

ΠΟΡΤΣΑΚΗΣ ΑΓΓΕΛΟΣ

**Ανάλυση Ευρωπαϊκών Πρακτικών
Κυκλικής Οικονομίας στον
Ενεργειακό Κλάδο και οι
Δυνατότητες Εφαρμογής τους στην
Ελλάδα**

Τομέας: ΧΧΧ

Επιβλέπων: Αθανάσιος Ρεντιζέλας, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα 2025



ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Άγγελος Πορτσάκης

Περίληψη

Η παρούσα εργασία εξετάζει την εφαρμογή των αρχών της Κυκλικής Οικονομίας (Circular Economy, CE) στον ενεργειακό τομέα με στόχο την ενίσχυση της βιωσιμότητας, τη μείωση της εξάρτησης από κρίσιμες πρώτες ύλες και τη συμβολή στην κλιματική ουδετερότητα. Μέσα από συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση και ανάλυση ευρωπαϊκών μελετών περίπτωσης, αναδεικνύονται πρακτικές κυκλικής διαχείρισης που αφορούν τον σχεδιασμό, την επαναχρησιμοποίηση, την παράταση ζωής και την ανάκτηση υλικών ενεργειακών τεχνολογιών.

Η μεθοδολογία βασίζεται σε πολυκριτηριακή αξιολόγηση μέσω δεικτών απόδοσης (KPIs), οι οποίοι καλύπτουν τεχνολογικές, περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές διαστάσεις. Μέσω της ανάλυσης αυτής διαμορφώνεται ένας οδικός χάρτης υλοποίησης κυκλικών λύσεων προσαρμοσμένος στις ανάγκες της Ελλάδας, λαμβάνοντας υπόψη θεσμικούς, τεχνικούς και αγοραστικούς παράγοντες.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η κυκλική οικονομία στον ενεργειακό τομέα μπορεί να μειώσει σημαντικά τα απόβλητα, να βελτιώσει την ασφάλεια εφοδιασμού σε πρώτες ύλες και να ενισχύσει την ανθεκτικότητα του ενεργειακού συστήματος. Επιπλέον, δημιουργούνται νέες επιχειρηματικές ευκαιρίες και θέσεις εργασίας, γεγονός που καθιστά την κυκλική μετάβαση κρίσιμο εργαλείο τόσο για την επίτευξη των στόχων της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας όσο και για την εθνική ενεργειακή στρατηγική.

Λέξεις-κλειδιά: Κυκλική Οικονομία, Ενεργειακός Τομέας, Ανακύκλωση, Βιώσιμη Ανάπτυξη, Πολυκριτηριακή Ανάλυση

Abstract

This thesis investigates the application of Circular Economy (CE) principles in the energy sector, aiming to enhance sustainability, reduce dependency on critical raw materials, and support climate neutrality. Through an extensive literature review and analysis of European case studies, circular management practices are identified in design, reuse, lifetime extension, and resource recovery of energy technologies.

The methodology is based on a multi-criteria assessment of performance indicators (KPIs) covering technological, environmental, economic, and social dimensions. Based on this analysis, a tailored roadmap for implementing circular solutions in the Greek energy sector is developed, taking into account institutional, technical, and market-related factors.

The findings demonstrate that CE practices in the energy sector can significantly reduce waste, improve supply security of raw materials, and strengthen the resilience of the energy system. Furthermore, new business opportunities and job creation emerge, positioning the circular transition as a critical tool both for achieving the objectives of the European Green Deal and for shaping national energy strategy.

Keywords: Circular Economy, Energy Sector, Recycling, Sustainable Development, Multi-Criteria Analysis

Περιεχόμενα

1.	Εισαγωγή.....	10
1.1	Πλαίσιο.....	10
1.2	Θεσμικό και Επιστημονικό Πλαίσιο	10
1.3	Ανάγκη για Διερεύνηση	11
1.4	Καινοτομία της Προσέγγισης	11
1.5	Σκοπός, Ερευνητικά Ερωτήματα και Στόχοι	12
1.6	Δομή της Εργασίας	13
2.	Θεωρητικό Πλαίσιο	15
2.1	Αρχές της Κυκλικής Οικονομίας και Σχέση με τη Βιώσιμη Ανάπτυξη 15	
2.2	Στρατηγικές Διατήρησης Αξίας και Εφαρμογές στον Ενεργειακό Τομέα 17	
2.3	Μέτρηση Κυκλικότητας και Θεσμικό Πλαίσιο στην Ευρώπη	19
2.4	Προκλήσεις, Περιορισμοί και Αναδυόμενες Τάσεις	20
3.	Μεθοδολογία	21
3.1	Δομημένη Μεθοδολογική Προσέγγιση	21
3.1.1	Βήμα 1: Σύνοψη Διαδικασίας.....	21
3.1.2	Βήμα 2: Δομή Ανάλυσης MCDA	22
3.1.3	Βήμα 3: Προσαρμογή KPIs στον Ενεργειακό Τομέα	24
3.1.4	3.1.5 Βήμα 4: Δεδομένα και Πηγές.....	30
3.1.5	Εμβάθυνση στη Λογική και Στόχευση της Μεθοδολογίας.....	31
3.2	Έξοδοι της Μεθοδολογίας και Λογική Roadmap	32
3.2.1	Κριτήρια και Σύνθεση Δεικτών	33
3.2.2	Μεθοδολογία Υπολογισμού Τελικών ΣΚΟΡ	34
4.	Διεθνείς Πρακτικές	37
4.1	Εισαγωγή.....	37
4.2	Αναλυτική Αποτίμηση Πρακτικών ανά Στάδιο Κυκλικής Οικονομίας 37	
4.2.1	Κυκλικές Εισροές (Circular Inputs)	37
4.2.2	Ανάκτηση Πόρων (Resource Recovery).....	38
4.2.3	Κυκλικός Σχεδιασμός (Circular Design).....	39
4.2.4	Βελτιστοποίηση Χρήσης (Optimized Use)	40
4.2.5	Παράταση Ζωής (Life Extension)	41
4.2.6	Νεότερες Ευρωπαϊκές Εξελίξεις (2023–2024)	41
4.2.7	Αντιστοίχιση KPIs ανά Πρακτική και Βαθμολόγηση	42
4.2.8	Βαθμός Τεχνολογικής Ωριμότητας και Στάδιο Εφαρμογής	49
4.2.9	Κατάταξη Πρακτικών Κυκλικής Οικονομίας	51
4.3	Συμπερασματική Αποτίμηση και Συγκριτική Ανάλυση	52
5.	Κυκλική Οικονομία στην Ελλάδα	57

5.1	Εισαγωγή.....	57
5.2	Προκλήσεις και Περιορισμοί Υλοποίησης	57
5.2.1	Τεχνικές προκλήσεις	57
5.2.2	Οικονομικές προκλήσεις	57
5.2.3	Κανονιστικές προκλήσεις	58
5.2.4	Κοινωνικές προκλήσεις.....	58
5.3	Σχόλια Εφαρμοσιμότητας και Εθνική Στρατηγική	58
5.4	Συγκριτική Ανάλυση Πρακτικών	60
5.5	Οδικός Χάρτης Εφαρμογής (2025–2035) Ανά Πρακτική	62
5.6	Μακροπρόθεσμες Πρακτικές και Θεσμική Στήριξη	63
5.7	Χρονογραμμή Οδικού Χάρτη	67
6.	Συμπεράσματα.....	68
6.1	Περιορισμοί της Έρευνας	69
6.2	Μελλοντικές Κατευθύνσεις και Πολιτικές Προτάσεις	70
7.	Βιβλιογραφία	71

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2-1: Στάδια εφαρμογής της Κυκλικής Οικονομίας [19]	16
Εικόνα 2-2: Εξέλιξη του Circularity Gap, 2018–2023 [30]	19
Εικόνα 5-1: Χρονογραμμή Οδικού Χάρτη Κυκλικής Οικονομίας στον Ελληνικό Ενεργειακό Τομέα.	65
Εικόνα 5-2 Χρονογραμμή Οδικού Χάρτη Κυκλικής Οικονομίας στον Ελληνικό Ενεργειακό Τομέα ανά πρακτική.	66

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2-1: Ιεραρχία Στρατηγικών Value Retentio στον Ενεργειακό Τομέα	18
Πίνακας 3-1: Αναλυτική βαθμολόγηση για τους επιλεγμένους δείκτες (Sk)	26
Πίνακας 3-2: Δείκτες που δεν διατηρήθηκαν	28
Πίνακας 3-3: Χαρτογράφηση επιλεγμένων δεικτών στο circular-SCOR	29
Πίνακας 3-4: Κατηγοριοποίηση και τοπικά βάρη KPIs ανά κριτήριο (κανονικοποιημένα)	34
Πίνακας 3-5 Κατώφλια (thresholds) βαθμολόγησης για τους 12 KPIs	35
Πίνακας 4-1 Συνολική αντιστοίχιση πρακτικών με KPIs, ποσοτικά δεδομένα και τελικό σκορ	43
Πίνακας 4-2 Βαθμολογίες πρακτικών ανά KPI (κλίμακα 1-5)	48
Πίνακας 4-3 Τελική κατάταξη πρακτικών	48
Πίνακας 4-4 Αξιολόγηση Βαθμού Τεχνολογικής Ωριμότητας Πρακτικών	50
Πίνακας 4-5: Συνολικός πίνακας πρακτικών Κυκλικής Οικονομίας (2020-2024) με βάση τα 12 KPIs.....	54
Πίνακας 5-1: Συγκριτική αποτίμηση κατηγοριών πρακτικών Κυκλικής Οικονομίας	61
Πίνακας 5-2: Οδικός Χάρτης Κυκλικής Οικονομίας (Βραχυπρόθεσμο Διάστημα)	62
Πίνακας 5-3: Οδικός Χάρτης Κυκλικής Οικονομίας (Μεσοπρόθεσμο Διάστημα)	62
Πίνακας 5-4: Οδικός Χάρτης Κυκλικής Οικονομίας (Μακροπρόθεσμο Διάστημα)	64

1. Εισαγωγή

1.1 Πλαίσιο

Η παγκόσμια οικονομία εξακολουθεί να βασίζεται σε ένα γραμμικό μοντέλο ανάπτυξης, το οποίο χαρακτηρίζεται από την εξόρυξη πρώτων υλών, την παραγωγή, την κατανάλωση και τελικά την απόρριψη. Αυτό το μοντέλο έχει οδηγήσει σε σημαντικές περιβαλλοντικές και ενεργειακές προκλήσεις, όπως η αύξηση των εκπομπών CO₂, η εξάντληση φυσικών πόρων και η αυξανόμενη παραγωγή αποβλήτων [38],[16]. Συγκεκριμένα, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα φαίνεται να έχουν ξεπεράσει τους 37 δισ. τόνους το 2024 [48], ενώ οι απώλειες ενέργειας στους θερμικούς σταθμούς φτάνουν έως και το 60% της εισερχόμενης ενέργειας [35].

Το πλαίσιο αυτό έχει οδηγήσει σε μια παγκόσμια μετατόπιση προς την Κυκλική Οικονομία (Circular Economy – CE), μια στρατηγική ανάπτυξης που στοχεύει στη διατήρηση της αξίας των προϊόντων, υλικών και πόρων όσο το δυνατόν περισσότερο[44]. Στον τομέα της ενέργειας, η μετάβαση αυτή αποκτά ιδιαίτερη σημασία καθώς η παραγωγή και διανομή της ενέργειας συνδέεται άμεσα με την κατανάλωση κρίσιμων υλικών (όπως μέταλλα, σπάνιες γαίες, σύνθετα υλικά κ.ά.) [25], τα οποία εμφανίζονται σε φωτοβολταϊκά πάνελ, ανεμογεννήτριες, συσσωρευτές και ηλεκτρικές υποδομές.

Η Κυκλική Οικονομία δεν περιορίζεται μόνο στην ανακύκλωση αποβλήτων. Περιλαμβάνει μια ολιστική προσέγγιση, η οποία καλύπτει όλα τα στάδια του κύκλου ζωής των προϊόντων [24]: κυκλικές εισροές, κυκλικό σχεδιασμό, βελτιστοποίηση παραγωγής και διανομής, παράταση διάρκειας ζωής και ανάκτηση πόρων.

1.2 Θεσμικό και Επιστημονικό Πλαίσιο

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει υιοθετήσει την *Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία* και το *Circular Economy Action Plan* [24], ενώ η στρατηγική για τις *Κρίσιμες Πρώτες Υλεις* στοχεύει στη μείωση της εξάρτησης από εισαγόμενα υλικά μέσω κυκλικών λύσεων [25]. Παράλληλα, η οδηγία για την Οικολογική Σχεδίαση (Ecodesign Directive) και το επερχόμενο *Digital Product Passport* προωθούν τη διαφάνεια, την ιχνηλασιμότητα και την επαναχρησιμοποίηση.

Η έννοια της Κυκλικής Οικονομίας δεν αποτελεί μόνο περιβαλλοντική ή τεχνολογική προσέγγιση, αλλά μια διεπιστημονική στρατηγική που εμπλέκει την οικονομία, τις δημόσιες πολιτικές και την κοινωνική συμπεριφορά. Η

Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία (Green Deal) καθιστά σαφές ότι η μετάβαση στην κυκλικότητα αποτελεί θεμελιώδη προϋπόθεση για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050. Σε αυτό το πλαίσιο, η Κυκλική Οικονομία αναδεικνύεται ως μοχλός καινοτομίας αλλά και γεωστρατηγικής αυτονομίας της Ε.Ε., μειώνοντας την εξάρτηση από κρίσιμες πρώτες ύλες.

1.3 Ανάγκη για Διερεύνηση

Παρά τις θεσμικές πρωτοβουλίες, η ακαδημαϊκή βιβλιογραφία και τα βιώσιμα επιχειρηματικά μοντέλα στον ενεργειακό τομέα παρουσιάζουν ετερογένεια, κυρίως σε ό,τι αφορά την αξιολόγηση της κυκλικότητας των υλικών [58],[46]. Οι περισσότερες μελέτες εστιάζουν είτε στην τεχνολογική σκοπιμότητα είτε στην περιβαλλοντική απόδοση, χωρίς να αναλύουν επαρκώς την ωριμότητα (readiness), την κοινωνική αποδοχή ή την κανονιστική βιωσιμότητα των λύσεων.

Η ανάγκη για διεπιστημονική διερεύνηση της κυκλικής οικονομίας στον ενεργειακό τομέα καθίσταται επιτακτική, καθώς εντοπίζεται ένα θεσμικό χάσμα μεταξύ τεχνολογικής εξέλιξης και αγοραστικής ενσωμάτωσης. Συγκεκριμένα, αρκετές λύσεις που έχουν αποδειχθεί τεχνικά εφαρμόσιμες (π.χ. ανακύκλωση σύνθετων υλικών, επαναχρησιμοποίηση θερμότητας από data centers) δεν υιοθετούνται ευρέως, είτε λόγω έλλειψης οικονομικών κινήτρων (π.χ. φορολογικές ελαφρύνσεις, σχήματα επιδότησης) είτε λόγω απουσίας σαφούς θεσμικού πλαισίου (π.χ. πρότυπα για επαναχρησιμοποίηση φωτοβολταϊκών πάνελ). Η παρούσα εργασία έχει ως στόχο την περαιτέρω διερεύνηση των αιτιών αυτού του χάσματος, παρέχοντας μία ολοκληρωμένη αξιολόγηση που συνδυάζει τεχνολογικά δεδομένα με παραμέτρους πολιτικής και αγοράς.

1.4 Καινοτομία της Προσέγγισης

Η παρούσα εργασία εισάγει μια ολοκληρωμένη και μετρήσιμη μεθοδολογική προσέγγιση για την αποτίμηση και ιεράρχηση κυκλικών πρακτικών στον ενεργειακό τομέα, βασισμένη αποκλειστικά σε ευρωπαϊκά δεδομένα και παραδείγματα. Η καινοτομία της προσέγγισης έγκειται στον συνδυασμό θεωρητικής δομής, εμπειρικής τεκμηρίωσης και επιχειρησιακής εφαρμοσιμότητας, μέσα από τα εξής διακριτά βήματα:

- **Συστηματικός εντοπισμός** και τεκμηρίωση εφαρμοσμένων πρακτικών Κυκλικής Οικονομίας στον ενεργειακό τομέα, με έμφαση σε

λειτουργικά παραδείγματα από την Ευρώπη και πλήρη ιχνηλασιμότητα πηγών.

- **Ταξινόμηση των πρακτικών** βάσει των πέντε βασικών σταδίων της Κυκλικής Οικονομίας — *Κυκλικές εισροές, Κυκλικός σχεδιασμός, Βελτιστοποίηση χρήσης, Παράταση ζωής και Ανάκτηση υλικών* — σύμφωνα με το πλαίσιο του Ellen MacArthur Foundation [38], για συγκρισιμότητα και αναλυτική πληρότητα.
- **Πολυκριτηριακή αξιολόγηση** των πρακτικών μέσω της μεθοδολογίας MCDA και του Επιπέδου Τεχνολογικής Ωριμότητας TRL, με θεμελίωση σε τέσσερις διαστάσεις — *Περιβαλλοντική, Οικονομική, Κοινωνική και Εφοδιαστικής/Λογιστικής φύσεως* — όπως προτείνεται από το σύγχρονο ευρωπαϊκό πλαίσιο αξιολόγησης κυκλικής απόδοσης [18].
- **Χρήση performance indicators** (και όχι τελικών αποτελεσμάτων) , ως εργαλείο αποτίμησης του δυναμικού μετάβασης στη κυκλική οικονομία. Οι δείκτες επιλέγονται και προσαρμόζονται στον ενεργειακό τομέα και χαρτογραφούνται στις λειτουργίες του κυκλικού μοντέλου SCOR (Plan, Source, Make, Deliver, Return, Recover, Enable), εξασφαλίζοντας σύνδεση με τις επιχειρησιακές ροές [18].
- **Σύνθεση στρατηγικού Roadmap**, βάσει των αποτελεσμάτων της MCDA ανάλυσης και των προτεραιοτήτων που προκύπτουν από τους δείκτες. Η προσέγγιση προσφέρει σαφές χρονοδιάγραμμα υλοποίησης και εστίαση σε δράσεις με άμεσο αντίκτυπο.

Η μεθοδολογία αυτή γεφυρώνει την απόσταση ανάμεσα σε θεωρητικά σχήματα και πραγματικές συνθήκες εφαρμογής, προσφέροντας ένα εργαλείο λήψης τεκμηριωμένων αποφάσεων για την κυκλική μετάβαση του ενεργειακού τομέα στην Ελλάδα και την Ευρώπη.

1.5 Σκοπός, Ερευνητικά Ερωτήματα και Στόχοι

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάλυση και η αξιολόγηση Ευρωπαϊκών πρακτικών Κυκλικής Οικονομίας (ΚΟ) μέσω της ανάπτυξης ενός προσαρμοσμένου πλαισίου αξιολόγησης στον ενεργειακό τομέα, με έμφαση στη δυνατότητα εφαρμογής τους στην Ελλάδα. Η προσέγγιση βασίζεται σε καλές ευρωπαϊκές πρακτικές και αποσκοπεί στη διατύπωση προτάσεων πολιτικής, τεχνολογικής στρατηγικής και έργων υποδομής που μπορούν να υποστηρίξουν τον πράσινο ενεργειακό μετασχηματισμό της χώρας.

Ερευνητικά ερωτήματα:

- Ποιες διεθνώς αναγνωρισμένες εφαρμογές Κυκλικής Οικονομίας είναι τεχνολογικά ώριμες και κατάλληλες για μεταφορά στο ελληνικό ενεργειακό σύστημα;
- Πώς αξιολογούνται οι πρακτικές αυτές ως προς την απόδοσή τους με βάση ένα πολυκριτηριακό πλαίσιο (περιβαλλοντικό, οικονομικό, κοινωνικό, εφοδιαστικό);
- Ποια είναι η σχετική προτεραιότητα των εφαρμογών αυτών και πώς εντάσσονται σε έναν ρεαλιστικό και λειτουργικό οδικό χάρτη μετάβασης;

Ειδικοί στόχοι:

- Ανάδειξη των σταδίων εφαρμογής της ΚΟ στον τομέα της ενέργειας, με έμφαση στη διαχείριση υλικών και προϊόντων.
- Συλλογή, ταξινόμηση και τεκμηρίωση ευρωπαϊκών εφαρμογών, με βάση τα πέντε στάδια κυκλικότητας.
- Αξιολόγηση των πρακτικών μέσω πολυκριτηριακής ανάλυσης (MCDA) και προσδιορισμός σχετικών KPIs.
- Διατύπωση προτάσεων πολιτικής και τεχνολογικής στρατηγικής, βάσει των αποτελεσμάτων της ανάλυσης, για την ενίσχυση της κυκλικής μετάβασης στον ελληνικό ενεργειακό τομέα.

1.6 Δομή της Εργασίας

Η εργασία οργανώνεται σε έξι κεφάλαια, τα οποία αναπτύσσονται με προοδευτική λογική — από τη θεωρητική θεμελίωση έως την εφαρμοσμένη ανάλυση και τις στρατηγικές προτάσεις.

- **Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή**

Παρουσιάζονται το θεσμικό και ερευνητικό πλαίσιο, η αναγκαιότητα της μελέτης, τα ερευνητικά ερωτήματα και η καινοτομία της προσέγγισης.

- **Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό Πλαίσιο**

Εξετάζονται οι βασικές αρχές της Κυκλικής Οικονομίας, οι επιμέρους στρατηγικές (9R), τα στάδια κυκλικότητας, καθώς και οι βασικοί δείκτες αξιολόγησης και οι ευρωπαϊκές πολιτικές που τις πλαισιώνουν.

- **Κεφάλαιο 3: Μεθοδολογία**

Αναλύεται το πλαίσιο πολυκριτηριακής αξιολόγησης (MCDA), τα επιλεγμένα κριτήρια, οι δείκτες και η αντιστοίχισή τους στο circular-SCOR. Περιγράφεται η διαδικασία ιεράρχησης και εξαγωγής προτεραιοτήτων.

- **Κεφάλαιο 4: Διεθνείς Πρακτικές**

Καταγράφονται και ταξινομούνται επιλεγμένες εφαρμογές κυκλικής οικονομίας στον ενεργειακό τομέα, σύμφωνα με τα πέντε στάδια CE. Περιλαμβάνονται μόνο περιπτώσεις από κράτη-μέλη της Ε.Ε. και συνδεδεμένες ευρωπαϊκές χώρες.

- **Κεφάλαιο 5: Κυκλική Οικονομία στην Ελλάδα**

Εξετάζεται η τρέχουσα κατάσταση στον ελληνικό ενεργειακό τομέα, οι δυνατότητες ενσωμάτωσης των ευρωπαϊκών πρακτικών, καθώς και οι βασικοί περιορισμοί και προκλήσεις και προτείνεται ένα χρονοπρογραμματισμένο roadmap προτεραιοτήτων για την εφαρμογή κυκλικών πρακτικών στον ελληνικό ενεργειακό τομέα.

- **Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα**

Συνοψίζονται τα βασικά ευρήματα, οι περιορισμοί της μελέτης και προτείνονται κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα καθώς και προτάσεις πολιτικής.

2. Θεωρητικό Πλαίσιο

2.1 Αρχές της Κυκλικής Οικονομίας και Σχέση με τη Βιώσιμη Ανάπτυξη

Η **Κυκλική Οικονομία** (Circular Economy – CE) συνιστά ένα σύγχρονο παραγωγικό και καταναλωτικό μοντέλο, το οποίο όχι μόνο επιδιώκει τη μεγιστοποίηση της ωφέλιμης ζωής των υλικών αλλά και την ελαχιστοποίηση της παραγωγής αποβλήτων, σε αντίθεση με το γραμμικό πρότυπο «παραγωγή–κατανάλωση–απόρριψη»[31].

