



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**Εξοικονόμηση πόρων (υλικών και ενέργειας) λόγω
επαναχρησιμοποίησης υλικών στα πλαίσια της κυκλικής
οικονομίας. Μελέτες περίπτωσης.**

Διπλωματική Εργασία

της

Τριαλόνα Βασιλικής

A.M 46148012

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια

Κονδύλη Μ. Αιμιλία



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**Model development for energy and materials saving in the
context of circular economy. Case studies**

Diploma Thesis

her

Triadona Vasiliki's

Registration Number: 46148012

Supervising Professor

Kondili M. Emilia



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**Εξοικονόμηση πόρων (υλικών και ενέργειας) λόγω
επαναχρησιμοποίησης υλικών στα πλαίσια της κυκλικής
οικονομίας. Μελέτες περίπτωσης.**

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή
Η πτυχιακή/διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι
Εξεταστική Επιτροπή:

ΕΠΩΝΥΜΟ – ΟΝΟΜΑ	ΥΠΟΓΡΑΦΗ
ΚΟΝΔΥΛΗ ΑΙΜΙΛΙΑ	
ΠΑΠΑΠΟΣΤΟΛΟΥ ΧΡΙΣΤΙΑΝΑ	
ΖΑΦΕΙΡΑΚΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ	

Δήλωση συγγραφέα Πτυχιακής/Διπλωματικής εργασίας

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Τριαλόνα Βασιλική του Νικολάου, με αριθμό μητρώου 46148012 φοιτήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο/Η Δηλών/ούσα

Τριαλόνα Βασιλική



Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία σηματοδοτεί το τέλος μιας σημαντικής περιόδου της ζωής μου, ένα μεγάλο ταξίδι με πολλές αναμνήσεις, πολλά σημαντικά διδάγματα τα οποία με έκαναν καλύτερη. Έμαθα επίσης πως ό,τι επιθυμούμε μπορούμε να το κατακτήσουμε με επιμονή, υπομονή και σκληρή δουλειά χωρίς να έχει κανένα εμπόδιο σημασία στο δρόμο μας.

Θα ήθελα πρώτη απ' όλους να ευχαριστήσω την υπεύθυνη καθηγήτρια μου, για τη στήριξη και πάνω απ' όλα για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε ώστε να ολοκληρώσω επιτυχώς την συγγραφή της διπλωματικής μου εργασίας. Νιώθω ιδιαίτερη τιμή που είχα την ευκαιρία να συνεργαστώ μαζί της.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω από καρδιάς την επί σειρά ετών κολλητή μου, της οποίας χωρίς την στήριξη της, δεν θα είχα πιστέψει ποτέ στις δυνατότητες μου αλλά και στον εαυτό μου, καθώς ήταν πάντα εδώ να με εμπνεύσει, να με βοηθάει και να με στηρίζει με κάθε δυνατό τρόπο. Αν και σε άλλον επαγγελματικό κλάδο οι συμβουλές της και η βοήθειά της με ακολούθησαν σε αυτό μου το ταξίδι. Για όλα αυτά και άλλα τόσα θα της είμαι για πάντα ευγνώμων.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω το αγόρι μου, που μαζί του διένυσα σχεδόν όλα τα χρόνια της φοίτησής μου, για τη στήριξη την αγάπη αλλά και την κατανόηση που έδειξε, αλλά και για τους μετέπειτα στόχους που με βοήθησε να θέσω.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τις συμφοιτήτριες και πλέον φίλες μου, που χωρίς εκείνες τίποτα δεν θα ήταν το ίδιο όλα αυτά τα χρόνια, τη παρέα μου και την οικογένεια μου.

Περίληψη

Οι ανθρώπινες δραστηριότητες καθώς και ο αυξημένος ρυθμός κατανάλωσης ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο έχουν οδηγήσει σε απώλεια της βιοποικιλότητας, την εξάντληση των πόρων και την υποβάθμιση του περιβάλλοντος. Όλα αυτά οδηγούν στην ευρέως γνωστή σε όλους μας κλιματική αλλαγή. Η αλλαγή του κλίματος προκαλείται κυρίως από τη καύση ορυκτών καυσίμων και η παραγωγή αποβλήτων, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη συσσώρευση αερίων όπως το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και το μεθάνιο (CH_4) στην ανώτερη ατμόσφαιρα. Η προσέγγιση της κυκλικής οικονομίας φαίνεται να προσφέρει τη λύση, επιτρέποντας την επανένταξη των υλικών στον οικονομικό κύκλο, διασφαλίζοντας παράλληλα μια παγκόσμια ισορροπία προσφοράς/ζήτησης. Η κυκλική οικονομία μπορεί να οριστεί ως «ένα αναγεννητικό σύστημα» στο οποίο η εισροή πόρων και τα απόβλητά, οι εκπομπές και η διαρροή ενέργειας ελαχιστοποιούνται με την επιβράδυνση, το κλείσιμο των βρόχων καθώς η αυξανόμενη ζήτηση για πόρους με τις αντίστοιχες περιβαλλοντικές διαταραχές είναι ένας από τους κρίσιμους μοχλούς για τη μετατόπιση προς αυτή. Στόχος της εργασίας είναι μέσω της κυκλικής οικονομίας με τη μέθοδο της επαναχρησιμοποίησης υλικών να καταφέρουμε να εξοικονομήσουμε πόρους και κατ' επέκταση ενέργεια. Στην εργασία ακολουθήσαμε μια μεθοδολογία βιβλιογραφικής ανασκόπησης μέσω αναζήτησης μελετών, άρθρων και λοιπών δημοσιεύσεων στις ηλεκτρονικές βάσεις αναζήτησης Science Direct, Scopus και MDPI.

Λέξεις – κλειδιά: κυκλική οικονομία, επαναχρησιμοποίηση, δείκτες κυκλικής οικονομίας, LCA, ανάκτηση, εξοικονόμηση.

Abstract

Human activities as well as the increased rate of energy consumption worldwide have led to loss of biodiversity, resource depletion and environmental degradation. All this leads to climate change, widely known to all of us. Climate change is mainly caused by the burning of fossil fuels and the production of waste, which results in the accumulation of gases such as carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄) in the upper atmosphere. The circular economy approach appears to offer the solution, allowing materials to be reintegrated into the economic cycle while ensuring a global supply/demand balance. The circular economy can be defined as "a regenerative system" in which resource input and waste, emissions and energy leakage are minimized by slowing down, closing the loops as increasing demand for resources with corresponding environmental disturbances is one of the critical levers for moving towards it. The goal of the work is through the circular economy with the method of reusing materials to manage to save resources and by extension energy. In the work we followed a bibliographic review methodology by searching for studies, articles and other publications in the online databases Science Direct, Scopus and MDPI.

Keywords: circular economy, reuse, circular economy indicators, LCA, recovery, savings.

