



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Μ.Π.Σ. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ (ΔΙΑ)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΜΗΜΑ : ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΑΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Α΄: ΣΟΦΙΟΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΑΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Β΄: ΜΟΥΣΤΑΚΑΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΤΙΤΛΟΣ :

**ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΡΓΟΤΑΞΙΩΝ ΜΕ ΜΗΔΕΝΙΚΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ: ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ
ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ ΚΑΙ ΠΡΑΚΤΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΣΕ ΕΡΓΑ
ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΣΤΗΝ ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΚΑΙ ΒΟΡΕΙΑ ΕΥΡΩΠΗ**

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ : ΤΣΕΝΑΪ ΓΚΡΙΣΕΛΑΝΤΑ

ΑΜ: 168074

Email: std168074@ac.eap.gr

Ημερομηνία: 30/06/2026

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	4
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ABSTRACT	6
ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ	6
KEYWORDS	7
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	8
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	8
1.2 ΓΕΝΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ: ΕΡΓΟΤΑΞΙΑ, ΑΠΟΒΛΗΤΑ ΚΑΙ ΚΥΚΛΙΚΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ	9
1.3 ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΕΡΩΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ	10
1.4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	10
1.5 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΚΑΙ ΘΕΣΜΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ	11
2.1 ΚΥΚΛΙΚΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ ΣΤΟΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟ ΚΛΑΔΟ	11
2.2 ΑΠΟΒΛΗΤΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΕΔΑΦΙΣΕΩΝ: ΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ	14
2.3 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΕΡΓΟΤΑΞΙΑΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ	15
2.4 ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΘΕΣΜΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΗΣ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗΣ ΕΝΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΑ ΑΚΚ	17
2.5 ΕΘΝΙΚΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΣΕ ΧΩΡΕΣ ΤΗΣ ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΕΥΡΩΠΗΣ	20
2.6 ΕΘΝΙΚΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΣΕ ΧΩΡΕΣ ΤΗΣ ΒΟΡΕΙΑΣ ΕΥΡΩΠΗΣ	23
2.7 ΔΕΙΚΤΕΣ ΚΑΙ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΣΕ ΕΡΓΟΤΑΞΙΑ	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΙ ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΣΕ ΕΡΓΑ ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ	29
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	29
3.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΜΕΛΕΤΩΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ	30
3.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΕΡΓΟΤΑΞΙΩΝ ΧΑΜΗΛΩΝ Ή ΜΗΔΕΝΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ	33

3.2 ^A ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΡΟΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΡΓΟΤΑΞΙΑΚΗΣ ΟΡΓΑΝΩΣΗΣ.....	33
3.2B ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΟΛΗΨΗΣ, ΔΙΑΛΟΓΗΣ ΚΑΙ ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ ΥΛΙΚΩΝ	35
3.3 ΨΗΦΙΑΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ (BIM, MATERIAL PASSPORTS ΚΤΛ)	38
3.4 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ (Π.Χ. LEED, BREEAM).....	41
3.5 ΠΟΣΟΤΙΚΟΙ ΔΕΙΚΤΕΣ ΕΠΙΔΟΣΗΣ: ΕΚΤΡΟΠΗ ΑΠΟ ΤΑΦΗ, ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ, ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ	44
3.6 ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΣΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΦΗ ZERO – WASTE ΕΡΓΟΤΑΞΙΩΝ	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΒΟΡΕΙΑΣ ΚΑΙ ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΕΥΡΩΠΗΣ.....	51
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	51
4.1 ΠΛΑΙΣΙΟ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ.....	52
4.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΘΕΣΜΙΚΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ (ΚΕΝΤΡΙΚΗ VS ΒΟΡΕΙΑ ΕΥΡΩΠΗ).....	54
4.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΦΑΡΜΟΖΟΜΕΝΩΝ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ	56
4.4 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΡΑΚΤΙΚΩΝ ΣΤΟ ΕΡΓΟΤΑΞΙΟ (ΡΟΕΣ, LOGISTICS, ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ)	57
4.5 ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΣΤΙΣ ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ: ΠΟΣΟΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ.....	59
4.6 ΣΥΝΘΕΣΗ: ΚΟΙΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ, ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΜΠΕΙΡΙΑ	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ.....	64
5.1 ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΕΥΡΗΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ.....	64
5.2 ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΤΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΠΡΑΚΤΙΚΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ	65
5.3 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΕΡΓΟΤΑΞΙΩΝ ΜΕ ΜΗΔΕΝΙΚΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ	66
5.4 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΘΕΣΜΙΚΩΝ ΚΑΙ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΠΑΡΕΜΒΑΣΕΩΝ.....	68
5.5 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ	69
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	70

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Βασικές αρχές της κυκλικής οικονομίας στον κατασκευαστικό τομέα...	13
Πίνακας 2: Βασικές κατηγορίες αποβλήτων κατασκευών και κατεδαφίσεων και δυνατότητες αξιοποίησης.....	15
Πίνακας 3: Βασικά θεσμικά και πολιτικά εργαλεία της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τη διαχείριση των ΑΚΚ.....	20
Πίνακας 4: Συγκριτική παρουσίαση χωρών Κεντρικής Ευρώπης.....	22
Πίνακας 5: Συγκριτική παρουσίαση χωρών Βόρειας Ευρώπης	25
Πίνακας 6: Βασικοί δείκτες αξιολόγησης διαχείρισης ΑΚΚ σε εργοτάξια	28
Πίνακας 7: Συγκριτική παρουσίαση μελετών περίπτωσης zero-waste εργοταξίων στην Κεντρική και Βόρεια Ευρώπη.....	32
Πίνακας 8: Βασικές πρακτικές διαχείρισης αποβλήτων σε εργοτάξια μηδενικών αποβλήτων	37
Πίνακας 9: Ψηφιακά εργαλεία και τεχνολογίες που υποστηρίζουν την κυκλική διαχείριση των ΑΚΚ.....	40
Πίνακας 10: Συγκριτική αξιολόγηση των συστημάτων LEED και BREEAM ως προς την υποστήριξη κυκλικών πρακτικών	43
Πίνακας 11: Βασικοί ποσοτικοί δείκτες αξιολόγησης της κυκλικότητας σε εργοτάξια χαμηλών ή μηδενικών αποβλήτων.....	46
Πίνακας 12: Βασικές προκλήσεις και περιορισμοί στην εφαρμογή πρακτικών μηδενικών αποβλήτων στον κατασκευαστικό τομέα	49
Πίνακας 13: Συγκριτική αποτύπωση θεσμικού πλαισίου Κεντρικής και Βόρειας Ευρώπης για τη διαχείριση ΑΚΚ.....	55
Πίνακας 14: Συγκριτική αξιολόγηση ποσοτικών επιδόσεων και βασικών δεικτών διαχείρισης ΑΚΚ στη Βόρεια και Κεντρική Ευρώπη	61
Πίνακας 15: Κοινά στοιχεία, βασικές διαφορές και κύρια διδάγματα από την ευρωπαϊκή εμπειρία στη διαχείριση ΑΚΚ.....	63

ΣΧΗΜΑΤΑ – ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

Σχήμα 1: Μετάβαση από το γραμμικό στο κυκλικό μοντέλο διαχείρισης πόρων στον κατασκευαστικό τομέα	13
Σχήμα 2: Βασικά ψηφιακά εργαλεία υποστήριξης της κυκλικής οικονομίας στις κατασκευές.....	28
Διάγραμμα: Συνθετικό μοντέλο εφαρμογής zero-waste εργοταξίων και κυκλικής κατασκευής	50

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας στο πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών « Διαχείριση Αποβλήτων » του Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου, θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου σε όλους όσους συνέλαβαν, άμεσα ή έμμεσα, στην πραγματοποίηση και την ολοκλήρωση της.

Θα ήθελα ιδιαίτερα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Σοφίο Σπυρίδωνα για την καθοδήγηση, τις παρατηρήσεις και τη συνεχή υποστήριξη του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Η συμβολή του υπήρξε ουσιαστική τόσο στην επιστημονική προσέγγιση του θέματος όσο και στη συνολική διαμόρφωση της μελέτης.

Επιπλέον ευχαριστώ θερμά τους διδάσκοντες του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών για τις γνώσεις και τα εφόδια που μου προσέφεραν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά την οικογένεια μου και τους ανθρώπους που στάθηκαν δίπλα μου με υπομονή, κατανόηση και στήριξη σε όλη τη διάρκεια της προσπάθειας αυτής.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τη διαχείριση Αποβλήτων Κατασκευών και Κατεδαφίσεων – ΑΚΚ (διεθνώς Construction and Demolition Waste-CDW) στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας, δίνοντας έμφαση στον σχεδιασμό και στη λειτουργία εργοταξίων χαμηλών ή μηδενικών αποβλήτων σε χώρες της Βόρειας και της Κεντρικής Ευρώπης.

Στο πρώτο μέρος της εργασίας παρουσιάζεται το θεωρητικό και θεσμικό πλαίσιο που διέπει τη διαχείριση των ΑΚΚ σε ευρωπαϊκό επίπεδο, με έμφαση στις βασικές αρχές της κυκλικής οικονομίας στον κατασκευαστικό τομέα. Αναλύονται ζητήματα που αφορούν την πρόληψη παραγωγής αποβλήτων, τη διαλογή στην πηγή, την επιλεκτική κατεδάφιση, την επαναχρησιμοποίηση υλικών και την αξιοποίηση ψηφιακών εργαλείων, όπως η Μοντελοποίηση Πληροφοριών Κτιρίου (ΜΠΚ) - Building Information Modelling (BIM), η Ανάλυση Κύκλου Ζωής ΑΚΖ - Life Cycle Assessment (LCA) και τις ψηφιακές ταυτότητες υλικών - material passports.

Στη συνέχεια, εξετάζονται μεθοδολογίες και πρακτικές που εφαρμόζονται σε έργα μεγάλης κλίμακας στη Βόρεια και στην Κεντρική Ευρώπη, δίνοντας έμφαση στη λειτουργία των εργοταξίων, στη διαχείριση ροών υλικών, στους μηχανισμούς παρακολούθησης και στους δείκτες περιβαλλοντικής επίδοσης. Παράλληλα, πραγματοποιείται συγκριτική ανάλυση των θεσμικών και οργανωτικών προσεγγίσεων.

Η συγκριτική ανάλυση των μελετών δείχνει ότι οι χώρες της Κεντρικής Ευρώπης βασίζονται περισσότερο σε κανονιστικούς και οικονομικούς μηχανισμούς που ενισχύουν την ανάκτηση και αξιοποίηση υλικών, ενώ οι χώρες της Βόρειας Ευρώπης δίνουν μεγαλύτερη έμφαση σε στρατηγικές πρόληψης, στην αξιολόγηση κύκλου ζωής και στη σύνδεση της διαχείρισης ΑΚΚ με την κλιματική πολιτική και τη βιώσιμη κατασκευή.

Το τελικό συμπέρασμα της εργασίας είναι ότι η αποτελεσματική εφαρμογή κυκλικών πρακτικών στον κατασκευαστικό τομέα απαιτεί συνδυασμό θεσμικών, τεχνικών και οργανωτικών παρεμβάσεων, καθώς και ενίσχυση της συνεργασίας μεταξύ των

εμπλεκόμενων φορέων. Παράλληλα, αναδεικνύεται η ανάγκη ανάπτυξης περισσότερο ολοκληρωμένων συστημάτων διαχείρισης και αξιολόγησης, τα οποία να υποστηρίζουν τη μετάβαση προς πιο βιώσιμα και αποδοτικά μοντέλα διαχείρισης αποβλήτων στον ελληνικό κατασκευαστικό τομέα.

ABSTRACT

This diploma thesis examines the management of Construction and Demolition Waste (CDW) within the framework of the circular economy, placing particular emphasis on the design and operation of low- or zero-waste construction sites in Northern and Central European countries.

Initially, the study presents the theoretical and institutional framework governing CDW management at the European level, as well as the fundamental principles of the circular economy in the construction sector. Issues related to waste prevention, source separation, selective demolition, material reuse, and the utilization of digital tools such as Building Information Modelling (BIM), Life Cycle Assessment (LCA), and material passports are analyzed.

Subsequently, the study examines methodologies and practices implemented in large-scale projects in Northern and Central Europe, focusing on construction site operations, material flow management, monitoring mechanisms, and environmental performance indicators. At the same time, a comparative analysis of the institutional and organizational approaches adopted in these regions is carried out.

The findings of the study indicate that Central European countries rely more heavily on regulatory and economic mechanisms that promote material recovery and reuse, whereas Northern European countries place greater emphasis on prevention strategies, life cycle assessment, and the integration of CDW management with climate policy and sustainable construction practices.

The thesis concludes that the effective implementation of circular practices in the construction sector requires a combination of institutional, technical, and organizational interventions, as well as stronger cooperation among the stakeholders involved. At the same time, it highlights the need for the development of more comprehensive management and evaluation systems capable of supporting the transition toward more sustainable and efficient waste management models within the Greek construction sector.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων (AKK) / Κυκλική οικονομία / Εργοτάξια μηδενικών αποβλήτων / Διαχείριση αποβλήτων / Μοντελοποίηση Πληροφοριών Κτιρίου (ΜΠΚ) / Ανάλυση κύκλου ζωής (AKZ) / Επιλεκτική κατεδάφιση / Βιώσιμη κατασκευή

KEYWORDS

Construction and Demolition Waste (CDW) / Circular economy / Zero-waste construction sites / Waste management / Building Information Modelling (BIM) / Life Cycle Assessment (LCA) / Selective demolition / Sustainable construction

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο κατασκευαστικός τομέας βρίσκεται σήμερα στο επίκεντρο της συζήτησης για τη βιώσιμη ανάπτυξη, καθώς συνδέεται με υψηλή κατανάλωση φυσικών πόρων και μεγάλη παραγωγή αποβλήτων. Η αυξημένη οικοδομική δραστηριότητα, η ανάπτυξη υποδομών και η ανακαίνιση του υφιστάμενου κτιριακού αποθέματος οδηγούν στην παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων αποβλήτων κατασκευών και κατεδαφίσεων (ΑΚΚ), γεγονός που δημιουργεί σημαντικές περιβαλλοντικές και οικονομικές επιπτώσεις.

Η ανάγκη της μετάβασης προς περισσότερο βιώσιμα πρότυπα ανάπτυξης έχει ενισχύσει τα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον για την εφαρμογή αρχών κυκλικής οικονομίας στον κατασκευαστικό τομέα. Στο πλαίσιο αυτό, ιδιαίτερη σημασία αποκτούν πρακτικές που σχετίζονται με την πρόληψη παραγωγής αποβλήτων, τη διαλογή στην πηγή, την επαναχρησιμοποίηση δομικών στοιχείων και την αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των υλικών καθ' όλη τη διάρκεια ζωής των έργων.

Οι χώρες της Βόρειας και της Κεντρικής Ευρώπης, τα τελευταία χρόνια έχουν υιοθετήσει περισσότερο οργανωμένες στρατηγικές και πολιτικές για τη διαχείριση των ΑΚΚ, ενσωματώνοντας τόσο θεσμικά εργαλεία όσο και νέες και πιο σύγχρονες τεχνολογίες στον σχεδιασμό και στη λειτουργία των εργοταξίων. Η ανάπτυξη ψηφιακών εργαλείων, όπως το BIM, το LCA και τα ψηφιακά διαβατήρια υλικών, έχουν συμβάλει σημαντικά στη βελτίωση της παρακολούθησης, της αξιολόγησης και της διαχείρισης των ροών.

Εξετάζονται οι βασικές πρακτικές και μεθοδολογίες διαχείρισης αποβλήτων κατασκευών και κατεδαφίσεων που εφαρμόζονται σε έργα μεγάλης κλίμακας στη Βόρεια και στην Κεντρική Ευρώπη, με στόχο τη συγκριτική αξιολόγηση των διαφορετικών προσεγγίσεων και τη διερεύνηση της δυνατότητας εφαρμογής αντίστοιχων πρακτικών στο ελληνικό κατασκευαστικό περιβάλλον.

Αρχικά η εργασία παρουσιάζει το θεωρητικό και θεσμικό πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας στις κατασκευές και στη συνέχεια εξετάζονται τεχνικές, οργανωτικές και ψηφιακές πρακτικές που σχετίζονται με τη λειτουργία εργοταξίων χαμηλών ή μηδενικών αποβλήτων. Τέλος, πραγματοποιείται συγκριτική ανάλυση μεταξύ των χωρών της Βόρειας και της Κεντρικής Ευρώπης, ώστε να αναδειχτούν τόσο οι βασικές ομοιότητες και διαφορές όσο και οι κυριότερες προκλήσεις που συνδέονται με την εφαρμογή κυκλικών στρατηγικών στον κατασκευαστικό τομέα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο κατασκευαστικός τομέας αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους καταναλωτές φυσικών πόρων και παράλληλα έναν από τους μεγαλύτερους παραγωγούς αποβλήτων σε παγκόσμιο και ευρωπαϊκό επίπεδο. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, τα απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων (ΑΚΚ) αντιπροσωπεύουν το μεγαλύτερο επιμέρους ρεύμα αποβλήτων, γεγονός που αναδεικνύει τη σημασία της αποτελεσματικής διαχείρισης τους τόσο για την προστασία του περιβάλλοντος όσο και για τη βιώσιμη χρήση των διαθέσιμων πόρων.

Η αυξημένη οικοδομική δραστηριότητα, η ανάγκη ενεργειακής αναβάθμισης του κτιριακού αποθέματος και η συνεχής ανάπτυξη τεχνικών έργων οδηγούν στην παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων ΑΚΚ. Όταν η διαχείριση των αποβλήτων αυτών δεν οργανώνεται με συστηματικό τρόπο, προκαλούνται σημαντικές απώλειες υλικών, αυξημένη κατανάλωση πρωτογενών πόρων και πρόσθετες περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις που σχετίζονται με τη μεταφορά, την επεξεργασία και την τελική διάθεση των υλικών.

Στο πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας και της μετάβασης προς περισσότερο κυκλικά μοντέλα ανάπτυξης, ενισχύεται η ανάγκη εφαρμογής πρακτικών που περιορίζουν την παραγωγή αποβλήτων και βελτιώνουν την αξιοποίηση των υλικών στον κατασκευαστικό τομέα. Μέσα σε αυτή τη μετάβαση προς πιο κυκλικά πρότυπα κατασκευής, αυξάνεται το ενδιαφέρον για εργοτάξια μηδενικών ή χαμηλών αποβλήτων (zero-waste ή low-waste construction sites), στα οποία δίνεται έμφαση στην πρόληψη παραγωγής αποβλήτων, στη διαλογή στην πηγή, στην επαναχρησιμοποίηση υλικών και στη μείωση της ταφής.

Ωστόσο η εφαρμογή τέτοιων πρακτικών προϋποθέτει όχι μόνο τεχνικές λύσεις διαχείρισης αποβλήτων, αλλά και ευρύτερο μετασχηματισμό του τρόπου σχεδιασμού, οργάνωσης και λειτουργίας των εργοταξίων. Σημαντικό ρόλο στη διαδικασία αυτή διαδραματίζουν εργαλεία όπως το BIM, τα συστήματα ιχνηλασιμότητας υλικών, η ανάλυση κύκλου ζωής και οι σύγχρονες μέθοδοι οργάνωσης εργοταξιακών ροών.

Παρά το γεγονός ότι σε χώρες της Βόρειας και Κεντρικής Ευρώπης έχουν ήδη αναπτυχθεί πιο οργανωμένα μοντέλα κυκλικής διαχείρισης ΑΚΚ, στην Ελλάδα η εφαρμογή αντίστοιχων πρακτικών παραμένει σχετικά περιορισμένη. Η παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρεί να διερευνήσει τις μεθοδολογίες και τις πρακτικές που εφαρμόζονται σε έργα μεγάλης κλίμακας στην Ευρώπη, καθώς και τη δυνατότητα προσαρμογής τους στο ελληνικό κατασκευαστικό πλαίσιο.

1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τον σχεδιασμό και την αξιολόγηση εργοταξίων μηδενικών ή σχεδόν μηδενικών αποβλήτων, μέσα από τη συγκριτική

ανάλυση μεθοδολογιών και εφαρμοσμένων πρακτικών σε έργα μεγάλης κλίμακας στη Βόρεια και Κεντρική Ευρώπη.

Η εργασία εξετάζει όχι μόνο τις τεχνικές επιλογές αλλά και τις οργανωτικές δομές που διαμορφώνουν τη λειτουργία ενός εργοταξίου, καθώς και στο θεσμικό πλαίσιο που επηρεάζει την αποτελεσματική διαχείριση των αποβλήτων κατασκευών και κατεδαφίσεων. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην επίτευξη υψηλών ποσοστών πρόληψης, ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης υλικών σε πραγματικές συνθήκες κατασκευής.

Πιο συγκεκριμένα, στόχος της εργασίας είναι:

- η καταγραφή και ανάλυση στρατηγικών σχεδιασμού και λειτουργίας εργοταξίων χαμηλών ή μηδενικών αποβλήτων,
- η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των εφαρμοζόμενων πρακτικών μέσω ποσοτικών και ποιοτικών δεικτών,
- η διερεύνηση των θεσμικών και οργανωτικών παραγόντων που υποστηρίζουν την εφαρμογή κυκλικών πρακτικών
- η διερεύνηση της δυνατότητας προσαρμογής αντίστοιχων πρακτικών στην ελληνική κατασκευαστική πραγματικότητα.

Τελικός σκοπός της εργασίας είναι η διαμόρφωση ενός πλαισίου προτάσεων που θα μπορούσαν να συμβάλουν στην ενίσχυση της κυκλικής διαχείρισης αποβλήτων στον ελληνικό κατασκευαστικό τομέα.

1.2 ΓΕΝΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ: ΕΡΓΟΤΑΞΙΑ, ΑΠΟΒΛΗΤΑ ΚΑΙ ΚΥΚΛΙΚΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ

Το εργοτάξιο αποτελεί τον βασικό χώρο διακίνησης και διαχείρισης ροών υλικών κατά τη διάρκεια υλοποίησης ενός έργου. Ο τρόπος οργάνωσης των εργοταξιακών διαδικασιών επηρεάζει άμεσα τόσο τις ποσότητες των παραγόμενων αποβλήτων όσο και τις δυνατότητες αξιοποίησης των υλικών.

Η παραδοσιακή γραμμική προσέγγιση των κατασκευών βασίζεται κυρίως στην κατανάλωση πρώτων υλών και στην τελική απόρριψη μεγάλου μέρους των παραγόμενων αποβλήτων. Αντίθετα, η κυκλική οικονομία επιδιώκει τη διατήρηση της αξίας των υλικών για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, μέσω στρατηγικών πρόληψης, επαναχρησιμοποίησης και ανακύκλωσης.

Η διαχείριση των ΑΚΚ δεν περιορίζεται πλέον αποκλειστικά στο τελικό στάδιο διάθεσης των αποβλήτων, αλλά ενσωματώνεται στον συνολικό σχεδιασμό και στη λειτουργία των έργων. Η εφαρμογή κυκλικών πρακτικών προϋποθέτει οργανωμένο σχεδιασμό ροών υλικών, αποτελεσματική διαλογή στην πηγή, επιλεκτική κατεδάφιση, καθώς και χρήση ψηφιακών εργαλείων που υποστηρίζουν την παρακολούθηση και αξιολόγηση των υλικών σε όλο τον κύκλο ζωής του έργου.

Στην πράξη, η εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον τρόπο οργάνωσης του ίδιου του εργοταξίου, τα κατάλληλα τεχνικά και ψηφιακά εργαλεία, καθώς και τη συνεργασία μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων, ώστε

να διασφαλίζεται τόσο η περιβαλλοντική όσο και η οικονομική βιωσιμότητα των έργων.

1.3 ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΕΡΩΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ

Η εργασία επικεντρώνεται στη διερεύνηση ερευνητικών ερωτημάτων, που σχετίζονται με τη διαχείριση αποβλήτων στον κατασκευαστικό τομέα και την εφαρμογή αρχών κυκλικής οικονομίας σε εργοτάξια μεγάλης κλίμακας. Συγκεκριμένα:

1. Ποιες στρατηγικές και πρακτικές εφαρμόζονται σε έργα μεγάλης κλίμακας στη Βόρεια και Κεντρική Ευρώπη για την ανάπτυξη εργοταξίων μηδενικών ή χαμηλών αποβλήτων;
2. Ποια θεσμικά, οικονομικά και οργανωτικά πλαίσια υποστηρίζουν την εφαρμογή αυτών των πρακτικών;
3. Ποιες μεθοδολογίες σχεδιασμού και διαχείρισης εργοταξίων συμβάλλουν στη μείωση της ταφής και ενισχύουν την επαναχρησιμοποίηση και την ανακύκλωση υψηλής ποιότητας;
4. Ποια είναι τα μετρήσιμα αποτελέσματα των παραπάνω πρακτικών ως προς τη μείωση, τη διαλογή, την επαναχρησιμοποίηση, την ανακύκλωση και εκτροπή από την ταφή;
5. Σε ποιο βαθμό οι πρακτικές αυτές μπορούν να προσαρμοστούν ρεαλιστικά στο ελληνικό κατασκευαστικό πλαίσιο, λαμβάνοντας υπόψη τους υφιστάμενους τεχνικούς, οικονομικούς και θεσμικούς περιορισμούς;

Μέσα από τα παραπάνω ερωτήματα επιχειρείται να αποτυπωθεί όχι μόνο η αποτελεσματικότητα των ευρωπαϊκών πρακτικών, αλλά και οι δυσκολίες προσαρμογής τους στο ελληνικό κατασκευαστικό περιβάλλον.

1.4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Η μεθοδολογική προσέγγιση βασίζεται:

- στη βιβλιογραφική ανασκόπηση της κυκλικής οικονομίας και των ΑΚΚ,
- στην ανάλυση ευρωπαϊκού και εθνικού θεσμικού πλαισίου,
- στην επιλογή και διερεύνηση μελετών περίπτωσης από χώρες της Βόρειας και Κεντρικής Ευρώπης, όπου έχουν εφαρμοστεί οργανωμένες πρακτικές διαχείρισης αποβλήτων σε έργα μεγάλης κλίμακας.

Οι μελέτες περίπτωσης συγκρίνονται με βάση κοινό πλαίσιο ποσοτικών και ποιοτικών δεικτών. Οι βασικοί δείκτες περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, την ποσότητα αποβλήτων ανά μονάδα επιφάνειας (kg AKK/m^2), το ποσοστό διαλογής στην πηγή, το ποσοστό προετοιμασίας για επαναχρησιμοποίηση, τα ποσοστά ανακύκλωσης (με διάκριση μεταξύ υψηλής και χαμηλής αξίας), καθώς και το ποσοστό εκτροπής από την ταφή.

Επιπλέον, εξετάζονται οργανωτικές παράμετροι που σχετίζονται με τη λειτουργία των εργοταξίων, όπως η διάταξη και η διαχείριση της εργοταξιακής εφοδιαστικής (logistics), οι ροές υλικών, οι συμβατικές απαιτήσεις, καθώς και οι ρόλοι και οι ευθύνες

των εμπλεκόμενων φορέων. Ο συνδυασμός ποσοτικών και ποιοτικών δεδομένων επιτρέπει πιο ολοκληρωμένη αξιολόγηση των διαφορετικών πρακτικών.

1.5 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η εργασία διαρθρώνεται σε πέντε κεφάλαια:

Το **πρώτο κεφάλαιο** παρουσιάζει το αντικείμενο, το γενικό πλαίσιο, τα ερευνητικά ερωτήματα, τη μεθοδολογική προσέγγιση και τη συνολική δομή της μελέτης.

Το **δεύτερο κεφάλαιο** αναλύει το θεωρητικό και θεσμικό πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας στον κατασκευαστικό τομέα και τα βασικά εργαλεία πολιτικής που σχετίζονται με τη διαχείριση ΑΚΚ σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Το **τρίτο κεφάλαιο** παρουσιάζει μεθοδολογίες και πρακτικές που εφαρμόζονται σε έργα μεγάλης κλίμακας στη Βόρεια και Κεντρική Ευρώπη, με έμφαση στον εργοταξιακό σχεδιασμό, στη διαχείριση υλικών και στη χρήση ψηφιακών εργαλείων.

Το **τέταρτο κεφάλαιο** περιλαμβάνει τη συγκριτική αξιολόγηση των επιλεγμένων περιπτώσεων και εξετάζει τη δυνατότητα προσαρμογής των πρακτικών αυτών στο ελληνικό κατασκευαστικό πλαίσιο.

Το **πέμπτο κεφάλαιο** παρουσιάζει τα βασικά συμπεράσματα και διατυπώνει προτάσεις τεχνικού σχεδιασμού και πολιτικής για την ενίσχυση της κυκλικής διαχείρισης αποβλήτων στον ελληνικό κατασκευαστικό τομέα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΚΑΙ ΘΕΣΜΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

2.1 ΚΥΚΛΙΚΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ ΣΤΟΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟ ΚΛΑΔΟ

Ο κατασκευαστικός τομέας αποτελεί έναν από τους πλέον απαιτητικούς τομείς ως προς την κατανάλωση φυσικών πόρων, την παραγωγή αποβλήτων και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που συνδέονται με τον κύκλο ζωής των κατασκευών. Η συνεχής αστικοποίηση, η ανάπτυξη νέων υποδομών και η ανακαίνιση του υφιστάμενου κτιριακού αποθέματος αυξάνουν σημαντικά τις ανάγκες σε πρώτες ύλες, ενέργεια και δομικά υλικά, ενισχύοντας παράλληλα την παραγωγή ΑΚΚ.

Σε παγκόσμιο επίπεδο, τα απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων αντιστοιχούν περίπου στο 30-35% των συνολικών στερεών αποβλήτων (Doussoulin & Bittencourt, 2022). Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, αποτελούν το μεγαλύτερο επιμέρους ρεύμα αποβλήτων, αντιπροσωπεύοντας περισσότερο από το 35% της συνολικής παραγωγής αποβλήτων (European Commission, 2023). Ο κατασκευαστικός τομέας συνδέεται με ιδιαίτερα υψηλή κατανάλωση πρώτων υλών και ενέργειας, ενώ συμβάλλει σημαντικά στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Τα δεδομένα αυτά δείχνουν ότι ο τρόπος σχεδιασμού, κατασκευής, λειτουργίας και διαχείρισης των τεχνικών έργων δεν αποτελεί μόνο τεχνικό ή οικονομικό ζήτημα, αλλά κρίσιμο πεδίο περιβαλλοντικής και αναπτυξιακής πολιτικής.

Η έννοια της κυκλικής οικονομίας βασίζεται στη σταδιακή απομάκρυνση από το γραμμικό μοντέλο «παίρνω-παράγω-απορρίπτω» σε ένα περισσότερο αποδοτικό σύστημα διαχείρισης πόρων, το οποίο δίνει έμφαση στη διατήρηση της αξίας των υλικών και στην παράταση της διάρκειας ζωής τους. Οι βασικές αρχές της περιλαμβάνουν την πρόληψη παραγωγής αποβλήτων, την επαναχρησιμοποίηση, την επισκευή, την ανακατασκευή και την ανακύκλωση υλικών (Oliveira et al., 2021).

Η ανάγκη εφαρμογής της κυκλικότητας στις κατασκευές ενισχύεται περαιτέρω από το γεγονός ότι μεγάλο μέρος του υφιστάμενου κτιριακού αποθέματος θα εξακολουθήσει να χρησιμοποιείται τις επόμενες δεκαετίες. Εκτιμάται ότι περίπου το 85-95% των σημερινών κτιρίων στην Ευρώπη θα παραμένει σε χρήση έως το 2050 (UNEP, 2024). Για τον λόγο αυτό, στρατηγικές όπως η ανακαίνιση, η προσαρμοστική επανάχρηση και η παράταση του κύκλου ζωής των κατασκευών αποκτούν ολοένα και μεγαλύτερη σημασία.

Ένα ακόμα ζήτημα που εμφανίζεται όλο και συχνότερα, είναι η διάκριση μεταξύ λειτουργικού άνθρακα (operational carbon) και ενσωματωμένου άνθρακα (embodied carbon). Ο λειτουργικός άνθρακας αφορά τις εκπομπές που προκύπτουν κατά τη χρήση των κτιρίων, ενώ ο ενσωματωμένος άνθρακας σχετίζεται με την εξόρυξη, παραγωγή, μεταφορά και επεξεργασία των δομικών υλικών. Καθώς οι πολιτικές ενεργειακής απόδοσης συμβάλλουν σταδιακά στη μείωση των λειτουργικών εκπομπών, η περιβαλλοντική σημασία των υλικών και των σχετικών ροών αποβλήτων καθίσταται ολοένα σημαντικότερη, ιδιαίτερα σε υλικά υψηλής έντασης άνθρακα, όπως το σκυρόδεμα και ο χάλυβας.

