακτικά καύσιμα
- Χρήση πράσινου υδρογόνου
- Εξηλεκτρισμός

Προτάσεις Πολιτικής

1. Εθνικό σύστημα πιστοποίησης για προϊόντα τσιμέντου

- Ενσωμάτωση στις δημόσιες προμήθειες
- Ευθυγράμμιση με ευρωπαϊκά πρότυπα & οικολογικά σήματα

2. Δεσμευτικοί στόχοι παροχής δεδομένων

- 1η φάση: 40% των δημοσίων συμβάσεων που περιλαμβάνουν τσιμέντο
- 2η φάση: Υποχρεωτική περιβαλλοντική δήλωση προϊόντος για συμμετοχή σε δημόσιες προμήθειες

3. Υποχρεωτικά περιβαλλοντικά κριτήρια

- Σταδιακή εφαρμογή αυστηρότερων ορίων εκπομπών CO₂ για το τσιμέντο σε δημόσια έργα

4. Πριμοδότηση λιγότερο ώριμων τεχνολογιών

- Πλασματική μείωση της τιμής συγκριτικής αξιολόγησης της οικονομικής προσφοράς για προϊόντα τσιμέντου που παράγονται με λιγότερο ώριμες τεχνολογίες

5. Κίνητρα για τους παραγωγούς πράσινου τσιμέντου

- Οικονομική επιβράβευση για την κάλυψη επενδύσεων σε καινοτόμες τεχνολογίες απανθρακοποίησης
- Σύνδεση οικονομικής επιβράβευσης με τιμή CO₂ στο ΣΕΔΕ

6. Κίνητρα για τις πιο πράσινες αναθέτουσες αρχές

- Πρόσθετη χρηματοδότηση αποκλειστικά για έργα που συμμορφώνονται με περιβαλλοντικά κριτήρια

Ένταξη της Ελλάδας στην πρωτοβουλία Industrial Deep Decarbonization Initiative (IDDI)

- Παροχή κινήτρων για επενδύσεις και δημιουργία αγορών πράσινου τσιμέντου
- Ενίσχυση του ρόλου της χώρας στη διαμόρφωση πολιτικών απανθρακοποίησης της βαριάς βιομηχανίας σε παγκόσμιο επίπεδο

Πίνακας Περιεχομένων

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	8
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΔΕΣΜΕΥΣΗΣ, ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΑΝΘΡΑΚΑ (CCUS).....	11
ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΜΕΙΩΣΗΣ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΣΤΗΝ ΤΣΙΜΕΝΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ.....	13
Βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας.....	14
Ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας	16
Αντικατάσταση ορυκτών καυσίμων με εναλλακτικά καύσιμα	19
Χρήση υδρογόνου ως καυσίμου	21
Εξηλεκτρισμός της διεργασίας παραγωγής κλίνκερ	24
ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΜΕΤΡΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΑΝΘΡΑΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ ΣΤΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ ΔΡΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΠΡΑΣΙΝΕΣ ΔΗΜΟΣΙΕΣ ΣΥΜΒΑΣΕΙΣ.....	29
Διεθνείς και Ευρωπαϊκές Πολιτικές για τις Πράσινες Δημόσιες Συμβάσεις	29
Εθνικό Σχέδιο Δράσης για τις Πράσινες Δημόσιες Συμβάσεις.....	33
Προτεινόμενα Μέτρα Πολιτικής για το Ελληνικό Σχέδιο ΠΔΣ	33
Ανάπτυξη εθνικού συστήματος πιστοποίησης για προϊόντα τσιμέντου.....	34
Σταδιακή θέσπιση υποχρέωσης προσκόμισης περιβαλλοντικής δήλωσης προϊόντος για τη συμμετοχή στις δημόσιες προμήθειες τσιμέντου	35
Σταδιακή θέσπιση υποχρεωτικών περιβαλλοντικών κριτηρίων στις δημόσιες προμήθειες τσιμέντου	35
Δημιουργία μηχανισμού πριμοδότησης πράσινου τσιμέντου με στόχο την ωρίμανση τεχνολογιών υψηλής μείωσης εκπομπών	37
Παροχή οικονομικών κινήτρων προς τους παραγωγούς τσιμέντου με υψηλές περιβαλλοντικές επιδόσεις.....	38
Οικονομική ενίσχυση αναθετουσών αρχών με υψηλότερο επίπεδο πράσινων προμηθειών.....	38
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	39

Εισαγωγή

Το τσιμέντο, ως το δεύτερο πιο χρησιμοποιούμενο υλικό στον κόσμο μετά το νερό, βρίσκεται στον πυρήνα της παγκόσμιας αστικοποίησης, της ανάπτυξης υποδομών και της εντατικής οικοδομικής δραστηριότητας, γεγονός που καθιστά τον κλάδο στρατηγικό για την οικονομία¹. Ωστόσο, είναι ένας από τους πιο ενεργοβόρους και ρυπογόνους βιομηχανικούς τομείς σε διεθνές επίπεδο², καθώς υπολογίζεται ότι η παραγωγή τσιμέντου συμβάλλει κατά περίπου 5-8% στις συνολικές παγκόσμιες ανθρωπογενείς εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου². Με δεδομένο ότι το 2021 οι συνολικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα του κλάδου παγκοσμίως ανήλθαν σε περίπου 2.9 Gt, αν η τσιμεντοβιομηχανία ήταν κράτος θα κατατασσόταν στην τρίτη θέση ανάμεσα στους παγκόσμιους ρυπαντές³.

Από την άλλη μεριά, η κλιματική κρίση καθιστά επιτακτική τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και στην τσιμεντοβιομηχανία. Η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) ειδικότερα έχει υιοθετήσει ένα συνεκτικό πλαίσιο κλιματικής πολιτικής, στο επίκεντρο του οποίου βρίσκεται η επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050, όπως αποτυπώνεται στη στρατηγική της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας⁴ και τον Ευρωπαϊκό Κλιματικό Νόμο⁵. Στο πλαίσιο αυτό, ο ενδιάμεσος στόχος για το 2030 προβλέπει μείωση των καθαρών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στην ΕΕ-27 κατά τουλάχιστον 55% σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990, γεγονός που οδήγησε στην υιοθέτηση της νομοθετικής δέσμης μέτρων «Fit for 55»⁶. Σε εθνικό επίπεδο, ο εθνικός κλιματικός νόμος περιλαμβάνει νομικά δεσμευτικούς στόχους μείωσης των καθαρών ανθρωπογενών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά τουλάχιστον 55% για το 2030 και κατά 80% για το 2040 με έτος αναφοράς το 1990⁷. Δομικό στοιχείο της ευρωπαϊκής κλιματικής πολιτικής, αποτελεί το Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών (ΣΕΔΕ) το οποίο προβλέπει τη σταδιακή κατάργηση των δωρεάν δικαιωμάτων του Συστήματος Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών (ΣΕΔΕ) για την βιομηχανία συνολικά κατά το διάστημα 2026-2034⁸. Ωστόσο, οι μηχανισμοί του ΣΕΔΕ οδηγούν σε σταδιακή αύξηση του κόστους των εκπομπών CO₂. Χωρίς την παροχή δωρεάν δικαιωμάτων οι βιομηχανίες είναι εκτεθειμένες στο επιπλέον αυτό κόστος, δημιουργώντας έτσι ισχυρά οικονομικά κίνητρα για

¹Gagg, C. R., Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis. Engineering Failure Analysis, vol. 40, p. 114-140 (May 2014): <https://shorturl.at/Qkwe3>

² World Economic Forum, LOW-CARBON CONCRETE AND CONSTRUCTION: A REVIEW OF GREEN PUBLIC PROCUREMENT PROGRAMMES, (June 2022): <https://shorturl.at/gVpVK>

³ Nehdi M. L., Marani A. & Zhang L., Is net-zero feasible: Systematic review of cement and concrete decarbonization technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 191, p. 114169 (March 2024): <https://shorturl.at/cWB96>

⁴ Ευρωπαϊκή Επιτροπή, Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία, (Δεκέμβριος 2019): <https://shorturl.at/MF1DX>

⁵ Κανονισμός (ΕΕ) 2021/1119 της 30ης Ιουνίου 2021 για τη θέσπιση πλαισίου με στόχο την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας και για την τροποποίηση των κανονισμών (ΕΚ) 401/2009 και (ΕΕ) 2018/1999 («Ευρωπαϊκό Νομοθέτημα για το Κλίμα»): <https://shorturl.at/pRcqQ>

⁶ Ευρωπαϊκό Συμβούλιο- Συμβούλιο της ΕΕ, Δέσμη Fit for 55: <https://shorturl.at/oE580>

⁷ Νόμος 4936/2022: Εθνικός Κλιματικός Νόμος - Μετάβαση στην κλιματική ουδετερότητα και προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή, επείγουσες διατάξεις για την αντιμετώπιση της ενεργειακής κρίσης και την προστασία του περιβάλλοντος - ΦΕΚ 105/Α/27.05.2022 (May 2022): <https://shorturl.at/QYnh2>

⁸ Ευρωπαϊκό Συμβούλιο- Συμβούλιο της ΕΕ, Fit for 55: Μεταρρύθμιση του συστήματος εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπών της ΕΕ: <https://shorturl.at/eruvf>

επενδύσεις σε τεχνολογίες παραγωγής τσιμέντου χαμηλών εκπομπών⁹. Παράλληλα, οι αυξανόμενες κοινωνικές και αγοραστικές πιέσεις επιδρούν καταλυτικά, καθώς η ζήτηση για βιώσιμα δομικά υλικά ενισχύεται¹⁰, ενώ οι δημόσιες και ιδιωτικές προμήθειες ενσωματώνουν ολοένα και περισσότερο κριτήρια βιωσιμότητας, προωθώντας την υιοθέτηση πράσινων λύσεων.

Απέναντι σε αυτή τη νέα πραγματικότητα, τον Μάιο του 2020, η Ευρωπαϊκή Ένωση Τσιμέντου (Cement Europe) διατύπωσε την δέσμευση του κλάδου να επιτύχει μηδενικές καθαρές εκπομπές κατά μήκος της αλυσίδας αξίας τσιμέντου και σκυροδέματος έως το 2050¹¹. Η επίτευξη του στόχου αυτού όμως, χαρακτηρίζεται από μεγάλες προκλήσεις. Πιο συγκεκριμένα, η παραγωγή του κλίνκερ -το βασικό συστατικό του τσιμέντου στο οποίο οφείλονται οι συγκολλητικές και δομικές ιδιότητες του, απαιτεί την θερμική αποδόμηση του ασβεστόλιθου (CaCO₃) σε κλίβανο στους 1450°C. Η διεργασία αυτή της θερμικής αποδόμησης του ασβεστόλιθου κατά την παραγωγή του κλίνκερ αποτελεί την κύρια πηγή εκπομπών CO₂ της τσιμεντοβιομηχανίας, με μερίδιο της τάξης του 60% του συνόλου¹². Η δεύτερη σημαντική πηγή εκπομπών αφορά τις ενεργειακές εκπομπές, οι οποίες προέρχονται από την καύση ορυκτών καυσίμων για την επίτευξη των απαιτούμενων υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας, και αντιπροσωπεύουν κατά προσέγγιση το υπόλοιπο 40%. Συνολικά, η μέση παγκόσμια ένταση εκπομπών για την παραγωγή κοινού τσιμέντου εκτιμάται σε περίπου 673 κιλά CO₂ ανά τόνο τσιμέντου¹³, ενώ η μέση κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας της τσιμεντοβιομηχανίας κυμαίνεται γύρω στα 100 kWh ανά τόνο παραγόμενου τσιμέντου¹⁴. Όσον αφορά την ελληνική τσιμεντοβιομηχανία, το 2023 η ένταση άνθρακα της διεργασίας παραγωγής κλίνκερ έφτασε τα 808 κιλά CO₂ ανά τόνο κλίνκερ¹⁵. Ενώ όμως οι ενεργειακές εκπομπές μπορούν να περιοριστούν μέσω, αντικατάστασης καυσίμων και βελτίωσης της ενεργειακής αποδοτικότητας¹⁶, οι εκπομπές που σχετίζονται με την επεξεργασία του ασβεστόλιθου είναι εγγενείς στη χημική αντίδραση αποδόμησής του, με αποτέλεσμα η τσιμεντοβιομηχανία να κατατάσσεται στους δυσκολότερους τομείς προς απανθρακοποίηση².

Προκειμένου να ανταπεξέλθει στην αναμφισβήτητη μεγάλη πρόκληση της απανθρακοποίησης των διεργασιών της και να τηρήσει τις δεσμεύσεις της για μηδενισμό του

⁹ The Green Tank, Τάσεις στο Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών στην ΕΕ-27 και την Ελλάδα 2005-2024, (Ιούλιος 2025): <https://shorturl.at/b7kLn>

¹⁰ Firoozi A.A., Oyejobi D. O., Avudaiappan S. & Saavedra Flores E., Emerging trends in sustainable building materials: Technological innovations, enhanced performance, and future directions. Results in Engineering, vol. 2, p. 103521 (December 2024): <https://shorturl.at/MS956>

¹¹ European Cement Association (CEMBUREAU), From Ambition to Deployment - our 2050 roadmap: The road travelled, pathways and levers to scale up our net zero ambition (2024): <https://shorturl.at/6FzVD>

¹² Andrew, R. M., Global CO₂ emissions from cement production. Earth System Science Data, vol. 10, is. 1, p. 195-217 (January 2018): <https://shorturl.at/OPoMs>

¹³ International Renewable Energy Agency, Decarbonising hard-to-abate sectors with renewables: Enablers and recommendations (2025): <https://shorturl.at/vGPol>

¹⁴ World Bank, Cement Sector: Energy Efficiency and Decarbonization (EE&D) Opportunities. Pakistan Sustainable Energy Series (August 2025): <https://shorturl.at/Di74i>

¹⁵ Τα δεδομένα για τις ποσότητες του κλίνκερ αντλήθηκαν από την ετήσια έκθεση απογραφής εκπομπών UNFCCC για την Ελλάδα. Η τελευταία διαθέσιμη έκθεση δημοσιεύτηκε τον Απρίλιο του 2025 και περιλαμβάνει δεδομένα έως και το 2023. Τα δεδομένα για τις εκπομπές CO₂ αντλήθηκαν από το Ενωσιακό Μητρώο.

¹⁶ International Energy Agency, Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry, (April 2018): <https://shorturl.at/FWN4P>

ανθρακικού της αποτυπώματος ως το 2050, η τσιμεντοβιομηχανία διαθέτει σημαντικές τεχνολογικές δυνατότητες. Πιο συγκεκριμένα, οι τεχνολογίες δέσμευσης, αξιοποίησης και αποθήκευσης άνθρακα (CCUS) έχουν την δυνατότητα να μειώσουν τις εκπομπές CO₂ της διεργασίας παραγωγής τσιμέντου¹⁷, ειδικά αυτών που προκύπτουν από τη θερμική αποδόμηση του ασβεστόλιθου. Ωστόσο, η γενικευμένη εφαρμογή των τεχνολογιών CCUS, ακόμα και για τις εκπομπές που προκύπτουν από τις διεργασίες παραγωγής θερμότητας, ενέχει τον κίνδυνο να εξαλειφθεί το κίνητρο για εφαρμογή εναλλακτικών λύσεων που μειώνουν τις εκπομπές στην πηγή. Συγκεκριμένα, η συνεχής βελτίωση και βελτιστοποίηση της ενεργειακής αποδοτικότητας των βιομηχανικών διεργασιών, η ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας, η αντικατάσταση ορυκτών καυσίμων με εναλλακτικά καύσιμα, η χρήση πράσινου υδρογόνου ως καυσίμου και ο εξηλεκτρισμός ενεργοβόρων διεργασιών αποτελούν αξιόπιστες και ρεαλιστικές εναλλακτικές για τη μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος της διεργασίας παραγωγή θερμικής ενέργειας.

Η ανάπτυξη και εφαρμογή των τεχνολογιών αυτών όμως, απαιτεί σημαντικές επενδύσεις για την κατάλληλη μετατροπή των υπάρχοντων παραγωγικών εγκαταστάσεων ή την εγκατάσταση νέων. Οι δημόσιοι φορείς αποτελούν τον μεγαλύτερο καταναλωτή της αγοράς τσιμέντου, με ποσοστά περίπου 30-40%, στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής και την Ευρώπη, αντίστοιχα^{2,18}. Συνεπώς, η Πολιτεία μπορεί να παίξει καταλυτικό ρόλο στην ενίσχυση, προώθηση και εφαρμογή αυτών των τεχνολογιών και την ομαλή προσαρμογή της βιομηχανίας παραγωγής τσιμέντου στις απαιτήσεις των κλιματικών στόχων αξιοποιώντας τις Πράσινες Δημόσιες Συμβάσεις (ΠΔΣ).

Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα έκθεση περιγράφει αρχικά τις βασικές τεχνολογίες που μπορούν να συμβάλλουν στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τις διεργασίες παραγωγής τσιμέντου με έμφαση σε αυτές που σχετίζονται με την παραγωγή θερμικής ενέργειας, παραθέτοντας στοιχεία για την τεχνολογική ωριμότητα και το κόστος τους. Στη συνέχεια, αναγνωρίζοντας τον ρόλο που μπορούν να παίξουν οι ΠΔΣ στην προώθηση και στήριξη αυτών των τεχνολογιών, πραγματοποιείται ανασκόπηση των διεθνών και ευρωπαϊκών πολιτικών που προωθούν τις ΠΔΣ ως επιμέρους εργαλείο στο πλαίσιο μιας ευρύτερης στρατηγικής απανθρακοποίησης της βιομηχανίας. Τέλος, προτείνονται μέτρα και πολιτικές που θα μπορούσαν να ενσωματωθούν στο Ελληνικό Σχέδιο Δράσης για τις Πράσινες Δημόσιες Συμβάσεις, με στόχο τη διευκόλυνση και χρηματοδότηση επενδύσεων σε αυτές τις τεχνολογίες.

¹⁷ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Section 4: Near-Term Responses in a Changing Climate. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (2023): <https://shorturl.at/wzOef>

¹⁸ NRDC, A design guide to state and local low-carbon concrete procurement (April 2022): <https://shorturl.at/DEqF9>

Τεχνολογίες δέσμευσης, αξιοποίησης και αποθήκευσης άνθρακα (CCUS)

Αναγνωρίζοντας πως ένα σημαντικό μέρος των συνολικών εκπομπών CO₂ της παραγωγής τσιμέντου συνδέεται με την αποσύνθεση του ανθρακικού ασβεστίου σε οξείδιο του ασβεστίου στους κλιβάνους, δηλαδή με την ίδια τη χημική διεργασία παραγωγής κλίνκερ, οι τεχνολογίες CCUS έχουν προταθεί ήδη από το 2009 από τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (International Energy Agency) ως οι πιο κατάλληλες για τη μείωση των εκπομπών που προέρχονται από αυτή τη διεργασία στην τσιμεντοβιομηχανία¹⁹. Δεδομένου ότι αυτές οι εκπομπές αντιπροσωπεύουν ένα μεγάλο τμήμα των συνολικών εκπομπών του κλάδου, οι τεχνολογίες CCUS αναμένεται να διαδραματίσουν καθοριστικό ρόλο στην επίτευξη της δέσμευσης, που υιοθέτησε η Ευρωπαϊκή Ένωση Τσιμέντου (Cement Europe) το 2020, για μηδενικές καθαρές εκπομπές κατά μήκος της αλυσίδας αξίας τσιμέντου και σκυροδέματος έως το 2050. Το θετικό αντίκτυπο της εφαρμογής τους αναμένεται να είναι σημαντικό και βραχυπρόθεσμα. Ειδικότερα, ο οδικός χάρτης κλιματικής ουδετερότητας της ένωσης εκτιμά ότι οι τεχνολογίες CCUS θα μπορούσαν να συμβάλλουν στη μείωση των εκπομπών CO₂ κατά περίπου 83 κιλά CO₂/τόνο τσιμέντου έως το 2030, αντιπροσωπεύοντας ποσοστό 28% στη συνολική μείωση των εκπομπών του κλάδου από όλα τα μέτρα²⁰. Οι αντίστοιχες εκτιμήσεις της συνεισφοράς των τεχνολογιών CCUS για το 2040 προσεγγίζουν μερίδιο 47.5% ή 300 κιλά CO₂/τόνο τσιμέντου και 46.5% ή 374 κιλά CO₂/τόνο τσιμέντου για την επίτευξη του στόχου κλιματικής ουδετερότητας μέχρι το 2050¹¹.