Η CE προκύπτει ως απάντηση στην αδυναμία του γραμμικού μοντέλου να ανταποκριθεί στις περιβαλλοντικές και οικονομικές προκλήσεις του 21ου αιώνα. Η εξάντληση των φυσικών πόρων, η αύξηση του κόστους υλικών, καθώς και η ανάγκη μείωσης των εκπομπών CO₂ καθιστούν επιτακτική την υιοθέτηση μοντέλων που βασίζονται στη διατήρηση της αξίας των υλικών εντός της οικονομίας. Επιπλέον, το μοντέλο CE προσφέρει απαντήσεις σε ζητήματα στρατηγικής αυτονομίας (π.χ. εξάρτηση από σπάνιες πρώτες ύλες) και ανθεκτικότητας εφοδιαστικής αλυσίδας [50].

Βασίζεται σε στρατηγικές όπως η επαναχρησιμοποίηση, η επισκευή, η ανακατασκευή και η ανάκτηση υλικών, που διαρθρώνονται στα ακόλουθα πέντε στάδια εφαρμογής [39]:

- **Κυκλικές εισροές (Circular Inputs):** αντικατάσταση πρωτογενών πρώτων υλών με ανακυκλωμένες ή ανανεώσιμες πηγές,
- **Κυκλικός σχεδιασμός (Design for Circularity):** δυνατότητα αποσυναρμολόγησης, επισκευής και επαναχρησιμοποίησης,
- **Βέλτιστη χρήση πόρων και μείωση αποβλήτων** μέσω βελτιστοποιημένων διεργασιών,
- **Παράταση διάρκειας ζωής προϊόντων**, με στόχο τη μείωση της ανάγκης για νέα παραγωγή,
- **Ανάκτηση υλικών και ενέργειας στο τέλος του κύκλου ζωής.**



Εικόνα 2-1: Στάδια εφαρμογής της Κυκλικής Οικονομίας [19]

Η CE δεν υποκαθιστά αλλά συμπληρώνει τη Βιώσιμη Ανάπτυξη, προσφέροντας ένα εφαρμοστικό πλαίσιο για τη διαχείριση υλικών και ροών πόρων εντός πλανητικών ορίων [43]. Μέσα από την κυκλική διαχείριση των πόρων, καθίσταται δυνατή η αποσύνδεση της οικονομικής ανάπτυξης από την κατανάλωση πρώτων υλών (decoupling), ενισχύοντας παράλληλα την κοινωνική ευημερία και περιβαλλοντική προστασία.

Αποτελεί οργανικό στοιχείο της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας και συμβάλλει στην επίτευξη των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης (SDGs), ιδιαίτερα των:

- SDG 12 – Υπεύθυνη Κατανάλωση και Παραγωγή,
- SDG 7 – Καθαρή Ενέργεια,
- SDG 13 – Δράση για το Κλίμα,
- SDG 9 – Βιομηχανία, Καινοτομία και Υποδομές,
- SDG 11 – Βιώσιμες Πόλεις και Κοινότητες.

Η συμβολή της CE σε αυτούς τους στόχους δεν είναι μόνο θεωρητική. Μέσω της μείωσης των αποβλήτων, της ενίσχυσης της αποδοτικότητας των πόρων και της προώθησης νέων επιχειρηματικών μοντέλων (π.χ. product-as-a-service), δημιουργούνται νέες ευκαιρίες για καινοτομία και θέσεις εργασίας, ενισχύοντας την ανταγωνιστικότητα της ευρωπαϊκής βιομηχανίας [64].

2.2 Στρατηγικές Διατήρησης Αξίας και Εφαρμογές στον Ενεργειακό Τομέα

Κεντρικό δόγμα της CE αποτελεί η **διατήρηση της αξίας** (*value retention*) υλικών και προϊόντων καθ' όλη τη διάρκεια ζωής τους. Η λογική αυτή έρχεται σε αντιδιαστολή με τη γραμμική χρήση-απόρριψη και στοχεύει στη διατήρηση των φυσικών και οικονομικών πόρων εντός της παραγωγικής αλυσίδας.

Οι βασικές στρατηγικές που υλοποιούν τη διατήρηση αξίας περιλαμβάνουν:

- **Επαναχρησιμοποίηση (Reuse)** : χρήση προϊόντων ή εξαρτημάτων χωρίς σημαντική επεξεργασία.
- **Επισκευή (Repair)** : αποκατάσταση λειτουργικότητας με ελάχιστη κατανάλωση νέων πόρων.
- **Ανακατασκευή (Remanufacturing)** : επαναφορά σε εργοστασιακή κατάσταση με χρήση ορισμένων νέων εξαρτημάτων.
- **Ανακύκλωση (Recycling)** : ανάκτηση πρώτων υλών μέσω φυσικοχημικής επεξεργασίας.

Η ιεράρχηση αυτών των στρατηγικών βασίζεται στη σχέση κόστους-οφέλους και περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Οι πρώτες στρατηγικές (π.χ. reuse, repair) παρουσιάζουν σαφώς χαμηλότερες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου συγκριτικά με την ανακύκλωση [53].

Η σημασία της CE στον ενεργειακό τομέα ενισχύεται λόγω της υψηλής υλικής έντασης των ΑΠΕ (Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας). Οι τεχνολογίες αυτές απαιτούν πληθώρα κρίσιμων πρώτων υλών (π.χ. λίθιο, κοβάλτιο, νιόβιο), η εξόρυξη και επεξεργασία των οποίων έχει σημαντικό περιβαλλοντικό κόστος [45]. Συνεπώς, η κυκλικότητα προσφέρει όχι μόνο περιβαλλοντικά αλλά και γεωοικονομικά οφέλη, όπως μείωση εξάρτησης από τρίτες χώρες και αύξηση της ασφάλειας εφοδιασμού.

Πίνακας 2-1: Ιεραρχία Στρατηγικών Value Retentio στον Ενεργειακό Τομέα

Στρατηγική	Ενδεικτική Εφαρμογή
Επαναχρησιμοποίηση	Μπαταρίες ηλεκτρικών οχημάτων (EV) επαναχρησιμοποιούνται ως σταθεροποιητές δικτύου ή σε αποκεντρωμένες μονάδες αποθήκευσης ενέργειας.
Επισκευή	Πτερύγια ανεμογεννητριών επισκευάζονται με χρήση σύνθετων ρητινών για επέκταση του κύκλου ζωής τους, αντί αντικατάστασης.
Ανακατασκευή (Refurbishment)	Μετατροπείς (inverters) και μετασχηματιστές υποβάλλονται σε ανακατασκευή και επαναπιστοποίηση για δεύτερη χρήση.
Ανακύκλωση	Ανάκτηση πυριτίου και αργύρου (Si/Ag) από φωτοβολταϊκά πάνελ στο τέλος ζωής τους μέσω υδρομεταλλουργικών μεθόδων.

Αξιοσημείωτες εφαρμογές περιλαμβάνουν και:

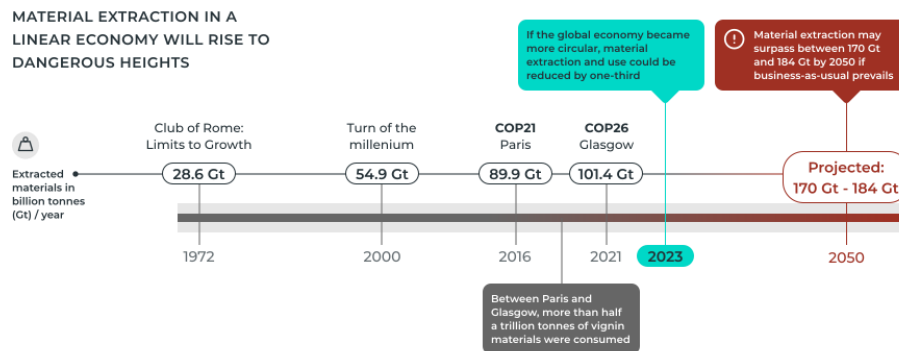
- Την ενσωμάτωση modular design σε μπαταρίες EV για διευκόλυνση στην αποσυναρμολόγηση,
- Τη χρήση ανακυκλωμένων πολυμερών σε πτερύγια Α/Γ,
- Την προτυποποίηση εξαρτημάτων με σκοπό την ανακατασκευή [21][60].

Οι παραπάνω εφαρμογές επιβεβαιώνουν ότι η CE δεν αποτελεί απλώς περιβαλλοντική πολιτική, αλλά επιχειρηματική στρατηγική με ισχυρή τεχνική και οικονομική αιτιολόγηση.

2.3 Μέτρηση Κυκλικότητας και Θεσμικό Πλαίσιο στην Ευρώπη

Η μετάβαση σε κυκλικό μοντέλο απαιτεί αξιόπιστους δείκτες απόδοσης. Ενδεικτικά:

- Circular Material Use Rate (CMUR): % ανακυκλωμένων υλικών,
- Circularity Rate: μέτρο κυκλικότητας παγκοσμίως – 7,2% το 2023 [29],
- Recycling Input Rate: εισροή ανακυκλωμένων υλικών σε νέα προϊόντα.



Εικόνα 2-2: Εξέλιξη του Circularity Gap, 2018–2023 [29]

Σε θεσμικό επίπεδο, η Ευρωπαϊκή Ένωση προωθεί συστηματικά την κυκλική μετάβαση μέσω:

- **Circular Economy Action Plan (2020)** [32],
- **Critical Raw Materials Act (2023)** [25],
- **Ecodesign Regulation (2023)**,
- **Product Circularity Data Sheets (PCDS)** [50].

Πέρα από τους δείκτες CMUR και Circularity Gap, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει προτείνει και πιο στοχευμένους δείκτες, όπως:

- **Material Circularity Indicator (MCI)**: Αντανακλά τον βαθμό υλικής επαναχρησιμοποίησης.
- **Product Circularity Score (PCS)**: Συνδυάζει ανθεκτικότητα, σχεδίαση και ανακυκλωσιμότητα.
- **Critical Raw Material Dependency (CRMD)**: Ποσοτικοποιεί τον βαθμό εξάρτησης από σπάνιες πρώτες ύλες.

Οι δείκτες αυτοί έχουν προταθεί σε κείμενα όπως το CE Monitoring Framework της Eurostat και αξιοποιούνται ευρέως από πρωτοβουλίες όπως η PCDS [34][40] .

2.4 Προκλήσεις, Περιορισμοί και Αναδυόμενες Τάσεις

Παρά τα οφέλη, η εφαρμογή της CE στον ενεργειακό τομέα συναντά εμπόδια

- **Τεχνικά:** πολυπλοκότητα σύνθετων υλικών (π.χ. blades, μπαταρίες),
- **Κανονιστικά:** ανομοιογένεια εντός E.E., καθυστερήσεις σε υποδομές,
- **Οικονομικά:** απουσία ώριμων αγορών, υψηλό αρχικό κόστος,
- **Κοινωνικά:** περιορισμένη αποδοχή και πληροφόρηση.

Την ίδια στιγμή, αναδύονται νέες τεχνολογικές καινοτομίες:

- Ψηφιακά εργαλεία ιχνηλασιμότητας και αλυσίδας εφοδιασμού,
- Τεχνητή Νοημοσύνη στην προγνωστική συντήρηση (predictive maintenance),
- 3D printing ανταλλακτικών για επιμήκυνση ζωής εξοπλισμού.

Επιπλέον, οι αυξανόμενες απαιτήσεις για διαφάνεια στην προέλευση υλικών και τη διαχείριση τέλους ζωής έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη εργαλείων όπως το Digital Product Passport (DPP), το οποίο αναμένεται να καταστεί υποχρεωτικό για εξοπλισμό ΑΠΕ και μπαταρίες EV έως το 2027 [36]. Παράλληλα, η πρόοδος της τεχνητής νοημοσύνης επιτρέπει πλέον την ανίχνευση φθορών και προγνωστική συντήρηση σε κρίσιμα συστήματα όπως ανεμογεννήτριες και υποσταθμούς.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η εφαρμογή πρακτικών CE μπορεί να συμβάλει στη μείωση του κόστους ενέργειας και στην ενίσχυση της ενεργειακής ισότητας, ιδίως μέσω χαμηλού κόστους remanufactured εξοπλισμού και εντοπισμένων αλυσίδων εφοδιασμού [61].

Η Κυκλική Οικονομία αναδεικνύεται έτσι ως βασικός μοχλός για τη στρατηγική αυτονομία, την πράσινη μετάβαση και τη βιώσιμη ανάπτυξη του ευρωπαϊκού ενεργειακού συστήματος.

3. Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία της παρούσας έρευνας στοχεύει στην αξιολόγηση και ενίσχυση της κυκλικότητας στον ενεργειακό τομέα μέσα από ένα δομημένο και τεκμηριωμένο σχήμα ανάλυσης. Η επιλογή συγκεκριμένων μεθοδολογικών βημάτων δεν είναι τυχαία βασίζεται σε ανάγκες εφαρμοσιμότητας, ιχνηλασιμότητας και προσαρμοστικότητας των αποτελεσμάτων σε διαφορετικά επίπεδα (στρατηγικό, λειτουργικό και τεχνικό). Η μεθοδολογική προσέγγιση διαρθρώνεται σε τέσσερα κύρια στάδια, τα οποία λειτουργούν διαδοχικά και συμπληρωματικά.

3.1 Δομημένη Μεθοδολογική Προσέγγιση

3.1.1 Βήμα 1: Σύνοψη Διαδικασίας

Αρχικά, προσδιορίζονται οι τεχνολογίες και υποδομές που εξετάζονται ως αντικείμενα ανάλυσης. Η επιλογή επικεντρώνεται σε τομείς υψηλής υλικής έντασης (π.χ. φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες, υποδομές αποθήκευσης), δεδομένης της σημαντικής επίπτωσής τους στη ζήτηση κρίσιμων πρώτων υλών και στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα του ενεργειακού τομέα.

Η μεθοδολογία ακολουθεί λογική τεσσάρων βημάτων :

1. **Συλλογή και Ταξινόμηση Ευρωπαϊκών Πρακτικών:** Εντοπισμός πραγματικών εφαρμογών CE στον ενεργειακό κλάδο βάσει πηγών όπως Eurostat, ΕΕΑ, επιστημονικά άρθρα και τεχνολογικές βάσεις δεδομένων.
2. **Καθορισμός Κριτηρίων και Δεικτών:** Ορισμός βασικών διαστάσεων (Περιβαλλοντική, Κοινωνική, Οικονομική, Λογιστική/Εφοδιαστική) και επιμέρους υποκριτηρίων, βάσει του πλαισίου των Alfina et al. [18].
3. **Αξιολόγηση με Χρήση Πολυκριτηριακή Ανάλυση (MCDA) και Επιπέδου Τεχνολογικής Ωριμότητας TRL:** Ιεράρχηση *KPIs* βάσει συνδυαστικής αξιολόγησης με σταθμισμένα κριτήρια από AHP. Κατόπιν γίνεται ταξινόμηση πρακτικών σε 3 στάδια τεχνολογικής ωριμότητας, εντός των οποίων οι πρακτικές ιεραρχούνται με MCDA.
4. **Σύνθεση Οδικού Χάρτη (Roadmap):** Χρονοπρογραμματισμός υλοποίησης των πρακτικών βάσει των αποτελεσμάτων MCDA, των υποδομών, πόρων της Ελλάδας και της στρατηγικής αξίας τους για τον ενεργειακό τομέα.

3.1.2 Βήμα 2: Δομή Ανάλυσης MCDA

Η Πολυκριτηριακή ανάλυση MCDA εφαρμόζεται μέσω διαδοχικών βημάτων που επιτρέπουν την ορθολογική ιεράρχηση εναλλακτικών επιλογών βάσει πολλαπλών κριτηρίων. Η παρούσα εργασία διατηρεί αποτελέσματα της πολυκριτηριακής προσέγγισης AHP ως βασικό εργαλείο για τον καθορισμό των βαρών των βασικών κριτηρίων, εντός της δομής αξιολόγησης που περιλαμβάνει KPIs. Εδώ υιοθετείται μια **προσαρμοσμένη προσέγγιση** με χρήση **δευτερογενών πηγών, δημοσιευμένων δεδομένων και θεσμικών προτύπων** για τον καθορισμό των σχετικών βαρών. Πιο συγκεκριμένα, τα κύρια βήματα της διαδικασίας είναι τα εξής:

1. **Ορισμός στόχου ανάλυσης:** Προτεραιοποίηση πρακτικών κυκλικής οικονομίας στον ενεργειακό τομέα.
2. **Δημιουργία ιεραρχικής δομής:** Οργάνωση σε επίπεδα — Στόχος, Κριτήρια (Περιβαλλοντικό, Οικονομικό, Κοινωνικό, Εφοδιαστικό).
3. **Κανονικοποίηση δεικτών ανά κριτήριο:** Οι δείκτες (KPIs) λαμβάνουν ένα τοπικό βάρος μέσα σε κάθε κριτήριο κανονικοποιημένο ως προς τον αριθμό τους
4. **Υπολογισμός συνολικών βαρών (global weights):** Εφόσον η ανάλυση περιλαμβάνει 2 επίπεδα, τα τοπικά βάρη πολλαπλασιάζονται με τα βάρη των κριτηρίων.

Η προσαρμογή αυτή κρίθηκε απαραίτητη, ώστε να διατηρηθεί η μεθοδολογική συνέπεια και η δυνατότητα επανάληψης της ανάλυσης χωρίς να απαιτείται η εμπλοκή υποκειμενικών κρίσεων. Αντίστοιχες πρακτικές έχουν τεκμηριωθεί στη βιβλιογραφία, όπως:

- η χρήση της AHP με στατικά βάρη από θεσμικά έγγραφα αντί για κρίσεις εμπειρογνομόνων [55],
- και η εφαρμογή της AHP με βάση πραγματικά δεδομένα απόδοσης χωρίς συμμετοχή εμπειρογνομόνων, όπως περιγράφεται στη μελέτη των Gavião et al. (2024) [42].

Η στρατηγική αυτή επιτρέπει την εφαρμογή της MCDA ως ένα αναλυτικό εργαλείο λήψης αποφάσεων σε περιβάλλοντα όπου δεν είναι διαθέσιμη ή δεν ενδείκνυται η χρήση πρωτογενούς συμμετοχικής πληροφόρησης, χωρίς να υποβαθμίζεται η εγκυρότητα και η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

Δομή Ανάλυσης ΑΗΡ

Ακολουθεί η ανάλυση της διαδικασίας ΑΗΡ από την οποία αντλήθηκαν τα βάρη των κριτηρίων και η ανάλυση των υλικών ροών με έμφαση στα λεγόμενα «κρίσιμα» υλικά, όπως λίθιο, κοβάλτιο, πυρίτιο και πολύτιμα μέταλλα. Η χαρτογράφηση βασίζεται σε δεδομένα από επιστημονική βιβλιογραφία, ευρωπαϊκές βάσεις δεδομένων (π.χ. JRC, Eurostat) και τεχνικές αναφορές του κλάδου. Η φάση αυτή είναι απαραίτητη για την ταυτοποίηση των σημείων συμφόρησης, των δυνητικών ευκαιριών για circular redesign, καθώς και για την επιλογή κατάλληλων στρατηγικών διατήρησης αξίας [21][60].

Η ενότητα αυτή ενσωματώνει εργαλεία της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA), όπως π.χ. Material Flow Analysis (MFA) και Input-Output Analysis (IOA), προκειμένου να αποτυπωθούν οι ροές υλικών και να εντοπιστούν κρίσιμες αλυσίδες εφοδιασμού. Παράλληλα, αξιολογείται η τρέχουσα κυκλικότητα των υλικών σε επίπεδο Ευρώπης (π.χ. CMUR), ώστε να εντοπιστούν πρακτικές που χρήζουν βελτίωσης.

- **Επίπεδο I (Στόχος):** Προτεραιοποίηση δεικτών/πρακτικών για CE στον ενεργειακό τομέα.
- **Επίπεδο II (Κύρια Κριτήρια):** Περιβαλλοντική, Κοινωνική, Οικονομική, Λογιστική/Εφοδιαστική.
- **Επίπεδο III (Υποκριτήρια):** Εκπομπές, κατανάλωση πόρων, αποδοχή, εργασία, κόστος, καινοτομία, διαχείριση αποθεμάτων.
- **Επίπεδο IV (KPIs):** 12 εξειδικευμένοι δείκτες, όπως Composite Material Separation Efficiency, Material Recovery Rate, Residual Heat Utilization Rate κ.ά.

Τεχνικές παράμετροι ΑΗΡ:

- Κλίμακα αξιολόγησης: λεκτική ("Πολύ σημαντικό" έως "Καθόλου σημαντικό"), μετατροπή σε αριθμητική κλίμακα 1–9.
- Υπολογισμός CR (Consistency Ratio) για αποδοχή του πίνακα.
- Ενδεικτικά βάρη από [18]: Οικονομική (0.3987), Περιβαλλοντική (0.2522), Λογιστική (0.2439), Κοινωνική (0.1052).

3.1.3 Τομέα

Βήμα 3: Προσαρμογή KPIs στον Ενεργειακό

Η επιλογή των δεικτών (KPIs) για την αξιολόγηση πρακτικών Κυκλικής Οικονομίας στον ενεργειακό τομέα βασίστηκε σε συνδυασμό βιβλιογραφικής ανασκόπησης, θεσμικών προτύπων και επιχειρησιακής εφαρμόσιμότητας. Το αρχικό σύνολο 16 υποψήφιων δεικτών προήλθε από το πλαίσιο *circular supply chain performance measurement* [18], εμπλουτισμένο με δείκτες παρακολούθησης τόσο της Ellen MacArthur Foundation [40] όσο και της Eurostat [34], καθώς και με αναφορές στο πρότυπο SCOR (Supply Chain Operations Reference model) [19].

Η διαδικασία επιλογής στόχευε να διασφαλίσει ότι οι δείκτες:

1. Έχουν υψηλή συνάφεια με τον ενεργειακό τομέα.
2. Είναι μετρήσιμοι με σαφή και επαναλήψιμο τρόπο.
3. Διαθέτουν δεδομένα σε επίπεδο μελετών περίπτωσης.
4. Είναι χρήσιμοι για λήψη αποφάσεων και χάραξη πολιτικής.
5. Ανταποκρίνονται σε σχετικά σύντομα χρονικά διαστήματα (δηλαδή όχι μόνο σε πολύ μακροπρόθεσμες τάσεις).

Για κάθε δείκτη k υπολογίστηκε ένα σύνθετο σκορ:

$$S_k = R_k + M_k + D_k + U_k + T_k$$

όπου:

- R_k : *sector relevance* – σημασία του δείκτη για τον ενεργειακό τομέα,
- M_k : *measurement clarity* – σαφήνεια και μονοσημία στη μέτρηση,
- D_k : *data availability* – διαθεσιμότητα αξιόπιστων δεδομένων,
- U_k : *decision usefulness* – χρησιμότητα του δείκτη για λήψη αποφάσεων,
- T_k : *time responsiveness* – ευαισθησία σε αλλαγές εντός εύλογου χρονικού ορίζοντα.