Η εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας στον κατασκευαστικό τομέα υποστηρίζεται πλέον από ένα σύνολο ψηφιακών και μεθοδολογικών εργαλείων, όπως το BIM, το LCA, η Ανάλυση Ροής Υλικών (APY) - Material Flow Analysis (MFA), τα ψηφιακά δίδυμα και τις ψηφιακές ταυτότητες υλικών. Τα εργαλεία αυτά διευκολύνουν την παρακολούθηση των ροών υλικών, την αξιολόγηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων και τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων σε όλο τον κύκλο ζωής των έργων.

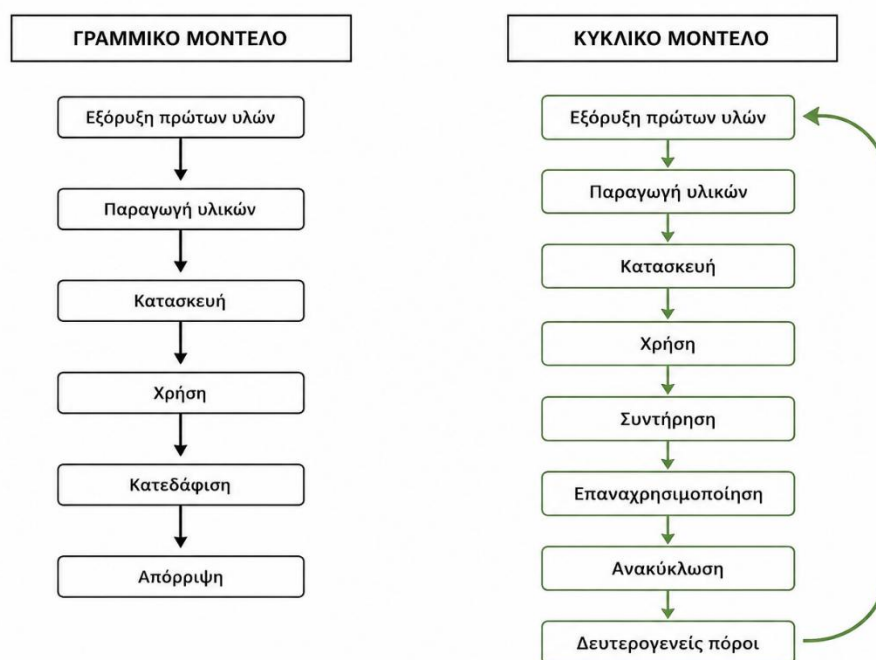
Παρότι οι στρατηγικές αυτές προωθούνται έντονα σε ευρωπαϊκό επίπεδο, η εφαρμογή τους διαφέρει αρκετά μεταξύ των χωρών και εξακολουθεί να αντιμετωπίζει σημαντικές δυσκολίες. Θεσμικοί περιορισμοί, οικονομικά και τεχνικά εμπόδια, καθώς και περιορισμένη ανάπτυξη δευτερογενών αγορών και άνιση εφαρμογή κυκλικών πρακτικών μεταξύ των ευρωπαϊκών χωρών επηρεάζουν σημαντικά τον βαθμό ενσωμάτωσης κυκλικών πρακτικών στον κατασκευαστικό τομέα (Ma et al., 2023).

Πίνακας 1: Βασικές αρχές της κυκλικής οικονομίας στον κατασκευαστικό τομέα

Αρχή	Περιγραφή	Εφαρμογή στον κατασκευαστικό τομέα
Πρόληψη αποβλήτων	Μείωση παραγωγής αποβλήτων πριν από τη δημιουργία τους	Βελτιστοποίηση σχεδιασμού και ποσοτήτων υλικών
Επαναχρησιμοποίηση	Επαναξιοποίηση δομικών στοιχείων και υλικών	Επαναχρησιμοποίηση μεταλλικών στοιχείων, κουφωμάτων και ξυλείας
Ανακύκλωση	Επεξεργασία αποβλήτων για παραγωγή νέων υλικών	Παραγωγή ανακυκλωμένων αδρανών από σκυρόδεμα
Σχεδιασμός για Αποσυναρμολόγηση	Σχεδιασμός για μελλοντική αποσυναρμολόγηση	Αρθρωτές και προκατασκευασμένες κατασκευές
Ψηφιακή παρακολούθηση	Διαχείριση πληροφοριών και ροών υλικών	ΜΠΚ, ψηφιακά δίδυμα, ψηφιακές ταυτότητες υλικών

Πηγές: European Commission - Circular Economy Action Plan / UNEP - Buildings and Climate Global Status Report

Σχήμα 1: Μετάβαση από το γραμμικό στο κυκλικό μοντέλο διαχείρισης πόρων στον κατασκευαστικό τομέα



Πηγές: Ιδία επεξεργασία βάσει European Commission (2020) και UNEP (2024).

2.2 ΑΠΟΒΛΗΤΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΕΔΑΦΙΣΕΩΝ: ΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ

Τα ΑΚΚ περιλαμβάνουν τα υλικά που προκύπτουν από δραστηριότητες κατασκευής, κατεδάφισης, ανακαίνισης και συντήρησης κτιρίων, καθώς και από ορισμένες κατηγορίες τεχνικών έργων και υποδομών. Η διαχείριση τους παρουσιάζει ιδιαίτερη πολυπλοκότητα λόγω τόσο της μεγάλης ποικιλίας υλικών όσο και των διαφορετικών πηγών παραγωγής τους (Teixeira et al., 2023).

Η σύσταση των ΑΚΚ είναι ιδιαίτερα ετερογενής και περιλαμβάνει σκυρόδεμα, τούβλα, κεραμικά, άσφαλτο, ξύλο, μέταλλα, γυαλί, πλαστικά, γύψο και μονωτικά υλικά. Σε ποσοτικούς όρους, τα ορυκτά ή αδρανή κλάσματα - κυρίως σκυρόδεμα, τούβλα και κεραμικά - αντιπροσωπεύουν περίπου το 70-90% της συνολικής μάζας των αποβλήτων, ενώ τα μη ορυκτά κλάσματα, όπως ξύλο, μέταλλα και πλαστικά, εμφανίζονται σε μικρότερες ποσότητες αλλά συχνά παρουσιάζουν υψηλότερη οικονομική αξία ανά μονάδα μάζας (Zhang et al., 2020).

Η ετερογένεια των υλικών επηρεάζει άμεσα τη δυνατότητα διαχείρισης των αποβλήτων, ιδιαίτερα όταν δεν εφαρμόζεται διαλογή στην πηγή. Η ανάμιξη διαφορετικών ρευμάτων δυσχεραίνει τη συλλογή, την επεξεργασία και την αξιοποίηση των υλικών, ενώ συχνά οδηγεί σε υποβάθμιση της ποιότητας των παραγόμενων δευτερογενών προϊόντων. Αντίθετα, η εφαρμογή οργανωμένων πρακτικών διαλογής και επιλεκτικής κατεδάφισης μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την καθαρότητα των υλικών και να ενισχύσει τις δυνατότητες επαναχρησιμοποίησης και ανακύκλωσης υψηλής ποιότητας.

Η παρουσία επικίνδυνων ουσιών, όπως αμιάντος, βαρέα μέταλλα και ορισμένοι οργανικοί ρύποι, αποτελεί σημαντική πρόκληση, κυρίως σε παλαιότερα κτίρια και κατασκευές. Όταν δεν προηγούνται κατάλληλοι έλεγχοι πριν από εργασίες κατεδάφισης ή ανακαίνισης, η ανάμιξη επικίνδυνων και μη επικίνδυνων κλασμάτων αυξάνει τους περιβαλλοντικούς και υγειονομικούς κινδύνους και περιορίζει τις δυνατότητες ασφαλούς αξιοποίησης των παραγόμενων υλικών. Για τον λόγο αυτό, οι ευρωπαϊκές κατευθυντήριες γραμμές δίνουν ιδιαίτερη έμφαση στους προ-κατεδαφιστικούς ελέγχους και στην επιλεκτική κατεδάφιση ως βασικά εργαλεία ποιοτικής διαχείρισης των ΑΚΚ (Sáez & Osmani, 2019).

Ένα ακόμη σημαντικό ζήτημα αποτελεί η συγκρισιμότητα των διαθέσιμων δεδομένων μεταξύ διαφορετικών χωρών και συστημάτων καταγραφής. Διαφοροποιήσεις ως προς την ένταξη συγκεκριμένων κατηγοριών αποβλήτων - όπως τα υλικά εκσκαφών ή ορισμένα ρεύματα έργων υποδομής - καθώς και αποκλίσεις στις μεθόδους ταξινόμησης και αναφοράς επηρεάζουν σημαντικά την αξιοπιστία των συγκριτικών αξιολογήσεων σε ευρωπαϊκό επίπεδο (Sáez & Osmani, 2019).

Η αποτελεσματική διαχείριση των αποβλήτων κατασκευών και κατεδαφίσεων δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την επίτευξη υψηλών ποσοστών ανάκτησης, αλλά και από την ποιότητα της αξιοποίησης των υλικών, την αξιοπιστία των δεδομένων και την

εφαρμογή στρατηγικών που δίνουν προτεραιότητα στην πρόληψη, στην επαναχρησιμοποίηση και στην ανακύκλωση υψηλής ποιότητας.

Πίνακας 2: Βασικές κατηγορίες αποβλήτων κατασκευών και κατεδαφίσεων και δυνατότητες αξιοποίησης

Κατηγορία ΑΚΚ	Ενδεικτικά Υλικά	Βασική δυνατότητα διαχείρισης / αξιοποίησης
Ορυκτά υλικά / αδρανή υλικά	Σκυρόδεμα, τούβλα, κεραμικά, άσφαλτος	Ανακύκλωση σε δευτερογενή αδρανή και αξιοποίηση σε εφαρμογές υπόβασης ή νέες κατασκευές
Μέταλλα	Χάλυβας, αλουμίνιο, χαλκός	Ανακύκλωση υψηλής αξίας
Ξύλο	Ξυλεία, δομικά στοιχεία, πάνελ	Επαναχρησιμοποίηση, ανακύκλωση ή ενεργειακή αξιοποίηση
Γυαλί	Υαλοπίνακες, γυάλινα στοιχεία	Ανακύκλωση υψηλής ποιότητας, εφόσον διασφαλίζεται καθαρό ρεύμα συλλογής
Πλαστικά	PVC, σωλήνες, μονωτικά υλικά	Ανακύκλωση ή ενεργειακή ανάκτηση, ανάλογα με την καθαρότητα και τον τύπο του υλικού
Γύψος	Γυψοσανίδες, γύψινα στοιχεία	Ανακύκλωση, υπό την προϋπόθεση διαχωρισμού στην πηγή
Επικίνδυνα υλικά	Αμίαντος, βαρέα μέταλλα, οργανικοί ρύποι	Ειδική διαχείριση και απομάκρυνση πριν από την αξιοποίηση των λοιπών υλικών

Πηγές: Teixeira et al. (2023), Zhang et al. (2020), Sáez & Osmani (2019).

2.3 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΕΡΓΟΤΑΞΙΑΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Η παραγωγή αποβλήτων στα εργοτάξια συνδέεται άμεσα με τον τρόπο σχεδιασμού, οργάνωσης και υλοποίησης των κατασκευαστικών έργων. Οι απώλειες υλικών επηρεάζουν ολόκληρο τον κύκλο ζωής των κατασκευών, καθώς οδηγούν σε αυξημένη κατανάλωση πρώτων υλών, πρόσθετες ενεργειακές απαιτήσεις, υψηλότερες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και αυξημένο οικονομικό κόστος (Cristóbal García et al., 2024). Για τον λόγο αυτό, τα εργοταξιακά απόβλητα αντιμετωπίζονται πλέον ως βασικός δείκτης αποδοτικότητας πόρων στον κατασκευαστικό τομέα.

2.3.1 Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των εργοταξιακών αποβλήτων συνδέονται τόσο με τις διαδικασίες διαχείρισης τους όσο και με τις επιπτώσεις που προκαλεί η ανάγκη παραγωγής νέων υλικών για την αντικατάσταση όσων χάνονται κατά τη διάρκεια του έργου. Η εξόρυξη πρώτων υλών, η παραγωγή δομικών υλικών, η μεταφορά και οι διαδικασίες επεξεργασίας απαιτούν σημαντικές ποσότητες ενέργειας και συνδέονται με εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, κατανάλωση φυσικών πόρων και επιβάρυνση οικοσυστημάτων.

Η πρόληψη παραγωγής αποβλήτων θεωρείται βασικός παράγοντας, καθώς συμβάλλει όχι μόνο στη μείωση των ποσοτήτων που οδηγούνται σε επεξεργασία ή διάθεση, αλλά και στον περιορισμό των ανάντη περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με την παραγωγή νέων υλικών. Η αξιολόγηση των επιπτώσεων αυτών πραγματοποιείται σε μεγάλο βαθμό μέσω εργαλείων Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, τα οποία επιτρέπουν την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων σε όλο τον κύκλο ζωής των έργων.

Σύμφωνα με την Οδηγία-Πλαίσιο για τα Απόβλητα (2008/98/EK), προτεραιότητα δίνεται στην πρόληψη, στην επαναχρησιμοποίηση και στην ανακύκλωση, ενώ η τελική διάθεση αποτελεί την λιγότερο επιθυμητή επιλογή. Η προσέγγιση αυτή συνδέεται άμεσα με την ανάγκη περιορισμού τόσο των παραγόμενων αποβλήτων όσο και της κατανάλωσης πρωτογενών πόρων.

Η σημασία της πρόληψης αναδεικνύεται ιδιαίτερα μέσα από εφαρμογές Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) σε πραγματικές συνθήκες έργου. Σε μελέτη 36 νέων δημοτικών κτιρίων στη Νορβηγία, καταγράφηκαν μέσες ποσότητες περίπου 51 kg/m² αποβλήτων και 88 kg CO₂eq/m² εκπομπών, ενώ διαπιστώθηκε ισχυρή συσχέτιση μεταξύ παραγόμενων αποβλήτων και κλιματικών επιβαρύνσεων (Fufa et al., 2021). Τα αποτελέσματα έδειξαν επίσης ότι διαφορετικές κατηγορίες υλικών παρουσιάζουν διαφορετικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα, γεγονός που υποδεικνύει την ανάγκη περισσότερο στοχευμένων στρατηγικών διαχείρισης ανά κατηγορία υλικού.

Σε παγκόσμιο επίπεδο, τα απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων αντιστοιχούν περίπου στο 30-35% των συνολικών στερεών αποβλήτων, ενώ σημαντικές ποσότητες εξακολουθούν να οδηγούνται σε ταφή (Swarnakar & Khalfan, 2024). Ως αποτέλεσμα, η μείωση των εργοταξιακών αποβλήτων συνδέεται άμεσα με την προστασία φυσικών πόρων, τον περιορισμό των εκπομπών άνθρακα και τη βελτίωση της συνολικής περιβαλλοντικής επίδοσης του κατασκευαστικού τομέα.

2.3.2 Οικονομικές επιπτώσεις

Οι οικονομικές επιπτώσεις των εργοταξιακών αποβλήτων είναι εξίσου σημαντικές και αφορούν τόσο το επίπεδο του έργου όσο και την ευρύτερη λειτουργία του κατασκευαστικού κλάδου. Σε επίπεδο εργοταξίου, τα απόβλητα συνεπάγονται απώλεια κόστους προμήθειας υλικών, αυξημένες ανάγκες μεταφοράς και διαχείρισης,

πρόσθετες εργασίες διαλογής και απομάκρυνση καθώς και πιθανές καθυστερήσεις στην εκτέλεση των έργων.

Σε ευρύτερο επίπεδο, πρακτικές όπως η ταφή και η χαμηλής αξίας αξιοποίηση των υλικών οδηγούν σε απώλεια πολύτιμων πόρων και αυξημένη εξάρτηση από πρωτογενείς πρώτες ύλες. Η αποτελεσματική διαχείριση αποβλήτων συνδέεται άμεσα με ζητήματα αποδοτικότητας πόρων, ανταγωνιστικότητας και ασφάλειας εφοδιασμού.

Ιδιαίτερη σημασία αποκτούν οι προσεγγίσεις που συνδυάζουν περιβαλλοντική και οικονομική αξιολόγηση μέσω εργαλείων όπως η Ανάλυση Κύκλου Ζωής και η αξιολόγηση κύκλου ζωής με περιβαλλοντικές και κοινωνικές παραμέτρους (Environmental/Social Life Cycle Costing - ELCC/SLCC). Σύμφωνα με μελέτες του Joint Research Centre (JRC), πρακτικές όπως η επαναχρησιμοποίηση δομικών στοιχείων και η βελτίωση της διαλογής μπορούν να επιφέρουν σημαντικά περιβαλλοντικά και κοινωνικά οφέλη, ακόμη και όταν απαιτούν αυξημένο αρχικό κόστος εφαρμογής (Cristóbal García et al., 2024).

Παρόλα αυτά, στην πράξη οι αποφάσεις σε επίπεδο έργου εξακολουθούν να βασίζονται κυρίως στο άμεσο οικονομικό κόστος και στον κίνδυνο καθυστερήσεων, γεγονός που περιορίζει την εφαρμογή πρακτικών πρόληψης και επαναχρησιμοποίησης. Η εμπειρία από χώρες της Βόρειας Ευρώπης δείχνει ότι η επίτευξη χαμηλών ποσοτήτων αποβλήτων απαιτεί εντατικό σχεδιασμό, συνεργασία μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων και συστηματική ενσωμάτωση κυκλικών πρακτικών ήδη από τα πρώτα στάδια ανάπτυξης του έργου (Fufa et al., 2021).

Για τον λόγο αυτό, ολοένα μεγαλύτερη σημασία αποκτά η χρήση συγκρίσιμων δεικτών επίδοσης, όπως:

- η ποσότητα αποβλήτων ανά μονάδα επιφάνειας,
- τα ποσοστά διαλογής στην πηγή,
- η εκτροπή αποβλήτων από την ταφή,
- και τα ποσοστά επαναχρησιμοποίησης και ανακύκλωσης.

Παρότι οι δείκτες αυτοί χρησιμοποιούνται ευρέως, εξακολουθούν να υπάρχουν δυσκολίες ως προς τη συγκρισιμότητα των δεδομένων.

Οι περιβαλλοντικές και οικονομικές επιπτώσεις των εργοταξιακών αποβλήτων αποτελούν αλληλένδετες διαστάσεις ενός ενιαίου συστήματος διαχείρισης πόρων. Η αποτελεσματική αντιμετώπιση τους προϋποθέτει συνδυασμό στρατηγικών πρόληψης, οργανωμένου σχεδιασμού, βελτιωμένης διαλογής και συστηματικής αξιολόγησης των ροών υλικών σε όλο τον κύκλο ζωής των έργων.

2.4 ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΘΕΣΜΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΗΣ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗΣ ΕΝΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΑ ΑΚΚ

Η κυκλική οικονομία αποτελεί πλέον βασικό άξονα της ευρωπαϊκής περιβαλλοντικής και αναπτυξιακής πολιτικής, ιδιαίτερα σε τομείς με αυξημένη κατανάλωση πρώτων

υλών και σημαντική παραγωγή αποβλήτων, όπως ο κατασκευαστικός κλάδος. Η αυξημένη παραγωγή αποβλήτων κατασκευών και κατεδαφίσεων, σε συνδυασμό με τις υψηλές απαιτήσεις σε πρώτες ύλες και ενέργεια, έχει αναδείξει τον τομέα των κατασκευών ως έναν από τους σημαντικότερους τομείς παρέμβασης στο πλαίσιο της μετάβασης προς περισσότερο βιώσιμα μοντέλα ανάπτυξης.

Στο πλαίσιο αυτό, η Ευρωπαϊκή Ένωση προωθεί σταδιακά τη μετάβαση από γραμμικά πρότυπα παραγωγής και κατανάλωσης σε περισσότερο κυκλικά μοντέλα, τα οποία βασίζονται στη μείωση παραγωγής αποβλήτων, στη βελτίωση της αποδοτικότητας πόρων και στη διατήρηση της αξίας των υλικών για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Η μετάβαση αυτή δεν περιορίζεται μόνο στη διαχείριση των αποβλήτων, αλλά επεκτείνεται στον συνολικό σχεδιασμό, στην κατασκευή, στη λειτουργία και στην αποσυναρμολόγηση των κτιρίων και των τεχνικών έργων.

Κεντρικό θεσμικό εργαλείο αποτελεί η Οδηγία-Πλαίσιο για τα Απόβλητα 2008/98/EK (Waste Framework Directive - WFD), η οποία εισάγει την ιεράρχηση αποβλήτων ως βασική αρχή πολιτικής και θέτει ως στόχο την προετοιμασία για επαναχρησιμοποίηση, ανακύκλωση και άλλη μορφή υλικής ανάκτησης τουλάχιστον του 70% κατά βάρος των μη επικίνδυνων ΑΚΚ (European Commission, 2008). Η Οδηγία δίνει προτεραιότητα στην πρόληψη, στην επαναχρησιμοποίηση και στην ανακύκλωση, ενώ η τελική διάθεση αντιμετωπίζεται ως η λιγότερο επιθυμητή επιλογή.

Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία και το νέο Σχέδιο Δράσης για την Κυκλική Οικονομία (ΣΧΚΟ) - Circular Economy Action Plan (CEAP) ενισχύουν τη σύνδεση της διαχείρισης ΑΚΚ με ευρύτερους στόχους που αφορούν την κλιματική ουδετερότητα, τη βιώσιμη χρήση πόρων και τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των κατασκευών (European Commission, 2020). Στο πλαίσιο αυτό, ο κατασκευαστικός τομέας αναγνωρίζεται ως μία από τις βασικές αλυσίδες αξίας για την εφαρμογή κυκλικών στρατηγικών σε ευρωπαϊκό επίπεδο.

Παρά τη σημαντική πρόοδο που έχει καταγραφεί σε αρκετά κράτη-μέλη, οι επιδόσεις διαχείρισης ΑΚΚ εξακολουθούν να παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των χωρών. Οι διαφορές αυτές συνδέονται τόσο με τον βαθμό ωριμότητας των εθνικών συστημάτων διαχείρισης όσο και με διαφοροποιήσεις στους τρόπους καταγραφής και ταξινόμησης των αποβλήτων (Sáez & Osmani, 2019; Wang et al., 2023). Ως αποτέλεσμα, η επίτευξη υψηλών ποσοστών ανάκτησης δεν αποτυπώνει πάντοτε τον πραγματικό βαθμό κυκλικότητας των εφαρμοζόμενων συστημάτων.

Ιδιαίτερη σημασία αποκτά το γεγονός ότι σημαντικό μέρος των ανακτώμενων ορυκτών αποβλήτων εξακολουθεί να αξιοποιείται σε εφαρμογές χαμηλής προστιθέμενης αξίας, όπως επιχώσεις και υπόβαση οδοποιίας. Για τον λόγο αυτό, η ευρωπαϊκή πολιτική μετατοπίζεται σταδιακά από την αποκλειστική έμφαση στην ποσοτική επίτευξη στόχων προς περισσότερο ποιοτικές μορφές διαχείρισης, οι οποίες δίνουν μεγαλύτερη βαρύτητα στην επαναχρησιμοποίηση δομικών στοιχείων, στη διατήρηση της αξίας των υλικών και στην ανακύκλωση υψηλής ποιότητας. Η μετατόπιση αυτή ενισχύθηκε

περαιτέρω με την Οδηγία (ΕΕ) 2018/851, η οποία τροποποίησε την Οδηγία 2008/98/ΕΚ, δίνοντας μεγαλύτερη έμφαση στην πρόληψη παραγωγής αποβλήτων, στην επαναχρησιμοποίηση και στην ανακύκλωση υψηλής ποιότητας.

Ιδιαίτερη σημασία αποκτούν πρακτικές όπως:

- η διαλογή στην πηγή,
- οι προ-κατεδαφιστικοί έλεγχοι,
- η επιλεκτική κατεδάφιση,
- και ο σχεδιασμός για αποσυναρμολόγηση.

Οι πρακτικές αυτές συμβάλλουν στη βελτίωση της καθαρότητας των ρευμάτων αποβλήτων και ενισχύουν τη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης και αξιοποίησης των υλικών σε εφαρμογές μεγαλύτερης περιβαλλοντικής και οικονομικής αξίας (Colmenero-Fonseca et al., 2023).

Η Ευρωπαϊκή Ένωση προωθεί την ανάπτυξη εργαλείων τυποποίησης και αξιολόγησης που ενισχύουν τη διαφάνεια και τη συγκρισιμότητα των κυκλικών πρακτικών. Μελέτες του Joint Research Centre (JRC) υπογραμμίζουν ότι η μετάβαση προς κυκλικά μοντέλα κατασκευής προϋποθέτει κοινούς ορισμούς, εναρμονισμένους δείκτες και αξιόπιστα συστήματα αξιολόγησης (La Fuente Nuno et al., 2024).

Σημαντικό ρόλο στη διαδικασία αυτή διαδραματίζουν επίσης τα ψηφιακά εργαλεία και τα συστήματα διαχείρισης πληροφορίας. Τεχνολογίες όπως το (BIM), τα ψηφιακά μητρώα κτιρίων / υλικών (digital logbooks) και τα material passports διευκολύνουν την παρακολούθηση των ροών υλικών και ενισχύουν τη δυνατότητα εφαρμογής κυκλικών στρατηγικών σε επίπεδο έργου. Παράλληλα, πλαίσια αξιολόγησης όπως το Level(s) - (ευρωπαϊκό πλαίσιο δεικτών βιωσιμότητας), καθώς και εθνικές πρωτοβουλίες όπως το ολλανδικό CB'23, επιχειρούν να μετατρέψουν τις γενικές αρχές της κυκλικότητας σε περισσότερο μετρήσιμα και εφαρμόσιμα κριτήρια.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται επίσης στις κυκλικές δημόσιες προμήθειες, οι οποίες χρησιμοποιούνται ως εργαλείο ενίσχυσης της αγοράς δευτερογενών υλικών και προώθησης κυκλικών επιχειρηματικών μοντέλων. Η εμπειρία χωρών όπως η Ολλανδία δείχνει ότι η σύνδεση κανονιστικών εργαλείων, οικονομικών κινήτρων, τυποποίησης και ψηφιοποίησης μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στην εφαρμογή κυκλικών πρακτικών στον κατασκευαστικό τομέα.

Ωστόσο, παρά τη σημαντική πρόοδο των τελευταίων ετών, εξακολουθούν να υπάρχουν σημαντικές προκλήσεις ως προς την εφαρμογή των ευρωπαϊκών στρατηγικών στην πράξη. Θεσμικές ασάφειες, διαφορετικά επίπεδα διοικητικής ωριμότητας, περιορισμένη ανάπτυξη δευτερογενών αγορών και άνιση εφαρμογή των πολιτικών μεταξύ των κρατών-μελών επηρεάζουν σημαντικά τον βαθμό υλοποίησης κυκλικών πρακτικών στις κατασκευές. Συνεπώς, η μετάβαση προς περισσότερο κυκλικά μοντέλα διαχείρισης ΑΚΚ δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την ύπαρξη ευρωπαϊκών στόχων και κανονιστικών πλαισίων, αλλά απαιτεί συνδυασμό τεχνικών, θεσμικών,

οικονομικών και οργανωτικών παρεμβάσεων σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής των έργων.

Πίνακας 3: Βασικά θεσμικά και πολιτικά εργαλεία της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τη διαχείριση των ΑΚΚ

Έτος	Πολιτική / Νομοθεσία	Βασικός στόχος
2008	Οδηγία-Πλαίσιο για τα Απόβλητα 2008/98/EK	Εισάγει την ιεράρχηση αποβλήτων και τον στόχο 70% για τα μη επικίνδυνα ΑΚΚ
2018	Οδηγία (ΕΕ) 2018/851	Ενισχύει την πρόληψη, την επαναχρησιμοποίηση και την ανακύκλωση υψηλής ποιότητας
2020	Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία	Συνδέει τη διαχείριση πόρων με την κλιματική ουδετερότητα
2020	Σχέδιο Δράσης για την Κυκλική Οικονομία	Αναγνωρίζει τις κατασκευές ως βασικό πεδίο κυκλικής μετάβασης
2021	Level(s) Framework	Παρέχει κοινό ευρωπαϊκό πλαίσιο δεικτών βιωσιμότητας και κυκλικότητας για τα κτίρια.

Πηγές: Οδηγία 2008/98/EK, Οδηγία (ΕΕ) 2018/851, European Commission (2020), Level(s).

2.5 ΕΘΝΙΚΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΣΕ ΧΩΡΕΣ ΤΗΣ ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΕΥΡΩΠΗΣ

Οι χώρες της Κεντρικής Ευρώπης παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον ως προς τη διαχείριση αποβλήτων κατασκευών και κατεδαφίσεων, καθώς διαθέτουν γενικά πιο οργανωμένα θεσμικά πλαίσια, αυστηρότερους μηχανισμούς ελέγχου και υψηλότερα ποσοστά αξιοποίησης αποβλήτων σε σύγκριση με μεγάλο μέρος της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Παρά τη κοινή ευρωπαϊκή βάση που διαμορφώνεται από την Οδηγία-Πλαίσιο για τα Απόβλητα (2008/98/EK), οι τρόποι εφαρμογής διαφοροποιούνται σημαντικά ως προς τα ρυθμιστικά εργαλεία, τα οικονομικά κίνητρα, τους μηχανισμούς ελέγχου και τον βαθμό ενσωμάτωσης των αρχών της κυκλικής οικονομίας.

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, η ετήσια παραγωγή ΑΚΚ εκτιμάται σε περίπου 820 εκατ. τόνους, γεγονός που καθιστά το συγκεκριμένο ρεύμα ένα από τα σημαντικότερα πεδία παρέμβασης της ευρωπαϊκής περιβαλλοντικής πολιτικής (Gálvez-Martos et al., 2018). Η θέσπιση του στόχου ανάκτησης τουλάχιστον 70% των μη επικίνδυνων ΑΚΚ μέσω της Οδηγίας-Πλαίσιο λειτούργησε ως βασικός μοχλός ανάπτυξης εθνικών στρατηγικών διαχείρισης. Ωστόσο, η εφαρμογή και η αποτελεσματικότητα των μέτρων αυτών εξακολουθεί να διαφοροποιείται σημαντικά μεταξύ των κρατών-μελών.

Στις περισσότερες χώρες της Κεντρικής Ευρώπης, οι υψηλές επιδόσεις συνδέονται με συνδυασμό αυστηρότερων ρυθμιστικών εργαλείων, οικονομικών αντικινήτρων για την

ταφή και ανεπτυγμένων μηχανισμών παρακολούθησης και ελέγχου των ροών αποβλήτων. Σύμφωνα με στοιχεία της Eurostat, η Γερμανία καταγράφει ποσοστά ανάκτησης που προσεγγίζουν το 93%, η Αυστρία περίπου το 90%, ενώ η Ολλανδία εμφανίζει ποσοστά που προσεγγίζουν το 100% (Eurostat, 2021). Οι επιδόσεις αυτές σχετίζονται όχι μόνο με την ανάπτυξη υποδομών επεξεργασίας, αλλά και με τη συνολική οργάνωση των εθνικών συστημάτων διαχείρισης.

Η Γερμανία αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα συστήματος που βασίζεται στην αυστηρή εφαρμογή της ιεράρχησης αποβλήτων και στον περιορισμό της ταφής. Η γερμανική πολιτική δίνει σαφή προτεραιότητα στην πρόληψη και στην αξιοποίηση υλικών, ενώ η διάθεση σε χώρους ταφής επιτρέπεται μόνο για συγκεκριμένες κατηγορίες αποβλήτων υπό αυστηρές προϋποθέσεις (Federal Statistical Office, 2019). Παράλληλα, οικονομικά αντικίνητρα, αυστηρές απαιτήσεις διαχωρισμού και και συστηματική ταξινόμηση των αποβλήτων ενισχύουν τόσο τη συμμόρφωση όσο και τη λειτουργία της αγοράς δευτερογενών υλικών.