Ωστόσο, η εγκατάσταση συστημάτων CCUS αυξάνει σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας σε επίπεδο εργοστασίου (κατά 50-300%), λόγω των απαιτήσεων για παραγωγή αναλώσιμων, άντληση διαλυτών, λειτουργία τεχνολογιών διαχωρισμού υψηλής ισχύος και καθαρισμό και συμπίεση του CO₂ ώστε να πληροί τις προδιαγραφές της αλυσίδας αξίας²¹. Επιπλέον, τα έργα CCUS απαιτούν υψηλές αρχικές επενδύσεις της τάξης των μερικών εκατοντάδων εκατομμυρίων ευρώ για ένα εργοστάσιο παραγωγής τσιμέντου, ενώ και το λειτουργικό τους κόστος παραμένει εξίσου σημαντικό, λόγω των ιδιαίτερα υψηλών ενεργειακών απαιτήσεων¹³. Συγκεκριμένα, η δέσμευση περίπου του 90% των εκπομπών CO₂ από έναν κλιβάνο τσιμέντου μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας της μονάδας κατά περίπου 25-40%. Ως αποτέλεσμα, η εφαρμογή τεχνολογιών CCS μπορεί να διπλασιάσει ή ακόμα και να τριπλασιάσει το κόστος παραγωγής του κλίνκερ²².

¹⁹ International Energy Agency (IEA), Cement Technology Roadmap: Carbon Emissions Reductions up to 2050 (October 2009): <https://shorturl.at/GF6cB>

²⁰ Η Ευρωπαϊκή Ένωση Τσιμέντου στοχεύει να μειώσει τις εκπομπές κατά μήκος της αλυσίδας αξίας τσιμέντου από 804 κιλά CO₂/τόνο τσιμέντου το 1990 σε 507 κιλά CO₂/τόνο τσιμέντου μέχρι το 2030

²¹ European Cement Research Academy (ECRA), The ECRA Technology Papers 2022: State of the Art Cement Manufacturing - Current technologies and their future development (2022): <https://shorturl.at/SDc2f>

²² Ige O.E. & Kabeya M., Decarbonizing the Cement Industry: Technological, Economic, and Policy Barriers to CO₂ Mitigation Adoption. Clean Technologies, vol. 7, is. 4, p. 85 (October 2025): <https://shorturl.at/e7bT0>

Παρά το μεγάλο οικονομικό τους αντίκτυπο, οι τεχνολογίες CCUS άρχισαν να θεωρούνται οικονομικά βιώσιμες τα τελευταία χρόνια λόγω της αύξησης του κόστους διοξειδίου του άνθρακα και της σταδιακής κατάργησης της διάθεσης δωρεάν δικαιωμάτων εκπομπών ως το 2034 σύμφωνα με την αναθεωρημένη οδηγία 2023/959/ΕΕ που διέπει τη λειτουργία του ΣΕΔΕ. Η ελκυστικότητα αυτών των επενδύσεων ενισχύθηκε ακόμα περισσότερο από την αύξηση των πόρων του Ταμείου Καινοτομίας, το οποίο χρηματοδοτείται από τη δημοπράτηση διακριτού τμήματος των δικαιωμάτων εκπομπών του ΣΕΔΕ, προκειμένου να στηρίξει την απανθρακοποίηση της βιομηχανίας, συμπεριλαμβανομένων και των έργων CCS/CCUS²³.

Οι δύο μεγάλες ελληνικές τσιμεντοβιομηχανίες (ΤΙΤΑΝ και ΑΓΕΤ Ηρακλής), ακολουθώντας αυτές τις πολιτικές κατευθύνσεις αλλά και ευθυγραμμιζόμενες με τα εταιρικά τους σχέδια για μείωση του ανθρακικού τους αποτυπώματος, έχουν ιεραρχήσει τη χρήση τεχνολογιών δέσμευσης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα ως βασικό μοχλό μείωσης των εκπομπών τους. Συγκεκριμένα, η ΤΙΤΑΝ Ελλάδας έχει εξασφαλίσει χρηματοδότηση ύψους 234 εκατ. ευρώ από το Ταμείο Καινοτομίας της ΕΕ για το έργο IFESTOS, το οποίο στοχεύει στην εγκατάσταση συστήματος CCS για τη δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα που εκπέμπεται από τις περιστροφικές καμίνους του εργοστασίου στο Καμάρι²⁴. Στη συνέχεια, το δεσμευόμενο CO₂ θα υγροποιείται και θα μεταφέρεται προς γεωλογική αποθήκευση, με στόχο την αποφυγή συνολικά 1.9 εκατ. τόνων CO₂/έτος, που αντιστοιχούν περίπου στο 15% των εκπομπών Κατηγορίας 1 της εταιρίας. Το έργο IFESTOS εντάχθηκε τον Ιούνιο του 2025 στο καθεστώς στρατηγικών επενδύσεων, με την τελική επενδυτική απόφαση να αναμένεται έως το τέλος του 2026 και ορίζοντα λειτουργίας το 2030²⁵. Παράλληλα, η ΑΓΕΤ Ηρακλής έχει δρομολογήσει το έργο OLYMPUS, που αφορά την εγκατάσταση συστήματος CCS στο εργοστάσιο στο Μηλάκι Εύβοιας, για το οποίο έχει εξασφαλίσει χρηματοδότηση περίπου 124.27 εκατ. ευρώ από το Ταμείο Καινοτομίας της ΕΕ²⁶. Το δεσμευόμενο CO₂ θα υγροποιείται και θα μεταφέρεται προς αποθήκευση, με στόχο την αποφυγή 1 εκατ. τόνων CO₂/έτος. Η συνολική αποφυγή απόλυτων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου υπολογίζεται σε 6.8 εκατ. τόνους ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα κατά τα πρώτα δέκα χρόνια λειτουργίας της εγκατάστασης²⁷. Το έργο OLYMPUS εντάχθηκε επίσης στο καθεστώς στρατηγικών επενδύσεων τον Νοέμβριο του 2025, με ορίζοντα λειτουργίας το 2029²⁸.

Εκτός από την αποθήκευση σε κατάλληλους γεωλογικούς σχηματισμούς (CCS), το δεσμευμένο CO₂ μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές (CCU). Στην παρούσα φάση ανάπτυξης των τεχνολογιών δέσμευσης, αξιοποίησης και αποθήκευσης CO₂, η επικρατούσα χρήση του δεσμευμένου CO₂ σε παγκόσμιο επίπεδο είναι για την επαύξηση της ανάκτησης πετρελαίου (Enhanced Oil Recovery - EOR). Συγκεκριμένα, στο τέλος του 2025 λειτουργούσαν παγκοσμίως 63 έργα CCUS, εκ των οποίων 27 (περίπου 43%) χρησιμοποιούσαν τμήμα του δεσμευμένου CO₂ (26.2 εκατ. τόνους ή 41% του συνολικά

²³ The Green Tank, Απανθρακοποίηση της Ελληνικής Βιομηχανίας: Σχέδια, Προκλήσεις & Προοπτικές, (Ιανουάριος 2025): <https://shorturl.at/232jM>

²⁴ IFESTOS: TITAN's pioneering carbon capture project: <https://shorturl.at/kAaAK>

²⁵ TITAN Greece's IFESTOS project has been designated as a Strategic Investment by Enterprise Greece: <https://shorturl.at/HGYOn>

²⁶ Olympus HERACLES Group - HOLCIM's Carbon Capture project towards a Net Zero Future: <https://shorturl.at/R5Dwj>

²⁷ European Commission, Innovation Fund, OLYMPUS: Ascending to the top of CO₂ avoidance in the EU cement sector through the innovative OxyCalciner technology: <https://shorturl.at/oanGx>

²⁸ HERACLES Group's OLYMPUS Project Included in the National "Strategic Investments of Exceptional Importance" Framework (Νοέμβριος 2025): <https://shorturl.at/noBpg>

δεσμευμένου) για την επαύξηση της ανάκτησης πετρελαίου²⁹. Το είδος αυτό της χρήσης του δεσμευμένου CO₂ εφαρμόζεται κυρίως στη Βόρεια Αμερική, όπου συγκεντρώνεται η συντριπτική πλειονότητα των σχετικών έργων¹⁶. Στο πλαίσιο αυτό, αν και το CO₂ που εγχέεται σε κοιτάσματα πετρελαίου παραμένει αποθηκευμένο μετά την ολοκλήρωση της εκμετάλλευσης, η τεχνολογία αυτή σήμερα αξιοποιείται ευρέως για την υποστήριξη της εξόρυξης υδρογονανθράκων.

Εναλλακτικές τεχνολογίες μείωσης εκπομπών στην τσιμεντοβιομηχανία

Παρά τις δυνατότητες τους για περιορισμό των εκπομπών της τσιμεντοβιομηχανίας, τα έργα CCS δεν αποτελούν «πανάκεια». Έρευνα του Ινστιτούτου Ενεργειακής Οικονομίας και Χρηματοοικονομικής Ανάλυσης (Institute for Energy Economic and Financial Analysis- IEEFA) εκτιμά το συνολικό κόστος των σχεδιαζόμενων έργων της αλυσίδας CCS στην ΕΕ σε περίπου 520 δισ. ευρώ³⁰. Δεδομένου πως η υλοποίηση έργων CCS εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από δημόσιες επιδοτήσεις, η έρευνα υπολογίζει το δυνητικό κόστος για τους φορολογούμενους έως και τα 140 δισ. ευρώ. Μια τέτοια δημοσιονομική δέσμευση ενέχει τον κίνδυνο εκτροπής πολύτιμων δημόσιων πόρων από ώριμες, άμεσα διαθέσιμες και οικονομικά αποδοτικότερες λύσεις απανθρακοποίησης της διεργασίας παραγωγής θερμότητας στην τσιμεντοβιομηχανία³¹. Εκτός του υψηλού κόστους εγκατάστασης και λειτουργίας αυτών των έργων, το πραγματικό ποσοστό δέσμευσης CO₂ των έργων που ήδη βρίσκονται σε λειτουργία είναι χαμηλότερο από το αναμενόμενο. Συγκεκριμένα, το IEEFA εξέτασε 16 έργα CCS, με τα ευρήματα να δείχνουν πως κανένα έργο δεν έχει επιτύχει δέσμευση CO₂ πάνω από 80%, με το μέσο ποσοστό δέσμευσης για τα εξεταζόμενα έργα να είναι περίπου 49%³².

Τέλος, αξιολόγηση της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC) καταδεικνύει ότι μέτρα όπως η αλλαγή καυσίμου, ο εξηλεκτρισμός σε συνδυασμό με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και η βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας επιτυγχάνουν καλύτερα αποτελέσματα από άποψη κόστους και αποτελεσματικότητας³³. Συνεπώς, το CCS θα πρέπει να αντιμετωπίζεται ως στοχευμένο και συμπληρωματικό εργαλείο που μπορεί να διαδραματίσει ρόλο σε επιλεγμένες και δυσχερώς απανθρακοποιήσιμες διεργασίες, αλλά οι δημόσιες πολιτικές οφείλουν να δίνουν προτεραιότητα σε εναλλακτικές λύσεις απανθρακοποίησης της τσιμεντοβιομηχανίας που μειώνουν τις εκπομπές στην πηγή.

Για τους παραπάνω λόγους, στη συνέχεια εστιάζουμε σε άλλες αποτελεσματικές λύσεις, όπως η συνεχής βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας των βιομηχανικών διεργασιών,

²⁹ Global CCS Institute, Global Status of CCS 2025 (2025): <https://shorturl.at/kHsTp>

³⁰ Institute for Energy Economic and Financial Analysis, Carbon capture and storage: Europe's climate gamble (October 2024): <https://shorturl.at/8gsTg>

³¹ European Environmental Bureau, CCS reality check: Risks and Priorities (May 2025): <https://shorturl.at/tPcRb>

³² Institute for Energy Economic and Financial Analysis, Carbon Capture and Storage: An unproven technology that cannot meet planetary CO₂ mitigation needs: <https://shorturl.at/sV8KM>

³³ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change, Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (2022): <https://shorturl.at/8lNgq>

που θα πρέπει να αποτελεί προτεραιότητα κάθε στρατηγικής απανθρακοποίησης της τσιμεντοβιομηχανίας, η ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας, η αντικατάσταση ορυκτών καυσίμων με εναλλακτικά καύσιμα, η χρήση πράσινου υδρογόνου και ο εξηλεκτρισμός ενεργοβόρων διεργασιών, οι οποίες συχνά παραβλέπονται.

Βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας

Η βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας αποτελεί θεμελιώδη στρατηγική μείωσης των εκπομπών και του κόστους παραγωγής στην τσιμεντοβιομηχανία, καθώς κάθε μονάδα ενέργειας που εξοικονομείται μεταφράζεται άμεσα σε χαμηλότερες εκπομπές CO₂ και χαμηλότερο ενεργειακό κόστος. Οι διαθέσιμες λύσεις βελτίωσης και βελτιστοποίησης της ενεργειακής κατανάλωσης στην τσιμεντοβιομηχανία καλύπτουν ολόκληρη τη διεργασία παραγωγής κλίνκερ και χαρακτηρίζονται από TRL 9³⁴, δηλαδή είναι πλήρως ώριμες, εμπορικά διαθέσιμες και εφαρμοσμένες σε πολλές βιομηχανικές μονάδες.

Οι **περιστροφικοί κλίβανοι ξηρής διεργασίας** κυριαρχούν παγκοσμίως, καθώς παρουσιάζουν αρκετά χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας σε σύγκριση με τις υγρές διεργασίες, λόγω της μειωμένης υγρασίας των πρώτων υλών και, κατά συνέπεια, των χαμηλότερων ενεργειακών αναγκών για ξήρανση. Η πλέον σύγχρονη τεχνολογία για την παραγωγή κλίνκερ περιλαμβάνει κλιβάνους ξηρής διεργασίας με προασβεστοποιητή, προθερμαντήρες κυκλώνα πολλαπλών σταδίων και καυστήρες πολλαπλών καναλιών, η οποία προτείνεται ως παράδειγμα Καλύτερης Διαθέσιμης Τεχνολογίας (Best Available Technology - BAT), σύμφωνα με τις ευρωπαϊκές οδηγίες, και εφαρμόζεται σε όλα τα νέα εργοστάσια παγκοσμίως¹¹.

Συγκεκριμένα, η αναβάθμιση υφιστάμενων κλιβάνων ξηρής διεργασίας με ενσωμάτωση προασβεστοποιητή και προθερμαντήρα πολλαπλών σταδίων επιτρέπει την αξιοποίηση της πλεονάζουσας θερμότητας της διεργασίας για την ξήρανση και προασβεστοποίηση των πρώτων υλών, μειώνοντας περαιτέρω την ενεργειακή κατανάλωση της διεργασίας. Οι προθερμαντήρες κυκλώνα πολλαπλών σταδίων επιτρέπουν την προοδευτική προθέρμανση και μερική απανθρακοποίηση των πρώτων υλών χρησιμοποιώντας τη θερμότητα των καυσαερίων, αυξάνοντας την ενεργειακή απόδοση κατά 30-40% σε σύγκριση με παλαιότερες διεργασίες¹⁶. Το κόστος αναβάθμισης για εφαρμογή αυτών των τεχνολογιών κυμαίνεται μεταξύ 70-100 €/τόνο κλίνκερ. Μπορεί όμως να αποκλίνει σημαντικά από αυτό το εύρος ανάλογα με την αρχική κατάσταση των εγκαταστάσεων και το επίπεδο του απαιτούμενου εκσυγχρονισμού. Σε κάποιες περιπτώσεις, η κατασκευή καινούριας εγκατάστασης παραγωγής κλίνκερ μπορεί να είναι οικονομικά πιο συμφέρουσα από την αναβάθμιση υφιστάμενης γραμμής. Η εγκατάσταση τέτοιων τεχνολογιών μπορεί να οδηγήσει σε αποφυγή εκπομπών 80-250 kg CO₂/τόνο κλίνκερ. Μία τέτοια επένδυση αναμένεται να οδηγήσει σε μείωση των λειτουργικών εξόδων από 2.81 €/τόνο τσιμέντου έως 9.07 €/τόνο τσιμέντου²¹,

³⁴ TRL (Technology Readiness Level): Τυποποιημένη κλίμακα εννέα επιπέδων για την αξιολόγηση της τεχνολογικής ωριμότητας. Η κλίμακα εκτείνεται από το TRL 1, που αντιστοιχεί στην παρατήρηση και τεκμηρίωση βασικών επιστημονικών αρχών, έως το TRL 9, που αφορά τεχνολογίες πλήρως ανεπτυγμένες, δοκιμασμένες και αποδεδειγμένα λειτουργικές σε βιομηχανικό και εμπορικό περιβάλλον.

με την τιμή του τσιμέντου στην Ευρωπαϊκή Ένωση να κυμαίνεται περίπου στα 150-200 €/τόνο τσιμέντου^{35,36}.

Επίσης, η αντικατάσταση των μονοβάθμιων καυστήρων με καυστήρες πολλαπλών καναλιών συνιστά ένα αποδοτικό μέτρο εξοικονόμησης ενέργειας στους κλιβάνους τσιμέντου. Οι καυστήρες πολλαπλών καναλιών λειτουργούν με χαμηλότερη παροχή αέρα, της τάξης του 8-12%, σε σύγκριση με το 20-25% στους μονοβάθμιους καυστήρες, χαρακτηριστικό που μπορεί να οδηγήσει σε εξοικονόμηση καυσίμου της τάξης των 50-80 MJ/τόνο κλίνκερ σε συμβατικούς κλιβάνους, ενώ σε κλιβάνους με προασβεστοποιητή τα οφέλη περιορίζονται περίπου στο μισό. Η βελτίωση αυτή συνεπάγεται μείωση εκπομπών κατά 2.2-3.3 kg CO₂/τόνο κλίνκερ σε συμβατικούς κλιβάνους. Το απαιτούμενο επενδυτικό κόστος εκτιμάται σε 0.5-0.66 εκατ. ευρώ για την εγκατάσταση νέου καυστήρα και προασβεστοποιητή, ενώ η μείωση του λειτουργικού κόστους υπολογίζεται σε 0.07-0.11 €/τόνο τσιμέντου^{3,21}.

Η σταθερότητα της συνεχούς παραγωγής στην διεργασία παραγωγής τσιμέντου αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την ενεργειακή αποδοτικότητα, καθώς διακυμάνσεις στις ιδιότητες των πρώτων υλών ή των καυσίμων επηρεάζουν τη θερμική και ηλεκτρική κατανάλωση. Η εφαρμογή προηγμένων συστημάτων ελέγχου με μοντέλα πρόβλεψης, τεχνητή νοημοσύνη και μηχανική μάθηση επιτρέπει τη συνεχή εποπτεία και βελτιστοποίηση των διεργασιών καύσης και άλεσης, μειώνοντας τις απώλειες ενέργειας και τις διακυμάνσεις στη λειτουργία. Το κόστος εγκατάστασης τέτοιων συστημάτων κυμαίνεται μεταξύ 0.12-2.5 €/τόνο κλίνκερ με την αναμενόμενη καθαρή εξοικονόμηση λειτουργικού κόστους, να υπολογίζεται σε περίπου 0.2-0.8 €/τόνο τσιμέντου. Το κόστος αρχικής επένδυσης εξαρτάται από τη διαμόρφωση της μονάδας και το επιθυμητό επίπεδο αυτοματισμού και οργάνωσης^{16,21}.