Ακρωνύμια

ΕΕ, Ευρωπαϊκή Ένωση

ΚΟ, Κυκλική Οικονομία

ΑΣΑ, Αστικά Στερεά Απόβλητα

LCA, Life Cycle Assessment

CCBs, Coal Combustion by-products

MCI, Material Circularity Index

WCI, Water Circularity Index

MRS, material reutilization score

MCDA, Multi-Criteria Decision Analysis

IR,, Intrinsic Recyclability

RC, Recycled Content

RCR, Recycling Collection Rate

ReR, Reuse Rate

PIS,, Positive Ideal Solution

NIS, Negative Ideal Solution

Al, Aluminum

GHG, Greenhouse Gas

GWP, Global Warming Potential

MPE, Metal Packaging Europe

PET, Polyethylene Terephthalate

rPET, recycled Polyethylene Terephthalate

PCR, Post-Consumer Resin

EOL, Energy End of Life

DRS, Deposit Return Schemes

CDW, Construction and demolition waste

EPD, Environmental Product Declarations

BF, Blast Furnace

DRI, Direct Reduced Iron

BOF, Basic Oxygen Furnace

EAF, Electric Arc Furnace

ECF, Embodied Carbon Factor

PPWR, Proposal Packaging and Packaging Waste

Περιεχόμενα

1° Κεφάλαιο	12
Εισαγωγή	12
2° Κεφάλαιο	16
Μεθοδολογία	16
3° Κεφάλαιο	17
3.1 Παρούσα κατάσταση	17
3.1.1 Ορισμός της Κυκλικής Οικονομίας.....	17
3.1.2 Βασικές αρχές Κυκλικής Οικονομίας	22
3.1.3 Κατασκευαστικός κλάδος.....	24
3.1.4 Κλωστοϋφαντουργικός κλάδος	25
3.1.5 Νερό και Κυκλική Οικονομία	27
3.1.6 Life Cycle Assessment	29
4° Κεφάλαιο	33
4.1 Ποσοτικοί Δείκτες	33
4.1.1 Ορισμός Δείκτη	33
4.1.2 Δείκτης δυνητικής επαναχρησιμοποίησης	36
4.1.3 Δείκτης Κυκλικότητας Υλικού.....	38
4.1.4 Δείκτης Κυκλοφορίας Νερού	40
4.1.5 Δείκτης Μακροζωίας.....	42
4.1.6 Δείκτης Επαναχρησιμοποίησης Υλικού συνδυαστικά με Δείκτη Κυκλικότητας Υλικού	43
5° Κεφάλαιο	47
5.1 Μελέτες Περίπτωσης συσκευασιών ποτών	47
5.1.1 Μελέτη 1 ^{ης} Περίπτωσης: Συσκευασία αλουμινίου.....	47
5.1.2 Μελέτη 2 ^{ης} Περίπτωσης: Πλαστικές φιάλες PET.....	52
5.1.3 Μελέτη 3 ^{ης} Περίπτωσης: Γυάλινες φιάλες	59
6° Κεφάλαιο	65
6.1 Μελέτες Περιπτώσεων: Οικοδομικών Υλικών	65
6.1.1 Μελέτη 4 ^{ης} Περίπτωσης: Τσιμέντο.....	65
6.1.2 Μελέτη 5 ^{ης} Περίπτωσης: Θερμομονωτικά Υλικά	71
6.1.3 Μελέτη 6 ^{ης} Περίπτωσης: Χάλυβας.....	77
7° Κεφάλαιο	84
7.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων	84

7.1.1 Συσκευασίες Ποτών	84
Γράφημα 18.....	93
7.1.2 Οικοδομικά Υλικά.....	95
8^ο Κεφάλαιο.....	104
Συμπεράσματα και επόμενα βήματα.....	104
Βιβλιογραφία.....	108

1^ο Κεφάλαιο

Εισαγωγή

Μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις που αντιμετωπίζει ολόένα και περισσότερο ο πλανήτης μας είναι η κλιματική αλλαγή. Με αυτό τον τρόπο όσο αφορά την ανάπτυξη του πλανήτη δημιουργούνται διάφοροι περιορισμοί όπως η αύξηση του πληθυσμού, η συγκέντρωση CO₂ στην ατμόσφαιρα, η κατανάλωση ενέργειας, η χρήση ορυκτών και φυσικών πόρων και η έλλειψη νερού. (Reh, 2013) Καθώς ο πληθυσμός αυξάνεται ραγδαία, αυξάνονται και οι ανθρώπινες δραστηριότητες. Αυτές οι δραστηριότητες έχουν ως αποτέλεσμα με τη σειρά τους αλλαγές στο κλίμα και κατ' επέκταση στην σύνθεση της παγκόσμιας ατμόσφαιρας η οποία μεταβάλλεται λόγω αυτών. (Malhi et al., 2021)

Η ανησυχία για τους φυσικούς πόρους και το περιβάλλον που προέκυψε μετά από τη βιομηχανική επανάσταση είναι αναμενόμενη. Επιπλέον, η συνεχιζόμενη παγκοσμιοποίηση και η τάση αυξανόμενης ανάπτυξης θα θέσει την ανθρώπινη κοινωνία στα πρόθυρα περιορισμών, όπως η ικανότητα περιβαλλοντικής ανάπτυξης και θα φτάσει στο φυσικό όριο. Έτσι η βιώσιμη βιομηχανική ανάπτυξη συνδέεται με τη βιώσιμη χρήση των πόρων, (Pomoni et al., 2024) καθώς οι φυσικοί πόροι χρησιμεύουν ως θεμελιώδεις εισροές στις διαδικασίες παραγωγής και είναι απαραίτητοι για την πρόοδο των κοινωνιών και τη διατήρηση της ζωής. (Edirisinghe et al., 2024a)

Η παγκόσμια βιομηχανία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από μη ανανεώσιμους φυσικούς πόρους τόσο για την παραγωγή ενέργειας όσο και για την παραγωγή υλικών. Τις επόμενες δεκαετίες, η ζήτηση για μέταλλα και ορυκτά αναμένεται να διπλασιαστεί για να ικανοποιηθούν οι ανάγκες του ταχέως αναπτυσσόμενου πληθυσμού. Για παράδειγμα, η βιομηχανία εξόρυξης καταναλώνει περίπου το 3,5% της κατανάλωσης ενέργειας παγκοσμίως. Έτσι η αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων απαιτεί επείγουσα προσοχή, (Di Domenico et al., 2023a) και καθίσταται απαραίτητη η αλλαγή της τρέχουσας παραγωγής και κατανάλωσης αγαθών, δίνοντας μεγαλύτερη έμφαση στη δημιουργία υψηλότερης προστιθέμενης αξίας με λιγότερες εισροές, μείωση του κόστους και ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. (Skare et al., 2024a)

Παρά την πρόσφατη αύξηση του ποσοστού των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η ορυκτή ενέργεια παραμένει η κυρίαρχη πηγή παγκοσμίως. Η εκμετάλλευση και η

χρήση μεγάλης ποσότητας ορυκτής ενέργειας διατηρούν υψηλές τις εκπομπές άνθρακα και η αναντιστοιχία πόρων αυξάνει επίσης τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα . Η ανθρώπινη εξάρτηση από την ορυκτή ενέργεια οδηγεί σε υπερθέρμανση του πλανήτη και σε πιο ακραίες καιρικές συνθήκες . Αντίθετα, οι ακραίες κλιματικές συνθήκες έχουν αμοιβαίο αντίκτυπο στην κατανάλωση ενέργειας και τις εκπομπές άνθρακα. Συγκεκριμένα, το ακραίο ζεστό καλοκαίρι και ο κρύος χειμώνας οδηγούν σε αυξημένη ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια και θέρμανση, με συνέπεια την αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας και, κατά συνέπεια, τις αυξημένες εκπομπές άνθρακα. (Tao et al., 2023)