Η Αυστρία ακολουθεί επίσης ένα ιδιαίτερα οργανωμένο πλαίσιο, με μεγαλύτερη έμφαση στην ποιότητα της διαχείρισης των υλικών ήδη από τη φάση της κατεδάφισης. Ο Νόμος Διαχείρισης Αποβλήτων (Waste Management Act) και το Διάταγμα για τα Ανακυκλωμένα Κατασκευαστικά Υλικά (Ordinance on Recycled Construction Materials) εισάγουν απαιτήσεις που αφορούν τη διαλογή, τον ποιοτικό έλεγχο και την ιχνηλασιμότητα των υλικών, ενώ το πρότυπο ÖNORM B 3151 καθιστά υποχρεωτικούς τους προ-κατεδαφιστικούς ελέγχους σε έργα συγκεκριμένης κλίμακας (Federal Law Gazette No. 181/2015). Παράλληλα, η ύπαρξη κεντρικής βάσης δεδομένων για τα υλικά κατεδάφισης και ανακύκλωσης ενισχύει τη διαφάνεια και τη δυνατότητα παρακολούθησης των ροών AKK (Deloitte, 2015a).

Η Ολλανδία παρουσιάζει μία από τις πιο ολοκληρωμένες και αναπτυγμένες στρατηγικές κυκλικής οικονομίας στον κατασκευαστικό τομέα. Εκτός από τα πολύ υψηλά ποσοστά ανάκτησης, η ολλανδική πολιτική αντιμετωπίζει τον κατασκευαστικό τομέα ως βασική αλυσίδα αξίας για τη μετάβαση προς κυκλικά μοντέλα ανάπτυξης. Η ταφή επαναχρησιμοποιήσιμων και ανακυκλώσιμων υλικών περιορίζεται αυστηρά, ενώ οικονομικά εργαλεία, όπως ο φόρος ταφής, λειτουργούν ενισχυτικά προς την ανακύκλωση και την αξιοποίηση δευτερογενών υλικών (Ministry of Infrastructure and Water Management, 2017).

Παράλληλα, ιδιαίτερη σημασία αποδίδεται στην ανάπτυξη εργαλείων τυποποίησης, περιβαλλοντικής αξιολόγησης και ψηφιακής διαχείρισης υλικών. Πρωτοβουλίες όπως το CB'23, τις ψηφιακές ταυτότητες υλικών (material passports) και ο Δείκτης Περιβαλλοντικού Κόστους - Environmental Cost Indicator (ECI) επιχειρούν να μετατρέψουν τις γενικές αρχές της κυκλικότητας σε εφαρμόσιμα και μετρήσιμα κριτήρια για τον σχεδιασμό και την αξιολόγηση έργων. Σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν επίσης οι κυκλικές δημόσιες προμήθειες, μέσω των οποίων οι περιβαλλοντικές απαιτήσεις ενσωματώνονται άμεσα στις διαδικασίες ανάθεσης έργων.

Αντίθετα, η Τσεχική Δημοκρατία παρουσιάζει ένα λιγότερο ώριμο και περισσότερο ευέλικτο πλαίσιο διαχείρισης ΑΚΚ. Παρότι η εθνική νομοθεσία έχει ευθυγραμμιστεί με τις βασικές ευρωπαϊκές απαιτήσεις, οι διαδικασίες ελέγχου και παρακολούθησης εφαρμόζονται λιγότερο συστηματικά, ιδιαίτερα σε έργα μικρότερης κλίμακας. Η εικόνα αυτή αποτυπώνεται και στα χαμηλότερα επίπεδα ανάκτησης σε σχέση με χώρες όπως η Γερμανία, η Αυστρία και η Ολλανδία (Eurostat, 2019).

Τα εθνικά πλαίσια των χωρών της Κεντρικής Ευρώπης δείχνουν ότι η αποτελεσματική διαχείριση ΑΚΚ δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την ύπαρξη ευρωπαϊκών στόχων, αλλά κυρίως από τον βαθμό ενσωμάτωσης των αρχών της κυκλικής οικονομίας σε εθνικό επίπεδο. Οι περιπτώσεις της Γερμανίας, της Αυστρίας και της Ολλανδίας αναδεικνύουν τη σημασία του συνδυασμού κανονιστικών εργαλείων, οικονομικών κινήτρων, οργανωμένων μηχανισμών παρακολούθησης και ψηφιακών συστημάτων διαχείρισης για την ανάπτυξη περισσότερο κυκλικών πρακτικών στον κατασκευαστικό τομέα.

Πίνακας 4: Συγκριτική παρουσίαση χωρών Κεντρικής Ευρώπης

Χώρα	Κύρια χαρακτηριστικά συστήματος	Βασικά εργαλεία / πρακτικές	Ερμηνεία επίδοσης
Γερμανία	Ωριμο σύστημα διαχείρισης ΑΚΚ με αυστηρή εφαρμογή της ιεράρχησης αποβλήτων	Περιορισμός ταφής, ταξινόμηση αποβλήτων, ανεπτυγμένες υποδομές επεξεργασίας	Υψηλή ποσοτική ανάκτηση, με ανάγκη διάκρισης μεταξύ ανάκτησης και πραγματικής κυκλικότητας
Αυστρία	Έμφαση στην ποιότητα της διαχείρισης ήδη από τη φάση κατεδάφισης	Προ-κατεδαφιστικοί έλεγχοι, ποιοτικός έλεγχος, ιχνηλασιμότητα υλικών	Ισχυρό θεσμικό πλαίσιο για καθαρότερα ρεύματα ΑΚΚ
Ολλανδία	Πολύ ανεπτυγμένη στρατηγική κυκλικής οικονομίας	Κυκλικές δημόσιες προμήθειες, δείκτης περιβαλλοντικού κόστους, ψηφιακές ταυτότητες υλικών	Πολύ υψηλή ανάκτηση, αλλά μέρος της αφορά χαμηλής αξίας χρήσεις

Τσεχία	Λιγότερο ώριμο και πιο ευέλικτο πλαίσιο	Εθνικά σχέδια διαχείρισης, βασική συμμόρφωση με ευρωπαϊκές απαιτήσεις	Χαμηλότερη θεσμική ωριμότητα σε σχέση με Γερμανία, Αυστρία και Ολλανδία
--------	---	---	---

Πηγές: Eurostat, Federal Statistical Office (2019), Ministry of Infrastructure and Water Management (2017), RVO (2025).

2.6 ΕΘΝΙΚΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΣΕ ΧΩΡΕΣ ΤΗΣ ΒΟΡΕΙΑΣ ΕΥΡΩΠΗΣ

Οι χώρες της Βόρειας Ευρώπης παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον ως προς τη διαχείριση αποβλήτων κατασκευών και κατεδαφίσεων, καθώς διαθέτουν γενικά υψηλό επίπεδο θεσμικής οργάνωσης, ανεπτυγμένες περιβαλλοντικές πολιτικές και αυξημένη ενσωμάτωση των αρχών της κυκλικής οικονομίας στον κατασκευαστικό τομέα. Παράλληλα, στις σκανδιναβικές χώρες η διαχείριση ΑΚΚ συνδέεται στενά με ευρύτερους στόχους που αφορούν τη μείωση των εκπομπών άνθρακα, την αποδοτικότητα πόρων και την αξιολόγηση κύκλου ζωής των κατασκευών.

Παρότι το βασικό θεσμικό υπόβαθρο διαμορφώνεται από τις ευρωπαϊκές κατευθύνσεις για την κυκλική οικονομία και την Οδηγία-Πλαίσιο για τα Απόβλητα, οι χώρες της Βόρειας Ευρώπης εμφανίζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις ως προς τις επιδόσεις και τις εφαρμοζόμενες στρατηγικές. Σύμφωνα με στοιχεία του Nordic Council of Ministers (2024), τα ποσοστά ανάκτησης ΑΚΚ ανέρχονται περίπου στο 43% στη Σουηδία, στο 44% στη Νορβηγία και στο 55% στη Φινλανδία, ενώ η Δανία εμφανίζει σημαντικά υψηλότερες επιδόσεις, γεγονός που υποδεικνύει ότι η ύπαρξη κοινού θεσμικού πλαισίου δεν οδηγεί απαραίτητα σε ομοιόμορφα αποτελέσματα εφαρμογής.

Η Δανία αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα χώρας με ιδιαίτερα ανεπτυγμένη στρατηγική κυκλικής οικονομίας στον κατασκευαστικό τομέα. Το Κλιματικό Σχέδιο για έναν Πράσινο Τομέα Αποβλήτων και την Κυκλική Οικονομία (Climate Plan for a Green Waste Sector and Circular Economy) σε συνδυασμό με την εθνική στρατηγική για τη βιώσιμη κατασκευή, συνδέει άμεσα τη διαχείριση ΑΚΚ με τη μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος των κτιρίων και την εφαρμογή εργαλείων αξιολόγησης κύκλου ζωής (Nordic Council of Ministers, 2023).

Από το 2023, οι υπολογισμοί (LCA) είναι υποχρεωτικοί για συγκεκριμένες κατηγορίες νέων κτιρίων, ενώ έχουν εισαχθεί και ανώτατα όρια εκπομπών CO₂ ανά τετραγωνικό μέτρο. Παράλληλα, ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην επιλεκτική κατεδάφιση, στη χαρτογράφηση επικίνδυνων υλικών και στην ιχνηλασιμότητα των ροών αποβλήτων. Παρότι η Δανία καταγράφει ιδιαίτερα υψηλά ποσοστά αξιοποίησης υλικών, εξακολουθούν να υπάρχουν προκλήσεις ως προς την περαιτέρω ανάπτυξη πρακτικών επαναχρησιμοποίησης και αξιοποίησης δευτερογενών υλικών υψηλής ποιότητας.

Η Φινλανδία ακολουθεί μια περισσότερο μακροπρόθεσμη και συστημική προσέγγιση, εντάσσοντας την κυκλική οικονομία στον πυρήνα της εθνικής αναπτυξιακής στρατηγικής έως το 2035 (YM, 2021a). Το Στρατηγικό Πρόγραμμα για την Κυκλική Οικονομία (Strategic Programme for Circular Economy) περιλαμβάνει δράσεις που

σχετίζονται με την ψηφιοποίηση των ροών υλικών, την ενίσχυση των κυκλικών δημόσιων προμηθειών και την προώθηση περισσότερο αποδοτικής χρήσης των φυσικών πόρων.

Παράλληλα, ο νέος Νόμος περί Κατασκευών (Construction Act) εισάγει απαιτήσεις για προ-κατεδαφιστική αποτύπωση υλικών, τη δυνατότητα μελλοντικής αποσυναρμολόγησης και τη βελτίωση της ιχνηλασιμότητας των δομικών στοιχείων (YM, 2021b). Παρότι το θεσμικό πλαίσιο θεωρείται ιδιαίτερα προηγμένο, η εφαρμογή πρακτικών εκτεταμένης επαναχρησιμοποίησης εξακολουθεί να παρουσιάζει περιορισμούς, κυρίως λόγω τεχνικών, οικονομικών και οργανωτικών δυσκολιών που σχετίζονται με την αγορά δευτερογενών υλικών.

Η Νορβηγία, αν και δεν αποτελεί κράτος-μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης, έχει σε μεγάλο βαθμό ευθυγραμμίσει τις πολιτικές της με τις ευρωπαϊκές κατευθύνσεις μέσω του Ευρωπαϊκού Οικονομικού Χώρου. Η Εθνική Στρατηγική για μια Πράσινη Κυκλική Οικονομία (National Strategy for a Green Circular Economy) συνδέει την κυκλικότητα με ζητήματα καινοτομίας, ανταγωνιστικότητας και ανάπτυξης νέων αγορών δευτερογενών υλικών (Nordic Council of Ministers, 2023). Παράλληλα, τροποποιήσεις στους τεχνικούς κανονισμούς και στα διοικητικά πλαίσια εισάγουν απαιτήσεις για αυξημένη διαλογή αποβλήτων, σχεδιασμό αποσυναρμολόγησης και χαρτογράφηση επαναχρησιμοποιήσιμων υλικών. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν επίσης οι εθελοντικές πρωτοβουλίες «Avfallsfrie byggeplasser» (εργοτάξια χωρίς απόβλητα), οι οποίες βασίζονται στη συνεργασία δημόσιων φορέων, κατασκευαστικών εταιρειών και συστημάτων περιβαλλοντικής πιστοποίησης. Η νορβηγική εμπειρία δείχνει ότι η εφαρμογή κυκλικών πρακτικών μπορεί να ενισχυθεί όχι μόνο μέσω δεσμευτικής νομοθεσίας, αλλά και μέσω συνεργατικών μηχανισμών και δημόσιων πολιτικών προώθησης της αγοράς.

Στη Σουηδία, η κυκλική οικονομία συνδέεται στενά με τους εθνικούς στόχους κλιματικής ουδετερότητας έως το 2045. Η εφαρμογή υποχρεωτικών δηλώσεων κλιματικού αποτυπώματος για νέα κτίρια από το 2022 ενισχύει τη χρήση εργαλείων LCA και την αξιολόγηση του ενσωματωμένου άνθρακα ήδη από τη φάση σχεδιασμού (Boverket, 2020). Παράλληλα, η Εθνική Στρατηγική για την Κυκλική Οικονομία προωθεί την αποδοτικότερη χρήση πόρων, την επαναχρησιμοποίηση και την ανάπτυξη δευτερογενών αγορών (Government Offices of Sweden, 2020).

Παρά τις σημαντικές θεσμικές εξελίξεις, οι σκανδιναβικές χώρες εξακολουθούν να αντιμετωπίζουν προκλήσεις που σχετίζονται με τη μετάβαση από τη γενική ανάκτηση υλικών προς περισσότερο κυκλικά μοντέλα αξιοποίησης. Η πρακτική εφαρμογή στρατηγικών επαναχρησιμοποίησης, η διαθεσιμότητα δευτερογενών υλικών υψηλής ποιότητας και η οικονομική βιωσιμότητα ορισμένων κυκλικών πρακτικών εξακολουθούν να αποτελούν βασικά ζητήματα για τον κατασκευαστικό τομέα.

Συνολικά, τα εθνικά πλαίσια των χωρών της Βόρειας Ευρώπης χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό θεσμικής ωριμότητας, ισχυρή σύνδεση της κυκλικής οικονομίας με την

κλιματική πολιτική και αυξανόμενη χρήση εργαλείων όπως η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA), οι κυκλικές δημόσιες προμήθειες και τα ψηφιακά συστήματα διαχείρισης υλικών. Η εμπειρία των χωρών αυτών δείχνει ότι η αποτελεσματική εφαρμογή κυκλικών πρακτικών προϋποθέτει συνδυασμό θεσμικών, τεχνικών και οργανωτικών παρεμβάσεων στον κατασκευαστικό τομέα.

Πίνακας 5: Συγκριτική παρουσίαση χωρών Βόρειας Ευρώπης

Χώρα	Κύρια κατεύθυνση πολιτικής	Βασικά εργαλεία / πρακτικές	Σχέση με κυκλική οικονομία
Δανία	Σύνδεση ΑΚΚ με κλιματική πολιτική και βιώσιμη κατασκευή	Υπολογισμοί ΑΚΖ, όρια εκπομπών CO ₂ , επιλεκτική κατεδάφιση	Έμφαση στη μείωση περιβαλλοντικού αποτυπώματος των κτιρίων
Σουηδία	Μακροπρόθεσμη στρατηγική κυκλικής οικονομίας	Προ-κατεδαφιστική αποτύπωση υλικών, σχεδιασμός αποσυναρμολόγησης, ιχνηλασιμότητα	Προώθηση συστημικής μετάβασης προς κυκλικές κατασκευές
Φιλανδία	Κυκλικότητα μέσω καινοτομίας και συνεργατικών πρωτοβουλιών	Διαλογή αποβλήτων, χαρτογράφηση επαναχρησιμοποιήσιμων υλικών, waste-free construction sites	Έμφαση σε συνεργασία δημόσιου και ιδιωτικού τομέα
Νορβηγία	Σύνδεση κυκλικής οικονομίας με κλιματική ουδετερότητα	Δηλώσεις κλιματικού αποτυπώματος, ΑΚΖ, ανάπτυξη δευτερογενών αγορών	Έμφαση στον ενσωματωμένο άνθρακα και στη χρήση πόρων

Πηγές: Nordic Council of Ministers (2023, 2024), Nordic Sustainable Construction (2023), YM (2021a, 2021b), Boverket (2020).

2.7 ΔΕΙΚΤΕΣ ΚΑΙ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΣΕ ΕΡΓΟΤΑΞΙΑ

Η αξιολόγηση της διαχείρισης αποβλήτων σε εργοτάξια, και ειδικότερα των αποβλήτων κατασκευών και κατεδαφίσεων, έχει αποκτήσει τα τελευταία χρόνια ιδιαίτερη σημασία στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας και της βιώσιμης κατασκευής. Η σύγχρονη προσέγγιση δεν περιορίζεται πλέον μόνο στην καταγραφή των παραγόμενων ποσοτήτων αποβλήτων, αλλά επεκτείνεται στην αξιολόγηση της συνολικής επίδοσης των έργων ως προς την πρόληψη, τη διαλογή, την επαναχρησιμοποίηση, την ανακύκλωση και τη διατήρηση της αξίας των υλικών.

Στο πλαίσιο αυτό, η αποτελεσματική αξιολόγηση προϋποθέτει:

- σαφείς και συγκρίσιμους δείκτες επίδοσης,
- αξιόπιστα δεδομένα πεδίου,

- και οργανωμένα συστήματα παρακολούθησης και επαλήθευσης των ροών αποβλήτων.

Η ανάπτυξη ψηφιακών τεχνολογιών στον κατασκευαστικό τομέα έχει ενισχύσει σημαντικά τις δυνατότητες παρακολούθησης και ανάλυσης των δεδομένων ΑΚΚ. Ιδιαίτερη σημασία αποκτά η ενσωμάτωση των δεικτών διαχείρισης αποβλήτων σε περιβάλλοντα (BIM), καθώς επιτρέπει τη σύνδεση των δεδομένων αποβλήτων με πληροφορίες σχεδιασμού, ποσοτήτων και υλικών ήδη από τα πρώτα στάδια ανάπτυξης ενός έργου (Akinade et al., 2015).

Στο πλαίσιο αυτό, έχει αναπτυχθεί το «πληροφοριακό μοντέλο BIM διαχείρισης ΑΚΚ», το οποίο βασίζεται στο πρότυπο Κλάσεις Βιομηχανικής Θεμελίωσης (KBΘ) - Industry Foundation Classes (IFC) και λειτουργεί ως κοινή δομή δεδομένων για την αξιολόγηση και ανάλυση δεικτών ΑΚΚ (Bakchan, et al. (2019). Οι προσεγγίσεις ανοικτού BIM ενισχύουν τη διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών λογισμικών και διευκολύνουν τη συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ έργων και εθνικών πλαισίων διαχείρισης. Παράλληλα, επιτρέπουν μεγαλύτερο βαθμό αυτοματοποίησης στη διαδικασία υπολογισμού και παρακολούθησης των ροών αποβλήτων.

Οι δείκτες αξιολόγησης που χρησιμοποιούνται στη διαχείριση ΑΚΚ οργανώνονται συνήθως σε τρεις βασικές λειτουργικές κατηγορίες:

- δείκτες εκτίμησης παραγωγής αποβλήτων,
- δείκτες αξιοποίησης και κυκλικότητας υλικών,
- και δείκτες διαχείρισης και τελικής διάθεσης.

Η διάρθρωση αυτή επιτρέπει πιο ολοκληρωμένη αξιολόγηση της περιβαλλοντικής επίδοσης των έργων, καθώς η ανάλυση δεν περιορίζεται μόνο στο τελικό στάδιο διαχείρισης, αλλά καλύπτει το σύνολο των ροών υλικών κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του έργου.

Μεταξύ των σημαντικότερων δεικτών περιλαμβάνεται ο Δείκτης Παραγωγής Αποβλήτων (ΔΠΑ) - Waste Generation Index (WGI), ο οποίος χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των παραγόμενων αποβλήτων ανά κατηγορία υλικού ή ανά δομικό στοιχείο. Οι τιμές του δείκτη βασίζονται συνήθως σε δεδομένα προηγούμενων εφαρμογών και χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη πιθανών ροών αποβλήτων σε διαφορετικούς τύπους έργων. Η χρήση τέτοιων δεικτών διευκολύνει την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ήδη από τη φάση σχεδιασμού και υποστηρίζει τη λήψη προληπτικών μέτρων διαχείρισης.

Η πρακτική εφαρμογή αυτών των εργαλείων έχει παρουσιαστεί σε πιλοτικές μελέτες έργων μεγάλης κλίμακας. Σε εφαρμογή σε εμπορικό κτίριο επιφάνειας περίπου 663 m², πραγματοποιήθηκε ανάλυση δεδομένων IFC μέσω εργαλείων επεξεργασίας αρχείων, όπως το IfcOpenShell και το Pandas, με στόχο τον υπολογισμό ποσοτήτων υλικών και παραγόμενων αποβλήτων. Τα αποτελέσματα έδειξαν συνολική παραγωγή περίπου 131,41 m³ ΑΚΚ, δηλαδή περίπου 0,2 m³/m² δομημένης επιφάνειας, ενώ εκτιμήθηκε

ότι περίπου το 51,14% των αποβλήτων μπορούσε να ανακυκλωθεί (Bakchan, et al. (2019). Τα αδρανή υλικά και τα μέταλλα εμφάνισαν τις υψηλότερες δυνατότητες ανάκτησης, γεγονός που επιβεβαιώνει τη σημασία της έγκαιρης διαλογής και της σωστής οργάνωσης των ροών υλικών.

Παρά τα πλεονεκτήματα των ψηφιακών εργαλείων, εξακολουθούν να υπάρχουν σημαντικοί περιορισμοί που σχετίζονται με:

- τη διαθεσιμότητα και ποιότητα των δεδομένων BIM,
- προβλήματα διαλειτουργικότητας κατά την εξαγωγή IFC αρχείων,
- και την ανάγκη ενσωμάτωσης πρόσθετων οικονομικών και περιβαλλοντικών δεδομένων, όπως κόστος μεταφοράς, κόστος διάθεσης και αξία δευτερογενών υλικών.

Πέρα από τους τεχνικούς δείκτες, ιδιαίτερη σημασία αποκτούν και τα στρατηγικά πλαίσια αξιολόγησης που λειτουργούν ως μηχανισμοί καθορισμού στόχων και παρακολούθησης προόδου σε επίπεδο κλάδου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο «Οδικός Χάρτης για Μηδενικά Αποφεύξιμα Απόβλητα στις Κατασκευές - Routemap for Zero Avoidable Waste in Construction», το οποίο προωθεί στρατηγικές πρόληψης αποβλήτων και αποδοτικότερης χρήσης πόρων στον κατασκευαστικό τομέα (Green Construction Board, 2021).

Το συγκεκριμένο πλαίσιο περιλαμβάνει μετρήσιμους στόχους που σχετίζονται με:

- τη μείωση παραγωγής αποβλήτων,
- τον περιορισμό της ταφής,
- και τη βελτίωση της αποδοτικότητας πόρων κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής των έργων.

Σύμφωνα με στοιχεία του (Defra, 2018), στο Ηνωμένο Βασίλειο καταγράφηκαν περίπου 60 εκατ. τόνοι ΑΚΚ και 51 εκατ. τόνοι αποβλήτων εκσκαφών, ενώ το οικονομικό κόστος αποβλήτων νέων κατασκευών εκτιμήθηκε σε περίπου 11 δισ. λίρες ετησίως. Τα δεδομένα αυτά αναδεικνύουν ότι η αποτελεσματική διαχείριση αποβλήτων δεν αποτελεί μόνο περιβαλλοντική υποχρέωση, αλλά και σημαντικό παράγοντα οικονομικής αποδοτικότητας.

Η αυξανόμενη χρήση δεικτών, ψηφιακών εργαλείων και τυποποιημένων πλαισίων αξιολόγησης συνδέεται άμεσα με τις γενικότερες τάσεις που παρατηρούνται σε χώρες της Κεντρικής και Βόρειας Ευρώπης, όπου η κυκλική οικονομία ενσωματώνεται σταδιακά στον σχεδιασμό, στις δημόσιες προμήθειες και στη διαχείριση των τεχνικών έργων.

Η αξιολόγηση της διαχείρισης αποβλήτων σε εργοτάξια απαιτεί συνδυασμό ποσοτικών δεικτών, αξιόπιστων δεδομένων και οργανωμένων μηχανισμών παρακολούθησης. Η ενσωμάτωση ψηφιακών τεχνολογιών, όπως το BIM και τα openBIM περιβάλλοντα, ενισχύει σημαντικά τη δυνατότητα συγκριτικής αξιολόγησης, και υποστηρίζει τη

μετάβαση προς περισσότερο τεκμηριωμένα και αποδοτικά κυκλικά μοντέλα διαχείρισης ΑΚΚ.

Πίνακας 6: Βασικοί δείκτες αξιολόγησης διαχείρισης ΑΚΚ σε εργοτάξια

Δείκτης	Μονάδα μέτρησης	Αντικείμενο αξιολόγησης	Σημασία για τη διαχείριση ΑΚΚ
Παραγόμενα ΑΚΚ ανά επιφάνεια	kg ΑΚΚ/m ²	Ποσότητα παραγόμενων αποβλήτων	Εκτίμηση αποδοτικότητας εργοταξίου
Ποσοστό διαλογής στην πηγή	%	Βαθμός διαχωρισμού αποβλήτων	Βελτίωση ποιότητας ανακύκλωσης
Ποσοστό επαναχρησιμοποίησης	%	Επαναξιοποίηση υλικών	Ενίσχυση κυκλικότητας
Ποσοστό ανακύκλωσης	%	Ανάκτηση υλικών	Μείωση κατανάλωσης πρωτογενών πόρων
Ποσοστό εκτροπής από ταφή	%	Αποφυγή διάθεσης σε ΧΥΤΑ	Περιβαλλοντική επίδοση
Ενσωματωμένος άνθρακας	kg CO ₂ eq/m ²	Περιβαλλοντικό αποτύπωμα υλικών	Σύνδεση με ΑΚΖ και κλιματική πολιτική
Ποιότητα αξιοποίησης	Ποιοτικός δείκτης	Αξία των ανακτημένων υλικών	Διάκριση ποσοτικής και ποιοτικής κυκλικότητας

Πηγές: Fufa et al. (2021, 2023), JRC (2024), La Fuente Nuno et al. (2024), Green Construction Board (2021), European Commission - Level(s).

Σχήμα 2: Βασικά ψηφιακά εργαλεία υποστήριξης της κυκλικής οικονομίας στις κατασκευές



Πηγή: Ιδία επεξεργασία βάσει Oliveira et al. (2021), Ma et al. (2023) και UNEP (2024).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΙ ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΣΕ ΕΡΓΑ ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μετάβαση του κατασκευαστικού τομέα από ένα γραμμικό πρότυπο παραγωγής και κατανάλωσης σε ένα περισσότερο κυκλικό μοντέλο δεν αφορά μόνο τη διαμόρφωση νέων πολιτικών κατευθύνσεων, αλλά απαιτεί ουσιαστικές αλλαγές στον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζονται, οργανώνονται και υλοποιούνται τα έργα μεγάλης κλίμακας. Στο πλαίσιο αυτό, η έννοια των zero-waste εργοταξίων αποκτά ιδιαίτερη σημασία, καθώς συνδέεται με την πρόληψη παραγωγής αποβλήτων, την αποδοτικότερη χρήση πόρων, την επαναχρησιμοποίηση υλικών και την προώθηση υψηλής ποιότητας ανακύκλωσης.

Το παρόν κεφάλαιο εξετάζει βασικές μεθοδολογίες και πρακτικές που εφαρμόζονται σε έργα μεγάλης κλίμακας, με ιδιαίτερη έμφαση σε παραδείγματα από την Κεντρική και Βόρεια Ευρώπη, όπου παρατηρείται μεγαλύτερη θεσμική και τεχνική ωριμότητα ως προς την εφαρμογή κυκλικών πρακτικών στον κατασκευαστικό τομέα. Η ανάλυση εστιάζει όχι μόνο σε τεχνικές διαχείρισης αποβλήτων, αλλά και σε ευρύτερες στρατηγικές σχεδιασμού και οργάνωσης έργων, οι οποίες ενσωματώνουν τις αρχές της κυκλικής οικονομίας ήδη από τα πρώτα στάδια ανάπτυξης ενός έργου.

Αρχικά, παρουσιάζονται επιλεγμένες μελέτες περίπτωσης, μέσα από τις οποίες εξετάζεται ο τρόπος εφαρμογής πρακτικών εργοταξίων μηδενικών ή χαμηλών αποβλήτων. Στη συνέχεια, αναλύονται μεθοδολογίες σχεδιασμού που υποστηρίζουν τη

μείωση των αποβλήτων, με έμφαση στις ροές υλικών, στην εργοταξιακή οργάνωση, καθώς και σε συστήματα πρόληψης, διαλογής και επαναχρησιμοποίησης.

Παράλληλα, εξετάζεται ο ρόλος των ψηφιακών εργαλείων και τεχνολογιών, όπως το BIM, τα material passports και τα πρότυπα διαχείρισης πληροφορίας, τα οποία διευκολύνουν την παρακολούθηση, την τεκμηρίωση και τη βελτιστοποίηση των ροών υλικών. Στο ίδιο πλαίσιο, παρουσιάζονται συστήματα πιστοποίησης και αξιολόγησης, όπως το LEED (σύστημα περιβαλλοντικής πιστοποίησης κτιρίων), το BREEAM (σύστημα περιβαλλοντικής αξιολόγησης κτιρίων) και Level(s) (ευρωπαϊκό πλαίσιο δεικτών βιωσιμότητας), μέσω των οποίων οι γενικές αρχές της βιωσιμότητας και της κυκλικότητας μετατρέπονται σε πιο συγκεκριμένα και μετρήσιμα κριτήρια.

Η ανάλυση συμπληρώνεται με την παρουσίαση βασικών ποσοτικών δεικτών επίδοσης, όπως η εκτροπή από την ταφή, η ανακύκλωση και η επαναχρησιμοποίηση, οι οποίοι επιτρέπουν μια πιο συστηματική και συγκρίσιμη αποτίμηση των πρακτικών που εφαρμόζονται στα έργα.

Τέλος, εξετάζονται οι βασικές προκλήσεις και περιορισμοί που εξακολουθούν να δυσχεραίνουν την ευρεία εφαρμογή των zero-waste εργοταξίων. Όπως προκύπτει, η μετάβαση αυτή δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τεχνικές λύσεις, αλλά επηρεάζεται από ένα ευρύτερο σύνολο θεσμικών, οικονομικών και οργανωτικών παραγόντων, καθώς και από τη λειτουργία της αγοράς.

Το κεφάλαιο αυτό λειτουργεί ως γέφυρα μεταξύ του θεωρητικού πλαισίου της κυκλικής οικονομίας και της συγκριτικής ανάλυσης που ακολουθεί, αναδεικνύοντας ότι η εφαρμογή zero-waste πρακτικών εξαρτάται από τον συνδυασμό τεχνικών, θεσμικών και οργανωτικών παραγόντων.

3.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΜΕΛΕΤΩΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

Η εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας στον κατασκευαστικό τομέα παρουσιάζει σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των ευρωπαϊκών χωρών, τόσο ως προς το επίπεδο θεσμικής ωριμότητας όσο και ως προς την ανάπτυξη πρακτικών πρόληψης, διαλογής και αξιοποίησης υλικών. Παρότι η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει κοινούς στόχους για την ανάκτηση και αξιοποίηση των αποβλήτων κατασκευών και κατεδαφίσεων, η εφαρμογή των σχετικών πολιτικών παρουσιάζει σημαντικές διαφοροποιήσεις στην πράξη.

Για τον λόγο αυτό, η μελέτη πραγματικών εφαρμογών αποκτά ιδιαίτερη σημασία, καθώς επιτρέπει να αξιολογηθεί σε ποιο βαθμό οι αρχές των εργοταξίων μηδενικών αποβλήτων μπορούν να εφαρμοστούν σε πραγματικές συνθήκες έργου. Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται επιλεγμένες μελέτες περίπτωσης από την Κεντρική και Βόρεια Ευρώπη, δηλαδή από περιοχές που εμφανίζουν σχετικά υψηλό βαθμό ωριμότητας ως προς τη διαχείριση των ΑΚΚ και την ενσωμάτωση κυκλικών πρακτικών.

Η επιλογή των συγκεκριμένων περιπτώσεων βασίστηκε σε ορισμένα κριτήρια, ώστε να διασφαλιστούν η συγκρισιμότητα και η αντιπροσωπευτικότητα των αποτελεσμάτων. Ειδικότερα, εξετάστηκαν περιπτώσεις στις οποίες διαπιστώνεται:

- εφαρμογή πρακτικών πρόληψης αποβλήτων και όχι μόνο διαχείρισης μετά την παραγωγή τους,
- ενσωμάτωση διαδικασιών επιλεκτικής κατεδάφισης ή αποσυναρμολόγησης,
- χρήση συστημάτων διαλογής στην πηγή και ιχνηλασιμότητας υλικών,
- ύπαρξη τεκμηριωμένων δεδομένων σχετικά με τις ροές αποβλήτων και τα ποσοστά ανάκτησης,
- σύνδεση των παραγόμενων υλικών με δευτερογενείς αγορές ή πρακτικές επαναχρησιμοποίησης.