Επιπλέον, οι ηλεκτρικοί κινητήρες που εξυπηρετούν τους μύλους άλεσης, τους κλιβάνους και τους ανεμιστήρες καταναλώνουν μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας στη διεργασία παραγωγής τσιμέντου, ενώ οι λοιποί κινητήρες είναι κατά κανόνα μικρότερης ισχύος και λειτουργούν σε σταθερές ταχύτητες. Η εγκατάσταση μετατροπέων συχνότητας μπορεί να επιφέρει αξιοσημείωτη μείωση του λειτουργικού κόστους, δεδομένου ότι η κατανάλωση ισχύος των κινητήρων μεταβάλλεται με τον κύβο της ταχύτητας περιστροφής. Ειδικότερα, η χρήση μετατροπέων συχνότητας σε κινητήρες μπορεί να μειώσει την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας κατά 3% έως 8%, ενώ η εφαρμογή τους σε ανεμιστήρες αντιστοιχεί σε εξοικονόμηση της τάξης των 5.5 kWh/τόνο κλίνκερ. Παράλληλα, η εγκατάσταση ανεμιστήρων υψηλής ενεργειακής απόδοσης μπορεί να επιφέρει επιπλέον μείωση 1.1 kWh/τόνο κλίνκερ, ενώ η αντικατάσταση ηλεκτροκίνητων συστημάτων μετάδοσης με υδραυλικά μπορεί να οδηγήσει σε εξοικονόμηση ενέργειας της τάξης του 10% έως 15%. Συνολικά, η εφαρμογή των ανωτέρω μέτρων συμβάλλει στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα κατά 3 έως 5 κιλά CO₂ ανά τόνο κλίνκερ. Πέραν της εξοικονόμησης ενέργειας, οι μετατροπείς συχνότητας βελτιώνουν τον έλεγχο και την ευελιξία των διεργασιών, μειώνοντας τις μηχανικές καταπονήσεις και, κατ' επέκταση, το κόστος συντήρησης. Το κόστος εγκατάστασης εκτιμάται σε περίπου 0.13-0.19 εκατ. ευρώ για συστήματα ισχύος 1,000kW,

³⁵ World Cement Association, Impact of EU ETS on the structure and profitability of the cement industry (2024): <https://shorturl.at/kwe39>

³⁶ Alexander Makhlay, European cement prices expected to rise in 2026 (February 2026): <https://shorturl.at/3zuv0>

ενώ η καθαρή μείωση του λειτουργικού κόστους μπορεί να φθάσει έως και 0.14 €/τόνο τσιμέντου^{3,21}.

Ο Πίνακας 1 συνοψίζει τις βασικές τεχνολογικές λύσεις βελτίωσης ενεργειακής αποδοτικότητας στην διεργασία παραγωγής κλίνκερ. Για κάθε τεχνολογία αποτυπώνεται ενδεικτικά το απαιτούμενο επενδυτικό κόστος (CAPEX), τα αναμενόμενα οφέλη στο λειτουργικό κόστος (OPEX), καθώς και τα αντίστοιχα ενεργειακά και περιβαλλοντικά οφέλη. Τα μεγέθη κόστους παρουσιάζουν εύρος τιμών, το οποίο αντανακλά τις διαφοροποιήσεις στη δυναμικότητα, την υφιστάμενη τεχνολογική κατάσταση των εγκαταστάσεων και το επίπεδο εκσυγχρονισμού που απαιτείται.

Πίνακας 1: Σύγκριση βασικών μέτρων βελτίωσης ενεργειακής αποδοτικότητας στην διεργασία παραγωγής κλίνκερ

Μέτρο	CAPEX	OPEX (εξοικονόμηση)	Ενεργειακό/ Περιβαλλοντικό όφελος
Αναβάθμιση κλιβάνου ξηρής διεργασίας με προασβεστοποιητή και πολυσταδιακό προθερμαντήρα	70-100 €/τόνο κλίνκερ	2.81-9.07 €/τόνο τσιμέντου	+30-40% ενεργειακή απόδοση, αποφυγή 80-250 κιλά CO ₂ /τόνο κλίνκερ
Καυστήρες πολλαπλών καναλιών	0.5-0.66 εκατ. €	0.07-0.11 €/τόνο τσιμέντου	Εξοικονόμηση 50-80 MJ/τόνο κλίνκερ (25-40 MJ/τόνο κλίνκερ σε κλιβάνους με προασβεστοποιητή), μείωση 2.2-3.3 κιλά CO ₂ /τόνο κλίνκερ
Προηγμένα συστήματα ελέγχου	0.12-2.5 €/τόνο κλίνκερ	0.2-0.8 €/τόνο τσιμέντου	Μείωση θερμικής και ηλεκτρικής κατανάλωσης, περιορισμός διακυμάνσεων
Μετατροπείς συχνότητας σε κινητήρες	0.13-0.19 εκατ. € / 1,000 kW	έως 0.14 €/τόνο τσιμέντου	Εξοικονόμηση 3-8% ηλεκτρικής ενέργειας, μείωση 3-5 κιλά CO ₂ /τόνο κλίνκερ

Ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Η ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας (Waste Heat Recovery - WHR) αναφέρεται στη διαδικασία συλλογής και αξιοποίησης της μέγιστης δυνατής ποσότητας θερμότητας από τις παραγωγικές διεργασίες μίας βιομηχανικής μονάδας, με στόχο τη μείωση της θερμικής ενέργειας που απορρίπτεται στο περιβάλλον και την επαναχρησιμοποίησή της για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στην τσιμεντοβιομηχανία σχεδόν το 50% της θερμικής ενέργειας που εισάγεται στη διεργασία παραγωγής κλίνκερ αποβάλλεται κυρίως μέσω των καυσαερίων καύσης, του θερμού αέρα από τα συστήματα ψύξης του κλίνκερ και της ακτινοβολίας από τις θερμές επιφάνειες του εξοπλισμού. Συγκεκριμένα, στις μονάδες ξηρής διεργασίας, οι συνολικές θερμικές απώλειες μπορούν να φθάσουν έως και το 45.6% της απαιτούμενης θερμικής ενέργειας, γεγονός που αναδεικνύει το ιδιαίτερα υψηλό δυναμικό εφαρμογής τεχνολογιών ανάκτησης απορριπτόμενης θερμότητας³⁷.

³⁷ Marenco-Porto C.A., Fierro J.J., Nieto-Londoño C., Lopera L., Escudero-Atehortua A., Giraldo M. & Jouhara H., Potential savings in the cement industry using waste heat recovery technologies. Energy, vol. 279, p. 127810 (September 2023): <https://shorturl.at/Rhl7U>

Η εφαρμογή τέτοιων συστημάτων στην τσιμεντοβιομηχανία συνιστά μια διπλά επωφεληλή λύση, καθώς συνδυάζει τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων με τη βελτίωση του κόστους λειτουργίας των μονάδων μέσω της μείωσης της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας. Η εφαρμογή της τεχνολογίας ανάκτησης απορριπτόμενης θερμότητας στην τσιμεντοβιομηχανία ξεκίνησε από την Ιαπωνία και στη συνέχεια διαδόθηκε σε άλλες ηπείρους, με κυρίαρχη εφαρμογή στην Ασία. Ιδιαίτερα στην Κίνα, τα συστήματα ανάκτησης θερμότητας προωθήθηκαν ως βασικός συντελεστής μείωσης των εκπομπών της τσιμεντοβιομηχανίας, ενώ το 2011, έγινε υποχρεωτική η εγκατάστασή τους για την αδειοδότηση νέων μονάδων παραγωγής κλίνκερ. Ως αποτέλεσμα, συστήματα ανάκτησης απορριπτόμενης θερμότητας είναι εγκατεστημένα σε πάνω από το 97% των νέων κλιβάνων στην τσιμεντοβιομηχανία³⁸.

Στις τσιμεντοβιομηχανίες, οι δύο κύριες θέσεις ανάκτησης θερμότητας είναι ο πύργος του συστήματος προθέρμανσης και η έξοδος του συστήματος ψύξης του κλίνκερ²¹. Σε τεχνικό επίπεδο, τα συστήματα ανάκτησης απορριπτόμενης θερμότητας στους κλιβάνους τσιμέντου λειτουργούν βάσει του θερμοδυναμικού κύκλου Rankine. Στον κύκλο αυτό, η θερμότητα που ανακτάται από τα θερμά απαέρια μεταφέρεται σε ένα εργαζόμενο ρευστό μέσω ενός λέβητα, προκαλώντας τη μετατροπή του από υγρή σε αέρια φάση. Ο παραγόμενος ατμός εκτονώνεται σε στρόβιλο συνδεδεμένο με ηλεκτρογεννήτρια, όπου η θερμική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική και στη συνέχεια σε ηλεκτρική. Ο ατμός εξόδου οδηγείται σε συμπυκνωτή, όπου ψύχεται και επανέρχεται σε υγρή κατάσταση και τροφοδοτεί τον λέβητα μέσω αντλίας, ολοκληρώνοντας τον κλειστό θερμοδυναμικό κύκλο³⁹.

Αν και η ηλεκτρική απόδοση των συστημάτων WHR στην τσιμεντοβιομηχανία περιορίζεται συνήθως σε ποσοστά της τάξης του 20-25% λόγω της σχετικά χαμηλής θερμοκρασίας των πηγών απορριπτόμενης θερμότητας, το ενεργειακό όφελος παραμένει ιδιαίτερα σημαντικό²¹. Οι πιο κοινές εφαρμογές ανάκτησης θερμότητας στην τσιμεντοβιομηχανία βασίζονται στον κύκλο Rankine με ατμό νερού (Steam Rankine Cycle - SRC), ενώ αρκετές εφαρμογές βασίζονται στον Οργανικό Κύκλο Rankine (Organic Rankine Cycle - ORC). Στον SRC, το ανακτημένο θερμικό φορτίο μετατρέπει το νερό σε υπέρθερμο ατμό, ο οποίος οδηγείται σε στρόβιλο για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, ενώ στον ORC χρησιμοποιείται οργανικό ρευστό με χαμηλότερο σημείο βρασμού, καθιστώντας τον κύκλο καταλληλότερο για πηγές μέσης ή χαμηλότερης θερμοκρασίας⁴⁰. Ειδικότερα, τα συστήματα ORC μπορούν να αξιοποιήσουν πηγές απορριπτόμενης θερμότητας με θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 150°C, ενώ τα συστήματα SRC περιορίζονται σε πηγές θερμότητας υψηλότερες των 260°C³⁹.

Συμπληρωματικά προς τους ανωτέρω κύκλους, ο κύκλος Kalina αποτελεί μια εναλλακτική τεχνολογία ανάκτησης απορριπτόμενης θερμότητας. Πρόκειται για παραλλαγή του κύκλου Rankine που χρησιμοποιεί ως εργαζόμενο ρευστό μίγμα νερού και αμμωνίας με αποτέλεσμα να μπορεί να αξιοποιεί αποτελεσματικότερα πηγές θερμότητας χαμηλής έως και μέσης θερμοκρασίας. Συγκεκριμένα, ο κύκλος Kalina μπορεί να λειτουργήσει σε ευρύ φάσμα

³⁸ Ofosu-Adarkwa J., Xie N. & Javed S.A., Forecasting CO2 emissions of China's cement industry using a hybrid Verhulst-GM(1,N) model and emissions' technical conversion. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 130, p. 109945 (September 2020): <https://shorturl.at/r3Fa4>

³⁹ International Finance Corporation & Institute for Industrial Productivity, Waste Heat Recovery for the Cement Sector: Market and Supplier Analysis (June 2014): <https://shorturl.at/bkM4Z>

⁴⁰ Joint Research Centre, Decarbonisation Options for the Cement Industry (2023): <https://shorturl.at/GuM7p>

θερμοκρασιών, από περίπου 95 °C έως και 535 °C, ενώ σε σύγκριση με τον Οργανικό Κύκλο Rankine επιτυγχάνει 15-25% υψηλότερη ηλεκτρική απόδοση³⁹.

Στην Ευρώπη, η αξιοποίηση συστημάτων ανάκτησης απορριπτόμενης θερμότητας στον κλάδο της τσιμεντοβιομηχανίας έχει αναπτυχθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, με έργα να υλοποιούνται ή να βρίσκονται σε στάδιο δοκιμών σε αρκετές χώρες. Ενδεικτικά, τέτοιες εγκαταστάσεις λειτουργούν στην Τσεχία, τη Γερμανία, την Ιταλία, την Πορτογαλία, τη Ρουμανία, τη Σλοβακία και τη Σουηδία, καλύπτοντας διαφορετικά στάδια ωριμότητας, από πιλοτικές δοκιμές έως πλήρως λειτουργικές μονάδες. Η Γερμανία και η Ιταλία παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη συγκέντρωση έργων, ενώ χώρες όπως η Ρουμανία και η Σλοβακία διαθέτουν ήδη συστήματα που λειτουργούν με επιτυχία για περισσότερα από δέκα χρόνια, με την εγκατεστημένη ισχύ των έργων αυτών να κυμαίνεται μεταξύ 2 και 8 MW_e³⁹.

Από οικονομικής άποψης, τα συστήματα ανάκτησης απορριπτόμενης θερμότητας στην τσιμεντοβιομηχανία χαρακτηρίζονται από υψηλό αρχικό επενδυτικό κόστος, αλλά χαμηλές λειτουργικές δαπάνες⁴⁰. Ως προς την ενεργειακή απόδοση, ο κύκλος Rankine με ατμό επιτυγχάνει μείωση της καθαρής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας της τάξης των 8-22 kWh ανά τόνο κλίνκερ, ενώ για τον Οργανικό Κύκλο Rankine το εύρος είναι ελαφρώς μικρότερο, μεταξύ 8 και 15 kWh/τόνο κλίνκερ. Ο κύκλος Kalina εμφανίζει συγκρίσιμες ή και υψηλότερες επιδόσεις, με εξοικονόμηση 10-24 kWh ανά τόνο κλίνκερ. Τα αντίστοιχα οφέλη σε επίπεδο εκπομπών CO₂ είναι επίσης σημαντικά, καθώς τα συστήματα ατμού οδηγούν σε μείωση 5-12 kg CO₂/τόνο κλίνκερ, τα συστήματα ORC σε 5-8 kg CO₂/τόνο κλίνκερ, ενώ ο κύκλος Kalina επιτυγχάνει μειώσεις της τάξης των 6-14 kg CO₂/τόνο κλίνκερ²¹.

Όσον αφορά το κόστος επένδυσης, η εγκατάσταση και των τριών τεχνολογιών εκτιμάται ότι κυμαίνεται μεταξύ 15 και 30 εκατ. ευρώ, με τις προβλέψεις να δείχνουν σχετικά σταθερά επίπεδα κόστους για την περίοδο 2020-2050. Το τελικό κόστος εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως ο τύπος της τεχνολογίας, το μέγεθος και η γεωγραφική θέση της εγκατάστασης, γεγονός που εξηγεί τη μεγάλη διακύμανση του ειδικού επενδυτικού κόστους: από περίπου 6,500 €/kW εγκατεστημένης ισχύος για μικρές μονάδες 2 MW (κυρίως ORC), έως περίπου 1,900€/kW για μεγαλύτερες εγκαταστάσεις 25 MW με κύκλο ατμού. Παράλληλα, όλες οι τεχνολογίες αναμένεται να συμβάλλουν σε μείωση του κόστους παραγωγής τσιμέντου κατά περίπου 0.5-1.5 €/τόνο^{39,40}.

Ο Πίνακας 2 παρουσιάζει συνοπτικά τις βασικές τεχνολογίες ανάκτησης απορριπτόμενης θερμότητας, εστιάζοντας στους κύκλους Rankine με ατμό, Οργανικό Rankine και Kalina. Για κάθε τεχνολογία αποτυπώνονται ενδεικτικά τα κύρια τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά, καθώς και οι επιπτώσεις τους στην ενεργειακή αποδοτικότητα και στις περιβαλλοντικές επιδόσεις των μονάδων παραγωγής τσιμέντου. Παράλληλα, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα οικονομικά μεγέθη που σχετίζονται με την εφαρμογή τους. Τα μεγέθη κόστους και απόδοσης δίνονται υπό μορφή εύρους τιμών, καθώς διαφοροποιούνται κυρίως ανάλογα με την εγκατεστημένη ισχύ των μονάδων.

Πίνακας 2. Συγκριτική παρουσίαση τεχνολογιών ανάκτησης απορριπτόμενης θερμότητας για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην τσιμεντοβιομηχανία

Παράμετρος	Κύκλος Rankine με ατμό (SRC)	Οργανικός Κύκλος Rankine (ORC)	Κύκλος Kalina
Εργαζόμενο ρευστό	Νερό/υδρατμός	Οργανικό ρευστό χαμηλού σημείου βρασμού	Μίγμα νερού-αμμωνίας
Εύρος θερμοκρασιών πηγής	> 260 °C	> 150 °C	95-535 °C
Εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας	8-22 kWh/τόνο κλίνκερ	8-15 kWh/τόνο κλίνκερ	10-24 kWh/τόνο κλίνκερ
Μείωση εκπομπών CO ₂	5-12 κιλά CO ₂ /τόνο κλίνκερ	5-8 κιλά CO ₂ /τόνο κλίνκερ	6-14 κιλά CO ₂ /τόνο κλίνκερ
Ειδικό επενδυτικό κόστος	1,900-6,500 €/kW	1,900-6,500 €/kW	1,900-6,500 €/kW
Συνολικό κόστος επένδυσης	15-30 εκατ. €	15-30 εκατ. €	15-30 εκατ. €
Επίδραση στο κόστος τσιμέντου	Μείωση 0.5-1.5 €/τόνο	Μείωση 0.5-1.5 €/τόνο	Μείωση 0.5-1.5 €/τόνο

Αντικατάσταση ορυκτών καυσίμων με εναλλακτικά καύσιμα

Η συνεπεξεργασία αποβλήτων ως εναλλακτικών καυσίμων αποτελεί μία αποτελεσματική στρατηγική μείωσης των εκπομπών CO₂ στην τσιμεντοβιομηχανία, μέσω της μερικής ή πλήρους αντικατάστασης των παραδοσιακών καυσίμων υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, όπως το πετρελαϊκό κοκ, το μαζούτ, ο γαιάνθρακας ή ακόμη και το ορυκτό αέριο, με εναλλακτικά καύσιμα χαμηλού ανθρακικού αποτυπώματος³. Τα τελευταία περιλαμβάνουν κυρίως βιομάζα και επεξεργασμένα απόβλητα, όπως λυματολάσπη, δημοτικά στερεά απόβλητα (MSW), καύσιμα προερχόμενα από απορρίμματα (RDF), καύσιμα παραγόμενα από επεξεργασμένα βιομηχανικά και αστικά απόβλητα (SRF), καύσιμα από ελαστικά (TDF) και πλαστικά (PDF). Μια ειδική κατηγορία εναλλακτικών καυσίμων, που έχει κεντρίσει το ενδιαφέρον της τσιμεντοβιομηχανίας και της βιομηχανίας αιολικής ενέργειας ως αμοιβαία επωφέλης διατομεακή στρατηγική, αποτελεί η αξιοποίηση αποσυρμένων πτερυγίων ανεμογεννητριών για ταυτόχρονη παραγωγή ενέργειας και αντικατάσταση υλικού μέσω της συνεπεξεργασίας σε κλιβάνους τσιμεντοβιομηχανιών, όπου τα σύνθετα υλικά στο τέλος του κύκλου ζωής τους, όπως τα πτερύγια ανεμογεννητριών κατασκευασμένα από υαλονήματα ή ανθρακονήματα ενσωματωμένα σε ρητίνες, μπορούν να ανακυκλωθούν με κυκλικό τρόπο¹¹Error! Bookmark not defined.,⁴¹.

Τα εναλλακτικά καύσιμα ορυκτής προέλευσης οδηγούν συνήθως σε μείωση εκπομπών κατά 0.5-1 τόνο CO₂ ανά τόνο καυσίμων υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα που αντικαθίσταται, ενώ η αντικατάστασή τους από βιομάζα μπορεί να οδηγήσει σε μειώσεις της τάξης των 2.5

⁴¹ Wind Europe, Decommissioning of Onshore Wind Turbines: Industry Guidance Document (November 2020): <https://shorturl.at/RbKCR>

τόνων CO₂⁴². Τα εναλλακτικά καύσιμα συχνά συνεπεξεργάζονται με τα ορυκτά καύσιμα. Η παραγόμενη στάχτη ενσωματώνεται μερικώς στο τσιμεντοκονίαμα, μειώνοντας τα υπολείμματα προς υγειονομική ταφή και αυξάνοντας την ενεργειακή αξιοποίηση. Επιπλέον, οι υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας του κλιβάνου (περίπου 1,450 °C) και η παραμονή των υλικών για έως 10 δευτερόλεπτα εξασφαλίζουν την πλήρη καταστροφή όλων των οργανικών συστατικών των αποβλήτων, καθιστώντας τη συνεπεξεργασία ασφαλή και αποτελεσματική μέθοδο⁴³.