Μια σημαντική ανθρώπινη δραστηριότητα είναι η αύξηση της εκβιομηχανοποίησης καθώς οδηγεί σε ανάλογη αύξηση των ημερήσιων ρυθμών παραγωγής απορριμμάτων των πόλεων. Οι συνέπειες είναι τεράστιες καθώς οι αναπτυσσόμενες περιοχές τείνουν σε μεθόδους διάθεσης των απορριμμάτων, οι οποίες έχουν αποδεχθεί καταστροφικές για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. (Thamarai & Naresh, 2023)

Τα απόβλητα προκαλούν ρύπανση σε κάθε τομέα της γης όπως ο αέρας, τα υπόγεια ύδατα αλλά και το έδαφος, καθώς προκαλούν ανεξέλεγκτη απόρριψη από βαρέα μέταλλα που εμφανίζεται στο νερό, το έδαφος και τα φυτά , η ανοιχτή καύση προκαλεί CO, CO₂ , SO, NO, PM₁₀ και άλλες εκπομπές ρύπων που επηρεάζουν την ατμόσφαιρα αλλά εκλύουν επίσης CO₂ και μεθάνιο στην ατμόσφαιρα, συμβάλλοντας στην κλιματική αλλαγή. Τα απόβλητα που παράγονται στην ΕΕ αυξάνονται όλο και περισσότερο και σήμερα φτάνουν περίπου τους 3 δισ. τόνους κάθε χρόνο. (Ferronato & Torretta, 2019) Έτσι η αύξηση της δημιουργίας αποβλήτων έχει με τη σειρά της οδηγήσει σε επιτάχυνση της κατανάλωσης ενέργειας αλλά και υλικών αλλά και υψηλότερο κόστος για την διαχείριση αυτών. (Debrah et al., 2021)

Σαν αποτέλεσμα αυτών η μείωση των παραγόμενων απορριμμάτων έχει γίνει μια σημαντική πρόκληση στις αναπτυσσόμενες χώρες αφού με την αυξανόμενη πίεση στους φυσικούς πόρους, η πρόκληση της καλύτερης και αποτελεσματικότερης χρήσης των υλικών και των πόρων έχει γίνει επιτακτικό ζήτημα σε όλο τον κόσμο, μέσω της μετάβασης σε μια πιο ωφέλιμη οικονομία, όπου η αξία των προϊόντων, των υλικών και των πόρων διατηρείται στην οικονομία όσο το δυνατό περισσότερο και η παραγωγή

αποβλήτων ελαχιστοποιείται. Αυτό αποτελεί ουσιαστική συμβολή στην ανάπτυξη μιας βιώσιμης, ανταγωνιστικής οικονομίας. (Morseletto, 2023)

Τα πλανητικά όρια, ένα πλαίσιο που προτείνεται από επιστήμονες για τον καθορισμό των ασφαλών ορίων λειτουργίας για πολλές κρίσιμες διεργασίες του γήινου συστήματος που ρυθμίζουν τη σταθερότητα και την ανθεκτικότητα του πλανήτη, βοηθούν στον εντοπισμό των ορίων πέρα από τα οποία οι ανθρώπινες δραστηριότητες θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε μη αναστρέψιμες αλλαγές στο περιβάλλον, δυνητικά στο σύστημα της γης. Αυτά τα όρια συνδέονται περίπλοκα με τα βιοφυσικά υποσυστήματα και τις ζωτικές διαδικασίες του πλανήτη. Το οικονομικό μοντέλο που επικρατεί ξεπερνά τα ασφαλή όρια του πλανήτη. Επί του παρόντος, πέντε από τα εννέα κρίσιμα «πλανητικά όρια», τα οποία αξιολογούν την περιβαλλοντική ευημερία σε ξηρά, θάλασσα και αέρα, έχουν ξεπεραστεί κυρίως λόγω των επιπτώσεων της γραμμικής οικονομίας «δημιουργία-χρήση-απόρριψη» (Edirisinghe et al., 2024b)

Το μοντέλο της γραμμικής οικονομίας ήταν το πιο επιτυχημένο στις βιομηχανίες μέχρι τον 20^ο αιώνα όσο αφορά την παραγωγή προϊόντων. Η γραμμική οικονομία μπορεί να περιγράψει ως μια οικονομία που ξεκινά από παρθένες πρώτες ύλες και καταλήγει σε χωματερή, καθώς οι αρχές της είναι καθορισμένες και αφορούν τύπους όπως «δημιουργία-χρήση-απόρριψη», «λήψη- δημιουργία-χρήση-απόρριψη» ή «cradle-to-grave». (Sakthivelmurugan et al., 2022) Όπως λοιπόν αναφέρθηκε στο μοντέλο της γραμμικής οικονομίας έχουμε τεράστια σπατάλη υλικών καθώς οι πρώτες ύλες χρησιμοποιούνται και στο τέλος ζωής τους καταλήγουν σε απόβλητα. Ως αποτέλεσμα στο να βρεθεί ένας εναλλακτικός τρόπος εισήχθη μια κυκλική οικονομία. Μια τεχνική κυκλικής οικονομίας που είναι οικονομικά βιώσιμη και στοχεύει στην αποτελεσματική αξιοποίηση των πόρων μέσω της ανακύκλωσης της επαναχρησιμοποίησης και της μείωσης. (Mahinroosta & Allahverdi, 2018a)

Επί του παρόντος, η ελαχιστοποίηση της χρήσης υλικών στη φάση του σχεδιασμού και η αναζήτηση βέλτιστων παραλλαγών παραγωγής είναι ζωτικής σημασίας, όπως και η επίτευξη της υψηλότερης δυνατής αξίας από τα υλικά μέσω της αποτελεσματικής χρήσης. (Skare et al., 2024b) Το μοντέλο γραμμικής οικονομίας, το οποίο οδήγησε τη βιομηχανική ανάπτυξη, είχε ως αποτέλεσμα τη ρύπανση και τη δυσανάλογη χρήση πεπερασμένων φυσικών κοιτασμάτων. Αντίθετα, η κυκλική οικονομία είναι βιώσιμη και υποστηρίζεται ως ουσιαστική ρεαλιστική εναλλακτική

λύση για τον μετριασμό των αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων, την προώθηση της μειωμένης κατανάλωσης ενέργειας και την ενίσχυση της οικονομικής ανάπτυξης. (Kumar et al., 2023) Η ΚΟ βασίζεται στην επαναχρησιμοποίηση, την ανακατασκευή και την ανακύκλωση προϊόντων για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα αντί για την εξαγωγή παρθένων υλικών. (Di Domenico et al., 2023b)

