



ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Κυκλική οικονομία και διαχείριση συγκεκριμένων ρευμάτων βιομηχανικών αποβλήτων:

θεωρητική προσέγγιση και προοπτικές για την τσιμεντοβιομηχανία»

ΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΥ ΣΠΥΡΙΔΟΥΛΑ

A.M.: 122811

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΜΟΥΣΤΑΚΑΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

Πάτρα, Σεπτέμβριος 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του/της φοιτητή/φοιτήτριας («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.



ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

**«Κυκλική οικονομία και διαχείριση συγκεκριμένων ρευμάτων
βιομηχανικών αποβλήτων:
θεωρητική προσέγγιση και προοπτικές για την τσιμεντοβιομηχανία»**

«Γιαννοπούλου Σπυριδούλα»

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

Μουστάκας Κωνσταντίνος

Κομίλης Δημήτριος

Πάτρα, Σεπτέμβριος 2026

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Μουστάκα Κωνσταντίνο για την αμέριστη κατανόηση, υποστήριξη και καθοδήγησή του σε όλη την πορεία της εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Ευχαριστώ επίσης την οικογένεια μου, που βρίσκεται πάντα στο πλάι μου και μου συμπαραστέκεται με κάθε τρόπο.

Αλλά κυρίως ευχαριστώ τον σύζυγό μου, ο οποίος αρχικά μου έδωσε το έναυσμα για την συγκεκριμένη μελέτη και στη συνέχεια με βοήθησε με τις γνώσεις του, την εμπιστοσύνη του, τον χρόνο του και την υποστήριξή του ώστε να μπορέσω να την ολοκληρώσω.

Τέλος, αφιερώνω το παρόν έργο στις δυο μικρές μου κόρες που αποτέλεσαν μια όμορφη τροχοπέδη στην ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας.

Περίληψη

Η παρούσα εργασία έχει ως αντικείμενό της τη μελέτη της εφαρμογής της Κυκλικής Οικονομίας στο πεδίο της διαχείρισης επιλεγμένων βιομηχανικών και κατασκευαστικών ρευμάτων, τα οποία συνδέονται με την παραγωγή του τσιμέντου και του σκυροδέματος. Η μελέτη δίνει έμφαση στις δυνατότητες αξιοποίησης των εν λόγω υλικών στην ελληνική βιομηχανία, υιοθετώντας μία βιβλιογραφική και θεωρητική ανάλυση, αξιοποιώντας, όμως, παράλληλα, και τη μέθοδο της μελέτης περίπτωσης. Πιο συγκεκριμένα εξετάζονται οι πρακτικές του TITAN και του ΗΡΑΚΛΗ, ως προς την ελληνική εφαρμογή, και οι περιπτώσεις των ομίλων TITAN και Holcim, ως προς τη διεθνή εφαρμογή και τις ευρύτερες εταιρικές στρατηγικές. Η ανάλυση που διεξήχθη ανέδειξε ότι η κυκλικότητα είναι σημαντική, αλλά δε διασφαλίζει πάντοτε, απαραίτητα, περιβαλλοντικά οφέλη. Η καθαρότητα των ρευμάτων αποβλήτων, η απόσταση μεταφοράς, η απαιτούμενη επεξεργασία, η ποιότητα του τελικού προϊόντος και η ανθεκτικότητά του καθορίζουν το τελικό αποτέλεσμα.

Λέξεις – Κλειδιά

Κυκλική Οικονομία, Τσιμεντοβιομηχανία, Βιομηχανικά Απόβλητα, Δευτερογενείς Πρώτες Ύλες, Ανακυκλωμένα Αδρανή, Εναλλακτικά Καύσιμα

«Circular Economy and management of specific industrial waste streams: A theoretical approach and prospects for the cement industry»

«Giannopoulou Spyridoula»

Abstract

The present study examines the application of the circular economy principles to the management of specific industrial and construction waste streams associated with cement and concrete industries. It focuses on the potential for utilizing these materials within the Greek cement industry, through a literature-based theoretical analysis and case study approach. More specifically, the study examines the practices implemented by TITAN and HERACLES in Greece, as well as the international operations and broader corporate strategies of the respective groups. The analysis indicates that, although circularity can provide significant environmental benefits, these benefits are not automatically ensured. The overall environmental performance depends on factors such as waste-stream purity, transportation distances, processing requirements, and the quality and durability of the final product.

Keywords

Circular Economy, Cement Industry, Industrial Waste, Secondary Raw Materials, Recycled Aggregates, Alternative Fuels.

Περιεχόμενα

Περίληψη	ii
Abstract	iii
Περιεχόμενα	iv
Κατάλογος Σχημάτων	vi
Κατάλογος Πινάκων	vii
Συντομογραφίες και Ακρωνύμια	viii
1. Εισαγωγή	1
2. Αρχές και εφαρμογές της Κυκλικής Οικονομίας	7
2.1 Θεμελιώδεις αρχές της Κυκλικής Οικονομίας	7
2.2 Εφαρμογές της Κυκλικής Οικονομίας στη βιομηχανία	12
2.3 Συνάφεια της Κυκλικής Οικονομίας με τον κλάδο τσιμέντου και σκυροδέματος	18
3. Βιομηχανικά Απόβλητα και Ρεύματα της Τσιμεντοβιομηχανίας	25
3.1 Κατηγορίες βιομηχανικών αποβλήτων	25
3.2 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις	32
3.3 Ειδικά ρεύματα της τσιμεντοβιομηχανίας	35
4. Συγκριτική Αξιολόγηση Ρευμάτων Αποβλήτων	40
4.1 Τεχνικά κριτήρια	40
4.2 Περιβαλλοντικά κριτήρια	42
4.3 Οικονομικά κριτήρια	44
4.4 Κανονιστικό/θεσμικό πλαίσιο	46
4.5 Εφαρμογή και προοπτικές στην ελληνική τσιμεντοβιομηχανία: TITAN και ΗΡΑΚΛΗΣ	49
4.6 Μελέτες περίπτωσης μονάδων TITAN και Holcim στο εξωτερικό	56
4.6.1 TITAN Zlatna Panega στη Βουλγαρία	57
4.6.2 TITAN USJE στη Βόρεια Μακεδονία	57
4.6.3 Holcim Altkirch στη Γαλλία	58
4.6.4 Holcim Saint-Pierre-la-Cour στη Γαλλία	58
4.6.5 Συγκριτική αποτίμηση και μεταφορά στην ελληνική εφαρμογή	59
5. Συμπεράσματα και Προοπτικές	61
5.1 Συνθετική αποτίμηση κριτηρίων και τελική ιεράρχηση ρευμάτων	63
5.2 Επιχειρησιακό σχέδιο εφαρμογής κυκλικότητας για την ελληνική τσιμεντοβιομηχανία	67
5.3 Περιορισμοί της παρούσας ανάλυσης και κατευθύνσεις μελλοντικής έρευνας	72

5.4 Προτάσεις πολιτικής και βιομηχανικής πρακτικής.....	74
Βιβλιογραφία	77

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1 Ιεράρχηση διαχείρισης ροών πριν από τη βιομηχανική αξιοποίηση.....	49
Σχήμα 2 Κοινή λογική κυκλικότητας στην τσιμεντοβιομηχανία.....	54
Σχήμα 3 Τέσσερις άξονες για συγκρίσιμη εταιρική αξιολόγηση.....	56
Σχήμα 4 Σταδιακός κύκλος εφαρμογής και ελέγχου μιας δευτερογενούς ροής	69

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Συνοπτική αποτύπωση θεμελιωδών αρχών της Κυκλικής Οικονομίας	12
Πίνακας 2 Ενδεικτικές εφαρμογές Κυκλικής Οικονομίας στη βιομηχανία.....	18
Πίνακας 3 Κύριες κυκλικές διαδρομές στον κλάδο τσιμέντου και σκυροδέματος	24
Πίνακας 4 Κατηγορίες ρευμάτων αποβλήτων σχετικών με τσιμέντο και σκυρόδεμα	31
Πίνακας 5 Ειδικά ρεύματα και πιθανές κυκλικές χρήσεις στην τσιμεντοβιομηχανία	39
Πίνακας 6 Τεχνική αξιολόγηση ενδεικτικών ρευμάτων	42
Πίνακας 7 Συγκριτικά ευρωπαϊκά ποσοτικά σημεία αναφοράς για απόβλητα και ανάκτηση	48
Πίνακας 8 Ενδεικτική αποτύπωση εφαρμογών Κυκλικής Οικονομίας σε TITAN και ΗΡΑΚΛΗ	53
Πίνακας 9 Συνοπτική σύγκριση ελληνικών και διεθνών ομίλων	54
Πίνακας 10 Σύγκριση δημοσιευμένων εταιρικών δεικτών και στόχων κυκλικότητας.....	55
Πίνακας 11 Συγκριτική αποτίμηση διεθνών μονάδων TITAN και Holcim	59
Πίνακας 12 Συγκριτική ιεράρχηση βασικών ρευμάτων για ελληνική εφαρμογή.....	66

Συντομογραφίες και Ακρωνύμια

ΑΕΚΚ — Απόβλητα Εκσκαφών, Κατασκευών και Κατεδαφίσεων

ΒΔΤ / BAT — Βέλτιστες Διαθέσιμες Τεχνικές / Best Available Techniques

ΕΕ / EU — Ευρωπαϊκή Ένωση / European Union

ΧΥΤΑ — Χώρος Υγειονομικής Ταφής Αποβλήτων

CCE — Circular Carbon Economy — Κυκλική οικονομία άνθρακα

CDW — Construction and Demolition Waste — Απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων

CE — Circular Economy — Κυκλική Οικονομία

CEM I — Κατηγορία τσιμέντου Portland

CO₂ — Διοξείδιο του άνθρακα

EEA — European Environment Agency — Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος

EPD — Environmental Product Declaration — Περιβαλλοντική Δήλωση Προϊόντος

GCCA — Global Cement and Concrete Association — Παγκόσμια Ένωση Τσιμέντου και Σκυροδέματος

GIZ — Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit — Γερμανικός Οργανισμός Διεθνούς Συνεργασίας

LCA — Life Cycle Assessment — Ανάλυση Κύκλου Ζωής

QR — Quick Response — Κωδικός ταχείας απόκρισης

RDF — Refuse-Derived Fuel — Καύσιμο προερχόμενο από απόβλητα

SCMs — Supplementary Cementitious Materials — Συμπληρωματικά τσιμεντοειδή υλικά

SRF — Solid Recovered Fuel — Στερεό ανακτηθέν καύσιμο

TSR — Thermal Substitution Rate — Ποσοστό θερμικής υποκατάστασης

1.Εισαγωγή

Η διπλωματική εργασία η οποία αναπτύσσεται παρακάτω εστιάζει στη σχέση η οποία διαμορφώνεται ανάμεσα στην Κυκλική Οικονομία και τη διαχείριση αποβλήτων, εστιάζοντας συγκεκριμένα στη διαχείριση επιλεγμένων ρευμάτων βιομηχανικών αποβλήτων στο πεδίο της τσιμεντοβιομηχανίας και της παραγωγής του σκυροδέματος. Πρόκειται για ένα εξαιρετικά στοχευμένο θέμα, το οποίο αφορά ένα πεδίο παραγωγικό, χρήσιμο, αλλά και συνδεδεμένο με έντονες περιβαλλοντικές συνέπειες που απαιτούν περιβαλλοντική ρύθμιση και σαφές θεσμικό πλαίσιο. Η έρευνα εστιάζει στο αντικείμενο αυτό αντιμετωπίζοντάς το ως ζήτημα τεχνικής αξιολόγησης, οργάνωσης ροών αλλά και θεσμικής προσαρμογής. Μάλιστα, ο συγκεκριμένος κλάδος επιλέχθηκε ως ενδεικτικός διότι συνδυάζει υψηλά επίπεδα κατανάλωσης σε επίπεδο πρώτων υλών, υψηλή ενεργειακή ένταση και σημαντικά επίπεδα εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Συνεπώς, πρόκειται για ένα πεδίο όπου η διερεύνηση των κυκλικών πρακτικών είναι θεμελιώδης για τη βιωσιμότητά του (Geissdoerfer et al., 2017; Korhonen et al., 2018).

Η μελέτη του συγκεκριμένου θέματος εκκινεί από την αναγνώριση του γεγονότος ότι το κυρίαρχο γραμμικό μοντέλο παραγωγής που είναι τριμερές και περιλαμβάνει «εξαγωγή-παραγωγή-απόρριψη» είναι παρωχημένο και είναι απαραίτητο να μεταβληθεί για να ανταποκριθεί επαρκώς στις σύγχρονες προκλήσεις που αφορούν τόσο την παραγωγή (ανάγκη για υψηλή παραγωγικότητα) όσο και το περιβάλλον. Στη γραμμική οικονομία η οικονομική αξία προκύπτει μέσα από την διαρκή και αδιάκοπη εισαγωγή νέων, πρωτογενών πόρων στο σύστημα και της απόρριψης των υπολειμμάτων στο τέλος της αλυσίδας. Αν και πράγματι πρόκειται για μία λογική που υπήρξε προσοδοφόρα για τη βιομηχανία, τα όριά της δεν άργησαν να φανούν, λόγω της εξάντλησης των φυσικών πόρων και της περιβαλλοντικής υποβάθμισης. Το κόστος της εξάρτησης από πρωτογενείς πόρους είναι υπέρογκο και το περιβάλλον έχει φτάσει ήδη στα όριά του, λόγω των επιπτώσεων της μακροχρόνιας βιομηχανικής ανάπτυξης, γεγονός που καθιστά αναγκαία τη στροφή προς νέα πρότυπα (Ghisellini et al., 2016; Kirchherr et al., 2017).

Το μοντέλο της Κυκλικής Οικονομίας έχει προτείνει μία πολύ διαφορετική ανάγνωση του μοντέλου παραγωγής, διότι δεν περιορίζεται στην ανακύκλωση στο τέλος του κύκλου ζωής

ενός προϊόντος, αλλά προτείνει την πλήρη επανεξέταση του τρόπου με τον οποίο σχεδιάζονται, χρησιμοποιούνται και επανεντάσσονται τα διάφορα υλικά στην οικονομία, εστιάζοντας, μάλιστα, στη διατήρηση της αξίας των πόρων για το δυνατόν μεγαλύτερο διάστημα στην επιβράδυνση των κύκλων χρήσης, στο κλείσιμο των υλικών ροών και στη μείωση των περιττών εισροών. Με αυτή την έννοια, η κυκλικότητα είναι περισσότερο σύστημα οργάνωσης της παραγωγής παρά απλή τεχνική διαχείρισης αποβλήτων, γι' αυτό και η μελέτη της απαιτεί συνδυασμό περιβαλλοντικής, τεχνικής, οικονομικής και θεσμικής ανάλυσης (Murray et al., 2017; Reike et al., 2018).

Η έννοια της Κυκλικής Οικονομίας έχει γνωρίσει σημαντική διάδοση τα τελευταία χρόνια, αλλά η διάδοσή της συνοδεύεται και από εννοιολογικές ασάφειες. Η σχετική βιβλιογραφία δείχνει ότι δεν υπάρχει ένας μόνο απολύτως αποδεκτός ορισμός, αλλά ένα σύνολο προσεγγίσεων που δίνουν διαφορετική έμφαση στην αποδοτικότητα πόρων, στη βιομηχανική συμβίωση, στον οικολογικό σχεδιασμό, στην ανακύκλωση ή στη μεταβολή των επιχειρηματικών μοντέλων. Η πολυμορφία αυτή δεν είναι κατ' ανάγκη αδυναμία, δείχνει, όμως, ότι η χρήση του όρου πρέπει να γίνεται με ακρίβεια. Μια εργασία που εξετάζει την Κυκλική Οικονομία στην τσιμεντοβιομηχανία οφείλει να αποφύγει τη γενικόλογη χρήση της έννοιας και να τη συνδέσει με μετρήσιμες ροές υλικών, τεχνικές προδιαγραφές και συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνέπειες (Kirchherr et al., 2017; Korhonen et al., 2018).

Η επιλογή της τσιμεντοβιομηχανίας ως πεδίου ανάλυσης είναι ιδιαίτερα σημαντική, ακριβώς διότι το τσιμέντο αποτελεί βασικό υλικό των σύγχρονων υποδομών και η παγκόσμια χρήση του συνδέεται με την αστικοποίηση, τις μεταφορές, την κατοικία και την παραγωγή δημοσίων έργων. Παράλληλα, η παραγωγή τσιμέντου είναι από τις πλέον απαιτητικές βιομηχανικές διεργασίες ως προς την κατανάλωση ενέργειας και πρώτων υλών. Η παραγωγή κλίνκερ απαιτεί υψηλές θερμοκρασίες, ενώ η ασβεστοποίηση του ασβεστόλιθου προκαλεί εκπομπές διεργασίας που δεν μπορούν να εξαλειφθούν μόνο με την αντικατάσταση καυσίμων. Για τον λόγο αυτό, οι στρατηγικές κυκλικότητας στον κλάδο πρέπει να συνδέονται τόσο με την ενεργειακή απόδοση όσο και με τη μείωση του λόγου κλίνκερ προς τσιμέντο (Scrivener et al., 2018; Habert et al., 2020).

Η συζήτηση για το τσιμέντο και το σκυρόδεμα έχει συχνά έναν ιδιότυπο χαρακτήρα, αφού από τη μια πλευρά, πρόκειται για υλικά χωρίς τα οποία δεν μπορεί να υπάρξει σύγχρονη τεχνική

υποδομή, από την άλλη, η παραγωγή τους επιβαρύνει το περιβάλλον σε σημαντική κλίμακα. Η απλή καταγγελία του κλάδου δεν αρκεί, όπως δεν αρκεί και η άκριτη επίκληση της ανάπτυξης. Η ουσιαστική προσέγγιση βρίσκεται στη διερεύνηση τεχνικά εφικτών επιλογών που μειώνουν το αποτύπωμα του προϊόντος χωρίς να υπονομεύουν την ασφάλεια, την ανθεκτικότητα και την ποιότητα των κατασκευών. Στο σημείο αυτό η Κυκλική Οικονομία αποκτά πρακτικό νόημα, επειδή μπορεί να συνδέσει την αξιοποίηση δευτερογενών υλικών με τις απαιτήσεις ενός κλάδου όπου οι προδιαγραφές δεν συγχωρούν πρόχειρους πειραματισμούς (Scrivener et al., 2018; Tokareva et al., 2023).

Η εργασία εστιάζει ιδίως στη δυνατότητα αξιοποίησης βιομηχανικών και κατασκευαστικών ρευμάτων αποβλήτων ως δευτερογενών πρώτων υλών ή συμπληρωματικών τσιμεντοειδών υλικών. Στη διεθνή βιβλιογραφία εξετάζονται υλικά όπως η ιπτάμενη τέφρα, η σκωρία υψικαμίνου, οι φυσικές ποζολάνες, τα ασβεστολιθικά πληρωτικά, καθώς και λεπτόκοκκα κλάσματα από απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων. Η αξιοποίησή τους δεν είναι ισοδύναμη σε όλες τις περιπτώσεις, αλλά εξαρτάται από τη χημική σύσταση, την ορυκτολογική δομή, την κοκκομετρία, την αντιδραστικότητα, τη διαθεσιμότητα, το κόστος επεξεργασίας και τη συμμόρφωση με πρότυπα ποιότητας. Έτσι, η κυκλικότητα μετατρέπεται σε τεχνικό ζήτημα ελέγχου και τεκμηρίωσης, όχι σε πρόθεση επαναχρησιμοποίησης (Habert et al., 2020; Tokareva et al., 2023).

Παράλληλα, η παραγωγή έτοιμου σκυροδέματος δημιουργεί ειδικά ρεύματα αποβλήτων, όπως επιστροφές νωπού σκυροδέματος, νερά πλύσης, λάσπη σκυροδέματος και ανακυκλωμένα αδρανή. Τα ρεύματα αυτά παρουσιάζουν ενδιαφέρον επειδή προέρχονται από ελεγχόμενες παραγωγικές διαδικασίες και συχνά μπορούν να συλλεχθούν, να διαχωριστούν και να επανεισαχθούν στην παραγωγή. Ωστόσο, η αξιοποίησή τους πρέπει να εξετάζεται με προσοχή, διότι το περιβαλλοντικό όφελος μπορεί να μειωθεί ή ακόμη και να αναιρεθεί όταν απαιτούνται ενεργοβόρες διεργασίες επεξεργασίας ή μεγάλες μεταφορικές αποστάσεις. Η ανάλυση κύκλου ζωής αποτελεί συνεπώς αναγκαίο εργαλείο, ώστε οι κυκλικές λύσεις να αξιολογούνται με βάση το συνολικό τους αποτύπωμα και όχι μόνο την καλή πρόθεση διαχείρισης αποβλήτων (Kleijer et al., 2017; Wijayasundara et al., 2016; Vieira et al., 2019).

Το ερευνητικό ενδιαφέρον της εργασίας βρίσκεται ακριβώς σε αυτή τη διασταύρωση θεωρίας και εφαρμογής. Από τη μία πλευρά, εξετάζεται το θεωρητικό πλαίσιο της Κυκλικής

Οικονομίας, οι αρχές της και οι περιορισμοί της και, από την άλλη, οι αρχές αυτές μεταφέρονται σε έναν βιομηχανικό κλάδο όπου τα υλικά δεν μπορούν να αντικατασταθούν πρόχειρα και όπου οι αποφάσεις έχουν άμεσες τεχνικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές συνέπειες. Με τον τρόπο αυτό, η εργασία δεν μένει στο επίπεδο μιας γενικής βιβλιογραφικής παρουσίασης, αλλά επιδιώκει να δείξει με ποιον τρόπο η Κυκλική Οικονομία μπορεί να αποκτήσει βιομηχανική λειτουργικότητα στον τομέα τσιμέντου και σκυροδέματος (Ghisellini et al., 2016; Geissdoerfer et al., 2017).

Σκοπός της εργασίας είναι να αναπτυχθεί ένα συνεκτικό θεωρητικό και αναλυτικό πλαίσιο για την εφαρμογή των αρχών της Κυκλικής Οικονομίας στη διαχείριση συγκεκριμένων ρευμάτων βιομηχανικών αποβλήτων που σχετίζονται με την τσιμεντοβιομηχανία. Ειδικότερα, επιδιώκεται να αποσαφηνιστούν οι βασικές αρχές της Κυκλικής Οικονομίας, να παρουσιαστούν οι κύριες εφαρμογές της στη βιομηχανία, να αναδειχθεί η συνάφειά της με τον κλάδο τσιμέντου και σκυροδέματος και να τεθεί η βάση για την κατηγοριοποίηση των σχετικών ρευμάτων αποβλήτων. Η εργασία, συνεπώς, δεν αντιμετωπίζει τα απόβλητα ως αδιαφοροποίητη μάζα, αλλά ως διαφορετικές ροές με ιδιαίτερα τεχνικά χαρακτηριστικά και διαφορετική δυνατότητα αξιοποίησης (Kirchherr et al., 2017; Reike et al., 2018).

Οι επιμέρους στόχοι της εργασίας είναι τέσσερις. Αφενός, να παρουσιαστεί η θεωρητική μετάβαση από το γραμμικό στο κυκλικό μοντέλο παραγωγής και να εξηγηθεί γιατί η απλή ανακύκλωση δεν επαρκεί ως πλήρης στρατηγική κυκλικότητας. Δεύτερον, να αναλυθούν οι βιομηχανικές εφαρμογές της Κυκλικής Οικονομίας, με έμφαση στην εσωτερική επανένταξη υλικών, στην υποκατάσταση πρωτογενών πόρων και στη βιομηχανική συμβίωση. Τρίτον, να εξεταστεί η ιδιαίτερη σημασία του κλάδου τσιμέντου και σκυροδέματος λόγω της κλίμακας παραγωγής, των εκπομπών και της τεχνικής δυνατότητας αξιοποίησης δευτερογενών υλικών. Τέταρτον, να διαμορφωθεί μια πρώτη κατηγοριοποίηση βιομηχανικών αποβλήτων που θα υποστηρίξει τη μετέπειτα συγκριτική αξιολόγηση των ρευμάτων (Korhonen et al., 2018; Murray et al., 2017).

Πέρα από τους παραπάνω στόχους, η εργασία επιδιώκει επίσης: (α) να αξιολογήσει τα επιλεγμένα ρεύματα με κοινά τεχνικά, περιβαλλοντικά, οικονομικά και θεσμικά κριτήρια, (β) να συγκρίνει τις πρακτικές των ΤΙΤΑΝ και ΗΡΑΚΛΗ με ενδεικτικές διεθνείς πρακτικές μεγάλων ομίλων και (γ) να διατυπώσει μετρήσιμους δείκτες και εφαρμόσιμες κατευθύνσεις

για την ελληνική τσιμεντοβιομηχανία. Έτσι, η θεωρητική ανάλυση συνδέεται άμεσα με τη συγκριτική αξιολόγηση και την πρακτική εφαρμογή.

Η μεθοδολογική προσέγγιση είναι βιβλιογραφική και θεωρητικό-αναλυτική. Βασίζεται σε επιστημονικά άρθρα που εξετάζουν την Κυκλική Οικονομία ως έννοια, τις εφαρμογές της στη βιομηχανία και τις τεχνικές δυνατότητες μείωσης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του τσιμέντου και του σκυροδέματος. Μάλιστα, εξαιρετική βαρύτητα δίνεται σε μελέτες που αναλύουν την περιβαλλοντική απόδοση κυκλικών λύσεων με όρους κύκλου ζωής και σε εργασίες που εξετάζουν τη χρήση δευτερογενών υλικών ως συμπληρωματικών τσιμεντοειδών υλικών. Η επιλογή αυτή είναι αναγκαία, διότι η τσιμεντοβιομηχανία δεν επιδέχεται επιφανειακές προσεγγίσεις, λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι κάθε υλικό που ενσωματώνεται στην παραγωγή πρέπει να ελεγχθεί ως προς την τεχνική του επίδοση, τη σταθερότητα και την περιβαλλοντική του συμβολή (Kleijer et al., 2017; Tokareva et al., 2023).

Η εργασία υιοθετεί μια επιφυλακτική, αλλά όχι απορριπτική, στάση απέναντι στην Κυκλική Οικονομία. Η επιφύλαξη είναι αναγκαία επειδή η κυκλικότητα συχνά παρουσιάζεται ως αυτονόητη λύση, ενώ η βιβλιογραφία δείχνει ότι δεν συνεπάγεται πάντοτε καθαρό περιβαλλοντικό όφελος. Η μεταφορά, η επεξεργασία, η ενεργειακή κατανάλωση και η ποιότητα των δευτερογενών υλικών μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά το τελικό αποτέλεσμα. Ωστόσο, η κυκλικότητα δεν πρέπει να υποτιμάται, επειδή σε κλάδους υψηλής υλικής έντασης μπορεί να μειώσει ουσιαστικά την κατανάλωση πρωτογενών πόρων και να περιορίσει τις εκπομπές ανά μονάδα προϊόντος. Το ζητούμενο είναι η τεκμηριωμένη εφαρμογή και όχι η άκριτη υιοθέτηση των πρακτικών της (Korhonen et al., 2018; Wijayasundara et al., 2016).

Η σημασία της εργασίας έγκειται στο γεγονός ότι συμβάλλει στην αποσαφήνιση της Κυκλικής Οικονομίας ως συστημικού πλαισίου και όχι ως στενής πρακτικής ανακύκλωσης. Σε εφαρμοσμένο επίπεδο, συνδέει τις αρχές αυτές με έναν κλάδο που βρίσκεται στον πυρήνα των σύγχρονων υποδομών και της βιομηχανικής παραγωγής. Η τσιμεντοβιομηχανία αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα όπου οι κυκλικές πρακτικές πρέπει να κριθούν με αυστηρά κριτήρια περιλαμβάνοντα: τεχνική επάρκεια, περιβαλλοντική αποτελεσματικότητα, οικονομική βιωσιμότητα και θεσμική συμβατότητα (Geissdoerfer et al., 2017; Habert et al., 2020).

Η διάρθρωση της εργασίας ακολουθεί τη λογική της σταδιακής εξειδίκευσης. Το πρώτο κεφάλαιο εισάγει το αντικείμενο, το ερευνητικό πλαίσιο και τη σημασία του θέματος. Το δεύτερο κεφάλαιο αναλύει τις αρχές και τις εφαρμογές της Κυκλικής Οικονομίας, ξεκινώντας από τη θεωρητική θεμελίωση και καταλήγοντας στη συνάφεια με τον κλάδο τσιμέντου και σκυροδέματος. Το τρίτο κεφάλαιο, στο τμήμα που αναπτύσσεται εδώ, εισάγει την κατηγοριοποίηση των βιομηχανικών αποβλήτων, ώστε να καταστεί σαφές ότι διαφορετικά ρεύματα απαιτούν διαφορετικές μεθόδους αξιολόγησης και διαχείρισης (Kirchherr et al., 2017; Vieira et al., 2019).

2. Αρχές και εφαρμογές της Κυκλικής Οικονομίας

2.1 Θεμελιώδεις αρχές της Κυκλικής Οικονομίας

Η Κυκλική Οικονομία δύναται να οριστεί ως ένα σύγχρονο πλαίσιο αναδιάρθρωσης της παραγωγής αλλά και της κατανάλωσης, το οποίο στηρίζεται στην αντίληψη ότι η οικονομική δραστηριότητα δεν πρέπει να καταναλώνει πρωτογενής πόρους απορρίπτοντας τα υπολείμματα με τρόπο γραμμικό, αλλά, αντίθετα, οφείλει να φροντίζει για τη διατήρηση της αξίας των υλικών, όσο το δυνατόν περισσότερο, μέσα στο σύστημα. Πρόκειται για μία μετάβαση εξαιρετικής σημασίας, διότι ουσιαστικά επηρεάζει πολυεπίπεδα τόσο τις ίδιες τις βιομηχανίες και τις πρακτικές τους (π.χ. σχεδιασμός προϊόντων, διαχείριση πρώτων υλών) αλλά και την αξιοποίηση και τελική απόρριψή τους από το χρήστη. Συνεπώς, πρόκειται για ένα σύνθετο σύστημα, με πολλαπλούς δρώντες, το οποίο για να εφαρμοστεί απαιτεί σαφώς μετάβαση από τις βιομηχανίες, αλλά και από την κοινωνία εν γένει (Geissdoerfer et al., 2017; Ghisellini et al., 2016).

Η κατανόηση της Κυκλικής Οικονομίας πραγματοποιείται μέσα από την παρατήρηση του τρόπου με τον οποίο αυτή τροποποιεί το παραδοσιακό μοντέλο της οικονομίας, το οποίο είναι γραμμικό, φροντίζοντας ώστε η αξία των προϊόντων να ενισχύεται σημαντικά. Ενώ στην περίπτωση του γραμμικού μοντέλου παρατηρείται ότι η αξία των υλικών είναι συνήθως βραχυπρόθεσμη (προς κατανάλωση), στην περίπτωση του κυκλικού μοντέλου, ήδη από το στάδιο του σχεδιασμού, υπάρχει η προοπτική της επανένταξης και όχι της απόρριψής. Η πρακτική αυτή συμβάλλει στη διαχείριση των αποβλήτων και διευκολύνει παράλληλες προσπάθειες, όπως η ανακύκλωση, περιορίζοντας των όγκο του υλικού προς απόρριψη (Kirchherr et al., 2017; Reike et al., 2018).

Μία θεμελιώδης αρχή είναι η πρόληψη της δημιουργίας αποβλήτων. Η πρόληψη βρίσκεται στην κορυφή της ιεράρχησης των επιλογών, επειδή το πιο αποτελεσματικό απόβλητο είναι αυτό που δεν δημιουργείται. Στη βιομηχανική πράξη, αυτό σημαίνει σχεδιασμό διεργασιών με λιγότερες απώλειες, ακριβέστερο έλεγχο εισροών, βελτίωση της αποδοτικότητας υλικών και περιορισμό των υπολειμμάτων που απαιτούν μεταγενέστερη επεξεργασία. Η αρχή αυτή έχει ιδιαίτερη βαρύτητα σε κλάδους όπως η τσιμεντοβιομηχανία, όπου οι ποσότητες υλικών είναι

τόσο μεγάλες ώστε ακόμη και μικρά ποσοστά απωλειών μεταφράζονται σε σημαντικούς όγκους αποβλήτων (Ghisellini et al., 2016; Korhonen et al., 2018).

Επίσης, βασική αρχή είναι η διατήρηση της αξίας των προϊόντων, των συστατικών και των υλικών. Η βιβλιογραφία τονίζει ότι οι στρατηγικές κυκλικότητας δεν είναι όλες ισοδύναμες. Η επισκευή, η επαναχρησιμοποίηση και η ανακατασκευή διατηρούν μεγαλύτερο μέρος της ενσωματωμένης αξίας σε σχέση με την απλή ανακύκλωση, η οποία συχνά συνεπάγεται υποβάθμιση υλικών ή απώλεια λειτουργικών χαρακτηριστικών. Στη βιομηχανία των δομικών υλικών, η έννοια αυτή μεταφράζεται στη διατήρηση ποιοτικών χαρακτηριστικών που επιτρέπουν στα υλικά να ξαναχρησιμοποιηθούν με ασφάλεια και προβλέψιμη απόδοση. Η διατήρηση της αξίας, επομένως, δεν είναι μόνο οικονομική έννοια, αλλά είναι και τεχνική απαίτηση (Reike et al., 2018; Murray et al., 2017).