Η αντικατάσταση ορυκτών καυσίμων με εναλλακτικά αποτελεί μία πλήρως ώριμη, σε εμπορική κλίμακα και με εκτενή βιομηχανική εφαρμογή τεχνολογία (TRL 9). Ωστόσο, ο βαθμός αξιοποίησης των εναλλακτικών καυσίμων διαφέρει σημαντικά ανά περιοχή και παραμένει χαμηλός σε παγκόσμιο επίπεδο. Συγκεκριμένα, κατά μέσο όρο περίπου 6% των ορυκτών καυσίμων αντικαθίστανται σήμερα παγκοσμίως από εναλλακτικά καύσιμα, εκ των οποίων περίπου τα δύο τρίτα είναι ορυκτής προέλευσης και το ένα τρίτο προέρχεται από βιομάζα. Παρόλα αυτά, προβλέπεται ότι η παγκόσμια χρήση εναλλακτικών καυσίμων θα αυξηθεί κατά μέσο όρο από το σημερινό 6% σε περίπου 22% έως το 2030 και σε 43% έως το 2050⁴⁴. Η ευρωπαϊκή τσιμεντοβιομηχανία έχει σημειώσει πιο σημαντική πρόοδο σε σύγκριση με τον παγκόσμιο μέσο όρο. Συγκεκριμένα, το 2021 τα εναλλακτικά καύσιμα αποτέλεσαν το 53% του ενεργειακού μείγματος, έναντι 46% το 2017 και μόλις 2% το 1990. Σε συνέχεια αυτής της πορείας, ο κλάδος έχει θέσει φιλόδοξους στόχους, επιδιώκοντας την αύξηση του μεριδίου των εναλλακτικών καυσίμων στο 60% έως το 2030, με 30% συμμετοχή βιοαποβλήτων, και στο 95% έως το 2050, με συμμετοχή βιοαποβλήτων 50%¹¹. Παρότι αναφέρεται πως δεν υφίστανται τεχνικά εμπόδια για την κάλυψη πάνω από 90% των θερμικών αναγκών της παραγωγής κλίνκερ από εναλλακτικά καύσιμα, η πρακτική εφαρμογή της τεχνολογίας επηρεάζεται από ένα σύνολο παραγόντων, όπως η τοπική διαθεσιμότητα, η περιεκτικότητα των εναλλακτικών καυσίμων σε βαρέα μέταλλα, χλώριο, θείο και PCB, καθώς και η υγρασία, το φυσικό μέγεθος και η θερμογόνος δύναμη των εναλλακτικών καυσίμων⁴⁵. Οι εφαρμογές, ιδίως σε ευρωπαϊκές βιομηχανίες, καταδεικνύουν ότι είναι εφικτά αρκετά υψηλότερα ποσοστά υποκατάστασης, καθώς καταγράφονται μέσοι εθνικοί δείκτες άνω του 70% και έως και 100% σε μεμονωμένες μονάδες τσιμέντου^{3,21}.

Στην Ελλάδα μονάδες παραγωγής τσιμέντου που αξιοποιούν εναλλακτικά καύσιμα λειτουργούν από τις μεγάλες τσιμεντοβιομηχανίες της χώρας. Συγκεκριμένα, στα εργοστάσια τσιμέντου του Ομίλου TITAN, το ποσοστό θερμιδικής υποκατάστασης συμβατικών στερεών καυσίμων από εναλλακτικά αυξήθηκε σε 39.3% το 2024⁴⁶, σε σχέση με 27% το 2020⁴⁷. Η χρήση βιομάζας σημείωσε επίσης σημαντική αύξηση φτάνοντας ποσοστό

⁴² Clark G., Davis M., Shibani, Kumar A., Assessment of fuel switching as a decarbonization strategy in the cement sector. Energy Conversion and Management, vol. 312, p. 118585 (July 2024): <https://shorturl.at/RUIC1>

⁴³ Beguedou E., Narra S., Armoo E.A., Agboka K. & Damgou M.K., Alternative Fuels Substitution in Cement Industries for Improved Energy Efficiency and Sustainability. Energies, vol. 16, is. 8, p. 3533 (April 2023): <https://shorturl.at/dgCLM>

⁴⁴ Global Cement and Concrete Association, Concrete Future: The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete (2020): <https://shorturl.at/li0Km>

⁴⁵ Rahman A., Rasul M.G., Khan M.M.K., Sharma S., Recent development on the uses of alternative fuels in cement manufacturing process. Fuel, vol. 145, p. 84-99 (April 2015): <https://shorturl.at/ESrau>

⁴⁶ TITAN Ελλάδα, Έκθεση Βιώσιμης Ανάπτυξης 2024: <https://shorturl.at/gRvvr>

⁴⁷ TITAN Ελλάδα, Έκθεση Βιώσιμης Ανάπτυξης 2020: <https://shorturl.at/QRi0w>

θερμιδικής υποκατάστασης 18.4% από μόλις 7.7% το 2020. Κατά το 2024, το θερμικό ενεργειακό μείγμα που καταναλώθηκε από τον όμιλο ΑΓΕΤ Ηρακλής χαρακτηρίστηκε από υψηλή συμμετοχή εναλλακτικών καυσίμων, τα οποία αντιστοιχούσαν στο 45.4% της συνολικής κατανάλωσης θερμικής ενέργειας, έναντι 27.7% το 2020, με τη συμβολή της βιομάζας στο μείγμα καυσίμων να αυξάνεται πάνω από τρεις φορές, από 4.7% το 2020⁴⁸ σε 16.8% το 2024⁴⁹.

Για μονάδες παραγωγής κλίνκερ με ετήσια δυναμικότητα παραγωγής 2 εκατ. τόνων, οι επενδυτικές δαπάνες για την εγκατάσταση και προσαρμογή υποδομών συνεπεξεργασίας εκτιμώνται σε ένα εύρος 5-15 εκατ. ευρώ ή μεταξύ 2.5-7.5 €/τόνο κλίνκερ, ενώ η καθαρή εξοικονόμηση λειτουργικού κόστους, υπολογίζεται σε περίπου 3-4 €/τόνο τσιμέντου²¹.

Παρά τα πλεονεκτήματά της, η στρατηγική της αντικατάστασης ορυκτών καυσίμων με εναλλακτικά καύσιμα επιτυγχάνει μικρές μειώσεις των εκπομπών CO₂ κατά 1-13%, ανάλογα με τη σύνθεση του μίγματος καυσίμων, τις πρόσθετες ανάγκες ξήρανσης των εναλλακτικών καυσίμων, τις παραμέτρους λειτουργίας του κλιβάνου και του υπόλοιπου εξοπλισμού της μονάδας παραγωγής κλίνκερ^{42,50,51}. Η μεγαλύτερη μείωση εκπομπών CO₂ επιτυγχάνεται με την αντικατάσταση ορυκτών καυσίμων με βιομάζα. Ωστόσο, με τη ζήτηση για προσφορά βιομάζας να αυξάνεται και την προσφορά να παραμένει σταθερή, το αναμενόμενο έλλειμμα διαθέσιμης βιομάζας εκτιμάται σε 50-150%¹³. Το έλλειμμα αυτό αποτελεί ένα σημαντικό εμπόδιο για τη μακροπρόθεσμη εφαρμογή αυτής της στρατηγικής. Συνεπώς, η εναλλακτική αυτή έχει πεπερασμένες δυνατότητες απανθρακοποίησης της τσιμεντοβιομηχανίας και απαιτείται να εξεταστούν πιο αποτελεσματικές και αποδοτικές επιλογές.

Χρήση υδρογόνου ως καυσίμου

Το υδρογόνο αποτελεί ένα από τα πλέον υποσχόμενα καθαρά καύσιμα για την παραγωγή θερμότητας στη βιομηχανία, καθώς διαθέτει ιδιότητες όπως υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, δυνατότητα αποθήκευσης, ευελιξία στη χρήση και πράσινο χαρακτήρα με την προϋπόθεση ότι για την παραγωγή του μέσω ηλεκτρόλυσης χρησιμοποιούνται ανανεώσιμες πηγές ενέργειας⁵². Στο πλαίσιο της βιομηχανίας τσιμέντου, η αξιοποίηση του υδρογόνου μπορεί να γίνει με δύο διαφορετικές προσεγγίσεις.

Η πρώτη προσέγγιση αφορά τη **χρήση του υδρογόνου ως καυσίμου για την παραγωγή της θερμότητας** που απαιτείται κατά την παραγωγή του κλίνκερ⁵². Παρόλο που από την καύση υδρογόνου δεν προκύπτουν εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, είναι δυνατόν το ανθρακικό αποτύπωμα της χρήσης του να είναι πολύ μεγάλο ανάλογα με τον τρόπο που αυτό παράγεται. Για παράδειγμα, οι εκπομπές από τη διεργασία παραγωγής υδρογόνου από

⁴⁸ Όμιλος ΗΡΑΚΛΗΣ, Έκθεση Αειφορίας 2020: <https://shorturl.at/ay00J>

⁴⁹ Όμιλος ΗΡΑΚΛΗΣ, Έκθεση Αειφορίας 2024: <https://shorturl.at/Uoqlp>

⁵⁰ Pitre V., La H. & Bergerson J.A., Impacts of alternative fuel combustion in cement manufacturing: Life cycle greenhouse gas, biogenic carbon, and criteria air contaminant emissions. Journal of Cleaner Production, vol. 475, p. 143717 (October 2024): <https://shorturl.at/LPDBc>

⁵¹ Global Efficiency Intelligence, Emissions Impacts of Alternative Fuels Combustion in the Cement Industry (June 2023): <https://shorturl.at/N3QQU>

⁵² Resources for the Future (RFF), Decarbonized Hydrogen in the US Power and Industrial Sectors: Identifying and Incentivizing Opportunities to Lower Emissions (December 2020): <https://shorturl.at/UVV8e>

αεριοποίηση λιθάνθρακα ή λιγνίτη (καφέ υδρογόνο) φτάνουν τα 19 kg CO₂/kg H₂. Αντίθετα, αν για την παραγωγή του εφαρμοστεί ηλεκτρόλυση με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ (πράσινο υδρογόνο), το συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα είναι μηδενικό. Επομένως, το **πράσινο υδρογόνο** μπορεί να αντικαταστήσει πλήρως ή μερικώς τα ορυκτά καύσιμα, προσφέροντας μια αποτελεσματική μέθοδο απανθρακοποίησης της διεργασίας παραγωγής θερμικής ενέργειας στην τσιμεντοβιομηχανία⁵³.

Σύμφωνα με θερμοδυναμικές αναλύσεις, η ενσωμάτωση συστημάτων καύσης υδρογόνου μπορεί να οδηγήσει σε μείωση εκπομπών έως και 44% σε σχέση με μια εγκατάσταση που λειτουργεί αποκλειστικά με ορυκτά καύσιμα⁵⁴. Άλλες προσεγγίσεις, όπου το υδρογόνο χρησιμοποιείται μερικώς ως συμπληρωματικό καύσιμο στο μείγμα, δείχνουν μειώσεις εκπομπών μεταξύ 15% και 19.6%, διατηρώντας παράλληλα σταθερή τη θερμική απόδοση και τη λειτουργία του κλιβάνου⁵⁵. Οι δοκιμές σε μεγάλες βιομηχανικές μονάδες έχουν δείξει ότι η μερική αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων με υδρογόνο είναι τεχνικά εφικτή και λειτουργικά σταθερή, αν και απαιτείται περαιτέρω βελτιστοποίηση του καυστήρα και των συνθηκών καύσης¹¹. Το 2022, έγινε δοκιμή μίγματος καυσίμου καθαρών μηδενικών εκπομπών άνθρακα για την παραγωγή θερμότητας στην τσιμεντοβιομηχανία Hanson στο Ηνωμένο Βασίλειο. Το ποσοστό του υδρογόνου στο μείγμα καυσίμων που χρησιμοποιήθηκε έφτασε περίπου το 40% της θερμικής ενέργειας στον κλίβανο αποδεικνύοντας πως η χρήση υδρογόνου σε κλιβάνους τσιμεντοβιομηχανιών σε υψηλό ποσοστό είναι τεχνικά εφικτή⁵⁶.

Όταν το υδρογόνο δεν παράγεται στις εγκαταστάσεις της τσιμεντοβιομηχανίας, η προμήθειά του απαιτεί ειδικές μεθόδους μεταφοράς και διαχείρισης. Για μικρές ποσότητες, μπορεί να μεταφερθεί με φορτηγά ή τρένα υπό εξαιρετικά υψηλή πίεση (500-1,000 bar), λόγω της χαμηλής θερμιδικής αξίας ως προς τον όγκο του (10.8 MJ/m³). Για μεγαλύτερους όγκους, απαιτείται η ανάπτυξη μόνιμων υποδομών, ιδιαίτερα αγωγών μεταφοράς και βαλβίδων ρύθμισης της πίεσης, καθώς η έγχυση του υδρογόνου στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις γίνεται κοντά στην ατμοσφαιρική πίεση. Αντίθετα, στην παραγωγή με ηλεκτρόλυση περιορίζεται στο ελάχιστο η κατανάλωση ενέργειας που σχετίζεται με τα συστήματα αποσυμπίεσης, ενώ η συνολική κατανάλωση ενέργειας προέρχεται κυρίως από την ίδια τη διεργασία ηλεκτρόλυσης για την παραγωγή υδρογόνου (44 MWh/τόνο H₂ για ηλεκτρόλυση με απόδοση 75%²¹).

Η δεύτερη προσέγγιση αφορά την **παραγωγή υδρογόνου μέσω ανάκτησης θερμότητας από τη διεργασία παραγωγής κλίνκερ**. Οι μεγάλες ποσότητες θερμότητας που απορρίπτονται από τους κλιβάνους και τους εναλλάκτες θερμότητας των συστημάτων αυτών μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή υδρογόνου. Παράλληλα, έχουν προταθεί υβριδικά συστήματα που ενσωματώνουν αεριοποίηση αποβλήτων και παραγωγή υδρογόνου σε μια

⁵³ Nhuchhen D.R., Sit S.P. & Layzell D.B., Decarbonization of cement production in a hydrogen economy. Applied Energy, vol. 317, p. 119180 (July 2022): <https://shorturl.at/dUvsS>

⁵⁴ Juangsa, F.B., Cezeliano A.S., Darmanto P.S. & Aziz M., Thermodynamic analysis of hydrogen utilization as alternative fuel in cement production. South African Journal of Chemical Engineering, vol. 42, p. 23-31 (October 2022): <https://shorturl.at/gAYQm>

⁵⁵ El-Emam R. S. & Gabriel K. S., Synergizing hydrogen and cement industries for Canada's climate plan - case study. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, vol. 43, p. 3151-3165 (June 2021): <https://shorturl.at/Yxjj7>

⁵⁶ Mineral Products Association, VDZ gGmbH, Cinar Ltd, Hanson & Tarmac, State of the art fuel mix for UK cement production to test the path for 'Net Zero': a technical, environmental and safety demonstration (August 2022): <https://shorturl.at/Ktrbn>

ενιαία εγκατάσταση παραγωγής τσιμέντου. Η προσέγγιση αυτή προσφέρει πολλαπλά οφέλη: μείωση του κόστους παραγωγής, αντικατάσταση πρωτογενών καυσίμων από προϊόντα αεριοποίησης και αξιοποίηση της παραγόμενης τέφρας ως πρώτης ύλης για το κλίνκερ¹¹.

Παρόλο που η καύση υδρογόνου στην παραγωγή κλίνκερ αποτελεί μία υποσχόμενη τεχνολογία απανθρακοποίησης της τσιμεντοβιομηχανίας, συνοδεύεται από σημαντικές τεχνικές και λειτουργικές απαιτήσεις. Το υδρογόνο είναι ιδιαίτερα εύφλεκτο και η φλόγα του είναι δυσδιάκριτη με αποτέλεσμα να διαδίδεται ταχύτητα, καθιστώντας αναγκαία την ύπαρξη αυστηρών μέτρων ασφαλείας⁵⁷. Επιπλέον, η σχετικά υψηλή θερμοκρασία αυτανάφλεξης δυσχεραίνει την έναρξη της καύσης χωρίς τη χρήση βοηθητικής πηγής, ενώ παρόλο που η καύση υδρογόνου εξαλείφει πλήρως τις εκπομπές CO₂, το υψηλό θερμικό φορτίο μπορεί να αυξήσει τον σχηματισμό οξειδίων του αζώτου (NO_x), κάτι που απαιτεί ελεγχόμενη θερμοκρασία και χρήση τεχνικών αραιώσης. Συγκεκριμένα, η ανάμιξη του υδρογόνου με ατμό ή αδρανή αέρια μπορεί να συμβάλλει στη σταθεροποίηση της φλόγας και τη μείωση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου⁵⁸.

Συνεπώς, η επιτυχής αξιοποίηση του υδρογόνου στην τσιμεντοβιομηχανία απαιτεί προσαρμογές σε καυστήρες, συστήματα τροφοδοσίας και ελέγχου, καθώς και αξιολόγηση της αντοχής των πυρίμαχων υλικών στις νέες συνθήκες λειτουργίας. Οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την πρόοδο και τη βιωσιμότητα της τεχνολογίας περιλαμβάνουν το κόστος και τη διαθεσιμότητα του υδρογόνου, καθώς και τεχνικές παραμέτρους όπως η ταχύτητα, ο ρυθμός και η θέση έγχυσης του στον καυστήρα, που καθορίζουν τη μορφή της φλόγας και την αποδοτικότητα της θερμικής ακτινοβολίας. Επιπλέον, η εγκατάσταση κατάλληλων συστημάτων αποθήκευσης και σωληνώσεων αποτελεί κρίσιμο στοιχείο για την αξιόπιστη λειτουργία της διεργασίας. Στο πλαίσιο αυτό, η τεχνολογία χρήσης υδρογόνου ως καυσίμου στην παραγωγή κλίνκερ βρίσκεται σήμερα σε επίπεδο τεχνολογικής ωριμότητας 6. Η ευρεία βιομηχανική αξιοποίησή της αναμένεται όταν το TRL υπερβεί το επίπεδο 8, το οποίο αναμένεται γύρω στο 2040²¹.

Ένα χαρακτηριστικό έργο που αφορά τη χρήση πράσινου υδρογόνου ως καυσίμου μηδενικών εκπομπών άνθρακα στην παραγωγή τσιμέντου αποτελεί το H2CEM του Ομίλου TITAN. Το έργο στοχεύει στην παραγωγή υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης, αξιοποιώντας ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στις μονάδες του Ομίλου σε Καμάρι, Δρέπανο και Ευκαρπία. Η βιομηχανική αξιοποίηση του υδρογόνου αναμένεται να μειώσει τις εκπομπές CO₂ κατά περίπου 160,000 τόνους ετησίως, που αντιστοιχεί σε τουλάχιστον 8% μείωση ανά τόνο παραγόμενου προϊόντος. Παράλληλα, προβλέπεται η κατασκευή πιλοτικού περιστροφικού κλιβάνου σχεδιασμένου να λειτουργεί με υδρογόνο ως κύριο καύσιμο, με στόχο την πειραματική διερεύνηση της συμπεριφοράς της φλόγας και των συνθηκών καύσης^{11,59}.

Το κόστος επένδυσης για την προσαρμογή μονάδων παραγωγής δυναμικότητας 6,000 τόνων κλίνκερ/ημέρα για αντικατάσταση καυσίμου κατά 10% με υδρογόνο κυμαίνεται στα 2.3-4.5 εκατ. ευρώ. Το κόστος αυτό αφορά την προσαρμογή υφιστάμενης μονάδας για τη δυνατότητα υποδοχής και καύσης υδρογόνου χωρίς την εγκατάσταση συστημάτων

⁵⁷ Mineral Products Association, Cinar Ltd & VDZ gGmbH, Options for switching UK cement production sites to near zero CO₂ emission fuel: Technical and financial feasibility (October 2019): <https://shorturl.at/Sjeli>

⁵⁸ Schneider M., Hoenig V., Ruppert J. & Rickert J., The cement plant of tomorrow. Cement and Concrete Research, vol. 173, p. 107290 (November 2023): <https://shorturl.at/1sjad>

⁵⁹ TITAN: Net Zero Innovation: <https://shorturl.at/k493h>

ηλεκτρόλυσης. Ωστόσο, η οικονομική προοπτική της χρήσης υδρογόνου ως καυσίμου στην παραγωγή τσιμέντου εξαρτάται κυρίως από το λειτουργικό κόστος, το οποίο συνδέεται άμεσα με την τιμή του καυσίμου. Με βάση τις τρέχουσες εκτιμήσεις, η τιμή του υδρογόνου αναμένεται να μειωθεί από περίπου 3.2 €/kg το 2020, σε 2.2 €/kg το 2030 και 1.5 €/kg έως το 2050, ακολουθώντας την πτώση του κόστους παραγωγής πράσινου υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης και την αύξηση της διαθεσιμότητας ανανεώσιμης ενέργειας. Με αυτόν τον τρόπο η τεχνολογία αναμένεται να καθίσταται ολοένα και πιο ανταγωνιστική σε σχέση με τα συμβατικά καύσιμα²¹.