Μια σημαντική ποσότητα των υλικών που εξάγονται από τη γη καταλήγει να απορρίπτεται ως βιομηχανικά απόβλητα κατά τη φάση της κατασκευής Η παγκόσμια παραγωγή βιομηχανικών αποβλήτων έχει παρουσιάσει μια σταθερή ανοδική τάση για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η τάση της κλιμάκωσης της παραγωγής αποβλήτων συνεχίζεται σε πολλές χώρες, όπως επισημαίνεται στην έκθεση της Παγκόσμιας Τράπεζας για το 2023 , η οποία βασίστηκε σε δεδομένα από το 2016. Επί του παρόντος, η παγκόσμια παραγωγή στερεών αποβλήτων ανέρχεται σε περίπου 2,02 δισεκατομμύρια τόνους ΜΤ ετησίως και οι προβλέψεις υποδηλώνουν ότι ο αριθμός αυτός μπορεί να εκτιναχθεί στα ύψη σε 3,40 δισεκατομμύρια ΜΤ έως το 2050. (Edirisinghe et al., 2024c)

Η παρούσα εργασία εστιάζει στις εφαρμογές που έχει η κυκλική οικονομία μέσω της επαναχρησιμοποίησης σε συγκεκριμένους τομείς με στόχο τον μετριασμό απόρριψης των πρώτων υλών και κατ' επέκταση στην εξοικονόμηση τους.

Η εργασία δομείται ως εξής:

Στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρονται οι βασικές εισαγωγικές αρχές που διεκπεραιώσης της εργασίας. Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην εργασία όσο αφορά τη βιβλιογραφική ανασκόπηση αλλά και τη μεθοδολογία της ερευνάς που υλοποιήθηκε. Ακολούθως το τρίτο κεφάλαιο εστιάζει στη παρούσα κατάσταση, πιο συγκεκριμένα στον ορισμό της κυκλικής οικονομίας στις αρχές της κυκλικής οικονομίας αλλά και στην ανάγκη εφαρμογής της αλλά και σε εφαρμογές επαναχρησιμοποίησης. Στο τέταρτο κεφάλαιο εξετάζονται τα βασικά εργαλεία της κυκλικής οικονομίας δηλαδή οι ποσοτικοί δείκτες, πιο συγκεκριμένα βλέπουμε βασικούς δείκτες και ποσοτικά παραδείγματα από μελέτες. Στο πέμπτο και έκτο κεφάλαιο έχουμε την εξέταση των περιπτώσεων μελέτης για το κάθε κεφάλαιο αντιστοιχεί διαφορετικός κλάδος και διαφορετικά υλικά. Στο έβδομο κεφάλαιο αποτυπώνεται η ανάλυση αποτελεσμάτων που προέκυψε από τα δύο παραπάνω κεφάλαια. Η εργασία ολοκληρώνεται με το όγδοο κεφάλαιο στο οποίο

πραγματοποιείται η συλλογή των συμπερασμάτων ενώ διατυπώνονται κάποιες προτάσεις για το μέλλον.

2^ο Κεφάλαιο

Μεθοδολογία

Πραγματοποιήθηκε συστηματική αναζήτηση για τον εντοπισμό σχετικών άρθρων για την αντιμετώπιση των ερευνητικών στόχων που αναφέρθηκαν παραπάνω. Οι βάσεις δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν η scopus, η mdpi και η sciencedirect. Η σχετική βιβλιογραφία, βρέθηκε και διερευνήθηκε ηλεκτρολογώντας τις λέξεις-κλειδιά “circular economy”, “ circular economy indicators”, “aluminum cans”, “cement”, “steel”, “PET bottles”, “glass bottles”, “energy consumption”, “energy savings” τα οποία συνδυάστηκαν με σκοπό τον περιορισμό γενικών πληροφοριών στις ειδικότερες κατηγορίες.

Συμπεριλάβαμε μελέτες που δημοσιεύθηκαν από το 2010 έως και σήμερα, προκειμένου να επανεξεταστούν οι μελέτες τις τελευταίας δεκαετίας που πραγματοποιήθηκαν στον τομέα για να αποφευχθεί η επανεξέταση των παρωχημένων μελετών. Μετά από κάθε αναζήτηση στις παραπάνω βάσεις δεδομένων, όλοι οι τίτλοι και οι περιλήψεις εξετάστηκαν για να επιλεγούν οι σχετικές μελέτες με βάση τα κριτήρια ένταξης και αποκλεισμού. Στη συνέχεια ελέγχθηκε η συγκρισιμότητα των μελετών εξετάζοντας ένα τυχαίο δείγμα μελετών που συμπεριλήφθηκαν και αποκλείστηκαν μετά την αρχική εξέταση.

Μετά την αφαίρεση των μελετών που πληρούσαν τα κριτήρια αποκλεισμού κατά την αρχική εξέταση, το πλήρες κείμενο των υπόλοιπων μελετών αξιολογήθηκε σε σχέση με τα κριτήρια ένταξης. Συνολικά βρέθηκαν και μελετήθηκαν 220 άρθρα, πολλά εκ των οποίων αποκλείστηκαν. Τα 11 από αυτά δεν παρείχαν τις απαραίτητες πληροφορίες που χρειαζόμασταν, 22 από αυτά απορρίφθηκαν λόγω χρονολογίας, ενώ πάνω από 50 ήταν με επαναλαμβανόμενες πληροφορίες. Εν κατακλείδι στην εργασία χρησιμοποιήθηκαν τα υπόλοιπα 137 άρθρα επιστημονικών πηγών.

Εξήχθησαν δεδομένα για δύο κατηγορίες θεμάτων: τα αποτελέσματα και τη μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την επαναχρησιμοποίηση

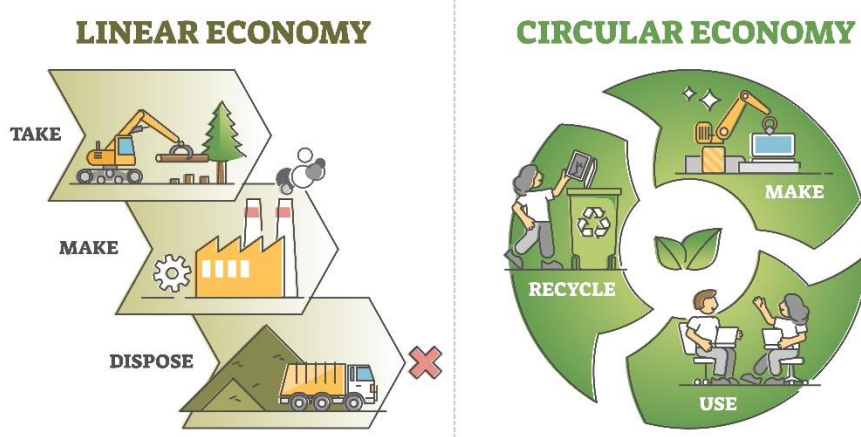
υλικών. Συγκεντρώθηκαν επίσης και άλλες πληροφορίες, όπως η κατανάλωση που είχαν στην αρχική τους παραγωγή αλλά και την εξοικονόμηση που έχουν μετά.