Τέλος, το κλείσιμο αναφέρεται στην επανεισαγωγή υλικών ροών στην παραγωγή, είτε εντός της ίδιας μονάδας είτε μεταξύ διαφορετικών παραγωγικών δραστηριοτήτων. Η πρακτική αυτή μειώνει την ανάγκη για πρωτογενείς πρώτες ύλες και περιορίζει τις εκροές αποβλήτων. Ωστόσο, το κλείσιμο των κύκλων δεν πρέπει να αντιμετωπίζεται μηχανικά. Ένας κύκλος μπορεί να είναι περιβαλλοντικά συμφέρον μόνο όταν η συλλογή, η μεταφορά και η επεξεργασία του υλικού δεν δημιουργούν μεγαλύτερη επιβάρυνση από αυτή που αποφεύγεται. Στο σημείο αυτό ανακύπτει και η ανάγκη για αξιολόγηση κύκλου ζωής και όχι για αποσπασματική κρίση (Geissdoerfer et al., 2017; Korhonen et al., 2018).

Μία ακόμη σημαντική αρχή είναι η επιβράδυνση των κύκλων χρήσης, η οποία σημαίνει ότι τα προϊόντα και τα υλικά παραμένουν σε χρήσιμη κατάσταση για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Σε καταναλωτικά προϊόντα αυτό μπορεί να σημαίνει επισκευασιμότητα ή ανθεκτικό σχεδιασμό. Στα δομικά υλικά και στο σκυρόδεμα, η αντίστοιχη λογική αφορά την ανθεκτικότητα των κατασκευών, τη μείωση της ανάγκης πρόωρων αντικαταστάσεων και τη δυνατότητα αξιοποίησης υλικών κατά την αποδόμηση. Η επιβράδυνση είναι συχνά λιγότερο θεαματική από την ανακύκλωση, αλλά έχει μεγάλη πρακτική σημασία, επειδή μειώνει τη συνολική υλική ζήτηση σε βάθος χρόνου (Geissdoerfer et al., 2017; Reike et al., 2018).

Επιπρόσθετα, σημαντική θεωρείται η στένωση των υλικών και ενεργειακών ροών, δηλαδή η παραγωγή της ίδιας λειτουργικής αξίας με λιγότερες εισροές. Στη βιομηχανία, η αρχή αυτή εκφράζεται μέσω της βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης, της μείωσης της υλικής έντασης

και της βελτιστοποίησης των διεργασιών. Στην περίπτωση του τσιμέντου, η στένωση μπορεί να συνδέεται με την παραγωγή τσιμέντων χαμηλότερου κλίνκερ, με τη χρήση κατάλληλων συμπληρωματικών υλικών και με τη βελτίωση της τεχνολογίας κλιβάνου. Δεν πρόκειται για αφηρημένη οικολογική πρόθεση, αλλά για άμεση σύνδεση ανάμεσα στην παραγωγική τεχνολογία και στο περιβαλλοντικό αποτέλεσμα (Scrivener et al., 2018; Habert et al., 2020).

Στο μοντέλο της Κυκλικής Οικονομίας προτείνεται η υποκατάσταση πρωτογενών πόρων από δευτερογενή υλικά και παραπροϊόντα, η οποία αποτελεί βασική πρακτική κυκλικότητας σε βιομηχανικούς κλάδους, επειδή μετατρέπει μια ροή που παλαιότερα θεωρούνταν απόβλητο σε παραγωγικό πόρο. Η επιτυχία της, ωστόσο, προϋποθέτει τεχνική συμβατότητα και σταθερή ποιότητα. Δεν αρκεί να υπάρχει διαθέσιμο υλικό, αλλά πρέπει να πληροί τις απαιτήσεις της διεργασίας και του τελικού προϊόντος. Στην τσιμεντοβιομηχανία, η απαίτηση αυτή είναι αποφασιστική, διότι η ασφάλεια και η ανθεκτικότητα των τελικών υλικών αποτελούν αδιαπραγμάτευτες παραμέτρους (Ghisellini et al., 2016; Tokareva et al., 2023).

Η βιομηχανική συμβίωση αποτελεί πρακτική έκφραση της υποκατάστασης πόρων σε διακλαδικό επίπεδο. Κατά συνέπεια, τα υπολείμματα μιας βιομηχανικής δραστηριότητας μπορούν να γίνουν εισροές για μια άλλη. Πρόκειται για μία ήδη υπάρχουσα πρακτική, η οποία όμως αποκτά νέα θεωρητική βαρύτητα μέσα από την Κυκλική Οικονομία. Η βιομηχανική συμβίωση απαιτεί γεωγραφική εγγύτητα, συμφωνία προδιαγραφών, αξιόπιστη διαθεσιμότητα υλικών και θεσμική σαφήνεια σχετικά με το αν μια ροή θεωρείται απόβλητο, παραπροϊόν ή δευτερογενής πρώτη ύλη (Ghisellini et al., 2016; Murray et al., 2017).

Η Κυκλική Οικονομία συνδέεται επίσης με την αρχή της συστημικής σκέψης. Η συστημική σκέψη υπενθυμίζει ότι μια αλλαγή σε ένα σημείο της αλυσίδας μπορεί να δημιουργήσει συνέπειες σε άλλα σημεία. Για παράδειγμα, η αντικατάσταση ενός πρωτογενούς υλικού από ένα δευτερογενές μπορεί να μειώνει την εξόρυξη, αλλά να αυξάνει την ανάγκη επεξεργασίας ή μεταφοράς. Αν η αξιολόγηση περιοριστεί σε ένα μόνο στάδιο, το αποτέλεσμα μπορεί να είναι παραπλανητικό. Για τον λόγο αυτό, η Κυκλική Οικονομία χρειάζεται εργαλεία συνολικής αποτίμησης, όπως η ανάλυση κύκλου ζωής, ώστε να αποφεύγονται μετατοπίσεις επιβάρυνσης από ένα στάδιο σε άλλο (Korhonen et al., 2018; Wijayasundara et al., 2016).

Σημαντική διάσταση της Κυκλικής Οικονομίας είναι και η διάκριση ανάμεσα στην ποσότητα και στην ποιότητα της κυκλικότητας. Ένα σύστημα μπορεί να ανακυκλώνει μεγάλες ποσότητες

υλικών, αλλά να παράγει χαμηλής αξίας δευτερογενή προϊόντα ή να προκαλεί σημαντική ενεργειακή κατανάλωση. Αντίθετα, μια πιο περιορισμένη αλλά τεχνικά ελεγχόμενη επανένταξη μπορεί να έχει μεγαλύτερη πραγματική αξία. Στην περίπτωση των δομικών υλικών, η ποιότητα έχει ιδιαίτερη σημασία, επειδή τα υλικά ενσωματώνονται σε κατασκευές με μακρά διάρκεια ζωής και υψηλές απαιτήσεις ασφάλειας. Η κυκλικότητα χωρίς ποιοτικό έλεγχο είναι περισσότερο ρίσκο παρά λύση (Reike et al., 2018; Tokareva et al., 2023).

Η έννοια των R-strategies, δηλαδή των στρατηγικών όπως refuse, reduce, reuse, repair, refurbish, remanufacture, repurpose, recycle και recover, προσφέρει χρήσιμο πλαίσιο κατανόησης της ιεράρχησης των κυκλικών επιλογών. Όσο υψηλότερα βρίσκεται μια στρατηγική στην ιεράρχηση, τόσο μεγαλύτερη αξία διατηρείται στο σύστημα. Η ανακύκλωση, αν και αναγκαία, βρίσκεται χαμηλότερα από την επαναχρησιμοποίηση ή τη μείωση, επειδή συνήθως απαιτεί επεξεργασία και οδηγεί σε απώλεια μέρους της αρχικής λειτουργικότητας. Στον κλάδο τσιμέντου και σκυροδέματος, η πλήρης επαναχρησιμοποίηση προϊόντων είναι συχνά δύσκολη, αλλά η μείωση του κλίνκερ, η χρήση SCMs και η αξιοποίηση ανακυκλωμένων αδρανών μπορούν να λειτουργήσουν ως ρεαλιστικές κυκλικές στρατηγικές (Reike et al., 2018; Habert et al., 2020).

Οι περιορισμοί της Κυκλικής Οικονομίας πρέπει να αναγνωρίζονται με σαφήνεια. Η βιβλιογραφία επισημαίνει ότι η κυκλικότητα δεν μπορεί να εξαλείψει πλήρως την ανάγκη πρωτογενών πόρων, διότι υπάρχουν απώλειες υλικών, υποβάθμιση ποιότητας και αυξανόμενη ζήτηση. Επιπλέον, σε αναπτυσσόμενους τομείς όπως οι υποδομές, η συνολική υλική ζήτηση μπορεί να ξεπερνά τις διαθέσιμες δευτερογενείς ροές. Άρα, η Κυκλική Οικονομία δεν πρέπει να παρουσιάζεται ως μαγικό ραβδί. Μπορεί να μειώσει σημαντικά την πίεση στους πόρους, αλλά δεν καταργεί την ανάγκη για υπεύθυνο σχεδιασμό, τεχνολογική βελτίωση και μείωση σπατάλης (Korhonen et al., 2018; Kirchherr et al., 2017).

Η κοινωνικοοικονομική διάσταση της Κυκλικής Οικονομίας είναι επίσης κρίσιμη, αφού η μετάβαση σε κυκλικά μοντέλα δεν πραγματοποιείται μόνο με τεχνικές λύσεις, αλλά απαιτεί επιχειρηματικά κίνητρα, κανονιστική σταθερότητα, αποδοχή από την αγορά και αλλαγή πρακτικών στους παραγωγούς και στους χρήστες. Στη βιομηχανία, οι αποφάσεις λαμβάνονται με βάση το κόστος, τη διαθεσιμότητα, τον κίνδυνο και την αξιοπιστία των εισροών. Αν ένα δευτερογενές υλικό είναι φθηνό αλλά ασταθές, δύσκολα θα υιοθετηθεί σε κρίσιμη παραγωγική

διεργασία. Συνεπώς, η Κυκλική Οικονομία χρειάζεται θεσμούς και αγορές που να μειώνουν την αβεβαιότητα και να ενθαρρύνουν την ασφαλή χρήση δευτερογενών υλικών (Murray et al., 2017; Ghisellini et al., 2016).

Η θεμελίωση της Κυκλικής Οικονομίας συνδέεται τελικά με μια πιο ώριμη αντίληψη της αποδοτικότητας. Η παλαιότερη βιομηχανική λογική συχνά ταύτιζε την αποδοτικότητα με την αύξηση παραγωγής και τη μείωση άμεσου κόστους. Η κυκλική προσέγγιση διευρύνει την έννοια της αποδοτικότητας, ενσωματώνοντας το κόστος των υλικών απωλειών, της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης και της εξάρτησης από πρωτογενείς πόρους. Αυτό δεν σημαίνει εγκατάλειψη της βιομηχανικής λογικής· αντιθέτως, σημαίνει πιο σοβαρή και μακροπρόθεσμη βιομηχανική λογική. Η παραγωγή παραμένει αναγκαία, αλλά οφείλει να γίνει πιο προσεκτική, πιο μετρήσιμη και λιγότερο σπάταλη (Geissdoerfer et al., 2017; Korhonen et al., 2018).

Οι θεμελιώδεις αρχές της Κυκλικής Οικονομίας μπορούν να συνοψιστούν στην πρόληψη αποβλήτων, στη διατήρηση αξίας, στο κλείσιμο, στη στένωση και στην επιβράδυνση των κύκλων υλικών, στην υποκατάσταση πρωτογενών πόρων και στη συστημική αξιολόγηση των επιπτώσεων. Οι αρχές αυτές αποτελούν το θεωρητικό υπόβαθρο για την ανάλυση της βιομηχανικής εφαρμογής που ακολουθεί. Ιδίως στην τσιμεντοβιομηχανία, όπου οι υλικές ποσότητες είναι τεράστιες και οι τεχνικές απαιτήσεις αυστηρές, οι αρχές της Κυκλικής Οικονομίας δεν μπορούν να εφαρμόζονται αποσπασματικά. Χρειάζονται τεχνικό έλεγχο, αξιολόγηση κύκλου ζωής και θεσμική υποστήριξη, διαφορετικά η κυκλικότητα δεν επιτυγχάνεται και δεν οδηγεί στα αναμενόμενα οφέλη (Scrivener et al., 2018; Habert et al., 2020).

Αρχή	Περιεχόμενο	Σημασία για βιομηχανικές εφαρμογές
Πρόληψη	Μείωση αποβλήτων ήδη από τον σχεδιασμό προϊόντων και διεργασιών.	Περιορίζει κόστος διαχείρισης και κατανάλωση πόρων.
Διατήρηση αξίας	Παράταση χρήσης και αποφυγή υποβάθμισης υλικών.	Στηρίζει υψηλότερης αξίας αξιοποίηση έναντι απλής διάθεσης.
Κλείσιμο κύκλων	Επανεισαγωγή υλικών ροών στην παραγωγή.	Μειώνει πρωτογενείς εισροές και εκροές αποβλήτων.
Στένωση κύκλων	Παραγωγή ίδιας λειτουργικής αξίας με λιγότερες εισροές.	Συνδέεται με ενεργειακή και υλική αποδοτικότητα.
Συστημική αξιολόγηση	Έλεγχος συνολικών επιπτώσεων σε επίπεδο κύκλου ζωής.	Αποφεύγει μετατόπιση προβλημάτων σε άλλα στάδια.

Πίνακας 1 Συνοπτική αποτύπωση θεμελιωδών αρχών της Κυκλικής Οικονομίας

Ο Πίνακας 1 δείχνει ότι η Κυκλική Οικονομία δεν ταυτίζεται με μία μόνο πρακτική, αλλά οι αρχές της συγκροτούν ιεραρχημένο πλαίσιο παρέμβασης, το οποίο ξεκινά από την πρόληψη και καταλήγει στην ελεγχόμενη ανάκτηση ή αξιοποίηση υλικών. Η διάκριση αυτή είναι κρίσιμη για την τσιμεντοβιομηχανία, επειδή ο κλάδος χρειάζεται τεχνικά τεκμηριωμένες επιλογές με μετρήσιμη επίδοση (Reike et al., 2018; Korhonen et al., 2018).

2.2 Εφαρμογές της Κυκλικής Οικονομίας στη βιομηχανία

Η Κυκλική Οικονομία για να εφαρμοστεί στην οικονομία απαιτεί σημαντικές προσαρμογές οι οποίες εστιάζουν στην πρακτική εφαρμογή. Η ένταξη ενός μοντέλου στην βιομηχανική πρακτική απαιτεί προσεγμένη εξέταση και στρατηγική, ώστε να αποφευχθούν λάθη που, εν τέλει, θα καταστήσουν τη βιομηχανία μη βιώσιμη ή θα πλήξουν την ποιότητα/λειτουργικότητα των προϊόντων που εξάγονται. Επομένως, η κυκλικότητα απαιτεί προσεκτική μελέτη και

εύλογο προγραμματισμό, ο οποίος να έχει εστιάσει στα μοναδικά χαρακτηριστικά κάθε γραμμής παραγωγής, όπως πρώτες ύλες, μηχανήματα, θερμοκρασίες, προδιαγραφές, κόστος και συμβάσεις προμήθειας. Επομένως, η κυκλικότητα αποκτά νόημα μόνο όταν μπορεί να μεταφραστεί σε αξιόπιστες τεχνικές και οργανωτικές πρακτικές και, στη βιομηχανία, οι βασικές εφαρμογές αφορούν την εσωτερική επανένταξη υπολειμμάτων, την υποκατάσταση πρωτογενών υλικών, τη βιομηχανική συμβίωση, την αξιοποίηση δευτερογενών καυσίμων και υλικών, καθώς και την αναδιοργάνωση της αλυσίδας εφοδιασμού με βάση την αποδοτικότερη χρήση πόρων (Ghisellini et al., 2016; Korhonen et al., 2018).

Η πρώτη κατηγορία εφαρμογών αφορά την εσωτερική διαχείριση υλικών ροών, καθώς σε μια βιομηχανική μονάδα, η συστηματική καταγραφή των εισροών και εκροών επιτρέπει τον εντοπισμό απωλειών, παραπροϊόντων και υπολειμμάτων που μπορούν να επανενταχθούν στη διαδικασία. Η πρακτική αυτή απαιτεί τεχνική παρακολούθηση και όχι μόνο διοικητική καταγραφή. Τα υλικά πρέπει να διαχωρίζονται, να αποθηκεύονται με κατάλληλο τρόπο και να ελέγχονται ως προς τα χαρακτηριστικά τους. Όταν η επανένταξη γίνεται χωρίς επαρκή έλεγχο, μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την ποιότητα του τελικού προϊόντος. Όταν γίνεται σωστά, μειώνει την κατανάλωση νέων πρώτων υλών και περιορίζει την ποσότητα αποβλήτων που οδηγείται σε εξωτερική διαχείριση (Geissdoerfer et al., 2017; Vieira et al., 2019).

Στις μονάδες παραγωγής σκυροδέματος, η εσωτερική διαχείριση υλικών ροών έχει άμεση πρακτική σημασία. Οι επιστροφές νωπού σκυροδέματος, τα νερά πλύσης και η λάσπη από τις διαδικασίες καθαρισμού αποτελούν ρεύματα που παράγονται καθημερινά. Η παραδοσιακή αντιμετώπισή τους ως προβλήματος διάθεσης δεν αρκεί πλέον. Η κυκλική προσέγγιση εξετάζει αν μπορούν να ανακτηθούν αδρανή, να επαναχρησιμοποιηθεί νερό ή να αξιοποιηθεί μέρος του υπολείμματος ως υλικό εισροής. Βέβαια, η εφαρμογή απαιτεί έλεγχο της περιεκτικότητας σε λεπτόκοκκα, του pH, της μεταβλητότητας και των επιπτώσεων στις ιδιότητες του σκυροδέματος. Η πρακτική αξία υπάρχει, αλλά μόνο αν συνοδεύεται από ποιοτικό έλεγχο (Kleijer et al., 2017; Vieira et al., 2019).

Η δεύτερη κατηγορία εφαρμογών αφορά την υποκατάσταση πρωτογενών πρώτων υλών από δευτερογενή υλικά. Πρόκειται για κεντρική στρατηγική κυκλικότητας στη βιομηχανία, επειδή μειώνει την εξάρτηση από εξορύξεις και αξιοποιεί ροές που διαφορετικά θα θεωρούνταν απόβλητα. Στην πράξη, η υποκατάσταση απαιτεί αντιστοίχιση ανάμεσα στις ιδιότητες του

δευτερογενούς υλικού και στις απαιτήσεις της παραγωγικής διεργασίας. Η χημική σύσταση, η υγρασία, η κοκκομετρία, η καθαρότητα και η σταθερότητα είναι παράγοντες που καθορίζουν την καταλληλότητα. Όσο πιο κρίσιμη είναι η τελική χρήση του προϊόντος, τόσο αυστηρότερες είναι οι προδιαγραφές (Ghisellini et al., 2016; Tokareva et al., 2023).

Η βιομηχανική συμβίωση αποτελεί τρίτη βασική εφαρμογή. Η ιδέα είναι ότι διαφορετικές βιομηχανικές μονάδες μπορούν να λειτουργούν ως δίκτυο, όπου τα παραπροϊόντα της μιας αποτελούν εισροές της άλλης. Η πρακτική αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική όταν υπάρχουν γεωγραφικά συγκεντρωμένες βιομηχανικές δραστηριότητες, σταθερές ροές υλικών και σαφές θεσμικό πλαίσιο. Στην τσιμεντοβιομηχανία, η δυνατότητα χρήσης παραπροϊόντων άλλων κλάδων, όπως σκωρίας ή τέφρας, αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα. Παρ' όλα αυτά, η βιομηχανική συμβίωση χρειάζεται εμπιστοσύνη μεταξύ επιχειρήσεων, συμβατική σταθερότητα, πρόβλεψη ποιότητας και μηχανισμούς ελέγχου, αλλιώς η συνεργασία καταρρέει μόλις εμφανιστεί το πρώτο τεχνικό πρόβλημα (Ghisellini et al., 2016; Murray et al., 2017).

Σημαντικότερος παράγοντας, επίσης, είναι ο οικολογικός και κυκλικός σχεδιασμός παραγωγικών διεργασιών. Στη βιομηχανία, ο σχεδιασμός δεν αφορά μόνο το τελικό προϊόν, αλλά και το πώς οργανώνεται η ίδια η παραγωγή. Η μείωση των απωλειών, η ανάκτηση θερμότητας, η βελτιστοποίηση κατανάλωσης ενέργειας και η επιλογή υλικών με δυνατότητα επανένταξης αποτελούν μέτρα που ενισχύουν την κυκλικότητα. Η προσέγγιση αυτή είναι πιο απαιτητική από την απλή διαχείριση αποβλήτων, επειδή προϋποθέτει παρέμβαση πριν δημιουργηθεί το πρόβλημα (Geissdoerfer et al., 2017; Korhonen et al., 2018).

Η αξιοποίηση εργαλείων ανάλυσης κύκλου ζωής για τη λήψη αποφάσεων είναι, φυσικά, απαραίτητη για την ορθή εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας έμπρακτα. Η LCA επιτρέπει την εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την εξόρυξη πρώτων υλών έως την παραγωγή, τη χρήση και το τέλος ζωής. Στις κυκλικές εφαρμογές, η LCA είναι κρίσιμη επειδή αποτρέπει απλουστεύσεις. Ένα ανακυκλωμένο υλικό δεν είναι αυτομάτως καλύτερο από ένα πρωτογενές, αν απαιτεί υπερβολική επεξεργασία ή μεταφέρεται σε μεγάλες αποστάσεις. Αντίστοιχα, μια λύση χαμηλών εκπομπών στην παραγωγή μπορεί να δημιουργεί προβλήματα αν μειώνει τη διάρκεια ζωής του προϊόντος. Η συνολική αξιολόγηση είναι, λοιπόν, απαραίτητη για σοβαρές αποφάσεις (Kleijer et al., 2017; Wijayasundara et al., 2016).

Η οικονομική διάσταση των βιομηχανικών εφαρμογών δεν μπορεί να αγνοηθεί. Η Κυκλική Οικονομία συχνά παρουσιάζεται ως περιβαλλοντικά επιθυμητή, αλλά η εφαρμογή της σε βιομηχανική κλίμακα απαιτεί οικονομική βιωσιμότητα. Το κόστος συλλογής, επεξεργασίας, αποθήκευσης, πιστοποίησης και μεταφοράς δευτερογενών υλικών μπορεί να είναι σημαντικό. Αν το κόστος αυτό υπερβαίνει το όφελος ή αν δημιουργεί υπερβολικό παραγωγικό ρίσκο, οι επιχειρήσεις δύσκολα θα υιοθετήσουν τη λύση σε σταθερή βάση. Γι' αυτό, η κυκλικότητα χρειάζεται συνδυασμό περιβαλλοντικών στόχων και οικονομικών κινήτρων (Murray et al., 2017; Korhonen et al., 2018).

Η θεσμική διάσταση είναι εξίσου κρίσιμη. Η ταξινόμηση μιας ροής ως αποβλήτου ή παραπροϊόντος επηρεάζει το κόστος, τις άδειες, τις ευθύνες και τη δυνατότητα μεταφοράς ή χρήσης της. Σε αρκετές περιπτώσεις, η τεχνική δυνατότητα αξιοποίησης υπάρχει, αλλά η κανονιστική αβεβαιότητα λειτουργεί ανασταλτικά. Οι επιχειρήσεις διστάζουν να επενδύσουν σε υλικά των οποίων το νομικό καθεστώς δεν είναι σαφές ή μπορεί να αλλάξει. Η Κυκλική Οικονομία, επομένως, δεν χρειάζεται μόνο μηχανικούς και περιβαλλοντολόγους· χρειάζεται και σαφείς κανόνες. Η απουσία θεσμικής σταθερότητας μπορεί να ακυρώσει ακόμη και τεχνικά ώριμες λύσεις (Ghisellini et al., 2016; Korhonen et al., 2018).

Η εφαρμογή της Κυκλικής Οικονομίας στη βιομηχανία επηρεάζεται επίσης από τη διαθεσιμότητα δευτερογενών υλικών. Μια βιομηχανική μονάδα χρειάζεται σταθερές ποσότητες και προβλέψιμη ποιότητα. Αν ένα υλικό είναι διαθέσιμο μόνο περιστασιακά ή με μεγάλες διακυμάνσεις σύνθεσης, δύσκολα μπορεί να ενσωματωθεί σε βασική παραγωγική διαδικασία. Η σταθερότητα είναι πιο σημαντική από όσο φαίνεται σε θεωρητικό επίπεδο. Στην παραγωγή τσιμέντου και σκυροδέματος, η αλλαγή σύστασης επηρεάζει την ενυδάτωση, την αντοχή, τον χρόνο πήξης και τη μακροχρόνια συμπεριφορά. Συνεπώς, η βιομηχανική αξιοποίηση δευτερογενών υλικών χρειάζεται συστηματικές αλυσίδες προμήθειας και όχι ευκαιριακή περισυλλογή υπολειμμάτων (Scrivener et al., 2018; Tokareva et al., 2023).

Ένα ακόμη πρακτικό πεδίο εφαρμογής είναι η δημιουργία προτύπων ποιότητας για δευτερογενή υλικά. Τα πρότυπα επιτρέπουν στην αγορά να γνωρίζει τι αγοράζει και στην παραγωγή να ενσωματώνει υλικά με προβλέψιμη συμπεριφορά. Χωρίς πρότυπα, τα δευτερογενή υλικά αντιμετωπίζονται συχνά με καχυποψία, ακόμη κι όταν διαθέτουν αξιόλογες ιδιότητες. Στον κλάδο των δομικών υλικών, η καχυποψία αυτή δεν είναι παράλογη, διότι η

αποτυχία υλικού μπορεί να έχει σοβαρές συνέπειες. Η λύση δεν είναι να χαμηλώσουν οι απαιτήσεις, αλλά να δημιουργηθούν αξιόπιστες διαδικασίες ελέγχου που θα επιτρέπουν τη χρήση κατάλληλων δευτερογενών ροών με ασφάλεια (Reike et al., 2018; Habert et al., 2020).

Η τεχνολογική καινοτομία υποστηρίζει τη βιομηχανική κυκλικότητα με διάφορους τρόπους. Η βελτίωση τεχνικών διαχωρισμού, άλεσης, θερμικής επεξεργασίας και χαρακτηρισμού υλικών καθιστά δυνατή την αξιοποίηση ροών που παλαιότερα θεωρούνταν χαμηλής αξίας. Τα λεπτόκοκκα απόβλητα κατεδαφίσεων, για παράδειγμα, μπορούν να εξεταστούν ως πληρωτικά ή ως συμπληρωματικά τσιμεντοειδή υλικά, εφόσον υποστούν κατάλληλο χαρακτηρισμό και επεξεργασία. Η καινοτομία, όμως, πρέπει να κριθεί με βάση τη συνολική της απόδοση. Αν η τεχνική επεξεργασία καταναλώνει υπερβολική ενέργεια, η περιβαλλοντική ωφέλεια μπορεί να περιοριστεί (Tokareva et al., 2023; Korhonen et al., 2018).

Στη βιομηχανία, οι κυκλικές εφαρμογές έχουν και οργανωτική διάσταση, καθώς απαιτούν συνεργασία μεταξύ τμημάτων παραγωγής, περιβαλλοντικής διαχείρισης, προμηθειών, ποιοτικού ελέγχου και οικονομικής διοίκησης. Η απόφαση χρήσης ενός δευτερογενούς υλικού δεν μπορεί να ληφθεί μόνο από το περιβαλλοντικό τμήμα, διότι επηρεάζει την παραγωγή και την ποιότητα. Αντίστοιχα, δεν μπορεί να ληφθεί μόνο με οικονομικά κριτήρια, διότι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις μπορεί να είναι κρίσιμες. Η Κυκλική Οικονομία, όταν εφαρμόζεται σοβαρά, σπάει τα διοικητικά στεγανά και αναγκάζει την επιχείρηση να βλέπει τις ροές υλικών ως κοινό αντικείμενο στρατηγικής (Geissdoerfer et al., 2017; Murray et al., 2017).

Η παραγωγή έτοιμου σκυροδέματος προσφέρει ένα σαφές παράδειγμα των δυσκολιών και των δυνατοτήτων της κυκλικότητας. Η ανακύκλωση επιστροφών σκυροδέματος και η παραγωγή ανακυκλωμένων αδρανών μπορούν να μειώσουν την ανάγκη διάθεσης και να περιορίσουν την κατανάλωση φυσικών αδρανών. Ωστόσο, τα ανακυκλωμένα αδρανή έχουν συχνά διαφορετική υδατοαπορρόφηση, πυκνότητα και επιφανειακή μορφολογία σε σχέση με τα φυσικά, γεγονός το οποίο σημαίνει ότι η χρήση τους μπορεί να απαιτήσει προσαρμογή συνθέσεων σκυροδέματος και έλεγχο μηχανικών ιδιοτήτων. Η κυκλικότητα συνιστά, ουσιαστικά, επανασχεδιασμό μίγματος και παραγωγικής πρακτικής (Kleijer et al., 2017; Vieira et al., 2019).

Η εφαρμογή της Κυκλικής Οικονομίας στη βιομηχανία μπορεί να οδηγήσει και σε μείωση περιβαλλοντικών επιπτώσεων πέρα από τα απόβλητα. Η υποκατάσταση κλίνκερ, για παράδειγμα, δεν μειώνει μόνο τη χρήση ασβεστόλιθου, αλλά και τις εκπομπές διεργασίας που

προκύπτουν από την ασβεστοποίηση. Επομένως, η επιλογή δευτερογενών ή συμπληρωματικών τσιμεντοειδών υλικών μπορεί να επηρεάσει άμεσα το ανθρακικό αποτύπωμα του τσιμέντου. Η σχέση αυτή η οποία και διαμορφώνεται κάνει την τσιμεντοβιομηχανία ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα για την Κυκλική Οικονομία, διότι δύναται να συνδεθεί με τον πυρήνα των εκπομπών του κλάδου (Scrivener et al., 2018; Habert et al., 2020).

Παρά τα οφέλη που σαφώς είναι αδιαμφισβήτητα, οι βιομηχανικές εφαρμογές της Κυκλικής Οικονομίας αντιμετωπίζουν κινδύνους υποβάθμισης ή μετατόπισης προβλήματος. Η υποβάθμιση εμφανίζεται όταν ένα υλικό επανεντάσσεται σε χαμηλότερης αξίας χρήση χωρίς προοπτική περαιτέρω αξιοποίησης. Η μετατόπιση προβλήματος εμφανίζεται όταν η μείωση ενός τύπου επιβάρυνσης συνοδεύεται από αύξηση άλλου, για παράδειγμα λιγότερα απόβλητα αλλά περισσότερη ενέργεια (Korhonen et al., 2018; Wijayasundara et al., 2016).

Η επιτυχία των εφαρμογών εξαρτάται και από τη χωρική διάσταση, διότι οι μεταφορικές αποστάσεις επηρεάζουν το οικονομικό και περιβαλλοντικό ισοζύγιο, ιδίως όταν πρόκειται για βαριά υλικά χαμηλής μοναδιαίας αξίας, όπως τα αδρανή ή τα υπολείμματα σκυροδέματος. Ένα υλικό μπορεί να είναι τεχνικά κατάλληλο, αλλά να μην είναι πρακτικά βιώσιμο αν απαιτεί μεγάλη μεταφορά. Αυτός είναι ένας από τους λόγους για τους οποίους οι κυκλικές λύσεις στον τομέα των δομικών υλικών έχουν συχνά τοπικό ή περιφερειακό χαρακτήρα. Η εγγύτητα μεταξύ πηγής αποβλήτου και μονάδας αξιοποίησης είναι κρίσιμη παράμετρος (Kleijer et al., 2017; Wijayasundara et al., 2016).

Συνοψίζοντας, η βιομηχανική εφαρμογή της Κυκλικής Οικονομίας περιλαμβάνει τεχνικές, οργανωτικές, οικονομικές και θεσμικές επιλογές. Η εσωτερική ανακύκλωση, η υποκατάσταση πρώτων υλών, η βιομηχανική συμβίωση, η ανάλυση κύκλου ζωής και η δημιουργία προτύπων ποιότητας αποτελούν βασικές πρακτικές. Η αποτελεσματικότητά τους, όμως, δεν είναι δεδομένη. Εξαρτάται από τη σταθερότητα των ροών, τη συμβατότητα με τις διεργασίες, το κόστος, το κανονιστικό πλαίσιο και το συνολικό περιβαλλοντικό ισοζύγιο. Η συγκεκριμένη διαπίστωση οδηγεί αναγκαστικά στη μελέτη ενός συγκεκριμένου κλάδου, όπου οι γενικές αρχές μπορούν να αξιολογηθούν με τρόπο άμεσο, τον κλάδο τσιμέντου και σκυροδέματος (Ghisellini et al., 2016; Habert et al., 2020).