Ο παραπάνω τύπος προτάθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, ως σύνθεση πέντε κριτηρίων που απαντώνται συχνά στη διεθνή βιβλιογραφία αξιολόγησης δεικτών και σύνθετων δεικτών (composite indicators). Συγκεκριμένα, η επιλογή των κριτηρίων βασίστηκε σε αρχές που παρουσιάζονται για τη δημιουργία σύνθετων δεικτών [56].

Από ένα αρχικό σύνολο δεικτών, διατηρήθηκαν 12 και απορρίφθηκαν 4.

Η διατήρηση βασίστηκε σε τιμή $s_k \geq 7$. Οι δείκτες που απορρίφθηκαν είχαν:

- Χαμηλή διαθεσιμότητα δεδομένων στον ενεργειακό τομέα,
- Περιορισμένη σημασία για τον ελληνικό ενεργειακό σχεδιασμό.

Οι δείκτες που διατηρήθηκαν είναι οι εξής:

- **Material Recovery Rate (MRR):** $\frac{\text{Μανακτημένο}}{\text{ΜΕοL}} \times 100\%$
- **Composite Material Separation Efficiency (CMSE):** $\frac{\text{Μινών-ρητινών εντός προδιαγραφών}}{\text{Μσύνθετου}} \times 100\%$
- **Component Salvage Rate (CSR):** $\frac{\text{Νεπαναχρησιμοποιήσιμων}}{\text{Νσυνολικών}} \times 100\%$
- **Disassembly Time per Unit (DTU):** λεπτά/μονάδα
- **Lifetime Extension Index (LEI):** $\left(\frac{\text{Lμετά}}{\text{Lπριν}} - 1\right) \times 100\%$
- **Residual Heat Utilization Rate (RHUR):** $\frac{\text{Qαξιοποίηση}}{\text{Qαπόρριψη}} \times 100\%$
- **Water Reuse Ratio (WRR):** $\frac{\text{Vεπαν.}}{\text{Vδιαθέσιμου}} \times 100\%$
- **CO₂ Savings per Unit:** $\frac{t\text{CO}_2e}{t\text{CO}_2e, \text{baseline}} \times 100\%$
- **Unit Cost Reduction (UCR):** $\frac{C_{\text{baseline}} - C_{\text{ce}}}{C_{\text{baseline}}} \times 100\%$
- **Payback Period (PP):** έτη
- **Local Energy Autonomy (LEA):** ποσοστό τοπικής κάλυψης ζήτησης
- **Regulatory Readiness (RR):** ποιοτική κλίμακα 1–5

Πίνακας 3-1: Αναλυτική βαθμολόγηση για τους επιλεγμένους δείκτες (S_k)

Δείκτης	R_k	M_k	D_k	U_k	T_k	S_k
Material Recovery Rate (MRR)	2	2	2	2	2	10
Composite Material Separation Efficiency (CMSE)	2	2	1	2	2	9
Component Salvage Rate (CSR)	2	2	2	1	2	9
Disassembly Time per Unit (DTU)	1	2	2	1	2	8
Lifetime Extension Index (LEI)	2	2	1	2	1	8
Residual Heat Utilization Rate (RHUR)	2	1	1	2	2	8
Water Reuse Ratio (WRR)	1	2	1	2	2	8
CO ₂ Savings per Unit	2	2	2	2	2	10
Unit Cost Reduction (UCR)	2	2	2	2	1	9
Payback Period (PP)	2	2	2	1	1	8
Local Energy Autonomy (LEA)	2	2	1	2	2	9
Regulatory Readiness (RR)	2	1	1	2	1	7

Στον Πίνακα 3.1 συνοψίζεται η αναλυτική βαθμολόγηση των 12 διατηρηθέντων δεικτών (KPIs) ως προς τα κριτήρια R_k , M_k , D_k , U_k , T_k , ενώ στον Πίνακα 3.2 τεκμηριώνονται οι 4 δείκτες που δεν διατηρήθηκαν :

- **Material Recovery Rate (MRR):** $R_k=2$ καθώς αποτελεί βασικό δείκτη στις περισσότερες μελέτες και πολιτικές CE. $M_k=2$ με σαφή thresholds (>90%, 70–90% κ.λπ.). $D_k=2$ καθώς υπάρχουν εκτενή δεδομένα από τη βιβλιογραφία και τη βιομηχανία. $U_k=2$ διότι είναι κεντρικό στις πολιτικές ΕΕ για CRM. $T_k=2$ καθώς το MRR αξιολογείται ετησίως .
- **Composite Material Separation Efficiency (CMSE):** $R_k=2$ λόγω συχνής εμφάνισης στη βιβλιογραφία (ιδίως στα blades). $M_k=2$ με ποιοτικά thresholds (πλήρης/μερικός/περιορισμένος διαχωρισμός). $D_k=1$ καθώς τα ποσοτικά δεδομένα είναι περιορισμένα. $U_k=2$ διότι είναι κρίσιμο για την ανακύκλωση σύνθετων. $T_k=2$ καθώς ανταποκρίνεται άμεσα σε αλλαγές μεθόδου.

- **Component Salvage Rate (CSR):** Rk=2 καθώς απαντάται σε πολλές εφαρμογές PV/EV. Mk=2 με ξεκάθαρη ποσοτική κλίμακα. Dk=2 με διαθέσιμα στοιχεία από πιλοτικά έργα. Uk=1 επειδή έχει μικρότερη άμεση αξία για πολιτικές σε σχέση με MRR. Tk=2 αλλαγές αντικατοπτρίζονται άμεσα
- **Disassembly Time per Unit (DTU):** Rk=1 λιγότερο συχνά στις μελέτες. Mk=2 με μετρήσιμα thresholds (<5 λεπτά, 5–10 κ.λπ.). Dk=2 λόγω δεδομένων από έργα ReBattery. Uk=1 περιορισμένη χρησιμότητα σε πολιτική χάραξη. Tk=2 αλλαγές αποτυπώνονται άμεσα.
- **Lifetime Extension Index (LEI):** Rk=2 συχνά στη βιβλιογραφία για predictive maintenance. Mk=2 με σαφή thresholds (+50%, +30–50% κ.λπ.). Dk=1 λιγότερα διαθέσιμα ποσοτικά στοιχεία. Uk=2 σημαντικό για τη βιομηχανία (O&M κόστη). Tk=1 αλλαγές εμφανίζονται μόνο μακροπρόθεσμα.
- **Residual Heat Utilization Rate (RHUR):** Rk=2 σημαντικός δείκτης σε έργα waste-heat recovery. Mk=1 καθώς τα thresholds είναι πιο ασαφή. Dk=1 περιορισμένα δεδομένα ποσοτικά στη βιβλιογραφία. Uk=2 κρίσιμος για την ενεργειακή πολιτική αστικών περιοχών. Tk=2 ο δείκτης ανταποκρίνεται άμεσα σε αλλαγές.
- **Water Reuse Ratio (WRR):** Rk=1 λιγότερο διαδεδομένος σε σχέση με MRR. Mk=2 με σαφή thresholds (>80%, 60–80% κ.λπ.). Dk=1 δεδομένα κυρίως από λίγες περιπτώσεις (ES/IL). Uk=2 υψηλή πολιτική αξία λόγω υδατικού stress. Tk=2 ο δείκτης ανταποκρίνεται άμεσα σε αλλαγές.
- **CO2 Savings per Unit:** Rk=2 ευρέως χρησιμοποιούμενος δείκτης. Mk=2 με ξεκάθαρες ποσοτικές κλίμακες. Dk=2 με εκτενή δεδομένα. Uk=2 κρίσιμος για Green Deal και ETS. Tk=2 οι εξοικονομήσεις αποτυπώνονται ετησίως.
- **Unit Cost Reduction (UCR):** Rk=2 συχνά χρησιμοποιούμενος σε οικονομικές αξιολογήσεις. Mk=2 με thresholds (>40%, 30–40% κ.λπ.). Dk=2 πολλά διαθέσιμα οικονομικά στοιχεία. Uk=2 σημαντικός για επενδυτικές αποφάσεις. Tk=1 οι αλλαγές εμφανίζονται μακροπρόθεσμα.
- **Payback Period (PP):** Rk=2 συχνά εμφανίζεται στις αξιολογήσεις. Mk=2 με ξεκάθαρη κλίμακα (<5, 5–7, 7–10 κ.λπ.). Dk=2 εύκολα διαθέσιμα δεδομένα. Uk=1 μέτρια αξία για πολιτικές αλλά κρίσιμο για επενδυτές. Tk=1 επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες και έτσι έχει μειωμένη χρονική ευαισθησία.
- **Local Energy Autonomy (LEA):** Rk=2 αναφέρεται σε αρκετές μελέτες τοπικής ενέργειας. Mk=2 με thresholds (>80%, 60–80% κ.λπ.). Dk=1

περιορισμένα στοιχεία διαθέσιμα· Uk=2 μεγάλη πολιτική σημασία για την αποκέντρωση· Tk=2 οι αλλαγές αντικατοπτρίζονται μηνιαία .

- **Regulatory Readiness (RR):** Rk=2 πολύ συχνά στη βιβλιογραφία και στις πολιτικές CE· Mk=1 καθώς η μέτρησή του παραμένει ποιοτική· Dk=1 δεδομένα κυρίως περιγραφικά, όχι αριθμητικά· Uk=2 κεντρικό για εφαρμογή τεχνολογιών· Tk=1 εξαρτάται έντονα από το εθνικό πλαίσιο.

Η βαθμολόγηση του Πιν. 3.1 πραγματοποιήθηκε από τον συγγραφέα βάσει τυποποιημένων κριτηρίων που ορίζονται στην ενότητα Βήμα 3 και τεκμηριώνονται βιβλιογραφικά. Σε περιπτώσεις περιορισμένων δεδομένων, η τιμή προέκυψε από συντηρητική εκτίμηση με τεκμηρίωση στις αναφερόμενες πηγές.

Πίνακας 3-2: Δείκτες που δεν διατηρήθηκαν

Δείκτης	Αιτιολόγηση απόρριψης	Σκορ Sk
Reverse Logistics Lead-Time (RL-LT)	Υψηλή συσχέτιση με DTU, ελάχιστη διαθεσιμότητα δεδομένων, δεν αποτυπώνεται σε EoL εξοπλισμό ενέργειας.	5
Sharing Platform Utilization (SPU)	Σχετίζεται κυρίως με B2C κυκλικά μοντέλα, όχι με βαριά ενεργειακή υποδομή.	4
Eco-Design Investment Intensity (EDII)	Υψηλή μεταβλητότητα μεταξύ επιχειρήσεων, δυσκολία στην αξιόπιστη αποτίμηση κόστους.	6
Supplier Code Compliance Rate (SCCR)	Δείκτης συμμόρφωσης, όχι απόδοσης, καλύπτεται εν μέρει από Regulatory Readiness (RR).	5

Παράλληλα, οι δείκτες χαρτογραφήθηκαν στις διεργασίες του μοντέλου circular-SCOR, το οποίο επεκτείνει το SCOR (Plan-Source-Make-Deliver-Return) με δύο επιπλέον κατηγορίες: *Recover* (ανάκτηση πόρων/ενέργειας) και *Enable* (διατομεακές προϋποθέσεις όπως δεδομένα, θεσμικό πλαίσιο, χρηματοδότηση). Η αντιστοίχιση φαίνεται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3-3: Χαρτογράφηση επιλεγμένων δεικτών στο circular-SCOR

Δείκτης	cSCOR διεργασίες
MRR, CMSE	Make / Recover / Return
CSR, DTU	Return / Recover / Enable
LEI	Plan / Make / Enable
RHUR, WRR	Make / Deliver / Recover
CO ₂ Savings	Plan / Make / Deliver
UCR, PP	Plan / Enable
LEA	Plan / Deliver
RR	Enable

Η ενσωμάτωση του προτύπου circular-SCOR στην παρούσα ανάλυση έχει καθοριστική σημασία για τη στρατηγική στόχευση των παρεμβάσεων κυκλικής οικονομίας. Μέσω της αντιστοίχισης των δεικτών KPIs στις φάσεις του μοντέλου (Plan, Source, Make, Deliver, Return, Recover, Enable), καθίσταται δυνατός ο εντοπισμός των κρίσιμων σημείων παρέμβασης στην αλυσίδα αξίας.

Αξία της Χαρτογράφησης SCOR:

Συστηματοποίηση των παρεμβάσεων: Η SCOR-based προσέγγιση επιτρέπει τη δομική ανάλυση της εφοδιαστικής και παραγωγικής αλυσίδας, διασφαλίζοντας ότι οι κυκλικές πρακτικές δεν εφαρμόζονται αποσπασματικά αλλά εντάσσονται σε ένα συνεκτικό πλαίσιο.

Εντοπισμός κενών: Η απουσία KPIs σε ορισμένα στάδια (π.χ. Source) υποδηλώνει την ανάγκη ανάπτυξης νέων δεικτών ή πρακτικών για αυτά τα σημεία.

Καθοδήγηση πολιτικής: Η SCOR αντιστοίχιση επιτρέπει στους φορείς χάραξης πολιτικής να εντοπίζουν πού εντοπίζεται η μεγαλύτερη στρατηγική αξία των παρεμβάσεων, π.χ. στο Enable ή στο Return.

Συμπεράσματα από τη Χαρτογράφηση:

1. Οι περισσότεροι δείκτες αφορούν τα στάδια **Make**, **Recover** και **Enable**, γεγονός που αποτυπώνει ότι η αξία της κυκλικής οικονομίας προκύπτει κυρίως κατά τη μεταποίηση, την ανάκτηση και τη ρυθμιστική/οργανωσιακή στήριξη.

2. Η χαμηλή εκπροσώπηση στο στάδιο **Source** (προμήθειες) υποδηλώνει έλλειψη συστηματικής καταγραφής πρακτικών CE στην προμήθεια πρώτων υλών, ειδικά για κρίσιμα υλικά.

3. Η ύπαρξη του *Enable* ως ξεχωριστής κατηγορίας αναδεικνύει τη σημασία της θεσμικής ετοιμότητας, της διαλειτουργικότητας δεδομένων και της προσβασιμότητας στη χρηματοδότηση για την εφαρμογή CE.

Η χαρτογράφηση αυτή επιτρέπει την ανάλυση των μελετών περίπτωσης του Κεφαλαίου 4 όχι μόνο σε επίπεδο δεικτών αλλά και ως προς το σημείο της εφοδιαστικής/παραγωγικής αλυσίδας όπου οι πρακτικές CE παρεμβαίνουν.

3.1.4

3.1.5

Βήμα 4: Δεδομένα και Πηγές

Η τελική φάση περιλαμβάνει τη σύγκριση διαφορετικών πρακτικών κυκλικότητας ανά υποδομή, τη βαθμολόγηση τους με βάση βιβλιογραφικά δεδομένα και θεσμικές πηγές και την ομαδοποίησή τους σε clusters στρατηγικών.

Από την ανάλυση αυτή προκύπτουν ποσοτικά αποτελέσματα αλλά και ποιοτικά συμπεράσματα που αφορούν τις εμπορικές, τεχνικές και θεσμικές προκλήσεις.

Οι έξοδοι της μεθοδολογίας προκύπτουν μέσα από τη διασταύρωση των αποτελεσμάτων της παραπάνω ανάλυσης με τεχνο-οικονομικά και κανονιστικά δεδομένα. Στην παρούσα εργασία, η αξιολόγηση κάθε πρακτικής στηρίζεται στο επίπεδο TRL, όπως προσδιορίζεται από πηγές της βιβλιογραφίας. Η τεχνολογική ωριμότητα (TRL) αποτελεί δείκτη της ετοιμότητας μιας τεχνολογίας να εφαρμοστεί στην πράξη. Για λόγους απλοποίησης και στρατηγικής κατηγοριοποίησης, γίνεται διάκριση μεταξύ:

- **Ώριμων πρακτικών:** TRL 8–9. Πλήρως αναπτυγμένες και εμπορικά διαθέσιμες.
- **Πιλοτικών πρακτικών:** TRL 6–7. Σε στάδιο δοκιμών ή πρώιμης εφαρμογής.
- **Πρακτικών σε ερευνητικό στάδιο:** TRL 4–5. Σε φάση εργαστηριακής ή μικρής κλίμακας ανάπτυξης.

Για την ιεράρχηση των στρατηγικών εντός του κάθε επιπέδου TRL αξιοποιείται το ΣΚΟΡ που υπολογίστηκε από την πολυκριτηριακή ανάλυση (MCDA), ενώ η στάθμιση των κριτηρίων πραγματοποιείται βάσει αξιολογήσεων από τη βιβλιογραφία και θεσμικές προτεραιότητες. Με αυτό τον τρόπο, διασφαλίζεται ότι οι προτεινόμενες λύσεις είναι κοινωνικά αποδεκτές και τεχνολογικά ρεαλιστικές.

Ο οδικός χάρτης (roadmap) καταρτίζεται βάσει των αποτελεσμάτων της παραπάνω ανάλυσης, ενσωματώνοντας τεκμηριωμένες βέλτιστες πρακτικές και ρυθμιστικές κατευθύνσεις από ευρωπαϊκά προγράμματα (π.χ. Horizon Europe) και πολιτικές πρωτοβουλίες (π.χ. CEAP 2.0). Η λογική πίσω από αυτό είναι η παραγωγή συστάσεων που δεν είναι απλώς περιγραφικές αλλά και εφαρμόσιμες, προσαρμοσμένες στις ιδιαίτερες ανάγκες και περιορισμούς των υφιστάμενων ενεργειακών και διοικητικών υποδομών.

Η μεθοδολογική αυτή προσέγγιση στοχεύει στη γεφύρωση θεωρίας και πράξης, παρέχοντας ένα πλαίσιο λήψης αποφάσεων για πολιτικούς σχεδιαστές, επιχειρήσεις και ερευνητικά κέντρα.

3.1.5 Εμβάθυνση στη Λογική και Στόχευση της Μεθοδολογίας

Ενώ τα προηγούμενα βήματα περιγράφουν το «πώς» υλοποιείται η μεθοδολογία, το παρόν υποκεφάλαιο αναλύει το «γιατί» πίσω από τις επιλογές αυτές και τι επιδιώκεται με την εφαρμογή τους.

Η συστηματική ανάλυση πρακτικών κυκλικής οικονομίας στον ενεργειακό τομέα δεν αποσκοπεί μόνο στη χαρτογράφηση της υφιστάμενης κατάστασης αλλά στη δημιουργία ενός εργαλείου λήψης αποφάσεων. Η επιλογή πολυκριτηριακών μεθόδων (MCDA, AHP) δικαιολογείται από την πολυπλοκότητα του ενεργειακού τομέα, όπου τεχνολογικοί, οικονομικοί, περιβαλλοντικοί και κοινωνικοί παράγοντες αλληλεπιδρούν.

Ειδικότερα:

- Η **ταξινόμηση πρακτικών** βάσει σταδίων CE επιτρέπει την κατανόηση της ωριμότητας των κυκλικών λύσεων και την εντόπιση των πιο κρίσιμων σημείων παρέμβασης (π.χ. σχεδιασμός έναντι ανάκτησης υλικών).
- Η **χρήση δεικτών (KPIs)** δεν αποτελεί απλή μεθοδολογική επιλογή, αλλά εξασφαλίζει ιχνηλασιμότητα, συγκρισιμότητα και δυνατότητα

επαναληψιμότητας των αποτελεσμάτων, γεγονός που είναι απαραίτητο για την υιοθέτηση τους από θεσμικούς φορείς και επιχειρήσεις.

- Η **πολυκριτηριακή αξιολόγηση** ανταποκρίνεται στην ανάγκη εξισορρόπησης μεταξύ διαφορετικών στόχων: μείωσης περιβαλλοντικού αποτυπώματος, ελαχιστοποίησης κόστους, διατήρησης ανταγωνιστικότητας και διασφάλισης κοινωνικής αποδοχής. Η μονοδιάστατη ανάλυση (π.χ. μόνο οικονομική) θα οδηγούσε σε μερικά και μη εφαρμόσιμα συμπεράσματα.
- Η **ανάπτυξη του roadmap** δεν περιορίζεται σε μια περιγραφική λίστα πρακτικών. Αντίθετα, αποτυπώνει την προοδευτική υλοποίηση μέτρων με βάση την τεχνική και θεσμική εφικτότητα, καθώς και την ωριμότητα της αγοράς. Στόχος είναι η παροχή ενός εργαλείου στρατηγικής που μπορεί να καθοδηγήσει φορείς χάραξης πολιτικής και επιχειρήσεις.

Οι «έξοδοι» της μεθοδολογίας (ιεραρχήσεις, δείκτες, roadmap) προκύπτουν ακριβώς για να καλύψουν τα κενά που εντοπίστηκαν στη βιβλιογραφία: έλλειψη συγκρίσιμων δεδομένων, αποσπασματική τεκμηρίωση εφαρμογών και περιορισμένη μεταφορά πρακτικών σε πραγματικά έργα. Ενσωματώνοντας την παραπάνω προσέγγιση, η έρευνα επιδιώκει όχι μόνο την ακαδημαϊκή κατανόηση αλλά και την πρακτική χρησιμότητα των συμπερασμάτων της.

3.2 Έξοδοι της Μεθοδολογίας και Λογική Roadmap

Η μεθοδολογική διαδικασία δεν περιορίζεται στην περιγραφή πρακτικών αλλά οδηγεί σε συγκεκριμένα αποτελέσματα (outputs), τα οποία είναι κρίσιμα για την ανάλυση και την εφαρμογή της Κυκλικής Οικονομίας στον ενεργειακό τομέα.

Προέλευση των Εξόδων

Οι έξοδοι της μεθοδολογίας προκύπτουν από τον συνδυασμό:

- **Ποσοτικών Δεδομένων:** Δείκτες KPIs, στοιχεία Eurostat, reports έργων και βιομηχανίας.
- **Συνδυαστικών Αναλύσεων:** Πολυκριτηριακή αξιολόγηση (MCDA/AHP) και που σταθμίζει την αξία κάθε πρακτικής ως προς τεχνολογική, οικονομική, περιβαλλοντική και κοινωνική διάσταση.

Λογική του Roadmap

Το roadmap δεν αποτελεί αυθαίρετη λίστα δράσεων αλλά προϊόν συστηματικής ανάλυσης. Η λογική ανάπτυξής του βασίζεται σε:

- **Τεχνική ετοιμότητα πρακτικών:** Πρακτικές που βρίσκονται σε αρχικό στάδιο ανάπτυξης τοποθετούνται σε μεταγενέστερους χρονικούς ορίζοντες.
- **Υποδομές και πόροι:** Η διαθεσιμότητα κατάλληλων υποδομών και εξειδικευμένου ανθρώπινου δυναμικού επηρεάζει τον ρυθμό υλοποίησης.

Τελικές Έξοδοι

Η εφαρμογή της μεθοδολογίας αποδίδει:

1. **Βαθμονομημένα βάρη** ανά κριτήριο και υποκριτήριο.
2. **Ιεραρχημένη λίστα πρακτικών και KPIs** για τον ενεργειακό τομέα.
3. Έναν **οδικό χάρτη υλοποίησης** (roadmap) που κατανέμει τις πρακτικές σε short-, medium- και long-term στάδια, με τεκμηρίωση.

Έτσι, η μεθοδολογία παρέχει όχι μόνο αναλυτικά αποτελέσματα αλλά και εφαρμόσιμες κατευθύνσεις στρατηγικού σχεδιασμού, με στόχο την ενίσχυση της κυκλικότητας και την ενσωμάτωσή της στον ελληνικό ενεργειακό τομέα.