Τα κριτήρια αυτά ευθυγραμμίζονται με τις κατευθύνσεις της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για τη βιώσιμη διαχείριση των ΑΚΚ (European Commission, 2016).

Η πρώτη κατηγορία μελετών περίπτωσης αφορά εφαρμογές στην Ολλανδία, όπου έχει αναπτυχθεί ένα από τα πιο προηγμένα συστήματα διαχείρισης ΑΚΚ στην Ευρώπη. Παρά τα ιδιαίτερα υψηλά ποσοστά ανάκτησης που καταγράφονται, σημαντικό μέρος τους εξακολουθεί να αφορά εφαρμογές χαμηλής προστιθέμενης αξίας, όπως η χρήση ανακυκλωμένων αδρανών σε επιχώσεις και υποβάσεις. Τα τελευταία χρόνια, ωστόσο, παρατηρείται μετατόπιση προς λύσεις υψηλότερης ποιότητας, ιδίως στον τομέα του σκυροδέματος, με στόχο την επανένταξη των υλικών σε νέες δομικές εφαρμογές (Zhang et al., 2020). Η ολλανδική περίπτωση αναδεικνύει ότι τα υψηλά ποσοστά ανάκτησης δεν συνεπάγονται απαραίτητα και υψηλή κυκλικότητα, αλλά και από την ποιότητα των ανακυκλωμένων υλικών, καθώς και από την ύπαρξη ώριμων αγορών που μπορούν να τα απορροφήσουν.

Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει περιπτώσεις από τη Νορβηγία, όπου έχουν εφαρμοστεί πιλοτικά πρακτικές εργοταξίων χαμηλών ή μηδενικών αποβλήτων. Τα διαθέσιμα αποτελέσματα δείχνουν ότι, μέσω της συστηματικής διαλογής στην πηγή, της καλύτερης οργάνωσης των παραγγελιών υλικών και της εφαρμογής πρακτικών αποσυναρμολόγησης, είναι δυνατό να μειωθεί ουσιαστικά η παραγωγή αποβλήτων ανά μονάδα επιφάνειας. Σε ορισμένα έργα, τα ποσοστά διαλογής ξεπέρασαν το 80%, ενώ η συνολική ποσότητα αποβλήτων μειώθηκε αισθητά. Παρ' όλα αυτά, η πλήρης επίτευξη των μηδενικών αποβλήτων εξακολουθεί να αποτελεί δύσκολο στόχο, κυρίως λόγω περιορισμών στις δευτερογενείς αγορές υλικών και της πολυπλοκότητας των κατασκευαστικών διαδικασιών (Fufa et al., 2021).

Αντίστοιχα, εφαρμογές σε πόλεις της Βόρειας Ευρώπης, όπως το Tampere στη Φινλανδία και το Stavanger στη Νορβηγία, αναδεικνύουν τη σημασία της τοπικής κλίμακας και της συνεργασίας μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων για την προώθηση της κυκλικής κατασκευής. Τα έργα αυτά δίνουν έμφαση στην επαναχρησιμοποίηση δομικών στοιχείων, στη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και στη δημιουργία τοπικών αλυσίδων αξίας για τα δευτερογενή υλικά. Οι εφαρμογές αυτές υποστηρίζονται από

τοπικές υποδομές και συνεργατικά σχήματα διαχείρισης υλικών, τα οποία ενισχύουν τη δυνατότητα ανάπτυξης κυκλικών αλυσίδων αξίας. Οι περιπτώσεις αυτές εντάσσονται ευρύτερα στο πλαίσιο των σκανδιναβικών χωρών, όπου παρατηρείται υψηλός βαθμός ανάπτυξης κυκλικών πρακτικών, ισχυρό θεσμικό πλαίσιο και μεγαλύτερη ωριμότητα στη διαχείριση των ΑΚΚ (Nordic Council of Ministers, 2024).

Κοινό χαρακτηριστικό όλων των παραπάνω περιπτώσεων είναι η σταδιακή μετάβαση από μια συμβατική προσέγγιση διαχείρισης αποβλήτων προς πιο ολοκληρωμένα μοντέλα κυκλικής οικονομίας, στα οποία η πρόληψη, η επαναχρησιμοποίηση και η υψηλής ποιότητας ανακύκλωση αποκτούν κεντρικότερο ρόλο. Ωστόσο, η σύγκριση μεταξύ διαφορετικών χωρών και έργων δεν είναι απλή, καθώς επηρεάζεται από διαφοροποιήσεις στα κανονιστικά πλαίσια, στους ορισμούς των αποβλήτων και στις μεθοδολογίες καταγραφής, γεγονός που δυσκολεύει την εξαγωγή πλήρως συγκρίσιμων συμπερασμάτων (Eurostat, 2023).

Οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των παραπάνω περιπτώσεων δείχνουν ότι η αποτελεσματικότητα των εργοταξίων μηδενικών αποβλήτων δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τεχνικές λύσεις ή υψηλά ποσοστά ανάκτησης. Αντίθετα, επηρεάζεται από τον βαθμό ενσωμάτωσης κυκλικών πρακτικών στον σχεδιασμό, στην οργάνωση του εργοταξίου, στις διαδικασίες προμήθειας και στη λειτουργία της αγοράς δευτερογενών υλικών. Η κατανόηση αυτών των παραμέτρων αποτελεί τη βάση για την ανάλυση των μεθοδολογιών και πρακτικών που ακολουθεί στις επόμενες ενότητες.

Πίνακας 7: Συγκριτική παρουσίαση μελετών περίπτωσης zero-waste εργοταξίων στην Κεντρική και Βόρεια Ευρώπη.

Χώρα / πόλη	Μελέτη περίπτωσης / πλαίσιο	Κύρια Χαρακτηριστικά	Βασικές πρακτικές κυκλικότητας / zero-waste	Κύρια Ευρήματα
Ολλανδία	Εθνικό σύστημα διαχείρισης ΑΚΚ	Υψηλά ποσοστά ανάκτησης και ώριμη αγορά δευτερογενών υλικών	Ανακύκλωση σκυροδέματος, περιορισμός downcycling	Η υψηλή ανάκτηση δεν συνεπάγεται απαραίτητα υψηλή κυκλικότητα
Νορβηγία	Πιλοτικά εργοταξία	Μείωση παραγωγής αποβλήτων και υψηλή διαλογή στην πηγή	Διαλογή στην πηγή, αποσυναρμολόγηση, προκατασκευή	Υψηλές επιδόσεις διαλογής, αλλά δυσκολία πλήρους επίτευξης zero-waste

Tampere, Φινλανδία	Αστικά έργα και τοπικές πρωτοβουλίες	Έμφαση στην επαναχρησιμοποί ηση και στην τοπική αξιοποίηση υλικών	Επαναχρησιμοποί ηση δομικών στοιχείων, τοπικές αλυσίδες αξίας	Καθοριστικός ο ρόλος της συνεργασίας μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων
Stavanger, Νορβηγία	Δημοτικές εφαρμογές	Ανάπτυξη υποδομών και συνεργασιών	Ανάκτηση και επαναχρησιμοποί ηση υλικών	Κρίσιμος ο ρόλος των θεσμών και των υποδομών
Σκανδιναβικές χώρες	Περιφερειακό πλαίσιο κυκλικής κατασκευής	Διαφορετικά επίπεδα ωριμότητας μεταξύ των χωρών	Κυκλικός σχεδιασμός, δημόσιες συμβάσεις, επαναχρησιμοποί ηση	Η επιτυχία εξαρτάται από το θεσμικό πλαίσιο και την ωριμότητα της αγοράς

Πηγές: Nordic Council of Ministers (2024), La Fuente et al. (2024), JRC (2024).

3.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΕΡΓΟΤΑΞΙΩΝ ΧΑΜΗΛΩΝ Ή ΜΗΔΕΝΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

3.2^A ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΡΟΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΡΓΟΤΑΞΙΑΚΗΣ ΟΡΓΑΝΩΣΗΣ

Ο σχεδιασμός των ροών υλικών και η εργοταξιακή οργάνωση αποτελούν βασικούς άξονες των μεθοδολογιών για εργοτάξια χαμηλών ή μηδενικών αποβλήτων, καθώς μετατοπίζουν την έμφαση από τη διαχείριση των αποβλήτων μετά την παραγωγή τους στην πρόληψη δημιουργίας τους ήδη από τα πρώτα στάδια του έργου. Η προσέγγιση αυτή συνδέεται άμεσα με τη μείωση της κατανάλωσης πόρων, των εκπομπών και των απωλειών υλικών σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής των κατασκευών. Σύμφωνα με την UNEP, ο τομέας των κτιρίων και των κατασκευών αντιστοιχούσε το 2020 στο 36% της παγκόσμιας τελικής κατανάλωσης ενέργειας και στο 37% των ενεργειακά συνδεδεμένων εκπομπών CO₂, γεγονός που αναδεικνύει τη σημασία των επιλογών σχεδιασμού και κατασκευής για τη συνολική περιβαλλοντική επίδοση των έργων (UNEP, 2021).

Η εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας στον κατασκευαστικό τομέα προϋποθέτει τον ανασχεδιασμό των ροών υλικών, ώστε τα προϊόντα και τα δομικά στοιχεία να παραμένουν σε χρήση για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα μέσω πρακτικών πρόληψης, προσαρμοστικότητας, αποσυναρμολόγησης και επαναχρησιμοποίησης (Benachio et al., 2020). Στο πλαίσιο αυτό, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή επισημαίνει ότι τα απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων αντιστοιχούν σε περισσότερο από το ένα τρίτο των συνολικών αποβλήτων που παράγονται στην Ευρωπαϊκή Ένωση, ενώ οι επιδόσεις ανακύκλωσης και ανάκτησης εξακολουθούν να διαφοροποιούνται σημαντικά μεταξύ των κρατών-μελών (European Commission, 2018). Το στοιχείο αυτό δείχνει ότι οι υψηλές επιδόσεις δεν αποτελούν αυτονόητο αποτέλεσμα της

νομοθεσίας, αλλά συνδέονται με τον βαθμό ενσωμάτωσης της πρόληψης αποβλήτων τόσο στον σχεδιασμό όσο και στην εκτέλεση των έργων.

Από αυτή τη σκοπιά, ο σχεδιασμός των ροών υλικών σε ένα εργοτάξιο χαμηλών ή μηδενικών αποβλήτων ξεκινά πριν από την έναρξη των κατασκευαστικών εργασιών. Ο Οδικός Χάρτης για Μηδενικά Αποφεύξιμα Απόβλητα στις Κατασκευές, θέτει ως βασική αρχή ότι τα απόβλητα πρέπει να προλαμβάνονται σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής του έργου, από τον σχεδιασμό και την προμήθεια έως τη χρήση και την τελική αποδόμηση των κατασκευών. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην προσέγγιση design out waste, δηλαδή στη βελτιστοποίηση της χρήσης υλικών ήδη από το στάδιο της μελέτης, μέσω του περιορισμού των απωλειών, της συνεργασίας με τους προμηθευτές και της επιλογής λύσεων που διευκολύνουν την επαναχρησιμοποίηση και την ανάκτηση υλικών. Ταυτόχρονα, το ίδιο πλαίσιο συνδέει τη μείωση αποβλήτων με τον σχεδιασμό για αποσυναρμολόγηση, την προσαρμοστικότητα των κατασκευών και την προτεραιότητα της ανακαίνισης έναντι της κατεδάφισης. Η αποτελεσματικότητα των στρατηγικών πρόληψης εξαρτάται τελικά από τον τρόπο με τον οποίο οι αρχές αυτές μεταφράζονται σε λειτουργικές πρακτικές στο επίπεδο του εργοταξίου, μέσω του συντονισμού των ροών υλικών, των προμηθειών και της εργοταξιακής οργάνωσης.

Η εμπειρία από τη Νορβηγία επιβεβαιώνει ότι οι δείκτες αποβλήτων βελτιώνονται ουσιαστικά μόνο όταν ο σχεδιασμός των ροών υλικών συνοδεύεται από έγκαιρο προγραμματισμό και αποτελεσματικό συντονισμό της αλυσίδας αξίας. Σύμφωνα με τη μελέτη των (Fufa et al., 2021), τα περισσότερα εργοτάξια παράγουν 40-60 kg/m² αποβλήτων, ενώ τα πιο φιλόδοξα έργα θέτουν στόχους κάτω από 25 kg/m². Σε νεότερη μελέτη, η οποία βασίστηκε σε 36 έργα, καταγράφηκε μέση παραγωγή περίπου 51 kg/m², υψηλό ποσοστό διαλογής (89%), αλλά αισθητά χαμηλότερο ποσοστό ανακύκλωσης (32%) (Fufa et al., 2023). Το εύρημα αυτό αναδεικνύει ότι τα υψηλά ποσοστά διαλογής δεν συνεπάγονται απαραίτητα και υψηλό επίπεδο κυκλικότητας ή ανακύκλωσης υψηλής αξίας. Συνεπώς, η αποτελεσματική διαχείριση δεν εξαρτάται μόνο από τον διαχωρισμό των αποβλήτων, αλλά κυρίως από τη μείωση της ποσότητας που παράγεται εξ αρχής. Επιπλέον, η καταγραφή βασικών ρευμάτων αποβλήτων, όπως ο γύψος, το ξύλο και τα μικτά απόβλητα, αναδεικνύει συγκεκριμένα σημεία παρέμβασης στον σχεδιασμό προμηθειών και στην προστασία των υλικών στο εργοτάξιο.

Επιπλέον, η μάζα των αποβλήτων δεν αποτελεί από μόνη της επαρκή δείκτη περιβαλλοντικής επίδοσης. Η ανάλυση των νορβηγικών έργων έδειξε θετική συσχέτιση μεταξύ παραγόμενων αποβλήτων και εκπομπών, αλλά και σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ έργων. Το στοιχείο αυτό υποδηλώνει ότι ο σχεδιασμός των ροών υλικών πρέπει να λαμβάνει υπόψη όχι μόνο την ποσότητα, αλλά και το είδος των υλικών, τις μεταφορές και τις διαδικασίες επεξεργασίας. Η προσέγγιση αυτή ευθυγραμμίζεται με την κατεύθυνση της UNEP, σύμφωνα με την οποία οι εκπομπές που σχετίζονται με τα υλικά και τις κατασκευαστικές διαδικασίες πρέπει να αξιολογούνται σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής, με ιδιαίτερη έμφαση στις αρχικές (upfront) επιπτώσεις και στη χρήση υλικών χαμηλού ανθρακικού αποτυπώματος.

Σε επιχειρησιακό επίπεδο, η εργοταξιακή οργάνωση αποτελεί τον βασικό μηχανισμό εφαρμογής του σχεδιασμού των ροών υλικών. Όπως δείχνει η μελέτη των (Bortolini et al., 2015), ο σχεδιασμός logistics δεν περιορίζεται μόνο στη χωροθέτηση του εργοταξίου, αλλά περιλαμβάνει τον καθορισμό χώρων αποθήκευσης, οδούσεων, διαδικασιών εκφόρτωσης και ελέγχου αποθεμάτων. Η ανεπαρκής οργάνωση μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένες μετακινήσεις, καθυστερήσεις και μη προστιθέμενες δραστηριότητες. Αντίθετα, η αξιοποίηση εργαλείων, όπως το 4D BIM, σε συνδυασμό με πρακτικές οπτικής διαχείρισης, μπορεί να συμβάλει σημαντικά στη βελτίωση της παραγωγικότητας και στη μείωση των αποθεμάτων.

Με βάση τα παραπάνω, μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για εργοτάξια χαμηλών ή μηδενικών αποβλήτων μπορεί να οργανωθεί σε πέντε βασικούς άξονες:

- έγκαιρος καθορισμός στόχων πρόληψης αποβλήτων και ενσωμάτωσή τους στα συμβατικά τεύχη,
- βελτιστοποίηση της χρήσης υλικών μέσω τυποποίησης και προκατασκευής,
- βελτιστοποίηση των προμηθειών μέσω πρακτικών just-in-time delivery,
- διαμόρφωση εργοταξιακής διάταξης που υποστηρίζει σαφείς και αποδοτικές ροές υλικών,
- αξιοποίηση ψηφιακών εργαλείων, όπως το BIM, για συνεχή παρακολούθηση και βελτίωση των διαδικασιών.

Συνοψίζοντας, ο σχεδιασμός των ροών υλικών και η εργοταξιακή οργάνωση αποτελούν βασικές προϋποθέσεις για τη μετάβαση σε εργοτάξια χαμηλών ή μηδενικών αποβλήτων. Η αποτελεσματικότητά τους εξαρτάται από την έγκαιρη ενσωμάτωση της πρόληψης στον σχεδιασμό, από τον συντονισμό της αλυσίδας αξίας και από τη χρήση αξιόπιστων δεδομένων και ψηφιακών εργαλείων. Επομένως, το zero-waste εργοτάξιο δεν προκύπτει μόνο από καλύτερη διαχείριση αποβλήτων, αλλά από συνολικό ανασχεδιασμό του τρόπου με τον οποίο οργανώνονται, συντονίζονται και διαχειρίζονται οι κατασκευαστικές διαδικασίες.

3.2B ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΟΛΗΨΗΣ, ΔΙΑΛΟΓΗΣ ΚΑΙ ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ ΥΛΙΚΩΝ

Στα εργοτάξια χαμηλών ή μηδενικών αποβλήτων, οι στρατηγικές διαχείρισης υλικών οργανώνονται με βάση την ιεράρχηση αποβλήτων, δίνοντας προτεραιότητα στην πρόληψη παραγωγής αποβλήτων, στην επαναχρησιμοποίηση και, σε επόμενο στάδιο, στην ανακύκλωση. Η λογική αυτή στοχεύει στη διατήρηση της αξίας των υλικών για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και αποτελεί βασική αρχή της κυκλικής οικονομίας στον κατασκευαστικό τομέα (Fufa et al., 2023; RVO, 2024).

Πρόληψη παραγωγής αποβλήτων

Η πρόληψη θεωρείται το πιο αποτελεσματικό στάδιο διαχείρισης, καθώς επηρεάζει άμεσα τόσο τη συνολική ποσότητα παραγόμενων αποβλήτων όσο και την κατανάλωση πόρων. Σε λειτουργικό επίπεδο, συνδέεται με την ακριβέστερη προμέτρηση υλικών, την αποφυγή υπερπαραγγελιών και τη βελτιστοποίηση των προμηθειών. Η χρήση

προκατασκευασμένων στοιχείων μπορεί επίσης να περιορίσει σημαντικά τις απώλειες στο εργοτάξιο, καθώς μειώνει τις επιτόπιες επεμβάσεις και τις αστοχίες κατά την κατασκευή. Παράλληλα, η αξιοποίηση ψηφιακών εργαλείων, όπως τα material passports και τα ψηφιακά logbooks, ενισχύει την ιχνηλασιμότητα των υλικών και διευκολύνει τη μελλοντική αξιοποίησή τους (RVO, 2024).

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα, η εφαρμογή στρατηγικών πρόληψης εξακολουθεί να παραμένει περιορισμένη σε μεγάλο μέρος του κατασκευαστικού κλάδου. Οι βασικότεροι περιορισμοί σχετίζονται με την έλλειψη τυποποιημένων διαδικασιών, τη μειωμένη διαθεσιμότητα αξιόπιστων δεδομένων και τη δυσκολία ενσωμάτωσης κυκλικών πρακτικών στις συμβατικές διαδικασίες προμηθειών και εργοταξιακής διαχείρισης.

Στην πράξη, η αποτελεσματικότητα των στρατηγικών πρόληψης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον συντονισμό μεταξύ σχεδιασμού, προμηθειών και εργοταξιακής διαχείρισης.

Διαλογή αποβλήτων στην πηγή

Η διαλογή αποβλήτων στην πηγή αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη διατήρηση της ποιότητας των παραγόμενων ρευμάτων και για τη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης ή υψηλής ποιότητας ανακύκλωσης. Η ανάμιξη διαφορετικών κλασμάτων μειώνει σημαντικά τη δυνατότητα αξιοποίησης των υλικών και οδηγεί συχνά σε εφαρμογές χαμηλής προστιθέμενης αξίας.

Στο πλαίσιο αυτό, το Ευρωπαϊκό Πρωτόκολλο Διαχείρισης AKK - EU Construction and Demolition Waste Protocol προτείνει την εφαρμογή προ-κατεδαφιστικών ελέγχων και την οργάνωση επιλεκτικής κατεδάφισης, με στόχο τον καλύτερο διαχωρισμό των υλικών και τη μείωση των μεικτών ρευμάτων αποβλήτων (European Commission, 2016). Παράλληλα, αναλύσεις του Joint Research Centre δείχνουν ότι η ποιότητα της διαλογής επηρεάζει άμεσα τις δυνατότητες επαναχρησιμοποίησης, καθώς η ανεπαρκής διαχείριση οδηγεί σε υποβάθμιση των υλικών και περιορισμό της αξίας τους (Eurostat, 2023).

Παρά τη σημασία της για τη διατήρηση της ποιότητας των υλικών, η διαλογή αφορά κυρίως τη διαχείριση των ήδη παραγόμενων ροών αποβλήτων. Συνεπώς, η αποτελεσματικότητά της εξαρτάται από τον συνδυασμό της με στρατηγικές πρόληψης και κυκλικού σχεδιασμού, ώστε να περιορίζεται εξ αρχής η ποσότητα των αποβλήτων που παράγονται στο εργοτάξιο.

Επαναχρησιμοποίηση δομικών προϊόντων

Η επαναχρησιμοποίηση αποτελεί έναν από τους πιο αποδοτικούς μηχανισμούς της κυκλικής οικονομίας, καθώς επιτρέπει τη διατήρηση της αξίας των υλικών και περιορίζει την ανάγκη παραγωγής νέων προϊόντων. Με τον τρόπο αυτό μειώνονται τόσο οι ενσωματωμένες εκπομπές άνθρακα όσο και η κατανάλωση φυσικών πόρων.

Παρά το σημαντικό της δυναμικό, η εφαρμογή της παραμένει περιορισμένη σε ευρωπαϊκό επίπεδο. Μεταξύ των βασικών εμποδίων περιλαμβάνονται η έλλειψη τεκμηρίωσης και πιστοποίησης των υλικών, το αυξημένο κόστος αποσυναρμολόγησης, οι κανονιστικοί περιορισμοί και η περιορισμένη ανάπτυξη οργανωμένων αγορών επαναχρησιμοποίησης (Nordic Council of Ministers, 2023).

Το γεγονός αυτό δείχνει ότι η ανάπτυξη πρακτικών επαναχρησιμοποίησης δεν εξαρτάται μόνο από την τεχνική δυνατότητα ανάκτησης υλικών, αλλά και από την ύπαρξη αξιόπιστων μηχανισμών πιστοποίησης, κατάλληλων κανονιστικών πλαισίων και οργανωμένων δευτερογενών αγορών. Στο πλαίσιο αυτό, η αξιοποίηση υποστηρικτικών μηχανισμών, όπως οι ψηφιακές πλατφόρμες ανταλλαγής υλικών και οι «τράπεζες υλικών» (material banks), μπορεί να ενισχύσει σημαντικά τη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης και τη σταθερότητα των δευτερογενών ροών υλικών (RVO, 2024).

Συστήματα υποστήριξης και ολοκληρωμένη προσέγγιση

Τα συστήματα πρόληψης, διαλογής και επαναχρησιμοποίησης λειτουργούν ως αλληλοσυνδεόμενα μέρη ενός ευρύτερου συστήματος διαχείρισης ροών υλικών. Η αποτελεσματικότητα κάθε σταδίου επηρεάζει άμεσα τα επόμενα, γεγονός που καθιστά απαραίτητη μια ολοκληρωμένη προσέγγιση σε επίπεδο σχεδιασμού και λειτουργίας του έργου.

Η ενσωμάτωση ψηφιακών εργαλείων, όπως το Building Information Modelling (BIM), μπορεί να ενισχύσει σημαντικά την αποτελεσματικότητα αυτής της προσέγγισης, καθώς επιτρέπει ακριβέστερη εκτίμηση ποσοτήτων, καλύτερο προγραμματισμό και βελτιστοποίηση των ροών υλικών ήδη από τη φάση του σχεδιασμού (RVO, 2024). Παράλληλα, η συνεργασία μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων, η ανάπτυξη κυκλικών προμηθειών και η δημιουργία αγορών δευτερογενών υλικών αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για την επιτυχή εφαρμογή των συστημάτων αυτών.

Παρά τη σημαντική πρόοδο σε επίπεδο πολιτικών και τεχνολογιών, η εφαρμογή των πρακτικών αυτών παραμένει άνιση μεταξύ των ευρωπαϊκών χωρών. Οι σχετικές μελέτες επισημαίνουν την ανάγκη για ισχυρότερα θεσμικά πλαίσια, κοινά πρότυπα και καλύτερη διαθεσιμότητα αξιόπιστων δεδομένων, ώστε να ενισχυθεί η εφαρμογή κυκλικών πρακτικών στον κατασκευαστικό τομέα (Eurostat, 2023).

Τα συστήματα πρόληψης, διαλογής και επαναχρησιμοποίησης αποτελούν βασικά εργαλεία για την ανάπτυξη εργοταξίων χαμηλών ή μηδενικών αποβλήτων. Η αποτελεσματικότητά τους εξαρτάται όχι μόνο από την εφαρμογή επιμέρους τεχνικών πρακτικών, αλλά και από τον βαθμό ενσωμάτωσής τους στον σχεδιασμό, στις προμήθειες, στην εργοταξιακή οργάνωση και στη λειτουργία της αγοράς δευτερογενών υλικών.

Πίνακας 8: Βασικές πρακτικές διαχείρισης αποβλήτων σε εργοτάξια μηδενικών αποβλήτων

Πρακτική	Περιγραφή	Αναμενόμενα οφέλη
Πρόληψη παραγωγής αποβλήτων	Ορθολογικός σχεδιασμός, ακριβής προμέτρηση και βελτιστοποίηση προμηθειών	Μείωση κατανάλωσης πόρων και συνολικής ποσότητας αποβλήτων
Διαλογή στην πηγή	Διαχωρισμός των αποβλήτων στον χώρο παραγωγής	Βελτίωση ποιότητας ανακύκλωσης
Προ-κατεδαφιστικοί έλεγχοι	Αναγνώριση και καταγραφή υλικών πριν από την κατεδάφιση	Αύξηση δυνατοτήτων επαναχρησιμοποίησης
Επιλεκτική κατεδάφιση	Σταδιακή αποσυναρμολόγηση κατασκευών	Ανάκτηση υλικών υψηλότερης αξίας
Σχεδιασμός για αποσυναρμολόγηση	Πρόβλεψη μελλοντικής αποσυναρμολόγησης από το στάδιο του σχεδιασμού	Διατήρηση της αξίας των υλικών
Διαβατήρια υλικών	Ψηφιακή τεκμηρίωση χαρακτηριστικών και προέλευσης υλικών	Ενίσχυση της κυκλικότητας

Πηγές: Colmenero et al. (2023), La Fuente et al. (2024), JRC (2024).

3.3 ΨΗΦΙΑΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ (BIM, MATERIAL PASSPORTS ΚΤΛ)

Η ανάπτυξη ψηφιακών εργαλείων τα τελευταία χρόνια έχει επηρεάσει σημαντικά τον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζονται, οργανώνονται και παρακολουθούνται τα κατασκευαστικά έργα. Στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας και των εργοταξίων χαμηλών ή μηδενικών αποβλήτων, τα εργαλεία αυτά επιτρέπουν ακριβέστερο σχεδιασμό, καλύτερη παρακολούθηση των ροών υλικών και πιο τεκμηριωμένη λήψη αποφάσεων σε όλο τον κύκλο ζωής των έργων. Στη σχετική βιβλιογραφία, ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στο (BIM), στα Material Passports και στα συστήματα διαχείρισης πληροφορίας σύμφωνα με το πρότυπο ISO 19650. Παράλληλα, αυξανόμενο ενδιαφέρον παρουσιάζουν και τεχνολογίες όπως η τεχνητή νοημοσύνη, η μηχανική μάθηση και το Διαδίκτυο των Πραγμάτων - Internet of Things (IoT) (Lyiola et al., 2024).

Το BIM αποτελεί σήμερα ένα από τα σημαντικότερα ψηφιακά εργαλεία στον κατασκευαστικό τομέα, καθώς επιτρέπει τη δομημένη οργάνωση και ανταλλαγή πληροφοριών που σχετίζονται με τα υλικά, τις ποσότητες και τις φάσεις υλοποίησης ενός έργου. Μέσω της ενσωμάτωσης αυτών των δεδομένων, καθίσταται δυνατός ο ακριβέστερος προγραμματισμός και η εκτίμηση της παραγωγής αποβλήτων ήδη από το στάδιο του σχεδιασμού, συμβάλλοντας στη μείωση σφαλμάτων και στη βελτίωση των κατασκευαστικών επιλογών (Akinade et al., 2015). Στο πλαίσιο των εργοταξίων χαμηλών αποβλήτων, το BIM χρησιμοποιείται όχι μόνο για τον προγραμματισμό των εργασιών, αλλά και για την πρόβλεψη των ροών υλικών και των πιθανών απωλειών, μετατοπίζοντας την έμφαση περισσότερο στην πρόληψη παρά στη διαχείριση των αποβλήτων μετά την παραγωγή τους.

Η σημασία του BIM ενισχύεται ακόμη περισσότερο όταν συνδυάζεται με τον σχεδιασμό για αποδόμηση ή αποσυναρμολόγηση (Design for Deconstruction / Disassembly). Στην κατεύθυνση αυτή, η ανάπτυξη του δείκτη αξιολόγησης αποδομησιμότητας βάσει (BIM-DAS), δείχνει ότι η δυνατότητα αποσυναρμολόγησης ενός κτιρίου μπορεί να αξιολογηθεί ήδη από τη φάση του σχεδιασμού με ποσοτικούς όρους. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη σύγκριση διαφορετικών σχεδιαστικών επιλογών με βάση τη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης και ανάκτησης υλικών (Ajayi et al., 2015). Παράγοντες όπως η χρήση προκατασκευασμένων στοιχείων και οι αποσυναρμολογούμενες συνδέσεις φαίνεται να επηρεάζουν σημαντικά τη δυνατότητα μελλοντικής αξιοποίησης των δομικών στοιχείων.

Από την άλλη πλευρά, ιδιαίτερη σημασία αποκτούν τα material passports, δηλαδή οι ψηφιακές «ταυτότητες» των δομικών υλικών. Τα συστήματα αυτά περιλαμβάνουν πληροφορίες σχετικά με τη σύσταση, τις ιδιότητες, την κατάσταση και τις δυνατότητες επαναχρησιμοποίησης των υλικών, υποστηρίζοντας τη διατήρηση της αξίας τους σε επόμενους κύκλους χρήσης (Çetin, 2023). Η έννοια αυτή αναπτύχθηκε μέσα από ευρωπαϊκές πρωτοβουλίες, όπως το έργο Buildings As Material Banks (BAMB), το οποίο αντιμετωπίζει τα κτίρια ως μελλοντικά αποθέματα υλικών και αναδεικνύει τον ρόλο της ψηφιακής τεκμηρίωσης στην εφαρμογή της κυκλικής οικονομίας (BAMB, 2019).

Ωστόσο, η εφαρμογή των material passports συνοδεύεται και από σημαντικές προκλήσεις. Στην πράξη, η έλλειψη αξιόπιστων δεδομένων σχετικά με τη σύνθεση των υλικών, την παρουσία επικίνδυνων ουσιών ή την πραγματική κατάσταση των δομικών στοιχείων περιορίζει σημαντικά τις δυνατότητες επαναχρησιμοποίησης και υψηλής ποιότητας ανακύκλωσης (Çetin, 2023). Το γεγονός αυτό δείχνει ότι η αποτελεσματικότητα των ψηφιακών εργαλείων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα, την πληρότητα και τη συστηματική διαχείριση των διαθέσιμων δεδομένων.

Ιδιαίτερη σημασία έχει επίσης το πρότυπο ISO 19650, το οποίο οργανώνει τη διαχείριση πληροφορίας σε όλο τον κύκλο ζωής του έργου. Βασικό στοιχείο του αποτελεί το Κοινό Περιβάλλον Δεδομένων (ΚΠΔ) - Common Data Environment (CDE), μέσω του οποίου διευκολύνεται η πρόσβαση σε κοινά και ενημερωμένα δεδομένα από όλα τα εμπλεκόμενα μέρη. Η τυποποίηση αυτή συμβάλλει στη μείωση πληροφοριακών ασυνεπειών και στη βελτίωση του συντονισμού μεταξύ σχεδιασμού, κατασκευής και λειτουργίας.