Πρακτική	Βασικός μηχανισμός	Προϋποθέσεις	Κύριος περιορισμός
Εσωτερική επανένταξη	Ανάκτηση υπολειμμάτων ίδιας μονάδας	Διαχωρισμός, σταθερή ποιότητα, έλεγχος	Επίδραση στο τελικό προϊόν
Υποκατάσταση πόρων	Χρήση δευτερογενών υλικών	Τεχνική συμβατότητα και επάρκεια ποσοτήτων	Μεταβλητότητα υλικών
Βιομηχανική συμβίωση	Ροές μιας μονάδας ως εισροές άλλης	Γεωγραφική εγγύτητα και συμβάσεις	Θεσμική αβεβαιότητα
Ανάλυση κύκλου ζωής	Συνολική αποτίμηση επιπτώσεων	Αξιόπιστα δεδομένα και λειτουργική μονάδα	Κίνδυνος ελλιπών παραδοχών

Πίνακας 2 Ενδεικτικές εφαρμογές Κυκλικής Οικονομίας στη βιομηχανία

Οι εφαρμογές του Πίνακα 2 δείχνουν ότι η βιομηχανική κυκλικότητα είναι πολυπαραμετρική. Η τεχνική δυνατότητα δεν αρκεί χωρίς οικονομική βιωσιμότητα, θεσμική σαφήνεια και περιβαλλοντική τεκμηρίωση. Ειδικά στα δομικά υλικά, η αξιολόγηση πρέπει να συνδέεται με τη λειτουργική απόδοση και τη διάρκεια ζωής του τελικού προϊόντος, διότι μια λύση με φαινομενικά χαμηλές εκπομπές μπορεί να αποδειχθεί προβληματική αν μειώνει την ανθεκτικότητα ή αυξάνει τις ανάγκες συντήρησης (Kleijer et al., 2017; Wijayasundara et al., 2016).

2.3 Συνάφεια της Κυκλικής Οικονομίας με τον κλάδο τσιμέντου και σκυροδέματος

Ο κλάδος που επιλέχθηκε προς μελέτη συνιστά ένα πρόσφορο πεδίο για τη μελέτη των εφαρμογών Κυκλικής Οικονομίας, ακριβώς λόγω της τεράστιας παραγωγής του και του σημαντικού του περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Χρησιμοποιείται με εξαιρετική διάδοση σε παγκόσμιο επίπεδο και είναι υπεύθυνο για την περιβαλλοντική υποβάθμιση πολλών περιοχών

και τη ραγδαία μείωση των φυσικών πόρων. Το τελικό σύνθετο υλικό, γνωστό ως σκυρόδεμα, χρησιμοποιείται εκτεταμένα στην παραγωγή κτιρίων, γεγονός το οποίο το καθιστά ένα από τα πλέον σημαντικά βιομηχανικά υλικά. Παράλληλα, στηρίζει την κατασκευή κτιρίων, υποδομών, δικτύων μεταφοράς και έργων κοινής ωφέλειας, γεγονός το οποίο δείχνει πως η χρήση του είναι αναγκαία (Scrivener et al., 2018; Habert et al., 2020).

Η παραγωγή τσιμέντου δημιουργεί εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από δύο βασικές πηγές. Η πρώτη είναι η κατανάλωση καυσίμων για την επίτευξη των υψηλών θερμοκρασιών που απαιτούνται στον κλίβανο. Η δεύτερη, και ιδιαίτερα κρίσιμη, είναι η χημική αντίδραση ασβεστοποίησης του ασβεστόλιθου κατά την παραγωγή κλίνκερ. Οι εκπομπές διεργασίας είναι ενσωματωμένες στη χημεία της παραγωγής και δεν μπορούν να εξαλειφθούν απλώς με καλύτερους καυστήρες. Γι' αυτό, η μείωση του αποτυπώματος του κλάδου απαιτεί παρεμβάσεις στη σύνθεση του τσιμέντου, στη χρήση συμπληρωματικών υλικών και στον περιορισμό της αναλογίας κλίνκερ (Scrivener et al., 2018; Habert et al., 2020).

Η Κυκλική Οικονομία συνδέεται με τον κλάδο μέσα από δύο κύριες διαδρομές οι οποίες αφορούν την αξιοποίηση δευτερογενών υλικών στην παραγωγή τσιμέντου, είτε ως εναλλακτικές πρώτες ύλες είτε ως συμπληρωματικά τσιμεντοειδή υλικά και τη διαχείριση ρευμάτων που παράγονται στην παραγωγή και χρήση σκυροδέματος, όπως επιστροφές, νερά πλύσης, λάσπες και ανακυκλωμένα αδρανή. Οι δύο διαδρομές δεν είναι ανεξάρτητες. Η πρώτη επηρεάζει τη σύσταση και το ανθρακικό αποτύπωμα του τσιμέντου, ενώ η δεύτερη επηρεάζει τη λειτουργική διαχείριση υλικών στον κύκλο ζωής του σκυροδέματος (Kleijer et al., 2017; Vieira et al., 2019).

Η μείωση του λόγου κλίνκερ προς τσιμέντο είναι ίσως η πιο άμεση στρατηγική μείωσης εκπομπών. Το κλίνκερ είναι το πλέον ενεργοβόρο και ανθρακικά επιβαρυντικό συστατικό του τσιμέντου. Η αντικατάσταση μέρους του με συμπληρωματικά τσιμεντοειδή υλικά μπορεί να μειώσει τις εκπομπές ανά τόνο τσιμέντου και να περιορίσει την κατανάλωση πρωτογενών πρώτων υλών. Υλικά όπως η σκυρία υψικαμίνου, η ιπτάμενη τέφρα, οι φυσικές ποζολάνες και ο ασβεστόλιθος έχουν μελετηθεί εκτενώς. Ωστόσο, η διαθεσιμότητα ορισμένων από αυτά επηρεάζεται από μεταβολές σε άλλους κλάδους, όπως η σταδιακή μείωση της παραγωγής ενέργειας από άνθρακα, γεγονός που κάνει αναγκαία την αναζήτηση νέων κατάλληλων ροών (Scrivener et al., 2018; Habert et al., 2020).

Τα λεπτόκοκκα απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων παρουσιάζουν αυξανόμενο ενδιαφέρον ως πιθανές δευτερογενείς ροές. Η μελέτη των Tokareva, Kaassamani και Waldmann δείχνει ότι τέτοια υλικά μπορεί να εμφανίζουν περιορισμένη ποζολανική δραστηριότητα, αλλά μπορούν να λειτουργήσουν ως πληρωτικά και να συμβάλουν στον μηχανισμό πυρήνωσης κατά την ενυδάτωση (Tokareva et al., 2023).

Η χρήση συμπληρωματικών τσιμεντοειδών υλικών πρέπει να αξιολογείται σε σχέση με την αντοχή, την ανθεκτικότητα, τον χρόνο πήξης, τη συμβατότητα με πρόσθετα και τη μακροχρόνια συμπεριφορά του σκυροδέματος. Η μείωση των εκπομπών δεν αρκεί αν το τελικό προϊόν έχει υποδεέστερη απόδοση ή μικρότερη διάρκεια ζωής. Μια κατασκευή που χρειάζεται πρόωρη επισκευή ή αντικατάσταση μπορεί να ακυρώσει το αρχικό περιβαλλοντικό όφελος. Γι' αυτό, η κυκλικότητα στον κλάδο πρέπει να συνδέεται με την αρχή της λειτουργικής ισοδυναμίας: τα υλικά συγκρίνονται με βάση την απόδοση που προσφέρουν στην ίδια λειτουργική μονάδα και όχι απλώς με βάση την προέλευσή τους (Kleijer et al., 2017; Habert et al., 2020).

Στο επίπεδο του σκυροδέματος, η κυκλικότητα συνδέεται με την αξιοποίηση ανακυκλωμένων αδρανών και την επαναχρησιμοποίηση υδάτινων ροών. Τα ανακυκλωμένα αδρανή προκύπτουν από θραύση και διαλογή αποβλήτων σκυροδέματος ή άλλων κατασκευαστικών υλικών. Η χρήση τους μπορεί να μειώσει την ανάγκη εξόρυξης φυσικών αδρανών και να περιορίσει την απόθεση αποβλήτων. Παρά ταύτα, η ποιότητά τους εξαρτάται από την καθαρότητα της πηγής, την παρουσία κονιάματος, την κοκκομετρία και την απορρόφηση νερού. Έτσι, η εφαρμογή τους απαιτεί προσαρμογή μίγματος, έλεγχο υγρασίας και σαφή ταξινόμηση ως προς την προβλεπόμενη χρήση (Kleijer et al., 2017; Wijayasundara et al., 2016).

Οι μονάδες έτοιμου σκυροδέματος αποτελούν μικρογραφία των πρακτικών προκλήσεων της Κυκλικής Οικονομίας. Οι επιστροφές νωπού σκυροδέματος εμφανίζονται όταν η ποσότητα που παραγγέλθηκε υπερβαίνει την ποσότητα που χρησιμοποιήθηκε στο έργο ή όταν υπάρχουν καθυστερήσεις και τεχνικές ασυμβατότητες. Η διαχείρισή τους μπορεί να περιλαμβάνει ανάκτηση αδρανών, παραγωγή προκατασκευασμένων στοιχείων χαμηλότερης απαίτησης ή ελεγχόμενη επανένταξη. Τα νερά πλύσης και οι λάσπες απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή λόγω υψηλού pH και περιεκτικότητας σε λεπτόκοκκα. Η λύση δεν βρίσκεται στην απλή απόρριψη,

αλλά ούτε και στην αλόγιστη επαναχρησιμοποίηση. Βρίσκεται στον έλεγχο (Vieira et al., 2019; Kleijer et al., 2017).

Η περιβαλλοντική αξιολόγηση των κυκλικών λύσεων στον κλάδο πρέπει να λαμβάνει υπόψη την κλίμακα και το βάρος των υλικών. Τα δομικά υλικά έχουν χαμηλή οικονομική αξία ανά μονάδα μάζας σε σχέση με άλλα προϊόντα, αλλά μετακινούνται σε τεράστιες ποσότητες. Αυτό σημαίνει ότι οι μεταφορές μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά το περιβαλλοντικό ισοζύγιο. Η αξιοποίηση ενός δευτερογενούς υλικού που βρίσκεται κοντά στη μονάδα παραγωγής μπορεί να είναι συμφέρουσα, ενώ η ίδια λύση με μεγάλες μεταφορικές αποστάσεις μπορεί να γίνει λιγότερο αποδοτική. Η τοπικότητα των ροών είναι, επομένως, ουσιώδης παράμετρος για τον κλάδο (Wijayasundara et al., 2016; Korhonen et al., 2018).

Η Κυκλική Οικονομία στον κλάδο τσιμέντου και σκυροδέματος δεν μπορεί να περιοριστεί στην ανακύκλωση στο τέλος ζωής. Πρέπει να αρχίζει από τον σχεδιασμό του προϊόντος, δηλαδή από τη σύνθεση του τσιμέντου, τη μείωση του κλίνκερ, την επιλογή κατάλληλων SCMs, τη βελτιστοποίηση των μιγμάτων σκυροδέματος και την πρόβλεψη ανθεκτικότητας. Πρέπει επίσης να συνεχίζεται στη φάση παραγωγής, με περιορισμό αποβλήτων και επανένταξη εσωτερικών ροών. Τέλος, πρέπει να επεκτείνεται στο τέλος ζωής των κατασκευών, με επιλεκτική κατεδάφιση και παραγωγή ποιοτικών ανακυκλωμένων αδρανών (Geissdoerfer et al., 2017; Reike et al., 2018).

Η οικονομική βιωσιμότητα των κυκλικών πρακτικών στον κλάδο εξαρτάται από το κόστος πρωτογενών υλικών, το κόστος διάθεσης αποβλήτων, την τιμή ενέργειας, την ανάγκη επενδύσεων σε εξοπλισμό και την ύπαρξη αγοράς για τα δευτερογενή προϊόντα. Η χρήση ανακυκλωμένων αδρανών ή η ανάκτηση υλικών από επιστροφές σκυροδέματος μπορεί να είναι οικονομικά ελκυστική όταν μειώνει κόστος διάθεσης και αγοράς φυσικών αδρανών. Αν όμως απαιτεί σύνθετη επεξεργασία, εκτεταμένο ποιοτικό έλεγχο και μακρινή μεταφορά, το οικονομικό πλεονέκτημα περιορίζεται. Η οικονομία, όπως πάντα, κρατά το μολύβι και κάνει τον λογαριασμό στο τέλος (Wijayasundara et al., 2016; Vieira et al., 2019).

Η θεσμική συμμόρφωση έχει ιδιαίτερη βαρύτητα, επειδή τα δομικά υλικά υπόκεινται σε πρότυπα, πιστοποιήσεις και τεχνικούς κανονισμούς. Η εισαγωγή δευτερογενών υλικών στην παραγωγή απαιτεί αποδείξεις ότι το τελικό προϊόν παραμένει ασφαλές και αξιόπιστο. Η Κυκλική Οικονομία δεν πρέπει να χρησιμοποιείται ως πρόσχημα για χαλάρωση

προδιαγραφών. Αντίθετα, πρέπει να συνοδεύεται από αυστηρότερη τεκμηρίωση, ώστε η αγορά και οι τεχνικοί φορείς να εμπιστεύονται τα προϊόντα χαμηλότερου περιβαλλοντικού αποτυπώματος (Scrivener et al., 2018; Habert et al., 2020).

Η συνάφεια της Κυκλικής Οικονομίας με την τσιμεντοβιομηχανία φαίνεται και από το γεγονός ότι ο κλάδος μπορεί να απορροφήσει μεγάλες ποσότητες υλικών, εφόσον αυτά είναι κατάλληλα. Η κλίμακα παραγωγής είναι τόσο μεγάλη ώστε ακόμη και μερική υποκατάσταση κλίνκερ ή πρωτογενών αδρανών μπορεί να έχει σημαντική συνολική επίδραση. Αυτό δεν σημαίνει ότι κάθε απόβλητο μπορεί να εισαχθεί στην παραγωγή. Σημαίνει ότι η επιλογή κατάλληλων ροών μπορεί να προσφέρει ουσιαστικό περιβαλλοντικό αποτέλεσμα. Η διαφορά ανάμεσα στην επιλεκτική αξιοποίηση και στην αδιάκριτη χρήση είναι καθοριστική (Ghisellini et al., 2016; Tokareva et al., 2023). Σε επίπεδο στρατηγικής, η τσιμεντοβιομηχανία μπορεί να κινηθεί προς την κυκλικότητα μέσα από συνδυασμό μέτρων: μείωση κλίνκερ, χρήση SCMs, αξιοποίηση εναλλακτικών πρώτων υλών, βελτιστοποίηση ενεργειακής απόδοσης, ανάκτηση ροών σε μονάδες σκυροδέματος, παραγωγή και χρήση ανακυκλωμένων αδρανών, καθώς και συνεργασία με άλλους κλάδους για σταθερές δευτερογενείς εισροές, όμως, κανένα μέτρο μόνο του δεν επαρκεί, διότι κάθε λύση πρέπει να αξιολογείται με βάση την τεχνική εφικτότητα και τη συνολική περιβαλλοντική συμβολή (Habert et al., 2020; Scrivener et al., 2018).

Η εφαρμογή κυκλικών στρατηγικών στον κλάδο έχει και όρια. Η αυξανόμενη ζήτηση για υποδομές σημαίνει ότι οι δευτερογενείς ροές δεν μπορούν να καλύψουν πλήρως όλες τις ανάγκες. Επιπλέον, ορισμένα παραδοσιακά SCMs, όπως η ιπτάμενη τέφρα, ενδέχεται να μειωθούν λόγω ενεργειακής μετάβασης, γεγονός το οποίο δημιουργεί ανάγκη για νέες πηγές υλικών και για τεχνολογίες που αξιοποιούν τοπικά διαθέσιμα ρεύματα. Η Κυκλική Οικονομία, συνεπώς, δεν αντικαθιστά την ανάγκη για ευρύτερη αποανθρακοποίηση, αλλά τη συμπληρώνει (Korhonen et al., 2018; Habert et al., 2020).

Συμπερασματικά, ο κλάδος τσιμέντου και σκυροδέματος είναι ιδιαίτερα συναφής με την Κυκλική Οικονομία επειδή διαθέτει μεγάλη δυνατότητα απορρόφησης δευτερογενών υλικών, σημαντικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα και σαφείς τεχνικές διαδρομές βελτίωσης. Η κυκλικότητα μπορεί να εκφραστεί τόσο στρατηγικά, μέσω της σύνθεσης του τσιμέντου και της μείωσης κλίνκερ, όσο και λειτουργικά, μέσω της διαχείρισης ροών στις μονάδες παραγωγής σκυροδέματος. Η πραγματική πρόκληση είναι να συνδυαστούν η περιβαλλοντική φιλοδοξία

με την τεχνική αξιοπιστία. Στον συγκεκριμένο κλάδο, η καλή πρόθεση δεν αρκεί· χρειάζεται υλικό που δουλεύει, προϊόν που αντέχει και τεκμηρίωση που στέκει (Scrivener et al., 2018; Tokareva et al., 2023). Η μείωση του λόγου κλίνκερ δεν πρέπει να εξετάζεται μόνο ως περιβαλλοντική τεχνική, αλλά και ως ζήτημα βιομηχανικής στρατηγικής. Κάθε μείωση κλίνκερ προϋποθέτει ότι το μίγμα τσιμέντου θα διατηρεί επαρκείς αντοχές, προβλέψιμη ενυδάτωση και ανθεκτικότητα σε βάθος χρόνου. Η χρήση δευτερογενών ή συμπληρωματικών υλικών μεταβάλλει τη χημεία του συστήματος και επηρεάζει τη συμπεριφορά του σκυροδέματος σε διαφορετικά περιβάλλοντα έκθεσης. Συνεπώς, η κυκλικότητα δεν μπορεί να αξιολογείται μόνο ανά τόνο τσιμέντου, αλλά πρέπει να συνδέεται με την τελική λειτουργική απόδοση της κατασκευής (Scrivener et al., 2018; Habert et al., 2020). Άλλωστε, η τσιμεντοβιομηχανία λειτουργεί σε συγκεκριμένες γεωγραφικές και παραγωγικές συνθήκες. Μια χώρα ή μια περιφέρεια μπορεί να διαθέτει άφθονα απόβλητα κατεδαφίσεων, αλλά περιορισμένη σκωρία ή τέφρα. Άλλη περιοχή μπορεί να έχει πρόσβαση σε φυσικές ποζολάνες, αλλά όχι σε σταθερές ροές ανακυκλωμένων λεπτόκοκκων. Αυτό σημαίνει ότι οι κυκλικές στρατηγικές δεν μπορούν να είναι ίδιες παντού. Χρειάζεται προσαρμογή στις διαθέσιμες ροές, στις αποστάσεις, στις υποδομές διαλογής και στις ανάγκες της τοπικής αγοράς (Kleijer et al., 2017; Wijayasundara et al., 2016).

Διαδρομή	Ενδεικτικά υλικά/ρεύματα	Πιθανό όφελος	Κρίσιμη απαίτηση
Μείωση κλίνκερ	SCMs, ασβεστόλιθος, ποζολάνες	Μείωση εκπομπών διεργασίας	Αντοχή και ανθεκτικότητα
Εναλλακτικές πρώτες ύλες	Βιομηχανικά παραπροϊόντα	Μείωση πρωτογενών εισροών	Σταθερή χημική σύσταση
Ανακυκλωμένα αδρανή	Θραυσμένο σκυρόδεμα	Μείωση εξόρυξης και διάθεσης	Ποιότητα και υδατοαπορρόφηση
Ροές ready-mix	Επιστροφές, νερά πλύσης, λάσπες	Μείωση αποβλήτων μονάδας	Έλεγχος pH, στερεών και ιδιοτήτων

Πίνακας 3 Κύριες κυκλικές διαδρομές στον κλάδο τσιμέντου και σκυροδέματος

Ο Πίνακας 3 αποτυπώνει τη διπλή φύση της κυκλικότητας στον κλάδο. Από τη μία πλευρά, υπάρχουν στρατηγικές που επηρεάζουν τη σύσταση του τσιμέντου και το ανθρακικό αποτύπωμα του κλίνκερ. Ωστόσο, υπάρχουν και λειτουργικές στρατηγικές που αφορούν τη διαχείριση υλικών ροών στις μονάδες σκυροδέματος. Η ολοκληρωμένη προσέγγιση πρέπει να συνδυάζει και τις δύο κατευθύνσεις, ώστε η μείωση αποβλήτων να συνδέεται με πραγματική περιβαλλοντική βελτίωση και όχι με αλλαγή σημείου διάθεσης (Scrivener et al., 2018; Habert et al., 2020).

3. Βιομηχανικά Απόβλητα και Ρεύματα της Τσιμεντοβιομηχανίας

3.1 Κατηγορίες βιομηχανικών αποβλήτων

Η αξιοποίηση μίας κυκλικής προσέγγισης στον κλάδο της τσιμεντοβιομηχανίας δεν μπορεί να διακριθεί από το πρώτο αλλά εξαιρετικά σημαντικό βήμα της κατηγοριοποίησης, διότι τα απόβλητα ενός τόσο σύνθετου κλάδου δεν είναι μία ενιαία κατηγορία και διαφοροποιούνται ως προς τη σύσταση, την προέλευση, τη μορφή που λαμβάνουν, τη δυνητική επικινδυνότητα και την ανάγκη επεξεργασίας. Η διάκριση μεταξύ των ροών αποβλήτων είναι εξαιρετικά αναγκαία, διότι κάθε ροή έχει άλλες δυνατότητες επανένταξης και μπορεί, όπως είναι εύλογο, να συνδέεται και με διαφορετικούς κινδύνους για την τελική μορφή του προϊόντος (Ghisellini et al., 2016; Korhonen et al., 2018).

Υπάρχουν απόβλητα που παράγονται εντός της ίδιας της βιομηχανικής μονάδας, απόβλητα που προέρχονται από συναφείς παραγωγικές δραστηριότητες και απόβλητα που προκύπτουν από το τέλος ζωής προϊόντων ή κατασκευών. Στην περίπτωση του σκυροδέματος, οι επιστροφές νωπού σκυροδέματος και τα νερά πλύσης είναι εσωτερικές ή άμεσα συνδεδεμένες ροές παραγωγής. Αντίθετα, τα απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων προέρχονται από το τέλος ζωής κτιρίων και έργων υποδομής. Η διάκριση αυτή έχει πρακτική σημασία, διότι οι εσωτερικές ροές είναι συνήθως πιο ελεγχόμενες, ενώ οι εξωτερικές ροές παρουσιάζουν μεγαλύτερη μεταβλητότητα (Vieira et al., 2019; Tokareva et al., 2023).

Τα βιομηχανικά απόβλητα μπορεί να είναι στερεά, υγρά, ιλύες ή λεπτόκοκκα υπολείμματα. Τα στερεά απόβλητα μπορούν να υποστούν θραύση, κοσκίνιση και ταξινόμηση. Τα υγρά απόβλητα απαιτούν έλεγχο χημικών χαρακτηριστικών και πιθανή επαναχρησιμοποίηση ως νερό διεργασίας. Οι ιλύες παρουσιάζουν ιδιαίτερες δυσκολίες λόγω υγρασίας, λεπτόκοκκου χαρακτήρα και πιθανής μεταβλητότητας σύστασης. Τα λεπτόκοκκα κλάσματα είναι τεχνικά ενδιαφέροντα αλλά και απαιτητικά, επειδή η υψηλή ειδική επιφάνεια και η χημική τους σύσταση επηρεάζουν την ενυδάτωση και τη ρεολογία μιγμάτων τσιμέντου (Vieira et al., 2019; Tokareva et al., 2023).

Ορισμένα βιομηχανικά απόβλητα μπορεί να περιέχουν ρύπους, βαρέα μέταλλα ή άλλες ουσίες που περιορίζουν τη δυνατότητα αξιοποίησης. Άλλα είναι μη επικίνδυνα αλλά εξακολουθούν

να απαιτούν έλεγχο ποιότητας. Στην κυκλική προσέγγιση, η μη επικινδυνότητα δεν σημαίνει αυτομάτως καταλληλότητα για χρήση. Ένα υλικό μπορεί να μην είναι επικίνδυνο, αλλά να είναι τεχνικά ακατάλληλο λόγω αστάθειας, ανεπιθύμητης κοκκομετρίας ή χαμηλής απόδοσης. Η διάκριση ανάμεσα στη νομική αποδοχή και στην τεχνική καταλληλότητα είναι ουσιώδης (Korhonen et al., 2018; Reike et al., 2018).

Ρεύματα που προέρχονται από ελεγχόμενη βιομηχανική διεργασία τείνουν να έχουν πιο σταθερή σύνθεση. Αντίθετα, τα μικτά απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων παρουσιάζουν μεγαλύτερη ετερογένεια, καθώς μπορεί να περιέχουν σκυρόδεμα, κεραμικά, κονιάματα, γύψο, ξύλο, μέταλλα ή άλλες προσμίξεις. Η ομοιογένεια επηρεάζει το κόστος διαχωρισμού και την αξιοπιστία της τελικής χρήσης. Στην παραγωγή τσιμέντου και σκυροδέματος, η σταθερή σύσταση δεν είναι πολυτέλεια αλλά προϋπόθεση. Όσο μεγαλύτερη η μεταβλητότητα, τόσο μεγαλύτερη η ανάγκη για προεπεξεργασία, έλεγχο και περιορισμό ποσοστών αντικατάστασης (Tokareva et al., 2023; Kleijer et al., 2017).

Ορισμένα υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εναλλακτικές πρώτες ύλες, αντικαθιστώντας μέρος των φυσικών εισροών. Άλλα μπορούν να λειτουργήσουν ως συμπληρωματικά τσιμεντοειδή υλικά, εφόσον διαθέτουν ποζολανική ή υδραυλική δραστικότητα. Άλλα λειτουργούν κυρίως ως πληρωτικά, βελτιώνοντας την κοκκομετρική συσκευασία ή επηρεάζοντας την ενυδάτωση μέσω μηχανισμών πυρήνωσης. Τέλος, ορισμένα ρεύματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο σε χαμηλότερης απαίτησης εφαρμογές. Η κατηγοριοποίηση με βάση τη λειτουργία είναι πιο χρήσιμη από την απλή κατηγοριοποίηση με βάση την ονομασία του αποβλήτου (Scrivener et al., 2018; Tokareva et al., 2023).

Στον κλάδο του σκυροδέματος, οι επιστροφές νωπού σκυροδέματος αποτελούν ιδιαίτερη κατηγορία. Δεν είναι κλασικό απόβλητο με την έννοια ενός υλικού που έχει ολοκληρώσει τον κύκλο ζωής του, αλλά προϊόν που δεν χρησιμοποιήθηκε εγκαίρως ή στην προβλεπόμενη ποσότητα. Η διαχείρισή του μπορεί να περιλαμβάνει ανάκτηση αδρανών, παραγωγή στοιχείων χαμηλότερης τεχνικής απαίτησης ή επανένταξη υπό ελεγχόμενες συνθήκες. Η επιλογή εξαρτάται από τον χρόνο, τη σύνθεση, τη χρήση προσθέτων και τις δυνατότητες της μονάδας. Η ροή αυτή δείχνει ότι η πρόληψη, δηλαδή ο ακριβέστερος προγραμματισμός παραγγελιών, μπορεί να είναι πιο αποδοτική από τη μεταγενέστερη επεξεργασία (Vieira et al., 2019; Geissdoerfer et al., 2017).

Τα νερά πλύσης και οι λάσπες σκυροδέματος αποτελούν υγρά ή ημιυγρά ρεύματα με ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Περιέχουν λεπτόκοκκα σωματίδια τσιμέντου, αδρανή και υψηλή αλκαλικότητα. Η επαναχρησιμοποίησή τους μπορεί να μειώσει την κατανάλωση καθαρού νερού και την ανάγκη διάθεσης, αλλά απαιτεί έλεγχο συγκέντρωσης στερεών και επίδρασης στις ιδιότητες του νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος. Η χρήση τους χωρίς έλεγχο μπορεί να επηρεάσει την εργασιμότητα, τον χρόνο πήξης και την αντοχή. Συνεπώς, πρόκειται για ροές με κυκλικό δυναμικό, αλλά όχι για υλικά που μπορούν να επανεισυχθούν τυφλά στην παραγωγή (Vieira et al., 2019; Kleijer et al., 2017).

Τα απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων αποτελούν ευρύτερη κατηγορία με σημαντικές ποσότητες και διαφορετικές δυνατότητες αξιοποίησης. Το καθαρό απόβλητο σκυροδέματος μπορεί να μετατραπεί σε ανακυκλωμένο αδρανές, ενώ τα λεπτόκοκκα κλάσματα μπορούν να μελετηθούν ως πληρωτικά ή πιθανές τσιμεντοειδείς προσθήκες. Τα μικτά ρεύματα, όμως, απαιτούν πιο αυστηρή διαλογή λόγω προσμίξεων. Η ποιότητα της επιλεκτικής κατεδάφισης επηρεάζει άμεσα την ποιότητα του ανακυκλωμένου υλικού. Επομένως, η κυκλικότητα αρχίζει πριν από τη θραύση: αρχίζει στον τρόπο αποδόμησης, διαλογής και συλλογής των υλικών στο εργοτάξιο (Tokareva et al., 2023; Reike et al., 2018).

Οι συμπληρωματικές βιομηχανικές ροές, όπως σκωρίες, τέφρες και ποζολανικά υλικά, αποτελούν ειδική κατηγορία επειδή μπορούν να επηρεάσουν άμεσα τη σύσταση του τσιμέντου. Τα υλικά αυτά έχουν αξιοποιηθεί ή μελετηθεί ως υποκατάστατα μέρους του κλίνκερ, συμβάλλοντας στη μείωση εκπομπών. Η καταλληλότητά τους εξαρτάται από τη χημική και ορυκτολογική σύσταση, τη λεπτότητα, την αντιδραστικότητα και τη σταθερότητα προμήθειας. Εδώ η κυκλικότητα συναντά τη χημεία του τσιμέντου. Αν το υλικό δεν συμβάλλει επαρκώς στην ανάπτυξη αντοχών ή αν δημιουργεί ανεπιθύμητες αντιδράσεις, η περιβαλλοντική του αξία δεν αρκεί για να δικαιολογήσει τη χρήση (Scrivener et al., 2018; Habert et al., 2020).

Τα ανακυκλωμένα αδρανή αποτελούν ακόμη μία βασική κατηγορία. Μπορούν να προέλθουν από θραυσμένο σκυρόδεμα και να χρησιμοποιηθούν σε νέες συνθέσεις σκυροδέματος ή σε εφαρμογές χαμηλότερων απαιτήσεων. Η παρουσία παλαιού κονιάματος στην επιφάνειά τους επηρεάζει την απορρόφηση νερού και τη μηχανική συμπεριφορά. Αυτό σημαίνει ότι η αντικατάσταση φυσικών αδρανών δεν είναι απλή αριθμητική πράξη. Χρειάζεται προσαρμογή

της σύνθεσης, έλεγχος υγρασίας και πιθανή διαφοροποίηση χρήσης. Παρ' όλα αυτά, σε κατάλληλες εφαρμογές μπορούν να μειώσουν την εξόρυξη φυσικών αδρανών και την απόθεση αποβλήτων (Kleijer et al., 2017; Wijayasundara et al., 2016).

Η κατηγοριοποίηση πρέπει να λαμβάνει υπόψη και την τελική ιεράρχηση διαχείρισης. Η πρόληψη και η μείωση παραγωγής αποβλήτων προηγούνται της επαναχρησιμοποίησης και της ανακύκλωσης. Στις μονάδες σκυροδέματος, αυτό σημαίνει καλύτερο προγραμματισμό παραγωγής, ακριβέστερες παραγγελίες και περιορισμό επιστροφών. Στα απόβλητα κατεδαφίσεων, σημαίνει επιλεκτική αποδόμηση και διαχωρισμό στην πηγή. Η ανακύκλωση είναι σημαντική, αλλά δεν πρέπει να χρησιμοποιείται ως άλλοθι για κακή οργάνωση (Geissdoerfer et al., 2017; Reike et al., 2018).

Τέλος, η κατηγοριοποίηση των βιομηχανικών αποβλήτων πρέπει να συνδέεται με κριτήρια αξιολόγησης. Για κάθε ροή χρειάζεται να εξετάζονται η ποσότητα, η σταθερότητα, η καθαρότητα, η τεχνική λειτουργία, το κόστος επεξεργασίας, οι μεταφορικές αποστάσεις, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις και το θεσμικό καθεστώς. Μόνο έτσι μπορεί να αποφασιστεί αν μια ροή είναι κατάλληλη για υψηλής αξίας αξιοποίηση, για χαμηλότερης απαίτησης χρήση ή για συμβατική διαχείριση (Korhonen et al., 2018; Wijayasundara et al., 2016).