3.2.1 Κριτήρια και Σύθεση Δεικτών

Η κατανομή των KPIs σε τέσσερα βασικά κριτήρια (Περιβαλλοντικό, Οικονομικό, Κοινωνικό, Εφοδιαστικό) επιτρέπει την πολυδιάστατη αποτίμηση της απόδοσης κάθε πρακτικής. Για κάθε KPI ορίστηκε τοπικό βάρος εντός του αντίστοιχου κριτηρίου, και στη συνέχεια υπολογίστηκε το παγκόσμιο βάρος μέσω του πολλαπλασιασμού με το βάρος του κριτηρίου, σύμφωνα με το πλαίσιο που περιγράφεται από τους Alfina et al. (2025) [18]. Η διαδικασία αυτή διασφαλίζει τη σταθμισμένη συμβολή κάθε KPI στην τελική αξιολόγηση των πρακτικών. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.4.

Τα συνολικά βάρη (w_k) των KPIs που υπολογίστηκαν ανωτέρω χρησιμοποιούνται στη μεθοδολογία υπολογισμού των τελικών σκορ των πρακτικών, όπως περιγράφεται στην επόμενη υποενότητα.

Πίνακας 3-4: Κατηγοριοποίηση και τοπικά βάρη KPIs ανά κριτήριο (κανονικοποιημένα)

Κριτήριο	KPI	Τοπικό Βάρος	Παγκόσμιο Βάρος(w_k)
Περιβαλλοντικό (0.2522)	MRR	0.2	0.0504
	CMSE	0.2	0.0504
	CO ₂ Savings	0.2	0.0504
	RHUR	0.2	0.0504
	WRR	0.2	0.0504
Οικονομικό (0.3987)	UCR	0.5	0.1994
	PP	0.5	0.1994
Κοινωνικό (0.1052)	RR	0.5	0.0526
	LEI	0.5	0.0526
Εφοδιαστικό (0.2439)	CSR	0.3333	0.0813
	DTU	0.3333	0.0813
	LEA	0.3333	0.0813

3.2.2

Μεθοδολογία Υπολογισμού Τελικών ΣΚΟΡ

Η βαθμολογία κάθε πρακτικής ανά KPI αποδόθηκε με βάση thresholds (π.χ. >90% MRR = 5/5). Ο Πίνακας 3.5 παρουσιάζει τα κατώφλια (thresholds) βαθμολόγησης για καθέναν από τους 12 επιλεγμένους δείκτες. Η λογική είναι να μετατρέπεται η απόδοση κάθε πρακτικής σε ποσοτικοποιημένο σκορ 1–5, ώστε να είναι δυνατή η συγκριτική ανάλυση.

Πίνακας 3-5 Κατώφλια (thresholds) βαθμολόγησης για τους 12 KPIs

KPI	Κριτήρια βαθμολόγησης (1–5)	Πηγή
Material Recovery Rate (MRR)	>90% = 5, 70–90% = 4, 50–70% = 3, 30–50% = 2, <30% = 1	[3][62]
Composite Material Separation Efficiency (CMSE)	Πλήρης διαχωρισμός υλικών = 5, μερικός = 3–4, περιορισμένος = 1–2	[6]
Component Salvage Rate (CSR)	>80% = 5, 60–80% = 4, 40–60% = 3, 20–40% = 2, <20% = 1	[67]
Disassembly Time per Unit (DTU)	<5 λεπτά = 5, 5–10 = 4, 10–20 = 3, 20–30 = 2, >30 = 1	[8]
Lifetime Extension Index (LEI)	>+50% = 5, +30–50% = 4, +10–30% = 3, +0–10% = 2, μηδενική/αρνητική = 1	[52]
Residual Heat Utilization Rate (RHUR)	>80% = 5, 60–80% = 4, 40–60% = 3, 20–40% = 2, <20% = 1	[4]
Water Reuse Ratio (WRR)	>80% = 5, 60–80% = 4, 40–60% = 3, 20–40% = 2, <20% = 1	[8]
CO₂ Savings per Unit	>80% έναντι baseline = 5, 60–80% = 4, 40–60% = 3, 20–40% = 2, <20% = 1	[41][12]
Unit Cost Reduction (UCR)	>40% = 5, 30–40% = 4, 20–30% = 3, 10–20% = 2, <10% = 1	[1]
Payback Period (PP)	<5 έτη = 5, 5–7 = 4, 7–10 = 3, 10–15 = 2, >15 = 1	[5][4]
Local Energy Autonomy (LEA)	>80% = 5, 60–80% = 4, 40–60% = 3, 20–40% = 2, <20% = 1	[7][10]
Regulatory Readiness (RR)	Νομοθεσία πλήρως ώριμη = 5, προχωρημένη = 4, υπό ανάπτυξη = 3, πρώιμη = 2, ανύπαρκτη = 1	[1][11]

- Στους δείκτες ποσοστού (π.χ. **MRR**, **CSR**, **WRR**, **LEA**) τα thresholds βασίζονται σε διεθνείς κατευθυντήριες γραμμές και benchmarks από τη βιβλιογραφία. Η κλίμακα ακολουθεί φθίνουσα διαβάθμιση από πολύ υψηλή απόδοση (>80– 90%) έως ελάχιστη (<20–30%).
- Σε λειτουργικούς δείκτες όπως το **Disassembly Time (DTU)** και ο **Payback Period (PP)**, τα thresholds ορίζονται αντιστρόφως: όσο μικρότερος ο χρόνος/διάρκεια, τόσο υψηλότερη η βαθμολογία. Αυτό αποτυπώνει την πρακτική ευκολία εφαρμογής.
- Για δείκτες βελτίωσης (π.χ. **Lifetime Extension Index**), η κλίμακα δείχνει το ποσοστό αύξησης διάρκειας ζωής. Τιμές άνω του +50% αποδίδουν μέγιστο σκορ.
- Στους δείκτες περιβαλλοντικής απόδοσης (**CO₂ Savings**, **RHUR**), η διαβάθμιση στηρίζεται σε ποσοστά εξοικονόμησης σε σχέση με baseline.
- Τέλος, ο δείκτης **Regulatory Readiness (RR)** έχει ποιοτική διαβάθμιση, από “ανύπαρκτο θεσμικό πλαίσιο” (1) έως “πλήρως ώριμη νομοθεσία” (5), με βάση ευρωπαϊκά κείμενα πολιτικής (CEAP 2.0, σχετικές Οδηγίες).

Για την κάθε πρακτική υπολογίστηκε το τελικό ΣΚΟΡ ως εξής:

$$\Sigma KOP_i = \sum_{j=1}^{12} w_{kj} \times s_{i,j}$$

Όπου

- ΣKOP_i = συνολικό σκορ πρακτικής i
- w_{kj} = παγκόσμιο βάρος του KPI j
- $s_{i,j}$ = βαθμολογία (0-5) της πρακτικής i στο KPI j (0 όπου δεν βρέθηκαν στοιχεία εκτός από το KPI RR)

4. Διεθνείς Πρακτικές

4.1 Εισαγωγή

Η ένταξη των αρχών της Κυκλικής Οικονομίας (Circular Economy – CE) στον ενεργειακό τομέα αποτελεί θεμελιώδη στρατηγική για την επίτευξη των στόχων της Πράσινης Συμφωνίας και της κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050. Η εφαρμογή κυκλικών πρακτικών δεν περιορίζεται στην παραγωγή ενέργειας, αλλά εκτείνεται στον σχεδιασμό, τη χρήση/λειτουργία, την επαναχρησιμοποίηση και την ανάκτηση υλικών και ενέργειας. Σύμφωνα με το μοντέλο της Ellen MacArthur Foundation [38], οι πρακτικές CE ταξινομούνται σε πέντε στάδια: *Κυκλικές Εισροές*, *Κυκλικός Σχεδιασμός*, *Βελτιστοποίηση Χρήσης*, *Παράταση Ζωής* και *Ανάκτηση Πόρων*.

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η αποτίμηση πρακτικών Κυκλικής Οικονομίας στον ενεργειακό τομέα. Η ανάλυση βασίζεται στους 12 δείκτες (KPIs) που διατηρήθηκαν στο Κεφ. 3, με στόχο:

1. την αντιστοίχιση κάθε πρακτικής με συγκεκριμένους δείκτες απόδοσης,
2. την αξιολόγηση του βαθμού τεχνολογικής (TRL)
3. τη διαμόρφωση μιας ιεραρχημένης λίστας των πρακτικών.

4.2 Αναλυτική Αποτίμηση Πρακτικών ανά Στάδιο Κυκλικής Οικονομίας

Για λόγους συνοχής, οι πρακτικές κωδικοποιούνται ως P1, P2, ..., Pn και γίνεται χρήση του κωδικού σε όλους τους πίνακες και τις αναφορές.

4.2.1 Κυκλικές Εισροές (Circular Inputs)

Οι κυκλικές εισροές αφορούν την υποκατάσταση παρθένων πρώτων υλών με ανακυκλωμένες ή ανανεώσιμες, συμβάλλοντας στη μείωση της εξάρτησης από ορυκτούς πόρους και στη μείωση εκπομπών κατά την παραγωγή.

P1 – Carbon2Chem – Thyssenkrupp (Γερμανία):

Το πρόγραμμα Carbon2Chem αξιοποιεί το CO₂ που παράγεται από χαλυβουργίες ως εισροή για την παραγωγή χημικών προϊόντων (π.χ. μεθανόλης, αμμωνίας), μέσω συνδυασμού με H₂ από ηλεκτρόλυση. Η τεχνολογία ενισχύει τη

βιομηχανική συμβίωση και συνεισφέρει στην αποανθρακοποιημένη παραγωγή ενέργειας [51].

KPIs: MRR, CO₂ Savings, LEA, RR.

P2–Bio-bean (ΗνωμένοΒασίλειο):

Η εταιρεία Bio-bean αναπτύσσει βιοκαύσιμα από απόβλητα καφέ. Το βιοκαύσιμο Coffee Logs χρησιμοποιείται σε λέβητες και θερμαντήρες, υποκαθιστώντας ξύλο. Η προσέγγιση ενσωματώνει πρακτικές CE μέσω εντοπισμού νέας αξίας σε απόβλητα ρών τροφίμων [20].

KPIs: CO₂ Savings, PP, RR.

P3 – Verbio Biogas (Γερμανία):

Η Verbio παράγει βιομεθάνιο από υπολείμματα γεωργικών καλλιεργειών και το εγχέει στο εθνικό δίκτυο φυσικού αερίου. Η τεχνολογία συνδυάζεται με ανάκτηση θρεπτικών συστατικών και παραγωγή λιπασμάτων. Η χρήση βιοάνθρακα (biochar) ως προσθετικό αυξάνει την απόδοση χώνευσης και επιτρέπει μόνιμη δέσμευση άνθρακα [12].

KPIs: RUHUR, WRR, CO₂ Savings, PP, LEA , RR

4.2.2 Ανάκτηση Πόρων (Resource Recovery)

Η ανάκτηση πόρων περιλαμβάνει τεχνολογίες που επιτρέπουν την εξαγωγή υλικών, μετάλλων ή ενέργειας από απόβλητα προϊόντα στο τέλος κύκλου ζωής τους.

P4 – ROSI Solar (Γαλλία):

Η ROSI εφαρμόζει διαδικασίες ανάκτησης πολύτιμων χημικών στοιχείων (Si, Ag, Cu) από αποσυρμένα Φ/Β πάνελ. Η μέθοδος βασίζεται σε υδρομεταλλουργικές διεργασίες χαμηλής κατανάλωσης και αυξημένης καθαρότητας προϊόντων. Ενδείκνυται για υποστήριξη κλειστών αλυσίδων ανακύκλωσης [13].

KPIs: MRR, CMSE, CSR, CO₂ Savings, RR.

P5 – DecomBlades (Δανία):

Η κοινοπραξία DecomBlades αναπτύσσει λύσεις μηχανικής και θερμικής ανακύκλωσης πτερυγίων ανεμογεννητριών, εστιάζοντας στη διαχείριση σύνθετων υλικών (π.χ. πολυεστέρες, ίνες γυαλιού) [28]. Το έργο προτείνει προσέγγιση σε βιομηχανική κλίμακα και αποτελεί case study αναφοράς.

KPIs: MRR, CMSE, CO₂ Savings, RR

P6 – Reciclalia (Ισπανία):

Η ισπανική εταιρεία Reciclalia εφαρμόζει τεχνολογίες χημικής διάσπασης για την ανάκτηση ινών άνθρακα από πτερύγια και εξαρτήματα αεροπορικής/ενεργειακής χρήσης. Οι ίνες επαναξιοποιούνται σε βιομηχανικές εφαρμογές, μειώνοντας την ανάγκη για παρθένο υλικό [91].

KPIs: CSR, CSME, CO₂ Savings, UCR, RR.

4.2.3 Κυκλικός Σχεδιασμός (Circular Design)

Ο κυκλικός σχεδιασμός αφορά τον αρχικό σχεδιασμό προϊόντων με τρόπο που να διευκολύνει την αποσυναρμολόγηση, τη συντήρηση και την ανακύκλωση στο τέλος κύκλου ζωής τους. Στον ενεργειακό τομέα, αυτό περιλαμβάνει τη σχεδίαση εξοπλισμού (π.χ. Φ/Β πάνελ, πτερύγια ανεμογεννητριών, μπαταρίες) με βάση τις αρχές της επισκευασιμότητας και ιχνηλασιμότητας.

P7 – CETEC Project (Δανία):

Το ερευνητικό έργο CETEC (Circular Economy for Thermoset Composites) αναπτύσσει τεχνολογίες αποδόμησης θερμοσκληρυνόμενων ρητινών (thermosets) που χρησιμοποιούνται στα πτερύγια ανεμογεννητριών. Μέσω ειδικών χημικών διεργασιών, οι ρητίνες διαχωρίζονται, επιτρέποντας την ανάκτηση ινών άνθρακα/γυαλιού χωρίς καταστροφή της δομής τους [27].

KPIs: CMSE, MRR, RR

P8–Reversible Adhesives–Vestas (Δανία):

Σε συνεργασία με το Fraunhofer Institute, στόχος είναι η ενσωμάτωση αναστρέψιμων συγκολλητικών υλικών στις ενώσεις πτερυγίων [49]. Αυτό επιτρέπει την αποσυναρμολόγηση χωρίς καταστροφή εξαρτημάτων.

KPIs: CMSE, MRR, CSR, RR

4.2.4 Βελτιστοποίηση Χρήσης (Optimized Use)

Περιλαμβάνει λύσεις που επιμηκύνουν τη διάρκεια ζωής του εξοπλισμού μέσω έξυπνης διαχείρισης, πρόληψης απωλειών και βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης κατά τη φάση λειτουργίας.

P9–Smart Heating Networks–Sandvika (Νορβηγία):

Πραγματοποιείται εγκατάσταση υπόγειων αντλιών θερμότητας σε μονάδα επεξεργασίας λυμάτων, συνδεδεμένη με τοπικό δίκτυο τηλεθέρμανσης. Ο συνδυασμός ανάκτησης θερμότητας και θερμικής αποθήκευσης μειώνει την εξάρτηση από εξωτερικές πηγές [57].

KPIs: RHUR, CO₂ Savings , PP, LEA, RR

P10 – Stimergy Data Center Heat Reuse (Γαλλία):

Η εταιρεία Stimergy επαναχρησιμοποιεί τη θερμότητα από servers για την παροχή ζεστού νερού σε σχολεία και δημόσιες υποδομές. Το σύστημα είναι αποκεντρωμένο και προσφέρει τοπική λύση ενεργειακής αποδοτικότητας [65].

KPIs: RHUR, CO₂ Savings , PP, LEA, UCR, RR.

P11–Reuse of Treated Water in Agriculture (Ισπανία/Ισραήλ):

Εφαρμόζονται τεχνικές επαναχρησιμοποίησης τριτοβάθμιας επεξεργασίας λυμάτων σε γεωργική άρδευση. Η πρακτική είναι ώριμη στην Ισπανία και το Ισραήλ, με θεσμικό πλαίσιο και σύστημα ελέγχου ποιότητας [17].

KPIs: WRR, CO₂ Savings, UCR, PP, RR.

P12–Hydroloop Reuse System (Ολλανδία,2024):

Αποτελεί καινοτόμο σύστημα επαναχρησιμοποίησης νερού για οικιακή και βιομηχανική χρήση, με ενσωματωμένη τεχνητή νοημοσύνη. Μειώνει κατά 30–45% την κατανάλωση νερού, συνεισφέροντας στον δείκτη Water Reuse Ratio (WRR). Προσφέρει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για χώρες με υδατικό stress [49].

KPIs: WRR, CO₂ Savings,UCR, PP, RR.

4.2.5 Παράταση Ζωής (Life Extension)

Αφορά την παράταση του κύκλου ζωής προϊόντων μέσω επαναχρησιμοποίησης, αναβάθμισης και προληπτικής συντήρησης.

P13 – 2nd-life PV Marketplace (Ελβετία):

Βασικός στόχος είναι η ανάπτυξη διαδικτυακών αγορών πιστοποιημένων Φ/Β πάνελ που έχουν ελεγχθεί μέσω DPP και αξιολογηθεί για επαναχρησιμοποίηση σε χαμηλών απαιτήσεων εγκαταστάσεις [37].

KPIs: CSR, LEI, UCR, PP, RR.

P14 –Predictive Maintenance (2022):

Με τη χρήση αισθητήρων και τεχνολογιών AI πραγματοποιείται ανάλυση δεδομένων λειτουργίας με σκοπό την πρόβλεψη βλαβών. Η πρακτική εφαρμόζεται σε ανεμογεννήτριες, Φ/Β, HVAC κ.λπ., επιτρέποντας μειωμένο downtime και παρατεταμένη λειτουργικότητα [66].

KPIs: LEI, UCR, PP, CO₂ Savings, RR.

4.2.6 Νεότερες Ευρωπαϊκές Εξελίξεις (2023–2024)

P15 – Green Hydrogen Valleys (ΕΕ, 2023–2024):

Προτείνεται η δημιουργία «πράσινων κοιλάδων υδρογόνου» σε βιομηχανικά clusters, με έμφαση στην τοπική παραγωγή/κατανάλωση H₂ από ΑΠΕ. Οι κοιλάδες περιλαμβάνουν υποδομές ηλεκτρόλυσης, αποθήκευσης, διανομής και τελικής χρήσης. Η πρωτοβουλία επιταχύνει την ενσωμάτωση του H₂ στις τοπικές ενεργειακές στρατηγικές και μειώνει τη χρήση ορυκτών καυσίμων στη βιομηχανία [26].

KPIs: PP, LEA, RR.

P16 – Cylib EV Recycling (Γερμανία, 2024):

Αποτελεί πρωτοβουλία για την ανακύκλωση μπαταριών ιόντων λιθίου από EVs, με στόχο την ποσοστιαία ανάκτηση >90% κρίσιμων μετάλλων (Li, Co, Ni) [29].

KPIs: MRR, DTU, CO₂ Savings, PP, RR.

P17 – CarbFix (Ισλανδία, 2023):

Προτείνεται η δέσμευση CO₂ από γεωθερμικές μονάδες και ορυχεία, με μόνιμη αποθήκευση σε βασαλτικά πετρώματα μέσω ορυκτοποίησης [23].

KPIs: CO₂ Savings, RR.

P18 – Urban Mining Data Centers (Σουηδία, 2023):

Συνδυάζει την ανάκτηση τόσο πολύτιμων μετάλλων (Au, Cu, REEs) όσο και θερμότητας από data centers. Αναδεικνύει τον ρόλο της αστικής μεταλλευτικής (urban mining) στη μετάβαση προς την κυκλική οικονομία [157].

KPIs: MRR, RHUR, CO₂ Savings, PP, LEA, RR.

P19 – Floating PV Recycling Scheme (Ολλανδία, 2024):

Αποτελεί καινοτόμο σχεδιασμό πλωτών φωτοβολταϊκών με ενσωματωμένο πλάνο ανακύκλωσης. Δείχνει πως ο κυκλικός σχεδιασμός μπορεί να είναι εξαρχής ενσωματωμένος στα έργα ΑΠΕ [22].

KPIs: MRR, CSME, CSR, PP, RR.

4.2.7 Αντιστοίχιση KPIs ανά Πρακτική και Βαθμολόγηση

Στους Πίνακες 4.1, 4.2 παρουσιάζονται όλες οι πρακτικές (P1–P19), οι δείκτες απόδοσης (KPIs) που αντιστοιχούν σε κάθε μία, τα ποσοτικά σκορ ανά KPI, καθώς και το τελικό σταθμισμένο σκορ. Οι αριθμοί σε παρενθέσεις δίπλα σε κάθε πρακτική αντιστοιχούν στο τελικό σκορ (0–5).