Πέρα από τα βασικά αυτά εργαλεία, η βιβλιογραφία αναδεικνύει και τον ρόλο νεότερων ψηφιακών τεχνολογιών. Η τεχνητή νοημοσύνη και η μηχανική μάθηση αξιοποιούνται για την πρόβλεψη της παραγωγής αποβλήτων και την υποστήριξη αποφάσεων σχετικών με τις ροές υλικών, ενώ το Internet of Things επιτρέπει την παρακολούθηση υλικών και εξοπλισμού σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, τεχνολογίες όπως η υπολογιστική όραση και οι μέθοδοι σάρωσης, όπως LiDAR και scan-to-BIM, διευκολύνουν τη συλλογή δεδομένων από υφιστάμενα κτίρια και υποστηρίζουν τη

δημιουργία πιο αξιόπιστων βάσεων δεδομένων για την επαναχρησιμοποίηση υλικών (Lyiola et al., 2024).

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα, η εφαρμογή των ψηφιακών αυτών εργαλείων εξακολουθεί να αντιμετωπίζει αρκετές δυσκολίες. Το υψηλό κόστος εφαρμογής, η ανάγκη εξειδικευμένων γνώσεων, η περιορισμένη διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών συστημάτων και η συχνά ανεπαρκής ποιότητα των δεδομένων αποτελούν βασικά εμπόδια για την ευρύτερη αξιοποίησή τους (Lyiola et al., 2024). Επιπλέον, η έλλειψη κοινών προτύπων και τυποποιημένων διαδικασιών δυσχεραίνει τη συστηματική εφαρμογή τους σε διαφορετικά έργα και εθνικά πλαίσια.

Τα ψηφιακά εργαλεία αποτελούν βασικό στοιχείο της μετάβασης προς πιο κυκλικά πρότυπα κατασκευής. Το BIM υποστηρίζει τον έγκαιρο και τεκμηριωμένο σχεδιασμό, τα material passports ενισχύουν την ιχνηλασιμότητα και τη διατήρηση της αξίας των υλικών, ενώ πρότυπα όπως το ISO 19650 οργανώνουν τη διαχείριση των πληροφοριών σε όλο τον κύκλο ζωής των έργων. Η συνδυασμένη αξιοποίησή τους μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στην ανάπτυξη εργοταξίων χαμηλών ή μηδενικών αποβλήτων.

Πίνακας 9: Ψηφιακά εργαλεία και τεχνολογίες που υποστηρίζουν την κυκλική διαχείριση των ΑΚΚ

Εργαλείο / Τεχνολογία	Κύρια λειτουργία	Συμβολή στα zero-waste εργοτάξια
Μοντελοποίηση Πληροφοριών Κτιρίου (BIM)	Ψηφιακή μοντελοποίηση και διαχείριση πληροφοριών έργου	Ακριβέστερη εκτίμηση ποσοτήτων, μείωση σφαλμάτων και βελτιστοποίηση των ροών υλικών
Ψηφιακά Διαβατήρια υλικών (Material Passports)	Ψηφιακή τεκμηρίωση χαρακτηριστικών και ιστορικού των υλικών	Ενίσχυση της επαναχρησιμοποίησης και της ιχνηλασιμότητας
Πρότυπο ISO 19650 και Κοινό Περιβάλλον Δεδομένων (Common Data Environment – CDE)	Τυποποιημένη διαχείριση και ανταλλαγή πληροφοριών	Βελτίωση του συντονισμού και της διαφάνειας των δεδομένων
Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ)	Εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων υλικών και προϊόντων	Υποστήριξη επιλογής υλικών χαμηλότερου περιβαλλοντικού αποτυπώματος
Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things – IoT)	Παρακολούθηση υλικών και εξοπλισμού σε πραγματικό χρόνο	Βελτίωση της διαχείρισης πόρων και των αποθεμάτων

Τεχνητή νοημοσύνη και μηχανική μάθηση	Πρόβλεψη παραγωγής αποβλήτων και υποστήριξη λήψης αποφάσεων	Βελτιστοποίηση των ροών υλικών και περιορισμός των απωλειών
Τεχνολογίες σάρωσης και Scan-to-BIM	Ψηφιακή αποτύπωση υφιστάμενων κτιρίων και δομικών στοιχείων	Υποστήριξη της αποσυναρμολόγησης και της επαναχρησιμοποίησης υλικών

Πηγές: ISO (2018), Akinade et al. (2015), Ajayi et al. (2015), Çetin (2023), Iyiola et al. (2024), JRC (2024).

3.4 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ (Π.Χ. LEED, BREEAM)

Τα συστήματα πιστοποίησης και περιβαλλοντικής αξιολόγησης κτιρίων αποτελούν πλέον βασικό εργαλείο προώθησης της βιώσιμης και κυκλικής κατασκευής. Μέσω οργανωμένων κριτηρίων και δεικτών, υποστηρίζουν την αξιολόγηση της περιβαλλοντικής επίδοσης των έργων και επηρεάζουν σημαντικά τις επιλογές σχεδιασμού, κατασκευής και διαχείρισης πόρων σε όλο τον κύκλο ζωής των κτιρίων. Με τον τρόπο αυτό, οι γενικές αρχές της βιωσιμότητας μετατρέπονται σε πιο συγκεκριμένες και μετρήσιμες απαιτήσεις, οι οποίες μπορούν να εφαρμοστούν στην πράξη τόσο σε επίπεδο μελέτης όσο και σε επίπεδο εργοταξίου.

Μεταξύ των πιο διαδεδομένων διεθνώς συστημάτων περιλαμβάνονται το LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) και το BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method), τα οποία αποτελούν συστήματα περιβαλλοντικής αξιολόγησης και πιστοποίησης κτιρίων. Και τα δύο βασίζονται σε συστήματα αξιολόγησης μέσω απονομής πιστωτικών μονάδων (credits), ανάλογα με την επίδοση του έργου σε επιμέρους κατηγορίες βιωσιμότητας. Η ευρεία εφαρμογή τους σε διαφορετικά γεωγραφικά και κανονιστικά περιβάλλοντα δείχνει ότι επηρεάζουν ουσιαστικά τις αποφάσεις σχεδιασμού ήδη από τα αρχικά στάδια ανάπτυξης ενός έργου.

Το σύστημα πιστοποίησης LEED v4.1 (Leadership in Energy and Environmental Design), το οποίο έχει αναπτυχθεί από το U.S. Green Building Council (USGBC), έναν μη κερδοσκοπικό οργανισμό των Ηνωμένων Πολιτειών που δραστηριοποιείται στην προώθηση της βιώσιμης δόμησης και συνεργάζεται με εθνικούς φορείς, όπως το Συμβούλιο Αειφόρων Κτιρίων Ελλάδας (SBC Greece), οργανώνεται σε επιμέρους θεματικές κατηγορίες αξιολόγησης. Ιδιαίτερη σημασία για τη διαχείριση αποβλήτων και πόρων έχει η ενότητα Materials and Resources, η οποία περιλαμβάνει κριτήρια σχετικά με τη διαχείριση αποβλήτων κατασκευής και κατεδάφισης, τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων μέσω αξιολόγησης κύκλου ζωής, καθώς και την ενίσχυση της διαφάνειας σχετικά με τα δομικά προϊόντα μέσω περιβαλλοντικών δηλώσεων προϊόντων (EPDs) και στοιχείων προέλευσης υλικών. Τα κριτήρια αυτά συνδέονται άμεσα με τη μείωση παραγωγής αποβλήτων, τη βελτιστοποίηση της χρήσης υλικών και τη μεγαλύτερη διαφάνεια σχετικά με τα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά των δομικών προϊόντων (U.S. Green Building Council, 2021).

Αντίστοιχα, το BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method), το οποίο αναπτύχθηκε από το Building Research Establishment (BRE), ένα μη κερδοσκοπικό διεθνές ερευνητικό και εκπαιδευτικό κέντρο για τα κτίρια και το δομημένο περιβάλλον, το οποίο ιδρύθηκε το 1921 στο Ηνωμένο Βασίλειο, αποτελεί ένα από τα παλαιότερα και πλέον διαδεδομένα συστήματα περιβαλλοντικής αξιολόγησης κτιρίων. Σε σύγκριση με άλλα συστήματα, υιοθετεί μια περισσότερο ολιστική προσέγγιση στη βιωσιμότητα, καθώς εξετάζει ζητήματα που σχετίζονται με τη διαχείριση, την ενέργεια, τα υλικά, τα απόβλητα και τη χρήση πόρων. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη διαχείριση αποβλήτων σε επίπεδο εργοταξίου, μέσω πρακτικών όπως η εκπόνηση σχεδίων διαχείρισης αποβλήτων, η διαλογή στην πηγή, η ορθή αποθήκευση υλικών και η ενίσχυση της επαναχρησιμοποίησης και της ανακύκλωσης. Αντίστοιχα, το BREEAM συνοδεύεται από αναλυτικές κατευθυντήριες οδηγίες και τεχνικές διευκρινίσεις, γεγονός που διευκολύνει τη συστηματικότερη εφαρμογή των σχετικών απαιτήσεων στον κατασκευαστικό τομέα (BRE, 2023).

Πέρα από τα συστήματα πιστοποίησης, σε ευρωπαϊκό επίπεδο έχει αναπτυχθεί και το πλαίσιο Level(s) από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Το Level(s) δεν αποτελεί σύστημα πιστοποίησης με τη στενή έννοια, αλλά λειτουργεί ως κοινό ευρωπαϊκό πλαίσιο δεικτών για την αξιολόγηση της περιβαλλοντικής επίδοσης των κτιρίων με βάση προσέγγιση κύκλου ζωής. Περιλαμβάνει δείκτες που σχετίζονται με τη χρήση πόρων, την παραγωγή αποβλήτων, τις εκπομπές, την κατανάλωση νερού, την υγεία και άνεση των χρηστών, καθώς και το κόστος κύκλου ζωής. Η βασική του συμβολή βρίσκεται στη δημιουργία μιας κοινής ευρωπαϊκής βάσης δεικτών και μεθοδολογιών αξιολόγησης, με στόχο τη βελτίωση της συγκρισιμότητας μεταξύ διαφορετικών έργων και εθνικών πλαισίων (European Commission, 2020).

Αξίζει να σημειωθεί ότι το LEED και το BREEAM, παρά τις σημαντικές ομοιοτητές τους, διαφοροποιούνται ως προς τη φιλοσοφία και τον τρόπο εφαρμογής τους. Το LEED βασίζεται περισσότερο σε ένα σύστημα πιστωτικών μονάδων, με έμφαση στην τεκμηρίωση επιδόσεων και στη σύγκριση εναλλακτικών λύσεων. Αντίθετα, το BREEAM δίνει μεγαλύτερη βαρύτητα στη διαχείριση του έργου και στην εφαρμογή βέλτιστων πρακτικών, υιοθετώντας μια περισσότερο διαδικαστική προσέγγιση. Παρ' όλα αυτά, και τα δύο συστήματα συμβάλλουν ουσιαστικά στη μείωση των αποβλήτων και στη βελτίωση της διαχείρισης πόρων, συνδέοντας τα κριτήρια αξιολόγησης με πρακτικές που σχετίζονται άμεσα με τα εργοτάξια χαμηλών ή μηδενικών αποβλήτων.

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματά τους, η εφαρμογή των συστημάτων αυτών συνοδεύεται και από δυσκολίες, όπως η ανάγκη εκτεταμένης τεκμηρίωσης, η διαθεσιμότητα αξιόπιστων δεδομένων και η απαίτηση εξειδικευμένων γνώσεων. Σε ορισμένες περιπτώσεις, υπάρχει επίσης ο κίνδυνος η συμμόρφωση να περιορίζεται στην κάλυψη συγκεκριμένων κριτηρίων χωρίς ουσιαστική ενσωμάτωση των αρχών της κυκλικότητας στην πράξη. Για τον λόγο αυτό, η αποτελεσματικότητά τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το κατά πόσο ενσωματώνονται έγκαιρα στις διαδικασίες σχεδιασμού και από το επίπεδο συνεργασίας μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων.

Τα συστήματα πιστοποίησης και αξιολόγησης, όπως το LEED και το BREEAM, καθώς και πλαίσια όπως το Level(s), συμβάλλουν ουσιαστικά στη μετάβαση του κατασκευαστικού τομέα προς πιο βιώσιμα και κυκλικά πρότυπα. Η σημασία τους δεν περιορίζεται μόνο στην αξιολόγηση της περιβαλλοντικής επίδοσης των έργων, αλλά επεκτείνεται και στη διαμόρφωση νέων πρακτικών σχεδιασμού, διαχείρισης υλικών και εργοταξιακής οργάνωσης, οι οποίες συνδέονται άμεσα με την ανάπτυξη εργοταξίων χαμηλών ή μηδενικών αποβλήτων.

Πίνακας 10: Συγκριτική αξιολόγηση των συστημάτων LEED και BREEAM ως προς την υποστήριξη κυκλικών πρακτικών

Παράμετρος αξιολόγησης	LEED v4.1	BREEAM	Level(s)
Τύπος πλαισίου	Σύστημα πιστοποίησης	Σύστημα αξιολόγησης και πιστοποίησης	Ευρωπαϊκό πλαίσιο δεικτών βιωσιμότητας
Βασική φιλοσοφία	Πιστωτικές μονάδες και τεκμηρίωση επιδόσεων	Βέλτιστες πρακτικές και διαχείριση έργου	Προσέγγιση κύκλου ζωής και συγκρισιμότητα
Διαχείριση ΑΚΚ	Σχέδιο διαχείρισης αποβλήτων	Διαχείριση εργοταξίου και αποβλήτων	Παρακολούθηση ροών αποβλήτων
Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ)	Υποστηρίζεται	Υποστηρίζεται	Κεντρικός άξονας
Περιβαλλοντικές Δηλώσεις Προϊόντων (EPDs)	Ισχυρή έμφαση	Υποστηρίζονται	Ενσωματώνονται μέσω ΑΚΖ
Επαναχρησιμοποίηση και ανακύκλωση υλικών	Υποστηρίζονται μέσω πιστωτικών μονάδων	Έμφαση στη διαχείριση πόρων	Έμφαση στη διατήρηση της αξίας των υλικών
Ενσωμάτωση αρχών κυκλικής οικονομίας	Μέτρια	Υψηλή	Πολύ υψηλή
Εφαρμογή σε επίπεδο εργοταξίου	Μέτρια	Ισχυρή	Περιορισμένη
Βασικό πλεονέκτημα	Διεθνής αναγνώριση	Ολοκληρωμένη διαχείριση έργου	Κοινή ευρωπαϊκή βάση δεικτών

Πηγές: U.S. Green Building Council (2021), BRE (2023), European Commission (2020).

3.5 ΠΟΣΟΤΙΚΟΙ ΔΕΙΚΤΕΣ ΕΠΙΔΟΣΗΣ: ΕΚΤΡΟΠΗ ΑΠΟ ΤΑΦΗ, ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ, ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ

Η αξιολόγηση της επίδοσης των έργων ως προς τη διαχείριση αποβλήτων κατασκευών και κατεδαφίσεων προϋποθέτει τη χρήση σαφών και ποσοτικοποιήσιμων δεικτών. Οι δείκτες αυτοί επιτρέπουν όχι μόνο τη μέτρηση, αλλά και τη σύγκριση και παρακολούθηση της προόδου προς πιο κυκλικά πρότυπα παραγωγής. Ιδιαίτερη σημασία έχουν δείκτες που σχετίζονται με την ένταση παραγωγής αποβλήτων, την εκτροπή από την ταφή, την ανακύκλωση, την προετοιμασία για επαναχρησιμοποίηση και την επαναχρησιμοποίηση. Η αξία τους δεν περιορίζεται στην απλή καταγραφή ποσοτήτων. Αντίθετα, συμβάλλουν και στην αποτίμηση της ποιότητας της διαχείρισης, καθώς και του βαθμού στον οποίο διατηρείται η αξία των υλικών μέσα στον κύκλο ζωής των κατασκευών (European Commission, 2020; JRC, 2024).

Ένας από τους βασικότερους δείκτες είναι η ένταση παραγωγής αποβλήτων, η οποία εκφράζεται συνήθως είτε ως συνολική ποσότητα αποβλήτων σε kg είτε ως κανονικοποιημένη τιμή σε kg/m² επιφάνειας κτιρίου. Το πλαίσιο Level(s) προτείνει η αξιολόγηση αυτή να βασίζεται στην καταγραφή των συνολικών παραγόμενων ποσοτήτων, στη διάκρισή τους ανά ρεύμα υλικών και στην τελική διαχείρισή τους, ώστε τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα μεταξύ έργων διαφορετικού τύπου και μεγέθους. Ταυτόχρονα, το ίδιο πλαίσιο διαχωρίζει τις βασικές εκροές σε απόβλητα προς διάθεση, στοιχεία ή συστατικά προς επαναχρησιμοποίηση, υλικά προς ανακύκλωση και υλικά προς άλλες μορφές ανάκτησης, όπως η επίχωση (European Commission, 2020). Ο συγκεκριμένος δείκτης είναι ιδιαίτερα χρήσιμος, επειδή επιτρέπει να εκτιμηθεί κατά πόσο οι πρακτικές πρόληψης αποδίδουν ήδη από το στάδιο του σχεδιασμού και της οργάνωσης του εργοταξίου.

Ιδιαίτερα σημαντικός είναι και ο δείκτης εκτροπής από την ταφή, ο οποίος αποτυπώνει το ποσοστό των αποβλήτων που δεν οδηγείται σε υγειονομική ταφή ή άλλη μορφή τελικής διάθεσης. Πρόκειται για έναν ευρέως χρησιμοποιούμενο δείκτη, καθώς δείχνει με σχετικά άμεσο τρόπο τον βαθμό απομάκρυνσης ενός έργου από τη γραμμική λογική « παραγωγή-χρήση-απόρριψη ». Παρ' όλα αυτά, η υψηλή εκτροπή από την ταφή δεν συνεπάγεται απαραίτητα και υψηλή κυκλικότητα, καθώς σημαντικό μέρος των αποβλήτων μπορεί να κατευθύνεται σε εφαρμογές χαμηλής προστιθέμενης αξίας, όπως η επίχωση ή άλλες μορφές downcycling. Για τον λόγο αυτό, ο συγκεκριμένος δείκτης θεωρείται αναγκαίος, αλλά όχι επαρκής για την ολοκληρωμένη αξιολόγηση της κυκλικής επίδοσης ενός έργου. (European Commission, 2020; JRC, 2024).

Αντίστοιχα, ο δείκτης ανακύκλωσης αποτυπώνει το ποσοστό των αποβλήτων που υφίσταται επεξεργασία ώστε να επανεισυχθεί στην παραγωγική αλυσίδα ως δευτερογενές υλικό. Σε επίπεδο ευρωπαϊκής πολιτικής, η Οδηγία-Πλαίσιο για τα Απόβλητα είχε θέσει ως στόχο έως το 2020 την προετοιμασία για επαναχρησιμοποίηση, την ανακύκλωση και άλλες μορφές ανάκτησης υλικών, συμπεριλαμβανομένης της επίχωσης, για τουλάχιστον 70% κατά βάρος των μη επικίνδυνων ΑΚΚ. Ωστόσο, η κριτική ανάλυση των (Moschen-Schimek et al., 2023) δείχνει ότι τα ποσοστά ανάκτησης που αναφέρονται στην Ευρωπαϊκή Ένωση δεν είναι

πάντοτε άμεσα συγκρίσιμα μεταξύ των κρατών-μελών. Οι διαφοροποιήσεις αυτές σχετίζονται κυρίως με τις μεθόδους συλλογής δεδομένων, τα συστήματα ταξινόμησης αποβλήτων και τον τρόπο με τον οποίο καταγράφεται η επίχωση. Επομένως, τα υψηλά ποσοστά ανάκτησης ή ανακύκλωσης δεν αντανakλούν απαραίτητα και ανακύκλωση υψηλής ποιότητας ή ουσιαστική κυκλικότητα.

Η διάκριση αυτή επιβεβαιώνεται και από τη νεότερη τεχνικοοικονομική και περιβαλλοντική αξιολόγηση του Joint Research Centre για τη διαχείριση των ΑΚΚ στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Σύμφωνα με την έκθεση, το μέσο ποσοστό ανάκτησης των ΑΚΚ στην ΕΕ βρίσκεται περίπου στο 89%, δηλαδή πάνω από τον υφιστάμενο στόχο. Παρ' όλα αυτά, τα κυρίαρχα συστήματα διαχείρισης εξακολουθούν να βασίζονται κυρίως στην παραγωγή ανακυκλωμένων αδρανών χαμηλής αξίας, τα οποία χρησιμοποιούνται κυρίως σε επιχώσεις, υποβάσεις οδοποιίας και άλλες εφαρμογές υποβάθμισης υλικού, και λιγότερο σε λύσεις που διατηρούν την αρχική λειτουργία και αξία των υλικών (JRC, 2024). Αυτό σημαίνει ότι η ποσοτική επίτευξη ή ακόμη και η υπέρβαση ενός στόχου ανάκτησης δεν συνεπάγεται αυτομάτως και προηγμένη κυκλική διαχείριση. Σε ακαδημαϊκό επίπεδο, είναι επομένως αναγκαίο να διακρίνονται σαφώς η γενική ανάκτηση, η ανακύκλωση και η ανακύκλωση υψηλής αξίας, ώστε η αξιολόγηση να είναι ουσιαστική και να μην οδηγεί σε παραπλανητικά συμπεράσματα.

Ακόμη υψηλότερα στην ιεραρχία της κυκλικής οικονομίας βρίσκεται η επαναχρησιμοποίηση, η οποία αφορά την εκ νέου χρήση προϊόντων ή συστατικών χωρίς ουσιαστική μεταβολή της υλικής τους υπόστασης. Η σημασία της είναι ιδιαίτερα μεγάλη, επειδή αποφεύγεται όχι μόνο η μετατροπή τους σε απόβλητο, αλλά και η ανάγκη παραγωγής νέου προϊόντος. Έτσι, προκύπτει σημαντική εξοικονόμηση πρώτων υλών, ενσωματωμένης ενέργειας και εκπομπών. Η νορβηγική έρευνα των (Fufa et al., 2023) δείχνει ότι η επαναχρησιμοποίηση αναγνωρίζεται από τους φορείς του κλάδου ως στρατηγική με ουσιαστικό περιβαλλοντικό όφελος, κυρίως λόγω της μείωσης των εκπομπών. Ωστόσο, στην πράξη παραμένει περιορισμένη, εξαιτίας παραγόντων όπως η έλλειψη τεκμηρίωσης, το υψηλό κόστος, η ανώριμη αγορά, η ανεπαρκής ρύθμιση και η απουσία εναρμονισμένων προτύπων. Στην ίδια μελέτη, η έλλειψη τεκμηρίωσης αναδείχθηκε ως το σημαντικότερο εμπόδιο, ενώ ο καλός σχεδιασμός αξιολογήθηκε ως ο πιο κρίσιμος παράγοντας επιτυχίας. Το εύρημα αυτό δείχνει ότι ο δείκτης επαναχρησιμοποίησης δεν εξαρτάται μόνο από τις ιδιότητες των ίδιων των υλικών, αλλά και από οργανωτικούς, θεσμικούς και πληροφοριακούς παράγοντες.

Η ίδια έρευνα έδειξε ακόμη ότι ορισμένα υλικά παρουσιάζουν μεγαλύτερο δυναμικό επαναχρησιμοποίησης σε σχέση με άλλα. Ειδικότερα, ο χάλυβας και το τούβλο αξιολογήθηκαν ως οι πλέον κατάλληλες κατηγορίες προϊόντων για επαναχρησιμοποίηση, ενώ και το ξύλο εμφανίζει σημαντικές δυνατότητες, εφόσον υπάρχουν κατάλληλες διαδικασίες ελέγχου, δοκιμών και τεκμηρίωσης (Fufa et al., 2023). Το στοιχείο αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για τη διαμόρφωση πιο εξειδικευμένων δεικτών επίδοσης, καθώς δείχνει ότι η συνολική κυκλικότητα ενός έργου δεν αρκεί να αποδίδεται μόνο με έναν συνολικό αριθμό. Αντίθετα, σε πολλές

περιπτώσεις είναι πιο ουσιαστικό να παρακολουθούνται δείκτες ανά επιμέρους ρεύμα υλικού, όπως το ποσοστό επαναχρησιμοποίησης μεταλλικών στοιχείων, το ποσοστό ανακύκλωσης ορυκτών ρευμάτων ή το ποσοστό εκτροπής ανά βασική κατηγορία αποβλήτων.

Προς αυτή την κατεύθυνση κινείται και η έκθεση του (JRC, 2024), σύμφωνα με την οποία, αν εξαιρεθούν τα εκσκαφικά υλικά και τα βυθοκορήματα, το τεχνικό δυναμικό προετοιμασίας για επαναχρησιμοποίηση και ανακύκλωσης στα ΑΚΚ μπορεί να φθάσει κατά μέσο όρο στο 83%. Το δυναμικό της προετοιμασίας για επαναχρησιμοποίηση μόνο εκτιμάται κατά μέσο όρο στο 16% του συνολικού ρεύματος, με σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ επιμέρους υλικών. Η ίδια μελέτη δείχνει επίσης ότι ένα σενάριο μέγιστης ανακύκλωσης θα μπορούσε να οδηγήσει σε πρόσθετη ετήσια μείωση περίπου 33 Mt CO₂ eq., ενώ ένα σενάριο που δίνει μεγαλύτερη έμφαση στην προετοιμασία για επαναχρησιμοποίηση, παράλληλα με την ανακύκλωση, θα μπορούσε να αυξήσει το όφελος περίπου στα 48 Mt CO₂ eq. (JRC, 2024). Με άλλα λόγια, από περιβαλλοντική σκοπιά, η απλή αύξηση της ανακύκλωσης δεν είναι από μόνη της αρκετή. Απαιτείται ταυτόχρονα μεγαλύτερη έμφαση στην προετοιμασία για επαναχρησιμοποίηση, όπου αυτό είναι τεχνικά, οικονομικά και οργανωτικά εφικτό.

Με βάση τα παραπάνω, ένα ολοκληρωμένο σύστημα δεικτών επίδοσης για έργα χαμηλών ή μηδενικών αποβλήτων θα πρέπει να περιλαμβάνει τη συνολική παραγωγή ΑΚΚ (kg και kg/m²), το ποσοστό εκτροπής από την ταφή, την ανακύκλωση, την προετοιμασία για επαναχρησιμοποίηση, καθώς και τις λοιπές μορφές υλικής ανάκτησης, με σαφή διάκριση της επίχωσης από την ανακύκλωση υψηλής αξίας. Παράλληλα, η παρακολούθηση επιμέρους δεικτών ανά κατηγορία υλικού ενισχύει σημαντικά την αναλυτική αξία της αξιολόγησης και διευκολύνει τον εντοπισμό των ρευμάτων που εμφανίζουν το μεγαλύτερο δυναμικό βελτίωσης.

Οι ποσοτικοί δείκτες επίδοσης δεν θα πρέπει να αντιμετωπίζονται ως απλά αριθμητικά εργαλεία συμμόρφωσης. Η ουσιαστική τους αξία βρίσκεται στο ότι μπορούν να λειτουργήσουν ως μέσα στρατηγικής καθοδήγησης. Η εκτροπή από την ταφή αποτυπώνει τον βαθμό απομάκρυνσης από τη διάθεση, η ανακύκλωση δείχνει την επανεισαγωγή υλικών στην παραγωγική αλυσίδα, ενώ η επαναχρησιμοποίηση εκφράζει το υψηλότερο επίπεδο διατήρησης αξίας στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας. Για να είναι όμως οι δείκτες αυτοί πραγματικά χρήσιμοι, απαιτούνται σαφείς ορισμοί, αξιόπιστη τεκμηρίωση, διακριτή παρακολούθηση των επιμέρους ρευμάτων και προσεκτική ερμηνεία των δεδομένων. Μόνο υπό αυτές τις προϋποθέσεις οι δείκτες μπορούν να λειτουργήσουν ως ουσιαστικά εργαλεία αξιολόγησης και στρατηγικής καθοδήγησης για τη μετάβαση προς πιο κυκλικά και zero-waste εργοτάξια.

***Πίνακας 11:** Βασικοί ποσοτικοί δείκτες αξιολόγησης της κυκλικότητας σε εργοτάξια χαμηλών ή μηδενικών αποβλήτων*

Δείκτης επίδοσης	Μονάδα Έκφρασης	Αντικείμενο αξιολόγησης	Βασικοί περιορισμοί
Παραγόμενα ΑΚΚ	kg ή kg/m ²	Ένταση παραγωγής αποβλήτων	Δεν αποτυπώνει την ποιότητα αξιοποίησης των υλικών
Εκτροπή από την ταφή	%	Βαθμός αποφυγής της τελικής διάθεσης αποβλήτων	Δεν εκφράζει απαραίτητα τον βαθμό κυκλικότητας
Ανακύκλωση	%	Επανεισαγωγή υλικών στη δευτερογενή παραγωγή	Ενδέχεται να περιλαμβάνει πρακτικές υποβάθμισης υλικών (downcycling)
Προετοιμασία για επαναχρησιμοποίηση	%	Διατήρηση δομικών στοιχείων για νέα χρήση	Απαιτεί τεκμηρίωση και κατάλληλες διαδικασίες ελέγχου
Επαναχρησιμοποίηση	%	Διατήρηση της αξίας των υλικών	Περιορισμένη εφαρμογή και ανεπαρκώς ανεπτυγμένες δευτερογενείς αγορές
Ανάκτηση υλικών	%	Συνολική αξιοποίηση των αποβλήτων	Μπορεί να περιλαμβάνει επίχωση και εφαρμογές χαμηλής αξίας
Ανακύκλωση υψηλής αξίας	%	Διατήρηση της ποιότητας και της λειτουργικότητας των υλικών	Απουσία εναρμονισμένων μεθόδων καταγραφής
Εκπομπές CO ₂ που αποφεύγονται	kg CO ₂ eq.	Περιβαλλοντικό όφελος των κυκλικών πρακτικών	Απαιτεί δεδομένα κύκλου ζωής
Δείκτες ανά επιμέρους ρεύμα υλικών	%	Απόδοση συγκεκριμένων κατηγοριών υλικών	Αυξημένες απαιτήσεις παρακολούθησης και τεκμηρίωσης

Πηγές: European Commission (2020), Fufa et al. (2023), Moschen-Schimek et al. (2023), JRC (2024).

3.6 ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΣΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ZERO – WASTE ΕΡΓΟΤΑΞΙΩΝ

Παρά τη σημαντική πρόοδο που έχει σημειωθεί τα τελευταία χρόνια σε επίπεδο πολιτικών, τεχνολογιών και συστημάτων αξιολόγησης, η ευρεία εφαρμογή εργοταξίων χαμηλών ή μηδενικών αποβλήτων εξακολουθεί να αντιμετωπίζει σημαντικές δυσκολίες. Η μετάβαση προς πιο κυκλικά πρότυπα κατασκευής δεν εξαρτάται μόνο από τη διαθεσιμότητα τεχνικών λύσεων, αλλά επηρεάζεται από ένα σύνθετο σύνολο θεσμικών, οικονομικών, οργανωτικών και πληροφοριακών παραγόντων. Για τον λόγο αυτό, η επίτευξη υψηλών ποσοστών ανάκτησης ή η εφαρμογή μεμονωμένων κυκλικών πρακτικών δεν αρκεί από μόνη της για την ανάπτυξη πραγματικά zero-waste εργοταξίων.

Ένας από τους σημαντικότερους περιορισμούς αφορά τις διαφοροποιήσεις που εξακολουθούν να υπάρχουν μεταξύ των εθνικών θεσμικών και κανονιστικών πλαισίων. Παρότι η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει κοινούς στόχους για τα απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων μέσω της Οδηγίας-Πλαίσιο για τα Απόβλητα, η εφαρμογή τους παρουσιάζει σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των κρατών-μελών ως προς τους ορισμούς, τις μεθόδους καταγραφής και τις απαιτήσεις διαχείρισης. Ειδικότερα, ζητήματα όπως η διάκριση μεταξύ ανακύκλωσης και επίχωσης, η πιστοποίηση δευτερογενών υλικών και οι προϋποθέσεις επαναχρησιμοποίησης εξακολουθούν να μην εφαρμόζονται με ενιαίο τρόπο σε ευρωπαϊκό επίπεδο (European Commission, 2020; JRC, 2024). Η έλλειψη εναρμονισμένων προτύπων δυσχεραίνει τόσο τη συγκρισιμότητα των δεδομένων όσο και την ανάπτυξη σταθερών δευτερογενών αγορών υλικών.