Συνεπώς, οι κατηγορίες βιομηχανικών αποβλήτων που σχετίζονται με την τσιμεντοβιομηχανία και το σκυρόδεμα μπορούν να οργανωθούν σε εσωτερικά ρεύματα παραγωγής, υδατικά και ιλύωδη υπολείμματα, ανακυκλωμένα αδρανή, λεπτόκοκκα κλάσματα αποβλήτων κατασκευών και κατεδαφίσεων, καθώς και βιομηχανικά παραπροϊόντα με πιθανή τσιμεντοειδή ή πληρωτική λειτουργία. Η ταξινόμηση αυτή επιτρέπει τη μετέπειτα συγκριτική αξιολόγηση με τεχνικά, περιβαλλοντικά, οικονομικά και κανονιστικά κριτήρια. Με αυτό τον τρόπο, η Κυκλική Οικονομία μετατρέπεται από γενική αρχή σε πρακτικό πλαίσιο επιλογής και αξιοποίησης υλικών (Ghisellini et al., 2016; Tokareva et al., 2023).

Η διάκριση ανάμεσα σε παραπροϊόν, δευτερογενή πρώτη ύλη και απόβλητο έχει ιδιαίτερη σημασία για την πρακτική εφαρμογή της Κυκλικής Οικονομίας. Ένα υλικό που θεωρείται απόβλητο υπάγεται σε αυστηρότερες διαδικασίες ελέγχου, μεταφοράς και αδειοδότησης, ενώ ένα παραπροϊόν μπορεί να ενταχθεί ευκολότερα σε παραγωγική χρήση, εφόσον πληροί συγκεκριμένες προϋποθέσεις. Η θεσμική αυτή διάκριση δεν είναι λεπτομέρεια γραφείου, διότι επηρεάζει το κόστος και την ταχύτητα αξιοποίησης. Στην τσιμεντοβιομηχανία, όπου οι ροές

υλικών είναι μεγάλες και οι προδιαγραφές αυστηρές, η σαφής ταξινόμηση αποτελεί προϋπόθεση για επενδύσεις και μακροχρόνιες συμφωνίες προμήθειας (Ghisellini et al., 2016; Korhonen et al., 2018).

Ένα ακόμη κριτήριο κατηγοριοποίησης είναι η δυνατότητα σταθερής τροφοδοσίας. Ρεύματα που παράγονται συνεχώς και σε προβλέψιμες ποσότητες μπορούν να ενταχθούν ευκολότερα σε βιομηχανικό σχεδιασμό. Αντίθετα, ρεύματα που εμφανίζονται εποχικά, περιστασιακά ή σε μικρές ποσότητες έχουν περιορισμένη αξία για βασικές διεργασίες, ακόμη και αν είναι τεχνικά κατάλληλα. Η παραγωγή τσιμέντου απαιτεί σταθερές συνταγές και σταθερό ποιοτικό έλεγχο. Συνεπώς, η κατηγοριοποίηση των αποβλήτων πρέπει να περιλαμβάνει όχι μόνο τη χημική και φυσική τους ποιότητα, αλλά και τη δυνατότητα αξιόπιστης εφοδιαστικής αλυσίδας (Scrivener et al., 2018; Habert et al., 2020).

Η ενεργειακή απαίτηση της προεπεξεργασίας αποτελεί πρόσθετο στοιχείο ταξινόμησης. Ορισμένα απόβλητα χρειάζονται μόνο διαλογή και κοσκίνιση, ενώ άλλα απαιτούν θραύση, άλεση, ξήρανση ή θερμική επεξεργασία. Όσο πιο σύνθετη είναι η προεπεξεργασία, τόσο μεγαλύτερο γίνεται το κόστος και τόσο πιο αβέβαιο το καθαρό περιβαλλοντικό όφελος. Η περίπτωση των λεπτόκοκκων αποβλήτων κατεδαφίσεων δείχνει ακριβώς αυτό το ζήτημα, ότι η τεχνική βελτίωση ενός υλικού μπορεί να το καταστήσει χρήσιμο, αλλά πρέπει να αξιολογείται αν η βελτίωση αυτή δικαιολογείται σε επίπεδο κύκλου ζωής (Tokareva et al., 2023; Wijayasundara et al., 2016).

Η καθαρότητα της πηγής είναι καθοριστική ιδίως για τα απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων. Όταν τα υλικά συλλέγονται χωριστά, η πιθανότητα υψηλής αξίας αξιοποίησης αυξάνεται. Όταν όμως συλλέγονται ως μικτό ρεύμα, αυξάνονται οι προσμίξεις, η ανάγκη διαχωρισμού και ο κίνδυνος τεχνικής αστοχίας. Η επιλεκτική κατεδάφιση και η διαλογή στην πηγή δεν είναι απλή περιβαλλοντική ευαισθησία· είναι παραγωγική προϋπόθεση για την ποιότητα των δευτερογενών υλικών. Με άλλα λόγια, η τύχη του ανακυκλωμένου υλικού κρίνεται συχνά πριν φτάσει στη μονάδα επεξεργασίας (Reike et al., 2018; Tokareva et al., 2023).

Για την τσιμεντοβιομηχανία, ενδιαφέρον παρουσιάζουν επίσης τα ρεύματα με ορυκτολογική ή χημική συγγένεια προς τις απαιτήσεις της παραγωγής. Υλικά πλούσια σε οξείδια ασβεστίου, πυριτίου, αργιλίου ή σιδήρου μπορούν να εξεταστούν ως πιθανές εισροές, εφόσον δεν

περιέχουν ανεπιθύμητα συστατικά σε κρίσιμα επίπεδα. Η αξιολόγηση, όμως, πρέπει να είναι εργαστηριακή και όχι ονομαστική. Το γεγονός ότι ένα υλικό προέρχεται από σκυρόδεμα ή κεραμικό δεν αρκεί για να θεωρηθεί κατάλληλο. Χρειάζεται χημικός χαρακτηρισμός, έλεγχος αντιδραστικότητας και δοκιμή επίδρασης στο τελικό σύστημα (Scrivener et al., 2018; Tokareva et al., 2023).

Η κατηγοριοποίηση πρέπει επίσης να διακρίνει τις υψηλής αξίας από τις χαμηλής αξίας χρήσεις. Ένα ανακυκλωμένο υλικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε νέο σκυρόδεμα, σε υπόβαση οδοποιίας, σε πληρώσεις ή σε άλλες εφαρμογές. Η υψηλότερη τεχνική χρήση δεν είναι πάντοτε η πιο κατάλληλη, αν απαιτεί υπερβολική επεξεργασία ή αυξημένο ρίσκο. Αντίστροφα, η διαρκής διοχέτευση υλικών σε χαμηλής αξίας χρήσεις μπορεί να συντηρεί μια μορφή υποκύκλωσης. Η σωστή επιλογή χρειάζεται ισορροπία ανάμεσα στη διατήρηση αξίας, στο κόστος και στην ασφάλεια του τελικού προϊόντος (Reike et al., 2018; Kleijer et al., 2017).

Τα κριτήρια κατηγοριοποίησης δεν είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους, διότι η χημική σύσταση συνδέεται με τη δυνατότητα τεχνικής χρήσης, η ομοιογένεια με το κόστος ποιοτικού ελέγχου, η γεωγραφική θέση με τις μεταφορικές επιπτώσεις και το θεσμικό καθεστώς με την οικονομική βιωσιμότητα (Korhonen et al., 2018; Wijayasundara et al., 2016). Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η κατηγοριοποίηση των αποβλήτων έχει προπαρασκευαστικό χαρακτήρα για τη συγκριτική αξιολόγηση που ακολουθεί. Η αξιολόγηση τεχνικών, περιβαλλοντικών, οικονομικών και κανονιστικών κριτηρίων μπορεί να γίνει μόνο εφόσον έχει προηγηθεί σαφής διάκριση των ρευμάτων. Η μεθοδολογική αυτή σειρά είναι απαραίτητη, πρώτα αναγνωρίζεται το υλικό, έπειτα χαρακτηρίζεται και τέλος αξιολογείται η πιθανή του χρήση. Η παράκαμψη κάποιου σταδίου οδηγεί σε βιαστικά συμπεράσματα, τα οποία σε βιομηχανικό περιβάλλον κοστίζουν δυνητικά (Ghisellini et al., 2016; Geissdoerfer et al., 2017).

Οι κατηγορίες βιομηχανικών αποβλήτων στον κλάδο τσιμέντου και σκυροδέματος πρέπει να αντιμετωπίζονται με βάση την παραγωγική τους λειτουργία και όχι μόνο την περιβαλλοντική τους ταυτότητα. Ρεύματα όπως οι επιστροφές σκυροδέματος, οι λάσπες, τα ανακυκλωμένα αδρανή, τα λεπτόκοκκα κλάσματα και τα βιομηχανικά παραπροϊόντα έχουν διαφορετικό επίπεδο ωριμότητας και διαφορετικούς περιορισμούς. Η συστηματική ταξινόμηση επιτρέπει να αναδειχθούν οι πραγματικές προοπτικές κυκλικότητας, αλλά και να αποφευχθούν

υπερβολικές υποσχέσεις που δεν στηρίζονται σε τεχνική βάση (Habert et al., 2020; Tokareva et al., 2023).

Κατηγορία ρεύματος	Προέλευση	Δυνατότητα αξιοποίησης	Βασική προϋπόθεση
Επιστροφές νωπού σκυροδέματος	Μονάδες ready-mix	Ανάκτηση αδρανών ή ελεγχόμενη επανένταξη	Χρόνος, σύνθεση και πρόσθετα
Νερά πλύσης/λάσπες	Καθαρισμός εξοπλισμού	Επαναχρησιμοποίηση νερού ή στερεών	Έλεγχος pH και στερεών
Ανακυκλωμένα αδρανή	Κατεδαφίσεις και θραύση σκυροδέματος	Μερική αντικατάσταση φυσικών αδρανών	Καθαρότητα και απορρόφηση
Λεπτόκοκκα κλάσματα	Απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων	Πληρωτικά ή πιθανά SCMs	Χαρακτηρισμός αντιδραστικότητας
Βιομηχανικά παραπροϊόντα	Άλλοι κλάδοι	Υποκατάσταση κλίνκερ ή πρώτων υλών	Σταθερή ποιότητα και διαθεσιμότητα

Πίνακας 4 Κατηγορίες ρευμάτων αποβλήτων σχετικών με τσιμέντο και σκυρόδεμα

Η ταξινόμηση του Πίνακα 4 δείχνει ότι η αξιοποίηση κάθε ρεύματος πρέπει να κρίνεται χωριστά. Η ίδια γενική αρχή, δηλαδή η επανένταξη υλικών στον κύκλο παραγωγής, οδηγεί σε διαφορετικές τεχνικές απαιτήσεις ανάλογα με το υλικό. Το αποφασιστικό ζήτημα δεν είναι αν ένα ρεύμα μπορεί θεωρητικά να αξιοποιηθεί, αλλά σε ποια χρήση, με ποια επεξεργασία, με ποιο κόστος και με ποια περιβαλλοντική επίδοση (Korhonen et al., 2018; Tokareva et al., 2023).

3.2 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις οι οποίες απορρέουν από τον κλάδο της τσιμεντοβιομηχανίας είναι πολλαπλές και απαιτούν, ανάλογα με τη φύση τους, στοχευμένο σχεδιασμό. Το τσιμέντο και το σκυρόδεμα, κατά την παραγωγή τους, εκπέμπουν βλαβερά για το περιβάλλον αέρια, τα οποία και συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, ενώ απαιτούν και αυξημένη κατανάλωση ενέργειας και πρώτων υλών. Ο τρόπος παραγωγής τους επιβαρύνεται σαφώς, λόγω της ρύπανσης του νερού, της παραγωγής υπολειμμάτων και της διατάραξης του οικοσυστήματος. Ακόμη και με τις στοιχειώδεις προσπάθειες των βιομηχανιών να περιορίσουν τους ρύπους αυτούς, είναι σαφές ότι πρόκειται για έναν κλάδο με έντονες και βαριές επιδράσεις, ο οποίος απαιτεί ρύθμιση, ως προς τη λειτουργία του και περιορισμό, στο πλαίσιο του δυνατού, όσον αφορά τον όγκο παραγωγής. Ωστόσο, λόγω της χρησιμότητάς τους για την κοινωνία, τα υλικά αυτά δεν δύνανται να πάψουν να παράγονται, ιδιαίτερα ελλείψει άλλων βιώσιμων επιλογών. Κατά συνέπεια, απαιτείται έμφαση στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας και της δυνατότητας επιμήκυνσης του χρόνου ζωής τους (Scrivener et al., 2018; Habert et al., 2020).

Όπως έχει διαπιστωθεί από διεξαχθείσες μελέτες στο παρελθόν η παραγωγή τσιμέντου διαθέτει ένα ισχυρό ανθρακικό αποτύπωμα. Η καύση καυσίμων στους κλιβάνους καθώς και η χημική αποσύνθεση του ασβεστίου κατά την ασβεστοποίηση συμβάλλουν ραγδαία στην εκπομπή αερίων επικίνδυνων για τον περιβάλλον. Αξίζει να σημειωθεί στο σημείο αυτό ότι ιδιαίτερα στην περίπτωση της παραγωγής κλίνκερ δεν δύνανται οι εξαιρετικά δυσμενείς συνέπειες της παραγωγής να περιοριστούν με καλύτερη ενεργειακή απόδοση, αλλά απαιτείται μείωση του λόγου κλίνκερ στο τελικό προϊόν, μέσα από τη χρήση εναλλακτικών υλικών και την εστίαση στον περιβαλλοντικό έλεγχο της καύσης του (Habert et al., 2020; GCCA, 2026a; Barnaetal., 2000).

Η εξόρυξη ασβεστόλιθου, αργίλου και αδρανών υλικών προκαλεί επίσης σημαντικές χωρικές και οικολογικές πιέσεις. Τα λατομεία μεταβάλλουν το ανάγλυφο, επηρεάζουν τη βλάστηση, δημιουργούν ανάγκη αποκατάστασης και παράγουν σκόνη και θόρυβο. Η υποκατάσταση μέρους των πρωτογενών πρώτων υλών με δευτερογενή υλικά δεν καταργεί την ανάγκη εξόρυξης, αλλά μπορεί να μειώσει την έντασή της, ιδίως όταν η δευτερογενής ροή βρίσκεται κοντά στη μονάδα παραγωγής. Η αξιοποίηση αποβλήτων κατεδαφίσεων, σκωριών, τεφρών ή

υπολειμμάτων σκυροδέματος πρέπει, όμως, να γίνεται με κριτήριο τη σταθερή χημική σύσταση και όχι απλώς την επιθυμία μείωσης του όγκου αποβλήτων (Tokareva et al., 2023; European Commission, 2026a).

Η σκόνη αποτελεί κλασική περιβαλλοντική παράμετρο της τσιμεντοβιομηχανίας. Παράγεται κατά την εξόρυξη, τη θραύση, την άλεση, τη μεταφορά, την αποθήκευση και την καύση. Η σύγχρονη τεχνολογία φίλτρων και κλειστών συστημάτων μεταφοράς έχει περιορίσει σημαντικά το πρόβλημα σε σχέση με παλαιότερες δεκαετίες, αλλά δεν το καθιστά αδιάφορο. Η χρήση δευτερογενών υλικών μπορεί να αυξήσει τις ανάγκες χειρισμού, αποθήκευσης και προεπεξεργασίας, άρα η κυκλικότητα πρέπει να συνοδεύεται από μέτρα ελέγχου διάχυτων εκπομπών. Διαφορετικά, η λύση ενός προβλήματος μπορεί να δημιουργήσει ένα άλλο, πιο τοπικό αλλά όχι λιγότερο πραγματικό (Korhonen et al., 2018; EEA, 2019).

Η κατανάλωση νερού στον κλάδο εμφανίζεται κυρίως στην παραγωγή σκυροδέματος, στον καθαρισμό εξοπλισμού, στη διαβροχή για περιορισμό σκόνης και σε βοηθητικές διεργασίες. Τα νερά πλύσης των μονάδων έτοιμου σκυροδέματος έχουν υψηλό pH και περιέχουν λεπτόκοκκα στερεά, τσιμεντοπολτό και υπολείμματα αδρανών. Η ανεξέλεγκτη διάθεση τέτοιων ροών μπορεί να επηρεάσει εδάφη και υδάτινους αποδέκτες. Η επαναχρησιμοποίηση νερού πλύσης στην παραγωγή, μετά από καθίζηση και έλεγχο ποιότητας, αποτελεί πρακτική κυκλικότητας, εφόσον δεν διαταράσσει τις ιδιότητες του τελικού σκυροδέματος (Vieira et al., 2019; Kleijer et al., 2017).

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις, επίσης, δεν περιορίζονται στην παραγωγή στο εργοστάσιο αλλά περιλαμβάνουν πτυχές όπως η μεταφορά, τόσο των πρώτων υλών και των καυσίμων, όσο και των δευτερογενών ροών και τελικού προϊόντος. Το βάρος των υλικών αυτών αλλά και η ποσότητα απαιτεί την επένδυση πολλαπλών πόρων σε δραστηριότητες μεταφορές, οι οποίες οφείλουν να λαμβάνονται υπ' όψιν στην αξιολόγηση και να μην αγνοούνται στη λήψη αποφάσεων. Η σημασία αυτή έγκειται στο γεγονός ότι μία βιώσιμη ή ακόμη και βιωσιμότερη επιλογή δεν διαθέτει κανένα όφελος, αν η μεταφορά της ρυπαίνει περισσότερο από όσο διασφαλίζεται μέσω των τηρουμένων μέτρων (Wijayasundara et al., 2016; Korhonen et al., 2018).

Η αξιοποίηση εναλλακτικών καυσίμων μπορεί να μειώσει την κατανάλωση ορυκτών καυσίμων και να προσφέρει διέξοδο σε μη ανακυκλώσιμα υπολείμματα. Ωστόσο, η πρακτική

αυτή χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή, επειδή συνδέεται με ζητήματα εκπομπών, ποιότητας καύσης, κοινωνικής αποδοχής και διαφάνειας. Η συναποτέφρωση σε κλιβάνους τσιμέντου παρουσιάζεται διεθνώς ως πρακτική ανάκτησης ενέργειας και υλικών, αλλά η περιβαλλοντική της αξία εξαρτάται από τη σύσταση του καυσίμου, τον έλεγχο των ρύπων και την τήρηση των ορίων εκπομπών (GCCA, 2026a; TITAN Ελλάδος, 2026b).

Σημαντική επίπτωση συνδέεται και με τα απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή επισημαίνει ότι τα απόβλητα αυτά αποτελούν περισσότερο από το ένα τρίτο των συνολικών αποβλήτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση, ενώ τα επίπεδα ανακύκλωσης και ανάκτησης διαφέρουν έντονα μεταξύ κρατών. Η απλή ανάκτηση μεγάλων ποσοτήτων δεν αρκεί όταν το αποτέλεσμα είναι χαμηλής ποιότητας επίχωση. Το ζητούμενο είναι η ποιοτική ανακύκλωση, δηλαδή η παραγωγή υλικών που μπορούν να επιστρέψουν σε τεχνικά χρήσιμες εφαρμογές (European Commission, 2026a; EEA, 2019).

Η αξιολόγηση κύκλου ζωής είναι το αναγκαίο εργαλείο για να κριθεί αν μια κυκλική πρακτική έχει πραγματικό περιβαλλοντικό όφελος. Η LCA επιτρέπει να ληφθούν υπόψη η εξόρυξη, η παραγωγή, η μεταφορά, η χρήση, η συντήρηση και το τέλος ζωής. Στην περίπτωση του σκυροδέματος, πρέπει να συγκρίνεται ίδια λειτουργική μονάδα και όχι απλώς ίδια μάζα υλικού. Ένα σκυρόδεμα χαμηλότερου αποτυπώματος ανά κυβικό μέτρο δεν είναι κατ' ανάγκη καλύτερο αν παρουσιάζει μειωμένη ανθεκτικότητα ή χρειάζεται μεγαλύτερη ποσότητα για να επιτύχει την ίδια δομική λειτουργία (Kleijer et al., 2017; Wijayasundara et al., 2016).

Η έννοια της μετατόπισης επιβάρυνσης είναι ιδιαίτερος κρίσιμη. Μια επιλογή μπορεί να μειώνει την απόθεση αποβλήτων αλλά να αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας· να περιορίζει τις εκπομπές CO₂ αλλά να επιβαρύνει άλλες κατηγορίες, όπως την τοξικότητα ή τη χρήση νερού· να μειώνει τη λατομική εξόρυξη αλλά να απαιτεί μακρινές μεταφορές (Korhonen et al., 2018; Murray et al., 2017). Η μακροχρόνια ανθεκτικότητα των κατασκευών είναι περιβαλλοντική παράμετρος η οποία και αναγνωρίζεται ως εξέχοντος σημαντική. Μια κατασκευή που διαρκεί περισσότερο μειώνει την ανάγκη νέων υλικών, εργασιών επισκευής και πρόωρης αντικατάστασης. Η χρήση δευτερογενών υλικών πρέπει, επομένως, να εξετάζεται όχι μόνο με βάση την αρχική αντοχή αλλά και με βάση τη συμπεριφορά έναντι διάβρωσης, ενανθράκωσης, διείσδυσης χλωριόντων, παγετού και χημικής προσβολής. Η κυκλικότητα που

υποβαθμίζει τη διάρκεια ζωής ενός έργου μπορεί να αποδειχθεί περιβαλλοντικά αντιπαραγωγική (Habert et al., 2020; Scrivener et al., 2018).

Σε τοπικό επίπεδο, οι τσιμεντοβιομηχανίες επηρεάζουν κοινωνίες που έχουν μάθει να συμβιώνουν με τη βιομηχανική παρουσία, αλλά δεν αποδέχονται πλέον αδιαφανείς πρακτικές. Η περιβαλλοντική διαχείριση οφείλει να συνοδεύεται από μετρήσιμα δεδομένα, τακτική ενημέρωση, διαβούλευση και δυνατότητα ελέγχου. Η αξιοποίηση αποβλήτων ως εναλλακτικών καυσίμων ή πρώτων υλών είναι κοινωνικά πιο ευαίσθητη από την απλή χρήση φυσικού ασβεστόλιθου. Για τον λόγο αυτό, η τεχνική ορθότητα χρειάζεται και κοινωνική νομιμοποίηση, αλλιώς η εφαρμογή της μένει εύθραυστη (Murray et al., 2017; Όμιλος ΗΡΑΚΛΗΣ, 2026a).

3.3 Ειδικά ρεύματα της τσιμεντοβιομηχανίας

Τα ειδικά ρεύματα της τσιμεντοβιομηχανίας διακρίνονται σε τρεις μεγάλες ομάδες: ρεύματα που χρησιμοποιούνται ως εναλλακτικές πρώτες ύλες, ρεύματα που αξιοποιούνται ως εναλλακτικά καύσιμα και ρεύματα που προκύπτουν από την παραγωγή και χρήση σκυροδέματος. Η διάκριση αυτή δεν είναι απλώς ταξινομική. Κάθε κατηγορία έχει διαφορετικές απαιτήσεις ελέγχου, διαφορετική σχέση με το τελικό προϊόν και διαφορετικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Ένα υλικό που είναι κατάλληλο ως πληρωτικό δεν είναι αναγκαστικά κατάλληλο ως ποζολανικό υλικό, ενώ ένα καύσιμο υψηλής θερμογόνου δύναμης μπορεί να είναι προβληματικό αν έχει ασταθή σύσταση ή ανεπιθύμητα ρυπαντικά φορτία (Tokareva et al., 2023; TITAN Ελλάδος, 2026b; Anastasiou et al., 2018).

Η ιπτάμενη τέφρα υπήρξε ιστορικά ένα από τα σημαντικότερα συμπληρωματικά τσιμεντοειδή υλικά. Προέρχεται από τη καύση άνθρακα σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς και, όταν έχει κατάλληλη χημική και κοκκομετρική σύσταση, μπορεί να συμμετέχει σε ποζολανικές αντιδράσεις που βελτιώνουν ορισμένες ιδιότητες του σκυροδέματος. Η σημασία της, ωστόσο, μειώνεται σε περιοχές όπου η ηλεκτροπαραγωγή από άνθρακα περιορίζεται. Αυτό δημιουργεί ένα παράδοξο της μετάβασης, ένα βιομηχανικό παραπροϊόν χρήσιμο για τη μείωση του κλίνκερ γίνεται λιγότερο διαθέσιμο επειδή ο ίδιος ο κλάδος προέλευσής του απανθρακοποιείται (Scrivener et al., 2018; Habert et al., 2020).

Η σκωρία υψικαμίνου αποτελεί επίσης σημαντικό υλικό για τσιμέντα χαμηλότερου αποτυπώματος. Ως παραπροϊόν της χαλυβουργίας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μετά από κατάλληλη ψύξη και άλεση ως λανθάνουσα υδραυλική ύλη. Η χρήση της μειώνει τον λόγο κλίνκερ και μπορεί να βελτιώσει την ανθεκτικότητα έναντι ορισμένων χημικών προσβολών. Το ζήτημα, όμως, είναι η διαθέσιμη ποσότητα και η γεωγραφική κατανομή. Η κυκλικότητα δεν μπορεί να βασίζεται σε υλικά που δεν υπάρχουν σταθερά ή που πρέπει να μεταφέρονται σε μεγάλες αποστάσεις με υψηλό κόστος και περιβαλλοντική επιβάρυνση (Habertetal., 2020; GCCA, 2026a).

Οι φυσικές ποζολάνες και οι ασβεστολιθικές προσθήκες αποτελούν ιδιαίτερα ενδιαφέρουσες επιλογές, ιδίως σε χώρες με κατάλληλη γεωλογική βάση. Οι ποζολάνες μπορούν να αντιδράσουν με το υδροξείδιο του ασβεστίου και να συμβάλουν στη βελτίωση της μικροδομής, ενώ ο ασβεστόλιθος λειτουργεί συχνά ως πληρωτικό και ως παράγοντας βελτίωσης της κοκκομετρικής συσκευασίας. Η χρήση τους δεν είναι αυτομάτως κυκλική όταν προέρχονται από νέα εξόρυξη, αλλά μπορεί να ενταχθεί σε στρατηγική χαμηλότερου κλίνκερ. Αξίζει, μάλιστα, στο σημείο αυτό, να τονιστεί ότι χαμηλότερο ανθρακικό αποτύπωμα δεν σημαίνει πάντοτε πλήρη κυκλικότητα (Scriveneretal., 2018; Reikeetal., 2018).

Τα απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων συνιστούν μία από τις πιο ελπιδοφόρες αλλά και πιο απαιτητικές ροές. Τα χονδρόκοκκα κλάσματα μπορούν να αξιοποιηθούν ως ανακυκλωμένα αδρανή, ενώ τα λεπτόκοκκα κλάσματα εξετάζονται ως πληρωτικά ή δυνητικά συμπληρωματικά τσιμεντοειδή υλικά. Η δυσκολία εντοπίζεται στην ανομοιογένεια: το ίδιο φορτίο μπορεί να περιέχει σκυρόδεμα, τούβλα, κονιάματα, γύψο, ξύλο, πλαστικά ή επικίνδυνα συστατικά. Η επιλεκτική κατεδάφιση, η προδιαλογή και ο εργαστηριακός χαρακτηρισμός είναι προϋποθέσεις για ουσιαστική αξιοποίηση (EuropeanCommission, 2026a; Tokarevaetal., 2023).

Οι επιστροφές νωπού σκυροδέματος είναι ιδιαίτερο ρεύμα επειδή δημιουργούνται εντός ελεγχόμενης αλυσίδας παραγωγής. Δεν πρόκειται για άγνωστο υλικό από διάφορες πηγές, αλλά για μείγμα γνωστής προέλευσης που επιστρέφει στη μονάδα λόγω υπερπαραγγελίας, καθυστέρησης ή αλλαγής εργοταξιακών συνθηκών. Η διαχείρισή του μπορεί να περιλαμβάνει ανάκτηση αδρανών, παραγωγή προκατασκευασμένων στοιχείων χαμηλών απαιτήσεων ή επανένταξη μετά από κατάλληλο έλεγχο. Η αξία του ρεύματος αυτού είναι ότι η κυκλικότητα

εφαρμόζεται κοντά στην πηγή και με σχετικά καλή ιχνηλασιμότητα (Vieiraetal., 2019; TITAN Ελλάδος, 2026b).

Τα νερά πλύσης των βαρελών, των αναμικτήρων και των εγκαταστάσεων παραγωγής περιέχουν λεπτόκοκκο τσιμεντοπολτό και αδρανή. Η επαναχρησιμοποίησή τους μειώνει την κατανάλωση καθαρού νερού και περιορίζει την παραγωγή υγρών αποβλήτων. Ωστόσο, απαιτεί συνεχή παρακολούθηση στερεών, pH και επίδρασης στη ρευστότητα και στον χρόνο πήξης(Vieiraetal., 2019; Kleijeretal., 2017).

Η λάσπη σκυροδέματος αποτελεί δυσκολότερο ρεύμα, επειδή περιέχει λεπτόκοκκο υλικό, υδροξείδια, άλατα και υπολείμματα τσιμέντου. Η υψηλή αλκαλικότητα και η μεταβλητότητα της σύστασης περιορίζουν την άμεση χρήση της. Παρά ταύτα, μετά από αφυδάτωση, ξήρανση ή άλλη επεξεργασία μπορεί να εξεταστεί ως υλικό χαμηλότερης απαίτησης ή ως δευτερογενής εισροή. Το κρίσιμο ερώτημα είναι αν η αναγκαία επεξεργασία είναι περιβαλλοντικά και οικονομικά εύλογη(Vieiraetal., 2019; Wijayasundaraetal., 2016).

Τα εναλλακτικά καύσιμα περιλαμβάνουν δευτερογενή καύσιμα από υπολείμματα ανακύκλωσης, RDF/SRF, λάσπη βιολογικών καθαρισμών, χρησιμοποιημένα έλαια, ελαστικά τέλους κύκλου ζωής, βιομάζα και άλλα βιομηχανικά ή εμπορικά υπολείμματα. Η χρήση τους στους κλιβάνους τσιμέντου συνδυάζει ανάκτηση ενέργειας και, σε ορισμένες περιπτώσεις, ενσωμάτωση ανόργανων συστατικών στη δομή του κλίνκερ. Η πρακτική είναι βιομηχανικά διαδεδομένη, αλλά δεν πρέπει να παρουσιάζεται χωρίς όρους. Χρειάζεται προδιαγραφή καυσίμου, έλεγχος χλωρίου, μετάλλων, υγρασίας και θερμογόνου δύναμης, καθώς και συνεχής παρακολούθηση εκπομπών (GCCA, 2026a; Όμιλος ΗΡΑΚΛΗΣ, 2026b).

Τα ελαστικά τέλους κύκλου ζωής αποτελούν χαρακτηριστικό παράδειγμα ροής με ενεργειακή και υλική αξία. Περιέχουν οργανικό μέρος που προσφέρει θερμότητα και ανόργανα συστατικά που μπορούν να ενσωματωθούν στο κλίνκερ. Παρά ταύτα, η χρήση τους πρέπει να ρυθμίζεται από σαφείς προδιαγραφές και περιβαλλοντικούς όρους. Η ύπαρξη διαθέσιμης θερμογόνου αξίας δεν αρκεί ως επιχείρημα. Στη σύγχρονη τσιμεντοβιομηχανία, κάθε εναλλακτικό καύσιμο πρέπει να κρίνεται από το συνολικό του ισοζύγιο, την επίδραση στη λειτουργία του κλιβάνου και τη συμμόρφωση προς τα όρια εκπομπών (TITAN Ελλάδος, 2026c; Όμιλος ΗΡΑΚΛΗΣ, 2026b).

Τα υπολείμματα ανακύκλωσης συσκευασιών και τα δευτερογενή καύσιμα από αστικά και εμπορικά απόβλητα αποτελούν πιο σύνθετη κατηγορία. Η ποιότητά τους εξαρτάται από το σύστημα συλλογής, τον διαχωρισμό, την ξήρανση και την προετοιμασία. Η τσιμεντοβιομηχανία μπορεί να προσφέρει διέξοδο σε κλάσματα που δεν ανακυκλώνονται υλικά, αλλά αυτό δεν πρέπει να λειτουργεί ανταγωνιστικά προς την ανακύκλωση. Η ιεράρχηση αποβλήτων επιβάλλει πρώτα πρόληψη και ανακύκλωση, και μόνο στη συνέχεια ανάκτηση ενέργειας για τα μη αξιοποιήσιμα κλάσματα (European Commission, 2026a; Όμιλος ΗΡΑΚΛΗΣ, 2026b).