Παράδειγμα υπολογισμού τελικού σκορ για την πρακτική P2

$$\Sigma KOP2 = (0.0504 \times 5) + (0.1994 \times 5) + (0.0526 \times 5) = 1.512$$

Πίνακας 4-1 Συνολική αντιστοίχιση πρακτικών με KPIs, ποσοτικά δεδομένα και τελικό σκορ

Πρακτική-Χώρα/Φορέας	Στάδιο CE	KPIs & Ποσοτικά δεδομένα (με thresholds)	Τελικό Σκορ (0-5)
P1 – Thyssenkrupp Carbon2Chem/ DE	Κυκλικές εισροές	CO ₂ savings: 78% (4/5) [68]; LEA: <20% (1/5) [69]; RR: Προχωρημένο (4/5) [70]	0.5941
P2 –Bio-bean Ltd. bean / UK	Κυκλικές εισροές	RR: ώριμο (5/5) [73]; CO ₂ savings: <0 (5/5) [71]; PP: payback 1.4 έτη (5/5) [72]	1.512
P3 – Verbio Verbio AG / Biogas DE	Κυκλικές εισροές	RHUR: <20% (1/5) [74]; WRR: =100% (1/5) [75]; CO ₂ savings: <0 (3/5) [76]; LEA: <20% (1/5) [78]; PP: 6.1 (2/5) [77]; RR: ώριμο (5/5) [79]	1.6963
P4 – ROSI ROSI / FR Solar	Ανάκτηση πόρων	MRR: >90% (5/5) [80]; CMSE: πλήρης διαχωρισμός Si/Ag (5/5) [81]; CSR: 20% (2/5) [82]; CO ₂ savings: 34% (2/5) [83]; RR: ώριμο (5/5) [84];	1.0304
P5 – Consortium / DecomBlades DK	Ανάκτηση πόρων	MRR: 70% (4/5) [85]; CO ₂ savings: 90% (5/5) [86]; RR: προχωρημένο (4/5) [87]	0.664
P6 –Reciclalia Reciclalia / ES	Ανάκτηση πόρων	CSR: 60% (4/5) [89] [90]; CMSE: πλήρης διαχωρισμός (5/5) [88]; CO ₂ savings: 90% (4/5) [91] ; UCR: 80% (5/5) [92] [93]; RR: προχωρημένο (4/5) [94]	1.9553
P7 – CETEC Project Vestas / DK	Κυκλικός σχεδιασμός	MRR: 65% (3/5) [95] ; RR: προχωρημένο (4/5) [96] ; CMSE: πλήρης διαχωρισμός (5/5) [97] ;	0.6136

Πρακτική-Χώρα/Φορέας	Στάδιο CE	KPIs & Ποσοτικά δεδομένα (με thresholds)	Τελικό Σκορ (0-5)
P8– Reversible Adhesives Vestas / DK	Κυκλικός σχεδιασμός	MRR: 95% (2/5)[98] ; CSR: 95% (5/5) [100] ; RR: Δεν υπάρχει (1/5); CMSE : πλήρης διαχωρισμός (5/5) [99] ;	0.9631
P9 – Smart Heating Municipality / NO	Βελτιστοποίηση χρήσης	RHUR: 30% (2/5) [101] ; LEA: 52% (4/5) [104] ; CO ₂ savings: 95% (5/5) [102] [103] ; UCR: <10% (1/5)[104] ; PP: <5 (5/5) [103]; RR: ώριμο (5/5) [106]	2.0561
P10–Stimergy Stimergy / FR	Βελτιστοποίηση χρήσης	RHUR: 94% (5/5) [107] ; LEA: 60% (4/5) χρήσης [111] ; CO ₂ savings: 20% (1/5) [108] ; PP: 5-7 (4/5) [110] ; UCR<20% (1/5) [109] ; RR: πρώιμο (2/5) [112]	1.7802
P11 – Water Reuse Public Utilities / ES-IL	Βελτιστοποίηση χρήσης	WRR: >80% (5/5) [148]; CO ₂ savings: <20% (1/5) [149]; UCR: 30-60% (5/5) [150]; RR: ώριμο (5/5) [152]; PP: payback 1.3 έτη (5/5) [151];	2.5594
P12– Hydroloop Hydroloop/ NL	Βελτιστοποίηση χρήσης	WRR:+30–45% (3/5) [113]; UCR: 45% (5/5) [115] ; PP: 4-12 έτη (3/5) [116]; CO ₂ savings: <20% (1/5) [114]; RR: πρώιμο (2/5) [117];	1.902
P13 – 2ndlife PV Marketplace Private Sector/ CH	Παράταση ζωής	CSR: 50% (5/5) [118]; PP: >15 (1/5) [121] ; UCR: 60% (5/5) [120]; LEI: +50% (5/5) [119]; RR: προχωρημένο (4/5) [122]	2.0763
P14–Predictive Maintenance Sweden (Pilot)	Παράταση ζωής	LEI: +20% (3/5) [123]; PP:<1 (5/5) [126]; CO ₂ savings: 19% (1/5) [124]; RR: ώριμο (5/5) [127][128]; UCR: 20% (3/5) [125]	2.0664
P15 – Green Hydrogen Valleys EU Initiative	Κυκλικές εισροές	LEA: 40-80% (4/5) [130]; PP: 11 (2/5) [129]; RR: ώριμο (5/5) [131]	0.987

Πρακτική-Χώρα/Φορέας	Στάδιο CE	KPIs & Ποσοτικά δεδομένα (με thresholds)	Τελικό Σκορ (0-5)
P16 – Cylib EV Recycling Consortium / DE	Ανάκτηση πόρων	MRR: 45% (2/5) [132]; RR: ώριμο (5/5) [136]; PP: 5.7 έτη (4/5) [135]; DTU: 30min (2/5) [133]; CO ₂ savings: 50% (3/5) [134];	1.4752
P17 – CarbFix Iceland	Ανάκτηση πόρων	CO ₂ savings: 95% (5/5) [137]; RR: ώριμο (5/5) [138]	0.515
P18 – Urban Mining DCs Iceland	Ανάκτηση πόρων	MRR: 90% (5/5) [139]; RHUR: 50-60% (2/5) [140]; CO ₂ savings: 35% (2/5) [141] ; PP=10-20 (2/5) [142]; LEA=1.5% (1/5) [143]; RR: προχωρημένο (4/5) [144]	1.2471
P19 – Floating PV Recycling NL (Pilot)	Κυκλικός σχεδιασμός	MRR: 99% (5/5) [145]; CSME: 100% (5/5) [146]; PP: 7–8 έτη (3/5) Error! Reference source not found. ; RR: ώριμο (5/5) [84]	1.3652

Για κάποιες από τις παραπάνω τιμές χρειάστηκε η εκτέλεση επιπλέον υπολογισμών ή η εκτίμηση των αποτελεσμάτων της βιβλιογραφίας με σκοπό την εννοποίηση των μονάδων μέτρησής τους. Συγκεκριμένα:

- Για την P1, υφίσταται τοπική αυτονομία ενέργειας (LEA) χωρίς να αναφέρεται συγκεκριμένο ποσοστό και έτσι ο δείκτης LEA έλαβε την τιμή 1 [68]. Παράλληλα στις περισσότερες Ευρωπαϊκές χώρες το ρυθμιστικό πλαίσιο είναι ώριμο, ωστόσο δεν είναι σαφές σε όλες όσον αφορά την χρήση του ανακυκλωμένου CO₂ και ως αποτέλεσμα το ρυθμιστικό πλαίσιο θεωρείται προχωρημένο [70].
- Για την P2, το αποτύπωμα των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα είναι αρνητικό καθώς υπάρχει δέσμευση CO₂ [71] και έτσι ο δείκτης CO₂ savings έλαβε την τιμή 5. Παρόμοια αξιολογήθηκαν όλες οι πρακτικές που αφορούν δέσμευση CO₂ ως προς το συγκεκριμένο KPI.

- Για την P3, η παραγόμενη θερμότητα χρησιμοποιείται για να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες όλων των διεργασιών, καθώς και για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [78] χωρίς να αναφέρεται συγκεκριμένο ενεργειακό μείγμα. Ο δείκτης LEA αξιολογήθηκε με την τιμή 1.
- Για την P5, παράγονται 1.2 gCO₂eq [86], ενώ το baseline είναι 10-15 gCO₂eq/kWh [153]. Τα στοιχεία αυτά δίνουν δείκτη CO₂ savings >90% και έτσι βαθμολογήθηκε με 5.
- Για την P6, παράγονται 1.3 gCO₂eq [91], ενώ το baseline είναι 10-15 gCO₂eq/kWh [153]. Τα στοιχεία αυτά δίνουν δείκτη CO₂ savings >90% και έτσι βαθμολογήθηκε με 5. Επιπλέον το κόστος για ανακυκλωμένο ανθράκονυμα ανέρχεται στα 4.83€/kg [92], ενώ το παρθένο ανθράκονυμα στα 22€/kg [93]. Ο δείκτης UCR ισούται με 80%.
- Για την P8, μόνο τα adhesives δεν ανακτώνται και αποτελούν το 5% του βάρους του πτερυγίου και έτσι CSR=95% και βαθμολογήθηκε με την τιμή 5 [100].
- Για την P9, και για τις υπόλοιπες πρακτικές που αφορούν επαναχρησιμοποίηση θερμότητας λήφθηκε η παραδοχή ότι τα συστήματα αναφοράς λειτουργούσαν με φυσικό αέριο. Οι αντλίες θερμότητας εκπέμπουν 11.9 gCO₂eq/kWh [102]. Ενώ το φυσικό αέριο κατά την καύση του εκπέμπει 253 gCO₂eq/kWh [103]. Ο δείκτης CO₂ savings ισούται με 95% και έλαβε την τιμή 5. Επιπλέον υπήρχαν οικονομικά πλεονεκτήματα χωρίς να αναφέρεται συγκεκριμένο ποσοστό [104], έτσι ο δείκτης UCR βαθμολογήθηκε με 1.
- Για την P10, η περίοδος αποπληρωμής προβλέπεται να είναι σημαντικά χαμηλή [110]. Η πρόταση αυτή τοποθετεί την περίοδο αποπληρωμής σε ένα διάστημα μεταξύ 5-7 ετών και έτσι ο δείκτης PP αξιολογείται με την τιμή 4. Παράλληλα παρατηρείται μειωμένο κόστος [109] χωρίς αναφορά σε συγκεκριμένες τιμές. Έτσι ο δείκτης UCR λαμβάνει τιμές κάτω από 20% και έτσι βαθμολογήθηκε με την τιμή 1.
- Για την P11, το ανακυκλωμένο νερό είναι αρκετά πιο οικονομικό [150]. Η πρόταση αυτή τοποθετεί τον δείκτη UCR μεταξύ των τιμών 30 και 60% και έτσι βαθμολογήθηκε με την τιμή 5.
- Για την P12, σε απολογισμούς της εταιρίας Hydroloop αναφέρεται μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα χωρίς την παράθεση συγκεκριμένου ποσοστού [114]. Ως αποτέλεσμα ο δείκτης CO₂ savings βαθμολογήθηκε με 1.

- Για την P13, υφίσταται περιορισμένη κερδοφορία [121], έτσι θεωρείται πως ο χρόνος αποπληρωμής ξεπερνάει τα 15 έτη και ο δείκτης PP βαθμολογήθηκε με την τιμή 1.
- Για τη P18, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ανέρχονται στα 65 gCO₂eq/kWh [141]. Ενώ το φυσικό αέριο κατά την καύση του εκπέμπει 253 gCO₂eq/kWh [103]. Ο δείκτης CO₂ savings ισούται με 34% και βαθμολογήθηκε με την τιμή 2.

Ακολουθεί ο συνολικός πίνακας αποτίμησης των πρακτικών ως προς τα KPI

Αντιστοίχιση KPIs:

- KPI1: Material Recovery Rate (MRR)
- KPI2: Composite Material Separation Efficiency (CMSE)
- KPI3: Component Salvage Rate (CSR)
- KPI4: Disassembly Time per Unit (DTU)
- KPI5: Lifetime Extension Index (LEI)
- KPI6: Residual Heat Utilization Rate (RHUR)
- KPI7: Water Reuse Ratio (WRR)
- KPI8: CO₂ Savings per Unit
- KPI9: Unit Cost Reduction (UCR)
- KPI10: Payback Period (PP)
- KPI11: Local Energy Autonomy (LEA)
- KPI12: Regulatory Readiness (RR)

Πίνακας 4-2 Βαθμολογίες πρακτικών ανά ΚΡΙ (κλίμακα 1–5)

Πρακτική	ΚΡΙ1	ΚΡΙ2	ΚΡΙ3	ΚΡΙ4	ΚΡΙ5	ΚΡΙ6	ΚΡΙ7	ΚΡΙ8	ΚΡΙ9	ΚΡΙ10	ΚΡΙ11	ΚΡΙ12
P1	4	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	4
P2	4	0	0	0	0	0	0	5	0	5	0	5
P3	0	0	0	0	0	1	5	5	0	4	1	5
P4	5	5	2	0	0	0	0	2	0	0	0	5
P5	4	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	4
P6	0	5	3	0	0	0	0	5	5	0	0	4
P7	3	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
P8	5	5	5	0	0	0	0	0	0	0	0	1
P9	0	0	0	0	0	2	0	5	1	5	3	5
P10	0	0	0	0	0	5	0	2	1	4	4	2
P11	0	0	0	0	0	0	5	1	5	5	0	5
P12	0	0	0	0	0	0	3	1	5	3	0	2
P13	0	0	5	0	5	0	0	0	5	1	0	4
P14	0	0	0	0	3	0	0	1	3	5	0	5
P15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	4	5
P16	2	0	0	2	0	0	0	3	0	4	0	5
P17	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	5
P18	5	0	0	0	0	3	0	2	0	2	1	5
P19	5	5	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5

Η τελική κατάταξη των πρακτικών παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα

Πίνακας 4-3 Τελική κατάταξη πρακτικών

Πρακτική	Τελικό Σκορ (0-5)	Κατάταξη
P11	2.5594	1
P13	2.0763	2
P14	2.0664	3
P9	2.0561	4
P6	1.9553	5

Πρακτική	Τελικό Σκορ (0-5)	Κατάταξη
P12	1.902	6
P10	1.7802	7
P3	1.6963	8
P2	1.512	9
P16	1.4752	10
P19	1.3652	10
P18	1.2471	12
P4	1.0304	13
P15	0.987	14
P8	0.9631	15
P5	0.664	16
P7	0.6136	17
P1	0.5941	18

4.2.8 Βαθμός Τεχνολογικής Ωριμότητας και Στάδιο Εφαρμογής

Η τεχνολογική ωριμότητα (TRL) αποτελεί δείκτη της ετοιμότητας μιας τεχνολογίας να εφαρμοστεί στην πράξη. Για λόγους απλοποίησης και στρατηγικής κατηγοριοποίησης, γίνεται διάκριση μεταξύ:

- **Όριμων πρακτικών:** TRL 8–9. Πλήρως αναπτυγμένες και εμπορικά διαθέσιμες.
- **Πιλοτικών πρακτικών:** TRL 6–7. Σε στάδιο δοκιμών ή πρώιμης εφαρμογής.
- **Πρακτικών σε ερευνητικό στάδιο:** TRL 4–5. Σε φάση εργαστηριακής ή μικρής κλίμακας ανάπτυξης.

Η κατηγοριοποίηση των πρακτικών παρουσιάζεται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 4-4 Αξιολόγηση Βαθμού Τεχνολογικής Ωριμότητας Πρακτικών

Πρακτική	TRL	Σχόλια
P1– Carbon2Chem	6-7	Βιομηχανική επίδειξη, απαιτεί εμπορικές συμπράξεις.
P2 – Bio-bean	6-7	Εμπορικά προχωρημένη, χαμηλό ρίσκο.
P3–Verbio	8-9	Λειτουργεί σε Γερμανία, θεσμικά εμπόδια στην Ελλάδα
P4 – ROSI Solar	8-9	Εμπορικά ώριμη, υψηλό CapEx
P5- DecomBlades	6-7	Πιλοτική μονάδα, υψηλή ενεργειακή ένταση
P6 – Reciclalia	6-7	Ανακύκλωση ινών άνθρακα σε εμπορικό επίπεδο.
P7 – CETEC Project	6-7	Πιλοτικό έργο, μακροπρόθεσμη αξία.
P8 – Reversible Adhesives	4-5	Σε δοκιμές με Vestas.
P9 – Smart Heating	6-7	Εφαρμοσμένη τεχνολογία, χρειάζεται τηλεθέρμανση.
P10 – Stimergy	8-9	Εμπορικά ώριμη, εύκολη υλοποίηση σε data centers.
P11 – Water Reuse	8-9	Πλήρως ώριμη σε ES/IL, ισχυρό θεσμικό πλαίσιο.
P12 – Hydroloop	8-9	Εφαρμοσμένη τεχνολογία, υψηλό δυναμικό για αστικά κέντρα.
P13 – 2nd-life PV Marketplace	6-7	Σε πρώιμο στάδιο αγοράς, απαιτεί πιστοποίηση.
P14 – Predictive Maintenance	8-9	Τεχνολογικά ώριμη και εμπορικά διαθέσιμη
P15 – Green Hydrogen Valleys	6-7	Πιλοτική υλοποίηση σε clusters, απαιτεί επενδύσεις.

Πρακτική	TRL	Σχόλια
P16 – Cylib EV Recycling	6-7	Τεχνολογικά προχωρημένη αλλά υψηλό CapEx, περιορισμένη κερδοφορία.
P17 – CarbFix	6-7	Λειτουργεί σε Ισλανδία, αλλά απαιτεί ειδική γεωλογία.
P18 – Urban Mining DCs (advanced)	4-5	Σε στάδιο επίδειξης, απαιτεί συνεργασίες με data centers.
P19 – Floating PV Recycling	4-5	Καινοτόμος σχεδιασμός, σε στάδιο επίδειξης.

4.2.9 Κατάταξη Πρακτικών Κυκλικής Οικονομίας

Η κατηγοριοποίηση των πρακτικών παρουσιάζεται στην ακόλουθη **Κατάταξη** βάσει της παραπάνω λογικής. Εντός κάθε χρονικού ορίζοντα, οι πρακτικές ταξινομούνται με βάση το **τελικό τους σκορ** όπως υπολογίστηκε στο Κεφ. 4.2.7

- **Βραχυπρόθεσμα εφαρμόσιμες (TRL 8-9)**

Οι παρακάτω πρακτικές χαρακτηρίζονται με TRL 8-9 καθώς βρίσκουν εμπορικές εφαρμογές σε πολλές χώρες και έτσι καθίστανται τεχνολογικά ώριμες.

- i. P11 – Water Reuse (2.5594)
- ii. P14 – Predictive Maintenance (2.0664)
- iii. P12 – Hydroloop (1.902)
- iv. P10 – Stimergy (1.7802)
- v. P3 – Verbio Biogas (1.6963)
- vi. P4 – ROSI Solar (1.0304)

- **Μεσοπρόθεσμες (TRL 6–7)**

Οι πρακτικές αυτές αξιοποιούνται σε πιλοτικά έργα ή έχουν περιορισμένες εμπορικές εφαρμογές αλλά έχουν περάσει το στάδιο της έρευνας και της ανάπτυξης.

- vii. P13 – 2nd-life PV (2.0763)
- viii. P9 – Smart Heating (2.0561)

- ix. P6 – Reciclalia (1.9553)
- x. P2 – Bio-bean (1.512)
- xi. P16 – Cylib (1.4752)
- xii. P15 – Green Hydrogen Valleys (0.987)
- xiii. P5 – DecomBlades (0.664)
- xiv. P7 – CETEC (0.6136)
- xv. P1 – Carbon2Chem (0.5941)
- xvi. P17 – CarbFix (0.515)

- **Μακροπρόθεσμες (TRL 4–5)**

Πρακτικές σε στάδια ανάπτυξης που δεν έχουν ακόμα πιλοτικά στάδια εφαρμογής.

- xvii. P19 – Floating PV Recycling (1.3652)
- xviii. P18 – Urban Mining (1.2471)
- xix. P8 – Reversible Adhesives (0.9631)

4.3 Συμπερασματική Αποτίμηση και Συγκριτική Ανάλυση

Η ανάλυση των μελετών περίπτωσης ανέδειξε ότι οι πρακτικές κυκλικής οικονομίας στον ενεργειακό τομέα δεν είναι ομοιογενείς αλλά διαφοροποιούνται ανάλογα με το στάδιο του κύκλου ζωής, την τεχνολογική βάση, καθώς και το θεσμικό και κοινωνικό περιβάλλον στο οποίο αναπτύσσονται. Ενώ σε κάποιες περιπτώσεις το επίκεντρο είναι η ανάκτηση υλικών (π.χ. ROSI Solar, Reciclalia), σε άλλες κυριαρχεί η λογική της αποδοτικότερης χρήσης (Stimergy, Sandvika) ή της παράτασης ζωής (Predictive Maintenance, Second-life PV).

Η αξιολόγηση με βάση τους δείκτες (KPIs) επιτρέπει μια συγκριτική αποτίμηση των πρακτικών:

- Οι δείκτες που αφορούν την εφοδιαστική (π.χ. Component Salvage Rate, Disassembly Time per Unit, Local Energy Autonomy) αναδεικνύουν υψηλές επιδόσεις σε λύσεις που εστιάζουν στην ανάκτηση πόρων, αλλά συχνά με αυξημένο ενεργειακό κόστος.
- Οι περιβαλλοντικοί δείκτες δείχνουν ότι η βελτιστοποίηση χρήσης και η επαναχρησιμοποίηση θερμότητας έχουν άμεσο και μετρήσιμο αποτύπωμα στη μείωση εκπομπών CO₂.
- Οι οικονομικοί δείκτες (Unit Cost Reduction, Payback Period) διαφοροποιούνται σημαντικά: Πρακτικές χαμηλού κόστους (π.χ. Smart Heating Networks) εμφανίζουν γρήγορη απόσβεση, ενώ έργα υψηλής

τεχνολογικής πολυπλοκότητας (π.χ. Urban Mining) απαιτούν μεγαλύτερους ορίζοντες απόδοσης.

- Οι κοινωνικοί και θεσμικοί δείκτες αναδεικνύουν ότι η αποδοχή και η κανονιστική συμβατότητα είναι κρίσιμοι παράγοντες για την κλιμάκωση. Παράδειγμα αποτελεί η επαναχρησιμοποίηση νερού σε Ισπανία/Ισραήλ, η οποία κατέστη δυνατή μόνο μέσω θεσμικού πλαισίου.

Από τη συγκριτική ανάλυση προκύπτουν ορισμένα κρίσιμα συμπεράσματα:

- Συγκεκριμένα για τις πρακτικές κυκλικών εισροών:
 - Η P1- Charbon2Chem έχει υψηλή περιβαλλοντική αξία και απαιτεί μικρή θεσμική προσαρμογή.
 - Η P2-BioBean είναι οικονομικά, περιβαλλοντικά αποδοτική και θεσμικά ώριμη.
 - Η P3-Verbio έχει υψηλούς περιβαλλοντικούς δείκτες, ώριμο θεσμικό πλαίσιο αλλά έχει μέτρια οικονομική απόδοση.
 - P15-Green Hydrogen Valleys παρουσιάζει χαμηλή κερδοφορία αλλά έχει υψηλή κοινωνική αξία και καθίσταται τεχνολογικά ώριμη.
- Οι πρακτικές με έμφαση στην ανάκτηση:
 - Η P4-ROSI είναι τεχνολογικά ώριμη και περιβαλλοντικά αποδοτική αλλά παραμένει λογιστικά απαιτητική.
 - Η P5-DecomBlades έχει πολύ υψηλή περιβαλλοντική αξία και είναι τεχνολογικά προχωρημένη.
 - Η P6-Reciclaia συνδυάζει σημαντική οικονομία πόρων και περιβαλλοντική απόδοση με υψηλή εφοδιαστική επίδοση και θεσμική ωριμότητα.
 - Η P16-Cylib παρουσιάζει μέτρια απόδοση σε περιβαλλοντικά και λογιστικά κριτήρια, ωστόσο παραμένει μια ώριμη και οικονομικά βιώσιμη πρακτική.
 - Η P17-CarbFix συνδυάζει υψηλή περιβαλλοντική απόδοση με θεσμική ωριμότητα.
 - Η P18-Urban Mining έχει μέτρια περιβαλλοντική απόδοση και είναι οικονομικά απαιτητική αλλά έχει προχωρημένο θεσμικό πλαίσιο.

- Οι λύσεις βελτιστοποίησης χρήσης:
 - Η P9-Smart Heating και η P10-Stimenergy συνδυάζουν ικανοποιητική οικονομική απόδοση με υψηλή περιβαλλοντική αξία και θεσμική ωριμότητα.
 - Η P11-Treated Water Reuse παρουσιάζει μεγάλη οικονομική και περιβαλλοντική απόδοση και καθίσταται τεχνολογικά ώριμη.
 - Η P12-Hydroloop είναι οικονομικά αποδοτική αλλά παρουσιάζει μικρή περιβαλλοντική επίδοση και είναι θεσμικά πρώιμη.
- Οι πρακτικές παράτασης ζωής:
 - Η P13- Second-life PV έχει μέτρια οικονομική απόδοση αλλά υψηλή κοινωνική αξία.
 - Η P14-Predictive Maintenance συνδυάζει υψηλή οικονομική αποδοτικότητα με μεγάλη θεσμική ωριμότητα, ωστόσο έχει χαμηλή περιβαλλοντική επίδοση.
- Οι πρακτικές που αφορούν κυκλικό σχεδιασμό
 - Η P7-CETEC παρουσιάζει υψηλή εφοδιαστική επίδοση και θεσμική ωριμότητα, αλλά παραμένει η μέτρια η περιβαλλοντική της απόδοση.
 - Η P8-Reversible Adhesives συνδυάζει υψηλή περιβαλλοντική και εφοδιαστική απόδοση, αλλά είναι θεσμικά ανώριμη.
 - Η P19-Floating PV Recycling είναι θεσμικά ώριμη, περιβαλλοντικά αποδοτική αλλά είναι οικονομικά απαιτητική.