3^ο Κεφάλαιο

3.1 Παρούσα κατάσταση

3.1.1 Ορισμός της Κυκλικής Οικονομίας

Η μετάβαση από ένα παραδοσιακό γραμμικό σε ένα εναλλακτικό κυκλικό σύστημα μπορεί να ενισχύσει την οικονομική ανάπτυξη και να υποστηρίξει τη βιώσιμη ανανέωση κεφαλαίου στην Ευρωπαϊκή Ένωση. (De Pascale et al., 2023a) Η εφικτή οικονομική ανάπτυξη με βάση την άμεση παραγωγή δεν είναι εφικτή σε έναν πλανήτη με περιορισμένους πόρους και περιορισμένη ικανότητα αφομοίωσης των απορριμμάτων. Παρά τις προσπάθειες για την αντιμετώπιση του περιβαλλοντικού ζητήματος από τη δεκαετία του 1960, η επιβάρυνση του παγκόσμιου περιβάλλοντος έχει αυξηθεί αδιάκοπα και μερικά πλανητικά όρια έχουν ξεπεραστεί. Σε αυτό το πλαίσιο, η κυκλική οικονομία (ΚΟ) θεωρείται μια επιλογή που μπορεί να αποφέρει τόσο οικονομικά όσο και φυσικά οφέλη. (Suárez-Eiroa et al., 2019)



Εικόνα 1 Μοντέλο γραμμικής οικονομίας και μοντέλο κυκλικής οικονομίας (Καλλιπολίτου, 2022)

Στο πλαίσιο του συστήματος της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ), όλα τα κράτη της ΕΕ έχουν προωθήσει μια σειρά ρυθμίσεων για την ενίσχυση της κυκλικότητας. Χαρακτηριστικά, σύμφωνα με την ακαδημαϊκή έρευνα σχετικά με την εκτέλεση της ΚΟ στην ΕΕ, η οποία παρουσιάζει μερικές ανακαλύψεις σε σχέση με την εκτέλεσή της

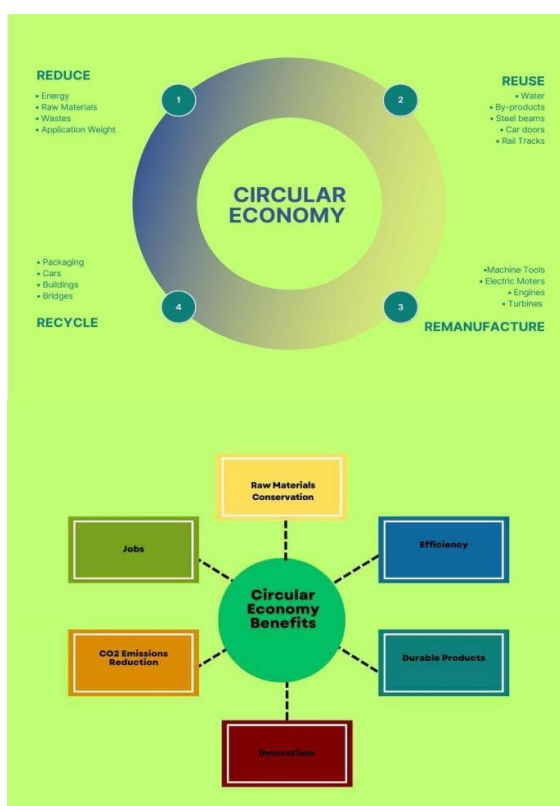
σε όλα τα επίπεδα, σε διαφορετικά οικονομικά τμήματα και έθνη της ΕΕ. (De Pascale et al., 2023b)

Η μετάβαση μιας οικονομικής διάστασης από την «παραγωγή-κατανάλωση-απόρριψη» στην «παραγωγή-κατανάλωση-επαναχρησιμοποίηση» απαιτεί την ένωση και τη δέσμευση μερικών εταίρων, όπως οι κατασκευαστές, οι αγοραστές και οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής. Η συν δημιουργία εκτίμησης μεταξύ αυτών των συντελεστών μπορεί να αποτελέσει βασικό μέρος της λογικής αυτής της οικονομικής επίδειξης, η οποία αναμένεται να έχει θετική επίδραση στην κοινωνική ζωή της κοινότητας, στην επάρκεια της οικονομίας και στο κανονικό περιβάλλον. Η προσέγγιση της ΚΟ καθοδηγήθηκε από την άποψη των Hysa et al., όπου το έδαφος απεικονίζεται ως ένα κυκλικό, κλειστό πλαίσιο με περιορισμένους πόρους, στο οποίο η οικονομία και το περιβάλλον θα έπρεπε να υπάρχουν δίπλα-δίπλα. (Hysa et al., 2020a)

Σε γενικές γραμμές, η ΚΟ βασίζεται στο σχεδιασμό βιομηχανικών προϊόντων με προστιθέμενη αξία, σε μεγαλύτερο κύκλο ζωής και μέγιστη αξιοποίηση στη δημιουργία ευέλικτων προϊόντων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διαφορετικές εφαρμογές με διαφορετική ωφέλιμη ζωή, εξασφαλίζοντας έτσι την επαναχρησιμοποίηση μεμονωμένων προϊόντων και την ομαλή επιστροφή των στερεών αποβλήτων στον βιομηχανικό τομέα, όπου το κόστος των δευτερογενών πρώτων υλών από την ανακύκλωση είναι ανταγωνιστικό στην αγορά σε μια συστημική προσέγγιση στη διαχείριση και στην ανάπτυξη βιώσιμων αλυσίδων εφοδιασμού. (Arruda et al., 2021)

Στη βιβλιογραφία παρέχονται διαφορετικοί ορισμοί της ΚΟ. Ορισμένοι από αυτούς έχουν μια ολιστική προοπτική και μερικοί από αυτούς μια μερική, που εστιάζει περισσότερο στον περιβαλλοντικό αντίκτυπο της κυκλικότητας. Σε κάποιες περιπτώσεις η ΚΟ ορίζεται ως ανάκτηση, η οποία απορρίπτει τα απόβλητα μέσω του σχεδιασμού καινοτόμων επιχειρηματικών μοντέλων που ενισχύουν τη χρήση βελτιωμένης σχεδίασης υλικού, προϊόντων και συστημάτων. Σε άλλες περιπτώσεις η ΚΟ ορίζεται ως «ένα οικονομικό μοντέλο στο οποίο ο σχεδιασμός, η παροχή πόρων, η προμήθεια, η παραγωγή και η επεξεργασία σχεδιάζονται και διαχειρίζονται, τόσο ως διαδικασία όσο και ως αποτέλεσμα, για τη μεγιστοποίηση της λειτουργίας του οικοσυστήματος και της ανθρώπινης ευημερίας». (Hysa et al., 2020b)