Τα ειδικά ρεύματα πρέπει να αξιολογούνται και ως προς την ιχνηλασιμότητα. Στην πράξη, ο παραγωγός τσιμέντου χρειάζεται να γνωρίζει την προέλευση, τη σύσταση και την επεξεργασία κάθε ροής. Η απουσία ιχνηλασιμότητας αυξάνει τον τεχνικό και νομικό κίνδυνο. Ιδίως όταν ένα υλικό προέρχεται από απόβλητα, η τεκμηρίωση είναι απαραίτητη για να αποδειχθεί ότι η χρήση του δεν εισάγει ανεπιθύμητους ρύπους στο προϊόν ή στις εκπομπές (Korhonen et al., 2018; EEA, 2019).

Η διαχείριση των ειδικών ρευμάτων πρέπει να συνδέεται με την έννοια της τεχνικής καταλληλότητας. Η καταλληλότητα δεν είναι γενική ιδιότητα του υλικού, αλλά σχέση ανάμεσα στο υλικό και στη συγκεκριμένη χρήση. Ένα υλικό μπορεί να είναι ακατάλληλο για δομικό σκυρόδεμα υψηλών απαιτήσεων, αλλά κατάλληλο για επιχώσεις ή μη φέροντα στοιχεία. Αντίστοιχα, ένα λεπτόκοκκο απόβλητο μπορεί να μην έχει αξιόλογη ποζολανική δραστηριότητα, αλλά να λειτουργεί χρήσιμα ως πληρωτικό (Tokareva et al., 2023; Reike et al., 2018).

Ρεύμα	Πιθανή χρήση	Κρίσιμες προϋποθέσεις	Κύριος κίνδυνος
Ιπτάμενη τέφρα	Συμπληρωματικό τσιμεντοειδές υλικό ή πρώτη ύλη	Σταθερή χημική σύσταση, λεπτότητα, χαμηλοί ρύποι	Μειούμενη διαθεσιμότητα λόγω απολιγνιτοποίησης
Σκωρία υψικαμίνου	Υδραυλικό πρόσθετο και υποκατάσταση κλίνκερ	Κατάλληλη κοκκοποίηση και άλεση	Εξάρτηση από παραγωγή χάλυβα και μεταφορές
Απόβλητα κατεδαφίσεων	Ανακυκλωμένα αδρανή, πληρωτικά, πιθανές πρώτες ύλες	Επιλεκτική κατεδάφιση, διαλογή, έλεγχος γύψου/ρύπων	Ανομοιογένεια και χαμηλή καθαρότητα
Επιστροφές νοπού σκυροδέματος	Ανάκτηση αδρανών, επανένταξη ή προκατασκευασμένα στοιχεία	Γνωστή προέλευση, γρήγορη διαχείριση, έλεγχος ποιότητας	Μεταβολή χρόνου πήξης και εργασιμότητας
Νερά πλύσης και λάσπες	Επαναχρησιμοποίηση νερού ή αξιοποίηση στερεού κλάσματος	Έλεγχος pH, στερεών και επίδρασης στο μίγμα	Αστάθεια σύστασης και αλκαλικότητα
RDF/SRF και άλλα εναλλακτικά καύσιμα	Συναξιοποίηση σε κλιβάνους	Θερμογόνος δύναμη, χαμηλό χλώριο, έλεγχος εκπομπών	Κοινωνική δυσπιστία και κίνδυνος ακατάλληλων ροών

Πίνακας 5 Ειδικά ρεύματα και πιθανές κυκλικές χρήσεις στην τσιμεντοβιομηχανία

4. Συγκριτική Αξιολόγηση Ρευμάτων Αποβλήτων

Η συγκριτική αξιολόγηση των ρευμάτων αποβλήτων είναι αναγκαία διότι η Κυκλική Οικονομία δεν μπορεί να εφαρμόζεται με ενιαίο τρόπο σε όλα τα υλικά. Κάθε ροή έχει διαφορετική τεχνική συμπεριφορά, διαφορετική περιβαλλοντική αξία, διαφορετικό κόστος και διαφορετικό κανονιστικό καθεστώς.

Το συγκριτικό πλαίσιο βασίζεται σε τέσσερις άξονες: τεχνικά κριτήρια, περιβαλλοντικά κριτήρια, οικονομικά κριτήρια και κανονιστικό ή θεσμικό πλαίσιο. Οι άξονες αυτοί δεν είναι ανεξάρτητοι. Ένα υλικό με υψηλή τεχνική αξία μπορεί να είναι ασύμφορο λόγω μεταφοράς· ένα περιβαλλοντικά χρήσιμο υλικό μπορεί να αποκλείεται από πρότυπα· μια φθηνή ροή μπορεί να δημιουργεί κινδύνους ποιότητας. Επομένως, η τελική απόφαση δεν είναι άθροισμα μεμονωμένων εντυπώσεων, αλλά ισορροπία μεταξύ παραγωγής, περιβάλλοντος, κόστους και ευθύνης (Korhonenetal., 2018; Habertetal., 2020).

4.1 Τεχνικά κριτήρια

Το πρώτο τεχνικό κριτήριο το οποίο λαμβάνεται υπ' όψιν είναι η χημική σύσταση, διότι στην παραγωγή τσιμέντου, τα υλικά δεν εισάγονται απλώς ως μάζα, αλλά ως φορείς οξειδίων, ανόργανων συστατικών και πιθανών ανεπιθύμητων στοιχείων. Η περιεκτικότητα σε CaO , SiO_2 , Al_2O_3 και Fe_2O_3 , καθώς και η παρουσία θεικών, χλωριόντων ή βαρέων μετάλλων, επηρεάζουν τη συμπεριφορά στον κλίβανο και στο τελικό προϊόν. Για τον λόγο αυτό, ένα δευτερογενές υλικό πρέπει να εντάσσεται σε σταθερό πρόγραμμα χημικού ελέγχου (Scrivenetal., 2018; TITAN Ελλάδος, 2026b).

Ένα ακόμη τεχνικό κριτήριο είναι η ορυκτολογική και μικροδομική καταλληλότητα. Υλικά με παρόμοια χημική σύσταση μπορεί να έχουν διαφορετική αντιδραστικότητα λόγω διαφορετικής κρυσταλλικής ή άμορφης δομής. Η ποζολανική δραστηριότητα, η λανθάνουσα υδραυλικότητα και η ικανότητα λειτουργίας ως πληρωτικού εξαρτώνται από τη δομή του υλικού και από την ειδική του επιφάνεια. Τα λεπτόκοκκα απόβλητα κατεδαφίσεων, για παράδειγμα, δεν πρέπει να

θεωρούνται αυτομάτως SCMs· χρειάζονται έλεγχο δραστηριότητας, διότι συχνά η συμβολή τους είναι περισσότερο φυσική παρά χημική (Tokarevaetal., 2023; Habertetal., 2020).

Η κοκκομετρία αποτελεί κριτήριο που επηρεάζει τόσο την παραγωγή όσο και την τελική απόδοση. Τα πολύ αδρά υλικά μπορεί να απαιτούν άλεση, ενώ τα πολύ λεπτόκοκκα μπορεί να δημιουργούν προβλήματα σκόνης, υγρασίας ή υπερβολικής απαίτησης νερού. Στο σκυρόδεμα, η κατανομή των κόκκων επηρεάζει την εργασιμότητα, την πυκνότητα συσκευασίας και τις μηχανικές ιδιότητες. Η χρήση ανακυκλωμένων αδρανών δεν μπορεί να γίνει με την αφέλεια ότι «πέτρα είναι και το ένα, πέτρα και το άλλο». Η μορφή, το παλαιό κονίαμα και η απορρόφηση νερού διαφοροποιούν ουσιαστικά τη συμπεριφορά τους (Kleijeretal., 2017; Wijayasundaraetal., 2016).

Η υγρασία είναι κρίσιμη τεχνική παράμετρος για εναλλακτικά καύσιμα και δευτερογενείς πρώτες ύλες. Υψηλή υγρασία μειώνει τη θερμογόνο δύναμη, αυξάνει την ενεργειακή απαίτηση και μπορεί να διαταράξει τη σταθερότητα της καύσης. Στα δευτερογενή υλικά που εισάγονται στην άλεση ή στο μίγμα σκυροδέματος, η υγρασία επηρεάζει τη δοσολογία και τη σταθερότητα παραγωγής. Η βιομηχανία χρειάζεται προβλέψιμη συμπεριφορά, όχι υλικά που αλλάζουν ιδιότητες ανάλογα με τον καιρό ή την αποθήκευση. Η αποθήκευση υπό κατάλληλες συνθήκες είναι, συνεπώς, μέρος της τεχνικής καταλληλότητας (Όμιλος ΗΡΑΚΛΗΣ, 2026b; Vieiraetal., 2019).

Η σταθερότητα της ροής αποτελεί ίσως το πιο πρακτικό τεχνικό κριτήριο. Μια τσιμεντοβιομηχανία λειτουργεί σε συνεχή βάση και δεν μπορεί να βασιστεί σε περιστασιακά διαθέσιμες ποσότητες. Τα δευτερογενή υλικά χρειάζονται σταθερή διαθεσιμότητα, προβλέψιμη ποιότητα και συμβατικές σχέσεις με προμηθευτές. Ακόμη και ένα εξαιρετικό υλικό, αν παρέχεται σποραδικά, μπορεί να αξιοποιηθεί μόνο συμπληρωματικά (Murrayetal., 2017; Korhonenetal., 2018).

Για τα εναλλακτικά καύσιμα, κεντρικά τεχνικά κριτήρια είναι η θερμογόνο δύναμη, η υγρασία, το μέγεθος τεμαχίων, η περιεκτικότητα σε χλώριο, θείο και μέταλλα, καθώς και η συμπεριφορά καύσης. Ο κλίβανος τσιμέντου απαιτεί σταθερό θερμικό προφίλ και ασφαλή ενσωμάτωση ανόργανων υπολειμμάτων. Αν το καύσιμο παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις, αυξάνει τον κίνδυνο λειτουργικών διαταραχών. Η κυκλική χρήση αποβλήτων ως καυσίμων

προϋποθέτει οργανωμένη προετοιμασία και ποιοτικό έλεγχο πριν από την είσοδο στη μονάδα (GCCA, 2026a; Όμιλος ΗΡΑΚΛΗΣ, 2026b).

Η συμβατότητα με τα πρότυπα προϊόντος είναι τεχνικό κριτήριο με άμεση εμπορική σημασία. Το τσιμέντο και το σκυρόδεμα δεν είναι προϊόντα ελεύθερου αυτοσχεδιασμού. Πρέπει να πληρούν συγκεκριμένες προδιαγραφές αντοχής, σύστασης, χρόνου πήξης, σταθερότητας όγκου και ανθεκτικότητας. Η χρήση δευτερογενών υλικών δεν πρέπει να θέτει σε αμφιβολία τη συμμόρφωση. Αντιθέτως, όσο πιο καινοτόμο είναι ένα υλικό, τόσο περισσότερη τεκμηρίωση χρειάζεται (Scriveneret al., 2018; Habertetal., 2020).

Η τεχνική αξιολόγηση πρέπει να περιλαμβάνει και την επίδραση στη μακροχρόνια ανθεκτικότητα. Ιδίως στα σκυροδέματα με δευτερογενή αδρανή ή συμπληρωματικά υλικά, η αρχική αντοχή δεν είναι αρκετή. Χρειάζεται διερεύνηση της συμπεριφοράς σε ενανθράκωση, χλωριόντα, θειικά, παγετό και υγροθερμικές μεταβολές. Η βραχυπρόθεσμη μηχανική επίδοση μπορεί να κρύβει μακροπρόθεσμη ευπάθεια (Kleijeretal., 2017; Habertetal., 2020).

Κριτήριο	Υψηλή καταλληλότητα	Μέτρια καταλληλότητα	Χαμηλή καταλληλότητα
Χημική σύσταση	Σταθερή και συμβατή με σύνθεση τσιμέντου	Μικρές διακυμάνσεις με δυνατότητα διόρθωσης	Άγνωστη ή έντονα μεταβαλλόμενη σύσταση
Κοκκομετρία	Συμβατή χωρίς σημαντική επεξεργασία	Απαιτεί περιορισμένη άλεση/διαλογή	Απαιτεί ενεργοβόρα ή δαπανηρή προεπεξεργασία
Διαθεσιμότητα	Σταθερή, συμβατική, περιφερειακά κοντινή	Περιοδική αλλά προβλέψιμη	Σποραδική και αβέβαιη
Επίδραση σε προϊόν	Δεν μειώνει αντοχή και ανθεκτικότητα	Απαιτεί προσαρμογή μίγματος	Δημιουργεί κίνδυνο αστοχίας ή μη συμμόρφωσης

Πίνακας 6 Τεχνική αξιολόγηση ενδεικτικών ρευμάτων

4.2 Περιβαλλοντικά κριτήρια

Τα περιβαλλοντικά κριτήρια πρέπει να εξετάζουν το συνολικό ισοζύγιο της ροής. Η απλή αποφυγή διάθεσης σε ΧΥΤΑ είναι σημαντική, αλλά δεν αρκεί. Πρέπει να υπολογίζεται αν η

συλλογή, η διαλογή, η επεξεργασία, η μεταφορά και η χρήση του υλικού προκαλούν μικρότερη συνολική επιβάρυνση από το σενάριο αναφοράς. Η Ευρωπαϊκή προσέγγιση για τα απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων δίνει πλέον έμφαση όχι μόνο στην ποσότητα ανάκτησης αλλά και στην ποιότητα της ανακύκλωσης (European Commission, 2026a; EEA, 2019; Arulrajah et al., 2017).

Σημαντικό κριτήριο είναι η δυνατότητα μείωσης εκπομπών CO₂, καθώς ρεύματα που υποκαθιστούν κλίνκερ έχουν συχνά μεγαλύτερο δυναμικό μείωσης εκπομπών από ρεύματα που αντικαθιστούν μόνο αδρανή, διότι το κλίνκερ ενσωματώνει υψηλές εκπομπές διεργασίας και ενέργειας. Παράλληλα, εναλλακτικά καύσιμα με βιογενές κλάσμα μπορούν να μειώσουν μέρος των ορυκτών εκπομπών. Η αξιολόγηση όμως πρέπει να είναι προσεκτική, διότι η προέλευση του υλικού, η προεπεξεργασία και η μεταφορά μπορούν να διαφοροποιήσουν σημαντικά το τελικό αποτέλεσμα (Habert et al., 2020; GCCA, 2026a; Akhtar & Sarmah, 2018).

Επίσης, σημαντικό κριτήριο είναι η εξοικονόμηση πρωτογενών φυσικών πόρων. Η χρήση δευτερογενών πρώτων υλών μειώνει την ανάγκη εξόρυξης ασβεστόλιθου, αργίλου ή αδρανών. Το περιβαλλοντικό όφελος είναι μεγαλύτερο όταν το δευτερογενές υλικό αντικαθιστά υλικό υψηλής περιβαλλοντικής έντασης ή όταν προέρχεται από ροή που διαφορετικά θα απορριπτόταν. Ωστόσο, η εξοικονόμηση πόρων πρέπει να συγκρίνεται με την ενέργεια επεξεργασίας. Η θραύση, άλεση, ξήρανση και διαλογή δεν είναι άνευ κόστους περιβαλλοντικά, ακόμη κι αν αναγνωρίζονται ως πράσινες δραστηριότητες (Wijayasundara et al., 2016; Korhonen et al., 2018).

Επιπροσθέτως, ένα κριτήριο είναι η αποφυγή ταφής και η αναβάθμιση της διαχείρισης αποβλήτων. Τα απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων έχουν μεγάλο όγκο και μπορούν να επιβαρύνουν σημαντικά τους χώρους διάθεσης. Η αξιοποίησή τους στην παραγωγή δομικών υλικών μπορεί να μειώσει την πίεση αυτή. Ωστόσο, η χαμηλής ποιότητας ανάκτηση, όπως η αδιάκριτη επίχωση, δεν ισοδυναμεί με ουσιαστική κυκλικότητα. Το περιβαλλοντικό κριτήριο πρέπει να ευνοεί τις χρήσεις που διατηρούν μεγαλύτερη αξία και δημιουργούν δευτερογενή προϊόντα με πραγματική τεχνική λειτουργία (EEA, 2019; Reike et al., 2018).

Ως προς τον κίνδυνο τοξικότητας ή έκπλυσης, ορισμένα βιομηχανικά απόβλητα μπορεί να περιέχουν βαρέα μέταλλα, διαλυτά άλατα ή οργανικούς ρύπους. Η περιβαλλοντική ασφάλεια ενός δευτερογενούς υλικού εξαρτάται από τη συμπεριφορά του στο τελικό προϊόν και στο

τέλος ζωής, ιδίως όταν το υλικό ενδέχεται μελλοντικά να θραυσθεί, να εκτεθεί ή να ανακυκλωθεί ξανά (Tokarevaetal., 2023; Korhonenetal., 2018). Ακόμη, σημαντική είναι η επίδραση στη διάρκεια ζωής της κατασκευής. Ένα υλικό που μειώνει τις αρχικές εκπομπές αλλά περιορίζει την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος μπορεί να αυξήσει τις συνολικές επιπτώσεις λόγω επισκευών ή αντικατάστασης. Για τον λόγο αυτό, η περιβαλλοντική αξιολόγηση πρέπει να συνδέεται με τη λειτουργική διάρκεια και όχι μόνο με το εργοστασιακό αποτύπωμα. Η καλύτερη περιβαλλοντική λύση δεν είναι πάντα εκείνη με τη χαμηλότερη αρχική εκπομπή, αλλά εκείνη που προσφέρει την ίδια ή καλύτερη υπηρεσία με μικρότερη συνολική επιβάρυνση (Kleijeretal., 2017; Habertetal., 2020).

Το τελευταίο κριτήριο είναι η συμβατότητα με την ιεράρχηση αποβλήτων. Η χρήση ενός υπολείμματος ως εναλλακτικού καυσίμου είναι περιβαλλοντικά εύλογη όταν το υλικό δεν μπορεί να ανακυκλωθεί με υψηλότερη αξία (Alsarhanetal., 2021). Αν, όμως, η ενεργειακή ανάκτηση απορροφά υλικά που θα μπορούσαν να ανακυκλωθούν υλικά, τότε η πρακτική έρχεται σε αντίθεση με την κυκλική ιεράρχηση. Η τσιμεντοβιομηχανία πρέπει να λειτουργεί συμπληρωματικά προς την ανακύκλωση και όχι ως εύκολη έξοδος για υλικά που θα μπορούσαν να διατηρηθούν σε υψηλότερο κύκλο αξίας (EuropeanCommission, 2026a; Όμιλος ΗΡΑΚΛΗΣ, 2026b). Τέλος, η περιβαλλοντική αξιολόγηση χρειάζεται διαφάνεια στα δεδομένα. Χωρίς αξιόπιστα στοιχεία για ποσότητες, σύσταση, μεταφορές, εκπομπές και τελικό προϊόν, κάθε ισχυρισμός περί κυκλικότητας παραμένει ατελής. Οι περιβαλλοντικές δηλώσεις προϊόντος, η ανάλυση κύκλου ζωής και η δημόσια περιβαλλοντική αναφορά μπορούν να στηρίζουν την εμπιστοσύνη των καταναλωτών και να αυξήσουν την ευαισθητοποίηση (GCCA, 2026b; TITAN Materials, 2026).

4.3 Οικονομικά κριτήρια

Η οικονομική αξιολόγηση των ρευμάτων αποβλήτων είναι αναγκαία διότι η κυκλικότητα δεν μπορεί να στηριχθεί μόνιμα σε επιδοτούμενη ή συγκυριακή εφαρμογή. Μια λύση που λειτουργεί μόνο όταν καλύπτεται από εξωτερική χρηματοδότηση ή όταν αγνοούνται τα κρυφά κόστη δεν είναι βιομηχανικά ώριμη. Το κόστος συλλογής, προεπεξεργασίας, αποθήκευσης, ποιοτικού ελέγχου, μεταφοράς, αδειοδότησης και πιθανών λειτουργικών κινδύνων πρέπει να

συγκρίνεται με το κόστος πρωτογενών υλικών, καυσίμων και διάθεσης αποβλήτων (Murray et al., 2017; Wijayasundara et al., 2016).

Τα δευτερογενή υλικά μπορεί να είναι φθηνότερα από τα πρωτογενή, ιδίως όταν ο παραγωγός αποβλήτου επιθυμεί να αποφύγει κόστος διάθεσης. Ωστόσο, η χαμηλή τιμή αγοράς μπορεί να αντισταθμίζεται από κόστος προεπεξεργασίας ή ελέγχου. Ένα υλικό με χαμηλή τιμή αλλά μεγάλη μεταβλητότητα μπορεί να καταλήξει ακριβότερο, επειδή απαιτεί συχνές διορθώσεις στη σύνθεση, περισσότερες δοκιμές και μεγαλύτερο παραγωγικό ρίσκο. Επιπλέον, στα δομικά υλικά, όπου οι ποσότητες είναι μεγάλες και η μοναδιαία αξία χαμηλή, η απόσταση μπορεί να καθορίσει την οικονομική βιωσιμότητα. Η αξιοποίηση ανακυκλωμένων αδρανών ή αποβλήτων κατεδαφίσεων είναι οικονομικά πιο λογική όταν πραγματοποιείται σε περιφερειακή κλίμακα, κοντά σε αστικά κέντρα και μονάδες παραγωγής. Αντίθετα, η μεταφορά βαριών υλικών σε μεγάλες αποστάσεις μπορεί να εξανεμίσει το όφελος (Kleijer et al., 2017; Wijayasundara et al., 2016).

Όταν ένα απόβλητο θα οδηγούνταν σε ταφή ή άλλη δαπανηρή διαχείριση, η αξιοποίησή του στην τσιμεντοβιομηχανία μπορεί να δημιουργήσει οικονομικό όφελος για περισσότερους από έναν φορείς. Ο παραγωγός αποβλήτου μειώνει κόστος διάθεσης, η τσιμεντοβιομηχανία αποκτά εναλλακτική εισροή και η κοινωνία μειώνει την πίεση στους χώρους διάθεσης. Η τριπλή αυτή ωφέλεια όμως προϋποθέτει σαφή συμβόλαια, έλεγχο ποιότητας και νόμιμη διακίνηση (Murray et al., 2017; Wijayasundara et al., 2016).

Επιπρόσθετα, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η αξιοποίηση δευτερογενών ροών μπορεί να απαιτεί εξοπλισμό προεπεξεργασίας, σιλό, συστήματα τροφοδοσίας, φίλτρα, εγκαταστάσεις ανάκτησης νερού, διαχωριστές αδρανών ή συστήματα παρακολούθησης. Η απόφαση επένδυσης εξαρτάται από τον αναμενόμενο όγκο ροών, τη διάρκεια συμβάσεων και τη σταθερότητα της πολιτικής. Μια εταιρεία δύσκολα θα επενδύσει σε εξοπλισμό όταν δεν γνωρίζει αν η ροή θα υπάρχει σε τρία χρόνια ή αν το κανονιστικό πλαίσιο θα αλλάξει. Η σταθερότητα είναι οικονομικό αγαθό (GIZ–LafargeHolcim, 2020, ενότητα 3.6).

Αν η χρήση δευτερογενούς υλικού οδηγήσει σε αστοχία ποιότητας, επιστροφή προϊόντων, απώλεια πιστοποίησης ή διακοπή παραγωγής, το κόστος μπορεί να είναι πολλαπλάσιο του αρχικού οφέλους. Η βιομηχανία τσιμέντου και σκυροδέματος λειτουργεί με μικρά περιθώρια

ανοχής σε κρίσιμες ιδιότητες. Επομένως, η οικονομική αξιολόγηση πρέπει να περιλαμβάνει κόστος κινδύνου και όχι μόνο κόστος αγοράς (Scrivener et al., 2018; Habert et al., 2020).

Γενικότερα, η αγορά κατασκευών είναι συχνά συντηρητική, επειδή η αστοχία στοιχίζει. Προϊόντα που περιλαμβάνουν ανακυκλωμένα ή δευτερογενή υλικά χρειάζονται πιστοποίηση, σαφείς τεχνικές επιδόσεις και εμπιστοσύνη μηχανικών, εργοληπτών και δημόσιων αναθετουσών αρχών. Αν η αγορά τα θεωρεί χαμηλότερης ποιότητας, το οικονομικό όφελος μειώνεται (Scrivener et al., 2018; Akhtar & Sarmah, 2018).

Τέλος, η οικονομική αξιολόγηση πρέπει να λαμβάνει υπόψη και τα μελλοντικά κόστη άνθρακα. Καθώς εντείνονται οι πολιτικές απανθρακοποίησης, οι εκπομπές CO₂ αποκτούν αυξανόμενη οικονομική σημασία. Η μείωση του κλίνκερ, η χρήση εναλλακτικών καυσίμων και η βελτίωση ενεργειακής απόδοσης μπορεί να προσφέρουν όχι μόνο περιβαλλοντικό αλλά και οικονομικό πλεονέκτημα. Το κόστος άνθρακα μετατρέπει αυτό που άλλοτε θεωρούνταν περιβαλλοντική ευαισθησία σε παράγοντα ανταγωνιστικότητας. Στην τσιμεντοβιομηχανία, το μέλλον δεν θα επιβραβεύσει απλώς τον φθινό παραγωγό, αλλά τον παραγωγό που μειώνει μετρήσιμα την έκθεση σε άνθρακα (GCCA, 2026b; Habert et al., 2020).

4.4 Κανονιστικό/θεσμικό πλαίσιο

Το κανονιστικό πλαίσιο αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την εφαρμογή της Κυκλικής Οικονομίας στην τσιμεντοβιομηχανία. Η τεχνική δυνατότητα αξιοποίησης ενός ρεύματος δεν αρκεί αν δεν υπάρχει νόμιμη δυνατότητα μεταφοράς, αποθήκευσης, επεξεργασίας και χρήσης του (European Union, 2008, άρθρα 5–6 και 23). Η διάκριση ανάμεσα σε απόβλητο, παραπροϊόν και δευτερογενή πρώτη ύλη έχει σημαντικές συνέπειες για την αδειοδότηση και την ευθύνη. Σε ένα πεδίο όπου εμπλέκονται βαριά βιομηχανία, δημόσια υγεία και δομική ασφάλεια, η κανονιστική σαφήνεια είναι προϋπόθεση εμπιστοσύνης (European Commission, 2026a; Korhonen et al., 2018).

Η ευρωπαϊκή πολιτική για τα απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων αναγνωρίζει τη μεγάλη τους σημασία για την Κυκλική Οικονομία. Το γεγονός ότι αποτελούν περισσότερο από το ένα τρίτο των αποβλήτων της Ευρωπαϊκής Ένωσης καθιστά αναγκαία τη μετάβαση από τη διάθεση

και τη χαμηλής αξίας ανάκτηση σε ποιοτική ανακύκλωση. Η προδιαλογή, οι έλεγχοι πριν την κατεδάφιση και η χωριστή συλλογή υλικών είναι ουσιώδη στοιχεία. Χωρίς αυτά, η τσιμεντοβιομηχανία θα λαμβάνει ασταθείς και ενδεχομένως ρυπασμένες ροές, κάτι που περιορίζει την ασφαλή αξιοποίηση (EuropeanCommission, 2026a; EEA, 2019).

Η ευρωπαϊκή ταξινομία για τη βιώσιμη χρηματοδότηση έχει επίσης σημασία, επειδή συνδέει την κυκλικότητα με κριτήρια τεχνικής συμμόρφωσης. Για ορισμένες δραστηριότητες κατασκευών, τα κριτήρια αναφέρονται σε χωριστή διαχείριση αποβλήτων, υψηλά ποσοστά επαναχρησιμοποίησης ή ανακύκλωσης και μείωση πρωτογενών πρώτων υλών μέσω δευτερογενών υλικών. Η κατεύθυνση είναι σαφής, η κυκλικότητα γίνεται σταδιακά όρος χρηματοδότησης και αξιολόγησης έργων, όχι απλώς εθελοντική περιβαλλοντική πρακτική (EuropeanUnion, 2026).

Για την τσιμεντοβιομηχανία, οι περιβαλλοντικοί όροι λειτουργίας, τα όρια εκπομπών και οι άδειες χρήσης εναλλακτικών καυσίμων είναι καθοριστικοί. Η χρήση αποβλήτων ως καυσίμων ή πρώτων υλών πρέπει να εντάσσεται σε πλαίσιο που ορίζει επιτρεπόμενες κατηγορίες, όρια ρύπων, διαδικασίες παραλαβής και υποχρεώσεις παρακολούθησης. Η κοινωνική δυσπιστία απέναντι στη χρήση αποβλήτων στους κλιβάνους δεν είναι παράλογη όταν δεν υπάρχει διαφάνεια (European Commission, 2013, BAT 11–13; GIZ–LafargeHolcim, 2020, ενότητες 3.1–3.2).

Τα πρότυπα για τσιμέντο και σκυρόδεμα περιορίζουν, αλλά και προστατεύουν, την κυκλική καινοτομία. Περιορίζουν, επειδή δεν επιτρέπουν οποιαδήποτε αλλαγή σύνθεσης χωρίς τεκμηρίωση. Προστατεύουν, επειδή εξασφαλίζουν ότι το προϊόν που φτάνει στο έργο έχει ελάχιστη προβλέψιμη ποιότητα. Η πρόκληση είναι να προσαρμοστούν τα πρότυπα ώστε να επιτρέπουν κατάλληλα δευτερογενή υλικά, χωρίς να μειώνουν τις απαιτήσεις ασφαλείας. Η χαλάρωση προδιαγραφών στο όνομα της βιωσιμότητας θα ήταν λάθος. Η ορθή λύση είναι η τεκμηριωμένη διεύρυνση των αποδεκτών υλικών (Scrivener et al., 2018; Habert et al., 2020).

Η δημόσια προμήθεια μπορεί να λειτουργήσει ως μοχλός κυκλικότητας. Αν τα δημόσια έργα ενσωματώνουν κριτήρια χαμηλού ανθρακικού αποτυπώματος, ανακυκλωμένου περιεχομένου και τεκμηριωμένης ανθεκτικότητας, τότε δημιουργείται αγορά για προϊόντα κυκλικής οικονομίας. Χωρίς ζήτηση, η βιομηχανία διστάζει να επενδύσει. Με σταθερή ζήτηση, οι

επενδύσεις σε δευτερογενή υλικά, περιβαλλοντικές δηλώσεις προϊόντος και συστήματα ανάκτησης αποκτούν οικονομικό νόημα (European Commission, χ.χ.).

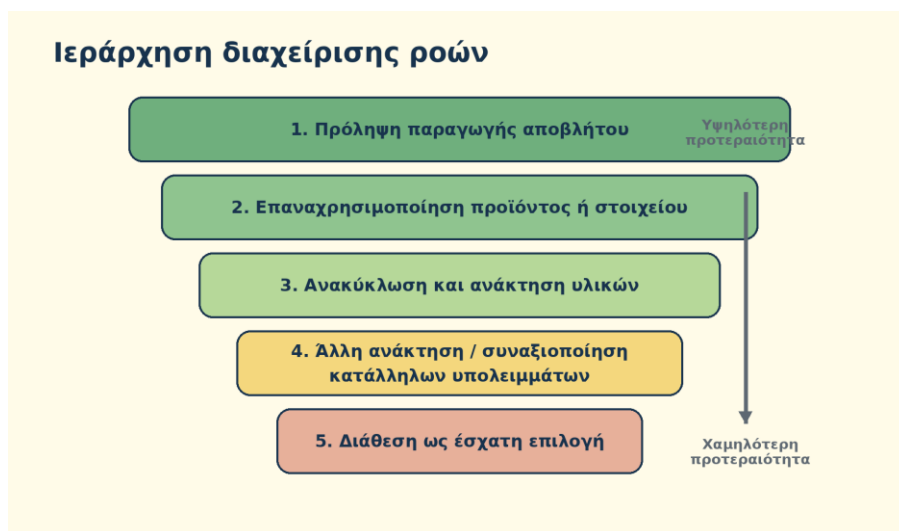
Το θεσμικό πλαίσιο πρέπει επίσης να αποτρέπει την ψευδοκυκλικότητα. Υπάρχει πάντα ο κίνδυνος να βαφτίζεται κυκλικό κάθε σενάριο που απομακρύνει ένα απόβλητο από τον χώρο διάθεσης, ακόμη κι όταν η τελική χρήση είναι χαμηλής αξίας ή περιβαλλοντικά αμφίβολη. Η ποιοτική ανακύκλωση, η ιχνηλασιμότητα και η αξιολόγηση κύκλου ζωής πρέπει να αποτελούν κριτήρια αποδοχής (EEA, 2019; Reikeetal., 2018).

Η ποσοτική ανάγνωση του ευρωπαϊκού πλαισίου βοηθά να διαχωριστεί η πραγματική κυκλικότητα από την απλή εκτροπή αποβλήτων από την ταφή. Τα ακόλουθα σημεία αναφοράς έχουν διαφορετικό πεδίο, αλλά επηρεάζουν άμεσα τη διαθεσιμότητα και την ποιότητα ροών που μπορεί να εξετάσει η τσιμεντοβιομηχανία (European Union, 2008, άρθρο 11; European Union, 2018a; European Union, 2018b).