Πίνακας 4-5: Συνολικός πίνακας πρακτικών Κυκλικής Οικονομίας (2020–2024) με βάση τα 12 KPIs

Πρακτική	Φορέας/Χώρα	Στάδιο CE	KPIs
Carbon2Chem	Thyssenkrupp / DE	Κυκλικές Εισροές	MRR, CO ₂ Savings, LEA, RR
Bio-bean	Bio-bean Ltd. / UK	Κυκλικές Εισροές	CO ₂ Savings, PP, RR
Verbio Biogas	Verbio AG / DE	Κυκλικές Εισροές	RHUR,WRR, CO ₂ Savings, PP, LEA, RR

Πρακτική	Φορέας/Χώρα	Στάδιο CE	KPIs
ROSI Solar	ROSI / FR	Ανάκτηση Πόρων	MRR, CMSE, CSR, CO ₂ Savings, RR
DecomBlades	Consortium / DK	Ανάκτηση Πόρων	MRR, CO ₂ Savings, RR
Reciclalia	Reciclalia / ES	Ανάκτηση Πόρων	CSME, CSR, CO ₂ Savings, UCR, RR
CETEC Project	Vestas / DK	Κυκλικός Σχεδιασμός	MRR, CMSE, RR
Reversible Adhesives	Vestas / DK	Κυκλικός Σχεδιασμός	MRR, CSME, CSR, RR
Stimergy	Stimergy / FR	Βελτιστοποίηση Χρήσης	RHUR, LEA, PP, CO ₂ Savings, RR
Treated Water Reuse	Public Utilities / ES-IL	Βελτιστοποίηση Χρήσης	WRR, CO ₂ Savings, PP LEA, UCR, RR
Smart Heating	Municipality / NO	Βελτιστοποίηση Χρήσης	RHUR, CO ₂ Savings, PP, LEA, RR
Predictive Maintenance	Various / EU	Παράταση Ζωής	LEI, CO ₂ Savings, UCR, PP, RR
2nd-life PV Marketplace	Private Sector / CH	Παράταση Ζωής	CSR, LEI, UCR, PP, RR
Hydroloop	Hydroloop / NL	Βελτιστοποίηση Χρήσης	WRR, CO ₂ Savings, UCR, PP, RR

Πρακτική	Φορέας/Χώρα	Στάδιο CE	KPIs
Urban Mining DCs	Sweden (Pilot)	Ανάκτηση Πόρων	MRR, RHUR, CO ₂ Savings, PP, LEA, RR
Green Hydrogen Valleys	EU Initiative	Κυκλικές Εισροές	PP, LEA, RR
Cylib EV	Consortium / DE	Ανάκτηση Πόρων	MRR, DTU, CO ₂ Savings, PP, RR
CarbFix	Iceland	Ανάκτηση Πόρων	CO ₂ Savings, RR
Floating PV Recycling	NL (Pilot)	Κυκλικός Σχεδιασμός	MRR, CSME, CSR, PP, RR

5. Κυκλική Οικονομία στην Ελλάδα

5.1 Εισαγωγή

Η μετάβαση της Ελλάδας σε ένα κυκλικό μοντέλο ενέργειας αποτελεί στρατηγικό στόχο για την επίτευξη των δεσμεύσεων κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050, σε εναρμόνιση με την Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία και το REPowerEU. Η συγκριτική ανάλυση του Κεφαλαίου 4 ανέδειξε πληθώρα πρακτικών που θα μπορούσαν να υιοθετηθούν στην Ελλάδα, ωστόσο οι προκλήσεις που παραμένουν είναι τεχνικές, οικονομικές, κανονιστικές και κοινωνικές. Στο κεφάλαιο αυτό επιχειρείται μια σύνθεση των ευρημάτων με στόχο:

- Να αποτυπωθούν οι βασικές προκλήσεις και περιορισμοί,
- Να συγκριθούν οι κατηγορίες πρακτικών ως προς τη διαθεσιμότητα των υποδομών και των πόρων στην ελληνική βιομηχανία.
- Να παρουσιαστεί ένας οδικός χάρτης εφαρμογής στην Ελλάδα για την περίοδο 2025–2035.

5.2 Προκλήσεις και Περιορισμοί Υλοποίησης

5.2.1 Τεχνικές προκλήσεις

Η ανακύκλωση σύνθετων υλικών, όπως τα πτερύγια ανεμογεννητριών, παραμένει περιορισμένη λόγω ελλιπούς εφαρμογής σε βιομηχανική κλίμακα και απουσίας τυποποίησης στις διαδικασίες [27]. Η ανάκτηση πολύτιμων μετάλλων από Φ/Β πάνελ απαιτεί εξειδικευμένες διεργασίες με υψηλή ενεργειακή κατανάλωση. Στην Ελλάδα, η απουσία εξειδικευμένων υποδομών και εργαστηρίων δυσχεραίνει την ανάπτυξη τέτοιων λύσεων.

5.2.2 Οικονομικές προκλήσεις

Η μετάβαση σε κυκλικό μοντέλο συνεπάγεται υψηλό αρχικό κόστος και αβέβαιη απόδοση επένδυσης. Για παράδειγμα, το εργοστάσιο ROSI στη Γαλλία χρηματοδοτήθηκε με δημόσια και ιδιωτικά κεφάλαια άνω των 10 εκ. € [12], ποσό που δύσκολα επενδύεται σε μικρότερες αγορές. Παράλληλα, οι αγορές δευτερογενών πρώτων υλών είναι ανώριμες, γεγονός που αποθαρρύνει επιχειρήσεις από το να συμμετέχουν.

5.2.3 Κανονιστικές προκλήσεις

Η ανομοιογένεια στην εφαρμογή κανονισμών εντός Ε.Ε. δυσχεραίνει την ανάπτυξη ενιαίων αγορών. Στην Ισπανία, το θεσμικό πλαίσιο για την επαναχρησιμοποίηση νερού έχει ήδη οδηγήσει σε βιομηχανική εφαρμογή, ενώ στην Ελλάδα το πεδίο αυτό περιορίζεται σε πιλοτικά έργα. Η υιοθέτηση του Digital Product Passport (DPP) αναμένεται να είναι βραδύτερη χωρίς στοχευμένα μέτρα.

5.2.4 Κοινωνικές προκλήσεις

Η χαμηλή αποδοχή της CE από επιχειρήσεις και πολίτες σχετίζεται με περιορισμένη ενημέρωση και απουσία κινήτρων. Όπως δείχνει η βιβλιογραφία, η κοινωνική διάσταση μπορεί να καθορίσει την επιτυχία ή την αποτυχία μιας πρακτικής, ανεξαρτήτως της τεχνικής της βιωσιμότητας [60].

5.3 Σχόλια Εφαρμοσιμότητας και Εθνική Στρατηγική

Η υιοθέτηση των ανωτέρω πρακτικών στην Ελλάδα απαιτεί αξιολόγηση τεχνικοοικονομικής σκοπιμότητας, θεσμικής προσαρμογής και ενίσχυση συνεργασιών με τοπικούς φορείς. Σε σχέση με τη διεθνή ιεράρχηση που προέκυψε στο Κεφ. 4, ορισμένες πρακτικές αποκτούν διαφορετική θέση στο τελικό roadmap λόγω ιδιαιτεροτήτων του ελληνικού χώρου όσον αφορά τις υποδομές και τους πόρους. Συγκεκριμένα, η πρακτική P2-Bio-bean κατατάσσεται υψηλότερα, καθώς είναι άμεσα εφαρμόσιμη σε αστικά κέντρα με χαμηλές απαιτήσεις σε νέες υποδομές. Αντίθετα, λύσεις όπως η P4-Rosi Solar, P6-Reciclalia, P16-ReBattery, P15-Green Hydrogen Valleys και P1-Carbon2Chem κατατάσσονται ως μακροπρόθεσμες λύσεις, καθώς απαιτούν βιομηχανικές εγκαταστάσεις που δεν υφίστανται ακόμα στην Ελλάδα. Τέλος η πρακτική P3-Verbio μετακινήθηκε στο μεσοπρόθεσμο διάστημα καθώς το ρυθμιστικό πλαίσιο για την έγχυση του βιομεθανίου στο δίκτυο φυσικού αερίου είναι ακόμα υπό κατασκευή, ενώ ταυτόχρονα υφίσταται μεγάλη παραγωγή βιοαερίου στην χώρα, Συγκεκριμένα :

- Η ROSI Solar (P4) απαιτεί εξειδικευμένες μονάδες υδρομεταλλουργικής επεξεργασίας για την ανάκτηση Si/Ag, οι οποίες δεν είναι ακόμη εγκατεστημένες στην Ελλάδα.
- Η DecomBlades (P5) και το CETEC (P7) χρειάζονται βιομηχανικές εγκαταστάσεις υψηλής ενεργειακής έντασης, άρα σημαντικό CapEx και εξειδικευμένο τεχνικό προσωπικό.

- Η Smart Heating (P9) απαιτεί δίκτυο τηλεθέρμανσης ή άλλες τοπικές ενεργειακές υποδομές για να αξιοποιηθεί η απορριπτόμενη θερμότητα. Έτσι ενδείκνυνται για πόλεις κοντά σε βιομηχανικές περιοχές με μεγάλες ανάγκες θέρμανσης.
- Οι Green Hydrogen Valleys (P15) εξαρτώνται από την ύπαρξη υποδομών ηλεκτρόλυσης, αποθήκευσης και διανομής υδρογόνου, καθώς και από δίκτυα μεταφοράς.
- Η Verbio Biogas (P3) διαθέτει δυναμικό εφαρμογής, ωστόσο απαιτεί πρόσβαση σε αγροτικά υπολείμματα, κατασκευή δικτύου διανομής βιομεθανίου και ενσωμάτωση στο υπάρχων δίκτυο φυσικού αερίου.
- Η Bio-bean (P2) είναι τεχνολογικά εφαρμόσιμη ενώ υπάρχει και μεγάλη ποσότητα πρώτης ύλης, αλλά εξαρτάται από τη διασπορά και τη συλλογή οργανικών αποβλήτων.
- Για την εφαρμογή των λύσεων Second-life PV (P13) και Urban Mining (P14, P18) απαιτούνται συστήματα πιστοποίησης, logistics και αγορές δευτερογενών υλικών.
- Η Carbon2Chem έχει περιορισμένες δυνατότητες εφαρμογής λόγω έλλειψης μεγάλης βιομηχανικής υποδομής.

Παρουσιάζεται ο τελικός οδικός χάρτης εφαρμογής με βάσει τις παραπάνω αλλαγές:

- **Βραχυπρόθεσμα εφαρμόσιμες (TRL 8-9)**
Οι παρακάτω πρακτικές χαρακτηρίζονται με TRL 8-9 καθώς βρίσκουν εμπορικές εφαρμογές σε πολλές χώρες και έτσι καθίστανται τεχνολογικά ώριμες.
 - i. P11 – Water Reuse (2.5594)
 - ii. P14 – Predictive Maintenance (2.0664)
 - iii. P12 – Hydroloop (1.902)
 - iv. P10 – Stimergy (1.7802)
 - v. P2 – Bio-bean (1.512)
- **Μεσοπρόθεσμες (TRL 6–7)**
Οι πρακτικές αυτές αξιοποιούνται σε πιλοτικά έργα ή έχουν περιορισμένες εμπορικές εφαρμογές αλλά έχουν ξεπεράσει το στάδιο της έρευνας και της ανάπτυξης.
 - i. P13 – 2nd-life PV (2.0763)

- ii. P9 – Smart Heating (2.0561)
- iii. P3 – Verbio Biogas (1.6963)
- iv. P17 – CarbFix (0.515)
- **Μακροπρόθεσμες (TRL 4–5)**

Πρόκειται για πρακτικές σε στάδιο ανάπτυξης που δεν έχουν ακόμα τεθεί σε πιλοτικό στάδιο εφαρμογής.

 - i. P6 – Reciclalia (1.9553)
 - ii. P16 –Cylib (1.4752)
 - iii. P19 – Floating PV Recycling (1.3652)
 - iv. P18 – Urban Mining (advanced) (1.2471)
 - v. P4 – ROSI Solar (1.0304)
 - vi. P15 – Green Hydrogen Valleys (0.987)
 - vii. P8 – Reversible Adhesives (0.9631)
 - viii. P5 – DecomBlades (0.664)
 - ix. P7 – CETEC (0.6136)
 - x. P1 – Carbon2Chem (0.5941)

5.4 Συγκριτική Ανάλυση Πρακτικών

Η παρακάτω ανάλυση επιχειρεί να συγκρίνει κατηγορίες πρακτικών Κυκλικής Οικονομίας που εντοπίζονται στον ευρωπαϊκό ενεργειακό τομέα και να εκτιμήσει την πιθανή εφαρμογή τους στην Ελλάδα. Η αξιολόγηση βασίζεται σε πλεονεκτήματα, περιορισμούς, εφαρμοσιμότητα στην Ελλάδα και χρονικό ορίζοντα υλοποίησης. Έμφαση δίνεται τόσο στην τεχνική εφικτότητα όσο και σε κοινωνικούς και θεσμικούς παράγοντες. Η ανάλυση του Κεφαλαίου 4 δείχνει ότι οι πρακτικές δεν έχουν ομοιόμορφη εφικτότητα στην Ελλάδα. Η συγκριτική τους αποτίμηση συνοψίζεται στον Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5-1: Συγκριτική αποτίμηση κατηγοριών πρακτικών Κυκλικής Οικονομίας

Κατηγορία	Πλεονεκτήματα	Περιορισμοί	Εφαρμοσιμότητα στην Ελλάδα
Κυκλικές Εισροές (P2, P3)	Αξιοποίηση αγροτικών/οργανικών αποβλήτων	Εξάρτηση από διαθέσιμη πρώτη ύλη	Υψηλή – ιδίως σε αγροτικές περιφέρειες
Ανάκτηση Πόρων (P4– P6, P15–P18)	Μείωση εξάρτησης από CRM, στρατηγική αυτονομία	Υψηλό CapEx, ανάγκη υποδομών	Χαμηλή – απαιτούν διεθνείς συμπράξεις
Κυκλικός Σχεδιασμός (P7–P8, P19)	Διευκολύνει αποσυναρμολόγηση/ανακύκλωση από design	Απαιτεί μετασχηματισμό αλυσίδων αξίας	Χαμηλή–περιορίζεται σε έργα επίδειξης
Βελτιστοποίηση Χρήσης (P9–P12)	Άμεσα περιβαλλοντικά οφέλη, χαμηλό κόστος	Εφαρμογή κυρίως σε αστικά κέντρα	Υψηλή – ιδίως σε Αθήνα/Θεσσαλονίκη
Παράταση Ζωής (P13–P14)	Μείωση κόστους και waste, ευρεία αποδοχή	Θέματα πιστοποίησης, ανάγκη data-sharing	Υψηλή – ιδανική για υπάρχουσες εγκαταστάσεις

5.5 Οδικός Χάρτης Εφαρμογής (2025–2035) Ανά Πρακτική

Στους Πίνακες 5.2, 5.3 αποτυπώνονται οι δράσεις, τα εμπόδια και η χρονική τοποθέτηση κάθε πρακτικής.

Πίνακας 5-2: Οδικός Χάρτης Κυκλικής Οικονομίας (Βραχυπρόθεσμο Διάστημα)

Πρακτική	Δράσεις	Εμπόδια	Φορείς
P11 – Water Reuse	Επαναχρησιμοποίηση νερού για χρήσεις στη γεωργία	Κανονιστικά εμπόδια	Υπ. Αγροτικής Ανάπτυξης
P14 – Predictive Maint	Εισαγωγή predictive maintenance συστημάτων σε ΑΠΕ	Ανάγκη data-sharing	Ιδιωτικές εταιρείες
P12 – Hydroloop	Οικιακή επαναχρησιμοποίηση νερού	Υψηλό κόστος εγκατάστασης	ΟΤΑ, ιδιωτικός τομέας
P10 – Stimergy	Αξιοποίηση θερμότητας data centers	Επενδύσεις	Ιδιωτικός τομέας
P2 – Bio-bean	Παραγωγή βιοκαυσίμων από χρησιμοποιημένους κόκκους καφέ	Συλλογή πρώτης ύλης	ΟΤΑ, startups

Πίνακας 5-3: Οδικός Χάρτης Κυκλικής Οικονομίας (Μεσοπρόθεσμο Διάστημα)

Πρακτική	Δράσεις	Εμπόδια	Φορείς
P13 – 2nd-life PV	Αγορά μεταχειρισμένων πάνελ	Έλλειψη πιστοποίησης	ΡΑΑΕΥ, ΚΑΠΕ
P9 – Sandvika	Εγκατάσταση αντλιών θερμότητας	Απουσία τηλεθέρμανσης	ΔΕΔΑ, Δήμοι
P3 – Verbio	Μονάδες βιομεθανίου με biochar	Υποδομές, θεσμικό πλαίσιο	ΥΠΕΝ, ΚΑΠΕ
P17 – CarbFix	Δέσμευση CO2 σε βασάλτες	Έλλειψη	Πανεπιστήμια, ΕΕ

5.6 Μακροπρόθεσμες Πρακτικές και Θεσμική Στήριξη

Ειδική μέριμνα απαιτείται για τις **μακροπρόθεσμες πρακτικές** (P5, P7, P8, P15–P18), οι οποίες δεν μπορούν να υλοποιηθούν βραχυπρόθεσμα στην Ελλάδα. Η θεσμική τους υποστήριξη μπορεί να γίνει με τη ίδρυση **Εθνικού Ινστιτούτου Σύνθετων Υλικών και Ανακύκλωσης**, με αντικείμενο την έρευνα, ανάπτυξη καινοτόμων τεχνολογιών ανακύκλωσης σύνθετων υλικών (όπως πτερύγια ανεμογεννητριών και προηγμένα πολυμερή), καθώς και την πιστοποίηση σχετικών διεργασιών και προϊόντων. Σήμερα υπάρχουν σημαντικοί φορείς, όπως το ΕΚΕΤΑ, το ΚΑΠΕ και πανεπιστημιακά εργαστήρια, οι οποίοι δραστηριοποιούνται σε συναφείς τομείς, όμως η ερευνητική τους κατεύθυνση παραμένει κατακερματισμένη και δεν εστιάζει ειδικά στη διαχείριση σύνθετων υλικών. Ένα νέο Ινστιτούτο θα μπορούσε να λειτουργήσει ως εξειδικευμένος κόμβος τεχνολογικής ανάπτυξης, διασφάλισης ποιότητας και συνεργασίας με την ευρωπαϊκή βιομηχανία, καλύπτοντας ένα κρίσιμο κενό στο εθνικό οικοσύστημα καινοτομίας, όπως το Fraunhofer Institute στην Γερμανία [154]. Σε αυτό το πλαίσιο, το Ινστιτούτο Κυκλικής Οικονομίας δεν περιορίζεται σε ερευνητικές δράσεις, αλλά μπορεί να λειτουργήσει ως ρυθμιστικός καταλύτης:

- Σχεδιάζοντας και προτείνοντας πρότυπα πιστοποίησης (π.χ. για second-life PV και ανακυκλωμένες πρώτες ύλες).
- Εισηγούμενο σχήματα φορολογικών κινήτρων ή μηχανισμούς επιδότησης που θα μειώνουν τον χρόνο απόσβεσης (Payback Period) για τις επιχειρήσεις.
- Παρέχοντας κατευθύνσεις σε εθνικούς και ευρωπαϊκούς ρυθμιστές για την ένταξη των δεικτών CE σε πολιτικές βιώσιμης ενέργειας.
- Δοκιμάζοντας πιλοτικά ρυθμιστικά «sandboxes» για νέες πρακτικές κυκλικής οικονομίας, ελαχιστοποιώντας την αβεβαιότητα επενδυτών και επιχειρήσεων.

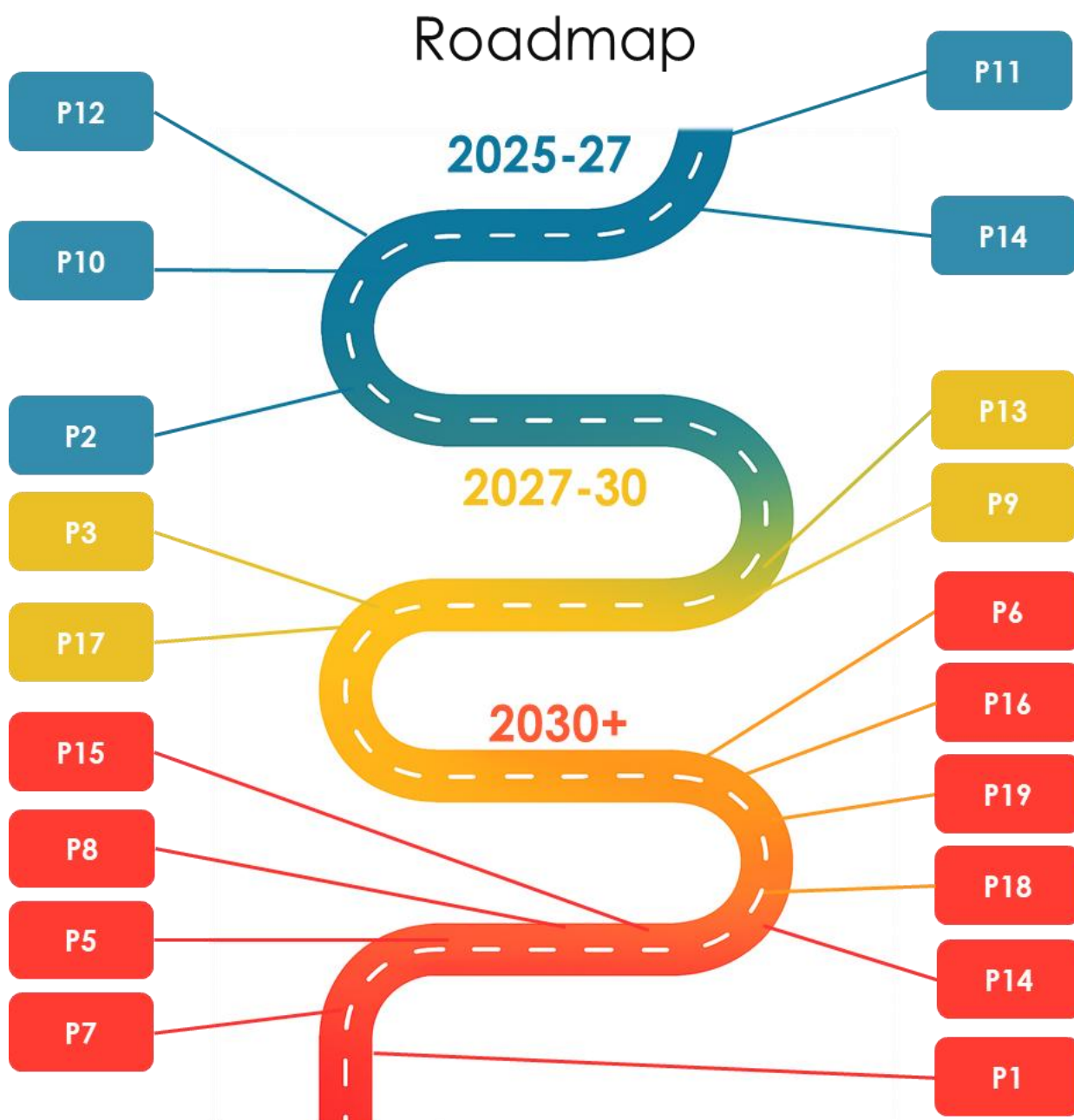
Με τον τρόπο αυτό, το Ινστιτούτο αποκτά διττό ρόλο: αφενός επιστημονικό και τεχνολογικό, αφετέρου θεσμικό και οικονομικό, καλύπτοντας τους βασικούς φραγμούς που καθυστερούν την κλιμάκωση των μακροπρόθεσμων πρακτικών.