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφική ανασκόπηση οι ορισμοί σχετικά με την ΚΟ διαφοροποιούνται. Ο πρώτος που ασχολήθηκε ήταν ο Ελβετός αρχιτέκτονας Walter R. Stahel ο οποίος στις αρχές της δεκαετίας του 1970 μετά από αύξηση των τιμών της ενέργειας και της υψηλή ανεργίας, παρατήρησε ότι χρειαζόταν περισσότερη εργασία και λιγότερους πόρους για την ανακαίνιση κτιρίων παρά για την ανέγερση νέων. Η αρχή αυτή θα μπορούσε να ισχύει για οποιοδήποτε απόθεμα ή κεφάλαιο, από κινητά τηλέφωνα μέχρι και καλλιεργήσιμη γη. Έτσι με την εναλλακτική λύση της ΚΟ θα μετατρέπονταν τα αγαθά που βρίσκονται στο τέλος της ζωής τους σε πόρους για άλλους, κλείνοντας τους βρόχους στα βιομηχανικά οικοσυστήματα και ελαχιστοποιώντας τα απόβλητα. Θα άλλαζε την οικονομική λογική γιατί αντικαθιστά την παραγωγή με την επάρκεια: επαναχρησιμοποίησε ό,τι μπορείς, ανακύκλωσε ό,τι δεν μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί, επισκεύασε ό,τι έχει χαλάσει, ανακατασκεύασε ό,τι δεν μπορεί να επισκευαστεί. Ο όρος λοιπόν απέκτησε μεγαλύτερη διάσταση και μεγαλύτερο κύρος από ερευνητικές ομάδες, μεγάλους οργανισμούς που οδήγησαν τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής να λάβουν μέτρα για το φαινόμενο της σπατάλης των πόρων.



Εικόνα 2 Οφέλη της Κυκλικής Οικονομίας (Pomoni et al., 2024)

Το Ίδρυμα Ellen MacArthur Foundation το 2013 έδωσε το ορισμό «Μια κυκλική οικονομία βασίζεται στις αρχές του σχεδιασμού των αποβλήτων και της ρύπανσης, της διατήρησης των προϊόντων και των υλικών σε χρήση και της αναγέννησης των φυσικών συστημάτων». (Ellen MacArthur Foundation, 2013) Η καθηγήτρια Nancy Bocken το 2014 έδωσε τον ορισμό, ως «Η κυκλική προσέγγιση έρχεται σε αντίθεση με το παραδοσιακό γραμμικό επιχειρηματικό μοντέλο παραγωγής προϊόντων «πάρε-φτιάξε-χρησιμοποίησε-απέριψε» και ένα βιομηχανικό σύστημα που βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στα ορυκτά καύσιμα, επειδή ο στόχος της επιχείρησης μετατοπίζεται από τη δημιουργία κερδών από την πώληση αντικειμένων, στη δημιουργία κερδών από την ροή υλικών και προϊόντων με την πάροδο του χρόνου» στον οποίο 2 χρόνια αργότερα πρόσθεσε «Επομένως, τα κυκλικά επιχειρηματικά μοντέλα μπορούν να επιτρέψουν οικονομικά βιώσιμους τρόπους για τη συνεχή επαναχρησιμοποίηση προϊόντων και υλικών, χρησιμοποιώντας ανανεώσιμες πηγές όπου είναι δυνατόν». (Bocken et al., 2016)

Ένα χρόνο αργότερα ο Martin Geissdoerfer έδωσε έναν ακόμα ορισμό όπου η ΚΟ είναι «Ένα αναγεννητικό σύστημα στο οποίο η εισροή πόρων και τα απόβλητα, οι εκπομπές και η διαρροή ενέργειας ελαχιστοποιούνται με την επιβράδυνση, το κλείσιμο και τον περιορισμό των βρόχων υλικών και ενέργειας. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με μακροχρόνιο σχεδιασμό, συντήρηση, επισκευή, επαναχρησιμοποίηση, ανακατασκευή, ανακαίνιση και ανακύκλωση» (Geissdoerfer et al., 2017) Η Patrizia Ghisellini όρισε ως «κυκλική οικονομία ως το νέο μοντέλο οικονομικής ανάπτυξης που προωθεί τη μέγιστη επαναχρησιμοποίηση/ανακύκλωση υλικών, αγαθών και εξαρτημάτων προκειμένου να μειωθεί η παραγωγή απορριμμάτων στον μεγαλύτερο δυνατό βαθμό. Στοχεύει στην καινοτομία ολόκληρης της αλυσίδας παραγωγής, κατανάλωσης, διανομής και ανάκτησης υλικών και ενέργειας σύμφωνα με το όραμα από «Cradle to Cradle» (Ghisellini et al., 2018)

Ένας από τους πιο ευρέως χρησιμοποιούμενους ορισμούς είναι αυτός που αναπτύχθηκε από τον Kirchherr , ο οποίος λέει «Μια κυκλική οικονομία περιγράφει ένα οικονομικό σύστημα που βασίζεται σε επιχειρηματικά μοντέλα που αντικαθιστούν την έννοια του «τέλους ζωής» με μείωση, εναλλακτικά επαναχρησιμοποίηση, ανακύκλωση και ανάκτηση υλικών σε διαδικασίες παραγωγής/διανομής και κατανάλωσης, λειτουργώντας έτσι σε μικρο-επίπεδο, (προϊόντα, εταιρείες, καταναλωτές), μέσο-επίπεδο (οικολογικά βιομηχανικά πάρκα) και μακρο-επίπεδο

(πόλη, περιοχή, έθνος και όχι μόνο), με στόχο την επίτευξη βιώσιμης ανάπτυξης, η οποία συνεπάγεται τη δημιουργία περιβαλλοντικής ποιότητας, οικονομικής ευημερίας και κοινωνικής ισότητας. όφελος των σημερινών και των μελλοντικών γενεών» (Figge et al., 2023)

Παρά τη διαφοροποίηση των ορισμών ο στόχος παραμένει ίδιος για όλους ωστόσο, κάθε τομέας ή πεδίο έχει τα δικά του χαρακτηριστικά που προσφέρουν ιδιαίτερες ευκαιρίες για κυκλικότητα. Για να γίνει πιο σαφής και εφαρμόσιμη η έννοια της ΚΟ, έχουν παρουσιαστεί αρκετές προσπάθειες με στόχο την εφαρμογή πιο κυκλικών σχεδίων. Αυτά περιλαμβάνουν κανόνες, διαδικασίες και πλαίσια σχεδίασης. Σε γενικές γραμμές λοιπόν η καθεμία από αυτές τις πρωτοβουλίες προσεγγίζει την εφαρμογή της κυκλικότητας από την κορυφή προς τα κάτω δηλαδή από την ιδέα της ΚΟ σε ένα πρακτικό στοιχείο. (Coenen et al., 2020)

Η Κίνα ήταν η πρώτη χώρα που εφάρμοσε τις αρχές ΚΟ στην εθνική πολιτική (με τον Νόμο για την Προώθηση της Κυκλικής Οικονομίας του 2008) και κυκλοφόρησε δείκτες εστιασμένους στη ΚΟ. Στην Ευρώπη, η ιδέα της ΚΟ έχει προωθηθεί ως μια προσέγγιση για την ταυτόχρονη βελτίωση τόσο των περιβαλλοντικών όσο και των οικονομικών επιδόσεων της βιομηχανικής κοινωνίας. Έχει κερδίσει σημαντική έλξη και ενδιαφέρον από τον ακαδημαϊκό κόσμο, τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων και τον επιχειρηματικό τομέα. (Harris et al., 2021)