Ρεύμα / δείκτης	Επίσημο ποσοτικό σημείο	Χρονικός ορίζοντας	Σημασία για τον κλάδο
Απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων (ΑΕΚΚ)	Πάνω από το 1/3 του συνόλου των αποβλήτων που παράγονται στην ΕΕ	Τρέχουσα ευρωπαϊκή αποτύπωση	Μεγάλη δυνητική δεξαμενή, αλλά απαιτεί επιλεκτική κατεδάφιση και καθαρές ροές
Μη επικίνδυνα ΑΕΚΚ	70% κατά βάρος για προετοιμασία επαναχρησιμοποίησης, ανακύκλωση και άλλη ανάκτηση υλικών	Στόχος από το 2020	Το ποσοστό μόνο του δεν αποδεικνύει ανακύκλωση υψηλής αξίας
Αστικά απόβλητα - ανακύκλωση	55% το 2025 · 60% το 2030 · 65% το 2035	2025-2035	Η συναξιοποίηση πρέπει να αφορά κατάλληλο υπολειμματικό κλάσμα και όχι ανακυκλώσιμα υλικά
Αστικά απόβλητα - ταφή	Το πολύ 10% των αστικών αποβλήτων	2035	Ενισχύει την ανάγκη οργανωμένων διαδρομών πρόληψης, ανακύκλωσης και ασφαλούς ανάκτησης

Πίνακας 7 Συγκριτικά ευρωπαϊκά ποσοτικά σημεία αναφοράς για απόβλητα και ανάκτηση

Σημείωση: Ο στόχος 70% για τα ΑΕΚΚ περιλαμβάνει και άλλη ανάκτηση υλικών, όπως επίχωση, επομένως δεν ισοδυναμεί αυτομάτως με κλειστό κύκλο υψηλής αξίας. Πηγές: European Commission (2026a), Directive 2008/98/EC και Directives (EU) 2018/850-851.



Σχήμα 1 Ιεράρχηση διαχείρισης ροών πριν από τη βιομηχανική αξιοποίηση

Το σχήμα 1 δείχνει ότι η συναξιοποίηση σε κλίβανο δεν είναι η πρώτη επιλογή. Εξετάζεται για κατάλληλα υπολειμματικά ρεύματα αφού αποκλειστούν τεχνικά ασφαλείς διαδρομές πρόληψης, επαναχρησιμοποίησης και υλικής ανακύκλωσης και μόνο με έλεγχο σύστασης, εκπομπών και νομιμότητας (Directive 2008/98/EC; Heidelberg Materials, 2026) (European Union, 2008, άρθρο 4; GIZ–LafargeHolcim, 2020, ενότητα 1.4).

4.5 Εφαρμογή και προοπτικές στην ελληνική τσιμεντοβιομηχανία: TITAN και ΗΡΑΚΛΗΣ

Η Ελλάδα διαθέτει μακρά παράδοση στην παραγωγή τσιμέντου και οι επιχειρηματικές οντότητες TITAN και ΗΡΑΚΛΗΣ συνδέονται με βιομηχανικές εγκαταστάσεις, δίκτυα προμήθειας, μονάδες σκυροδέματος και περιβαλλοντικές υποχρεώσεις (TITAN Ελλάδος, 2026a; Όμιλος ΗΡΑΚΛΗΣ, 2026a).

Στην περίπτωση του TITAN, η εταιρική παρουσίαση της Κυκλικής Οικονομίας συνδέει την παραγωγή τσιμέντου με τη βιομηχανική συμβίωση, τη χρήση εναλλακτικών πρώτων υλών και

καυσίμων, τη βιώσιμη κατασκευή και την ανάκτηση υλικών και ενέργειας. Ειδική σημασία έχει η αναφορά σε υλικά όπως τέφρες, σκωρίες, υπολείμματα υαλοανακύκλωσης, υλικά εκσκαφών, απόβλητα κατεδαφίσεων και επιστροφές σκυροδέματος από μονάδες της INTERBETON, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εναλλακτικές πρώτες ύλες στην παραγωγή τσιμέντου (TITAN Ελλάδος, 2026a; TITAN Ελλάδος, 2026b).

Η πρακτική αξία της προσέγγισης του TITAN βρίσκεται στο ότι συνδέει τα απόβλητα με συγκεκριμένη παραγωγική χρήση. Η αναφορά στις επιστροφές σκυροδέματος από την INTERBETON είναι ιδιαίτερος σημαντική, επειδή αφορά ρεύμα γνωστής προέλευσης, εντός ομίλου ή συνεργαζόμενου δικτύου, με μεγαλύτερη δυνατότητα ιχνηλασιμότητας από γενικευμένα απόβλητα κατεδαφίσεων. Έτσι, η εφαρμογή της Κυκλικής Οικονομίας γίνεται πιο πειστική: δεν βασίζεται σε αφηρημένη συλλογή αποβλήτων, αλλά σε οργανωμένη επανένταξη υλικού που προκύπτει από την ίδια αλυσίδα σκυροδέματος (TITAN Ελλάδος, 2026b; Vieiraetal., 2019).

Ο TITAN αναφέρεται επίσης στη συναξιοποίηση εναλλακτικών καυσίμων στους κλιβάνους παραγωγής κλίνκερ, με ανάκτηση ενέργειας και υλικών. Η πρακτική αυτή, όταν εφαρμόζεται με προδιαγραφές, μπορεί να συμβάλει στη μείωση χρήσης μη ανανεώσιμων καυσίμων και στην αξιοποίηση μη ανακυκλώσιμων υπολειμμάτων. Παράλληλα, η εταιρεία υπογραμμίζει την ανάγκη ελέγχων τόσο στην παραγωγή όσο και κατά την παραλαβή των εναλλακτικών καυσίμων. Πρόκειται για κρίσιμο σημείο, διότι χωρίς έλεγχο η συναξιοποίηση παύει να είναι κυκλική πρακτική και γίνεται απλώς διαχείριση αποβλήτων μέσω καύσης (TITAN Ελλάδος, 2026c; GCCA, 2026a).

Στην περίπτωση του Ομίλου ΗΡΑΚΛΗΣ, η Κυκλική Οικονομία παρουσιάζεται ως στρατηγική προτεραιότητα συνδεδεμένη με την εξοικονόμηση μη ανανεώσιμων φυσικών πόρων και την αξιοποίηση αποβλήτων που διαφορετικά θα οδηγούνταν σε ταφή. Ο Όμιλος δηλώνει ότι χρησιμοποιεί καύσιμα και πρώτες ύλες προερχόμενες από βιομηχανικά, εμπορικά και αστικά απόβλητα, καθώς και υπολείμματα ανακύκλωσης και γεωργικά απόβλητα, εντάσσοντάς τα στην παραγωγική διαδικασία με βάση τις αρχές της Κυκλικής Οικονομίας (Όμιλος ΗΡΑΚΛΗΣ, 2026a; Όμιλος ΗΡΑΚΛΗΣ, 2026b).

Η προσέγγιση του ΗΡΑΚΛΗ έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον επειδή συνδέεται με την ευρύτερη στρατηγική του Ομίλου Holcim για την κυκλική κατασκευή. Η επίσημη παρουσίαση τονίζει

τη χρήση αποβλήτων ως καυσίμων ή πρώτων υλών και την εφαρμογή βιώσιμης διαχείρισης αποβλήτων στις εγκαταστάσεις του. Η σημασία αυτής της κατεύθυνσης έγκειται στο ότι η τσιμεντοβιομηχανία μπορεί να λειτουργήσει ως αποδέκτης κατάλληλων υπολειμματικών ροών, αρκεί να μη διαρρηγνύεται η ιεράρχηση αποβλήτων και να μη μειώνεται ο ποιοτικός έλεγχος (Όμιλος ΗΡΑΚΛΗΣ, 2026a; EuropeanCommission, 2026a).

Συγκριτικά, και οι δύο επιχειρήσεις εμφανίζουν την Κυκλική Οικονομία μέσα από τρεις βασικές διαδρομές: εναλλακτικές πρώτες ύλες, εναλλακτικά καύσιμα και αξιοποίηση/ανάκτηση ροών που συνδέονται με το σκυροδέμα και τα απόβλητα κατασκευών. Η διαφορά δεν πρέπει να αναζητηθεί μόνο στις διατυπώσεις των ιστοσελίδων, αλλά στο επίπεδο εφαρμογής, στη διαφάνεια των δεδομένων, στα ποσοστά υποκατάστασης, στην ποιότητα των ροών και στη δυνατότητα σύνδεσης με μετρήσιμη μείωση αποτυπώματος (TITAN Ελλάδος, 2026a–b; Όμιλος ΗΡΑΚΛΗΣ, 2026a–b).

Για τον TITAN, μία ρεαλιστική πρόταση περαιτέρω εφαρμογής θα ήταν η συστηματική ανάπτυξη κλειστού κυκλώματος για τις επιστροφές σκυροδέματος και τα απόβλητα κατεδαφίσεων που σχετίζονται με το δίκτυο σκυροδέματος. Η εταιρεία θα μπορούσε να ενισχύσει την ιχνηλασιμότητα των επιστροφών, να διακρίνει χρήσεις υψηλής και χαμηλής αξίας και να δημοσιοποιεί ετήσια στοιχεία για τις ποσότητες που επανεντάσσονται στην παραγωγή τσιμέντου ή σκυροδέματος. Με τον τρόπο αυτό, η κυκλικότητα θα αποκτούσε τεκμηριωμένη μορφή και όχι μόνο ποιοτική περιγραφή (TITAN Ελλάδος, 2026b; TITAN Materials, 2026).

Για τον ΗΡΑΚΛΗ, μία αντίστοιχη πρόταση είναι η ενίσχυση της διαφάνειας ως προς τις κατηγορίες εναλλακτικών καυσίμων και πρώτων υλών, τις προδιαγραφές παραλαβής και τα περιβαλλοντικά αποτελέσματα της υποκατάστασης. Η κοινωνική αποδοχή της χρήσης αποβλήτων στους κλιβάνους εξαρτάται αποφασιστικά από τη δημόσια πληροφόρηση. Η δημοσιοποίηση συγκεντρωτικών δεδομένων για θερμική υποκατάσταση, εκπομπές, ποσοστά βιογενούς κλάσματος και είδη υπολειμματικών ροών θα μπορούσε να ενισχύσει την εμπιστοσύνη και να μειώσει την καχυποψία (Όμιλος ΗΡΑΚΛΗΣ, 2026b; GCCA, 2026b).

Και στις δύο περιπτώσεις, η Κυκλική Οικονομία θα μπορούσε να εφαρμοστεί πιο ολοκληρωμένα μέσω περιφερειακών συνεργασιών με δήμους, μονάδες ανακύκλωσης, εργολήπτες κατεδαφίσεων, λατομεία και δημόσιους φορείς έργων. Η τσιμεντοβιομηχανία δεν

μπορεί μόνη της να δημιουργήσει καθαρές ροές αποβλήτων κατασκευών. Χρειάζεται προηγούμενη διαλογή, απομάκρυνση επικίνδυνων υλικών και σταθερή τροφοδοσία. Η δημιουργία τοπικών συμφωνιών βιομηχανικής συμβίωσης θα μείωνε μεταφορές και θα αύξανε την ποιότητα των δευτερογενών υλικών (European Commission, 2026a; EEA, 2019).

Ένα ειδικό πεδίο εφαρμογής για την Ελλάδα είναι η αξιοποίηση αποβλήτων κατεδαφίσεων από αστικές ανακαινίσεις και παλαιό κτιριακό απόθεμα. Στην ελληνική εφαρμογή χρειάζεται να ελεγχθεί η ποιότητα των μικτών υλικών ανακαίνισης, καθώς η ανεπαρκής διαλογή αποτελεί αναγνωρισμένο κίνδυνο για την αξιοποίηση των ΑΕΚΚ. Ο TITAN και ο ΗΡΑΚΛΗΣ θα μπορούσαν να στηρίξουν πιλοτικές αλυσίδες προδιαλεγμένων υλικών, όπου το σκυρόδεμα, τα κεραμικά και τα λεπτόκοκκα κλάσματα θα οδηγούνται σε διαφορετικές χρήσεις (European Commission, 2026a; Akhtar & Sarmah, 2018).

Η ανάπτυξη προϊόντων χαμηλότερου κλίνκερ αποτελεί ακόμη μία κατεύθυνση εφαρμογής. Οι δύο εταιρείες μπορούν να ενισχύσουν την παραγωγή σύνθετων τσιμέντων και σκυροδεμάτων χαμηλότερου ανθρακικού αποτυπώματος, εφόσον τηρούνται οι τεχνικές προδιαγραφές και η ανθεκτικότητα. Η εφαρμογή αυτή συνδέεται με την παγκόσμια στρατηγική του κλάδου, όπου η υποκατάσταση κλίνκερ θεωρείται από τις βασικές παρεμβάσεις για την περίοδο έως το 2030. Για την Ελλάδα, η πρόκληση είναι να συνδυαστούν τοπικά διαθέσιμα υλικά, τεχνική αξιοπιστία και αποδοχή από την αγορά (GCCA, 2026a; Scrivener et al., 2018).

Εξίσου σημαντική είναι η αξιοποίηση περιβαλλοντικών δηλώσεων προϊόντος και δεδομένων κύκλου ζωής. Αν τα προϊόντα κυκλικής οικονομίας των ελληνικών τσιμεντοβιομηχανιών συνοδεύονται από τεκμηριωμένη LCA, οι μηχανικοί και οι αναθέτουσες αρχές μπορούν να τα συγκρίνουν με συμβατικές λύσεις. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για δημόσια έργα, όπου η εισαγωγή πράσινων κριτηρίων θα απαιτήσει αξιόπιστα δεδομένα. Η ελληνική αγορά χρειάζεται να μεταβεί από την αόριστη επίκληση της οικολογίας σε μετρήσιμες τεχνικές και περιβαλλοντικές επιδόσεις (Kleijer et al., 2017; European Commission, χ.χ.).

Η βασική επιφύλαξη για τις ελληνικές εφαρμογές αφορά τη διαθεσιμότητα και ποιότητα των δευτερογενών ροών. Η χώρα δεν μπορεί να αντιγράψει μηχανικά πρακτικές χωρών με διαφορετική βιομηχανική βάση, διαφορετικά απόβλητα και διαφορετική οργάνωση ανακύκλωσης. Χρειάζεται χαρτογράφηση ελληνικών ροών: τέφρες όπου υπάρχουν, σκωρίες ή άλλα βιομηχανικά παραπροϊόντα, απόβλητα κατεδαφίσεων, επιστροφές σκυροδέματος,

λάσπες και υπολείμματα ανακύκλωσης. Χωρίς τέτοια χαρτογράφηση, οι στόχοι μένουν γενικοί και η εφαρμογή αποσπασματική (Korhonen et al., 2018; Scrivener et al., 2018).

Επιχείρηση	Πεδία εφαρμογής	Τεκμηριωμένη ένδειξη	Πρόταση ενίσχυσης
TITAN	Εναλλακτικές πρώτες ύλες, εναλλακτικά καύσιμα, επιστροφές σκυροδέματος, βιομηχανική συμβίωση	Αναφορά σε τέφρες, σκωρίες, απόβλητα κατεδαφίσεων, υλικά ανακύκλωσης και επιστροφές INTERBETON	Ποσοτική δημοσιοποίηση ροών και LCA προϊόντων με δευτερογενές περιεχόμενο
ΗΡΑΚΛΗΣ	Καύσιμα και πρώτες ύλες από βιομηχανικά, εμπορικά και αστικά απόβλητα, υπολείμματα ανακύκλωσης και γεωργικά απόβλητα	Εταιρική αναφορά σε αξιοποίηση αποβλήτων ως πόρων και υποκατάσταση ορυκτών καυσίμων	Ενισχυμένη διαφάνεια ως προς κατηγορίες καυσίμων, ποσοστά υποκατάστασης και εκπομπές
Κοινή προοπτική	Περιφερειακά δίκτυα βιομηχανικής συμβίωσης και ποιοτική ανακύκλωση ΑΕΚΚ	Σύνδεση με ευρωπαϊκές κατευθύνσεις για CDW και κυκλική κατασκευή	Συνεργασίες με δήμους, εργολήπτες, μονάδες ανακύκλωσης και δημόσια έργα

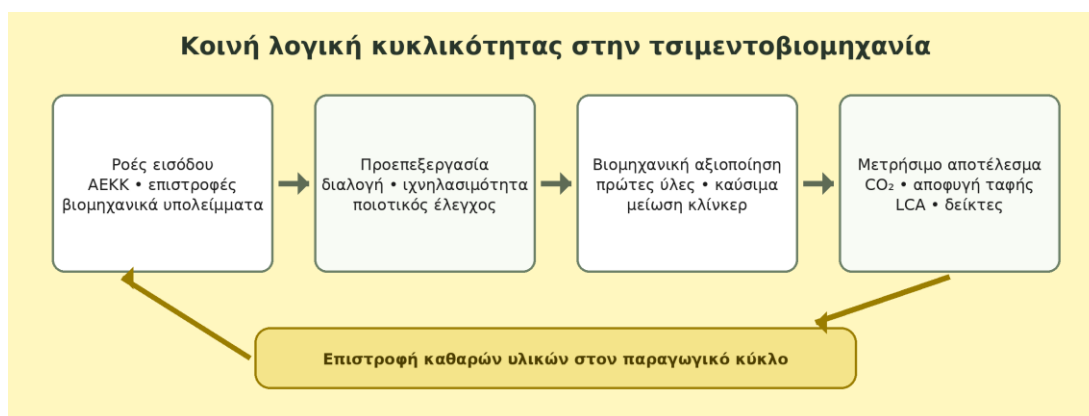
Πίνακας 8 Ενδεικτική αποτύπωση εφαρμογών Κυκλικής Οικονομίας σε TITAN και ΗΡΑΚΛΗΣ

Για να αποκτήσει η ελληνική αποτίμηση εξωτερικό σημείο αναφοράς, εξετάζονται ενδεικτικά η CEMEX και η Heidelberg Materials. Η CEMEX συνδέει την κυκλικότητα με τη Regenera και θέτει για το 2030 στόχο 55% εναλλακτικών καυσίμων και λόγο κλίνκερ 68%, ενώ η Heidelberg Materials επιδιώκει κυκλικές εναλλακτικές για το 50% των προϊόντων σκυροδέματος και συμμετοχή εναλλακτικών καυσίμων 45% έως το 2030 (CEMEX, 2026a; CEMEX, 2026b; Heidelberg Materials, 2026).

Επιχείρηση	Κύριος μηχανισμός	Χαρακτηριστική κατεύθυνση	Σημείο αναφοράς για την Ελλάδα
TITAN	Εναλλακτικές ύλες/καύσιμα και επιστροφές σκυροδέματος	Ιχνηλασιμότητα ροών INTERBETON και βιομηχανική συμβίωση	Ετήσια ποσοτικά στοιχεία και LCA ανά προϊόν
ΗΡΑΚΛΗΣ	Συναξιοποίηση υπολειμματικών καυσίμων και πρώτων υλών	Σύνδεση με ευρύτερη στρατηγική κυκλικής κατασκευής	Συγκρίσιμοι δείκτες υποκατάστασης και εκπομπών
CEMEX	Regenera, μείωση κλίνκερ και εναλλακτικά καύσιμα	55% εναλλακτικά καύσιμα και λόγος κλίνκερ 68% έως το 2030	Ενοποιημένη διαχείριση ροών και μετρήσιμοι στόχοι
Heidelberg Materials	ReConcrete, ανάκτηση κλασμάτων σκυροδέματος και εναλλακτικά καύσιμα	50% κυκλικές επιλογές σκυροδέματος και 45% εναλλακτικά καύσιμα έως το 2030	Επιλεκτική διαλογή και υψηλής αξίας ανάκτηση ΑΕΚΚ

Πίνακας 9 Συνοπτική σύγκριση ελληνικών και διεθνών ομίλων

Σημείωση: Η σύγκριση αφορά δημοσιοποιημένες στρατηγικές και όχι κατάταξη λειτουργικής επίδοσης, επειδή οι γεωγραφικές συνθήκες, τα διαθέσιμα ρεύματα και οι μέθοδοι αναφοράς διαφέρουν. Πηγές: TITAN Ελλάδος (2026a–c), Όμιλος ΗΡΑΚΛΗΣ (2026a–b), CEMEX (2026a–b) και Heidelberg Materials (2026).



Σχήμα 2 Κοινή λογική κυκλικότητας στην τσιμεντοβιομηχανία

Το κοινό πρότυπο είναι σαφές και αφορά πτυχές όπως καθαρή και ιχνηλάσιμη ροή, ποιοτικός έλεγχος, αξιοποίηση στην υψηλότερη τεχνικά ασφαλή βαθμίδα και μέτρηση του αποτελέσματος. Για την Ελλάδα, το κρίσιμο κενό δεν είναι η απουσία δυνατών χρήσεων, αλλά η σταθερή τροφοδοσία, η συγκρισιμότητα των δεικτών και η τεκμηρίωση με LCA (Reike et al., 2018; Kleijer et al., 2017).

Η σύγκριση γίνεται ουσιαστικότερη όταν διαχωρίζονται οι γενικές δεσμεύσεις από τους δημοσιευμένους αριθμητικούς δείκτες. Οι όμιλοι δεν χρησιμοποιούν ενιαία βάση μέτρησης, αλλά οι στόχοι τους αποκαλύπτουν ποιο πεδίο θεωρεί κάθε εταιρεία κεντρικό για την κυκλικότητα (TITAN, 2026; Holcim, 2026; CEMEX, 2026a).

Όμιλος	Δημοσιευμένο σημείο αναφοράς	Στόχος 2030	Όριο άμεσης σύγκρισης
TITAN	Οι στόχοι αναφέρονται ως μεταβολή έναντι εταιρικής βάσης	>60% πράσινα προϊόντα · 3,3× περισσότερα εναλλακτικά καύσιμα · 5× περισσότερη βιομάζα · -14,1 ποσοστιαίες μονάδες κλίνκερ στο τσιμέντο	Σχετικοί δείκτες, όχι κοινή απόλυτη βάση με τους άλλους ομίλους
Holcim (όμιλος αναφοράς ΗΡΑΚΛΗ)	8 εκατ. τόνοι ΑΕΚΚ ανακυκλώθηκαν το 2025	>20 εκατ. τόνοι ΑΕΚΚ ετησίως	Δείκτης μάζας και όχι ποσοστό υποκατάστασης
CEMEX	32,1% εναλλακτικά καύσιμα · λόγος κλίνκερ 70,1% στον δημοσιευμένο πίνακα στόχων	55% εναλλακτικά καύσιμα · λόγος κλίνκερ 68%	Συγκρίσιμο μόνο εφόσον ο ορισμός θερμικής υποκατάστασης είναι κοινός
Heidelberg Materials	29,9% εναλλακτικά καύσιμα το 2023	45% εναλλακτικά καύσιμα · κυκλικές εναλλακτικές για το 50% των προϊόντων σκυροδέματος	Συνδυάζει δείκτη καυσίμων με δείκτη προϊόντικού χαρτοφυλακίου

Πίνακας 10 Σύγκριση δημοσιευμένων εταιρικών δεικτών και στόχων κυκλικότητας

Σημείωση: Τα στοιχεία είναι δημόσιοι εταιρικοί δείκτες και δεν αποτελούν κατάταξη λειτουργικής επίδοσης. Πηγές: TITAN (2026), Holcim (2026), CEMEX (2026a) και Heidelberg Materials (2026).



Σχήμα 3 Τέσσερις άξονες για συγκρίσιμη εταιρική αξιολόγηση

Η εταιρική σύγκριση είναι αξιόπιστη μόνο όταν κάθε δείκτης συνοδεύεται από κοινό ορισμό, έτος βάσης, γεωγραφικό πεδίο και μέθοδο επαλήθευσης. Για τον TITAN και τον ΗΡΑΚΛΗ προτείνεται, συνεπώς, κοινός πυρήνας δημοσιοποίησης για λόγο κλίνκερ, θερμική υποκατάσταση, τόνους δευτερογενών υλών και τεκμηρίωση LCA/EPD (Habert et al., 2020; Kleijer et al., 2017).

4.6 Μελέτες περίπτωσης μονάδων TITAN και Holcim στο εξωτερικό

Οι ακόλουθες περιπτώσεις επιλέγονται σκόπιμα ώστε να καλύπτουν την αξιοποίηση εναλλακτικών καυσίμων, την υποκατάσταση ορυκτών πρώτων υλών και τη μείωση του κλίνκερ. Αφορούν συγκεκριμένες εγκαταστάσεις και βασίζονται σε πρωτογενείς εταιρικές

δημοσιεύσεις. Δεν αποτελούν αντιπροσωπευτικό δείγμα του κλάδου ή ανεξάρτητη επαλήθευση περιβαλλοντικής επίδοσης. Για κάθε περίπτωση διαχωρίζονται η δημοσιευμένη εφαρμογή, η βάση του αριθμητικού δείκτη και η δυνατότητα μεταφοράς της εμπειρίας στην Ελλάδα.

4.6.1 TITAN Zlatna Panega στη Βουλγαρία

Η Zlatna Panega, μονάδα του ομίλου TITAN στη Βουλγαρία, συνδυάζει την αξιοποίηση βιομηχανικών αποβλήτων με την υποκατάσταση συμβατικών καυσίμων. Σε ανακοίνωση της 1ης Οκτωβρίου 2025, η εταιρεία αναφέρει θερμική υποκατάσταση 65% για τέσσερις συνεχόμενους μήνες. Αναφέρει επίσης ότι το 2024 αξιοποιήθηκαν 110.000 τόνοι βιομηχανικών αποβλήτων στην παραγωγή τσιμέντου, σκυροδέματος και κλίνκερ. Η δεύτερη ποσότητα καλύπτει περισσότερες παραγωγικές δραστηριότητες και δεν πρέπει να αποδοθεί αποκλειστικά στον κλίβανο ή στα εναλλακτικά καύσιμα (TITAN Zlatna Panega, 2025).

Η περίπτωση δείχνει την αξία της παράλληλης παρακολούθησης ενέργειας και υλικών. Το 65% δεν είναι ετήσιος μέσος όρος, ενώ οι 110.000 τόνοι δεν εκφράζουν ποσοστό θερμικής υποκατάστασης. Για την ελληνική εφαρμογή προκύπτει ως αναλυτικό δίδαγμα η ανάγκη χωριστής απογραφής των ρευμάτων και σαφούς δήλωσης της περιόδου αναφοράς. Χωρίς αναλυτική σύσταση, κατανομή χρήσεων και δεδομένα εκπομπών, οι δύο αριθμοί δεν αρκούν για να υπολογιστεί καθαρό περιβαλλοντικό όφελος ή κατάταξη μονάδων (TITAN Zlatna Panega, 2025; Kleijer et al., 2017).

4.6.2 TITAN USJE στη Βόρεια Μακεδονία

Η μονάδα USJE στα Σκόπια άρχισε να χρησιμοποιεί εναλλακτικά καύσιμα στα τέλη του 2018. Η επίσημη παρουσίαση περιγράφει την αξιοποίηση RDF από κατάλληλα επεξεργασμένα υπολείμματα και γεωργικών αποβλήτων, όπως φλοιοί ρυζιού. Αναφέρει περιβαλλοντική μελέτη, διερεύνηση πηγών προμήθειας, αδειοδότηση και εξοπλισμό δοσομέτρησης. Το 15% παρουσιάζεται ως στόχος της πρώτης φάσης και ως δυνατότητα κάλυψης μέρους της ενέργειας θέρμανσης ενός κλιβάνου· δεν τεκμηριώνεται ως επιτευχθείς ετήσιος δείκτης (TITAN USJE, χ.χ.).

Η USJE είναι χρήσιμη ως παράδειγμα σταδιακής εισαγωγής υπολειμματικών καυσίμων, με τεχνική προετοιμασία και ενημέρωση ενδιαφερομένων. Η εταιρεία περιγράφει συναντήσεις,

εργαστήρια και επισκέψεις στη μονάδα. Για την Ελλάδα, η αναλυτική προέκταση είναι ότι η προσαρμογή της τροφοδοσίας και η διαβούλευση χρειάζεται να προηγούνται της επέκτασης. Το 15% δεν μπορεί να συγκριθεί απευθείας με το 65% της Zlatna Panega, επειδή το ένα αφορά στόχο πρώτης φάσης και το άλλο δημοσιευμένη επίδοση περιορισμένης χρονικής περιόδου (TITAN USJE, χ.χ.; TITAN Zlatna Panega, 2025).

4.6.3 Holcim Altkirch στη Γαλλία

Στη μονάδα Altkirch της Γαλλίας, η Holcim αναφέρει παραγωγή κλίνκερ με εξ ολοκλήρου ανακυκλωμένη ορυκτή τροφοδοσία. Η εφαρμογή συνδέεται με την ανάκτηση ορυκτών υλικών από το ανθρωπογενές απόθεμα, δηλαδή την «αστική εξόρυξη». Το ενδιαφέρον της περίπτωσης βρίσκεται στην αντικατάσταση της πρωτογενούς ορυκτής τροφοδοσίας του κλιβάνου και όχι απλώς στην προσθήκη ανακυκλωμένων αδρανών στο σκυρόδεμα (Holcim, χ.χ.).

Η διατύπωση «100%» αφορά την προέλευση των ορυκτών υλικών στη δημοσιοποιημένη παραγωγή. Δεν αποδεικνύει ότι όλη η ετήσια παραγωγή της μονάδας χρησιμοποιεί αυτή τη σύνθεση ούτε ότι το προϊόν έχει μηδενικές εκπομπές. Ως προοπτική για ελληνικές μονάδες, η περίπτωση στηρίζει τη διερεύνηση επιλεγμένων ορυκτών υπολειμμάτων μετά από χαρακτηρισμό και δοκιμές. Η αναλυτική αυτή μεταφορά προϋποθέτει έλεγχο της χημικής ισορροπίας της τροφοδοσίας και αποτίμηση ολόκληρου του κύκλου ζωής (Holcim, χ.χ.; Scrivener et al., 2018; Kleijer et al., 2017).

4.6.4 Holcim Saint-Pierre-la-Cour στη Γαλλία

Τον Φεβρουάριο του 2023 η Holcim ανακοίνωσε λειτουργία παραγωγής τσιμέντου με πυρωμένη άργιλο στη Saint-Pierre-la-Cour. Η ανακοίνωση περιγράφει δυναμικότητα έως 500.000 τόνους τσιμέντου χαμηλού ανθρακικού αποτυπώματος ετησίως και προϊόν ECOPlanet με αποτύπωμα CO₂ κατά 50% χαμηλότερο από το τσιμέντο αναφοράς CEM I. Περιγράφει επίσης χρήση εναλλακτικών καυσίμων βιομάζας και ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας στη σχετική λειτουργία. Η δυναμικότητα δεν ισοδυναμεί με επιβεβαιωμένη ετήσια παραγωγή, ενώ η μείωση αφορά τη δηλωμένη σύγκριση προϊόντων (Holcim, 2023).

Η πυρωμένη άργιλος δεν αποτελεί αυτομάτως απόβλητο. Η περίπτωση εντάσσεται συγκριτικά ως διαδρομή μείωσης κλίνκερ που συνδυάζεται με ενεργειακή αξιοποίηση βιομάζας και θερμότητας, όχι ως απόδειξη ανακύκλωσης ΑΕΚΚ. Για την Ελλάδα, προκύπτει η δυνατότητα

διερεύνησης κατάλληλων αργιλικών υλικών, με χωριστή αποτίμηση της προέλευσής τους και της ενέργειας κατεργασίας. Η συνάφειά της με την κυκλικότητα πρέπει επομένως να τεκμηριώνεται ανά ροή και να μη συγχέεται με κάθε πρακτική απανθρακοποίησης (Holcim, 2023; Scrivener et al., 2018).

4.6.5 Συγκριτική αποτίμηση και μεταφορά στην ελληνική εφαρμογή

Οι τέσσερις περιπτώσεις υποδεικνύουν διαφορετικές διαδρομές και διαφορετικούς περιορισμούς τεκμηρίωσης. Η συγκριτική αποτίμηση του Πίνακα 11 δεν κατατάσσει τις μονάδες. Απομονώνει το αντικείμενο κάθε εφαρμογής και το στοιχείο που χρειάζεται έλεγχο πριν χρησιμοποιηθεί ως πρότυπο για τον TITAN Ελλάδος ή τον ΗΡΑΚΛΗ.