Εξηλεκτρισμός της διεργασίας παραγωγής κλίνκερ

Ο εξηλεκτρισμός της παραγωγής κλίνκερ αποτελεί μια από τις πλέον καινοτόμες προσεγγίσεις για την απανθρακοποίηση της τσιμεντοβιομηχανίας, καθώς αντικαθιστά την καύση ορυκτών καυσίμων με ηλεκτρική ενέργεια για την παροχή θερμότητας στον κλίβανο. Η τεχνολογία αυτή παραμένει σε αρχικό επίπεδο ωριμότητας, καθώς η κάλυψη των πολύ υψηλών θερμοκρασιακών απαιτήσεων της διεργασίας ασβεστοποίησης αποτελεί βασικό τεχνικό περιορισμό. Παρά τις προκλήσεις, ορισμένες τσιμεντοβιομηχανίες έχουν ήδη δρομολογήσει πιλοτικές δράσεις έρευνας και ανάπτυξης¹¹. Οι δύο βασικές προσεγγίσεις που υπάρχουν είναι ο **μερικός εξηλεκτρισμός**, όπου η ηλεκτρική ενέργεια αξιοποιείται κυρίως για την προθέρμανση των πρώτων υλών (έως ~900 °C) με καυστήρες πλάσματος ή ηλεκτρικούς θερμαντήρες αντίστασης, και ο **πλήρης εξηλεκτρισμός**, όπου οι απαιτούμενες τελικές θερμοκρασίες επιτυγχάνονται αποκλειστικά μέσω τεχνολογιών υψηλής θερμοκρασίας, όπως τα συστήματα πλάσματος (plasma burners), η επαγωγική θέρμανση (inductive heating), η θέρμανση μικροκυμάτων (microwave heating) και τα συστήματα ηλεκτρικών αντιστάσεων για θέρμανση (resistive electrical heating)⁴⁰.

Οι τεχνολογίες παραγωγής θερμότητας μέσω ηλεκτρικής ενέργειας για την παραγωγή κλίνκερ πέραν των συστημάτων πλάσματος, αν και παρουσιάζουν ερευνητικό ενδιαφέρον, βρίσκονται ακόμη σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης και αντιμετωπίζουν σημαντικές τεχνικές και λειτουργικές προκλήσεις που περιορίζουν τη βιομηχανική τους εφαρμογή. Συγκεκριμένα, η επαγωγική θέρμανση, αν και ιδιαίτερα αποδοτική σε αγωγή και μαγνητικά υλικά, δεν είναι εύκολα εφαρμόσιμη στην τσιμεντοβιομηχανία, καθώς οι πρώτες ύλες του τσιμέντου παρουσιάζουν πολύ χαμηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα και μηδενική μαγνητική απόκριση. Ως αποτέλεσμα, η μεταφορά θερμότητας απαιτεί τη χρήση ενδιάμεσων αγωγίμων στοιχείων, γεγονός που μειώνει σημαντικά την ενεργειακή απόδοση και αυξάνει τη θερμική αδράνεια του συστήματος, καθιστώντας τη μέθοδο μη πρακτική για βιομηχανική κλίμακα στην παρούσα φάση. Παρόμοιες δυσκολίες παρατηρούνται και στη θέρμανση μέσω μικροκυμάτων, η οποία βασίζεται στην απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από το υλικό. Παρότι η μέθοδος επιτρέπει ταχεία και άμεση θέρμανση χωρίς φυσική επαφή, η χαμηλή απορροφητικότητα των πρώτων υλών, σε συνδυασμό με προβλήματα ανάκλασης και ανομοιογενούς θέρμανσης, οδηγούν σε χαμηλή ενεργειακή απόδοση και περιορισμένη σταθερότητα της διεργασίας. Τέλος, η θέρμανση μέσω ηλεκτρικών αντιστάσεων, παρά την απλότητά της και τη δυνατότητα ελέγχου της παρεχόμενης θερμότητας, συναντά σοβαρούς περιορισμούς λόγω της ανάγκης χρήσης υλικών με εξαιρετικά υψηλή αντοχή σε θερμοκρασίες και οξειδωτικές συνθήκες, καθώς και λόγω της έντονης φθοράς των αντιστάσεων από τη σκόνη και τις θερμικές καταπονήσεις του κλιβάνου. Συνολικά, παρόλο

που υπάρχουν κάποιες αρχικές εφαρμογές, οι τεχνολογίες αυτές παραμένουν σε επίπεδο εργαστηριακής ή θεωρητικής διερεύνησης, καθώς οι απαιτήσεις θερμικής ισχύος και αξιοπιστίας της τσιμεντοβιομηχανίας καθιστούν την άμεση εφαρμογή τους ιδιαίτερα δύσκολη στο παρόν στάδιο τεχνολογικής ωρίμανσης τους³.

Η τεχνολογία πλάσματος θεωρείται σήμερα η πιο υποσχόμενη μεταξύ των διαθέσιμων επιλογών, καθώς συνδυάζει υψηλές θερμοκρασίες, γρήγορη απόκριση και τεχνική ευελιξία. Η εφαρμογή της βασίζεται στη δημιουργία μιας θερμής δέσμης ιονισμένου αερίου μέσω ηλεκτρικής εκκένωσης ή πεδίου υψηλής συχνότητας. Η θερμότητα μεταφέρεται στο υλικό κυρίως μέσω συναγωγής, με το είδος και τη ροή του αερίου (O₂, N₂, CO, αέρας ή ατμός) να καθορίζουν την αποδοτικότητα της διεργασίας. Οι θερμοκρασίες που μπορούν να επιτευχθούν κυμαίνονται από 1,500 °C έως και πάνω από 7,000 °C, γεγονός που καθιστά την τεχνολογία θεωρητικά ικανή να καλύψει τις θερμοκρασιακές απαιτήσεις της παραγωγής κλίνκερ.

Η τεχνολογία έχει αποτελέσει αντικείμενο μελετών σε σημαντικά ερευνητικά έργα, όπως το CemZero στη Σουηδία, που υλοποιήθηκε από τη Vattenfall και τη Cementsa. Στο πλαίσιο του έργου διερευνήθηκαν διάφορα σενάρια πλήρους εξηλεκτρισμού της παραγωγής τσιμέντου με χρήση κλιβάνων πλάσματος, επιβεβαιώνοντας τη σκοπιμότητα εφαρμογής σε πιλοτική κλίμακα⁶⁰. Επιπλέον, οι προσομοιώσεις που διεξήχθησαν στο πλαίσιο του έργου έδειξαν πως μια μελλοντική λειτουργία της μονάδας της Cementsa βασισμένη στον ηλεκτρισμό θα μπορούσε να λειτουργήσει συμπληρωματικά με την ανάπτυξη και λειτουργία αιολικού πάρκου, βελτιώνοντας το συνολικό ενεργειακό ισοζύγιο και ταυτόχρονα μειώνοντας τις αιχμές πλεονάζουσας ισχύος που θα προκαλούσε διαφορετικά η αυξημένη αιολική παραγωγή.

Παράλληλα, η Βρετανική Ένωση Ορυκτών Προϊόντων πραγματοποίησε προσομοιώσεις και πειραματικές δοκιμές σε βιομηχανικό κλίβανο τσιμέντου, καταδεικνύοντας ότι ο κλίβανος πλάσματος μπορεί να λειτουργήσει αξιόπιστα στο ιδιαίτερα απαιτητικό περιβάλλον της διεργασίας παραγωγής κλίνκερ. Παρότι η διάρκεια λειτουργίας των δοκιμών ήταν περιορισμένη, τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν τη βιωσιμότητα της τεχνολογίας σε αρχικό στάδιο, θέτοντας τις βάσεις για περαιτέρω ανάπτυξη σε μεγαλύτερη κλίμακα^{61,62}.

Μία αρκετά ανεπτυγμένη τεχνολογία για τον εξηλεκτρισμό της διεργασίας παραγωγής θερμότητας στην τσιμεντοβιομηχανία αποτελεί η RotoDynamic Heater (RDH™) της φινλανδικής Coolbrook, η οποία στοχεύει στην παροχή θερμότητας υψηλών θερμοκρασιών 700°C έως 1,700°C⁶³. Η τεχνολογία έχει δοκιμαστεί επιτυχώς σε πιλοτική εφαρμογή κλίμακας 1MW, επιτυγχάνοντας την παροχή θερμότητας πάνω από 1,000°C και μπορεί

⁶⁰ Cementsa, & Vattenfall, CemZero: A Feasibility Study Evaluating Ways to Reach Sustainable Cement Production via the Use of Electricity (December 2018): <https://shorturl.at/eBidL>

⁶¹ Mineral Products Association (MPA), Development of State of the art fuel mix for UK cement production to test the path for 'Net Zero: <https://shorturl.at/kNPFY>

⁶² Volaity S.S., Aylas-Paredes B.K., Han T., Huang J., Sridhar S., Sant G., Kumar A. & Neithalath N., Towards decarbonization of cement industry: a critical review of electrification technologies for sustainable cement production. *Materials Sustainability*, vol. 3 (July 2025): <https://shorturl.at/M0gMg>

⁶³ Coolbrook, Electrifying high-temperature industrial heat with RotoDynamic Technology (November 2024): <https://shorturl.at/HSB9K>

εύκολα να ενσωματωθεί σε υφιστάμενες εγκαταστάσεις⁶⁴. Στα τέλη του 2025, ανακοινώθηκε η πρώτη βιομηχανική εφαρμογή της τεχνολογίας αυτής στο εργοστάσιο Boyareddypalli της Adani Cement στην περιοχή Andhra Pradesh της Ινδίας, με αναμενόμενη αποφυγή περίπου 60,000 τόνων CO₂ ετησίως⁶⁵.

Παρά τα ενθαρρυντικά αποτελέσματα, ο εξηλεκτρισμός της τσιμεντοβιομηχανίας βρίσκεται ακόμη σε μεταβατικό στάδιο από την πειραματική προς τη βιομηχανική εφαρμογή, με κύριες προκλήσεις την ενεργειακή απόδοση της διεργασίας, τη σταθερότητα λειτουργίας και το υψηλό επενδυτικό κόστος. Η τεχνολογία παραμένει σε χαμηλό επίπεδο τεχνολογικής ωριμότητας (TRL 4), καθώς οι εφαρμογές περιορίζονται σε πιλοτικά έργα και πειραματικές μελέτες, χωρίς εφαρμογή σε βιομηχανική κλίμακα. Η ωρίμανση της τεχνολογίας αναμένεται να επιταχυνθεί μέσα στην επόμενη δεκαετία, με την επίτευξη επιπέδου τεχνολογικής ωριμότητας άνω του 8 να προβλέπεται μεταξύ 2030-2040²¹. Ωστόσο, οι τεχνικές προκλήσεις που σχετίζονται με την τροποποίηση του υπάρχοντος εξοπλισμού και το υψηλό κόστος αναβάθμισης σε σχέση με την κατασκευή νέων μονάδων αποτελούν σημαντικά εμπόδια⁶⁶. Επιπλέον, η υψηλή ενεργειακή κατανάλωση των διεργασιών καθιστά απαραίτητη την εξασφάλιση επαρκούς και σταθερής παροχής ηλεκτρικής ενέργειας χαμηλού ανθρακικού αποτυπώματος, γεγονός που εξαρτάται άμεσα από την ανάπτυξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, την επάρκεια των δικτύων μεταφοράς ηλεκτρισμού και την ανάπτυξη συστημάτων αποθήκευσης. Για τον λόγο αυτό, πολλές τσιμεντοβιομηχανίες εξετάζουν ήδη την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών ή αιολικών μονάδων πλησίον των εργοστασίων τους, προκειμένου να διασφαλίσουν επαρκή και οικονομικά βιώσιμη παροχή καθαρής ηλεκτρικής ενέργειας⁴⁰. Η σημερινή διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για ιδιοπαραγωγή ηλεκτρισμού στον κλάδο παραγωγής τσιμέντου παγκοσμίως παραμένει περιορισμένη, ωστόσο καταγράφονται ενθαρρυντικές εξελίξεις τα τελευταία χρόνια^{12,16}. Επιπλέον, δεδομένου πως τα εργοστάσια τσιμέντου λειτουργούν συνεχώς, θα μπορούσαν να παρέχουν υπηρεσίες ευελιξίας από την πλευρά της ζήτησης, απορροφώντας πλεονάζουσα ενέργεια από ΑΠΕ σε σενάρια υψηλής διείσδυσης ΑΠΕ, συμβάλλοντας στην εξισορρόπηση του δικτύου ηλεκτρισμού⁶².

Ο εξηλεκτρισμός της παραγωγής θερμότητας στην τσιμεντοβιομηχανία μπορεί να μειώσει τις σχετικές εκπομπές CO₂ κατά 95-100%, αυξάνοντας όμως το κόστος παραγωγής κλίνκερ κατά 95-113% κυρίως λόγω του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας. Παράλληλα, το κόστος αποφυγής CO₂, που αντιπροσωπεύει την απαιτούμενη οικονομική επιβάρυνση σε επενδύσεις και λειτουργικά έξοδα για τη μείωση μιας επιπλέον μονάδας εκπομπών, κυμαίνεται στα 63-86 €/τόνο CO₂. Οι κεφαλαιουχικές δαπάνες για την εγκατάσταση μονάδων που λειτουργούν με ηλεκτρική ενέργεια είναι ιδιαίτερα υψηλές και οι διαθέσιμες εκτιμήσεις κινούνται σε ένα μεγάλο εύρος το οποίο εξαρτάται από τη δυναμικότητα του εργοστασίου, τις αρχικές παραδοχές και τη γεωγραφική περιοχή εγκατάστασης. Συγκεκριμένα, για τα συστήματα ηλεκτρικών αντιστάσεων για θέρμανση το κόστος εγκατάστασης κυμαίνεται μεταξύ 46-198 εκατ. ευρώ, ενώ το κόστος λειτουργίας διαμορφώνεται περίπου στα 92 €/τόνο τσιμέντου, που είναι 30-40% υψηλότερο από τα συστήματα παραγωγής θερμότητας από ορυκτά

⁶⁴ Coolbrook successfully completes first phase of pilot tests to demonstrate its RotoDynamic Technology and its potential to reduce global industrial CO₂ emissions by 30% (September 2023): <https://shorturl.at/IAEYI>

⁶⁵ Adani Cement and Coolbrook to deploy world's first commercial RotoDynamic Heater to advance cement decarbonisation (November 2025): <https://shorturl.at/KLjXt>

καύσιμα. Στην περίπτωση των συστημάτων με επαγωγική θέρμανση, το κόστος εγκατάστασης για εργοστάσιο ετήσιας δυναμικότητας ενός εκατομμυρίου τόνων τσιμέντου είναι περίπου 40% υψηλότερο και κυμαίνεται μεταξύ 175-276 εκατ. ευρώ. Ωστόσο, το κόστος λειτουργίας είναι 15-20% χαμηλότερα, επιτυγχάνοντας παρόμοιο κόστος παραγωγής κλίνκερ και αποφυγής εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Τα συστήματα θέρμανσης με μικροκύματα έχουν μέτριο κόστος εγκατάστασης που κυμαίνεται στο εύρος 179-230 εκατ. ευρώ για εργοστάσιο δυναμικότητας 3 εκατ. τόνων τσιμέντου/έτος, ενώ το κόστος παραγωγής κλίνκερ είναι υψηλό λόγω χαμηλής θερμικής απόδοσης των υλικών με το κόστος αποφυγής εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα να είναι ανταγωνιστικό μόνο σε περιοχές με φθηνή ηλεκτρική ενέργεια από ΑΠΕ⁶². Στο πλαίσιο του έργου CemZero, το κόστος εγκατάστασης συστημάτων πλάσματος για εργοστάσιο δυναμικότητας 1.3 εκατ. τόνων τσιμέντου/έτος υπολογίζεται στα 294 εκατ. ευρώ και το κόστος λειτουργίας κυμαίνεται μεταξύ 92-120 ευρώ/τόνο τσιμέντου, με το 75% του κόστους να αποδίδεται στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Το κόστος παραγωγής κλίνκερ είναι 70-93% υψηλότερο από τα συστήματα παραγωγής θερμότητας από ορυκτά καύσιμα, ενώ το κόστος αποφυγής εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα είναι ιδιαίτερα ανταγωνιστικό και διαμορφώνεται περίπου στα 75 €/τόνο CO₂, όταν το διοξείδιο του άνθρακα αξιοποιείται ως αέριο μεταφοράς και η ηλεκτρική ενέργεια προέρχεται από ΑΠΕ χαμηλού κόστους⁶⁰.

Κάποιες προσεγγίσεις, προτείνουν πως στις εκτιμήσεις κόστους του εξηλεκτρισμού των συστημάτων θερμότητας στην τσιμεντοβιομηχανία θα πρέπει να συνεκτιμηθούν και οι απώλειες που σχετίζονται με το κόστος ευκαιρίας και προκύπτουν από πιθανές διακοπές λειτουργίας για συντήρηση ή αντικατάσταση εξοπλισμού και υπολογίζονται στα 93-190 €/τόνου τσιμέντου⁶². Κάποιες άλλες μελέτες υπολογίζουν το επενδυτικό κόστος για προσαρμογή υπάρχοντων μονάδων σε περίπου 88 €/τόνο τσιμέντου, με το μη ενεργειακό λειτουργικό κόστος να κυμαίνεται μεταξύ 4-4.5 €/τόνο τσιμέντου⁴², ενώ το συνολικό λειτουργικό κόστος εκτιμάται μεταξύ 57-205 €/τόνο τσιμέντου για το 2020, 62-221 €/τόνο τσιμέντου για το 2030 και 49-180 €/τόνο τσιμέντου για το 2050²¹.

Παρά τις τεχνικές και οικονομικές προκλήσεις που σχετίζονται με το κόστος επένδυσης, τη διαθεσιμότητα πράσινης ηλεκτρικής ενέργειας και την ενσωμάτωση σε υφιστάμενες μονάδες, η δυνατότητα μείωσης των εκπομπών CO₂ έως και 35% μέσω της αντικατάστασης των ορυκτών καυσίμων με πράσινη ηλεκτρική ενέργεια καθιστά τον εξηλεκτρισμό στρατηγικό πυλώνα για την απανθρακοποίηση του κλάδου²¹.

Ο Πίνακας 3 παρουσιάζει συνοπτικά τις βασικές τεχνολογίες παραγωγής θερμότητας μέσω ηλεκτρικής ενέργειας για την διεργασία παραγωγής κλίνκερ. Για κάθε τεχνολογία αποτυπώνεται ενδεικτικά το απαιτούμενο επενδυτικό κόστος (CAPEX), το αναμενόμενο λειτουργικό κόστος (OPEX), η εκτιμώμενη αύξηση κόστους σε σχέση με συστήματα παραγωγής θερμότητας από ορυκτά καύσιμα, καθώς και το κόστος αποφυγής εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Τα μεγέθη κόστους δίνονται υπό μορφή εύρους τιμών, καθώς εξαρτώνται σημαντικά από το κόστος και την προέλευση της ηλεκτρικής ενέργειας.