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή το 2015 ενέκρινε το σχέδιο δράσης και καθόρισε μια φιλόδοξη ατζέντα για τη μετατροπή της οικονομίας της ΕΕ σε κυκλική, όπου η αξία των προϊόντων και των υλικών διατηρείται ως όσο το δυνατόν περισσότερο, αποφέροντας έτσι σημαντικά οικονομικά οφέλη μαζί με κοινωνικά και περιβαλλοντικά κίνητρα. Στην εμφάνιση και την εφαρμογή της ΚΟ, η ΕΕ υπήρξε πρωτοπόρος, καθώς τα κράτη μέλη της έχουν ξεκινήσει συλλογικά μια σειρά πολιτικών και πλαισίων που προάγουν την ΚΟ σε διάφορους κλάδους, επιχειρήσεις και υπηρεσίες. Η υφιστάμενη έρευνα για την ΚΟ στην ΕΕ παρουσιάζει μια ποικιλία μελετών που απεικονίζουν την εφαρμογή της ΚΟ σε διάφορους τομείς και κλάδους, και υποστηρίζεται επαρκώς από περιπτωσιολογικές μελέτες προϊόντων και υπηρεσιών από βιομηχανίες ή/και επιχειρήσεις. (Mhatre et al., 2021)

3.1.2 Βασικές αρχές Κυκλικής Οικονομίας

Η πιο σημαντική αρχή που εφαρμόζεται στην ευρωπαϊκή νομοθεσία για τα απόβλητα είναι η ιεραρχία των αποβλήτων που καθορίζει μια σειρά προτεραιότητας από την πρόληψη, την προετοιμασία για επαναχρησιμοποίηση, την ανακύκλωση και την ανάκτηση ενέργειας έως τις δραστηριότητες διάθεσης, όπως η υγειονομική ταφή. Μέσω του σχεδίου δράσης του οποίου οι στόχοι του 2030 για την ανακύκλωση (65% για τα αστικά στερεά απόβλητα, 70% για απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων, 75% για απορρίμματα συσκευασίας), περιορισμοί υγειονομικής ταφής (μείωση ΑΣΑ σε 10%), προώθηση της βιομηχανικής συμβίωσης και του οικολογικού σχεδιασμού. Ακόμη και αν η πρόληψη της δημιουργίας αποβλήτων στην πηγή έχει την υψηλότερη προτεραιότητα, οι ποσοτικοί στόχοι πρόληψης της δημιουργίας αποβλήτων (εκτός από τα απόβλητα τροφίμων) εξακολουθούν να λείπουν στην ευρωπαϊκή νομοθεσία. (Zeller et al., 2019)

Προκειμένου να αυξηθεί η αποτελεσματικότητα της χρήσης των πόρων, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή τον Μάρτιο του 2020 καθόρισε εννέα αρχές (9R) της κυκλικής οικονομίας. Οι αρχές αυτές αναφέρονται συχνά ως «Η πυραμίδα των 9R's» δείχνει την απώλεια της εγγενούς αξίας ενός προϊόντος σύμφωνα με τις αρχές που ισχύουν σε κάθε περίπτωση. (Υπουργείο Ενέργειας, Εμπορίου και Βιομηχανίας, 2023)

Τα «9R» είναι ένα κυκλικό οικονομικό πλαίσιο που εξετάζει πώς τα υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και να επαναχρησιμοποιηθούν στην υψηλότερη αξία τους, ελαχιστοποιώντας τα απόβλητα και την περιβαλλοντική καταστροφή. Κάθε "R" αντιπροσωπεύει μια διαφορετική δράση ή προσέγγιση που μπορεί να συμβάλει σε μια πιο κυκλική οικονομία. Το πλαίσιο 9R παρέχει μια πρακτική προσέγγιση για την εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας εστιάζοντας στην επανεξέταση των προτύπων κατανάλωσης, στην ελαχιστοποίηση της παραγωγής αποβλήτων και στη μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας των πόρων. Εφαρμόζοντας αυτές τις στρατηγικές, μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα πιο βιώσιμο και κυκλικό οικονομικό σύστημα που μειώνει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και προάγει τη μακροπρόθεσμη οικονομική και περιβαλλοντική ανθεκτικότητα. (European Commission, 2020)



Εικόνα 3 9R's της Κυκλικής Οικονομίας (European Commission, 2020)

Σύμφωνα με τους Kusumo et al. οι οποίοι έκαναν μια ανασκόπηση της βιβλιογραφίας και συνόψισαν τα βασικά μέρη της ΚΟ, τόνισαν τη σημαντικότητα του βιώσιμου σχεδιασμού. Η χρήση του βιώσιμου σχεδιασμού σημαίνει ότι οι επιχειρήσεις εξετάζουν ολόκληρο τον κύκλο ζωής του προϊόντος, συμπεριλαμβανομένης της φάσης σχεδιασμού, κατά την επιλογή των απαραίτητων πρώτων υλών και λειτουργιών. Επιπλέον, προσπαθούν για το μικρότερο δυνατό οικονομικό αποτύπωμα.

Οι βασικές προσεγγίσεις αφορούν:

- Σχεδιασμός ανθεκτικών προϊόντων, αντικείμενα που θα χρησιμοποιούνται για μεγάλο χρονικό διάστημα ή και δεκαετίες λόγω του προσδιορισμού υψηλής ποιότητας, σκληρών υλικών. Για να είναι πετυχημένα τα προϊόντα αυτά, απαιτούν μια εντελώς διαφορετική διάταξη τοποθέτησης και προώθησης.
- Αρθρωτός σχεδιασμός, το προϊόν πρέπει να είναι κατασκευασμένο έτσι ώστε να επιτρέπει την εύκολη αφαίρεση και αντικατάσταση εξαρτημάτων για να παρατείνει τη διάρκεια ζωής του προϊόντος.
- Βιώσιμα υλικά, είναι τα υλικά υψηλής βιωσιμότητας που μπορούν να κάνουν τον καταναλωτή να χρειάζεται να αγοράζει μόνο ένα προϊόν κάθε δέκα χρόνια ή είναι τα υλικά τα οποία είναι φιλικά προς το περιβάλλον δηλαδή είναι εύκολα ανακυκλώσιμα και βιοαποδομήσιμα.