Παράλληλα, σημαντικά εμπόδια προκύπτουν και σε οικονομικό επίπεδο. Σε πολλές περιπτώσεις, η αποσυναρμολόγηση, η διαλογή και η προετοιμασία υλικών για επαναχρησιμοποίηση εμφανίζουν υψηλότερο κόστος σε σύγκριση με τη χρήση νέων υλικών ή με συμβατικές πρακτικές κατεδάφισης. Η περιορισμένη ανάπτυξη δευτερογενών αγορών, η μεταβλητότητα της ποιότητας των ανακυκλωμένων υλικών και η συχνά χαμηλή οικονομική αξία των ανακτημένων προϊόντων περιορίζουν σημαντικά τα κίνητρα εφαρμογής κυκλικών πρακτικών στον κατασκευαστικό τομέα. Επιπλέον, η απουσία σταθερών μηχανισμών οικονομικής ενίσχυσης και η χαμηλή τιμή πολλών πρωτογενών υλικών καθιστούν συχνά δυσκολότερη την ανταγωνιστικότητα των πρακτικών επαναχρησιμοποίησης και υψηλής ποιότητας ανακύκλωσης (Fufa et al., 2023).

Σημαντικές προκλήσεις εμφανίζονται και σε τεχνικό επίπεδο. Η ποιότητα των παραγόμενων ρευμάτων αποβλήτων επηρεάζεται άμεσα από την επιμόλυνση υλικών, την ανεπαρκή διαλογή στην πηγή και την περιορισμένη τεκμηρίωση σχετικά με τη σύσταση και την κατάσταση των δομικών στοιχείων. Ιδιαίτερα στα υφιστάμενα κτίρια, η έλλειψη αξιόπιστων δεδομένων σχετικά με τα χρησιμοποιούμενα υλικά και η πιθανή παρουσία επικίνδυνων ουσιών δυσχεραίνουν σημαντικά τη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης ή ανακύκλωσης υψηλής ποιότητας. Ωστόσο, η εφαρμογή πρακτικών αποσυναρμολόγησης απαιτεί συχνά περισσότερο χρόνο, εξειδικευμένο

προσωπικό και διαφορετικές διαδικασίες οργάνωσης σε σχέση με τις συμβατικές πρακτικές κατεδάφισης (Çetin, 2023).

Επιπλέον, η ανάπτυξη εργοταξίων χαμηλών ή μηδενικών αποβλήτων επηρεάζεται έντονα από οργανωτικούς και διαχειριστικούς παράγοντες. Ο κατασκευαστικός τομέας χαρακτηρίζεται συχνά από κατακερματισμένες αλυσίδες αξίας, μεγάλο αριθμό υπεργολάβων και περιορισμένο συντονισμό μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων. Ως αποτέλεσμα, η ενσωμάτωση πρακτικών πρόληψης, διαλογής και επαναχρησιμοποίησης καθίσταται δυσκολότερη, ιδιαίτερα όταν οι σχετικές απαιτήσεις δεν έχουν ενσωματωθεί έγκαιρα στον σχεδιασμό, στις προμήθειες και στη διαχείριση του έργου. Η αποτελεσματική εφαρμογή κυκλικών πρακτικών προϋποθέτει επομένως αυξημένο επίπεδο συνεργασίας, ανταλλαγής πληροφοριών και συντονισμού σε όλη την αλυσίδα παραγωγής.

Αντίστοιχα, παρά τη σημαντική ανάπτυξη ψηφιακών τεχνολογιών, εξακολουθούν να υπάρχουν σημαντικά πληροφοριακά και τεχνολογικά κενά. Η περιορισμένη διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών ψηφιακών συστημάτων, η άνιση υιοθέτηση εργαλείων BIM και η έλλειψη αξιόπιστων βάσεων δεδομένων περιορίζουν τη δυνατότητα ολοκληρωμένης παρακολούθησης των ροών υλικών και της περιβαλλοντικής επίδοσης των έργων, ενώ η συστηματική εφαρμογή εργαλείων όπως τα material passports απαιτεί υψηλής ποιότητας δεδομένα και συνεχή ενημέρωση πληροφοριών σε όλο τον κύκλο ζωής του έργου, κάτι που στην πράξη δεν είναι πάντοτε εφικτό (ISO, 2018; Iyiola et al., 2024).

Τέλος, σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν και ευρύτεροι πολιτισμικοί και αγοραστικοί παράγοντες. Σε μεγάλο μέρος του κατασκευαστικού τομέα εξακολουθεί να επικρατεί μια περισσότερο γραμμική λογική παραγωγής και κατανάλωσης, ενώ η χρήση επαναχρησιμοποιημένων ή δευτερογενών υλικών συχνά αντιμετωπίζεται με επιφυλακτικότητα. Η περιορισμένη εμπιστοσύνη στην ποιότητα των δευτερογενών προϊόντων, η απουσία εμπειρίας σε πρακτικές κυκλικής κατασκευής και η συνήθης προτεραιότητα του χαμηλού αρχικού κόστους έναντι της μακροπρόθεσμης περιβαλλοντικής επίδοσης αποτελούν παράγοντες που επιβραδύνουν τη μετάβαση προς πιο κυκλικά μοντέλα κατασκευής.

Η εφαρμογή εργοταξίων χαμηλών ή μηδενικών αποβλήτων αποτελεί μια σύνθετη διαδικασία που δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την εφαρμογή επιμέρους τεχνικών πρακτικών ή την επίτευξη ποσοτικών στόχων ανάκτησης. Αντίθετα, προϋποθέτει ευρύτερες αλλαγές στον τρόπο σχεδιασμού, οργάνωσης και διαχείρισης των έργων, καθώς και ισχυρότερη σύνδεση μεταξύ θεσμικού πλαισίου, αγοράς, τεχνολογίας και εργοταξιακής πρακτικής. Υπό αυτή την έννοια, η μετάβαση προς zero-waste εργοτάξια συνιστά όχι μόνο τεχνική, αλλά και οργανωτική και συστημική πρόκληση για τον σύγχρονο κατασκευαστικό τομέα.

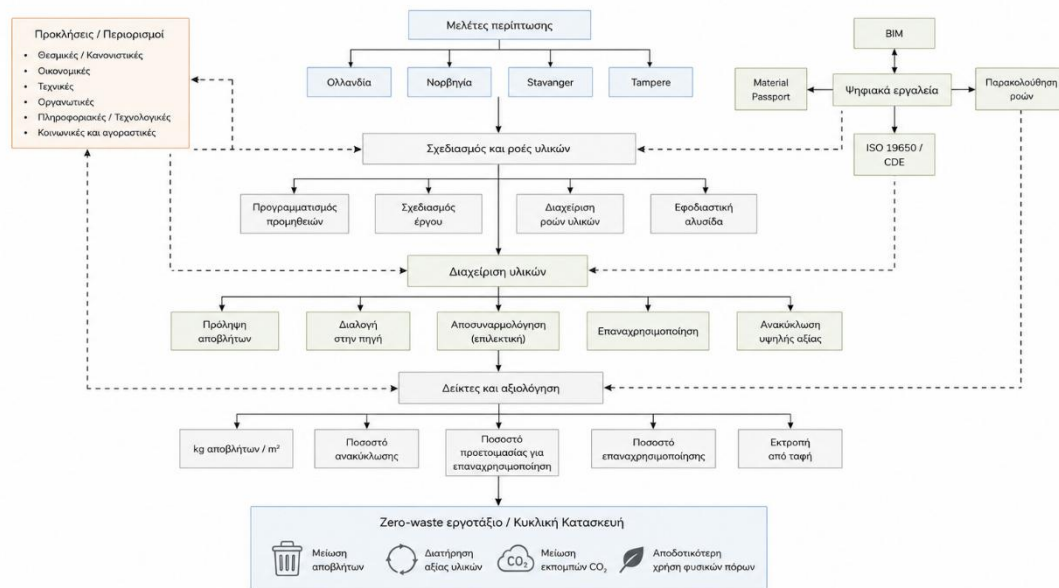
***Πίνακας 12:** Βασικές προκλήσεις και περιορισμοί στην εφαρμογή πρακτικών μηδενικών αποβλήτων στον κατασκευαστικό τομέα*

Κατηγορία προκλήσεων	Κύρια εμπόδια	Επιπτώσεις
Θεσμικές	Διαφοροποιήσεις κανονιστικών πλαισίων και έλλειψη εναρμονισμένων προτύπων	Περιορισμένη συγκρισιμότητα και δυσκολίες ανάπτυξης δευτερογενών αγορών
Οικονομικές	Υψηλό κόστος αποσυναρμολόγησης και περιορισμένη ανταγωνιστικότητα δευτερογενών υλικών	Μειωμένα κίνητρα εφαρμογής κυκλικών πρακτικών
Τεχνικές	Επιμόλυνση υλικών, περιορισμένες υποδομές και ανεπαρκής τεκμηρίωση	Περιορισμός της επαναχρησιμοποίησης και της ανακύκλωσης υψηλής αξίας
Οργανωτικές	Κατακερματισμός της αλυσίδας αξίας και ανεπαρκής συνεργασία των εμπλεκόμενων φορέων	Δυσκολίες συντονισμού και απώλεια αξιοποιήσιμων υλικών
Πληροφοριακές και τεχνολογικές	Περιορισμένη διαλειτουργικότητα ψηφιακών εργαλείων και ελλιπή δεδομένα	Δυσχέρεια παρακολούθησης των ροών υλικών και της περιβαλλοντικής επίδοσης
Κοινωνικές και αγοραστικές	Περιορισμένη αποδοχή δευτερογενών υλικών και έλλειψη εμπειρίας σε κυκλικές πρακτικές	Επιβράδυνση της μετάβασης προς κυκλικά πρότυπα κατασκευής

Πηγές: Çetin (2023), Fufa et al. (2023), Iyiola et al. (2024), JRC (2024).

Η εφαρμογή εργοταξίων χαμηλών ή μηδενικών αποβλήτων προϋποθέτει την αλληλεπίδραση τεχνικών, θεσμικών, οργανωτικών και ψηφιακών παραμέτρων. Η σχέση μεταξύ των βασικών συνιστωσών που αναλύθηκαν στο παρόν κεφάλαιο αποτυπώνεται συνοπτικά στο Διάγραμμα.

Διάγραμμα: Συνθετικό μοντέλο εφαρμογής zero-waste εργοταξίων και κυκλικής κατασκευής



Πηγή: Ίδια επεξεργασία βάσει της βιβλιογραφικής ανασκόπησης του Κεφαλαίου 3.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΒΟΡΕΙΑΣ ΚΑΙ ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΕΥΡΩΠΗΣ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διαχείριση των αποβλήτων κατασκευών και κατεδαφίσεων αποτελεί έναν από τους πλέον κρίσιμους τομείς για τη μετάβαση του κατασκευαστικού κλάδου σε ένα κυκλικό και αποδοτικό μοντέλο παραγωγής. Η σημασία του ζητήματος αποτυπώνεται πρωτίστως στο μέγεθος του ρεύματος αυτού σε ευρωπαϊκό επίπεδο. Σύμφωνα με στοιχεία της Eurostat, το 2022 στην Ευρωπαϊκή Ένωση παρήχθησαν συνολικά 2.233 εκατομμύρια τόνοι αποβλήτων, εκ των οποίων το 38,4% προήλθε από δραστηριότητες κατασκευών και κατεδαφίσεων, καθιστώντας τον κλάδο τη σημαντικότερη πηγή αποβλήτων (Eurostat, 2024).

Η μεγάλη συμμετοχή των ΑΚΚ στο συνολικό ρεύμα αποβλήτων δείχνει ότι ο κατασκευαστικός τομέας επηρεάζει άμεσα τόσο την κατανάλωση πόρων όσο και την παραγωγή αποβλήτων στην Ευρώπη. Το Joint Research Centre επισημαίνει ότι ο κατασκευαστικός τομέας ευθύνεται για σημαντικό ποσοστό της κατανάλωσης πρώτων υλών και για περισσότερο από το ένα τρίτο των συνολικών αποβλήτων της ΕΕ, γεγονός που καθιστά αναγκαίο τον ανασχεδιασμό όχι μόνο της διαχείρισης των αποβλήτων, αλλά και του τρόπου με τον οποίο σχεδιάζονται, κατασκευάζονται και αποδομούνται τα έργα (JRC, 2024).

Σε επίπεδο πολιτικής, το βασικό πλαίσιο διαμορφώνεται από την Οδηγία-Πλαίσιο για τα Απόβλητα 2008/98/ΕΚ (WFD 2008/98/EC), η οποία θέτει ως στόχο την προετοιμασία για επαναχρησιμοποίηση, ανακύκλωση και ανάκτηση τουλάχιστον του 70% των μη επικίνδυνων αποβλήτων ΑΚΚ (European Commission, 2008).

Παράλληλα, δίνεται έμφαση στην επιλεκτική κατεδάφιση, στη χωριστή συλλογή βασικών υλικών και στην ασφαλή απομάκρυνση επικίνδυνων ουσιών.

Η βιβλιογραφία επισημαίνει ότι η επίτευξη υψηλών ποσοστών ανάκτησης δεν συνεπάγεται πάντοτε και υψηλό επίπεδο κυκλικότητας, καθώς σημαντικό μέρος των ανακτώμενων υλικών εξακολουθεί να οδηγείται σε εφαρμογές χαμηλής προστιθέμενης αξίας (JRC, 2024).

Η διάκριση αυτή αποκτά ιδιαίτερη σημασία στο πλαίσιο της συγκριτικής ανάλυσης μεταξύ Βόρειας και Κεντρικής Ευρώπης. Οι δύο περιοχές, αν και λειτουργούν εντός του ίδιου ευρωπαϊκού θεσμικού πλαισίου, παρουσιάζουν διαφορετικές προσεγγίσεις: στις χώρες της Κεντρικής Ευρώπης η έμφαση δίνεται κυρίως σε κανονιστικά και οικονομικά εργαλεία που ενισχύουν την ανάκτηση, ενώ στη Βόρεια Ευρώπη παρατηρείται μεγαλύτερη ενσωμάτωση της κυκλικής λογικής στον σχεδιασμό, στη διαχείριση των υλικών και στις πρακτικές εργοταξίου.

Στην περίπτωση αυτή, η έννοια των εργοταξίων μηδενικών αποβλήτων (zero-waste construction sites) λειτουργεί ως βασικός άξονας αξιολόγησης. Σύμφωνα με το σχέδιο δράσης *Routemap for Zero Avoidable Waste in Construction*, το οποίο εκπονήθηκε από το Green Construction Board, η μείωση των αποβλήτων δεν περιορίζεται στη φάση της διαχείρισης, αλλά εκτείνεται σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής του έργου, από τον σχεδιασμό και την προμήθεια έως την κατασκευή και την αποδόμηση (Green Construction Board, 2021).

Με βάση τα παραπάνω, το παρόν κεφάλαιο προχωρά σε συγκριτική ανάλυση των πρακτικών και επιδόσεων μεταξύ Βόρειας και Κεντρικής Ευρώπης, εξετάζοντας το θεσμικό πλαίσιο, τις εφαρμοζόμενες μεθοδολογίες, τις πρακτικές εργοταξίου και τα ποσοτικά αποτελέσματα. Στόχος δεν είναι μόνο η καταγραφή διαφορών, αλλά και η ανάδειξη των μηχανισμών που οδηγούν σε υψηλότερη πρόληψη, επαναχρησιμοποίηση και ποιοτική ανακύκλωση, στο πλαίσιο της μετάβασης προς ένα πλήρως κυκλικό κατασκευαστικό μοντέλο.

4.1 ΠΛΑΙΣΙΟ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Η συγκριτική ανάλυση μεταξύ των χωρών της Βόρειας και της Κεντρικής Ευρώπης στη διαχείριση αποβλήτων κατασκευών και κατεδαφίσεων βασίζεται στην ανάγκη να εξεταστεί όχι μόνο το ποσοτικό αποτέλεσμα της διαχείρισης, αλλά και οι μηχανισμοί που διαμορφώνουν τις επιδόσεις αυτές. Στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας, η αξιολόγηση των συστημάτων διαχείρισης δεν μπορεί να περιορίζεται σε γενικούς δείκτες ανάκτησης, αλλά απαιτεί συνδυαστική προσέγγιση που συνδυάζει θεσμικά, τεχνικά και επιχειρησιακά στοιχεία.

Το βασικό θεωρητικό υπόβαθρο της ανάλυσης αποτελεί η ιεράρχηση των αποβλήτων, όπως αυτή θεσμοθετείται μέσω της Οδηγίας-Πλαίσιο για τα Απόβλητα 2008/98/EC. Η ιεράρχηση αυτή δίνει προτεραιότητα στην πρόληψη παραγωγής αποβλήτων, ακολουθούμενη από την επαναχρησιμοποίηση, την ανακύκλωση και άλλες μορφές ανάκτησης, ενώ η διάθεση αποτελεί την έσχατη επιλογή. Στο κομμάτι των αποβλήτων

κατασκευών και κατεδαφίσεων, η εφαρμογή της ιεράρχησης αυτής συνδέεται άμεσα με τη διατήρηση της αξίας των υλικών και τη μείωση της εξάρτησης από πρωτογενείς πόρους (Zhang et al., 2022).

Η ανάγκη ποιοτικής αξιολόγησης ενισχύεται από τα διαθέσιμα ευρωπαϊκά δεδομένα. Σύμφωνα με στοιχεία της Eurostat, σημαντικό ποσοστό των αποβλήτων οδηγείται σε εργασίες ανάκτησης, ωστόσο η ανάκτηση αυτή περιλαμβάνει διαφορετικές κατηγορίες, όπως η ανακύκλωση, η ενεργειακή αξιοποίηση και η επίχωση, οι οποίες δεν έχουν την ίδια συμβολή στην κυκλικότητα. Για τον λόγο αυτό, η παρούσα ανάλυση διακρίνει μεταξύ ποσοτικής ανάκτησης και ποιοτικής αξιοποίησης των υλικών, λαμβάνοντας υπόψη τον βαθμό στον οποίο τα υλικά επανεντάσσονται στην παραγωγική διαδικασία με διατήρηση της αξίας τους.

Η μεθοδολογία της συγκριτικής ανάλυσης οργανώνεται σε τέσσερις βασικούς άξονες. Ο πρώτος αφορά το θεσμικό πλαίσιο, δηλαδή τις ευρωπαϊκές και εθνικές ρυθμίσεις, τα οικονομικά εργαλεία και τους μηχανισμούς ελέγχου που επηρεάζουν τη διαχείριση των ΑΚΚ. Ο δεύτερος άξονας αφορά τις εφαρμοζόμενες μεθοδολογίες, όπως ο κυκλικός σχεδιασμός, η επιλεκτική κατεδάφιση και η επαναχρησιμοποίηση υλικών. Ο τρίτος άξονας εστιάζει στις πρακτικές εργοταξίου, με έμφαση στις ροές υλικών, τα logistics και την επιχειρησιακή οργάνωση. Ο τέταρτος άξονας αφορά την αξιολόγηση των επιδόσεων, με βάση δείκτες όπως το ποσοστό ανάκτησης, η ανακύκλωση, η επαναχρησιμοποίηση, η εκτροπή από την ταφή και η παραγωγή αποβλήτων ανά μονάδα επιφάνειας.

Η επιλογή των παραπάνω αξόνων επιτρέπει τη συστηματική σύγκριση διαφορετικών μοντέλων διαχείρισης, εξετάζοντας τόσο τα αποτελέσματα όσο και τους παράγοντες που τα επηρεάζουν. Η προσέγγιση αυτή συνάδει με τις σύγχρονες τάσεις αξιολόγησης της κυκλικής οικονομίας, όπου η επίδοση δεν αποτιμάται αποκλειστικά με βάση ποσοτικούς δείκτες, αλλά και με βάση τη δομή και τη λειτουργία των συστημάτων (JRC, 2024).

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται επίσης στη διαθεσιμότητα και συγκρισιμότητα των δεδομένων. Αν και η Eurostat παρέχει εναρμονισμένα στατιστικά στοιχεία, οι διαφορές στους ορισμούς των ΑΚΚ και στις μεθόδους καταγραφής μεταξύ των κρατών-μελών επηρεάζουν την ακρίβεια των συγκρίσεων. Επιπλέον, η διαφορετική αντιμετώπιση της επίχωσης ως μορφής ανάκτησης δημιουργεί περαιτέρω αποκλίσεις στους δείκτες επίδοσης (European Commission, 2023).

Η συγκριτική ανάλυση Βόρειας και Κεντρικής Ευρώπης δεν περιορίζεται σε γεωγραφική διάκριση, αλλά προσεγγίζεται ως σύγκριση διαφορετικών μοντέλων εφαρμογής της κυκλικής οικονομίας. Η Κεντρική Ευρώπη χαρακτηρίζεται κυρίως από ισχυρούς κανονιστικούς μηχανισμούς και ανεπτυγμένες αγορές δευτερογενών υλικών, ενώ η Βόρεια Ευρώπη δίνει μεγαλύτερη έμφαση στην πρόληψη, στον σχεδιασμό και στην ενσωμάτωση της κυκλικότητας σε όλο τον κύκλο ζωής των κατασκευών.

Η μεθοδολογία αυτή επιτρέπει τη σύνδεση ποσοτικών δεδομένων, θεσμικού πλαισίου και πρακτικών εφαρμογής, ώστε η σύγκριση να αποτυπώνει όχι μόνο τις διαφορές στις επιδόσεις, αλλά και τους λόγους που οδηγούν σε αυτές. Με τον τρόπο αυτό, η ανάλυση συμβάλλει στην κατανόηση των προϋποθέσεων για τη μετάβαση προς εργοτάξια μηδενικών αποβλήτων και πιο ώριμα κυκλικά μοντέλα στον κατασκευαστικό τομέα.

4.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΘΕΣΜΙΚΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ (ΚΕΝΤΡΙΚΗ VS ΒΟΡΕΙΑ ΕΥΡΩΠΗ)

Η σύγκριση του θεσμικού πλαισίου διαχείρισης αποβλήτων κατασκευών και κατεδαφίσεων μεταξύ Κεντρικής και Βόρειας Ευρώπης βασίζεται σε ένα κοινό ευρωπαϊκό υπόβαθρο, το οποίο διαμορφώνεται κυρίως από την Waste Framework Directive 2008/98/EC, αλλά διαφοροποιείται σημαντικά ως προς την εφαρμογή, τα εργαλεία πολιτικής και τον βαθμό ωριμότητας των επιμέρους συστημάτων.

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, το θεσμικό πλαίσιο για τα ΑΚΚ στηρίζεται στη θέσπιση κοινών αρχών, όπως η ιεράρχηση των αποβλήτων και ο στόχος τουλάχιστον 70% ανάκτησης των μη επικίνδυνων ΑΚΚ. Ωστόσο, η απουσία πλήρως εναρμονισμένων ορισμών και μεθόδων καταγραφής οδηγεί σε σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των κρατών-μελών, τόσο ως προς τα ποσοστά όσο και ως προς την ποιότητα των αποτελεσμάτων (Colmenero-Fonseca et al., 2023).

Στις χώρες της Κεντρικής Ευρώπης, όπως η Γερμανία, η Ολλανδία, η Αυστρία και το Βέλγιο, το θεσμικό πλαίσιο χαρακτηρίζεται από υψηλό βαθμό ωριμότητας και βασίζεται σε έναν συνδυασμό κανονιστικών και οικονομικών εργαλείων. Η επιβολή υψηλών τελών ταφής, οι απαγορεύσεις διάθεσης ανακυκλώσιμων υλικών και η ανάπτυξη ανεπτυγμένων συστημάτων παρακολούθησης ενισχύουν τη μετάβαση προς την ανάκτηση και αξιοποίηση των αποβλήτων. Παράλληλα, η ύπαρξη αγορών δευτερογενών υλικών επιτρέπει την επανένταξη των ανακυκλωμένων προϊόντων στην παραγωγική διαδικασία, ενισχύοντας τη λειτουργία της διαχείρισης πόρων (European Commission 2023; RVO, 2025).

Αντίθετα, στις χώρες της Βόρειας Ευρώπης, όπως η Δανία, η Φινλανδία, η Σουηδία και η Νορβηγία, το θεσμικό πλαίσιο παρουσιάζει μια πιο προληπτική προσέγγιση. Οι πολιτικές συνδέονται στενά με στρατηγικές βιώσιμης κατασκευής και ενσωματώνουν εργαλεία όπως η ανάλυση κύκλου ζωής (LCA), η επιλεκτική κατεδάφιση και ο σχεδιασμός για αποσυναρμολόγηση. Η έμφαση δίνεται στη μείωση της παραγωγής αποβλήτων ήδη από το στάδιο του σχεδιασμού, γεγονός που ευθυγραμμίζεται με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας και των zero-waste εργοταξίων (Nordic Sustainable Construction, 2023).

Ένα κρίσιμο σημείο διαφοροποίησης μεταξύ των δύο περιφερειών αφορά τον τρόπο ενσωμάτωσης της κυκλικότητας στο θεσμικό πλαίσιο. Στην Κεντρική Ευρώπη, η κυκλικότητα προωθείται κυρίως μέσω οικονομικών κινήτρων και ρυθμιστικών περιορισμών που ενισχύουν την ανάκτηση και την ανακύκλωση. Αντίθετα, στη Βόρεια Ευρώπη, η κυκλικότητα ενσωματώνεται πιο συστηματικά σε όλο τον κύκλο ζωής των

κατασκευών, με έμφαση στην πρόληψη, στη διατήρηση της αξίας των υλικών και στην ανάπτυξη προτύπων και εργαλείων αξιολόγησης.

Παράλληλα, σημαντικές προκλήσεις παραμένουν σε επίπεδο εναρμόνισης και συγκρισιμότητας. Η διαφορετική αντιμετώπιση της επίχωσης ως μορφής ανάκτησης, καθώς και οι αποκλίσεις στους ορισμούς των ΑΚΚ, επηρεάζουν την αξιοπιστία των συγκριτικών δεικτών και δυσχεραίνουν την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων (European Commission, 2023).

Η σημασία του θεσμικού πλαισίου αναδεικνύεται ιδιαίτερα στο πλαίσιο της μετάβασης προς εργοτάξια μηδενικών αποβλήτων. Τα εργοτάξια μηδενικών αποβλήτων προϋποθέτουν όχι μόνο υψηλά ποσοστά ανάκτησης, αλλά κυρίως την ύπαρξη πολιτικών που ενισχύουν την πρόληψη, τη διαλογή στην πηγή και την επαναχρησιμοποίηση υλικών. Στο πλαίσιο αυτό, το θεσμικό μοντέλο της Βόρειας Ευρώπης εμφανίζεται πιο συμβατό με τις αρχές των zero-waste προσεγγίσεων, ενώ το μοντέλο της Κεντρικής Ευρώπης προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα ως προς την ανάπτυξη αγορών και την επίτευξη υψηλών ποσοτικών στόχων.

Η σύγκριση καταδεικνύει ότι, παρά το κοινό ευρωπαϊκό πλαίσιο, αναπτύσσονται δύο διακριτά αλλά συμπληρωματικά μοντέλα διαχείρισης. Η Κεντρική Ευρώπη υιοθετεί ένα περισσότερο ρυθμιστικό και οικονομικό μοντέλο, το οποίο οδηγεί σε υψηλά ποσοστά ανάκτησης, ενώ η Βόρεια Ευρώπη αναπτύσσει ένα πιο συστημικό και προληπτικό μοντέλο, εστιάζοντας στη μείωση της παραγωγής αποβλήτων και στη διατήρηση της αξίας των υλικών. Ο συνδυασμός των δύο αυτών προσεγγίσεων φαίνεται να αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη μετάβαση προς πιο ολοκληρωμένα και κυκλικά συστήματα διαχείρισης ΑΚΚ.

Πίνακας 13: Συγκριτική αποτύπωση θεσμικού πλαισίου Κεντρικής και Βόρειας Ευρώπης για τη διαχείριση ΑΚΚ

Παράμετρος σύγκρισης	Κεντρική Ευρώπη	Βόρεια Ευρώπη
Βασική κατεύθυνση πολιτικής	Έμφαση στην ανάκτηση, την ανακύκλωση και τη λειτουργία δευτερογενών αγορών	Έμφαση στην πρόληψη, τον κυκλικό σχεδιασμό και τη μείωση περιβαλλοντικού αποτυπώματος
Κύρια εργαλεία εφαρμογής	Τέλη ταφής, περιορισμοί διάθεσης, ανεπτυγμένες υποδομές επεξεργασίας	Ανάλυση κύκλου ζωής, επιλεκτική κατεδάφιση, σχεδιασμός για αποσυναρμολόγηση
Ρόλος αγοράς	Ισχυρή σύνδεση με αγορές δευτερογενών υλικών	Αναπτυσσόμενες αγορές, με έμφαση στην επαναχρησιμοποίηση
Ρόλος θεσμικού πλαισίου	Ρυθμιστικός και οικονομικός χαρακτήρας	Προληπτικός και συστημικός χαρακτήρας

Σχέση με zero-waste εργοτάξια	Υποστηρίζει υψηλή ανάκτηση και οργανωμένη αξιοποίηση	Υποστηρίζει περισσότερο την πρόληψη και τη διατήρηση αξίας υλικών
Βασικός περιορισμός	Κίνδυνος έμφασης στην ποσοτική ανάκτηση και όχι στην ποιοτική κυκλικότητα	Περιορισμοί σε αγορές, logistics και πρακτική εφαρμογή επαναχρησιμοποίησης

Πηγές: European Commission (2008, 2023), JRC (2024), Nordic Sustainable Construction (2023), RVO (2025).

4.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΦΑΡΜΟΖΟΜΕΝΩΝ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ

Η σύγκριση των εφαρμοζόμενων μεθοδολογιών διαχείρισης αποβλήτων κατασκευών και κατεδαφίσεων μεταξύ των χωρών της Βόρειας και της Κεντρικής Ευρώπης αναδεικνύει ουσιαστικές διαφοροποιήσεις ως προς τον τρόπο ενσωμάτωσης της κυκλικής οικονομίας και τον βαθμό ωριμότητας των σχετικών πρακτικών. Παρότι όλες οι χώρες λειτουργούν εντός του ίδιου ευρωπαϊκού κανονιστικού πλαισίου και επιδιώκουν την επίτευξη του στόχου ανάκτησης τουλάχιστον 70% των μη επικίνδυνων ΑΚΚ, οι μεθοδολογικές προσεγγίσεις διαφοροποιούνται σημαντικά τόσο ως προς τα μέσα όσο και ως προς τα αποτελέσματα (European Commission, 2008).

Στις χώρες της Κεντρικής Ευρώπης, όπως η Γερμανία, η Ολλανδία και η Αυστρία, οι μεθοδολογίες διαχείρισης χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό θεσμικής οργάνωσης και ισχυρή σύνδεση με την αγορά. Η έμφαση δίνεται κυρίως στη διαλογή στην πηγή, στην αποδοτική συλλογή και επεξεργασία των αποβλήτων και στην ανάπτυξη αγορών δευτερογενών υλικών. Τα οικονομικά εργαλεία, όπως τα τέλη ταφής και τα διαφοροποιημένα κόστη διαχείρισης, λειτουργούν ως βασικοί μηχανισμοί ενίσχυσης της ανακύκλωσης και της ανάκτησης (EEA, 2025). Η προσέγγιση αυτή μπορεί να χαρακτηριστεί ως κυρίως «downstream», καθώς επικεντρώνεται στη βελτιστοποίηση της διαχείρισης των αποβλήτων μετά την παραγωγή τους.

Παρά τα υψηλά ποσοστά ανάκτησης που επιτυγχάνονται, η βιβλιογραφία επισημαίνει ότι σημαντικό μέρος της αξιοποίησης αφορά εφαρμογές χαμηλής προστιθέμενης αξίας, όπως η επίχωση ή η χρήση υλικών σε δευτερεύουσες κατασκευαστικές εφαρμογές. Το Joint Research Centre τονίζει ότι η μετάβαση προς πραγματική κυκλικότητα απαιτεί μετατόπιση από την ποσοτική στην ποιοτική αξιολόγηση της ανακύκλωσης, με έμφαση στην επαναχρησιμοποίηση και στην ανακύκλωση υψηλής αξίας (JRC, 2024).