Πίνακας 3. Συγκριτική παρουσίαση τεχνολογιών παραγωγής θερμότητας μέσω ηλεκτρικής ενέργειας για την διεργασία παραγωγής κλίνκερ

Τεχνολογία	CAPEX	OPEX	Αύξηση Κόστους	Κόστος Αποφυγής CO ₂
Γενικές Εκτιμήσεις	88 €/τόνο τσιμέντου (για μετατροπή υφιστάμενων μονάδων)	57-205 €/τόνο τσιμέντου (2020) 62-221 €/τόνο τσιμέντου (2030) 49-180 €/τόνο τσιμέντου (2050)	95-113% σε σχέση με θερμότητα από ορυκτά καύσιμα	63-86 €/τόνο CO ₂
Ηλεκτρικές Αντιστάσεις	46-198 εκατ. ευρώ	92 €/τόνο τσιμέντου	30-40% σε σχέση με θερμότητα από ορυκτά καύσιμα	-
Επαγωγική Θέρμανση	175-276 εκατ. ευρώ (δυναμικότητα: 1 Mt/year)	78-83 €/τόνο τσιμέντου	Παρόμοιο με ορυκτά καύσιμα	-
Μικροκύματα	179-230 εκατ. ευρώ (δυναμικότητα: 3 Mt/year)	Υψηλότερο από άλλες τεχνολογίες		Ανταγωνιστικό με ενέργεια από ΑΠΕ χαμηλού κόστους
Πλάσμα (CemZero)	294 εκατ. ευρώ (δυναμικότητα: 1.3 Mt/year)	92-120 €/τόνο τσιμέντου		75 €/τόνο CO ₂ , με ενέργεια από ΑΠΕ χαμηλού κόστους

Ενσωμάτωση μέτρων για την απανθρακοποίηση της τσιμεντοβιομηχανίας στο Ελληνικό Σχέδιο Δράσης για τις Πράσινες Δημόσιες Συμβάσεις

Όπως προκύπτει από την περιγραφή των τεχνολογιών που προηγήθηκε, η κάλυψη σημαντικών κενών χρηματοδότησης αποτελεί μεγάλη και κοινή πρόκληση για την υλοποίηση των σχετικών επενδύσεων που θα «πρασινίσουν» τις αντίστοιχες βιομηχανικές διεργασίες. Το «πρασίνισμα» των δημόσιων συμβάσεων αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη προοπτική αντιμετώπισης αυτής της πρόκλησης.

Ειδικότερα, η δυνατότητα ανάπτυξης αγοράς για τσιμέντο χαμηλού ανθρακικού αποτυπώματος, με αξιοποίηση των δημόσιων συμβάσεων ως εργαλείου πολιτικής, επαληθεύεται από το γεγονός ότι το μερίδιο των δημόσιων συμβάσεων στη συνολική αγορά τσιμέντου στην ΕΕ (154 Mt) ανήλθε περίπου στο 31% (47 Mt) το 2019. Το μερίδιο αυτό αντιστοιχεί σε περίπου 5.15 δισ. ευρώ, όταν η συνολική αξία της αγοράς τσιμέντου είναι περίπου 17 δισ. Ευρώ⁶⁷. Στην Ελλάδα, οι δημόσιες συμβάσεις για υποδομές και κατασκευαστικά έργα αντιπροσωπεύουν περίπου το 25-35% της συνολικής αξίας της κατασκευαστικής δραστηριότητας⁶⁸, με αποτέλεσμα ένα σημαντικό μερίδιο της εγχώριας κατανάλωσης τσιμέντου να αφορά έργα που χρηματοδοτούνται ή ανατίθενται από τον δημόσιο τομέα.

Σε αυτό το πλαίσιο, το Ελληνικό Σχέδιο Δράσης για τις Πράσινες Δημόσιες Συμβάσεις μπορεί να διαδραματίσει καταλυτικό ρόλο ως εργαλείο πολιτικής που θα κατευθύνει τη δημόσια ζήτηση προς προϊόντα τσιμέντου χαμηλών εκπομπών άνθρακα, παρέχοντας παράλληλα κίνητρα για επενδύσεις στις καθαρότερες τεχνολογίες παραγωγής. Παράλληλα, οι ΠΔΣ μπορούν να λειτουργήσουν ως καταλύτης για την ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας της εγχώριας τσιμεντοβιομηχανίας, προωθώντας την καινοτομία, την έρευνα, την ανάπτυξη καθώς και τη σύνδεση της απανθρακοποίησης της τσιμεντοβιομηχανίας με ευρωπαϊκούς μηχανισμούς χρηματοδότησης⁶⁹.

Διεθνείς και Ευρωπαϊκές Πολιτικές για τις Πράσινες Δημόσιες Συμβάσεις

Η Ατζέντα 2030 των Ηνωμένων Εθνών για τη Βιώσιμη Ανάπτυξη και οι 17 Στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης (ΣΒΑ) έθεσαν τη βιωσιμότητα στο επίκεντρο της παγκόσμιας πολιτικής. Τα κράτη που υιοθέτησαν τους ΣΒΑ έχουν δεσμευθεί να ενισχύσουν τα «βιώσιμα πρότυπα παραγωγής

⁶⁷ Research Centre on the Environment, Economy and Energy (3E) of the Brussels School of Governance, Public procurement of cement and steel for construction: Assessing the potential of lead markets for green steel and cement in the EU (July 2024): <https://shorturl.at/C0Y08>

⁶⁸ Ίδρυμα Οικονομικών και Βιομηχανικών Ερευνών (IOBE), Τάσεις, προκλήσεις και προοπτικές των Κατασκευών στην Ελλάδα (Μάρτιος 2024): <https://shorturl.at/3xxiK>

⁶⁹ Stokke R., Kristoffersen F.S., Stamland M., Holmen E., Hamdan H. & De Boer L., The role of green public procurement in enabling low-carbon cement with CCS: An innovation ecosystem perspective. Journal of Cleaner Production, vol. 363, p. 132451 (August 2022): <https://shorturl.at/nlWWp>

και κατανάλωσης» (ΣΒΑ 12) και να «προωθήσουν τις πρακτικές δημόσιων προμηθειών που είναι βιώσιμες» (υποστόχος 12.7)⁷⁰, με τις ΠΔΣ να αποτελούν συστατικό στοιχείο των Βιώσιμων Δημόσιων Συμβάσεων (ΒΔΣ). Το 2008, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή όρισε τις ΠΔΣ ως «*μία διαδικασία με την οποία οι δημόσιες αρχές επιδιώκουν να συνάψουν συμβάσεις για αγαθά, υπηρεσίες και έργα με μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους, σε σύγκριση με αγαθά, υπηρεσίες και έργα που επιτελούν την ίδια πρωταρχική λειτουργία τα οποία θα αποτελούσαν το αντικείμενο της σύμβασης υπό άλλες συνθήκες*»⁷¹

Επιπλέον, η οδηγία της ΕΕ για τις δημόσιες συμβάσεις παρέχει ένα σαφές, αλλά μη υποχρεωτικό, πλαίσιο για την προώθηση των πράσινων δημόσιων συμβάσεων, ήδη από το 2014. Το άρθρο 67 της οδηγίας λειτουργεί ως ισχυρή πολιτική σύσταση προς τα κράτη μέλη για την ενσωμάτωση περιβαλλοντικών και κοινωνικών παραμέτρων στη στάθμιση της «*πλέον συμφέρουσας από οικονομική άποψη προσφοράς*»⁷². Συνεπώς, η οδηγία του 2014 αναγνώρισε ρητά τη δυνατότητα ένταξης περιβαλλοντικών κριτηρίων σε όλα τα βασικά στάδια μιας διαδικασίας ανάθεσης: στις τεχνικές προδιαγραφές, στα κριτήρια ανάθεσης και στους όρους εκτέλεσης της σύμβασης. Κρίσιμος περιορισμός είναι ότι οι εν λόγω περιβαλλοντικές και κοινωνικές απαιτήσεις πρέπει να συνδέονται με το αντικείμενο της σύμβασης και όχι με τον ίδιο τον προμηθευτή⁷³.

Ωστόσο, η συμπερίληψη αυτών των κριτηρίων παραμένει στη διακριτική ευχέρεια των εθνικών αρχών και των αναθετουσών φορέων. Η μη υποχρεωτικότητα χρήσης κριτηρίων βέλτιστης σχέσης ποιότητας-τιμής έχει ως αποτέλεσμα η χαμηλότερη τιμή να αποτελεί σημαντικό κριτήριο ανάθεσης στους περισσότερους διαγωνισμούς στην ΕΕ ή μερικές φορές να είναι το μοναδικό κριτήριο τόσο στο στάδιο της υποβολής προσφορών όσο και στο στάδιο ανάθεσης μίας δημόσιας σύμβασης⁷⁴. Η ειδική έκθεση του Ευρωπαϊκού Ελεγκτικού Συνεδρίου για τις δημόσιες συμβάσεις στην ΕΕ ανέδειξε πως στην πλειονότητα των κρατών μελών, η συχνότητα εφαρμογής της χαμηλότερης τιμής ως του κριτηρίου ανάθεσης αυξήθηκε κατά το διάστημα 2011-2021. Ειδικότερα, το 2021, σε οκτώ κράτη μέλη (Σλοβακία, Κύπρος, Ρουμανία, Λιθουανία, Ελλάδα, Βουλγαρία, Τσεχία, Μάλτα) οι αναθέσεις με κριτήριο τη χαμηλότερη προσφορά υπερέβαιναν ακόμη και το 80%⁷⁵. Επιπρόσθετα, το 2023, 20 κράτη μέλη ανέθεσαν πάνω από το 50% των δημόσιων διαγωνισμών τους με μοναδικό κριτήριο τη χαμηλότερη τιμή, με το ποσοστό για 10 από αυτά τα κράτη μέλη να υπερβαίνει το 80%⁷⁴.

⁷⁰ United Nations, Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development (October 2015): <https://shorturl.at/NOS4u>

⁷¹ European Commission, Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions - Public procurement for a better environment (July 2008): <https://shorturl.at/Qel4V>

⁷² Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο & Συμβούλιο της ΕΕ, Οδηγία 2014/24/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 26ης Φεβρουαρίου 2014, σχετικά με τις δημόσιες προμήθειες και την κατάργηση της οδηγίας 2004/18/ΕΚ (2014): <https://shorturl.at/YsJJY>

⁷³ ICLEI - Local Governments for Sustainability, European Secretariat, The Procura+ Manual: A Guide to Implementing Sustainable Procurement, 3rd Edition (2016): <https://shorturl.at/lu6FV>

⁷⁴ Ψήφισμα του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου της 9ης Σεπτεμβρίου 2025 σχετικά με τις δημόσιες συμβάσεις (Σεπτέμβριος 2025): <https://shorturl.at/DPWHS>

⁷⁵ European Court of Auditors, Special Report No. 28/2023: Public Procurement in the EU - Less Competition for Contracts Awarded for Works, Goods, and Services in the 20 Years Up to 2021 (December 2023): <https://shorturl.at/FNlBX>

Στο πλαίσιο της αναθεώρησης της οδηγίας της ΕΕ για τις δημόσιες συμβάσεις, το ψήφισμα του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου προτείνει την ενίσχυση των ΠΔΣ, τονίζοντας πως οι διαδικασίες σύναψης δημόσιων συμβάσεων θα πρέπει να ενθαρρύνουν και να ανταμείβουν καινοτόμες και βιώσιμες λύσεις που μπορούν να τονώσουν την οικονομική ανάπτυξη⁷⁴. Στην ίδια κατεύθυνση, η Έκθεση Letta προτείνει τη μετάβαση από τη χαμηλότερη τιμή ως μοναδικό κριτήριο ανάθεσης δημοσίων συμβάσεων σε μία ολιστική προσέγγιση που θα επιδιώκει την καλύτερη σχέση ποιότητας/τιμής όπου η ποιότητα, η καινοτομία, το κόστος κύκλου ζωής και η κοινωνική και περιβαλλοντική βιωσιμότητα θα λαμβάνονται υπόψη στην αξιολόγηση μίας προσφοράς⁷⁶. Για παράδειγμα, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή εφαρμόζει στην ανάθεση δημοσίων συμβάσεων κατά κανόνα έναν σταθμισμένο μέσο όρο, με βάρος 30% για το κόστος και 70% για το κριτήριο της ποιότητας (ενσωματώνοντας όλες τις παραπάνω πτυχές).

Η έκθεση Draghi, που δημοσιεύτηκε μερικούς μήνες αργότερα, για το μέλλον της ευρωπαϊκής ανταγωνιστικότητας ενσωματώνει την κλιματική πολιτική ως εργαλείο βιομηχανικής στρατηγικής, με σκοπό την ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας, της ανθεκτικότητας, της ενεργειακής ασφάλειας και της επάρκειας πόρων. Σε αυτό το πλαίσιο, οι πολιτικές δημοσίων προμηθειών αποκτούν κεντρικό ρόλο όχι μόνο ως εργαλείο επίτευξης των κλιματικών στόχων της ΕΕ, αλλά και ως μέσο δημιουργίας ζήτησης για καινοτόμα και χαμηλών εκπομπών προϊόντα ευρωπαϊκής παραγωγής⁷⁷. Ειδικότερα, στο κεφάλαιο για τις ενεργοβόρες βιομηχανίες, η έκθεση προτείνει την ενίσχυση της ζήτησης για πράσινα προϊόντα μέσω της προώθησης της διαφάνειας και της εισαγωγής τυποποιημένων περιβαλλοντικών κριτηρίων στις δημόσιες προμήθειες. Για τον σκοπό αυτό, συστήνεται η εναρμόνιση του ορισμού των «πράσινων προϊόντων» σε ολόκληρη την Ενιαία Αγορά, ώστε να αποφευχθούν αντικρουόμενα πρότυπα, καθώς και η ανάπτυξη μιας κοινής μεθοδολογίας για την αξιολόγηση του ανθρακικού αποτυπώματος των προϊόντων.

Υλοποιώντας τις συστάσεις της έκθεσης Draghi, τον Μάρτιο του 2026, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή παρουσίασε την πράξη για την επιτάχυνση της βιομηχανικής παραγωγής (Industrial Accelerator Act), με στόχο την επιτάχυνση της ανάπτυξης της ευρωπαϊκής βιομηχανίας και την αύξηση της ζήτησης προϊόντων χαμηλών εκπομπών άνθρακα ευρωπαϊκής κατασκευής, μεταξύ των οποίων και το τσιμέντο⁷⁸. Συγκεκριμένα, για το τσιμέντο προβλέπεται ότι τουλάχιστον 5% του συνολικού όγκου σε δημόσιες συμβάσεις πρέπει να πληροί κριτήρια χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Τα μέτρα αυτά αναμένεται να τεθούν σε εφαρμογή την 1^η Ιανουαρίου 2029, ενισχύοντας τη ζήτηση για τσιμέντο χαμηλού ανθρακικού αποτυπώματος και προωθώντας τις επενδύσεις σε τεχνολογίες απανθρακοποίησης της τσιμεντοβιομηχανίας.

Παράλληλα, μία σειρά από πρόσφατες ευρωπαϊκές πολιτικές δημιουργούν ένα θετικό πλαίσιο για την προοδευτική υιοθέτηση των ΠΔΣ σε τομείς όπως οι κατασκευές και τα προϊόντα που συνδέονται με τον κλάδο. Συγκεκριμένα, η αναθεωρημένη οδηγία της ΕΕ για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων εισάγει την απαίτηση υπολογισμού και γνωστοποίησης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής των νέων

⁷⁶ Letta Enrico, Much More Than a Market (April 2024): <https://shorturl.at/MT2db>

⁷⁷ Draghi Mario, The future of European competitiveness (Part A): A competitiveness strategy for Europe (September 2024): <https://shorturl.at/kbFa6>

⁷⁸ European Commission, Proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council establishing a framework of measures for the acceleration of industrial capacity and decarbonisation in strategic sectors and amending Regulations (EU) 2018/1724, (EU) 2024/1735 and (EU) 2024/3110 (March 2026): <https://shorturl.at/5mnDJ>

κτιρίων, μέσω των Πιστοποιητικών Ενεργειακής Απόδοσης, από το 2030⁷⁹. Επιπλέον, τα κράτη μέλη υποχρεούνται να υιοθετήσουν εθνικούς οδικούς χάρτες και στόχους για τη μείωση των εκπομπών αυτών. Αν και η οδηγία δεν θεσπίζει άμεσα δεσμευτικά κριτήρια ΠΔΣ, το πλαίσιο που εισάγει δημιουργεί τις προϋποθέσεις για την ενσωμάτωση κριτηρίων σχετικά με το ανθρακικό αποτύπωμα στις δημόσιες προμήθειες έργων, συμπεριλαμβανομένης της χρήσης τσιμέντου⁶⁷.

Ο αναθεωρημένος Κανονισμός δομικών προϊόντων συμπληρώνει το πλαίσιο αυτό, θέτοντας εναρμονισμένους κανόνες για την εμπορία και την αξιολόγηση των δομικών προϊόντων στην ΕΕ⁸⁰. Αν και ο κανονισμός δεν επιβάλλει άμεσα αυστηρά περιβαλλοντικά όρια, ενισχύει τη δυνατότητα τυποποίησης περιβαλλοντικών επιδόσεων και ελάχιστων αποδεκτών ορίων για προϊόντα όπως το τσιμέντο, μέσω κατ' εξουσιοδότηση πράξεων. Παράλληλα, ο κανονισμός για τον καθορισμό απαιτήσεων οικολογικού σχεδιασμού όσον αφορά τα βιώσιμα προϊόντα θεσπίζει ένα οριζόντιο πλαίσιο για πολλές κατηγορίες προϊόντων που διατίθενται στην αγορά της ΕΕ. Οι απαιτήσεις αυτές δύνανται να καλύπτουν, μεταξύ άλλων, το ανθρακικό και περιβαλλοντικό αποτύπωμα των προϊόντων, προωθώντας τη διαφάνεια μέσω εργαλείων όπως το ψηφιακό διαβατήριο προϊόντος⁸¹. Επιπλέον, ο κανονισμός προβλέπει πως σε περίπτωση που δεν θεσπιστούν εγκαίρως περιβαλλοντικές απαιτήσεις για το τσιμέντο από την εφαρμογή του Κανονισμού δομικών προϊόντων, η Επιτροπή θα πρέπει να εκδώσει κατ' εξουσιοδότηση πράξεις για τον καθορισμό απαιτήσεων οικολογικού σχεδιασμού για το τσιμέντο το νωρίτερο στις 31 Δεκεμβρίου 2028 και το αργότερο ως την 1η Ιανουαρίου 2030. Συνεπώς, ο Κανονισμός για τον καθορισμό απαιτήσεων οικολογικού σχεδιασμού όσον αφορά τα βιώσιμα προϊόντα ανοίγει τον δρόμο για υποχρεωτικές απαιτήσεις περιβαλλοντικής βιωσιμότητας στις δημόσιες προμήθειες, ενισχύοντας τη δυνατότητα προώθησης του τσιμέντου χαμηλού ανθρακικού αποτυπώματος μέσω των πράσινων δημοσίων συμβάσεων.

Συνοψίζοντας, ενώ η οδηγία για τις δημόσιες συμβάσεις παρέχει στα κράτη μέλη τη δυνατότητα ενσωμάτωσης περιβαλλοντικών κριτηρίων, η εφαρμογή των ΠΔΣ παραμένει σε μεγάλο βαθμό προαιρετική. Αντίθετα, οι πιο στοχευμένοι Κανονισμοί, όπως ο Κανονισμός δομικών προϊόντων και ο Κανονισμός για τον καθορισμό απαιτήσεων οικολογικού σχεδιασμού όσον αφορά τα βιώσιμα προϊόντα, σηματοδοτούν μια σταδιακή μετάβαση προς πιο δεσμευτική και συστηματική ενσωμάτωση της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας στις δημόσιες προμήθειες, ιδιαίτερα σε τομείς υψηλού ανθρακικού αποτυπώματος, όπως το τσιμέντο. Οι δυνατότητες που δίνει το ευρωπαϊκό πλαίσιο αποτελούν σημαντική ευκαιρία για τη δημιουργία σταθερής ζήτησης για τσιμέντο χαμηλού ανθρακικού αποτυπώματος και για τη στήριξη της μετάβασης της τσιμεντοβιομηχανίας προς ένα πιο ανταγωνιστικό και κλιματικά ουδέτερο μοντέλο αξιοποιώντας τις πράσινες δημόσιες συμβάσεις.