Πίνακας 5-4: Οδικός Χάρτης Κυκλικής Οικονομίας (Μακροπρόθεσμο Διάστημα)

Πρακτική	Δράσεις	Εμπόδια	Φορείς
P6 – Reciclalia	Ανάκτηση ινών γυαλίου	Κόστος διεργασίας	Βιομηχανία συνθέτων υλικών
P16 – Cylib EV	Ανακύκλωση μπαταριών EV	Κόστος, αγορά	Αυτοκινητοβιομηχανία
P19 – Floating PV	Πλωτά Φ/Β με ανακύκλωση	Πιλοτικό στάδιο	ΕΜΠ, ιδιωτικός τομέας
P18 – Urban Mining DCs	Ανάκτηση μετάλλων και θερμότητας	Χαμηλό TRL	Startups
P4 – ROSI Solar	Μονάδα ανάκτησης Si/Ag από Φ/Β	Υψηλό CapEx	Ιδιωτικές εταιρείες,
P15 – Green H ₂ Valleys	Clusters υδρογόνου από ΑΠΕ	Υποδομές, κόστος	ΥΠΕΝ, βιομηχανία
P8 – Reversible Adhesives	Αναστρέψιμα συγκολλητικά στις Α/Γ	Έλλειψη αγοράς	Βιομηχανία Α/Γ
P5 – DecomBlades	Ανακύκλωση πτερυγίων Α/Γ	Ενεργοβόρες διεργασίες	Ερευνητικά κέντρα
P7 – CETEC	Ανάπτυξη νέων ρητινών για Α/Γ	R&D φάση	ΕΜΠ, Εθνικό Ινστιτούτο
P1- Carbon2Chem	Ανάπτυξη μονάδων δέσμευσης CO ₂	Υποδομές, κόστος	ΥΠΕΝ, βιομηχανία



Εικόνα 5-1: Χρονογραμμή Οδικού Χάρτη Κυκλικής Οικονομίας στον Ελληνικό Ενεργειακό Τομέα.



Εικόνα 5-2 Χρονογραμμή Οδικού Χάρτη Κυκλικής Οικονομίας στον Ελληνικό Ενεργειακό Τομέα ανά πρακτική.

5.7 Χρονογραμμή Οδικού Χάρτη

Η συνολική εικόνα φαίνεται ότι η Ελλάδα παρουσιάζει χαμηλούς δείκτες κυκλικότητας (CMUR 2,4% [155]) σε σχέση με τον μέσο όρο της Ε.Ε. (11,7% [156]). Ωστόσο, το δυναμικό σε βιομάζα, ΑΠΕ και δευτερογενείς ροές υλικών παρέχει ευκαιρίες που μπορούν να αξιοποιηθούν άμεσα. Οι πιο εφαρμόσιμες λύσεις είναι οι **Optimized Use** και **Life Extension**, λόγω χαμηλού κόστους και υψηλής κοινωνικής αποδοχής. Οι **Resource Recovery** πρακτικές απαιτούν διεθνείς συνεργασίες και χρηματοδότηση, ενώ ο **Circular Design** παραμένει στρατηγικός στόχος για το μακροπρόθεσμο μέλλον.

6. Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία είχε ως κεντρικό σκοπό την ανάλυση, αξιολόγηση και συστηματοποίηση πρακτικών Κυκλικής Οικονομίας στον ενεργειακό τομέα, με ιδιαίτερη έμφαση στην εφαρμογή τους στην ελληνική πραγματικότητα. Από την αρχή τέθηκαν συγκεκριμένοι στόχοι και ερευνητικά ερωτήματα, τα οποία καθόρισαν το μεθοδολογικό πλαίσιο και τον τρόπο προσέγγισης. Μέσα από εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση, καταγραφή περιπτώσεων και χρήση πολυκριτηριακής ανάλυσης, έγινε προσπάθεια να δοθεί μία ολοκληρωμένη εικόνα της τρέχουσας κατάστασης, των δυνατοτήτων αλλά και των περιορισμών που παρουσιάζει η εφαρμογή των κυκλικών πρακτικών.

Το πρώτο ερευνητικό ερώτημα αφορούσε την καταγραφή και ανάδειξη των διεθνών πρακτικών που είναι ώριμες και κατάλληλες για υιοθέτηση στην Ελλάδα. Από την ανάλυση των πέντε βασικών σταδίων της κυκλικής οικονομίας προέκυψε ότι ορισμένες πρακτικές ξεχωρίζουν για τη δυνατότητα μεταφοράς τους. Η επαναχρησιμοποίηση λυμάτων για άρδευση, αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα τεχνολογίας που θα μπορούσε να εφαρμοστεί στην ελληνική αγορά. Παράλληλα, η επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένου νερού για οικιακή χρήση αναδεικνύεται σε αξιόσημαντη πρακτική. Επιπλέον, η αξιοποίηση τεχνολογιών AI με σκοπό την πρόβλεψη βλαβών, μπορεί να βρει σημαντική εφαρμογή σε ΑΠΕ. Τέλος, Η επαναχρησιμοποίηση θερμότητας από data centers, όπως η πρακτική της Stimergy στη Γαλλία, αποτελεί παράδειγμα που μπορεί να μεταφερθεί σε ελληνικές πόλεις, ιδίως καθώς αυξάνεται η εγκατάσταση ψηφιακών υποδομών, συμπληρώνοντας έτσι το πλέγμα πρακτικών με άμεσο ενδιαφέρον για την ελληνική περίπτωση.

Το δεύτερο ερευνητικό ερώτημα επικεντρώθηκε στον τρόπο αξιολόγησης αυτών των πρακτικών μέσω πολυκριτηριακής ανάλυσης. Η μεθοδολογία που υιοθετήθηκε επέτρεψε την οργάνωση των πρακτικών με βάση περιβαλλοντικά, οικονομικά, κοινωνικά και θεσμικά κριτήρια, τα οποία ιεραρχήθηκαν με διαφάνεια και συνέπεια. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η περιβαλλοντική απόδοση και η μείωση αποβλήτων αποτελούν βασικό κριτήριο για την επιλογή πρακτικών, γεγονός που αντανάκλα την ανάγκη ευθυγράμμισης με τους στόχους της Πράσινης Συμφωνίας. Η οικονομική βιωσιμότητα αναδείχθηκε επίσης ως καθοριστικός παράγοντας, καθώς πρακτικές που δεν εξασφαλίζουν αποδεκτά κόστη και εύλογες περιόδους απόσβεσης δύσκολα θα υιοθετηθούν από την αγορά. Παράλληλα, η κοινωνική αποδοχή και η θεσμική ετοιμότητα απέκτησαν ιδιαίτερη βαρύτητα στην ελληνική περίπτωση, όπου συχνά παρατηρούνται καθυστερήσεις στην εφαρμογή ευρωπαϊκών οδηγιών και δυσκολίες στη συνεργασία διαφορετικών φορέων.

Το τρίτο ερευνητικό ερώτημα αφορούσε τη διαμόρφωση ενός οδικού χάρτη προτεραιοτήτων για την υιοθέτηση των πρακτικών αυτών. Από την ανάλυση προέκυψε ότι βραχυπρόθεσμα, μέσα στην επόμενη τριετία, μπορούν να εφαρμοστούν πρακτικές όπως η αξιοποίηση θερμότητας από data centers, παραγωγή βιοκαυσίμων από χρησιμοποιημένους κόκκους καφέ, επαναχρησιμοποίηση νερού σε γεωργική και οικιακή χρήση και η εφαρμογή προληπτικής συντήρησης με τεχνητή νοημοσύνη. Μεσοπρόθεσμα, σε ορίζοντα 3–7 ετών, μπορούν να υλοποιηθούν marketplaces για επαναχρησιμοποίηση εξοπλισμού ΑΠΕ, να εγκατασταθούν αντλίες θερμότητας για τηλεθέρμανση μέσω αξιοποίησης της θερμότητας αστικών λυμάτων, η παραγωγή βιομεθανίου από αγροτικά υπολείμματα καθώς και η εφαρμογή τεχνολογιών δέσμευσης CO₂ σε βασάλτες. Μακροπρόθεσμα, σε χρονικό ορίζοντα άνω των επτά ετών, εκτιμάται ότι θα είναι ώριμες οι πρακτικές ανακύκλωσης σύνθετων υλικών, όπως τα πτερύγια ανεμογεννητριών και τα προηγμένα πολυμερή, τεχνολογίες ανάκτησης πυριτίου από φωτοβολταϊκά, η δημιουργία κοιλάδων πράσινου υδρογόνου από ΑΠΕ καθώς και η ανάπτυξη μονάδων δέσμευσης CO₂, με την μετέπειτα μετατροπή του σε βιοκαύσιμα. Η λογική αυτού του χρονοπρογραμματισμού βασίζεται τόσο στο επίπεδο ωριμότητας των τεχνολογιών όσο και στη διαθεσιμότητα θεσμικού πλαισίου και επενδυτικών εργαλείων.

Συνολικά, η εργασία απέδειξε ότι η Κυκλική Οικονομία στον ενεργειακό τομέα δεν αποτελεί μόνο ένα περιβαλλοντικό μοντέλο αλλά ένα στρατηγικό εργαλείο βιωσιμότητας, καινοτομίας και ασφάλειας εφοδιασμού. Οι πρακτικές που εξετάστηκαν μπορούν, με κατάλληλη θεσμική και τεχνολογική προσαρμογή, να αποτελέσουν τον πυρήνα ενός νέου παραγωγικού μοντέλου για την Ελλάδα. Η υιοθέτησή τους θα συμβάλει στην πράσινη μετάβαση, στην επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας και στην ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας της ελληνικής οικονομίας στο πλαίσιο της ευρωπαϊκής και διεθνούς αγοράς.

6.1 Περιορισμοί της Έρευνας

Η ανάλυση στηρίχθηκε κυρίως σε δευτερογενή δεδομένα και διεθνείς πιλοτικές εφαρμογές, με αποτέλεσμα να υπάρχει έλλειψη πρωτογενών ποσοτικών μετρήσεων ειδικά για κοινωνικούς και θεσμικούς δείκτες. Επιπλέον, η απουσία μεγάλων πιλοτικών έργων στην Ελλάδα δεν επέτρεψε την άμεση επικύρωση των συμπερασμάτων στο εθνικό πλαίσιο. Οι περιορισμοί αυτοί καθιστούν τα συμπεράσματα περισσότερο ενδεικτικά και λιγότερο απολύτως γενικεύσιμα. Ωστόσο, η εργασία έθεσε ένα ισχυρό θεμέλιο για μελλοντικές έρευνες και πρακτικές εφαρμογές.

6.2 Μελλοντικές Κατευθύνσεις και Πολιτικές Προτάσεις

Οι κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα περιλαμβάνουν την ενσωμάτωση λεπτομερούς ανάλυσης κόστους-οφέλους για κάθε πρακτική, ώστε να αποτιμηθεί καλύτερα η οικονομική τους βιωσιμότητα. Προτείνεται επίσης η ανάπτυξη μοντέλων ποσοτικής αποτίμησης ροών υλικών και εκπομπών, ώστε να αποτυπωθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Ιδιαίτερη σημασία έχει η δημιουργία πιλοτικών έργων CE στην Ελλάδα, μέσω συνεργασίας πανεπιστημίων, βιομηχανίας και δημόσιων φορέων. Τέλος, η εμπάθυνση στην κοινωνική διάσταση, όπως η αποδοχή από τις τοπικές κοινωνίες και οι δυνατότητες δημιουργίας θέσεων εργασίας, είναι κρίσιμη για την ευρεία εφαρμογή των πρακτικών.

Σε πολιτικό επίπεδο, η ανάγκη δημιουργίας εθνικού πλαισίου κυκλικής οικονομίας ειδικά για τον ενεργειακό τομέα αναδεικνύεται ως προτεραιότητα, με έμφαση στη θέσπιση κινήτρων για επενδύσεις σε καινοτόμες τεχνολογίες. Η ενσωμάτωση κυκλικών δεικτών στην εποπτεία της ενεργειακής αγοράς από ρυθμιστικούς φορείς, όπως η ΡΑΕ και ο ΑΔΜΗΕ, θα ενίσχυε την ιχνηλασιμότητα και τη διαφάνεια. Η στήριξη νεοφυών επιχειρήσεων που δραστηριοποιούνται σε τομείς ανακύκλωσης, επαναχρησιμοποίησης και βιοενέργειας θα μπορούσε να δημιουργήσει νέα δυναμική. Τέλος, η ενίσχυση της σύνδεσης της κυκλικής οικονομίας με την αγροτική παραγωγή και τα τοπικά ενεργειακά δίκτυα προτείνεται ως στρατηγική επιλογή για τη χώρα.

7. Βιβλιογραφία

- [1] Wich, T., Lueke, W., Deerberg, G. and Oles, M. (2020). Carbon2Chem[®]-CCU as a Step Toward a Circular Economy. *Frontiers in Energy Research*, 7. doi:<https://doi.org/10.3389/fenrg.2019.00162>
- [2] Europa.eu. (2020). EUR-Lex - 52020DC0098 - EN - EUR-Lex. [online] Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0098>.
- [3] Europa.eu. (2018). Directive - 2018/851 - EN - EUR-Lex. [online] Available at: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/851/oj/eng?> [Accessed 4 Oct. 2025].
- [4] European Circular Economy Stakeholder Platform. (2017). Stimergy: recycled heat from server rooms provides hot water. [online] Available at: <https://circulareconomy.europa.eu/platform/en/good-practices/stimergy-recycled-heat-server-rooms-provides-hot-water?>
- [5] Waste Flow Organic Waste (Food Waste) Impact on PESTEL categories. (n.d.). Available at: <https://h2020repair.eu/wp-content/uploads/2020/08/BIO-BEAN-From-waste-coffee-ground-to-biofuel.pdf>.
- [6] Decomblades.dk. (2020). DecomBlades | Wind industry blade decommissioning. [online] Available at: <https://decomblades.dk/?> [Accessed 4 Oct. 2025].
- [7] Wråke, M., Kenneth Bernard Karlsson, Anders Kofoed-Wiuff, Torjus Folsland Bolkesjø, Lindroos, T., Martin Börjesson Hagberg, Mikkel Bosack Simonsen, Unger, T., Berit Tennback, Eirik Ogner Jåstad, Antti Lehtilä, Nelli Putkonen and Tiina Koljonen (2021). NORDIC CLEAN ENERGY SCENARIOS: Solutions for Carbon Neutrality. doi:<https://doi.org/10.6027/ner2021-01>.

- [8] Europa.eu. (2020). Regulation - 2020/741 - EN - EUR-Lex. [online] Available at: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2020/741/oj/eng?> [Accessed 4 Oct. 2025].
- [9] Project-cetec.dk. (2021). Home. [online] Available at: <https://www.project-cetec.dk/uk/?> [Accessed 4 Oct. 2025].
- [10] H2v.eu. (2022). Reports | H2Valleys. [online] Available at: <https://h2v.eu/analysis/reports?> [Accessed 4 Oct. 2025].
- [11] Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs. (2022). Sustainable product policy & ecodesign. [online] Available at: https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/sustainability/sustainable-product-policy-ecodesign_en? [Accessed 4 Oct. 2025].
- [12] Verbio (2024). 2024/2025. [online] Verbio.de. Available at: <https://www.verbio.de/en/investor-relations/reports-presentations-earnings-calls/?> [Accessed 4 Oct. 2025].
- [13] Rosi-solar.com. (2025). ROSI | Circular Economy for the PV Industry. [online] Available at: <https://www.rosi-solar.com/?> [Accessed 4 Oct. 2025].
- [14] Advancedbiofuelsusa.info. (2025). Welcome To Zscaler Directory Authentication. [online] Available at: <https://advancedbiofuelsusa.info/new-verbio-plant-for-the-production-of-biomethane-from-100-percent-straw-commissioned-as-scheduled?> [Accessed 4 Oct. 2025].
- [15] Verbio (2024) VerBIO Annual Report 2023/2024. https://www.verbio.de/fileadmin/user_upload/Verbio/Download_center/20240926_Verbio_Annual_Report_FY_2023_2024.pdf
- [16] E. E. Agency. Circular economy in europe – key trends and statistics. <https://www.eea.europa.eu/publications/circular-economy-in-europe-2023>, 2023.

- [17] E. E. Agency. Water reuse in agriculture in europe and israel, 2023. Accessed August 2025.
- [18] K. N. Alfina, R. M. C. Ratnayake, D. Wibisono, M. H. Basri, and N. B. Mulyono. Prioritizing performance indicators for the circular economy transition in healthcare supply chains. *Circular Economy and Sustainability*, 5:231–276, 2025.
- [19] ASCM. Scoring digital standard v12.0. ASCM website, 2022. Updated digital version of the SCOR reference model.
- [20] B. bean Ltd. Bio-bean: Recycling coffee waste into biofuel, 2023.
- [21] N. M. Bocken, I. de Pauw, C. Bakker, and B. van der Grinten. Product design and business model strategies for a circular economy. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 2016.
- [22] F. S. BV. Recyclable floating pv modules, 2024. Design documents for circular PV implementation.
- [23] CarbFix. CO₂ mineralization for permanent storage, 2023. CarbFix Project in Iceland.
- [24] E. Commission. A new circular economy action plan. https://ec.europa.eu/environment/strategy/circular-economy-action-plan_en, 2020.
- [25] E. Commission. Critical raw materials act. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_1661, 2023.
- [26] Clean Hydrogen Partnership. (2023). Hydrogen Valleys. [online] Available at: https://www.clean-hydrogen.europa.eu/get-involved/hydrogen-valleys_en.
- [27] Decommissioned Wind Turbine Blade Management Strategies. (2024). Available at: https://cleanpower.org/wp-content/uploads/gateway/gateway/2023/01/ACP_BladeRecycling_WhitePaper_240905.pdf? [Accessed 1 Oct. 2025].
- [28] DecomBlades consortium awarded funding for a large, cross-sector wind turbine blade recycling project. (n.d.). Available at: https://www.lmwindpower.com/sites/default/files/related_documents/DecomBladesPressRelease.pdf? [Accessed 1 Oct. 2025].

- [29] Cylib.de. (2025). Cylib | Next generation battery recycling. [online] Available at: <https://www.cylib.de/>.
- [30] C. Economy. The circularity gap report 2023, 2023. Accessed: July 2025.
- [31] Ellen MacArthur Foundation. Towards the circular economy: Economic and business rationale for an accelerated transition, 2015.
- [32] European Commission. Circular economy action plan for a cleaner and more competitive europe, 2020.
- [33] European Commission. Proposal for a regulation on critical raw materials (com/2023/160), 2023. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52023PC0160>.
- [34] Eurostat. Monitoring framework for the circular economy. 2022.
- [35] Eurostat. Thermal losses in electricity generation. <https://ec.europa.eu/eurostat>, 2022.
- [36] R. Fernandez and M. Bosch. Predictive maintenance through iot and data analytics. *Energy Maintenance Journal*, 2022.
- [37] R. Fernandez and M. Bosch. Predictive maintenance through iot and data analytics. *Energy Maintenance Journal*, 2022.
- [38] E. M. Foundation. Towards the circular economy vol. 1. <https://ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-1>, 2013.
- [39] E. M. Foundation. Circular economy system diagram. <https://ellenmacarthurfoundation.org>, 2017.
- [40] E. M. Foundation. Completing the picture: How the circular economy tackles climate change, 2019.
- [41] S. Fuss et al. Negative emissions—part 2: Costs, potentials and side effects. *Environmental Research Letters*, 13(6):063002, 2020.

- [42] L. O. Gavião, G. B. A. Lima, P. A. d. A. Garcia, and L. d. S. Teixeira. Decision support based on performance data using the analytic hierarchy process without expert judgement. *Brazilian Journal of Operations & Production Management*, 21(1):e20241882, 2024.
- [43] M. Geissdoerfer, P. Savaget, N. M. Bocken, and E. J. Hultink. The circular economy – a new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143:757–768, 2017.
- [44] M. Geissdoerfer, P. Savaget, N. M. Bocken, and E. J. Hultink. The circular economy—a new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143:757–768, 2017.
- [45] K. Hartley, G. Montes de Oca, T. van den Brink, B. Sprecher, A. Tukker, and M. van Deursen. Circular economy strategies for critical raw materials in wind turbines. *Resources, Conservation and Recycling*, 168:105261, 2021.
- [46] K. Hartley and M. van Dijk. Policies for circular economy in the energy sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021. [47] Hydroloop. Hydroloop reuse system: Ai-based greywater recycling, 2024.
- [47] Netherlands. Internal documentation, as referenced in thesis_{emp.pdf}.
- [48] IEA. Global co2 emissions forecast 2024. <https://www.iea.org/reports/global-energy-co2-status-report-2024>, 2024.
- [49] F. Institute and Vestas. Reversible adhesives for wind turbine blade disassembly, 2021.
- [50] J. Korhonen, A. Honkasalo, and J. Seppälä. Circular economy: the concept and its limitations. *Ecological Economics*, 143:37–46, 2018.
- [51] L. Kreimeier and D. Jansen. Carbon2chem: Co2-based chemicals from steel mill emissions. *Journal of CO2 Utilization*, 2022.

- [52] J. Lee et al. Predictive maintenance and circular economy: Extending equipment lifetime. *Journal of Cleaner Production*, 276:123225, 2020.
- [53] M. Linder and M. Williander. Circular business model innovation: inherent uncertainties. *Business Strategy and the Environment*, 2017.
- [54] Luxembourg Ministry of the Economy. Product circularity data sheet (pcds), 2021.
- [55] G. Montibeller and A. Franco. Raising the bar: Building a synthesis of requirements for a robust multi-criteria decision analysis process. *European Journal of Operational Research*, 212(3):603–613, 2011.
- [56] OECD. *Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide*. OECD Publishing, Paris, 2008.
- [57] M. of Sandvika. Smart heating network from wastewater heat recovery, 2023. Accessed August 2025.
- [58] A. Papaioannou, C. Karakosta, and J. Psarras. Circular economy strategies in energyintensive industries: A review. *Journal of Industrial Ecology*, 2022.
- [59] S. U. M. P. Program. Data center mineral and heat recovery initiative, 2023. Sweden Pilot Project, internal project report.
- [60] P. Rosa, F. Sassanelli, and M. Terzi. Towards circular economy adoption: a systematic literature review on barriers and enablers. *Journal of Cleaner Production*, 286:125490, 2021.
- [61] J. D. Sachs. How circular economy supports social equity and energy access, 2022.
- [62] R. Solar. Silicon and silver recovery from end-of-life pv panels. In *PVSEC Conference*, 2022.
- [63] R. Solar. Advanced pv panel recycling solutions, 2024.
- [64] W. R. Stahel. The circular economy. *Nature*, 531(7595):435–438, 2016.