Μονάδα και χώρα	Διαδρομή αξιοποίησης	Δημοσιευμένο στοιχείο	Όριο ερμηνείας
Zlatna Panega Βουλγαρία	Βιομηχανικά απόβλητα και εναλλακτικά καύσιμα	65% θερμική υποκατάσταση για τέσσερις μήνες· 110.000 t αποβλήτων το 2024	Διαφορετική περίοδος και πεδίο των δύο δεικτών
USJE Βόρεια Μακεδονία	RDF και γεωργικά υπολείμματα	Έναρξη στα τέλη του 2018· στόχος πρώτης φάσης 15%	Ο στόχος δεν αποτελεί ετήσια μετρημένη επίδοση
Altkirch Γαλλία	Ανακυκλωμένα ορυκτά στην τροφοδοσία κλίνκερ	Δημοσιοποιημένη παραγωγή με 100% ανακυκλωμένα ορυκτά	Δεν τεκμηριώνεται ίδια σύνθεση σε όλη την ετήσια παραγωγή
Saint-Pierre-la-Cour Γαλλία	Πυρωμένη άργιλος, καύσιμα βιομάζας και ανάκτηση θερμότητας	Έως 500.000 t/έτος δυναμικότητα τσιμέντου· δηλωμένη μείωση CO ₂ 50% έναντι CEM I	Η άργιλος δεν είναι εξ ορισμού απόβλητο· ο δείκτης αφορά προϊόν

Πίνακας 11 Συγκριτική αποτίμηση διεθνών μονάδων TITAN και Holcim

Πηγές Πίνακα 11: TITAN Zlatna Panega (2025), TITAN USJE (χ.χ.), Holcim (χ.χ.) και Holcim (2023). Οι επισημάνσεις και η σύγκριση αποτελούν αναλυτική επεξεργασία της παρούσας εργασίας.

Για τον σχεδιασμό ελληνικών πιλοτικών εφαρμογών προτείνεται αρχικά κοινό δελτίο δεδομένων ανά μονάδα: προέλευση και μάζα ροής, χρήση ως καυσίμου ή πρώτης ύλης, χρονική περίοδος, θερμική υποκατάσταση, χαρακτηριστικά προϊόντος και στοιχεία εκπομπών. Μόνο έπειτα μπορεί να εξεταστεί η μεταφορά συγκεκριμένης πρακτικής. Η χωριστή καταγραφή στόχων, δυναμικοτήτων και επιτευχθεισών επιδόσεων αποτρέπει παραπλανητικές συγκρίσεις και επιτρέπει τη σύνδεση της εταιρικής πληροφόρησης με τεχνική αξιολόγηση κύκλου ζωής (Kleijer et al., 2017; Habert et al., 2020).

5. Συμπεράσματα και Προοπτικές

Τα συμπεράσματα που ακολουθούν αποτελούν σύνθεση της βιβλιογραφικής εξέτασης και των εταιρικών περιπτώσεων. Οι προτεραιότητες, τα βήματα εφαρμογής και οι προτάσεις πολιτικής διατυπώνονται από την παρούσα εργασία με βάση τις πηγές που αναφέρονται σε κάθε σημείο, δεν προκύπτουν από πρωτογενείς μετρήσεις ελληνικών μονάδων ούτε αποτελούν δεσμεύσεις των εξεταζόμενων επιχειρήσεων.

Η παρούσα εργασία ανέδειξε ότι η Κυκλική Οικονομία στην τσιμεντοβιομηχανία δεν είναι ένα απλό πρόσθετο περιβαλλοντικό κεφάλαιο, αλλά τρόπος αναδιοργάνωσης υλικών ροών σε έναν κλάδο υψηλής ενεργειακής και υλικής έντασης. Το τσιμέντο και το σκυρόδεμα παραμένουν αναγκαία υλικά για τις υποδομές, την κατοικία και τα δημόσια έργα. Το ζήτημα, επομένως, δεν είναι να αντιμετωπιστεί ο κλάδος ως περιβαλλοντικά ανεπιθύμητος συνολικά, αλλά να μειωθεί συστηματικά το αποτύπωμά του χωρίς να τεθεί σε κίνδυνο η τεχνική ασφάλεια και η ανθεκτικότητα των κατασκευών (Scrivener et al., 2018; Habert et al., 2020).

Η βασική θεωρητική διαπίστωση είναι ότι η Κυκλική Οικονομία δεν ταυτίζεται με την ανακύκλωση. Περιλαμβάνει πρόληψη, διατήρηση αξίας, στένωση και κλείσιμο κύκλων, βιομηχανική συμβίωση, υποκατάσταση πρωτογενών πόρων και αξιολόγηση κύκλου ζωής. Στην τσιμεντοβιομηχανία, οι αρχές αυτές αποκτούν συγκεκριμένο νόημα μέσα από τη μείωση του κλίνκερ, τη χρήση συμπληρωματικών τσιμεντοειδών υλικών, την αξιοποίηση εναλλακτικών πρώτων υλών και καυσίμων, την ανάκτηση ροών σκυροδέματος και την ποιοτική ανακύκλωση αποβλήτων κατασκευών και κατεδαφίσεων (Reike et al., 2018; Scrivener et al., 2018).

Η τεχνική ανάλυση έδειξε ότι κάθε ρεύμα αποβλήτου πρέπει να αξιολογείται χωριστά. Η ιπτάμενη τέφρα, η σκωρία, οι φυσικές ποζολάνες, τα απόβλητα κατεδαφίσεων, τα νερά πλύσης, οι λάσπες σκυροδέματος και τα εναλλακτικά καύσιμα δεν έχουν την ίδια χρήση ούτε την ίδια αξία. Η χημική σύσταση, η κοκκομετρία, η υγρασία, η αντιδραστικότητα, η σταθερότητα και η συμμόρφωση προς πρότυπα είναι παράγοντες που καθορίζουν αν μια ροή μπορεί να αξιοποιηθεί. Χωρίς αυτά τα κριτήρια, η κυκλικότητα γίνεται τεχνικά αβάσιμη (Scrivener et al., 2018; Asadollahfardi et al., 2015; Tokareva et al., 2023).

Η περιβαλλοντική ανάλυση οδήγησε σε πιο σύνθετο συμπέρασμα. Η χρήση δευτερογενών υλικών είναι συχνά ωφέλιμη, αλλά δεν είναι αυτομάτως περιβαλλοντικά ανώτερη. Η μεταφορά, η προεπεξεργασία, η κατανάλωση ενέργειας και η επίδραση στη διάρκεια ζωής του τελικού προϊόντος μπορούν να μεταβάλουν το ισοζύγιο. Για τον λόγο αυτό, η ανάλυση κύκλου ζωής πρέπει να αποτελεί βασικό εργαλείο αξιολόγησης (Kleijer et al., 2017; Wijayasundara et al., 2016).

Η οικονομική διάσταση επιβεβαιώνει ότι οι κυκλικές λύσεις χρειάζονται βιωσιμότητα σε βιομηχανική κλίμακα. Η αξιοποίηση αποβλήτων μπορεί να μειώσει κόστος πρώτων υλών, καυσίμων και διάθεσης, αλλά μπορεί επίσης να απαιτήσει επενδύσεις σε εξοπλισμό, προεπεξεργασία, αποθήκευση και ελέγχους. Η οικονομική βιωσιμότητα δεν αναιρεί την περιβαλλοντική αξία, αντίθετα, είναι όρος για να μη μείνει η κυκλικότητα σε επίπεδο πιλοτικών δράσεων (Wijayasundara et al., 2016; GIZ–LafargeHolcim, 2020, ενότητα 3.6).

Το θεσμικό πλαίσιο αναδείχθηκε ως αποφασιστικός παράγοντας. Η ταξινόμηση των ροών, οι άδειες χρήσης, τα όρια εκπομπών, τα πρότυπα προϊόντων, οι δημόσιες προμήθειες και οι ευρωπαϊκές απαιτήσεις για απόβλητα κατασκευών καθορίζουν το περιθώριο εφαρμογής. Η ειδική αναφορά στον TITAN και στον ΗΡΑΚΛΗ έδειξε ότι η ελληνική τσιμεντοβιομηχανία έχει ήδη ενσωματώσει στοιχεία Κυκλικής Οικονομίας, κυρίως μέσω εναλλακτικών πρώτων υλών, εναλλακτικών καυσίμων, βιομηχανικής συμβίωσης και διαχείρισης αποβλήτων. Ο TITAN αναφέρεται σε αξιοποίηση παραπροϊόντων και αποβλήτων, όπως τέφρες, σκωρίες, απόβλητα κατεδαφίσεων και επιστροφές σκυροδέματος από την INTERBETON. Ο ΗΡΑΚΛΗΣ δηλώνει αξιοποίηση βιομηχανικών, εμπορικών και αστικών αποβλήτων ως καυσίμων και πρώτων υλών, στο πλαίσιο της στρατηγικής κυκλικότητας (TITAN Ελλάδος, 2026b; Όμιλος ΗΡΑΚΛΗΣ, 2026b).

Η αξιολόγηση των δύο ελληνικών παραδειγμάτων πρέπει να παραμείνει ισορροπημένη. Δεν είναι ορθό να παρουσιαστούν οι εταιρικές πρακτικές ως πλήρης απόδειξη κυκλικής μετάβασης χωρίς ποσοτικά δεδομένα. Είναι όμως ορθό να παρουσιαστούν ως ενδείξεις υπαρκτής βιομηχανικής εφαρμογής και ως πεδία περαιτέρω ανάπτυξης (Korhonen et al., 2018; Kleijer et al., 2017).

Ως πρώτη προοπτική προτείνεται η συστηματική χαρτογράφηση των ελληνικών δευτερογενών ροών που μπορούν να αξιοποιηθούν στην τσιμεντοβιομηχανία. Η χαρτογράφηση πρέπει να

περιλαμβάνει ποσότητες, γεωγραφική κατανομή, χημική σύσταση, εποχικότητα, σημερινή μέθοδο διαχείρισης και πιθανές τεχνικές χρήσεις. Επίσης, προτείνεται η ενίσχυση της επιλεκτικής κατεδάφισης και της ποιοτικής ανακύκλωσης αποβλήτων κατασκευών. Η τσιμεντοβιομηχανία μπορεί να αξιοποιήσει ορισμένα κλάσματα, αλλά δεν μπορεί να θεραπεύσει την ακαταστασία μιας κακής κατεδάφισης. Η ποιότητα πρέπει να διαμορφώνεται στην πηγή, με διαχωρισμό σκυροδέματος, τοιχοποιίας, μετάλλων, ξύλου, γύψου και επικίνδυνων υλικών (European Commission, 2026a; Akhtar & Sarmah, 2018).

Ακόμη, σημαντική είναι η ανάπτυξη περιβαλλοντικών δηλώσεων προϊόντος και συγκρίσιμων δεδομένων LCA για τσιμέντα και σκυροδέματα με δευτερογενές περιεχόμενο. Η αγορά χρειάζεται τεκμηρίωση για να επιλέξει προϊόντα χαμηλότερου αποτυπώματος. Οι δημόσιες αρχές, οι μηχανικοί και οι εργολήπτες δεν μπορούν να βασίζονται σε γενικές πράσινες περιγραφές, αλλά χρειάζονται αριθμούς, λειτουργικές μονάδες, όρια συστήματος και διαφανείς παραδοχές (Kleijer et al., 2017; Habert et al., 2020).

Εν συνεχεία, προτείνεται η σύνδεση των δημόσιων έργων με κριτήρια κυκλικότητας. Αν οι διαγωνισμοί συνεχίσουν να αξιολογούν μόνο το χαμηλότερο άμεσο κόστος, η αγορά θα δυσκολευτεί να στηρίξει προϊόντα με τεκμηριωμένη περιβαλλοντική υπεροχή αλλά αρχικά υψηλότερο κόστος ελέγχου. Τα κριτήρια πρέπει να περιλαμβάνουν ανθρακικό αποτύπωμα, ανακυκλωμένο περιεχόμενο, ανθεκτικότητα και τεχνική πιστοποίηση (European Commission, χ.χ.).

Βάσει των παραπάνω, διαπιστώνεται ότι η Κυκλική Οικονομία μπορεί να αποτελέσει ουσιαστική στρατηγική για την τσιμεντοβιομηχανία, εφόσον εφαρμόζεται με τεχνική αυστηρότητα, περιβαλλοντική τεκμηρίωση, οικονομική λογική και θεσμική σαφήνεια. Ο κλάδος δεν μπορεί να γίνει άυλος ούτε να πάψει να χρησιμοποιεί μεγάλες ποσότητες υλικών. Μπορεί όμως να γίνει λιγότερο σπάταλος, λιγότερο εξαρτημένος από πρωτογενείς πόρους και περισσότερο υπεύθυνος στη διαχείριση των ροών του (Korhonen et al., 2018; Habert et al., 2020).

5.1 Συνθετική αποτίμηση κριτηρίων και τελική ιεράρχηση ρευμάτων

Η ιεράρχηση είναι ποιοτική και εξαρτάται από τον επιδιωκόμενο στόχο: η ευκολία άμεσης εφαρμογής, η αποφυγή ταφής και η μείωση εκπομπών δεν οδηγούν αναγκαστικά στην ίδια

σειρά προτεραιότητας. Δεν εφαρμόστηκε αριθμητικό μοντέλο στάθμισης κριτηρίων. Συνεπώς, οι χαρακτηρισμοί του Πίνακα 12 αποτελούν τεκμηριωμένη αναλυτική κρίση και όχι υπολογισμένη συνολική βαθμολογία (Kleijer et al., 2017; Habert et al., 2020).

Αν τα ρεύματα ιεραρχηθούν με βάση το συνδυασμένο τεχνικό, περιβαλλοντικό και οικονομικό τους δυναμικό, οι επιστροφές νωπού σκυροδέματος και τα νερά πλύσης εμφανίζονται ως άμεσες πρακτικές εσωτερικής κυκλικότητας. Έχουν το πλεονέκτημα της γνωστής προέλευσης και της μικρής μεταφορικής απόστασης. Δεν είναι όμως λύσεις απεριορίστης κλίμακας, διότι εξαρτώνται από την καθημερινή παραγωγή και την οργάνωση των μονάδων έτοιμου σκυροδέματος. Αποτελούν περισσότερο πεδίο λειτουργικής βελτίωσης παρά στρατηγική πλήρους απανθρακοποίησης (Asadollahfardi et al., 2015; Vieira et al., 2019).

Τα συμπληρωματικά τσιμεντοειδή υλικά έχουν υψηλότερο δυναμικό μείωσης εκπομπών, επειδή μπορούν να υποκαταστήσουν μέρος του κλίνκερ. Η τεχνική και περιβαλλοντική τους αξία είναι μεγάλη, αλλά περιορίζεται από τη διαθεσιμότητα, την ποιότητα και τη γεωγραφική κατανομή. Η μελλοντική μείωση ορισμένων παραπροϊόντων, όπως η ιπτάμενη τέφρα, καθιστά αναγκαία την αναζήτηση νέων υλικών, όπως ασβεστολιθικές προσθήκες, φυσικές ποζολάνες, κατεργασμένες άργιλοι και επιλεγμένα λεπτόκοκκα απόβλητα κατεδαφίσεων (Scrivener et al., 2018; Tokareva et al., 2023).

Τα απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων αποτελούν μεγάλη ποσοτικά δεξαμενή, αλλά η αξιοποίησή τους εξαρτάται από την ποιότητα διαλογής. Όταν το υλικό προέρχεται από επιλεκτική κατεδάφιση και καθαρή ροή σκυροδέματος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί πιο αξιόπιστα ως ανακυκλωμένο αδρανές ή ως πρώτη ύλη χαμηλότερων απαιτήσεων. Όταν προέρχεται από μικτό μπάζο, η χρήση του δυσκολεύει και συχνά περιορίζεται σε χαμηλότερης αξίας εφαρμογές (Akhtar & Sarmah, 2018; European Commission, 2026a).

Τα εναλλακτικά καύσιμα έχουν ιδιαίτερη στρατηγική σημασία για τη μείωση της εξάρτησης από ορυκτά καύσιμα και για τη διαχείριση υπολειμματικών ροών που δεν ανακυκλώνονται. Παράλληλα, αποτελούν το πιο κοινωνικά ευαίσθητο πεδίο. Για τον λόγο αυτό, η χρήση τους πρέπει να συνοδεύεται από αυστηρούς όρους, διαφάνεια, έλεγχο εκπομπών και σαφή τεκμηρίωση ότι δεν λειτουργεί ανταγωνιστικά προς την υλική ανακύκλωση. Η συναξιοποίηση μπορεί να είναι χρήσιμη, αλλά μόνο ως μέρος καλά οργανωμένης ιεράρχησης αποβλήτων (GIZ–LafargeHolcim, 2020, ενότητες 1.4 και 3.5).

Η τελική ιεράρχηση μπορεί να μεταβληθεί ανάλογα με την τεχνολογία, τις τιμές ενέργειας, το κόστος άνθρακα, τη διαθεσιμότητα δευτερογενών υλικών και το θεσμικό πλαίσιο. Για την ελληνική περίπτωση, η προτεραιότητα πρέπει να δοθεί σε λύσεις που συνδυάζουν εγγύτητα, ιχνηλασιμότητα και τεχνική σταθερότητα. Οι επιστροφές σκυροδέματος, τα καθαρά κλάσματα κατεδαφίσεων, ορισμένα βιομηχανικά παραπροϊόντα και τα προδιαγεγραμμένα εναλλακτικά καύσιμα μπορούν να ενταχθούν σε ένα ρεαλιστικό σχέδιο. Αντίθετα, η αδιάκριτη χρήση ανομοιογενών ροών, χωρίς σταθερό ποιοτικό έλεγχο, θα δημιουργούσε περισσότερα προβλήματα από όσα θα έλυνε (Wijayasundara et al., 2016; Scrivener et al., 2018).

Η ακόλουθη συγκριτική μήτρα μετατρέπει τη συνθετική αποτίμηση σε πρακτική σειρά προτεραιότητας για την ελληνική περίπτωση. Οι χαρακτηρισμοί είναι σχετικοί μέσα στο πλαίσιο της εργασίας και προϋποθέτουν συμμόρφωση με τα πρότυπα προϊόντος (Akhtar & Sarmah, 2018; Asadollahfardi et al., 2015; Habert et al., 2020).

Ρεύμα / διαδρομή	Τεχνική ετοιμότητα	Κύριο όφελος	Κρίσιμη προϋπόθεση	Προτεραιότητα
Επιστροφές σκυροδέματος και νερά πλύσης	Υψηλή σε οργανωμένες μονάδες	Κλειστός τοπικός κύκλος και μικρή μεταφορά	Ιχνηλασιμότητα, pH, στερεά και καθημερινός έλεγχος	Υψηλή
Καθαρά ΑΕΚΚ / ανακυκλωμένα αδρανή	Μέτρια προς υψηλή	Μείωση φυσικών αδρανών και ταφής	Επιλεκτική κατεδάφιση, γύψος/ρύποι, υδατοαπορρόφηση	Υψηλή υπό όρους
SCMs, τοπικές ποζολάνες και επιλεγμένα λεπτόκοκκα	Μέτρια	Μεγαλύτερο δυναμικό μείωσης κλίνκερ	Χημικός χαρακτηρισμός, ανθεκτικότητα και επάρκεια ποσότητας	Υψηλή μετά από δοκιμές
Προδιαγεγραμμένα εναλλακτικά καύσιμα	Υψηλή τεχνολογικά	Υποκατάσταση ορυκτών καυσίμων και αξιοποίηση υπολείμματος	Θερμογόνος δύναμη, χλώριο/μέταλλα, εκπομπές και διαφάνεια	Μέτρια προς υψηλή
Μικτά ή άγνωστης σύστασης απόβλητα	Χαμηλή	Αβέβαιο	Πλήρης προεπεξεργασία και απόδειξη ασφάλειας	Χαμηλή / απόρριψη

Πίνακας 12 Συγκριτική ιεράρχηση βασικών ρευμάτων για ελληνική εφαρμογή

Σημείωση: Η προτεραιότητα είναι αναλυτική σύνθεση και όχι μετρημένη κατάταξη βιομηχανικών μονάδων. Βασίζεται στη βιβλιογραφία για τεχνική συμβατότητα, κύκλο ζωής, μεταφορές και κίνδυνο ποιότητας (Akhtar & Sarmah, 2018; Asadollahfardi et al., 2015; Habert et al., 2020; Scrivener et al., 2018).

Η εργασία καταλήγει ότι οι ελληνικές τσιμεντοβιομηχανίες μπορούν να αποτελέσουν κεντρικούς κόμβους κυκλικότητας, επειδή διαθέτουν θερμικές διεργασίες υψηλής θερμοκρασίας, ανάγκη μεγάλων ποσοτήτων υλικών, οργανωμένα συστήματα ελέγχου και δυνατότητα απορρόφησης ορισμένων δευτερογενών ροών. Δεν μπορούν, όμως, να υποκαταστήσουν την απουσία οργανωμένης πολιτικής αποβλήτων. Αν τα υλικά φτάνουν ακάθαρτα, ασταθή και χωρίς τεκμηρίωση, η βιομηχανική αξιοποίηση περιορίζεται (GIZ–LafargeHolcim, 2020, ενότητες 2.3 και 2.5).

Σε επίπεδο έρευνας, απαιτούνται περισσότερες ελληνικές μελέτες LCA για συγκεκριμένα σενάρια: χρήση επιστροφών σκυροδέματος ως πρώτης ύλης, αξιοποίηση λεπτόκοκκων ΑΕΚΚ ως πληρωτικών, υποκατάσταση κλίνκερ με τοπικές ποζολάνες, χρήση ανακυκλωμένων αδρανών σε μη φέροντα και φέροντα στοιχεία, και σύγκριση εναλλακτικών καυσίμων με συμβατικά καύσιμα. Χωρίς ελληνικά δεδομένα, οι διεθνείς μελέτες παραμένουν χρήσιμες αλλά όχι πλήρως επαρκείς για αποφάσεις πολιτικής και επένδυσης (Kleijer et al., 2017; Tokareva et al., 2023).

Σε επίπεδο πρακτικής, οι επιχειρήσεις θα μπορούσαν να αναπτύξουν πιλοτικά έργα επίδειξης με πλήρη δημοσιοποίηση τεχνικών και περιβαλλοντικών στοιχείων. Η Κυκλική Οικονομία στην τσιμεντοβιομηχανία δεν θα εξαλείψει πλήρως τις εκπομπές ούτε θα καταργήσει την ανάγκη για πρωτογενείς πόρους. Μπορεί όμως να περιορίσει τις απώλειες, να αξιοποιήσει υπολειμματικές ροές, να μειώσει τον λόγο κλίνκερ, να βελτιώσει τη διαχείριση αποβλήτων και να συνδέσει την παραγωγή με ένα πιο υπεύθυνο μοντέλο υλικών (Habert et al., 2020; Scrivener et al., 2018).

5.2 Επιχειρησιακό σχέδιο εφαρμογής κυκλικότητας για την ελληνική τσιμεντοβιομηχανία

Ένα ρεαλιστικό σχέδιο εφαρμογής κυκλικότητας στην ελληνική τσιμεντοβιομηχανία πρέπει να ξεκινά από την απογραφή ροών και όχι από την επιλογή τεχνολογίας. Η τεχνολογία χωρίς χαρτογράφηση υλικών κινδυνεύει να μείνει αναξιοποίητη ή να χρησιμοποιηθεί για ακατάλληλες ροές. Η απογραφή πρέπει να περιλαμβάνει τις ποσότητες, την εποχικότητα, την προέλευση, τη χημική σύσταση, την υγρασία, την απόσταση από τις μονάδες και τη σημερινή μέθοδο διαχείρισης κάθε ρεύματος. Μόνο έτσι μπορεί να αποφασιστεί αν ένα υλικό είναι υποψήφιο για τσιμέντο, σκυρόδεμα, αδρανές, καύσιμο ή άλλη χρήση (GIZ–LafargeHolcim, 2020, ενότητες 2.1 και 2.5).

Το επόμενο βήμα είναι η δημιουργία πρωτοκόλλων αποδοχής υλικών. Κάθε ρεύμα που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη ή καύσιμο πρέπει να συνοδεύεται από προδιαγραφές παραλαβής. Οι προδιαγραφές αυτές δεν πρέπει να περιορίζονται σε μία γενική περιγραφή, αλλά να περιλαμβάνουν όρια για βασικά χημικά συστατικά, υγρασία, κοκκομετρία, ανεπιθύμητα υλικά, θερμογόνο δύναμη όπου πρόκειται για καύσιμα, και απαιτήσεις δειγματοληψίας. Η ύπαρξη πρωτοκόλλου προστατεύει την παραγωγή, μειώνει την αβεβαιότητα και αποτρέπει τη μετατροπή της κυκλικότητας σε ανεξέλεγκτη παραλαβή αποβλήτων (European Commission, 2013, BAT 11; GIZ–LafargeHolcim, 2020, ενότητα 3.3.4).

Εν συνεχεία, απαιτείται η ανάπτυξη μικρών πιλοτικών εφαρμογών με αυστηρή παρακολούθηση. Η βιομηχανία δεν πρέπει να περνά από το εργαστήριο κατευθείαν στη γενικευμένη χρήση. Είναι απαραίτητες δοκιμές σε ελεγχόμενη κλίμακα, παραγωγή δοκιμαστικών παρτίδων, σύγκριση με συμβατικά προϊόντα, έλεγχος αντοχών, ανθεκτικότητας και εργασιμότητας, καθώς και αποτίμηση κύκλου ζωής (Anastasiou et al., 2018; Asadollahfardi et al., 2015; Kleijer et al., 2017).

Το επόμενο βήμα είναι η διαμόρφωση σταθερών συμβάσεων προμήθειας. Η τσιμεντοβιομηχανία χρειάζεται προβλέψιμες εισροές και δεν μπορεί να στηρίζεται σε περιστασιακές ευκαιρίες. Οι συμβάσεις με μονάδες ανακύκλωσης, εργολάβους κατεδαφίσεων, δήμους, βιομηχανίες και εταιρείες διαχείρισης αποβλήτων πρέπει να ορίζουν ποσότητες,

ποιότητα, ευθύνη μη συμμόρφωσης και διαδικασίες ελέγχου (GIZ–LafargeHolcim, 2020, ενότητες 2.6 και 3.6).

Ένα ακόμη σημαντικό βήμα είναι η ενσωμάτωση της κυκλικότητας στον ποιοτικό έλεγχο της καθημερινής λειτουργίας. Δεν αρκεί να ελεγχθεί ένα υλικό στην αρχή. Η σύσταση των δευτερογενών ροών μπορεί να μεταβάλλεται, επομένως χρειάζονται περιοδικές δοκιμές και μηχανισμοί απόρριψης παρτίδων που δεν πληρούν τις προδιαγραφές. Αυτό είναι ιδιαίτερα κρίσιμο για RDF/SRF, λάσπες, λεπτόκοκκα ΑΕΚΚ και ανακυκλωμένα αδρανή (GIZ–LafargeHolcim, 2020, ενότητα 3.3.4; Akhtar & Sarmah, 2018).

Φυσικά, απαραίτητη είναι η σύνδεση των κυκλικών πρακτικών με μετρήσιμους δείκτες. Ενδεικτικοί δείκτες είναι το ποσοστό υποκατάστασης κλίνκερ, το ποσοστό θερμικής υποκατάστασης από εναλλακτικά καύσιμα, οι τόνοι δευτερογενών πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται, οι τόνοι αποβλήτων που αποφεύγουν την ταφή, η μείωση εκπομπών CO₂ ανά τόνο τσιμέντου και η κατανάλωση νερού ανά κυβικό μέτρο σκυροδέματος (Habert et al., 2020; Vieira et al., 2019).

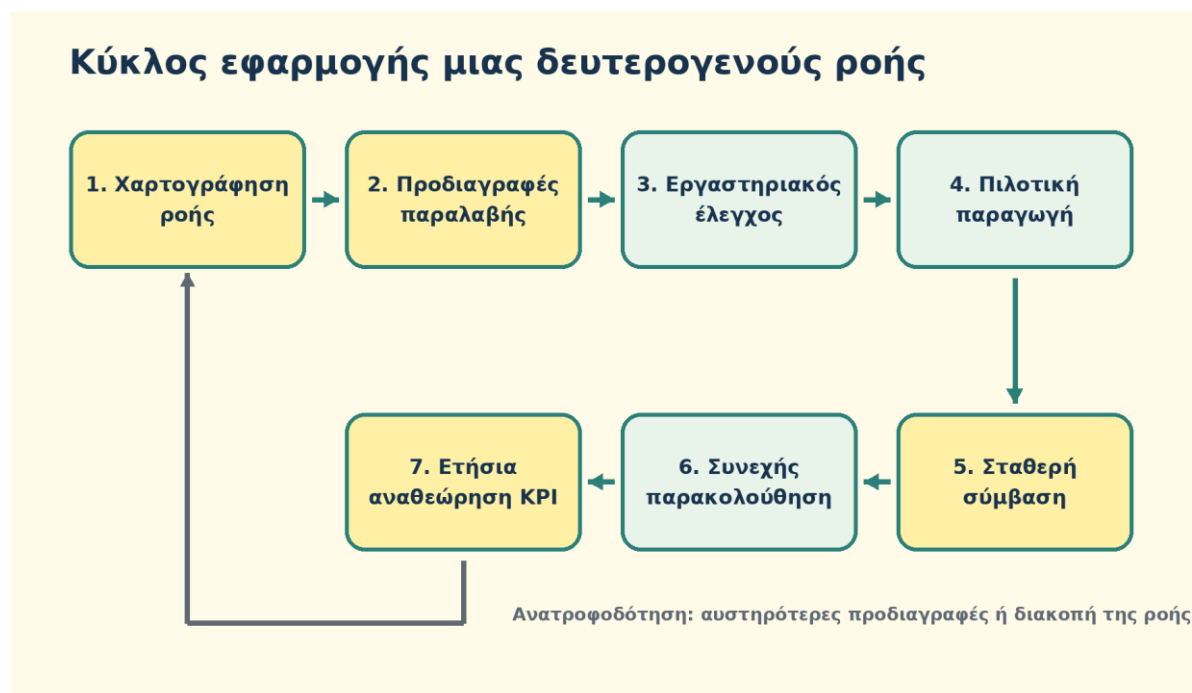
Ακόμη, η κοινωνία δεν θα αποδεχθεί εύκολα τη χρήση αποβλήτων σε βιομηχανικούς κλιβάνους αν δεν γνωρίζει τι ακριβώς χρησιμοποιείται, με ποιους όρους και με ποια αποτελέσματα. Οι επιχειρήσεις πρέπει να αποφεύγουν τη γλώσσα που ωραιοποιεί υπερβολικά την πραγματικότητα. Καλύτερα να δηλώνουν με ακρίβεια ότι αξιοποιούν συγκεκριμένες υπολειμματικές ροές υπό ελεγχόμενες συνθήκες, παρά να δημιουργούν την εντύπωση ότι κάθε απόβλητο γίνεται πόρος δυνητικά (GIZ–LafargeHolcim, 2020, ενότητα 3.5.2).

Μία σημαντική προϋπόθεση για την πρόοδο στο συγκεκριμένο τομέα, είναι φυσικά η συνεργασία με την ακαδημαϊκή και ερευνητική κοινότητα. Τα πανεπιστήμια και τα ερευνητικά εργαστήρια μπορούν να συμβάλουν στον χαρακτηρισμό υλικών, στις δοκιμές ανθεκτικότητας, στις αναλύσεις κύκλου ζωής και στην ανάπτυξη νέων συνθέσεων. Η συνεργασία αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για ελληνικά υλικά, όπως τοπικές ποζολάνες, λεπτόκοκκα από κατεδαφίσεις, λάσπες σκυροδέματος και συγκεκριμένα βιομηχανικά παραπροϊόντα. Η διεθνής βιβλιογραφία δίνει κατεύθυνση σχετικά με τα απαραίτητα βήματα, αλλά η ελληνική εφαρμογή χρειάζεται ελληνικά δεδομένα (Anastasiou et al., 2018; Tokareva et al., 2023).

Το ένατο βήμα είναι η προσαρμογή των δημόσιων έργων. Αν οι προδιαγραφές δημοσίων έργων παραμένουν αδιάφορες προς το αποτύπωμα άνθρακα και το ανακυκλωμένο περιεχόμενο, η

ζήτηση για κυκλικά προϊόντα θα αναπτύσσεται αργά. Οι αναθέτουσες αρχές μπορούν να ζητούν περιβαλλοντικές δηλώσεις προϊόντος, τεκμηρίωση LCA και ελάχιστες απαιτήσεις κυκλικότητας, χωρίς να θυσιάζουν την ασφάλεια. Ο σωστός δρόμος δεν είναι να μειωθούν οι τεχνικές απαιτήσεις, αλλά να προστεθούν περιβαλλοντικές απαιτήσεις με τρόπο μετρήσιμο και εφαρμόσιμο (European Commission, χ.χ.).

Έπειτα, σημαντική είναι η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων σε ετήσια βάση. Η κυκλικότητα δεν πρέπει να αντιμετωπίζεται ως έργο που ολοκληρώνεται, αλλά ως σύστημα που βελτιώνεται. Κάθε έτος μπορούν να συγκρίνονται οι ποσότητες δευτερογενών υλικών, οι εκπομπές, το κόστος, οι απορρίψεις ακατάλληλων παρτίδων και οι τεχνικές επιδόσεις προϊόντων. Με αυτόν τον τρόπο, η επιχείρηση μπορεί να εντοπίζει ποια ρεύματα αποδίδουν πραγματικά και ποια μένουν στο όριο της βιωσιμότητας. Η μέτρηση είναι η μόνη σοβαρή γλώσσα της βιομηχανικής βελτίωσης (GIZ–LafargeHolcim, 2020, ενότητες 3.2.3 και 3.3.4).