⁷⁹ Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο & Συμβούλιο της ΕΕ, Οδηγία (ΕΕ) 2024/1275 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 24ης Απριλίου 2024, για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων, (αναδιατύπωση), (Μάιος 2024): <https://shorturl.at/SxZvu>

⁸⁰ Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο & Συμβούλιο της ΕΕ, Κανονισμός (ΕΕ) 2024/3110 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 27ης Νοεμβρίου 2024, για τη θέσπιση εναρμονισμένων κανόνων εμπορίας δομικών προϊόντων και την κατάργηση του κανονισμού (ΕΕ) αριθ. 305/2011, (Δεκέμβριος 2024): <https://shorturl.at/TjQ3o>

⁸¹ Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο & Συμβούλιο της ΕΕ, Κανονισμός (ΕΕ) 2024/1781 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 13ης Ιουνίου 2024, για τη θέσπιση πλαισίου για τον καθορισμό απαιτήσεων οικολογικού σχεδιασμού όσον αφορά τα βιώσιμα προϊόντα, για την τροποποίηση της οδηγίας (ΕΕ) 2020/1828 και του κανονισμού (ΕΕ) 2023/1542 και για την κατάργηση της οδηγίας 2009/125/ΕΚ (Ιούνιος 2024): <https://shorturl.at/OxlX9>

Εθνικό Σχέδιο Δράσης για τις Πράσινες Δημόσιες Συμβάσεις

Η Ελλάδα υιοθέτησε το πρώτο Εθνικό Σχέδιο Δράσης για τις Πράσινες Δημόσιες Συμβάσεις το 2021, καλύπτοντας την περίοδο 2021-2023, με πρόβλεψη αναθεώρησης ανά τριετία ή νωρίτερα εφόσον κριθεί αναγκαίο⁸². Το Σχέδιο παρέχει το θεσμικό πλαίσιο για την ενσωμάτωση περιβαλλοντικών κριτηρίων στις δημόσιες προμήθειες και ευθυγραμμίζεται με τις αντίστοιχες πολιτικές της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Το Εθνικό Σχέδιο Δράσης περιλαμβάνει επίσης μηχανισμό παρακολούθησης και αξιολόγησης, με τη συλλογή ετήσιων ποσοτικών δεικτών από τις αναθέτουσες αρχές μέσω τυποποιημένου ερωτηματολογίου. Οι αρχές καλούνται να αναφέρουν τον αριθμό και το είδος των συμβάσεων που ενσωματώνουν πράσινα κριτήρια, καθώς και πληροφορίες σχετικά με την κατάρτιση τους στη διαχείριση ΠΔΣ⁸³.

Συγκεκριμένα, το αρχικό Εθνικό Σχέδιο Δράσης προβλέπει τόσο υποχρεωτικές απαιτήσεις όσο και ποσοτικούς στόχους για συγκεκριμένες κατηγορίες προμηθειών, οι οποίοι εφαρμόζονται οριζόντια σε όλες τις αναθέτουσες αρχές. Οι στόχοι εφαρμογής ΠΔΣ διαφοροποιούνται ανά κατηγορία, κυμαινόμενοι από 15% έως 80%, με την πλειονότητα των κατηγοριών να τοποθετείται στο 50%. Η υποχρέωση εφαρμογής των πράσινων κριτηρίων εισάγεται σταδιακά: αρχικά για τις κεντρικές κυβερνητικές αρχές, στη συνέχεια για τις μη κεντρικές αναθέτουσες αρχές και, τέλος, για το σύνολο των αναθετόντων φορέων. Το 2024, δημοσιεύτηκε η αναθεώρηση του σχεδίου που επικαιροποίησε τους εθνικούς στόχους εφαρμογής των ΠΔΣ, αναθεωρώντας προς τα κάτω φιλόδοξους δεσμευτικούς στόχους και αυξάνοντας κάποιους χαμηλούς στόχους του αρχικού σχεδίου. Οι εθνικοί στόχοι για το 2024 διαμορφώθηκαν μεταξύ 20% και 60%, με την πλειονότητα τους να παραμένει γύρω στο 50%⁸⁴.

Όσον αφορά τα προϊόντα της τσιμεντοβιομηχανίας και ιδιαίτερα το τσιμέντο, οι εθνικοί μη δεσμευτικοί στόχοι εφαρμογής ΠΔΣ διαμορφώνονται στο 40% για τις κατηγορίες «Σχεδιασμός, οδοποιία, κατασκευή και συντήρηση» και «Σχεδιασμός, κτίρια γραφείων, κατασκευή και διαχείριση». Πρόκειται για τις βασικές κατηγορίες δημοσίων έργων στις οποίες χρησιμοποιούνται μεγάλες ποσότητες τσιμέντου, γεγονός που καθιστά τις ΠΔΣ σημαντικό δυνητικό εργαλείο πολιτικής για τη διαμόρφωση ζήτησης για τσιμέντο χαμηλότερου ανθρακικού αποτυπώματος στην ελληνική αγορά.

Προτεινόμενα Μέτρα Πολιτικής για το Ελληνικό Σχέδιο ΠΔΣ

Παρά το γεγονός ότι το Εθνικό Σχέδιο Δράσης για την προώθηση Πράσινων Δημοσίων Συμβάσεων κινείται σε θετική κατεύθυνση, δεν παρέχει επαρκή κίνητρα για την υιοθέτηση και ανάπτυξη τεχνολογιών απανθρακοποίησης στη διεργασία παραγωγής θερμότητας στην τσιμεντοβιομηχανία. Για τον λόγο αυτό, σε συνέχεια των μη δεσμευτικών στόχων που έχουν τεθεί για τις κατασκευές και τις υποδομές, η επόμενη αναθεώρηση του ελληνικού σχεδίου για τις ΠΔΣ θα πρέπει να ενσωματώσει στοχευμένα και δεσμευτικά κριτήρια για το τσιμέντο. Με τον τρόπο αυτό, οι ΠΔΣ μπορούν να εξελιχθούν από εργαλείο οριζόντιας συμμόρφωσης σε στρατηγικό εργαλείο πολιτικής για τη στήριξη των τεχνολογιών απανθρακοποίησης της

⁸² Κοινή Υπουργική Απόφαση 14900/2021 - ΦΕΚ 466/Β/08.02.2021

⁸³ OECD, Harnessing Public Procurement for the Green Transition: Good Practices in OECD Countries (June 2024): <https://shorturl.at/57kWv>

⁸⁴ Κοινή Υπουργική Απόφαση 54862/2024 - ΦΕΚ 4102/Β/12.07.2024

ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας και την ενίσχυση της ανταγωνιστικότητάς της. Στην παρούσα ενότητα προτείνονται μέτρα πολιτικής με σκοπό την υποστήριξη και εφαρμογή των τεχνολογιών που περιγράφονται στο προηγούμενο κεφάλαιο για την απανθρακοποίηση της διεργασίας παραγωγής θερμότητας στην τσιμεντοβιομηχανία.

Ανάπτυξη εθνικού συστήματος πιστοποίησης για προϊόντα τσιμέντου

Προϋπόθεση για την αποτελεσματικότητα των ΠΔΣ, είναι η καθιέρωση κοινών, αξιόπιστων και ευρέως αποδεκτών εργαλείων και μεθοδολογιών για την πιστοποίηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του τσιμέντου. Η ανάγκη για εναρμονισμένες μεθοδολογίες και πρότυπα αναδεικνύεται και σε ευρωπαϊκές εκθέσεις και κανονιστικά κείμενα, όπως, μεταξύ άλλων, στην έκθεση Draghi και στον Κανονισμό για τον καθορισμό απαιτήσεων οικολογικού σχεδιασμού για τα βιώσιμα προϊόντα^{77,81}. Τα εργαλεία αυτά εξασφαλίζουν την ακριβή μέτρηση και παρακολούθηση των εκπομπών, της ενεργειακής αποδοτικότητας και της χρήσης πόρων, καθιστώντας τους στόχους περιβαλλοντικής απόδοσης σαφείς, μετρήσιμους και ελέγξιμους. Η συμφωνία σε κοινά πρότυπα ενισχύει τη διαφάνεια, τη συγκρισιμότητα μεταξύ παραγωγών και την αξιοπιστία των δημόσιων συμβάσεων, υποστηρίζοντας με αυτόν τον τρόπο την προώθηση της πράσινης μετάβασης της βιομηχανίας. Για τον λόγο αυτό, **προτείνεται η ανάπτυξη ενός εθνικού σχήματος πιστοποίησης για τα προϊόντα τσιμέντου που πληρούν συγκεκριμένα όρια εκπομπών CO₂ ανά τόνο προϊόντος και συγκεκριμένους στόχους χρήσης ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας που προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές**. Στη συνέχεια, η πιστοποίηση των προϊόντων τσιμέντου μπορεί να αποτελέσει προϋπόθεση συμμετοχής σε διαγωνισμούς δημοσίων προμηθειών, εξασφαλίζοντας ότι μόνο προϊόντα που πληρούν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και όρια εκπομπών θα αξιολογούνται για τις προμήθειες του Δημοσίου. Το εθνικό πλαίσιο πιστοποίησης μπορεί να βασιστεί σε υφιστάμενα ευρωπαϊκά ή διεθνή πρότυπα και να ευθυγραμμιστεί με αναγνωρισμένα οικολογικά σήματα (Ecolabels), όπως το οικολογικό σήμα της ΕΕ (EU Ecolabel), ενσωματώνοντας ή υιοθετώντας επιμέρους κριτήρια από αυτά^{85,86}. Προς το παρόν, το πλαίσιο του EU Ecolabel δεν περιλαμβάνει ειδική ομάδα προϊόντων για το τσιμέντο ως υλικό. Ωστόσο, η απόφαση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για τον καθορισμό των κριτηρίων απονομής του οικολογικού σήματος της ΕΕ σε προϊόντα σκληρής επένδυσης περιλαμβάνει την κατηγορία προκατασκευασμένο σκυρόδεμα, όπου προτείνονται συγκεκριμένα όρια εκπομπών και μέθοδοι υπολογισμού των εκπομπών CO₂ για το τσιμέντο που χρησιμοποιείται στα συγκεκριμένα προϊόντα⁸⁷. Δεδομένου πως το εθνικό σύστημα πιστοποίησης για προϊόντα τσιμέντου αναμένεται να είναι πιο αποτελεσματικό και λειτουργικό αν ευθυγραμμιστεί με τις αντίστοιχες ευρωπαϊκές πρωτοβουλίες, προτείνεται η ανάπτυξη του να βασιστεί στο υπάρχον πλαίσιο και να αναπροσαρμόζεται ακολουθώντας τις αναθεωρήσεις του οικολογικού σήματος της ΕΕ σχετικά με τα προϊόντα τσιμέντου.

⁸⁵ Donatello S., Perez Camacho M.N. & Wolf O., Practical guide for the use of the EU Ecolabel in the green public procurement of hard covering products (September 2024): <https://shorturl.at/Wm84p>

⁸⁶ One Planet network, Good practices on ecolabelling and sustainable public procurement (January 2026): <https://shorturl.at/Hkbn7>

⁸⁷ Ευρωπαϊκή Επιτροπή, Απόφαση (ΕΕ) 2021/476 της Επιτροπής της 16ης Μαρτίου 2021 για τον καθορισμό των κριτηρίων απονομής του οικολογικού σήματος της ΕΕ σε προϊόντα σκληρής επένδυσης (Μάρτιος 2021): <https://shorturl.at/N45fx>

Σταδιακή θέσπιση υποχρέωσης προσκόμισης περιβαλλοντικής δήλωσης προϊόντος για τη συμμετοχή στις δημόσιες προμήθειες τσιμέντου

Προτείνεται η αναθεώρηση της μη δεσμευτικότητας του εθνικού στόχου υιοθέτησης Πράσινων Δημόσιων Συμβάσεων στις δύο κατηγορίες που αφορούν τον κατασκευαστικό τομέα, με σκοπό την προώθηση της σταδιακής ενσωμάτωσης περιβαλλοντικών κριτηρίων σε όλες τις προκηρύξεις δημοσίων έργων. Σε πρώτο στάδιο, ο μη δεσμευτικός στόχος θα πρέπει να μετατραπεί σε δεσμευτικό και να εξειδικευτεί, έτσι ώστε τουλάχιστον 40% των δημοσίων συμβάσεων που περιλαμβάνουν τσιμέντο ή σκυρόδεμα να απαιτούν από τους υποψήφιους προμηθευτές την παροχή δεδομένων περιβαλλοντικού αποτυπώματος (π.χ. εκπομπές CO₂ ανά τόνο προϊόντος, ενσωματωμένη ενέργεια από μη ανανεώσιμες πηγές, χρήση πόρων), χωρίς η αξιολόγηση να είναι ακόμη δεσμευτική. Σε επόμενο στάδιο, η προσκόμιση Περιβαλλοντικής Δήλωσης Προϊόντος (Environmental Product Declaration - EPD) θα γίνει υποχρεωτική για την συμμετοχή σε δημόσιους διαγωνισμούς προμήθειες τσιμέντου. Παρόλο που το μέτρο αυτό δεν συμβάλλει άμεσα στη χρηματοδότηση των προτεινόμενων τεχνολογιών, αναμένεται πως αυτό το μεταβατικό στάδιο θα επιτρέψει τόσο στη βιομηχανία όσο και στις αναθέτουσες αρχές να αναπτύξουν τις απαραίτητες διαδικασίες και δομές πιστοποίησης και μέτρησης, ενώ θα ενισχύσει τη διαφάνεια και τη συγκρισιμότητα μεταξύ προϊόντων. Παράλληλα, τα δεδομένα που θα συλλέγονται από αυτή τη διαδικασία θα επιτρέψουν την ανάπτυξη ενός εθνικού μητρώου περιβαλλοντικών χαρακτηριστικών για προϊόντα τσιμέντου.

Σταδιακή θέσπιση υποχρεωτικών περιβαλλοντικών κριτηρίων στις δημόσιες προμήθειες τσιμέντου

Σε δεύτερο στάδιο, τα ίδια τα κριτήρια θα πρέπει να αποκτήσουν δεσμευτικό χαρακτήρα, με στόχο οι συμβάσεις που αφορούν δομικά υλικά και ιδιαίτερα το τσιμέντο να πληρούν συγκεκριμένα ανώτατα όρια εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και χρήσης ενέργειας και πόρων, συμβατά με τους εθνικούς και ευρωπαϊκούς στόχους απανθρακοποίησης. Συγκεκριμένα, η συμμετοχή στους σχετικούς διαγωνισμούς θα προϋποθέτει την υποχρεωτική προσκόμιση Περιβαλλοντικής Δήλωσης Προϊόντος, βασισμένης σε κοινά αποδεκτά ευρωπαϊκά ή διεθνή πλαίσια όπως το EN 15804⁸⁸ ή το ISO 21930⁸⁹. Στην αρχική φάση εφαρμογής θα εφαρμόζονται ελάχιστα όρια μόνο για την τιμή του δείκτη «Δυναμικό Υπερθέρμανσης του Πλανήτη (Global Warming Potential)», που μετράει τις ενσωματωμένες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ανά τόνο προϊόντος. Ωστόσο, θα πρέπει να ενθαρρύνεται η προσκόμιση πλήρους περιβαλλοντικής δήλωσης προϊόντος για την ανάπτυξη και τον εμπλουτισμό του εθνικού μητρώου περιβαλλοντικών χαρακτηριστικών για προϊόντα τσιμέντου.

Ο καθορισμός των υποχρεωτικών περιβαλλοντικών κριτηρίων μπορεί να βασιστεί στον Κανονισμό 2020/852 που θεσπίζει το πλαίσιο της ΕΕ για τη διευκόλυνση των βιώσιμων

⁸⁸ EN 15804 Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products - 3rd Edition (2013): <https://shorturl.at/vcUvW>

⁸⁹ ISO 21930 - 2nd Edition (2017): <https://shorturl.at/PF2ys>

επενδύσεων (EU taxonomy)⁹⁰. Ο Κανονισμός της Ταξινόμιας θέτει έξι περιβαλλοντικούς στόχους: τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής, την προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή, την βιώσιμη χρήση και προστασία των υδατικών και των θαλάσσιων πόρων, τη μετάβαση σε μια κυκλική οικονομία, την πρόληψη και έλεγχο της ρύπανσης και την προστασία και αποκατάσταση της βιοποικιλότητας και των οικοσυστημάτων. Για να χαρακτηριστεί μια δραστηριότητα ως βιώσιμη, πρέπει να ικανοποιεί ταυτόχρονα τρεις βασικές προϋποθέσεις. Συγκεκριμένα, να συνεισφέρει ουσιαστικά σε τουλάχιστον έναν από τους έξι στόχους (Substantial Contribution), να μην προκαλεί σημαντική βλάβη σε κανέναν από τους υπόλοιπους πέντε (αρχή Do No Significant Harm - DNSH), και να τηρεί ελάχιστες διασφαλίσεις σχετικά με τα ανθρώπινα και τα εργασιακά δικαιώματα.

Στην πρώτη φάση υποχρεωτικής εφαρμογής περιβαλλοντικών προδιαγραφών, τα όρια εκπομπών CO₂ θα μπορούσαν να καθοριστούν σύμφωνα με τα τεχνικά κριτήρια ελέγχου για τη μη πρόκληση σημαντικής βλάβης στον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής, όπως αυτά εξειδικεύονται στο Παράρτημα II του Κατ' Εξουσιοδότηση Κανονισμού (ΕΕ) 2021/2139 για τη συμπλήρωση του Κανονισμού των Βιώσιμων Επενδύσεων. Το όριο αυτό αντικατοπτρίζει τη διάμεση τιμή εκπομπών των υφιστάμενων εγκαταστάσεων στην ΕΕ και υπολογίστηκε σε 0.816 τόνους CO₂/τόνο κλίνκερ ή 0.530 τόνους CO₂/τόνο τσιμέντου⁹¹. Σημειώνεται ότι η ελληνική τσιμεντοβιομηχανία ήδη ικανοποιεί αυτό το όριο καθώς η μέση ένταση άνθρακα των προϊόντων τσιμέντου που παράγει είναι 0.808 τόνοι CO₂/τόνο κλίνκερ, επιτρέποντας την ομαλή και σταδιακή προσαρμογή της στις απαιτήσεις του προτεινόμενου πλαισίου για τις ΠΔΣ. Σε ένα δεύτερο στάδιο, προτείνεται η πλήρης ευθυγράμμιση με τα αυστηρότερα κριτήρια σημαντικής συμβολής στον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής, τα οποία, σύμφωνα με το Παράρτημα I του Κατ' Εξουσιοδότηση Κανονισμού (ΕΕ) 2021/2139, θέτουν ως ελάχιστο όριο επιλεξιμότητας τη μέση τιμή των 10% πλέον αποδοτικών εγκαταστάσεων στην ΕΕ, που υπολογίζεται σε 0.722 τόνους CO₂/τόνο κλίνκερ ή 0.469 τόνους CO₂/τόνο τσιμέντου.

Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η σταδιακή σύγκλιση των δημόσιων προμηθειών στην χώρα με τις προηγμένες τεχνικές απαιτήσεις της ΕΕ, αλλά και η επιτάχυνση επενδύσεων σε καινοτόμες τεχνολογίες απανθρακοποίησης της τσιμεντοβιομηχανίας. Εναλλακτικά, αν τα δεδομένα που θα συλλεχθούν από την εφαρμογή του προηγούμενου μέτρου δείξουν ότι οι συμμετέχουσες τσιμεντοβιομηχανίες δεν βρίσκονται κοντά στα όρια εκπομπών που ορίζονται βάσει του Κατ' Εξουσιοδότηση Κανονισμού (ΕΕ) 2021/2139, τα όρια προσαρμόζονται ανά τρία έτη στο 90% των επιδόσεων της ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας, ώστε να παραμένουν απαιτητικά αλλά ρεαλιστικά. Η θέσπιση των ελαχίστων ορίων στοχεύει στη σταδιακή αλλά φιλόδοξη μείωση των μέγιστων εκπομπών CO₂ ανά τόνο παραγόμενου προϊόντος, ώστε η ελληνική αγορά να ευθυγραμμιστεί με τους στόχους καθαρών μηδενικών εκπομπών έως το

⁹⁰ Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο & Συμβούλιο της ΕΕ, Κανονισμός (ΕΕ) 2020/852 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 18ης Ιουνίου 2020 σχετικά με τη θέσπιση πλαισίου για τη διευκόλυνση των βιώσιμων επενδύσεων και για την τροποποίηση του κανονισμού (ΕΕ) 2019/2088 (Ιούνιος 2020): <https://shorturl.at/asw5b>

⁹¹ Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο & Συμβούλιο της ΕΕ, Κατ' εξουσιοδότηση κανονισμός (ΕΕ) 2021/2139 της Επιτροπής, της 4ης Ιουνίου 2021, για τη συμπλήρωση του κανονισμού (ΕΕ) 2020/852 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου με τη θέσπιση τεχνικών κριτηρίων ελέγχου για τον προσδιορισμό των προϋποθέσεων υπό τις οποίες μια οικονομική δραστηριότητα θεωρείται ότι συμβάλλει σημαντικά στον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής ή στην προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή και για τον προσδιορισμό του κατά πόσον αυτή η οικονομική δραστηριότητα δεν βλάπτει σημαντικά οποιονδήποτε από τους άλλους περιβαλλοντικούς στόχους (Δεκέμβριος 2021): <https://shorturl.at/xyYfl>

2050. Η εφαρμογή αυτού του μέτρου αναμένεται να ενθαρρύνει την άμεση υιοθέτηση ήδη διαθέσιμων και ώριμων τεχνολογιών απανθρακοποίησης της διεργασίας παραγωγής κλίνκερ.