Αντίθετα, στις χώρες της Βόρειας Ευρώπης, όπως η Δανία, η Φινλανδία και η Νορβηγία, οι εφαρμοζόμενες μεθοδολογίες παρουσιάζουν μια περισσότερο «upstream» και ουσιαστική προσέγγιση. Η διαχείριση των αποβλήτων δεν αντιμετωπίζεται ως μεμονωμένο στάδιο, αλλά ενσωματώνεται σε όλο τον κύκλο ζωής των κατασκευών. Κεντρικό ρόλο διαδραματίζουν πρακτικές όπως ο κυκλικός σχεδιασμός, η αποσυναρμολόγηση (design for disassembly), η επιλεκτική κατεδάφιση και η συστηματική καταγραφή των υλικών με στόχο την επαναχρησιμοποίησή τους (Nordic Sustainable Construction, 2023).

Η προσέγγιση αυτή ενισχύεται από την αξιοποίηση ψηφιακών εργαλείων και συστημάτων ιχνηλασιμότητας, τα οποία επιτρέπουν την παρακολούθηση των ροών υλικών και διευκολύνουν την επαναχρησιμοποίηση σε διαφορετικά έργα. Ωστόσο, παρά την πρόοδο σε επίπεδο σχεδιασμού και στρατηγικής, η πρακτική εφαρμογή των μεθοδολογιών αυτών συναντά περιορισμούς, κυρίως λόγω της ανεπαρκούς ανάπτυξης αγορών δευτερογενών υλικών και των δυσκολιών στη διαχείριση logistics επαναχρησιμοποίησης (Nordic Council of Ministers, 2023).

Ένα κρίσιμο σημείο διαφοροποίησης μεταξύ των δύο περιφερειών αφορά, συνεπώς, τη θέση στην οποία παρεμβαίνουν οι εφαρμοζόμενες μεθοδολογίες στον κύκλο ζωής των κατασκευών. Στην Κεντρική Ευρώπη, η έμφαση δίνεται στη βελτίωση της διαχείρισης των αποβλήτων μετά την παραγωγή τους, ενώ στη Βόρεια Ευρώπη η έμφαση μετατοπίζεται στην πρόληψη και στον σχεδιασμό, με στόχο τη μείωση της παραγωγής αποβλήτων ήδη από τα αρχικά στάδια.

Η διαφοροποίηση αυτή έχει άμεση επίδραση και στην ποιότητα των αποτελεσμάτων. Ενώ τα μοντέλα της Κεντρικής Ευρώπης οδηγούν σε υψηλά ποσοστά ανάκτησης, τα μοντέλα της Βόρειας Ευρώπης εμφανίζουν μεγαλύτερη συμβατότητα με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας, καθώς δίνουν προτεραιότητα στη διατήρηση της αξίας των υλικών και στην επαναχρησιμοποίηση.

Στο πλαίσιο των εργοταξίων μηδενικών αποβλήτων, οι παραπάνω διαφορές αποκτούν ιδιαίτερη σημασία. Τα zero-waste εργοτάξια προϋποθέτουν συνδυασμό μεθοδολογιών που καλύπτουν τόσο το στάδιο του σχεδιασμού όσο και το στάδιο της διαχείρισης, ενσωματώνοντας πρακτικές πρόληψης, αποδοτικής χρήσης υλικών και υψηλής ποιότητας αξιοποίησης των αποβλήτων. Ως εκ τούτου, καμία από τις δύο προσεγγίσεις δεν επαρκεί από μόνη της. Η αποτελεσματική μετάβαση προς κυκλικά μοντέλα απαιτεί τη σύγκλιση των «downstream» πρακτικών της Κεντρικής Ευρώπης με τις «upstream» στρατηγικές της Βόρειας Ευρώπης.

Η σύγκριση των εφαρμοζόμενων μεθοδολογιών δείχνει ότι η επίτευξη υψηλών ποσοτικών επιδόσεων δεν συνεπάγεται απαραίτητα και υψηλό επίπεδο κυκλικότητας. Η πρόοδος προς πιο κυκλικά μοντέλα κατασκευής εξαρτάται από το κατά πόσο οι πρακτικές αυτές ενσωματώνονται σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής των έργων, με έμφαση όχι μόνο στην ποσότητα αλλά και στην ποιότητα της αξιοποίησης των υλικών.

4.4 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΡΑΚΤΙΚΩΝ ΣΤΟ ΕΡΓΟΤΑΞΙΟ (ΡΟΕΣ, LOGISTICS, ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ)

Η μετάβαση προς εργοτάξια μηδενικών αποβλήτων (zero-waste construction sites) εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον τρόπο με τον οποίο οργανώνονται οι ροές υλικών, τα logistics και η εκπαίδευση των εμπλεκόμενων φορέων. Σε αντίθεση με την παραδοσιακή προσέγγιση, όπου η διαχείριση των αποβλήτων αντιμετωπίζεται ως τελικό στάδιο της κατασκευαστικής διαδικασίας, οι σύγχρονες πρακτικές στη Βόρεια και Κεντρική Ευρώπη ενσωματώνουν τη λογική της πρόληψης και της αποδοτικής χρήσης πόρων ήδη από τη φάση σχεδιασμού και υλοποίησης του έργου.

Σε επίπεδο ροών υλικών, τα διαθέσιμα δεδομένα καταδεικνύουν ότι η αποτελεσματική διαχείριση προϋποθέτει ακριβή προγραμματισμό, έλεγχο των προμηθειών και συνεχή παρακολούθηση των ποσοτήτων υλικών που εισέρχονται και εξέρχονται από το εργοτάξιο. Σε ανάλυση 36 έργων στη Νορβηγία, καταγράφηκε μέση παραγωγή αποβλήτων περίπου 51 kg/m², με υψηλό ποσοστό διαλογής της τάξης του 89%, χωρίς όμως αυτό να μεταφράζεται σε αντίστοιχα υψηλά ποσοστά ανακύκλωσης, τα οποία περιορίζονται περίπου στο 32% (Fufa et al., 2023). Τα στοιχεία δείχνουν ότι η διαλογή στην πηγή, αν και απαραίτητη, δεν επαρκεί από μόνη της για την επίτευξη κυκλικής διαχείρισης.

Η ανάλυση των ροών δείχνει επίσης ότι συγκεκριμένα κλάσματα αποβλήτων, όπως το ξύλο, ο γύψος και τα μικτά απόβλητα, κυριαρχούν στον συνολικό όγκο, γεγονός που υποδηλώνει ότι οι στρατηγικές μείωσης πρέπει να είναι στοχευμένες και όχι οριζόντιες. Η πρόληψη παραγωγής αποβλήτων, η αποφυγή υπερπαραγγελιών και η επαναχρησιμοποίηση υλικών αποτελούν βασικά στοιχεία για τη μείωση των συνολικών ποσοτήτων και την αύξηση της αποδοτικότητας των εργοταξίων.

Ο ρόλος των logistics είναι εξίσου καθοριστικός, ιδιαίτερα σε σχέση με την επαναχρησιμοποίηση υλικών. Σε αντίθεση με τα νέα υλικά, τα επαναχρησιμοποιούμενα εξαρτώνται από τη χρονική διαθεσιμότητα, τη δυνατότητα αποθήκευσης και τη μεταφορά τους μεταξύ έργων. Στις χώρες της Βόρειας Ευρώπης, βασικά εμπόδια αποτελούν η έλλειψη χώρων προσωρινής αποθήκευσης, η χρονική ασυμβατότητα μεταξύ έργων και η περιορισμένη ανάπτυξη αγορών δευτερογενών υλικών (Nordic Sustainable Construction, 2023). Ως αποτέλεσμα, ακόμη και όταν τα υλικά είναι τεχνικά επαναχρησιμοποιήσιμα, η πρακτική αξιοποίησή τους παραμένει περιορισμένη.

Αντίθετα, στην Κεντρική Ευρώπη, και ιδιαίτερα στην Ολλανδία, η ανάπτυξη οργανωμένων δικτύων συνεργασίας, ψηφιακών πλατφορμών και εργαλείων ιχνηλασιμότητας επιτρέπει τη βελτιστοποίηση των logistics και τη διασύνδεση των ροών υλικών μεταξύ διαφορετικών έργων (RVO, 2025). Σε αυτή την περίπτωση, το εργοτάξιο εντάσσεται σε ένα ευρύτερο σύστημα κυκλικής οικονομίας, όπου η επαναχρησιμοποίηση και η ανακύκλωση υποστηρίζονται από υποδομές και αγορές.

Η εκπαίδευση και η ανάπτυξη δεξιοτήτων αποτελούν επίσης κρίσιμο παράγοντα για την επιτυχία των πρακτικών αυτών. Η αποτελεσματική διαλογή και διαχείριση των υλικών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την κατάρτιση των εργαζομένων και την κατανόηση των στόχων του έργου. Σύμφωνα με το Routemap for Zero Avoidable Waste in Construction, η μείωση αποβλήτων απαιτεί ενσωμάτωση σχετικών στόχων στα συμβατικά τεύχη, εκπαίδευση του εργατικού δυναμικού και παροχή κινήτρων στους εμπλεκόμενους φορείς (Construction Leadership Council, 2021). Η αλλαγή αυτή δεν αφορά μόνο τεχνικές πρακτικές, αλλά και τη συνολική κουλτούρα διαχείρισης των πόρων.

Στα zero-waste εργοταξίων, οι παραπάνω πρακτικές αποτυπώνονται σε συγκεκριμένους δείκτες απόδοσης, όπως η ποσότητα αποβλήτων ανά μονάδα επιφάνειας (kg/m^2), το ποσοστό διαλογής στην πηγή, το ποσοστό επαναχρησιμοποίησης και η εκτροπή από την ταφή. Οι δείκτες αυτοί επιτρέπουν την αντικειμενική αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των μέτρων και τη σύγκριση μεταξύ έργων και χωρών.

Η σύγκριση μεταξύ Βόρειας και Κεντρικής Ευρώπης αναδεικνύει δύο συμπληρωματικές προσεγγίσεις. Στη Βόρεια Ευρώπη, η έμφαση δίνεται στην πρόληψη, στον σχεδιασμό και στη θεσμική υποστήριξη των πρακτικών μηδενικών αποβλήτων, ενώ στην Κεντρική Ευρώπη δίνεται μεγαλύτερη έμφαση στη λειτουργία της αγοράς, στα logistics και στην αξιοποίηση των αποβλήτων μέσω οργανωμένων συστημάτων. Η αποτελεσματική εφαρμογή εργοταξίων μηδενικών αποβλήτων φαίνεται να απαιτεί συνδυασμό πρόληψης, σωστής οργάνωσης των ροών υλικών και λειτουργίας αξιόπιστων συστημάτων επαναχρησιμοποίησης και ανακύκλωσης.

4.5 ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΣΤΙΣ ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ: ΠΟΣΟΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ

Η αξιολόγηση των επιδόσεων στη διαχείριση αποβλήτων κατασκευών και κατεδαφίσεων στην Ευρωπαϊκή Ένωση βασίζεται σε ένα σύνολο ποσοτικών δεικτών και θεσμικών στόχων, οι οποίοι αποτυπώνουν τόσο το επίπεδο συμμόρφωσης των κρατών-μελών όσο και τον βαθμό μετάβασης προς την κυκλική οικονομία. Η European Commission, μέσω της Waste Framework Directive 2008/98/EC, έχει θέσει ως βασικό στόχο την επίτευξη τουλάχιστον 70% επαναχρησιμοποίησης, ανακύκλωσης και ανάκτησης των μη επικίνδυνων αποβλήτων ΑΚΚ, ο οποίος αποτελεί μέχρι σήμερα το βασικό σημείο αναφοράς για την αξιολόγηση των επιδόσεων (European Commission, 2008).

Σε επίπεδο συνολικής παραγωγής, τα απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων αποτελούν το μεγαλύτερο ρεύμα αποβλήτων στην Ευρώπη, αντιπροσωπεύοντας περίπου το 34-38% της συνολικής παραγωγής αποβλήτων (EEA, 2025). Σύμφωνα με στοιχεία της Eurostat, η συνολική ποσότητα ΑΚΚ υπερβαίνει τα 800 εκατομμύρια τόνους ετησίως, γεγονός που καθιστά τη διαχείρισή τους κρίσιμο πεδίο για την επίτευξη των στόχων της κυκλικής οικονομίας (Eurostat, 2023).

Ωστόσο, η επίτευξη υψηλών ποσοστών ανάκτησης δεν συνεπάγεται απαραίτητα υψηλό επίπεδο κυκλικότητας. Όπως επισημαίνεται από το Joint Research Centre, σημαντικό μέρος της καταγεγραμμένης ανάκτησης αφορά πρακτικές χαμηλής προστιθέμενης αξίας, όπως η χρήση αδρανών υλικών για επιχώσεις (backfilling), οι οποίες δεν συνιστούν ουσιαστική ανακύκλωση ή επαναχρησιμοποίηση υψηλής ποιότητας (JRC, 2024). Η διάκριση μεταξύ ποσοτικής ανάκτησης και ποιοτικής αξιοποίησης αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την ορθή ερμηνεία των επιδόσεων των κρατών-μελών.

Η ποσοτική σύγκριση μεταξύ χωρών αναδεικνύει σημαντικές διαφοροποιήσεις. Στην Κεντρική Ευρώπη, χώρες όπως η Ολλανδία παρουσιάζουν ποσοστά ανάκτησης που

προσεγγίζουν το 98-100%, ενώ η Γερμανία καταγράφει αντίστοιχα ποσοστά της τάξης του 90-93%, επιτυγχάνοντας σε μεγάλο βαθμό τους ευρωπαϊκούς στόχους μέσω ανεπτυγμένων συστημάτων διαχείρισης και ισχυρών θεσμικών εργαλείων (Eurostat, 2023; RVO, 2025). Αντίστοιχα, στη Βόρεια Ευρώπη, χώρες όπως η Δανία και η Φινλανδία εμφανίζουν υψηλά ποσοστά ανάκτησης (περίπου 85-90%), τα οποία συνοδεύονται από πιο συστηματική εφαρμογή πρακτικών πρόληψης και επαναχρησιμοποίησης σε επίπεδο έργου (Nordic Sustainable Construction, 2023).

Οι διαφορές αυτές σχετίζονται όχι μόνο με τα ποσοστά ανάκτησης, αλλά και με τον τρόπο εφαρμογής των πρακτικών διαχείρισης. Στις χώρες της Βόρειας Ευρώπης, η διαχείριση των αποβλήτων ενσωματώνεται ήδη από το στάδιο του σχεδιασμού, με έμφαση στη μείωση παραγωγής αποβλήτων, στη διαλογή στην πηγή και στην επαναχρησιμοποίηση υλικών. Σε έργα μεγάλης κλίμακας, καταγράφονται δείκτες παραγωγής αποβλήτων της τάξης των 20-40 kg/m², καθώς και υψηλά ποσοστά διαλογής και αξιοποίησης υλικών, γεγονός που συνάδει με τις αρχές των εργοταξίων μηδενικών αποβλήτων (Nordic Sustainable Construction, 2023). Αντίθετα, σε αρκετές χώρες της Κεντρικής Ευρώπης, η επίτευξη υψηλών ποσοστών ανάκτησης βασίζεται κυρίως σε αποδοτικά συστήματα επεξεργασίας αποβλήτων μετά την παραγωγή τους, χωρίς να δίνεται αντίστοιχη έμφαση στην πρόληψη.

Η αξιολόγηση της συμμόρφωσης των κρατών-μελών με την Οδηγία-Πλαίσιο για τα Απόβλητα δείχνει ότι, παρά τη γενική επίτευξη του στόχου του 70%, παραμένουν σημαντικές αποκλίσεις ως προς την ποιότητα των αποτελεσμάτων (Evaluation of CDW under WFD, 2025). Οι χώρες με υψηλότερο βαθμό ωριμότητας παρουσιάζουν καλύτερες επιδόσεις όχι μόνο στους δείκτες ανάκτησης, αλλά και σε δείκτες όπως η επαναχρησιμοποίηση υλικών, η εκτροπή από την ταφή και η συνολική μείωση παραγωγής αποβλήτων.

Η μετάβαση προς εργοτάξια μηδενικών αποβλήτων μεταβάλλει τον τρόπο αξιολόγησης των επιδόσεων. Πέρα από το ποσοστό ανάκτησης, δίνεται ιδιαίτερη έμφαση σε δείκτες όπως το ποσοστό επαναχρησιμοποίησης, ο δείκτης εκτροπής από ταφή (diversion rate) και η ποσότητα αποβλήτων ανά μονάδα επιφάνειας (kg/m²). Οι δείκτες αυτοί επιτρέπουν την πιο ολοκληρωμένη αποτύπωση της περιβαλλοντικής επίδοσης και αναδεικνύουν τη σημασία της πρόληψης και του σχεδιασμού στη διαχείριση των αποβλήτων.

Η συγκριτική ανάλυση καταδεικνύει ότι, ενώ τόσο η Βόρεια όσο και η Κεντρική Ευρώπη επιτυγχάνουν υψηλά ποσοτικά αποτελέσματα, διαφοροποιούνται σημαντικά ως προς τη στρατηγική προσέγγιση. Η Κεντρική Ευρώπη διακρίνεται για την επίτευξη υψηλών ποσοστών ανάκτησης μέσω ανεπτυγμένων συστημάτων διαχείρισης, ενώ η Βόρεια Ευρώπη προσεγγίζει περισσότερο τα πρότυπα της κυκλικής οικονομίας, δίνοντας έμφαση στην πρόληψη, την επαναχρησιμοποίηση και τη διατήρηση της αξίας των υλικών. Η σύγκλιση των δύο αυτών προσεγγίσεων αποτελεί βασική προϋπόθεση για την αποτελεσματική εφαρμογή των εργοταξίων μηδενικών αποβλήτων και τη μετάβαση σε ένα πλήρως κυκλικό μοντέλο στον κατασκευαστικό τομέα.

Πίνακας 14: Συγκριτική αξιολόγηση ποσοτικών επιδόσεων και βασικών δεικτών διαχείρισης ΑΚΚ στη Βόρεια και Κεντρική Ευρώπη

Παράμετρος αξιολόγησης	Κεντρική Ευρώπη	Βόρεια Ευρώπη
Ποσοστό ανάκτησης ΑΚΚ	Πολύ υψηλό (>90%)	Υψηλό (≈85–90%)
Εκτροπή από την ταφή	Πολύ υψηλή	Υψηλή
Έμφαση στην πρόληψη παραγωγής αποβλήτων	Μέτρια	Ισχυρή
Επαναχρησιμοποίηση υλικών	Περιορισμένη έως μέτρια	Μεγαλύτερη έμφαση και συστηματικότερη εφαρμογή
Ανακύκλωση υψηλής αξίας	Αναπτυσσόμενη	Μεγαλύτερη ενσωμάτωση στις στρατηγικές διαχείρισης
Παραγόμενα απόβλητα σε έργα μεγάλης κλίμακας	Μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις μεταξύ έργων	20–40 kg/m ² σε έργα με προηγμένες πρακτικές
Κυρίαρχη προσέγγιση	Ανάκτηση και αξιοποίηση των παραγόμενων αποβλήτων	Πρόληψη, κυκλικός σχεδιασμός και διατήρηση της αξίας των υλικών
Βαθμός συμβατότητας με την προσέγγιση zero-waste	Υψηλός ως προς την ανάκτηση	Υψηλός ως προς την πρόληψη και την κυκλικότητα

Πηγές: Eurostat (2023), JRC (2024), EEA (2025), Nordic Sustainable Construction (2023), Fufa et al. (2023), RVO (2025).

4.6 ΣΥΝΘΕΣΗ: ΚΟΙΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ, ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΜΠΕΙΡΙΑ

Η συγκριτική ανάλυση μεταξύ Βόρειας και Κεντρικής Ευρώπης δείχνει ότι, παρά τις διαφοροποιήσεις στις εθνικές πολιτικές και στις πρακτικές εφαρμογής, οι χώρες που εμφανίζουν υψηλότερη ωριμότητα στη διαχείριση αποβλήτων κατασκευών και κατεδαφίσεων στηρίζονται σε ορισμένα κοινά χαρακτηριστικά. Πρώτον, αξιοποιούν το ευρωπαϊκό θεσμικό πλαίσιο όχι μόνο ως υποχρέωση συμμόρφωσης, αλλά ως βάση για τη μετάβαση από τη διαχείριση αποβλήτων προς τη διαχείριση πόρων. Η Οδηγία-Πλαίσιο για τα Απόβλητα και ο στόχος ανάκτησης τουλάχιστον 70% των μη επικίνδυνων ΑΚΚ αποτελούν κοινό σημείο αναφοράς, ενώ δίνεται έμφαση στην επιλεκτική κατεδάφιση, στη χωριστή συλλογή υλικών και στη διευκόλυνση της επαναχρησιμοποίησης και της ανακύκλωσης (European Commission, 2008).

Δεύτερο κοινό στοιχείο αποτελεί η σταδιακή αναγνώριση ότι τα υψηλά ποσοστά ανάκτησης δεν συνεπάγονται απαραίτητα υψηλό επίπεδο κυκλικότητας. Όπως επισημαίνεται από το Joint Research Centre, σημαντικό μέρος της καταγεγραμμένης ανάκτησης αφορά εφαρμογές χαμηλής προστιθέμενης αξίας, όπως η επίχωση, γεγονός που καθιστά αναγκαία τη διάκριση μεταξύ ποσοτικής επίδοσης και ποιοτικής αξιοποίησης των υλικών (Cristóbal García et al., 2024). Η προσέγγιση αυτή αποτελεί

κρίσιμο σημείο για την αξιολόγηση των επιδόσεων στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας.

Η βασική διαφοροποίηση μεταξύ των δύο περιφερειών εντοπίζεται στον τρόπο με τον οποίο οργανώνεται η μετάβαση προς την κυκλικότητα. Στην Κεντρική Ευρώπη, χώρες όπως η Ολλανδία, η Γερμανία και η Αυστρία βασίζονται κυρίως σε ισχυρούς κανονιστικούς μηχανισμούς, οικονομικά εργαλεία και ανεπτυγμένες αγορές δευτερογενών υλικών. Η προσέγγιση αυτή οδηγεί σε υψηλά ποσοτικά αποτελέσματα και σε αποδοτική αξιοποίηση των ροών αποβλήτων, χωρίς όμως να εξασφαλίζει πάντοτε πρόληψη ή επαναχρησιμοποίηση υψηλής αξίας.

Αντίθετα, στη Βόρεια Ευρώπη, η κυκλικότητα ενσωματώνεται πιο συστηματικά στον σχεδιασμό και στον κύκλο ζωής των κατασκευών. Οι σκανδιναβικές χώρες δίνουν έμφαση στην πρόληψη παραγωγής αποβλήτων, στην επιλεκτική κατεδάφιση, στη χαρτογράφηση υλικών και στην ανάπτυξη εργαλείων που διευκολύνουν την επαναχρησιμοποίηση. Η προσέγγιση αυτή ευθυγραμμίζεται περισσότερο με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας, αν και η εφαρμογή της περιορίζεται συχνά από την ανεπαρκή ανάπτυξη αγορών και υποδομών επαναχρησιμοποίησης (Nordic Council of Ministers, 2023).

Η σύνθεση των παραπάνω ευρημάτων μπορεί να αποτυπωθεί σε τρεις βασικές διαστάσεις. Ως προς τα κοινά στοιχεία, όλες οι χώρες λειτουργούν εντός ενός κοινού θεσμικού πλαισίου και επιδιώκουν υψηλά ποσοστά ανάκτησης. Ως προς τις διαφορές, η Κεντρική Ευρώπη δίνει μεγαλύτερη έμφαση σε ρυθμιστικά και οικονομικά εργαλεία που ενισχύουν την ανάκτηση, ενώ η Βόρεια Ευρώπη εστιάζει περισσότερο στην πρόληψη και στον σχεδιασμό. Ως προς τα μαθήματα που προκύπτουν, καθίσταται σαφές ότι η μετάβαση προς την κυκλική κατασκευή δεν μπορεί να βασιστεί αποκλειστικά σε μία από τις δύο προσεγγίσεις.

Ένα βασικό συμπέρασμα αφορά την ανάγκη μετατόπισης από τη λογική της τελικής διαχείρισης στη λογική του κύκλου ζωής. Σύμφωνα με την ιεράρχηση των αποβλήτων, η πραγματική κυκλικότητα επιτυγχάνεται όταν η πρόληψη, η επαναχρησιμοποίηση και η ανακύκλωση υψηλής ποιότητας προηγούνται της ανάκτησης χαμηλής αξίας (Zhang et al., 2022). Η αξιολόγηση των επιδόσεων πρέπει να βασίζεται σε σύνθετους δείκτες, όπως η παραγωγή αποβλήτων ανά μονάδα επιφάνειας (kg/m^2), το ποσοστό επαναχρησιμοποίησης, η εκτροπή από την ταφή και η ποιότητα της ανακύκλωσης.

Ένα δεύτερο σημαντικό μάθημα αφορά τον ρόλο της αγοράς και των υποδομών. Η εμπειρία της Κεντρικής Ευρώπης δείχνει ότι η ύπαρξη ανεπτυγμένων αγορών δευτερογενών υλικών αποτελεί βασική προϋπόθεση για την αποτελεσματική αξιοποίηση των αποβλήτων, ενώ η εμπειρία της Βόρειας Ευρώπης αναδεικνύει τη σημασία του σχεδιασμού, της πληροφορίας και της ιχνηλασιμότητας των υλικών. Χωρίς τον συνδυασμό αυτών των στοιχείων, η επαναχρησιμοποίηση παραμένει περιορισμένη, ακόμη και όταν είναι τεχνικά εφικτή.

Η ευρωπαϊκή εμπειρία δείχνει ότι η αποτελεσματική μετάβαση προς εργοτάξια χαμηλών ή μηδενικών αποβλήτων δεν εξαρτάται από μία μόνο στρατηγική. Η Κεντρική Ευρώπη παρουσιάζει ιδιαίτερα ανεπτυγμένους μηχανισμούς ανάκτησης και αξιοποίησης αποβλήτων, ενώ η Βόρεια Ευρώπη δίνει μεγαλύτερη έμφαση στην πρόληψη, στον σχεδιασμό και στην επαναχρησιμοποίηση υλικών. Η συνδυαστική αξιοποίηση των δύο μοντέλων φαίνεται να αποτελεί την πιο ολοκληρωμένη προσέγγιση για τη μετάβαση προς πιο αποδοτικά και κυκλικά συστήματα διαχείρισης στον κατασκευαστικό τομέα καθώς η σύγχρονη ευρωπαϊκή πολιτική δίνει ολοένα μεγαλύτερη έμφαση στην πρόληψη παραγωγής αποβλήτων, στην επαναχρησιμοποίηση και στη διατήρηση της αξίας των υλικών.

Πίνακας 15: Κοινά στοιχεία, βασικές διαφορές και κύρια διδάγματα από την ευρωπαϊκή εμπειρία στη διαχείριση ΑΚΚ

Κοινά στοιχεία	Βασικές διαφορές	Κύρια διδάγματα
Κοινό ευρωπαϊκό θεσμικό πλαίσιο και στόχος ανάκτησης τουλάχιστον 70% των μη επικίνδυνων ΑΚΚ	Η Κεντρική Ευρώπη δίνει μεγαλύτερη έμφαση σε κανονιστικά και οικονομικά εργαλεία, ενώ η Βόρεια Ευρώπη στην πρόληψη και στον κυκλικό σχεδιασμό	Η αποτελεσματική μετάβαση προς την κυκλική οικονομία απαιτεί συνδυασμό των δύο προσεγγίσεων
Υψηλά ποσοστά ανάκτησης και αυξανόμενη ενσωμάτωση κυκλικών πρακτικών	Η Κεντρική Ευρώπη εστιάζει περισσότερο στην αξιοποίηση των αποβλήτων μετά την παραγωγή τους, ενώ η Βόρεια Ευρώπη παρεμβαίνει ήδη από το στάδιο του σχεδιασμού	Η πρόληψη παραγωγής αποβλήτων παρουσιάζει μεγαλύτερη περιβαλλοντική αξία από την απλή ανάκτηση
Ανάπτυξη ψηφιακών εργαλείων και συστημάτων παρακολούθησης υλικών	Διαφορετικός βαθμός ανάπτυξης αγορών δευτερογενών υλικών και υποδομών επαναχρησιμοποίησης	Η επαναχρησιμοποίηση απαιτεί κατάλληλες αγορές, υποδομές και αξιόπιστη πληροφορία
Αυξανόμενη αναγνώριση της σημασίας της κυκλικότητας στον κατασκευαστικό τομέα	Διαφορετικός βαθμός ενσωμάτωσης της κυκλικής οικονομίας στον κύκλο ζωής των κατασκευών	Η αξιολόγηση των επιδόσεων πρέπει να βασίζεται όχι μόνο σε ποσοτικούς δείκτες, αλλά και στην ποιότητα της αξιοποίησης των υλικών

Ενίσχυση της χρήσης εργαλείων αξιολόγησης και δεικτών επίδοσης	Διαφορετική έμφαση μεταξύ ανάκτησης, ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης	Η μετάβαση προς zero-waste εργοτάξια προϋποθέτει συστημική προσέγγιση που συνδυάζει σχεδιασμό, αγορές, τεχνολογία και θεσμική υποστήριξη
--	--	--

Πηγές: European Commission (2008), Zhang et al. (2022), Nordic Council of Ministers (2023), Cristóbal García et al. (2024), JRC (2024).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ

5.1 ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΕΥΡΗΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία ανέδειξε ότι ο κατασκευαστικός τομέας αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους τομείς για τη μετάβαση προς την κυκλική οικονομία, τόσο λόγω της έντασης χρήσης φυσικών πόρων όσο και λόγω της μεγάλης παραγωγής αποβλήτων κατασκευών και κατεδαφίσεων. Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, τα ΑΚΚ αντιπροσωπεύουν περίπου το 34-38% της συνολικής παραγωγής αποβλήτων, γεγονός που καθιστά τη διαχείριση τους βασικό ζήτημα περιβαλλοντικής πολιτικής.

Από τη μελέτη του θεσμικού πλαισίου προκύπτει ότι, παρά την ύπαρξη κοινών ευρωπαϊκών στόχων, όπως η επίτευξη τουλάχιστον 70% ανάκτησης των μη επικίνδυνων ΑΚΚ, οι επιδόσεις των κρατών-μελών διαφέρουν σημαντικά τόσο ως προς την ποσότητα όσο και ως προς την ποιότητα της διαχείρισης. Σε αρκετές περιπτώσεις, τα ποσοστά ανάκτησης υπερβαίνουν το 85-90%, ωστόσο σημαντικό μέρος αυτής της ανάκτησης αφορά εφαρμογές χαμηλής προστιθέμενης αξίας, όπως η επίχωση. Επομένως η υψηλή ποσοτική επίδοση δεν συνεπάγεται απαραίτητα με ουσιαστική κυκλικότητα, καθιστώντας αναγκαία τη διάκριση μεταξύ ανάκτησης υλικών και πραγματικής διατήρησης της αξίας τους μέσα στον κύκλο ζωής των κατασκευών.

Η μελέτη των μεθοδολογιών και πρακτικών σε έργα μεγάλης κλίμακας έδειξε ότι η αποτελεσματική διαχείριση των αποβλήτων δεν περιορίζεται στην επεξεργασία των παραγόμενων ροών, αλλά συνδέεται άμεσα με τον σχεδιασμό, την εργοταξιακή οργάνωση και τη διαχείριση των ροών υλικών. Τα zero-waste εργοταξία βασίζονται κυρίως στην πρόληψη παραγωγής αποβλήτων, στην επαναχρησιμοποίηση και στην υψηλής ποιότητας ανακύκλωση, ενσωματώνοντας αρχές κυκλικού σχεδιασμού ήδη από τα πρώιμα στάδια ανάπτυξης ενός έργου.

Η συγκριτική ανάλυση μεταξύ Βόρειας και Κεντρικής Ευρώπης ανέδειξε δύο διαφορετικές, αλλά σε αρκετά σημεία συμπληρωματικές προσεγγίσεις. Στην Κεντρική Ευρώπη, η διαχείριση βασίζεται κυρίως σε κανονιστικά και οικονομικά εργαλεία που ενισχύουν την ανάκτηση και την ανάπτυξη αγορών δευτερογενών υλικών. Αντίθετα, στη Βόρεια Ευρώπη δίνεται μεγαλύτερη έμφαση στην πρόληψη, στον κυκλικό σχεδιασμό και στην ενσωμάτωση της κυκλικότητας σε όλο τον κύκλο ζωής των κατασκευών, με στόχο τη μεγαλύτερη διατήρηση της αξίας των υλικών.