Σχήμα 4 Σταδιακός κύκλος εφαρμογής και ελέγχου μιας δευτερογενούς ροής

Καμία ροή δεν πρέπει να περνά σε συνεχή βιομηχανική χρήση πριν ολοκληρωθούν ο χαρακτηρισμός, οι δοκιμές και η πιλοτική παραγωγή. Η ετήσια αναθεώρηση κλείνει τον κύκλο: μπορεί να οδηγήσει σε αυστηρότερες προδιαγραφές, αλλαγή προμηθευτή ή διακοπή

της ροής όταν οι δείκτες ποιότητας και περιβάλλοντος αποκλίνουν (GIZ–LafargeHolcim, 2020, ενότητα 3.3.4; Anastasiou et al., 2018).

Στην περίπτωση του TITAN, το επιχειρησιακό σχέδιο θα μπορούσε να δώσει προτεραιότητα σε ροές με υψηλή ιχνηλασιμότητα, όπως επιστροφές σκυροδέματος, εσωτερικά υπολείμματα παραγωγής και επιλεγμένα απόβλητα κατεδαφίσεων. Η σύνδεση με τη δραστηριότητα έτοιμου σκυροδέματος προσφέρει πρακτικό πλεονέκτημα, επειδή επιτρέπει καλύτερη γνώση της προέλευσης του υλικού. Αν οι ροές αυτές συνοδευθούν από LCA και δημόσιους δείκτες, μπορούν να αποτελέσουν πειστικά παραδείγματα κυκλικότητας για την ελληνική αγορά (TITAN Ελλάδος, 2026b; Kleijer et al., 2017).

Για τον ΗΡΑΚΛΗ, το επιχειρησιακό σχέδιο θα μπορούσε να ενισχύσει περαιτέρω την οργανωμένη συναξιοποίηση υπολειμματικών καυσίμων και πρώτων υλών, με έμφαση στη διαφάνεια και στις προδιαγραφές. Επειδή ο Όμιλος εντάσσεται σε διεθνές πλαίσιο στρατηγικής κυκλικής κατασκευής, μπορεί να αξιοποιήσει τεχνογνωσία και πρακτικές που εφαρμόζονται σε άλλες χώρες. Το κρίσιμο σημείο για την ελληνική περίπτωση είναι η προσαρμογή στις τοπικές ροές και στις κοινωνικές ευαισθησίες γύρω από τη χρήση αποβλήτων ως καυσίμων (Όμιλος ΗΡΑΚΛΗΣ, 2026b; GIZ–LafargeHolcim, 2020).

Η σύγκλιση των δύο επιχειρήσεων θα μπορούσε να αποβεί ωφέλιμη για τον κλάδο συνολικά, αν οδηγήσει στη δημιουργία κοινών τεχνικών κατευθύνσεων για δευτερογενή υλικά, όχι σε απλή εταιρική προβολή. Ένας κλαδικός οδηγός για την αξιοποίηση ΑΕΚΚ, επιστροφών σκυροδέματος, νερών πλύσης και εναλλακτικών καυσίμων θα μπορούσε να βελτιώσει τη συνολική αξιοπιστία της αγοράς. Σε τέτοια θέματα, ο ανταγωνισμός δεν αναιρεί την ανάγκη κοινών ελάχιστων κανόνων. Η ασφάλεια και η περιβαλλοντική ευθύνη πρέπει να έχουν κοινή βάση (Akhtar & Sarmah, 2018; Asadollahfardi et al., 2015; GIZ–LafargeHolcim, 2020).

Η ελληνική τσιμεντοβιομηχανία έχει επίσης τη δυνατότητα να συνδεθεί με την αποκατάσταση λατομείων και την τοπική περιβαλλοντική διαχείριση. Αν και αυτό δεν αποτελεί στενά ρεύμα αποβλήτου, εντάσσεται στη γενικότερη περιβαλλοντική ευθύνη του κλάδου. Η χρήση κατάλληλων αδρανών, η αποκατάσταση τοπίου, η βιοποικιλότητα και η διαχείριση σκόνης πρέπει να συνδυάζονται με τις κυκλικές πρακτικές. Η κοινωνία αξιολογεί τη βιομηχανία συνολικά, όχι μόνο από το ποσοστό εναλλακτικών καυσίμων που δηλώνει (European Commission, 2013; Korhonen et al., 2018).

Ασφαλώς, προσοχή χρειάζεται στη γλώσσα των εταιρικών αναφορών. Όροι όπως «μηδενικά απόβλητα», «πράσινη παραγωγή» ή «πλήρης κυκλικότητα» πρέπει να χρησιμοποιούνται με μέτρο, επειδή συχνά δημιουργούν υπερβολικές προσδοκίες. Στην τσιμεντοβιομηχανία, με τη συμβατική παραγωγή κλίνκερ εξακολουθούν να προκύπτουν εκπομπές διεργασίας, ανάγκη πρώτων υλών και τεχνικοί περιορισμοί. Η κυκλική μετάβαση πρέπει να συνοδευθεί από κατάρτιση προσωπικού. Οι χειριστές, οι υπεύθυνοι ποιότητας, οι μηχανικοί παραγωγής και οι προμηθευτές πρέπει να κατανοούν τι αλλάζει όταν εισάγονται δευτερογενείς ροές. Η αλλαγή υλικών επηρεάζει την αποθήκευση, την τροφοδοσία, την ασφάλεια, την παραγωγή και τον ποιοτικό έλεγχο. Η εκπαίδευση μειώνει τα λάθη και αυξάνει την αποδοχή μέσα στην ίδια την επιχείρηση (Habert et al., 2020; GIZ–LafargeHolcim, 2020, ενότητες 3.3–3.4).

Σε επίπεδο πολιτικής, θα ήταν χρήσιμη η δημιουργία περιφερειακών μητρώων δευτερογενών ροών. Τα μητρώα αυτά θα μπορούσαν να δείχνουν διαθέσιμες ποσότητες, ποιότητα, αδειοδοτημένους παραγωγούς, αποστάσεις και πιθανές χρήσεις. Μια τέτοια υποδομή θα μείωνε την αβεβαιότητα και θα επέτρεπε σε επιχειρήσεις όπως ο TITAN και ο ΗΡΑΚΛΗΣ να σχεδιάζουν σταθερότερα τη χρήση δευτερογενών υλικών (GIZ–LafargeHolcim, 2020, ενότητα 2.5; European Commission, 2026a).

Η σύνδεση με την ψηφιακή ιχνηλασιμότητα είναι επίσης σημαντική. Τα φορτία αποβλήτων και δευτερογενών υλικών μπορούν να παρακολουθούνται μέσω ψηφιακών δελτίων, QRcodes, βάσεων δεδομένων και συστημάτων ελέγχου ποιότητας. Έτσι μειώνεται ο κίνδυνος λανθασμένης ταξινόμησης και διευκολύνεται η τεκμηρίωση προς αρχές, πελάτες και πιστοποιητικούς φορείς (European Commission, 2026a; GIZ–LafargeHolcim, 2020, ενότητα 3.3.4).

Τέλος, το σχέδιο εφαρμογής πρέπει να αναγνωρίζει ότι δεν είναι όλα τα ρεύματα κατάλληλα για υψηλής αξίας χρήση. Η ειλικρινής αξιολόγηση επιτρέπει σε ορισμένα υλικά να αποκλείονται ή να οδηγούνται σε άλλες εφαρμογές (GIZ–LafargeHolcim, 2020, ενότητες 2.1.1–2.1.2).

5.3 Περιορισμοί της παρούσας ανάλυσης και κατευθύνσεις μελλοντικής έρευνας

Οι μελέτες της ενότητας 4.6 διευρύνουν τη γεωγραφική κάλυψη, αλλά δεν αίρουν τον περιορισμό της συγκρισιμότητας. Περιλαμβάνουν εταιρικές ανακοινώσεις, στόχους πρώτης φάσης και στοιχεία δυναμικότητας με διαφορετικά όρια αναφοράς. Δεν πραγματοποιήθηκε ανεξάρτητη επιτόπια επαλήθευση. Επομένως, χρησιμοποιούνται για την αναγνώριση διαδρομών εφαρμογής και αναγκών ελέγχου, όχι για την απόδειξη υπεροχής ενός ομίλου (TITAN Zlatna Panega, 2025; TITAN USJE, χ.χ.; Holcim, χ.χ.; Holcim, 2023).

Η παρούσα ανάλυση είναι βιβλιογραφική και θεωρητικο-αναλυτική, επομένως δεν αντικαθιστά εργαστηριακή ή βιομηχανική δοκιμή συγκεκριμένων ελληνικών ρευμάτων. Αυτός είναι βασικός περιορισμός. Η συμπεριφορά ενός δευτερογενούς υλικού δεν μπορεί να τεκμηριωθεί μόνο μέσα από ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας, αλλά χρειάζονται δείγματα, δοκιμές σύστασης, πειραματικά μίγματα, έλεγχοι αντοχής και ανθεκτικότητας, καθώς και σύγκριση με συμβατικά υλικά. Συνεπώς, η τρέχουσα εργασία παρέχει πλαίσιο αξιολόγησης, όχι τελική πιστοποίηση υλικών (Anastasiou et al., 2018; Asadollahfardi et al., 2015).

Ένας ακόμη περιορισμός είναι η έλλειψη πλήρων ποσοτικών δεδομένων για τις ελληνικές εφαρμογές. Οι εταιρικές πηγές του TITAN και του ΗΡΑΚΛΗ τεκμηριώνουν ότι υπάρχουν πρακτικές Κυκλικής Οικονομίας, αλλά δεν αρκούν από μόνες τους για πλήρη συγκριτική αξιολόγηση. Για να αξιολογηθεί με ακρίβεια η συμβολή τους, θα χρειαζόνταν στοιχεία για ποσότητες εναλλακτικών πρώτων υλών, ποσοστά θερμικής υποκατάστασης, ανθρακικό αποτύπωμα ανά προϊόν, μεταφορικές αποστάσεις και αποτελέσματα ελέγχων, διότι χωρίς αυτά, η ανάλυση παραμένει ποιοτική (TITAN Ελλάδος, 2026b; Όμιλος ΗΡΑΚΛΗΣ, 2026b; Kleijer et al., 2017).

Ακόμη, οι ευρωπαϊκές απαιτήσεις για την κυκλική οικονομία, τα απόβλητα κατασκευών, την ταξινόμηση και τη βιώσιμη χρηματοδότηση μεταβάλλονται, γεγονός το οποίο σημαίνει ότι μια πρακτική που σήμερα βρίσκεται σε φάση πιλοτικής ή εθελοντικής εφαρμογής μπορεί να καταστεί αύριο κανονιστική απαίτηση. Η εργασία πρέπει, συνεπώς, να διαβαστεί ως

αποτύπωση και αναλυτικό πλαίσιο της παρούσας περιόδου, όχι ως μόνιμος οδηγός χωρίς ανάγκη επικαιροποίησης (European Union, 2018b; European Union, 2026).

Η αποδοχή της χρήσης αποβλήτων ως καυσίμων ή πρώτων υλών δεν μπορεί να συναχθεί μόνο από τεχνικά δεδομένα. Χρειάζεται έρευνα αντιλήψεων τοπικών κοινωνιών, εργαζομένων, μηχανικών, δημόσιων αρχών και πελατών. Η τεχνική επάρκεια είναι αναγκαία αλλά όχι πάντοτε αρκετή. Στην πράξη, μια λύση μπορεί να είναι τεχνικά ορθή και κοινωνικά δύσκολη. Η διαχείριση αυτής της απόστασης αποτελεί κρίσιμο ζήτημα για την ελληνική τσιμεντοβιομηχανία (GIZ–LafargeHolcim, 2020, ενότητα 3.5).

Μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να αναπτύξει συγκριτική LCA για τρία ελληνικά σενάρια: συμβατικό τσιμέντο και σκυρόδεμα, τσιμέντο με αυξημένη χρήση δευτερογενών υλικών, και σκυρόδεμα με ανακυκλωμένα αδρανή ή νερά πλύσης. Μια τέτοια μελέτη θα έδειχνε ποια παρέμβαση προσφέρει μεγαλύτερο περιβαλλοντικό όφελος ανά λειτουργική μονάδα. Θα επέτρεπε επίσης να φανεί σε ποια απόσταση μεταφοράς χάνεται το πλεονέκτημα ενός ανακυκλωμένου υλικού (Kleijer et al., 2017).

Μία άλλη κατεύθυνση έρευνας αφορά τη δοκιμή λεπτόκοκκων κλασμάτων από ελληνικά ΑΕΚΚ ως πληρωτικών ή πιθανών συμπληρωματικών υλικών. Τα λεπτόκοκκα συχνά αποτελούν πρόβλημα για τις μονάδες ανακύκλωσης, επειδή έχουν χαμηλότερη εμπορική αξία από τα χονδρόκοκκα αδρανή. Αν βρεθούν κατάλληλες χρήσεις στην τσιμεντοβιομηχανία ή στο σκυρόδεμα, θα αυξηθεί η ποιότητα της ανακύκλωσης. Η έρευνα πρέπει να εξετάσει χημική σύσταση, δραστηριότητα, επίδραση στην ενυδάτωση και πιθανή έκπλυση (Tokareva et al., 2023).

Χρήσιμη θα ήταν και η διερεύνηση επιχειρηματικών μοντέλων συνεργασίας ανάμεσα σε τσιμεντοβιομηχανίες, δήμους και μονάδες διαχείρισης ΑΕΚΚ. Χωρίς συμβάσεις, ευθύνη ποιότητας και σταθερά κίνητρα, οι ροές δεν θα σταθεροποιηθούν. Μια οικονομική ανάλυση κόστους-οφέλους για τέτοιες συνεργασίες θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμη για την ελληνική αγορά (Murray et al., 2017; Wijayasundara et al., 2016).

Τέλος, μελλοντική έρευνα μπορεί να εξετάσει την ένταξη κριτηρίων κυκλικότητας στις τεχνικές προδιαγραφές δημόσιων έργων. Το ερώτημα δεν είναι μόνο ποια υλικά μπορούν να παραχθούν, αλλά και ποια υλικά θα ζητήσει η αγορά. Αν τα δημόσια έργα απαιτήσουν τεκμηριωμένα χαμηλότερο αποτύπωμα, τότε η βιομηχανία θα έχει ισχυρότερο κίνητρο να

επενδύσει σε κυκλικές λύσεις. Αν η ζήτηση παραμείνει αδιάφορη, η μετάβαση θα εξαρτηθεί αποκλειστικά από την εταιρική πρωτοβουλία, πράγμα ασταθές και αργό (European Commission, χ.χ.).

5.4 Προτάσεις πολιτικής και βιομηχανικής πρακτικής

Προτείνεται, συνεπώς, η δημιουργία εθνικού πλαισίου τεχνικής ποιότητας για δευτερογενή υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε τσιμέντο και σκυρόδεμα. Το πλαίσιο αυτό θα πρέπει να περιλαμβάνει μεθόδους δειγματοληψίας, ελάχιστες απαιτήσεις καθαρότητας, όρια ανεπιθύμητων συστατικών και διαδικασίες πιστοποίησης. Με αυτόν τον τρόπο, οι παραγωγοί δευτερογενών υλικών θα γνωρίζουν τι απαιτεί η αγορά και οι τσιμεντοβιομηχανίες θα μπορούν να ενσωματώνουν ροές με μικρότερο τεχνικό κίνδυνο. Η ποιότητα πρέπει να γίνει κοινή γλώσσα ανάμεσα στην ανακύκλωση και στην παραγωγή (Scrivener et al., 2018; Akhtar & Sarmah, 2018).

Επίσης, προτείνεται η υποχρεωτική ενίσχυση της επιλεκτικής κατεδάφισης σε έργα συγκεκριμένης κλίμακας. Πριν από την κατεδάφιση χρειάζεται απογραφή υλικών, απομάκρυνση επικίνδυνων συστατικών, χωριστή συλλογή σκυροδέματος, μετάλλων, ξύλου και γύψου, καθώς και τεκμηρίωση της τελικής διαδρομής κάθε ροής (European Commission, 2026a).

Επίσης ενδιαφέρουσα θα ήταν η χρήση πράσινων δημόσιων προμηθειών με προσοχή στις τεχνικές επιδόσεις. Το κράτος μπορεί να ζητά προϊόντα χαμηλότερου ανθρακικού αποτυπώματος και συγκεκριμένο επίπεδο τεκμηριωμένης κυκλικότητας, αλλά δεν πρέπει να υποκαθιστά τα τεχνικά πρότυπα με περιβαλλοντικά συνθήματα. Τα δημόσια έργα χρειάζονται υλικά που είναι και ασφαλή και περιβαλλοντικά βελτιωμένα. Η ορθή προμήθεια πρέπει να βαθμολογεί το συνολικό αποτύπωμα, τη διάρκεια ζωής, την ύπαρξη EPD και τη συμμόρφωση προς τα πρότυπα (European Commission, χ.χ.; Kleijer et al., 2017).

Στη συνέχεια, προτείνεται η δημιουργία περιφερειακών κόμβων ανακύκλωσης αδρανών και δευτερογενών πρώτων υλών κοντά σε αστικά κέντρα και βιομηχανικές μονάδες. Οι κόμβοι αυτοί θα μπορούσαν να συνδέουν εργοτάξια, μονάδες ΑΕΚΚ, λατομεία, μονάδες σκυροδέματος και τσιμεντοβιομηχανίες. Έτσι θα μειώνονταν οι μεταφορές, θα αυξανόταν η

ποιότητα διαλογής και θα διαμορφωνόταν σταθερή αγορά δευτερογενών υλικών (Wijayasundara et al., 2016; Akhtar & Sarmah, 2018).

Ο TITAN, ο ΗΡΑΚΛΗΣ και κάθε άλλη μονάδα που εφαρμόζει σχετικές πρακτικές θα μπορούσαν να δημοσιοποιούν με συγκρίσιμο τρόπο ποσοστά εναλλακτικών καυσίμων, τόνους εναλλακτικών πρώτων υλών, αποφυγή ταφής, μείωση εκπομπών, χρήση νερού και ποσότητες ανακυκλωμένων υλικών. Η σύγκριση πρέπει να γίνεται με προσοχή, διότι κάθε μονάδα έχει διαφορετικές συνθήκες, αλλά η ύπαρξη δεικτών θα βελτίωνε τη διαφάνεια και θα περιόριζε την αοριστία (Habert et al., 2020; Kleijer et al., 2017).

Επειδή το θέμα δημιουργεί εύλογες κοινωνικές ανησυχίες, οι επιχειρήσεις πρέπει να παρουσιάζουν προληπτικά τι είδους καύσιμα χρησιμοποιούνται, ποιοι έλεγχοι εφαρμόζονται, ποια είναι τα όρια εκπομπών και ποια είναι τα πραγματικά αποτελέσματα παρακολούθησης. Η διαβούλευση δεν πρέπει να γίνεται μόνο όταν έχει ξεσπάσει σύγκρουση, αλλά μέσα από διαρκή επικοινωνία με το κοινό (GIZ–LafargeHolcim, 2020, ενότητα 3.5.2).

Ακόμη, απαραίτητη είναι η ενίσχυση της έρευνας για ελληνικά συμπληρωματικά τσιμεντοειδή υλικά. Προτείνεται να διερευνηθούν πιθανές τοπικές πηγές ποζολανικών ή πληρωτικών υλικών με συστηματική δειγματοληψία και χαρακτηρισμό. Η εξάρτηση από κλασικά παραπροϊόντα άλλων κλάδων μπορεί να αποδειχθεί περιοριστική στο μέλλον. Η έρευνα σε τοπικά υλικά θα μπορούσε να στηρίξει τσιμέντα χαμηλότερου κλίνκερ με μικρότερες μεταφορές και καλύτερη προσαρμογή στην ελληνική παραγωγή (Scrivener et al., 2018).

Ακόμη, χειριστές μονάδων ΑΕΚΚ, οι υπεύθυνοι κατεδαφίσεων, οι μεταφορείς, οι υπεύθυνοι ποιοτικού ελέγχου και οι μηχανικοί πρέπει να γνωρίζουν τις απαιτήσεις των υλικών. Η κακή διαλογή, η επιμόλυνση και η λανθασμένη αποθήκευση μπορούν να ακυρώσουν μια κατά τα άλλα καλή κυκλική αλυσίδα. Κάθε προϊόν με δευτερογενές περιεχόμενο πρέπει να αξιολογείται ως προς την πραγματική του λειτουργία στον χρόνο. Η καλύτερη κυκλική λύση είναι εκείνη που μειώνει το αποτύπωμα χωρίς να αυξάνει τον κίνδυνο επισκευών ή πρόωρης αντικατάστασης (Akhtar & Sarmah, 2018; Kleijer et al., 2017).

Τέλος, προτείνεται η σταδιακή μετάβαση, με σαφείς ενδιάμεσους στόχους. Η τσιμεντοβιομηχανία δεν μπορεί να αλλάξει από τη μία μέρα στην άλλη, ούτε όμως μπορεί να επικαλείται διαρκώς τη δυσκολία ως άλλοθι. Χρειάζονται στόχοι ανά πενταετία για υποκατάσταση κλίνκερ, εναλλακτικά καύσιμα, δευτερογενείς πρώτες ύλες, νερό και απόβλητα

παραγωγής. Οι στόχοι πρέπει να είναι φιλόδοξοι αλλά τεχνικά ρεαλιστικοί. Η μετάβαση θέλει βήματα, όχι άλματα στο κενό (Habert et al., 2020; GCCA, 2026a).

Η εφαρμογή αυτών των προτάσεων θα μπορούσε να μεταβάλει την ελληνική τσιμεντοβιομηχανία από παθητικό αποδέκτη περιβαλλοντικών πιέσεων σε ενεργό οργανωτή κυκλικών ροών. Αυτό δεν σημαίνει ότι ο κλάδος απαλλάσσεται από τις ευθύνες του ή ότι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις εξαφανίζονται. Σημαίνει ότι η παραγωγή συνδέεται με καλύτερη χρήση υλικών, διαφάνεια και τεχνική βελτίωση. Η πρακτική σημασία της προσέγγισης για την Ελλάδα πρέπει να αξιολογηθεί με στοιχεία για τις διαθέσιμες ροές, τη ζήτηση δομικών υλικών και τις περιφερειακές υποδομές διαχείρισης (Korhonen et al., 2018; European Commission, 2026a).

Η τελική θέση της εργασίας είναι ότι η Κυκλική Οικονομία πρέπει να αντιμετωπιστεί ως απαιτητική βιομηχανική πρακτική και όχι ως ρητορικό ένδυμα βιωσιμότητας. Στον κλάδο του τσιμέντου, η επιτυχία θα κριθεί στην πράξη όπου και θα φανεί αν οι ροές είναι καθαρές, αν τα προϊόντα αντέχουν, αν οι εκπομπές μειώνονται και αν η κοινωνία εμπιστεύεται τη διαδικασία (Korhonen et al., 2018; Habert et al., 2020).

Βιβλιογραφία

- Akhtar, A., & Sarmah, A. K. (2018). Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. *Journal of Cleaner Production*, 186, 262–281. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.085>
- Alsarhan, L. M., Alayyar, A. S., Alqahtani, N. B., & Khadary, N. H. (2021). Circular carbon economy (CCE): A way to invest CO₂ and protect the environment, a review. *Sustainability*, 13(21), Article 11625. <https://doi.org/10.3390/su132111625>
- Anastasiou, E., Papachristoforou, M., Anesiadis, D., Zafeiridis, K., & Tsardaka, E.-C. (2018). Investigation of the use of recycled concrete aggregates originating from a single ready-mix concrete plant. *Applied Sciences*, 8(11), Article 2149. <https://doi.org/10.3390/app8112149>
- Arulrajah, A., Mohammadinia, A., D’Amico, A., & Horpibulsuk, S. (2017). Cement kiln dust and fly ash blends as an alternative binder for the stabilization of demolition aggregates. *Construction and Building Materials*, 145, 218–225. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.007>
- Asadollahfardi, G., Asadi, M., Jafari, H., Moradi, A., & Asadollahfardi, R. (2015). Experimental and statistical studies of using wash water from ready-mix concrete trucks and a batching plant in the production of fresh concrete. *Construction and Building Materials*, 98, 305–314. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.053>
- Barna, R., Rethy, Z., Imyim, A., Perrodin, Y., Moszkowicz, P., & Tiruta-Barna, L. (2000). Environmental behaviour of a construction made of a mixture of hydraulic binders and air pollution control residues from municipal solid waste incineration: Part 1. Physico-chemical characterisation and modelling of the source term. *Waste Management*, 20(8), 741–750. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(00\)00032-5](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(00)00032-5)
- CEMEX. (2026a). Our 2030 targets. Διαθέσιμο στο: <https://www.cemex.com/en/sustainability/our-2030-targets>

CEMEX. (2026b). Regenera: Committed to circularity. Διαθέσιμο στο:

<https://www.cemex.com/en/products-solutions/regenera>

European Commission. (2026a). Construction and demolition waste. Διαθέσιμο στο:

https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/construction-and-demolition-waste_en

European Environment Agency. (2019). Construction and demolition waste: Challenges and opportunities in a circular economy. Publications Office of the European Union.

<https://doi.org/10.2800/07321>

European Union. (2008). Directive 2008/98/EC on waste and repealing certain Directives. Official Journal of the European Union, L 312, 3-30.

European Union. (2018a). Directive (EU) 2018/850 amending Directive 1999/31/EC on the landfill of waste. Official Journal of the European Union, L 150, 100-108.

European Union. (2018b). Directive (EU) 2018/851 amending Directive 2008/98/EC on waste. Official Journal of the European Union, L 150, 109-140.

European Union. (2026). Commission Delegated Regulation (EU) 2023/2486, consolidated version 01/01/2026. EUR-Lex. Διαθέσιμο στο: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:02023R2486-20260101>

Geissdoerfer, M. κ.ά. (2017) ‘The Circular Economy – A new sustainability paradigm?’, *Journal of Cleaner Production*, 143, σελ. 757–768. Διαθέσιμο στο: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>.

Ghisellini, P., Cialani, C. και Ulgiati, S. (2016a) ‘A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems’, *Journal of Cleaner Production*, 114, σελ. 11–32. Διαθέσιμο στο: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>.

Ghisellini, P., Cialani, C. και Ulgiati, S. (2016b) ‘A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems’, *Journal of Cleaner Production*, 114, σελ. 11–32. Διαθέσιμο στο: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>.

Global Cement and Concrete Association. (2026a). 2020-2030: The decade to make it happen. Διαθέσιμο στο: <https://gccassociation.org/concretefuture/2020-2030-the-decade-to-make-it-happen/>

Global Cement and Concrete Association. (2026b). Our commitment and pathway. Διαθέσιμο στο: <https://gccassociation.org/concretefuture/our-commitment-pathway/>

Habert, G. κ.ά. (2020) ‘Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries’, *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(11), σελ. 559–573. Διαθέσιμο στο: <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3>.

Heidelberg Materials. (2026). Circular economy. Διαθέσιμο στο: <https://www.heidelbergmaterials.com/en/sustainability/we-decarbonize-the-construction-industry/circular-economy>

Holcim. (2026). Circular construction. <https://www.holcim.com/sustainability/circular-construction> (Πρόσβαση: 15 Σεπτεμβρίου 2026).

Kirchherr, J., Reike, D. και Hekkert, M. (2017) ‘Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions’, *Resources, Conservation and Recycling*, 127, σελ. 221–232. Διαθέσιμο στο: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>.

Kleijer, A.L. κ.ά. (2017) ‘Product-specific Life Cycle Assessment of ready mix concrete: Comparison between a recycled and an ordinary concrete’, *Resources, Conservation and Recycling*, 122, σελ. 210–218. Διαθέσιμο στο: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.02.004>.

- Korhonen, J., Honkasalo, A. και Seppälä, J. (2018) ‘Circular Economy: The Concept and its Limitations’, *Ecological Economics*, 143, σελ. 37–46. Διαθέσιμοστο: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>.
- Murray, A., Skene, K. και Haynes, K. (2017a) ‘The Circular Economy: An Interdisciplinary Exploration of the Concept and Application in a Global Context’, *Journal of Business Ethics*, 140(3), σελ. 369–380. Διαθέσιμοστο: <https://doi.org/10.1007/s10551-015-2693-2>.
- Murray, A., Skene, K. και Haynes, K. (2017b) ‘The Circular Economy: An Interdisciplinary Exploration of the Concept and Application in a Global Context’, *Journal of Business Ethics*, 140(3), σελ. 369–380. Διαθέσιμοστο: <https://doi.org/10.1007/s10551-015-2693-2>.
- Reike, D., Vermeulen, W.J.V. και Witjes, S. (2018) ‘The circular economy: New or Refurbished as CE 3.0? — Exploring Controversies in the Conceptualization of the Circular Economy through a Focus on History and Resource Value Retention Options’, *Resources, Conservation and Recycling*, 135, σελ. 246–264. Διαθέσιμοστο: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.027>.
- Scrivener, K.L., John, V.M. και Gartner, E.M. (2018) ‘Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry’, *Cement and Concrete Research*, 114, σελ. 2–26. Διαθέσιμοστο: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>.
- TITAN Materials. (2026). Annual reports. Διαθέσιμοστο: <https://ir.titanmaterials.com/en/investor-information/integrated-annual-report>
- Tokareva, A., Kaassamani, S. και Waldmann, D. (2023) ‘Fine demolition wastes as Supplementary cementitious materials for CO₂ reduced cement production’, *Construction and Building Materials*, 392, σελ. 131991. Διαθέσιμοστο: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131991>.

- Vieira, L.D.B.P. κ.ά. (2019) ‘Waste generation from the production of ready-mixed concrete’, *Waste Management*, 94, σελ. 146–152. Διαθέσιμο στο:
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.05.043>.
- Wijayasundara, M. κ.ά. (2016) ‘Financial assessment of manufacturing recycled aggregate concrete in ready-mix concrete plants’, *Resources, Conservation and Recycling*, 109, σελ. 187–201. Διαθέσιμο στο: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.02.007>.
- Όμιλος ΗΡΑΚΛΗΣ. (2026a). Circular economy. Διαθέσιμο στο:
<https://www.lafarge.gr/en/circular-economy>
- Όμιλος ΗΡΑΚΛΗΣ. (2026b). Alternative fuels and raw materials. Διαθέσιμο στο:
<https://www.lafarge.gr/en/alternative-fuels-and-raw-materials>
- TITAN Ελλάδος. (2026a). Circular economy. Διαθέσιμο στο:
<https://www.titan.gr/en/sustainability/environment/circular-economy>
- TITAN Ελλάδος. (2026b). Use of alternative raw materials and fuels. Διαθέσιμο στο:
<https://www.titan.gr/en/sustainability/environment/circular-economy/alternative-raw-materials-and-fuels>
- TITAN Ελλάδος. (2026c). Co-processing. Διαθέσιμο στο:
<https://www.titan.gr/en/sustainability/environment/climate-change/co-processing>
- TITAN. (2026). Our targets and road to net zero. Διαθέσιμο στο:
<https://www.titanmaterials.com/net-zero/our-targets-and-road-to-net-zero/>
- European Commission. (2013). Commission Implementing Decision 2013/163/EU of 26 March 2013 establishing the best available techniques (BAT) conclusions under Directive 2010/75/EU for the production of cement, lime and magnesium oxide. Official Journal of the European Union, L 100, 1–45. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32013D0163>

European Commission. (χ.χ.). Green Public Procurement. Green Forum. https://green-forum.ec.europa.eu/green-business/green-public-procurement_en (Πρόσβαση: 15 Σεπτεμβρίου 2026).

GIZ–LafargeHolcim. (2020). Guidelines on Pre- and Co-processing of Waste in Cement Production: Use of waste as alternative fuel and raw material. https://www.giz.de/en/downloads/giz-2020_en_guidelines-pre-coprocessing.pdf

Holcim. (2023, 13 Φεβρουαρίου). Holcim launches Europe’s first calcined clay low-carbon cement operation. https://www.holcim.com/building-materials-solutions/ecoplanet?gad_source=1&gad_campaignid=23667754274&gbraid=0AAAAABVG1RS4exRXEz9c5v48P6lufwhBR&gclid=CjwKCAjw2aPVBhBkEiwA0Cptt95N_CXlBi0AK7FEEDrTeR2Mt6g0c3tq8CKf4ESR1DMPIDgABWmIvRoCU2AQAvD_BwE

Holcim. (χ.χ.). What is urban mining? <https://www.holcim.com/who-we-are/our-stories/what-is-urban-mining> (Πρόσβαση: 15 Σεπτεμβρίου 2026).

TITAN USJE. (χ.χ.). Alternative fuels and raw materials. <https://www.usje.mk/en/sustainability/environment/alternative-fuels-and-raw-materials/> (Πρόσβαση: 15 Σεπτεμβρίου 2026).

TITAN Zlatna Panega. (2025, 1 Οκτωβρίου). TITAN Zlatna Panega reports a record increase of 65% thermal substitution of fossil fuels with alternative fuels for four consecutive months. <https://www.titan.bg/en/news/record-increase-of-65-thermal-substitution-of-fossil-fuels-with-alternative-fuels-for-four-consecutive-months-321/>