Δημιουργία μηχανισμού πριμοδότησης πράσινου τσιμέντου με στόχο την ωρίμανση τεχνολογιών υψηλής μείωσης εκπομπών

Προτείνεται η δημιουργία ενός μηχανισμού πριμοδότησης των προϊόντων τσιμέντου που υπερβαίνουν τα ελάχιστα περιβαλλοντικά όρια που περιγράφονται στο προηγούμενο μέτρο, εφαρμόζοντας καινοτόμες τεχνολογίες μείωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της παραγωγής τσιμέντου, με σκοπό τη δραστικότερη μείωση των εκπομπών της τσιμεντοβιομηχανίας. Στο πλαίσιο αυτού του μέτρου, **προτείνεται ο καθορισμός ενός ποσοστιαίου στόχου για ΠΔΣ για τσιμέντο ή και σκυρόδεμα, που όχι μόνο πληρούν τα ελάχιστα όρια εκπομπών CO₂, αλλά βασίζονται σε πιο καινοτόμες τεχνολογικές λύσεις, όπως η χρήση πράσινου υδρογόνου ή πράσινης ηλεκτρικής ενέργειας για την παραγωγή θερμότητας, η εφαρμογή λύσεων βελτιστοποίησης της ενεργειακής αποδοτικότητας και η εγκατάσταση συστημάτων ανάκτησης θερμότητας.** Στην περίπτωση αυτή, εφαρμόζοντας τις αρχές πολιτικής που έχουν αναλυθεί στην ενότητα για τις ευρωπαϊκές πολιτικές που προωθούν τις ΠΔΣ, η ανάθεση των συμβάσεων θα βασίζεται στο κριτήριο της πλέον συμφέρουσας από οικονομική άποψη προσφοράς βάσει βέλτιστης σχέσης ποιότητας - τιμής. Η περιβαλλοντική και τεχνολογική απόδοση των προϊόντων θα αξιολογείται με σημαντικό συντελεστή βαρύτητας, ώστε η καινοτομία να αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την τελική επιλογή του αναδόχου. Συγκεκριμένα, οι προμηθευτές θα υποβάλλουν αναλυτικές περιβαλλοντικές δηλώσεις προϊόντος, καθώς και τεκμηριωμένα στοιχεία για τις διαδικασίες παραγωγής κλίνκερ που εφαρμόζουν. Οι αναθέτουσες αρχές θα εφαρμόζουν ένα σύστημα αξιολόγησης που θα πριμοδοτεί τις προσφορές που εισάγουν τεχνολογικές λύσεις που προωθούν την απανθρακοποίηση της παραγωγής τσιμέντου. Ο μηχανισμός αυτός μπορεί να βασιστεί σε μια αντιστρόφως ανάλογη συσχέτιση του επιπέδου τεχνολογικής ωριμότητας (TRL) κάθε τεχνολογίας με μια σχετική (πλασματική) μείωση της οικονομικής προσφοράς αποκλειστικά για τις ανάγκες της συγκριτικής αξιολόγησης και κατάταξης. Για παράδειγμα, σύμφωνα με την ανάλυση της προηγούμενης ενότητας, ο εξηλεκτρισμός με χρήση συστημάτων πλάσματος είναι η τεχνολογία με το χαμηλότερο επίπεδο τεχνολογικής ωριμότητας (TRL 4) μεταξύ των εξεταζόμενων τεχνολογιών. Στο πλαίσιο αυτής της πολιτικής, η προσφορά ενός προμηθευτή που αξιοποιεί μια τέτοια τεχνολογία θα μπορεί να πριμοδοτηθεί με το ανώτατο καθοριζόμενο ποσοστό κατά την αξιολόγηση της προσφοράς του, το οποίο, θα επιφέρει μία πλασματική μείωση (εικονική έκπτωση) της τάξης του 8-10% επί της τιμής της προσφοράς του για τη διαμόρφωση της τιμής συγκριτικής αξιολόγησης. Το προτεινόμενο μέτρο, παρουσιάζει αναλογίες με το επιτυχημένο ολλανδικό εργαλείο CO₂ Performance Ladder, καθώς αξιοποιεί έναν μηχανισμό πριμοδότησης στο πλαίσιο των δημόσιων συμβάσεων για να ενισχύσει την περιβαλλοντική και τεχνολογική απόδοση πέραν των ελάχιστων απαιτήσεων συμμόρφωσης. Αν και στηρίζεται στην ίδια λογική, ενώ το CO₂ Performance Ladder επικεντρώνεται στην περιβαλλοντική επίδοση του ίδιου του οργανισμού, το προτεινόμενο μέτρο στοχεύει στην πριμοδότηση και ωρίμανση τεχνολογιών που επιτυγχάνουν υψηλή μείωση εκπομπών μέσω των δημοσίων συμβάσεων. Και στις δύο περιπτώσεις, η περιβαλλοντική επίδοση δεν λειτουργεί ως αποκλειστικό κριτήριο, αλλά ενσωματώνεται ως παράγοντας ανταγωνιστικού πλεονεκτήματος μέσω μιας πλασματικής

οικονομικής έκπτωσης για τη διαμόρφωση της τιμής συγκριτικής αξιολόγησης της προσφοράς, η οποία αυξάνεται όσο υψηλότερη είναι η φιλοδοξία των μέτρων μείωσης εκπομπών⁸³. Ο μηχανισμός αυτός μπορεί να συμβάλλει στην επιτάχυνση της ωρίμανσης και υιοθέτησης τεχνολογιών χαμηλών εκπομπών στην ελληνική τσιμεντοβιομηχανία αλλά και να λειτουργήσει ως έμμεση υποστήριξη της τεχνολογικής καινοτομίας και της ανταγωνιστικότητας στον κλάδο.

Παροχή οικονομικών κινήτρων προς τους παραγωγούς τσιμέντου με υψηλές περιβαλλοντικές επιδόσεις

Προτείνεται η δημιουργία ενός μηχανισμού παροχής οικονομικών κινήτρων για την προμήθεια προϊόντων τσιμέντου που υπερβαίνουν σε σημαντικό βαθμό τις ελάχιστες απαιτήσεις των ΠΔΣ. Όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως, στο πλαίσιο των ΠΔΣ, προτείνεται τα δεδομένα περιβαλλοντικού αποτυπώματος για κάθε τύπο τσιμέντου να καταγράφονται και συγκεντρώνονται σε ένα εθνικό μητρώο περιβαλλοντικών χαρακτηριστικών για προϊόντα τσιμέντου. Με βάση αυτά τα δεδομένα, **οι παραγωγοί που προσφέρουν προϊόντα τσιμέντου με εκπομπές CO₂ χαμηλότερες από το μέσο όρο εκπομπών του προηγούμενου έτους, λαμβάνουν εφάπαξ οικονομική ενίσχυση.** Η ενίσχυση αυτή αφορά αποκλειστικά την χρηματοδότηση υφιστάμενων ή μελλοντικών επενδύσεων για την ανάπτυξη καινοτόμων τεχνολογιών που επιτυγχάνουν τη δραστικότερη μείωση των εκπομπών της τσιμεντοβιομηχανίας. Η ενίσχυση αυτή θα υπολογίζεται με βάση την τιμή του CO₂ στο Ευρωπαϊκό Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών για κάθε τόνο μείωσης CO₂ που επιτυγχάνεται κάτω από το μέσο όρο του προηγούμενου έτους. Το συγκεκριμένο μέτρο πολιτικής αποτελεί ένα διαφανές και μετρήσιμο κίνητρο για τη μείωση των εκπομπών πέραν των ελάχιστων απαιτήσεων, προωθώντας και επιβραβεύοντας τη συνεχή βελτίωση των προμηθευτών. Παράλληλα, το προτεινόμενο μέτρο λειτουργεί και σαν έμμεση επιδότηση του κόστους εγκατάστασης και λειτουργίας των πιο πολύπλοκων και τεχνολογικά καινοτόμων τεχνολογιών απανθρακοποίησης της διεργασίας παραγωγής τσιμέντου.

Οικονομική ενίσχυση αναθετουσών αρχών με υψηλότερο επίπεδο πράσινων προμηθειών

Στο πλαίσιο του προτεινόμενου μέτρου, οι αναθέτουσες αρχές που εφαρμόζουν με επιτυχία τους Πράσινες Δημόσιες Συμβάσεις (ΠΔΣ) δύνανται να λαμβάνουν επιπλέον χρηματοδότηση ή αυξημένο προϋπολογισμό για έργα που συμμορφώνονται με περιβαλλοντικά κριτήρια. Ο μηχανισμός εφαρμογής του μέτρου βασίζεται στους στόχους που έχουν ήδη καθοριστεί για κάθε φορέα από την εθνική στρατηγική ΠΔΣ, οι οποίοι λειτουργούν ως σημείο αναφοράς. Συγκεκριμένα, **προτείνεται η ετήσια αξιολόγηση των αναθετουσών αρχών ως προς την επίτευξη των στόχων αυτών και η παροχή ενισχυμένης χρηματοδότησης σε όσους φορείς επιτυγχάνουν επιδόσεις που υπερβαίνουν τους προβλεπόμενους στόχους.** Η προσέγγιση αυτή είναι συναφής με επιτυχημένα διεθνή παραδείγματα, όπως το σύστημα επιβράβευσης βάσει επίδοσης που εφαρμόζεται στη Νότια Κορέα. Εκεί, οι δημόσιοι οργανισμοί αξιολογούνται ετησίως βάσει δεικτών απόδοσης, μεταξύ των οποίων περιλαμβάνεται και ο βαθμός εφαρμογής των ΠΔΣ, μετρούμενος ως το ποσοστό των πράσινων αγορών επί του συνόλου των δημόσιων προμηθειών. Όσο υψηλότερη είναι η επίδοση ενός οργανισμού στη

χρήση ΠΔΣ, τόσο υψηλότερη είναι και η χρηματοοικονομική επιβράβευση που λαμβάνει, είτε με τη μορφή έκτακτης ετήσιας χρηματοδότησης είτε μέσω στοχευμένων περιβαλλοντικών επιχορηγήσεων προς τους φορείς με σταθερά καλή επίδοση⁸³. Το μέτρο ενθαρρύνει τη συστηματική εφαρμογή των ΠΔΣ στην προμήθεια τσιμέντου, επιβραβεύοντας την πλήρη ενσωμάτωση περιβαλλοντικών προτύπων στις δημόσιες συμβάσεις μέσω θετικών οικονομικών κινήτρων για τις αναθέτουσες αρχές.

Συμπεράσματα

Η τσιμεντοβιομηχανία συγκαταλέγεται μεταξύ των σημαντικότερων πηγών βιομηχανικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα παγκοσμίως με αποτέλεσμα να αποτελεί έναν κρίσιμο κλάδο για την επίτευξη του νομικά δεσμευτικού στόχου της ΕΕ και της Ελλάδας για κλιματική ουδετερότητα έως το 2050, όπως αυτός αποτυπώνεται στον Ευρωπαϊκό Κλιματικό Νόμο και τον Εθνικό Κλιματικό Νόμο, αντίστοιχα. Η επίτευξη του στόχου αυτού προϋποθέτει τη ριζική αναμόρφωση τόσο του ενεργειακού μίγματος όσο και του μοντέλου λειτουργίας της τσιμεντοβιομηχανίας. Παράλληλα, πρόκειται για έναν από τους πλέον δυσχερώς απανθρακοποιήσιμους βιομηχανικούς κλάδους, εξαιτίας του υψηλού ενεργειακού της αποτυπώματος και των εγγενών εκπομπών που συνδέονται με τη διεργασία παραγωγής κλίνκερ. Η σταδιακή μείωση των δωρεάν δικαιωμάτων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα έως το 2034 σε συνδυασμό με τη μεγάλη εξάρτηση από τον άνθρακα και τα παράγωγά του καθιστά τον κλάδο ιδιαίτερα ευάλωτο σε περιβαλλοντικές και ρυθμιστικές πιέσεις. Παρόλο που τα τελευταία χρόνια έχουν εφαρμοστεί μέτρα απανθρακοποίησης του ενεργειακού μίγματος και βελτίωσης της ενεργειακής αποδοτικότητας του κλάδου, η πρόοδος προς τη μείωση των εκπομπών των προϊόντων τσιμέντου παραμένει περιορισμένη.

Η σταδιακή μετάβαση σε μία διεργασία παραγωγής κλίνκερ με χαμηλό ανθρακικό αποτύπωμα απαιτεί τον συνδυασμό βραχυπρόθεσμων και μακροπρόθεσμων παρεμβάσεων. Στο πλαίσιο αυτό, οι τεχνολογίες δέσμευσης, αξιοποίησης και αποθήκευσης άνθρακα αναγνωρίζονται ως κρίσιμο εργαλείο για τη μείωση των εκπομπών διεργασίας που προκύπτουν από τη χημική αποσύνθεση του ανθρακικού ασβεστίου και οι οποίες δεν μπορούν να εξαλειφθούν με παρεμβάσεις στο ενεργειακό μίγμα της παραγωγής. Ωστόσο, οι τεχνολογίες αυτές αφενός στοχεύουν στη δέσμευση εκπομπών μετά την παραγωγή τους και όχι στη μείωση των εκπομπών στην πηγή, και αφετέρου συνοδεύονται από ιδιαίτερα υψηλό ενεργειακό και οικονομικό κόστος. Επιπλέον, η εφαρμογή τους συνδέεται με μια σειρά τεχνικών και οικονομικών προκλήσεων καθιστώντας αμφίβολη την επιτυχία τους στη μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος της βαριάς βιομηχανίας. Οι παράγοντες αυτοί περιορίζουν τον ρόλο τους ως κυρίαρχης στρατηγικής απανθρακοποίησης του κλάδου.

Η προτεραιότητα των πολιτικών απανθρακοποίησης θα πρέπει να δίνεται σε παρεμβάσεις που μειώνουν άμεσα την παραγωγή εκπομπών στην πηγή. Οι βελτιώσεις ενεργειακής αποδοτικότητας, καθώς και η ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας αποτελούν τεχνικά ώριμες και οικονομικά βιώσιμες λύσεις με άμεση απόδοση. Οι τεχνολογίες αντικατάστασης των ορυκτών καυσίμων με χρήση εναλλακτικών καυσίμων συγκριτικά χαμηλότερων εκπομπών από επεξεργασμένα απορρίμματα ή απόβλητα και βιομάζα έχουν αναδειχθεί ως η πλέον ώριμη επιλογή χαμηλού επενδυτικού κόστους, προσφέροντας όμως σχετικά μικρά περιβαλλοντικά οφέλη. Επιπλέον, οι δυνατότητές αυτών των εναλλακτικών εξαντλούνται

σύντομα, καθώς δεν αντιμετωπίζουν το διαρθρωτικό ζήτημα του υψηλού ανθρακικού αποτυπώματος της παραγωγής θερμότητας η οποία χρησιμοποιείται για την παραγωγή κλίνκερ.

Σε μεσοπρόθεσμο ορίζοντα, η χρήση πράσινου υδρογόνου ως καυσίμου και ο εξηλεκτρισμός της παραγωγικής διεργασίας μπορούν να παίξουν καταλυτικό ρόλο στην επιτυχή και βιώσιμη απανθρακοποίηση του κλάδου. Αν και οι τεχνολογίες αυτές βρίσκονται ακόμη σε αρχικά στάδια ωριμότητας, προσφέρουν τη δυνατότητα δραστικής μείωσης των εκπομπών της βιομηχανίας, ιδιαίτερα όταν βασίζονται σε πράσινο υδρογόνο και ηλεκτρική ενέργεια παραγόμενη από ανανεώσιμες πηγές.

Συνεπώς, η επιτυχής μετάβαση της τσιμεντοβιομηχανίας σε ένα καθεστώς χαμηλών εκπομπών άνθρακα απαιτεί ένα συνεκτικό πλαίσιο πολιτικής, που θα συνδέει τις τεχνολογικές εξελίξεις με τη βιομηχανική στρατηγική της χώρας. Στο πλαίσιο αυτό, οι Πράσινες Δημόσιες Συμβάσεις μπορούν να αποτελέσουν ένα σημαντικό εργαλείο πολιτικής για την προώθηση και την έμμεση υποστήριξη επενδύσεων σε τεχνολογίες μείωσης των εκπομπών CO₂, μέσω της ενίσχυσης της εγχώριας ζήτησης για χαμηλού ανθρακικού αποτυπώματος τσιμέντο στις δημόσιες προμήθειες που αφορούν πάνω από το 30% της συνολικής ζήτησης τσιμέντου. Η τσιμεντοβιομηχανία μπορεί έτσι να μετατραπεί από τομέα υψηλών εκπομπών σε πεδίο εφαρμογής καινοτόμων λύσεων, συμβάλλοντας τόσο στην αύξηση της ανταγωνιστικότητας της οικονομίας όσο και στην επίτευξη των εθνικών και ευρωπαϊκών κλιματικών στόχων. Η διαμόρφωση σταθερής και επαρκούς ζήτησης για προϊόντα χαμηλών εκπομπών είναι κρίσιμη για την κινητοποίηση επενδύσεων και τη διασφάλιση της οικονομικά βιώσιμης απανθρακοποίησης του κλάδου.

Τα προτεινόμενα μέτρα πολιτικής απαντούν σε αυτές τις απαιτήσεις μέσα από μια σταδιακή αλλά συνεκτική προσέγγιση, περιλαμβάνοντας:

- τη δημιουργία ενός εθνικού συστήματος πιστοποίησης προϊόντων τσιμέντου,
- την υποχρεωτική παροχή και αξιολόγηση περιβαλλοντικών δεδομένων,
- τη θέσπιση ελάχιστων δεσμευτικών περιβαλλοντικών προδιαγραφών για τα προϊόντα τσιμέντου στις δημόσιες συμβάσεις,
- την **πριμοδότηση της περιβαλλοντικής και τεχνολογικής επίδοσης** αντί αποκλειστικά του χαμηλού οικονομικού κόστους,
- την **παροχή οικονομικών κινήτρων για τους παραγωγούς προϊόντων τσιμέντου** που επιτυγχάνουν δραστική μείωση εκπομπών,
- την **οικονομική επιβράβευση στις αναθέτουσες αρχές** που υπερβαίνουν τους εθνικούς στόχους του σχεδίου για τις ΠΔΣ.

Η εφαρμογή τέτοιων μέτρων πολιτικής μπορεί να λειτουργήσει πολλαπλασιαστικά, επιταχύνοντας την υιοθέτηση καινοτόμων τεχνολογιών χαμηλών εκπομπών, όπως η χρήση πράσινου υδρογόνου ως καυσίμου και ο εξηλεκτρισμός της διεργασίας παραγωγής κλίνκερ, συμβάλλοντας έτσι στην επίτευξη οικονομικών κλίμακας για πράσινα προϊόντα τσιμέντου και ενισχύοντας παράλληλα τη διεθνή ανταγωνιστικότητα της ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας. Σε εθνικό επίπεδο, η συστηματική αξιοποίηση των Πράσινων Δημόσιων Συμβάσεων δεν

αποτελεί απλώς εργαλείο κλιματικής πολιτικής, αλλά κρίσιμο στοιχείο μιας ολοκληρωμένης βιομηχανικής στρατηγικής για τη μετάβαση προς μια κλιματικά ουδέτερη οικονομία.

Επιπλέον, στο πλαίσιο μίας συνεκτικής εθνικής στρατηγικής απανθρακοποίησης της τσιμεντοβιομηχανίας, η **ένταξη της Ελλάδας στην πρωτοβουλία Industrial Deep Decarbonization Initiative (IDDI)** θα αποτελούσε κομβικό βήμα, ενισχύοντας παράλληλα τον ρόλο της χώρας στη διαμόρφωση πολιτικών απανθρακοποίησης της βαριάς βιομηχανίας σε παγκόσμιο επίπεδο. Στη διεθνή αυτή πρωτοβουλία συμμετέχουν κυβερνήσεις, επιχειρήσεις και οργανισμοί που συνεργάζονται με στόχο, μεταξύ άλλων, τον καθορισμό στόχων πράσινων δημοσίων προμηθειών, την παροχή κινήτρων για επενδύσεις σε προϊόντα χαμηλών εκπομπών και τη δημιουργία αγορών για υλικά χαμηλών και σχεδόν μηδενικών εκπομπών, όπως το τσιμέντο.