- [65] Stimergy. Heat recovery from data centers, 2023.
- [66] P. C. Switzerland. Second-life pv panel marketplace, 2023.
- [67] Y. Xu et al. Second-life photovoltaic panels: Opportunities and challenges.
- [68] *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 143:110890, 2021. *Carbon2Chem®: First project phase successfully completed and notice of funding received from federal government for second phase* (no date).
<https://www.thyssenkrupp.com/en/newsroom/press-releases/pressdetailpage/carbon2chem--first-project-phase-successfully-completed-and-notice-of-funding-received-from-federal-government-for-second-phase-88707?>
- [69] Thyssenkrupp (2024) 'Realisation agreement for the connection of thyssenkrupp Steel to the future hydrogen network has been signed,' Thyssenkrupp, 21 March. <https://www.thyssenkrupp-steel.com/en/newsroom/press-releases/realisation-agreement-for-the-connection-of-thyssenkrupp-steel-to-the-future-hydrogen-network-has-been-signed.html?>
- [70] Legislative framework (no date). https://climate.ec.europa.eu/eu-action/industrial-carbon-management/legislative-framework_en?
- [71] The Impact Reporting Archive (no date) bio-bean on The Impact Reporting Archive. <https://impact-reporting.com/business/bio-bean/>.
- [72] Granata, G. and Petrides, D. (2021). Solar Photovoltaic Panel Recycling - Process Modeling and Techno-Economic Assessment (TEA) using SuperPro... ResearchGate. [online] doi:<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33973.19687>.
- [73] Ready to Burn (2024) Ready to Burn | Administered by Woodsure on behalf of Defra. https://www.readytoburn.org/?utm_.
- [74] Nutrient recovery by biogas digestate processing – Bioenergy (2025).
<https://www.ieabioenergy.com/blog/publications/nutrient-recovery-by-biogas-digestate-processing/>.
- [75] Wantz, E., Lemonnier, M., Benizri, D., Dietrich, N. and Gilles Hébrard (2023). Innovative high-pressure water scrubber for biogas upgrading at farm-scale using vacuum for water

- regeneration. *Applied Energy*, 350, pp.121781–121781. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121781>.
- [76] Frankl, P. (2024). KEYNOTE SPEECH. [online] Available at: https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2024/10/24-Oct_All-Day-Sessions.pdf? [Accessed 24 Sep. 2025].
- [77] Lawson, N., Alvarado-Morales, M., Tsapekos, P. and Angelidaki, I. (2021). Techno-Economic Assessment of Biological Biogas Upgrading Based on Danish Biogas Plants. *Energies*, 14(24), p.8252. doi:<https://doi.org/10.3390/en14248252>.
- [78] Moriarty, K. and National Renewable Energy Laboratory (2013) Feasibility study of anaerobic digestion of food waste in St. Bernard, Louisiana, Technical Report. <https://docs.nrel.gov/docs/fy13osti/57082.pdf>.
- [79] energy.ec.europa.eu. (n.d.). Biomethane. [online] Available at: https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/bioenergy/biomethane_en.
- [80] Intersolar.de. (2023). Photovoltaics Recycling Rate up to 99 Percent Possible. [online] Available at: <https://www.intersolar.de/news/recycling-of-photovoltaic-modules>.
- [81] Fan, H.-H., Salas-Redondo, C. and Chalaux, A. (2024) 'Life cycle assessment of an innovative high-value-recovery crystalline silicon photovoltaic recycling process – the environmental impacts and benefits,' *EPJ Photovoltaics*, 15, p. 35. <https://doi.org/10.1051/epjpv/2024034>.
- [82] C&En, M.P.S.T. (2025) Solar panels face recycling challenge. <https://cen.acs.org/environment/recycling/Solar-panels-face-recycling-challenge-photovoltaic-waste/100/i18?>
- [83] Mao, D., Yang, S., Ma, L., Ma, W., Yu, Z., Xi, F. and Yu, J. (2024). Overview of life cycle assessment of recycling end-of-life photovoltaic panels: A case study of crystalline silicon photovoltaic panels. *Journal of Cleaner Production*, 434, pp.140320–140320. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140320>.
- [84] team photorama (2021). EU regulation pushing forward PV recycling: the WEEE directive – Photorama. [online] Photorama-

- project.eu. Available at: <https://www.photorama-project.eu/eu-regulation-pushing-forward-pv-recycling-the-weee-directive?> [Accessed 24 Sep. 2025].
- [85] Åkesson, D., Foltynowicz, Z., Christéen, J. and Skrifvars, M. (2012). Microwave pyrolysis as a method of recycling glass fibre from used blades of wind turbines. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 31(17), pp.1136–1142. doi:<https://doi.org/10.1177/0731684412453512>.
- [86] Vogiantzi, C. and Tserpes, K. (2025). A Comparative Environmental and Economic Analysis of Carbon Fiber-Reinforced Polymer Recycling Processes Using Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing. *Journal of Composites Science*, 9(1), p.39. doi:<https://doi.org/10.3390/jcs9010039>.
- [87] Manuel, J. and Cristina, D. (2023). How ready is the wind energy industry for the circular economy? *Sustainable Production and Consumption*, 43, pp.62–76. doi:<https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.10.016>.
- [88] Ventureradar.com. (2025). Reciclopedia Composite | VentureRadar. [online] Available at: <https://www.ventureradar.com/organisation/Reciclopedia%20Composite/f2491ff9-a2dd-4906-811a-e369b36e89a1?> [Accessed 24 Sep. 2025].
- [89] Shetty, S., Pinkard, B.R. and Novosselov, I.V. (2022). Recycling of carbon fiber reinforced polymers in a subcritical acetic acid solution. *Heliyon*, p.e12242. doi:<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12242>.
- [90] Grund, D., Orlishausen, M. and Taha, I. (2019). Determination of fiber volume fraction of carbon fiber-reinforced polymer using thermogravimetric methods. *Polymer Testing*, [online] 75, pp.358–366. doi:<https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.02.031>.
- [91] Tecnicasreunidas.es. (2025). Técnicas Reunidas and Reciclopedia develop an excellent example of circular economy – Técnicas Reunidas. [online] Available at: <https://www.tecnicasreunidas.es/articulo/tecnicas-reunidas-and-reciclopedia-develop-an-excellent-example-of-circular-economy/> [Accessed 24 Sep. 2025].

- [92] Urruzola, E., Merlo-Camuñas, L., Calvo-Rodríguez, F., Azcona, M., Cerdeira-Peinado, M., de la Guerra, E. and Iribarren, D. (2025). Eco-efficiency assessment and benchmarking of recycled carbon fibre. *Cleaner Materials*, [online] 17, p.100333. doi:<https://doi.org/10.1016/j.clema.2025.100333>.
- [93] Das, S. et al. (2016) Global Carbon Fiber Composites Supply Chain Competitiveness Analysis. <https://www.nrel.gov/docs/fy16osti/66071.pdf>.
- [94] Manuel, J. and Cristina, D. (2023). How ready is the wind energy industry for the circular economy? *Sustainable Production and Consumption*, 43, pp.62–76. doi:<https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.10.016>.
- [95] Ahrens, A., Bonde, A., Sun, H., Wittig, N.K., Hammershøj, H.C.D., Batista, G.M.F., Sommerfeldt, A., Frølich, S., Birkedal, H. and Skrydstrup, T. (2023). Catalytic disconnection of C–O bonds in epoxy resins and composites. *Nature*, [online] pp.1–8. doi:<https://doi.org/10.1038/s41586-023-05944-6>.
- [96] Ahrens, A., Bonde, A., Sun, H., Wittig, N.K., Hammershøj, H.C.D., Batista, G.M.F., Sommerfeldt, A., Frølich, S., Birkedal, H. and Skrydstrup, T. (2023). Catalytic disconnection of C–O bonds in epoxy resins and composites. *Nature*, [online] pp.1–8. doi:<https://doi.org/10.1038/s41586-023-05944-6>.
- [97] Manuel, J. and Cristina, D. (2023). How ready is the wind energy industry for the circular economy? *Sustainable Production and Consumption*, 43, pp.62–76. doi:<https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.10.016>.
- [98] Bennet, L. et al. (no date) SUSTAINABLE DECOMMISSIONING: WIND TURBINE BLADE RECYCLING REPORT FROM PHASE 1 OF THE ENERGY TRANSITION ALLIANCE BLADE RECYCLING PROJECT. https://ore.catapult.org.uk/wp-content/uploads/2021/03/CORE_Full_Blade_Report_web.pdf.
- [99] Bioökonomie.de. (2025). Klebstoffe auf Knopfdruck entkleben | Bioökonomie.de. [online] Available at: <https://biooekonomie.de/foerderung/foerderbeispiele/klebstoffe-auf-knopfdruck-entkleben> [Accessed 24 Sep. 2025].
- [100] Mishnaevsky, L., Branner, K., Petersen, H., Beauson, J., McGugan, M. and Sørensen, B. (2017). *Materials for Wind Turbine Blades: An*

- Overview. *Materials*, 10(11), p.1285.
doi:<https://doi.org/10.3390/ma10111285>.
- [101] Alnahhal, S. and Spremberg, E. (2016). Contribution to Exemplary In-house Wastewater Heat Recovery in Berlin, Germany. *Procedia CIRP*, 40, pp.35–40.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.046>.
- [102] Strømmens klimagassutslipp ned fra 15 til 11,9 g CO₂-ekv/kWh. (2025). *Energiaktuel.no*. [online]
doi:<https://doi.org/10.2994.sklwtpknwqkki7/1200x630>.
- [103] Chapter 2: Stationary Combustion. (2006). Available at:
https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_2_Ch2_Stationary_Combustion.pdf.
- [104] Energy from sewage water -District heating and district cooling in Sandvika, with 2 Unitop[®]. (n.d.). Available at:
https://www.friotherm.com/wp-content/uploads/2017/11/sandvika_e005_uk.pdf [Accessed 24 Sep. 2025].
- [105] Smith, N.R. and Henze, G.P. (2020) 'Modelling of wastewater heat recovery heat pump systems,' *Journal of Sustainable Development of Energy Water and Environment Systems*, 9(1), p. 0.
<https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d8.0330>.
- [106] Lyons, L., Kostas Kavvadias and Carlsson, J. (2021). Defining and accounting for waste heat and cold. [online]
doi:<https://doi.org/10.2760/73253>.
- [107] Frédéric Bordage (2014). Stimergy chauffe l'eau des immeubles avec ses chaudières numériques. [online] Green IT. Available at:
<https://www.greenit.fr/2014/03/14/stimergy-chauffe-l-eau-des-immeubles-avec-ses-chaudieres-numeriques/?> [Accessed 24 Sep. 2025].
- [108] Stimergy's edge platform used to heat French public pool (2017). <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/stimergys-edge-platform-used-to-heat-french-public-pool/?>
- [109] European Circular Economy Stakeholder Platform. (2017). Stimergy: recycled heat from server rooms provides hot water. [online] Available at:
<https://circulareconomy.europa.eu/platform/en/good->

- practices/stimergy-recycled-heat-server-rooms-provides-hot-water? [Accessed 24 Sep. 2025].
- [110] Wahlroos, M., Pärssinen, M., Rinne, S., Syri, S. and Manner, J. (2018). Future views on waste heat utilization – Case of data centers in Northern Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, pp.1749–1764. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.058>.
- [111] Frédéric Bordage (2014). Stimergy chauffe l’eau des immeubles avec ses chaudières numériques. [online] Green IT. Available at: <https://www.greenit.fr/2014/03/14/stimergy-chauffe-l-eau-des-immeubles-avec-ses-chaudieres-numeriques/>? [Accessed 24 Sep. 2025].
- [112] Twobirds.com. (2024). Data centres & waste heat: An overview of the legal requirements for waste heat utilisation. [online] Available at: <https://www.twobirds.com/en/insights/2024/germany/rechnen-und-abwaerme-ein-ueberblick-ueber-die-gesetzlichen-vorgaben-zur-abwaermenutzung> [Accessed 24 Sep. 2025].
- [113] Hydraloop.com. (2025). Product Data Sheet – Hydraloop H300 (metric) – Info Center. [online] Available at: <https://info.hydraloop.com/docs/product-data-sheet-hydraloop-h300-metric/> [Accessed 24 Sep. 2025].
- [114] Epic Cleantec. (2024). How Water Reuse Can Lower Carbon Emissions | Epic Cleantec. [online] Available at: <https://epiccleantec.com/blog/how-onsite-water-reuse-can-lower-carbon-emissions-buildings?> [Accessed 24 Sep. 2025].
- [115] Netherlands Water Partnership. (2021). Hydraloop | NWP. [online] Available at: <https://www.netherlandswaterpartnership.com/network/members/hydraloop> [Accessed 24 Sep. 2025].
- [116] Juan, Y.-K., Chen, Y. and Lin, J.-M. (2016). Greywater Reuse System Design and Economic Analysis for Residential Buildings in Taiwan. *Water*, [online] 8(11), p.546. doi:<https://doi.org/10.3390/w8110546>.
- [117] Hydraloop Systems B.V. and Buck, S. (2020) NSF/ANSI 350 Standard Compliance of Hydraloop product, NSF/ANSI 350 Standard.

- <https://info.hydraloop.com/wp-content/uploads/2025/01/Hydraloop-NSF-350-certificate.pdf>
- [118] SwissPVCircle. (2025). Project. [online] Available at: <https://www.pv-circle.ch/en/projekt.html>? [Accessed 24 Sep. 2025].
- [119] Www.bfh.ch. (2023). A second life for photovoltaic modules. [online] Available at: <https://www.bfh.ch/en/news/news/2023/ein-zweites-leben-fuer-photovoltaik-module/> [Accessed 24 Sep. 2025].
- [120] Rajagopalan, N. et al. (2021) Preliminary environmental and financial viability analysis of circular Economy scenarios for satisfying PV System service lifetime, IEA PVPS. report T12-21:2021. International Energy Agency. <https://iea-pvps.org/research-tasks/pv-sustainability/>.
- [121] Sens eRecycling. (2024). Improving the circular economy in the solar industry. [online] Available at: <https://www.erecycling.ch/en/privatpersonen/blog/swiss-pv-circle-abschluss.html>? [Accessed 24 Sep. 2025].
- [122] EUROPEAN SOLAR PV INDUSTRY ALLIANCE PV PASSPORT Paving the way: Recommendation for the Implementation of a Mandatory Digital Product Passport (DPP) for Solar Photovoltaic Modules in the European Union. (2024). Available at: <https://solaralliance.eu/wp-content/uploads/2024/11/ESIA-PV-Passport-II.pdf>? [Accessed 24 Sep. 2025].
- [123] Rapidcanvas.ai. (2023). Assessing the ROI for Predictive Maintenance Solution on Wind Turbines Summaries. [online] Available at: [https://www.rapidcanvas.ai/blogs/assessing-the-roi-for-predictive-maintenance-solution-on-wind-turbines?](https://www.rapidcanvas.ai/blogs/assessing-the-roi-for-predictive-maintenance-solution-on-wind-turbines/) [Accessed 24 Sep. 2025].
- [124] Ding, C., Ke, J., Levine, M. and Zhou, N. (2024). Potential of artificial intelligence in reducing energy and carbon emissions of commercial buildings at scale. Nature Communications, [online] 15(1), p.5916. doi:<https://doi.org/10.1038/s41467-024-50088-4>.
- [125] Kateryna Dmytriyeva (2023). Commercial HVAC maintenance: Key to energy savings and equipment health. [online] Www.cim.io. Available at: <https://www.cim.io/blog/commercial-hvac->

- maintenance-key-to-energy-savings-and-equipment-health? [Accessed 24 Sep. 2025].
- [126] Chapter 6 Predictive Maintenance Technologies. (n.d.). Available at: https://www1.eere.energy.gov/femp/pdfs/om_6.pdf.
- [127] for, O. (2018). ISO 17359:2018. [online] ISO. Available at: <https://www.iso.org/standard/71194.html?> [Accessed 24 Sep. 2025].
- [128] Artificialintelligenceact.eu. (2024). High-level summary of the AI Act | EU Artificial Intelligence Act. [online] Available at: <https://artificialintelligenceact.eu/high-level-summary/?>.
- [129] Pettinau, A., Marotto, D., Federica Dessì and Ferrara, F. (2024). Techno-economic assessment of renewable hydrogen production for mobility: A case study. *Energy conversion and management*, 311, pp.118513–118513. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118513>.
- [130] South Africa Hydrogen Valley Final Report Table of Contents. (2021). Available at: https://www.dsti.gov.za/images/2021/Hydrogen_Valley_Feasibility_Study_Report_Final_Version.pdf? [Accessed 24 Sep. 2025].
- [131] Hydrogen and decarbonised gas market (no date). https://energy.ec.europa.eu/topics/markets-and-consumers/hydrogen-and-decarbonised-gas-market_en?
- [132] Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI. (2023). Europe expands recycling of lithium-ion batteries: Focus on capacity development, demand analysis and market players. [online] Available at: <https://www.isi.fraunhofer.de/en/blog/themen/batterie-update/recycling-lithium-ionen-batterien-europa-kapazitaeten-bedarf-akteure-markt-analyse.html>.
- [133] Klohs, D., Offermanns, C., Heimes, H. and Kampker, A. (2023). Automated Battery Disassembly—Examination of the Product- and Process-Related Challenges for Automotive Traction Batteries. *Recycling*, [online] 8(6), p.89. doi:<https://doi.org/10.3390/recycling8060089>.
- [134] Zanoletti, A., Carena, E., Ferrara, C. and Bontempi, E. (2024). A Review of Lithium-Ion Battery Recycling: Technologies,

- Sustainability, and Open Issues. Batteries, [online] 10(1), pp.38–38. doi:<https://doi.org/10.3390/batteries10010038>.
- [135] Seo, J. -, Vu, T.T., Cho, S. -, Cha, J. -, Choi, Y. -, Kim, H. - and Song, D. - (2025). Techno-economic evaluation of Lithium hydroxide recovery from waste battery effluent: Process design and scalability assessment. *Journal of Energy Storage*, [online] 125, p.117002. doi:<https://doi.org/10.1016/j.est.2025.117002>.
- [136] European Union (2023). Regulation - 2023/1542 - EN - EUR-Lex. [online] Europa.eu. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1542/oj/eng>.
- [137] Matter, J.M., Stute, M., Snaebjornsdottir, S.O., Oelkers, E.H., Gislason, S.R., Aradottir, E.S., Sigfusson, B., Gunnarsson, I., Sigurdardottir, H., Gunnlaugsson, E., Axelsson, G., Alfredsson, H.A., Wolff-Boenisch, D., Mesfin, K., Taya, D.F. d. I. R., Hall, J., Dideriksen, K. and Broecker, W.S. (2016). Rapid carbon mineralization for permanent disposal of anthropogenic carbon dioxide emissions. *Science*, [online] 352(6291), pp.1312–1314. doi:<https://doi.org/10.1126/science.aad8132>.
- [138] Carbfix.com. (2024). Carbfix Secures Europe’s First Storage Permit for Onshore Geological Storage of CO2 - Carbfix. [online] Available at: https://www.carbfix.com/newsmedia/carbfix-secures-europes-first-storage-permit-for-o?utm_source=carbonstorage.beehiiv.com&utm_medium=referral&utm_campaign=low-carbon-solutions-arrive-at-data-centers [Accessed 24 Sep. 2025].
- [139] www.stenarecycling.com. (2022). Recycling and reusing electronic waste | Stena Recycling. [online] Available at: <https://www.stenarecycling.com/what-we-offer/material-recycling/electronics/>.
- [140] INTEL et al. (2010) A Metric for Measuring the Benefit of Reuse Energy from a Data Center. Edited by M. Patterson. https://datacenters.lbl.gov/sites/default/files/EREmetric_GreenGrid.pdf.
- [141] GrowSmarter (2019). Open district heating, stockholm exergi. [online] Slideshare. Available at: <https://www.slideshare.net/slideshow/open-district-heating-stockholm-exergi/208786918> [Accessed 24 Sep. 2025].

- [142] Vahid Zangeneh and Lars Erik Øi (2023). Economic investigation of heat pumps for heat recovery from data center. 64th International Conference of Scandinavian Simulation Society, SIMS 2023 Västerås, Sweden, September 25-28, 2023, [online] pp.39–45. doi:<https://doi.org/10.3384/ecp200006>.
- [143] Building Energy Exchange (2024) Solutions for Low-Carbon building: Stockholm - Building Energy Exchange. <https://be-exchange.org/beexreport/low-carbon-stockholm/>
- [144] Commission adopts EU-wide scheme for rating sustainability of data centres (2024). https://energy.ec.europa.eu/news/commission-adopts-eu-wide-scheme-rating-sustainability-data-centres-2024-03-15_en.
- [145] Intersolar.de. (2023). Photovoltaics Recycling Rate up to 99 Percent Possible. [online] Available at: <https://www.intersolar.de/news/recycling-of-photovoltaic-modules>.
- [146] Fan, H.-H., Salas-Redondo, C. and Chalaux, A. (2024). Life cycle assessment of an innovative high-value-recovery crystalline silicon photovoltaic recycling process – the environmental impacts and benefits. EPJ Photovoltaics, 15, p.35. doi:<https://doi.org/10.1051/epjpv/2024034>.
- [147] Cromratie Clemons, S.K., Salloum, C.R., Herdegen, K.G., Kamens, R.M. and Gheewala, S.H. (2021). Life cycle assessment of a floating photovoltaic system and feasibility for application in Thailand. Renewable Energy, 168, pp.448–462. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.082>.
- [148] Nappier, S. (2023) From Water Stressed to Water Secure: Lessons from Israel’s Water Reuse Approach, 2022 U.S. DELEGATION SUMMARY. Summary Report. <https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-03/From%20Water%20Stressed%20to%20Water%20Secure%20-%20Lessons%20from%20Israel%27s%20Water%20Reuse%20Approach.pdf>.
- [149] Heyde, B.J., Braun, M., Soufi, L., Lüneberg, K., Gallego, S., Amelung, W., Axtmann, K., Bierbaum, G., Glaeser, S.P., Grohmann, E., Arredondo-Hernández, R., Mulder, I., Pulami, D., Smalla, K., Zarfl, C., Siebe, C. and Siemens, J. (2025). Transition from irrigation

- with untreated wastewater to treated wastewater and associated benefits and risks. *npj Clean Water*, [online] 8(1). doi:<https://doi.org/10.1038/s41545-025-00438-6>.
- [150] Government amends Water Law to cut price for farmers | The Times of Israel (2025). <https://www.timesofisrael.com/government-amends-water-law-to-cut-price-for-farmers/>
- [151] López-Serrano, M.J., Velasco-Muñoz, J.F., Aznar-Sánchez, J.A. and María, I. (2021). Economic Analysis of the Use of Reclaimed Water in Agriculture in Southeastern Spain, A Mediterranean Region. *Agronomy*, 11(11), pp.2218–2218. doi:<https://doi.org/10.3390/agronomy11112218>.
- [152] Water Reuse Europe (2025) Policy and Regulations - Water Reuse Europe. <https://www.water-reuse-europe.org/about-water-reuse/policy-and-regulations/#page-content>.
- [153] Thomson, C. and Harrison, G. (2015). Life cycle costs and carbon emissions of wind power Executive Summary Key Points. [online] Available at: https://www.climatexchange.org.uk/wp-content/uploads/2023/09/life_cycle_wind_executive_summary.pdf.
- [154] Fraunhofer Institute for Wood Research Wilhelm-Klauditz-Institut WKI. (2020). Certification - Fraunhofer WKI. [online] Available at: <https://www.wki.fraunhofer.de/en/departments/qa/testing-monitoring-certification/certification.html>? [Accessed 25 Sep. 2025].
- [155] Photo: Beach Cleaning in Greece (photo by ‘Greece without Single Use Plastics’ Alliance). (2020). Available at: https://switchmed.eu/wp-content/uploads/2020/12/2020.11.27-Country-Profile-Greece_final.pdf? [Accessed 27 Sep. 2025].
- [156] Eurostat (2022). EU’s circular material use rate decreased in 2021. [online] @EU_Eurostat. Available at: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/ddn-20221213-1>? [Accessed 27 Sep. 2025].
- [157] Wallsten, B., Carlsson, A., Frändegård, P., Krook, J. and Svanström, S. (2013). To prospect an urban mine – assessing the metal recovery potential of infrastructure ‘cold spots’ in Norrköping,

Sweden. Journal of Cleaner Production, 55, pp.103–111.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.041>.