Το βασικό συμπέρασμα της έρευνας είναι ότι η αποτελεσματική μετάβαση προς εργοτάξια μηδενικών αποβλήτων δεν μπορεί να βασιστεί αποκλειστικά σε μία μόνο προσέγγιση, αλλά απαιτεί τον συνδυασμό υψηλών επιδόσεων ανάκτησης, πρόληψης αποβλήτων και ουσιαστικής αξιοποίησης των υλικών. Η σύγκλιση αυτών των στοιχείων αποτελεί κρίσιμη προϋπόθεση για τη μετάβαση του κατασκευαστικού τομέα σε πιο βιώσιμα και αποδοτικά πρότυπα διαχείρισης πόρων.

Η παρούσα εργασία συνέβαλε στη συνδυαστική εξέταση θεσμικών, τεχνικών, οργανωτικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων που σχετίζονται με τον σχεδιασμό και τη λειτουργία εργοταξίων χαμηλών ή μηδενικών αποβλήτων. Η συγκριτική ανάλυση των πρακτικών που εφαρμόζονται σε χώρες της Βόρειας και της Κεντρικής Ευρώπης ανέδειξε ότι η αποτελεσματική μετάβαση προς πιο κυκλικά πρότυπα διαχείρισης δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την επίτευξη υψηλών ποσοστών ανάκτησης, αλλά από τον συνδυασμό μέτρων πρόληψης, επαναχρησιμοποίησης, ποιοτικής ανακύκλωσης, κατάλληλης οργάνωσης των εργοταξίων και υποστηρικτικών θεσμικών εργαλείων. Παράλληλα, η εργασία ανέδειξε στοιχεία και πρακτικές που μπορούν, με τις απαραίτητες προσαρμογές, να αξιοποιηθούν και στο ελληνικό κατασκευαστικό περιβάλλον, συμβάλλοντας στη σταδιακή ενσωμάτωση των αρχών της κυκλικής οικονομίας.

5.2 ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΤΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΠΡΑΚΤΙΚΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Η ελληνική πραγματικότητα παρουσιάζει σημαντικές διαφοροποιήσεις σε σχέση με τις χώρες της Βόρειας και Κεντρικής Ευρώπης, τόσο ως προς τη δομή του κατασκευαστικού τομέα όσο και ως προς το επίπεδο θεσμικής ωριμότητας και ανάπτυξης των αγορών δευτερογενών υλικών. Παρά τη σταδιακή προσαρμογή στο ευρωπαϊκό θεσμικό πλαίσιο, η εφαρμογή κυκλικών πρακτικών στη διαχείριση των ΑΚΚ παραμένει περιορισμένη.

Στην πράξη, η ελληνική αγορά εξακολουθεί να δίνει μεγαλύτερη έμφαση στην τελική διαχείριση των αποβλήτων και λιγότερο στην πρόληψη, στην επιλεκτική κατεδάφιση και στην επαναχρησιμοποίηση υλικών. Αυτό δείχνει ότι υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης, κυρίως σε επίπεδο οργάνωσης, ελέγχου και ανάπτυξης κατάλληλων υποδομών.

Η μελέτη των ευρωπαϊκών παραδειγμάτων έδειξε ότι η προσαρμογή των βέλτιστων πρακτικών στην Ελλάδα είναι εφικτή, αλλά δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω απλής μεταφοράς μοντέλων. Απαιτείται προσαρμογή στις τοπικές συνθήκες, λαμβάνοντας υπόψη τον μικρότερο μέσο όγκο έργων, την κατακερματισμένη δομή του κατασκευαστικού κλάδου, την περιορισμένη εμπειρία σε διαδικασίες αποσυναρμολόγησης και την απουσία οργανωμένων αγορών επαναχρησιμοποίησης υλικών.

Στο ελληνικό πλαίσιο, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν πρακτικές που μπορούν να εφαρμοστούν σταδιακά και χωρίς ιδιαίτερα υψηλό αρχικό κόστος. Μεταξύ αυτών

περιλαμβάνονται η βελτίωση της διαλογής αποβλήτων στην πηγή μέσω καλύτερης οργάνωσης του εργοταξίου, η συστηματική καταγραφή των ροών υλικών, η μείωση απωλειών μέσω ορθολογικής διαχείρισης προμηθειών και η ενίσχυση της χρήσης προκατασκευασμένων στοιχείων όπου είναι εφικτό. Οι πρακτικές αυτές δεν απαιτούν απαραίτητα ριζική αλλαγή του τρόπου λειτουργίας των εργοταξίων, αλλά μπορούν να αποτελέσουν ένα πρώτο βήμα προς πιο κυκλικές μορφές οργάνωσης.

Η αξιοποίηση ψηφιακών εργαλείων, όπως το BIM, μπορεί επίσης να υποστηρίξει αυτή τη μετάβαση. Μέσω αυτού είναι δυνατή η ακριβέστερη εκτίμηση των ποσοτήτων υλικών, η καλύτερη παρακολούθηση των ροών και ο περιορισμός των αστοχιών κατά τη φάση του σχεδιασμού και της κατασκευής. Η εφαρμογή του, βέβαια, προϋποθέτει κατάλληλη τεχνογνωσία και εξοικείωση των εμπλεκόμενων φορέων.

Ιδιαίτερη σημασία έχει επίσης η ανάπτυξη τοπικών δικτύων συνεργασίας μεταξύ κατασκευαστικών εταιρειών, διαχειριστών αποβλήτων και φορέων της αγοράς, με στόχο τη δημιουργία αλυσίδων αξίας για τα δευτερογενή υλικά. Η ενίσχυση της ιχνηλασιμότητας και της τεκμηρίωσης των υλικών μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην αύξηση της εμπιστοσύνης της αγοράς και, κατ' επέκταση, στην προώθηση της επαναχρησιμοποίησης.

Συνεπώς η προσαρμογή των ευρωπαϊκών πρακτικών στην Ελλάδα πρέπει να γίνει με ρεαλιστικό και σταδιακό τρόπο. Δεν αρκεί η εισαγωγή τεχνικών λύσεων, αλλά απαιτείται ταυτόχρονα ενίσχυση της θεσμικής εφαρμογής, ανάπτυξη της αγοράς και βελτίωση της οργάνωσης του κατασκευαστικού τομέα. Υπό αυτή την έννοια, η μετάβαση προς πιο κυκλικά και zero-waste εργοτάξια στην Ελλάδα αποτελεί περισσότερο ζήτημα ευρύτερης αναδιοργάνωσης του κλάδου παρά απλής υιοθέτησης τεχνολογικών πρακτικών.

Παρά τις υφιστάμενες αδυναμίες, η ελληνική πραγματικότητα παρουσιάζει σημαντικές δυνατότητες σταδιακής προσαρμογής στις αρχές της κυκλικής οικονομίας. Η βελτίωση της διαλογής στην πηγή, η αποτελεσματικότερη εργοταξιακή οργάνωση, η αξιοποίηση ψηφιακών τεχνολογιών και η ανάπτυξη αξιόπιστων αγορών δευτερογενών υλικών μπορούν να συμβάλουν ουσιαστικά προς αυτή την κατεύθυνση.

Συνολικά, η μετάβαση προς εργοτάξια μηδενικών αποβλήτων δεν αποτελεί μόνο περιβαλλοντική απαίτηση, αλλά και αναγκαία κατεύθυνση για τον εκσυγχρονισμό και τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα του κατασκευαστικού τομέα. Η εφαρμογή πιο κυκλικών προσεγγίσεων στη διαχείριση των ΑΚΚ μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά τόσο στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων όσο και στη δημιουργία πιο αποδοτικών και ανθεκτικών μοντέλων κατασκευής στο μέλλον.

5.3 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΕΡΓΟΤΑΞΙΩΝ ΜΕ ΜΗΔΕΝΙΚΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ

Ο σχεδιασμός εργοταξίων μηδενικών αποβλήτων στην Ελλάδα απαιτεί την υιοθέτηση μιας ολοκληρωμένης προσέγγισης, η οποία καλύπτει όλα τα στάδια του κύκλου ζωής του έργου, από τον αρχικό σχεδιασμό έως την κατασκευή και την αποδόμηση.

Ένα εργοτάξιο zero-waste δεν βασίζεται σε μεμονωμένες πρακτικές, αλλά σε συνδυασμό τεχνικών, οργανωτικών και διαχειριστικών παρεμβάσεων. Σε επίπεδο σχεδιασμού, είναι σημαντικό να τίθενται από τα αρχικά στάδια στόχοι μείωσης αποβλήτων, μέσω της βελτιστοποίησης της χρήσης υλικών, της τυποποίησης των κατασκευαστικών λύσεων και της επιλογής υλικών που μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν ή να ανακυκλωθούν με υψηλή ποιότητα.

Η προσέγγιση «σχεδιασμός για αποσυναρμολόγηση» μπορεί να συμβάλει σημαντικά, ιδίως σε έργα μεγάλης κλίμακας, καθώς διευκολύνει την αποσυναρμολόγηση και την επαναχρησιμοποίηση δομικών στοιχείων στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Με τον τρόπο αυτό, τα υλικά δεν αντιμετωπίζονται ως μελλοντικά απόβλητα, αλλά ως πόροι που μπορούν να αξιοποιηθούν ξανά.

Σε επίπεδο εργοταξιακής οργάνωσης, απαιτείται σαφής σχεδιασμός των ροών υλικών, με πρόβλεψη κατάλληλων χώρων για διαλογή, αποθήκευση και προσωρινή συγκέντρωση αποβλήτων. Η διαλογή στην πηγή αποτελεί βασική προϋπόθεση για την αξιοποίηση των υλικών και πρέπει να συνοδεύεται από σαφείς διαδικασίες, κατάλληλη σήμανση και συνεχή έλεγχο.

Στην ελληνική πραγματικότητα, όπου τα εργοτάξια είναι συχνά περιορισμένου χώρου, η αποτελεσματική διάταξη και οργάνωση των λειτουργιών αποκτούν ακόμη μεγαλύτερη σημασία. Ακόμη και μικρές οργανωτικές παρεμβάσεις, όπως η σαφής χωροθέτηση κάδων ή η καλύτερη αλληλουχία των εργασιών, μπορούν να μειώσουν τις απώλειες υλικών και να βελτιώσουν τη διαχείριση των αποβλήτων.

Η προμήθεια υλικών μπορεί να συμβάλει στη μείωση των αποβλήτων. Η εφαρμογή της λογικής just-in-time περιορίζει τις περιττές αποθηκεύσεις, οι οποίες συχνά οδηγούν σε φθορές, απώλειες και πλεονάζοντα υλικά. Παράλληλα, η χρήση προκατασκευασμένων στοιχείων μπορεί να μειώσει τα σφάλματα κατά την κατασκευή και να περιορίσει σημαντικά τα απόβλητα που παράγονται στο εργοτάξιο.

Η αξιοποίηση ψηφιακών εργαλείων, όπως το BIM, μπορεί να ενισχύσει τον προγραμματισμό και την παρακολούθηση των ροών υλικών, επιτρέποντας ακριβέστερη εκτίμηση ποσοτήτων και έγκαιρη λήψη αποφάσεων. Μέσω της ψηφιακής τεκμηρίωσης διευκολύνεται η καλύτερη διαχείριση των αποβλήτων και η υποστήριξη πρακτικών επαναχρησιμοποίησης.

Εξίσου σημαντική είναι και η εκπαίδευση των εμπλεκόμενων φορέων. Η επιτυχία ενός zero-waste εργοταξίου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το αν οι εργαζόμενοι, οι εργολάβοι, οι μελετητές και οι διαχειριστές αποβλήτων κατανοούν τον ρόλο τους. Η σαφής κατανομή ευθυνών, η παρακολούθηση δεικτών επίδοσης, όπως τα kg/m² παραγόμενων αποβλήτων και τα ποσοστά διαλογής, καθώς και η ενσωμάτωση σχετικών στόχων στα συμβατικά τεύχη των έργων μπορούν να ενισχύσουν σημαντικά την εφαρμογή των μέτρων.

Ο σχεδιασμός εργοταξίων μηδενικών αποβλήτων προϋποθέτει τον συντονισμό τεχνικών, οργανωτικών και διαχειριστικών παραμέτρων σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής ενός έργου. Η αποτελεσματική εφαρμογή των σχετικών πρακτικών εξαρτάται από την ενσωμάτωσή τους ήδη από τα πρώτα στάδια σχεδιασμού και από τη συστηματική εφαρμογή τους κατά τη διάρκεια υλοποίησης του έργου.

5.4 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΘΕΣΜΙΚΩΝ ΚΑΙ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΠΑΡΕΜΒΑΣΕΩΝ

Η μετάβαση προς εργοτάξια μηδενικών αποβλήτων δεν μπορεί να επιτευχθεί μόνο μέσω τεχνικών παρεμβάσεων, αλλά απαιτεί ένα συνεκτικό θεσμικό και πολιτικό πλαίσιο, το οποίο να στηρίζει στην πράξη την πρόληψη, την επαναχρησιμοποίηση και την ανακύκλωση υψηλής ποιότητας των ΑΚΚ.

Ιδιαίτερη σημασία έχει η ενίσχυση των υποχρεώσεων για διαλογή στην πηγή και επιλεκτική κατεδάφιση μέσω σαφών και δεσμευτικών κανονισμών. Η καθιέρωση υποχρεωτικών προ-κατεδαφιστικών ελέγχων, κυρίως σε έργα ανακαίνισης και κατεδάφισης, μπορεί να βελτιώσει αρκετά την ποιότητα των παραγόμενων ρευμάτων αποβλήτων. Με αυτό τον τρόπο διευκολύνεται η αναγνώριση υλικών που μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν ή να ανακυκλωθούν αποτελεσματικότερα.

Στην Ελλάδα, όπου τέτοιες πρακτικές δεν έχουν ακόμη αναπτυχθεί σε μεγάλο βαθμό, η θεσμική τους ενίσχυση είναι απαραίτητη. Δεν αρκεί να υπάρχουν γενικές κατευθύνσεις. Χρειάζονται συγκεκριμένες απαιτήσεις, έλεγχοι και μηχανισμοί εφαρμογής, ώστε οι πρακτικές αυτές να ενταχθούν στην καθημερινή λειτουργία των έργων.

Τα οικονομικά εργαλεία μπορούν επίσης να επηρεάσουν ουσιαστικά τη λειτουργία της αγοράς. Η αύξηση των τελών ταφής, σε συνδυασμό με την παροχή κινήτρων για επαναχρησιμοποίηση και ανακύκλωση υψηλής ποιότητας, μπορεί να καταστήσει τις κυκλικές πρακτικές πιο ανταγωνιστικές σε σχέση με τις γραμμικές λύσεις διαχείρισης. Όταν η απόρριψη παραμένει οικονομικά φθηνότερη από την ανάκτηση, η μετάβαση σε πιο βιώσιμες πρακτικές γίνεται πιο δύσκολη.

Η ενσωμάτωση περιβαλλοντικών κριτηρίων στις δημόσιες συμβάσεις μπορεί να αποτελέσει ακόμη ένα σημαντικό εργαλείο. Το Δημόσιο, ως μεγάλος αναθέτων φορέας, μπορεί να δημιουργήσει ζήτηση για ανακυκλωμένα και επαναχρησιμοποιημένα υλικά. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να συμβάλει στη σταδιακή ωρίμανση της αγοράς δευτερογενών υλικών.

Απαραίτητη είναι επίσης η θέσπιση σαφών προδιαγραφών ποιότητας για τα δευτερογενή υλικά. Η έλλειψη εμπιστοσύνης στην ποιότητα αυτών των υλικών αποτελεί ένα από τα βασικά εμπόδια για την ευρύτερη χρήση τους. Η ανάπτυξη μηχανισμών πιστοποίησης και τεχνικών προτύπων μπορεί να περιορίσει αυτή την αβεβαιότητα και να ενισχύσει τη χρήση τους τόσο σε δημόσια όσο και σε ιδιωτικά έργα.

Η ενσωμάτωση ψηφιακών εργαλείων και συστημάτων ιχνηλασιμότητας σε εθνικό επίπεδο μπορεί επίσης να βελτιώσει σημαντικά τη διαθεσιμότητα δεδομένων και τη διαφάνεια στη διαχείριση των αποβλήτων. Η δημιουργία ενιαίων βάσεων δεδομένων, η καταγραφή των ποσοτήτων και η παρακολούθηση δεικτών, όπως η παραγωγή αποβλήτων ανά μονάδα επιφάνειας (kg/m^2), μπορούν να βοηθήσουν στον καλύτερο σχεδιασμό πολιτικών. Χωρίς αξιόπιστα δεδομένα, η αξιολόγηση της προόδου παραμένει περιορισμένη.

Τέλος, η εκπαίδευση και κατάρτιση των επαγγελματιών του κατασκευαστικού κλάδου αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την επιτυχή εφαρμογή των παραπάνω μέτρων. Η μετάβαση προς κυκλικά και εργοτάξια μηδενικών ή χαμηλών αποβλήτων απαιτεί νέες δεξιότητες σε θέματα κυκλικού σχεδιασμού, διαλογής αποβλήτων, χρήσης ψηφιακών εργαλείων και αξιοποίησης δευτερογενών υλικών. Η εκπαίδευση μηχανικών, εργολάβων, τεχνιτών και διαχειριστών αποβλήτων μπορεί να ενισχύσει ουσιαστικά την ικανότητα του κλάδου να εφαρμόσει τις απαιτούμενες αλλαγές.

Η αποτελεσματική εφαρμογή των παραπάνω παρεμβάσεων προϋποθέτει συντονισμένη δράση μεταξύ δημόσιων φορέων, κατασκευαστικών επιχειρήσεων και των εμπλεκόμενων επαγγελματιών του τεχνικού κλάδου. Η δημιουργία σταθερού θεσμικού πλαισίου, η παροχή κατάλληλων οικονομικών κινήτρων και η ανάπτυξη αξιόπιστων αγορών δευτερογενών υλικών αποτελούν βασικές προϋποθέσεις για τη σταδιακή μετάβαση προς περισσότερο βιώσιμα πρότυπα διαχείρισης των ΑΚΚ.

5.5 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Παρά την προσπάθεια για μια ολοκληρωμένη και συστηματική προσέγγιση του θέματος, η παρούσα έρευνα παρουσιάζει ορισμένους περιορισμούς, οι οποίοι σχετίζονται κυρίως με τη διαθεσιμότητα των δεδομένων, τη συγκρισιμότητα των ευρωπαϊκών στοιχείων και τη μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθήθηκε.

Ένας βασικός περιορισμός αφορά τις διαφορετικές μεθοδολογίες καταγραφής των ΑΚΚ μεταξύ των κρατών-μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Οι ορισμοί, οι κατηγορίες αποβλήτων και οι μεθοδολογίες υπολογισμού δεν είναι πάντα πλήρως συγκρίσιμες. Αυτό δυσκολεύει την άμεση σύγκριση των επιδόσεων μεταξύ χωρών. Ιδιαίτερα η διαφορετική αντιμετώπιση της επίχωσης επηρεάζει σημαντικά την ερμηνεία των ποσοστών ανάκτησης.

Επιπλέον, η έρευνα βασίστηκε κυρίως σε δευτερογενή δεδομένα και βιβλιογραφικές πηγές, καθώς και μελέτες περίπτωσης από χώρες με υψηλό βαθμό ωριμότητας στη διαχείριση των ΑΚΚ. Η επιλογή αυτή επέτρεψε τη συγκριτική ανάλυση και την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων. Ωστόσο, ενδέχεται να περιορίζει τη δυνατότητα άμεσης γενίκευσης των αποτελεσμάτων στην ελληνική πραγματικότητα, όπου οι θεσμικές και αγοραστικές συνθήκες διαφοροποιούνται σημαντικά.

Ένας ακόμη περιορισμός αφορά την απουσία πρωτογενούς εμπειρικής έρευνας σε ελληνικά εργοτάξια. Η συλλογή δεδομένων από πραγματικά έργα, όπως η καταγραφή

ποσοτήτων αποβλήτων, η ανάλυση των ροών υλικών και η αξιολόγηση των εφαρμοζόμενων πρακτικών, θα μπορούσε να προσφέρει πιο ακριβή και ποσοτικοποιημένα συμπεράσματα, ενισχύοντας τη σύνδεση μεταξύ ανάλυσης και πρακτικής εφαρμογής.

Για τη μελλοντική έρευνα προτείνεται η διεξαγωγή εμπειρικών μελετών σε έργα διαφορετικής κλίμακας και τύπου στην Ελλάδα, με στόχο την καταγραφή δεικτών επίδοσης, όπως η παραγωγή αποβλήτων ανά μονάδα επιφάνειας (kg/m^2), τα ποσοστά διαλογής και η επαναχρησιμοποίηση υλικών. Παράλληλα, θα ήταν χρήσιμη η ανάπτυξη προτύπων δεικτών αξιολόγησης προσαρμοσμένων στις ιδιαιτερότητες της ελληνικής αγοράς.

Σημαντικό πεδίο μελλοντικής μελέτης αποτελεί και η οικονομική βιωσιμότητα των κυκλικών πρακτικών. Η επαναχρησιμοποίηση υλικών, η επιλεκτική κατεδάφιση και η χρήση δευτερογενών υλικών πρέπει να αξιολογηθούν όχι μόνο περιβαλλοντικά, αλλά και οικονομικά. Η ανάλυση κόστους-οφέλους μπορεί να δείξει σε ποιες περιπτώσεις οι πρακτικές αυτές είναι άμεσα εφαρμόσιμες και πού απαιτούνται πρόσθετα κίνητρα.

Επιπλέον, μελλοντικές έρευνες θα μπορούσαν να εξετάσουν πιο αναλυτικά τον ρόλο των ψηφιακών εργαλείων, όπως το BIM και οι ψηφιακές πλατφόρμες ιχνηλασιμότητας και τα material passports. Τα εργαλεία αυτά μπορούν να υποστηρίξουν την καταγραφή, την παρακολούθηση και την επαναχρησιμοποίηση υλικών, αλλά η εφαρμογή τους στην ελληνική αγορά χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση.

Η διερεύνηση της σχέσης μεταξύ τεχνικών, θεσμικών και οικονομικών παραγόντων μπορεί να συμβάλει στην ανάπτυξη πιο ολοκληρωμένων μοντέλων για τη μετάβαση προς κυκλικά και zero-waste εργοτάξια. Η αναγνώριση των περιορισμών της παρούσας εργασίας δεν μειώνει τη σημασία των ευρημάτων της. Αντίθετα, δείχνει ότι το ζήτημα χρειάζεται περαιτέρω μελέτη, με έμφαση σε πρακτικές λύσεις που μπορούν να εφαρμοστούν ρεαλιστικά στον ελληνικό κατασκευαστικό τομέα.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Akinade O. O., et al. (2015). Waste minimisation through deconstruction: A BIM based Deconstructability Assessment Score (BIM-DAS)
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.10.018>
2. Ajayi S. O., Akinade O. O., et al. (2015). Waste effectiveness of the construction industry: Understanding the impediments and requisites for improvements.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.06.001>
3. Bakchan, et al. (2019). Circular economy systems in construction waste management. Resources, Conservation and Recycling.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.020>
4. BAMB Project. (2019). Buildings as material banks.
<https://www.bamb2020.eu>

5. Benachio et al., 2020
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121046>
6. Bortolini, R., et al. (2015). Site logistics planning and control using 4D modeling: A study in a lean car factory building site.
<https://leanconstruction.org.uk/wp-content/uploads/2018/09/Bortolini-et-al.-2015-Site-Logistics-Planning-and-Control-Using-4d-Modeling -A-Study-in-a-Lean-Car-Factory-Building-Site.pdf>
7. Boverket. (2020). Climate declarations for buildings. Swedish National Board of Housing, Building and Planning.
<https://www.boverket.se/en/start/laws-and-regulations/climate-declaration/>
8. BRE Global. (2023). BREEAM.
<https://kb.breeam.com/>
9. Çetin S, et al. (2023) Data requirements and availabilities for material passports: A digitally enabled framework for improving the circularity of existing buildings.
<https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.07.011>
10. Colmenero-Fonseca, J. L., et al. (2023). Evaluation of construction and demolition waste management in European Union member states. Advances in Civil Engineering.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2023/6421442>
11. Construction Leadership Council (2021). Vision and Strategic Priorities
<https://www.constructionleadershipcouncil.co.uk/wp-content/uploads/2021/03/CLC-Strategy-2021-Final.pdf>
12. Construction Leadership Council (2021). The Routemap for Zero Avoidable Waste in Construction
<https://www.constructionleadershipcouncil.co.uk/wp-content/uploads/2021/07/ZAW-Interactive-Routemap-FINAL.pdf>
13. Cristóbal García, J., et al. (2024). Techno-economic and environmental assessment of construction and demolition waste management in the European Union. Joint Research Centre (JRC).
https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/2024-01/JRC135470_01_1.pdf
14. Defra. (2018). Our waste, our resources: A strategy for England. Department for Environment, Food & Rural Affairs.
<https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5c18f11740f0b60bbe0d827/resources-waste-strategy-dec-2018.pdf>
15. Deloitte. (2015a). Construction and demolition waste management in Austria: Factsheet. European Commission.
https://ec.europa.eu/environment/waste/studies/deliverables/CDW_Austria_Factsheet_Final.pdf
16. Doussoulin, M., & Bittencourt, T. (2022). Structural circular economy approaches in the construction sector. Structures and Economics.
<https://doi.org/10.1016/j.strueco.2021.10.009>

17. European Commission. (2008). Directive 2008/98/EC on waste and repealing certain directives.
<https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/98/oj>
18. European Commission. (2016). EU construction and demolition waste management protocol.
<https://ec.europa.eu/docsroom/documents/20509>
19. European Commission. (2018). EU construction and demolition waste protocol and guidelines.
https://single-market-economy.ec.europa.eu/news/eu-construction-and-demolition-waste-protocol-2018-09-18_en
20. European Commission. (2020). A new circular economy action plan.
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0098>
21. European Commission. (2020). Level(s): A common EU framework of core sustainability indicators for office and residential buildings.
https://susproc.jrc.ec.europa.eu/product-bureau/sites/default/files/2021-02/JRC109285_171205_levels_eu_framework_of_building_indicators_parts_1_and_2_pubsy_version_b1-0.pdf
22. European Commission. (2020). Level(s) documentation: Construction and demolition waste indicator 2.2.
https://susproc.jrc.ec.europa.eu/product-bureau/sites/default/files/2020-10/20201013%20New%20Level%28s%29%20documentation_2.2%20C%26d%20waste_Publication%20v1.0.pdf
23. European Commission. (2023). Construction and demolition waste (CDW).
https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/construction-and-demolition-waste_en
24. European Environment Agency (EEA). (2025). Waste generation and material consumption.
<https://www.eea.europa.eu/en/europe-environment-2025/thematic-briefings/circular-economy-and-other-enablers-of-transformative-change/waste-generation-and-material-consumption>
25. Eurostat. (2019). Circular economy indicators.
https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/cej_wm040/default/table?lang=en
26. Eurostat. (2021). Waste generation statistics.
https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_wasgen/default/table?lang=en
27. Eurostat. (2023). Waste statistics.
https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_wasgen/default/table
28. Eurostat. (2024). Waste statistics.
https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics
29. Evaluation of CDW under WFD (2025).
<https://www.researchgate.net/publication/390301614>

30. Federal Statistical Office. (2019). Waste management statistics in Germany.
<https://www.destatis.de/EN/Themes/Society-Environment/Environment/Waste-Management/Tables/liste-brief-overview-waste-balance.html>
31. Fufa, S. M., et al. (2021). Construction waste generation in Norwegian construction projects. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1196/1/012018>
32. Fufa, S. M., et al. (2023). Construction waste performance in Norwegian construction sites. Results in Construction Advances.
<https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2023.200149>
33. Fufa, S. M., et al. (2023). Circularity performance in construction projects. Journal of Cleaner Production.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137067>
34. Gálvez-Martos, J. L., et al. (2018). Construction and demolition waste best practices in Europe. Resources, Conservation and Recycling.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.016>
35. Government Offices of Sweden. (2020). Circular economy policy framework.
<https://faolex.fao.org/docs/pdf/swe208661.pdf>
36. Green Construction Board. (2021). The routemap for zero avoidable waste in construction.
<https://www.constructionleadershipcouncil.co.uk/wp-content/uploads/2021/07/ZAW-Interactive-Routemap-FINAL.pdf>
37. International Organization for Standardization (ISO). (2018). Information management according to BS EN ISO 19650.
<https://imiframework.org/wp-content/uploads/2019/10/Information-Management-according-to-BS-EN-ISO-19650-Guidance-Part-1-Concepts-2ndEdition.pdf>
38. Joint Research Centre (JRC). (2024). Techno-economic and environmental assessment of construction and demolition waste management in the EU.
https://build-up.ec.europa.eu/system/files/2024-04/JRC2024-Techno-economic_and_environmental_assessment_of_CDW_management_in_the_EU_Final_with_identifiers_2.pdf
39. La Fuente Nuno, A., et al. (2024). Policy support indicators for sustainable circular construction. Joint Research Centre (JRC).
https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/2024-09/PSIS_circularconstruction_online.pdf
40. LEED-certified green buildings are better buildings
<https://www.usgbc.org/leed>
Lyiola et al. (2024). Digital Technologies for Promoting Construction and Demolition Waste Management: A Systematic Review
<https://doi.org/10.3390/buildings14103234>
41. Ma, M., et al. (2023). Sustainable construction practices and circular economy transition. Sustainable Production and Consumption.

- <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101226>
42. Ministry of Infrastructure and Water Management, (2017)
<https://lap3.nl/service/english/>
 43. Moschen-Schimek et al. (2023). Critical review of the recovery rates of construction and demolition waste in the European Union – An analysis of influencing factors in selected EU countries
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.05.020>
 44. Nordic Council of Ministers. (2023). Circular construction in the Nordic countries.
<https://pub.norden.org/nord2023-031/>
 45. Nordic Sustainable Construction (2023).
<https://www.nordicsustainableconstruction.com/news/2023/july/policies-enabling-the-reuse-of-construction-products-in-the-nordics>
 46. Nordic Council of Ministers (2024). Circular Construction in Nordic cities Current state and development.
<https://www.nordicsustainableconstruction.com/Media/638628583398894940/Circular%20Construction%20in%20Nordic%20cities.pdf>
 47. Oliveira, M., et al. (2021). Circular economy adaptation in the construction sector. Habitat International.
<https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2022.102615>
 48. RVO (2024). <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2024-02/NL%20Branding-Circular%20Buildings-v9-T.pdf>
 49. RVO (2025). https://www.rvo.nl/sites/default/files/2025-09/RVO_sectorgids%20circulaire%20bouw_English.pdf
 50. Sáez, P. V., & Osmani, M. (2019). A diagnosis of construction and demolition waste generation and recovery practice in the European Union. Journal of Cleaner Production.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118400>
 51. Swarnakar Vikas and Khalfan Malik (2024). An analysis of circular economy adaptation in construction and demolition waste management sector: a systematic literature review and conceptual implementation framework.
<https://doi.org/10.1108/SASBE-08-2024-0284>
 52. Teixeira, C. A., et al. (2023). Circularity indicators in construction materials. Minerals.
<https://doi.org/10.3390/min14010039>
 53. United Nations Environment Programme (UNEP). (2021). Global status report for buildings and construction.
https://globalabc.org/sites/default/files/2021-10/GABC_Buildings-GSR-2021_BOOK.pdf
 54. United Nations Environment Programme (UNEP). (2024). Global status report for buildings and construction.
https://globalabc.org/sites/default/files/2025-03/Global-Status-Report-2024_2025.pdf

55. U.S. Green Building Council (2021). LEED v4.1 Building Design and Construction Guide.
<https://www.usgbc.org/leed/v41>
56. Wang, J., et al. (2023). Circular economy and construction and demolition waste recycling systems. Waste Management & Research.
<https://doi.org/10.1177/0734242X221126393>
57. YM – Ministry of the Environment Finland. (2021a). Circular economy programme.
<https://ym.fi/kiertotalousohjelma>
58. YM – Ministry of the Environment Finland. (2021b). Circular economy policy objectives.
<https://ym.fi/-/kiertotalousohjelma-tavoitteena-vahentaa-uusiutumattomien-luonnonvarojen-kulutusta>
59. Zhang, C., et al. (2020). Circular construction and demolition waste management. Journal of Cleaner Production.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121718>
60. Zhang, X., et al. (2022). Circular economy and waste hierarchy in construction systems. Science of the Total Environment.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721049676>

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

61. Οδηγία 2008/98/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 19ης Νοεμβρίου 2008 , για τα απόβλητα και την κατάργηση ορισμένων οδηγιών.
<http://data.europa.eu/eli/dir/2008/98/oj>
62. Οδηγία (ΕΕ) 2018/851 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 30ής Μαΐου 2018, για την τροποποίηση της οδηγίας 2008/98/EK για τα απόβλητα.
<http://data.europa.eu/eli/dir/2018/851/oj>