Οι συγγραφείς επίσης έδωσαν μια ερμηνεία για την επαναχρησιμοποίηση η οποία αφορά ένα προϊόν/αντικείμενο το οποίο απορρίπτεται από ένα άτομο/έργο με σκοπό να χρησιμοποιηθεί εκ νέου με το ίδιο τρόπο ή με παρόμοιο με τον αρχικό τους σκοπό. Η πραγματοποίηση της επαναχρησιμοποίησης εξαρτάται και από την αγορά την οποία απευθύνεται.(Kusumo et al., 2022)

3.1.3 Κατασκευαστικός κλάδος

Σύμφωνα με τους Roberts et al. τα κτίρια κατασκευάζονται συνήθως για να ικανοποιήσουν μια συγκεκριμένη ανάγκη και είτε κατεδαφίζονται είτε ανακαινίζονται εκτενώς όταν καθίστανται περιττά. Αυτή η παραδοσιακή άποψη των κτιρίων ως εμπορευμάτων μιας χρήσης ακολουθεί το προηγούμενο «πάρε-χρησιμοποίησε-απέριψε» μιας γραμμικής οικονομίας. Τα κτίρια έχουν περιβαλλοντικές επιπτώσεις καθ' όλη τη διάρκεια ζωής τους. Ιστορικά, η λειτουργική χρήση των κτιρίων θεωρήθηκε ότι είναι ο μεγαλύτερος παραγωγός περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Για την αντιμετώπιση της αναποτελεσματικής χρήσης υλικών και την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των κτιρίων, έχουν προταθεί στρατηγικές μείωσης για διάφορες πτυχές του σχεδιασμού, της κατασκευής, της χρήσης και της διάθεσης ενός. (Roberts et al., 2023)

Δεδομένου λοιπόν ότι ο κλάδος δεν μπορεί να συνεχίσει να ασκεί την πρακτική του εάν εξαντληθούν οι πόροι από τους οποίους εξαρτάται, η διαχείριση των αποβλήτων κατασκευών και κατεδαφίσεων θα πρέπει να εφαρμοστεί με αποτελεσματικό τρόπο σύμφωνα με τους Kabirifar et al. Παρά την εξέταση πολλών καλά ανεπτυγμένων στρατηγικών για τη διαχείριση των αποβλήτων κατασκευών και κατεδαφίσεων, τα αποτελέσματα της εφαρμογής αυτών των στρατηγικών απέχουν πολύ από το βέλτιστο. Ο κύριος λόγος αυτής της αναποτελεσματικότητας οφείλεται στην ανεπαρκή κατανόηση των κύριων παραγόντων, οι οποίοι διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο στη διαχείριση αποβλήτων κατασκευών και κατεδαφίσεων. (Kabirifar et al., 2020)

Σύμφωνα με τις ιεραρχίες των απορριμμάτων, η επαναχρησιμοποίηση προτιμάται από την ανακύκλωση. Το παραπάνω γεγονός οφείλεται κυρίως στη σημαντικά χαμηλότερη επεξεργασία και επανεπεξεργασία που απαιτείται για την επαναχρησιμοποίηση αυτών των συστατικών από την ανακύκλωσή τους. (Rakhshan et al., 2021)

Διάφοροι τύποι οικοδομικών υλικών μπορούν να ανακτηθούν από τοποθεσίες κατασκευής, ανακαίνισης και κατεδάφισης και στη συνέχεια να πωληθούν, να αποθηκευτούν για μελλοντική χρήση ή να επαναχρησιμοποιηθούν στο τρέχον έργο. Με βάση τη μελέτη των Vallini et al. η οποία υπογραμμίζει ότι στην Ευρωπαϊκή Ένωση, τα απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων είναι ένα από τα πιο βαριά και

ογκώδη ρεύματα αποβλήτων που παράγονται , όπως συμβαίνει επίσης στην Κίνα και τις Ηνωμένες Πολιτείες . Αυτό συνεπάγεται υψηλή διαθεσιμότητα υλικού που μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί ως προσροφητικό υλικό σε αντιδραστήρες για την απομάκρυνση των ρύπων που υπάρχουν στα λύματα πολλών βιομηχανιών. Η δυνατότητα προσρόφησης ιόντων και άλλων ρύπων χρησιμοποιώντας υλικά κατεδάφισης ταξινομούνται σε τέσσερις κύριους τύπους (θρυμματισμένο σκυρόδεμα, τούβλα, μείγμα και των δύο και αδρανή με ρύπους ως πλαστικά).(Vallini et al., 2023)

Σύμφωνα με τη μελέτη των Benjamin Sanchez και Carl Haas ο χαρακτήρας της επαναχρησιμοποίησης κτιρίων είναι σε μεγάλο βαθμό ευθυγραμμισμένος με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας . Αυτό συμβαίνει επειδή: ένα τεράστιο ποσοστό όλων των υλικών που έχουν εξαχθεί ποτέ στην ανθρώπινη ιστορία βρίσκονται στο σημερινό δομημένο περιβάλλον, ο ρυθμός ανανέωσης των κτιρίων θεωρείται σχετικά χαμηλός, η τιμή της εξόρυξης υλικών αυξάνεται όπως και οι αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις λόγω των φυσικών περιορισμών των πιο αραιωμένων και απομακρυσμένων αποθεμάτων μεταλλευμάτων και άλλων πόρων. Για τα υπάρχοντα κτίρια, η πλήρης αποσυναρμολόγηση κτιρίου συνήθως δεν είναι δυνατή, καθώς δεν έχουν σχεδιαστεί για αποσυναρμολόγηση. Ωστόσο, η διαδικασία θα μπορούσε να περιοριστεί στον σχεδιασμό για την αποσυναρμολόγηση δομικών στοιχείων που έχουν αξία για την επαναχρησιμοποίηση του κτιρίου.

Ο σχεδιασμός για αποσυναρμολόγηση διαδραματίζει βασικό ρόλο στη διαδικασία αυτή, όπου οι ακολουθίες σχεδιασμού αποσυναρμολόγησης, καθώς και οι μέθοδοι αποσυναρμολόγησης για την ανάκτηση των εξαρτημάτων, πρέπει να εκτελούνται με αποτελεσματικό τρόπο. Οι στόχοι είναι να μειωθεί το κόστος του κτιρίου και να αυξηθεί ο χρόνος κύκλου ζωής των εξαρτημάτων του κτιρίου. Εάν ο σχεδιασμός για αποσυναρμολόγηση είναι πολύ περίπλοκος ή χρονοβόρος, το σχετικό οικονομικό και περιβαλλοντικό κόστος μπορεί να είναι υψηλότερο από την εγκατάσταση νέων εξαρτημάτων. (Sanchez & Haas, 2018)

3.1.4 Κλωστοϋφαντουργικός κλάδος

Άλλος ένας κλάδος που διαδραματίζει βασικό ρόλο και όσο αφορά τα απορρίμματα αλλά και τον τρόπο μείωσης τους είναι ο κλάδος της κλωστοϋφαντουργίας. Η διαδικασία παραγωγής κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων δημιουργεί υψηλή κατανάλωση ενέργειας και νερού, τοξική χημική

ρύπανση (ειδικά για το νερό), υποβάθμιση του εδάφους και εκπομπές αερίων θερμοκηπίου, παράγοντας υψηλό αποτύπωμα άνθρακα. Επιπλέον, μόνο το 27% των ρούχων που παράγονται ανακυκλώνονται ή επαναχρησιμοποιούνται. Με αυτόν τον τρόπο, μεγάλες ποσότητες προϊόντων καταλήγουν ως σκουπίδια σε χωματερές, αποτεφρώνονται ή εγκαταλείπονται σε απομακρυσμένα μέρη. (Battesini Teixeira et al., 2023)

Ωστόσο, η βιομηχανία της μόδας έχει καταβάλει σημαντικές προσπάθειες για την εφαρμογή κυκλικών στρατηγικών. Υπάρχουν τρεις στρατηγικές που προτείνονται από τους που βοηθούν στην εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας στη βιομηχανία της μόδας, ο κυκλικός σχεδιασμός (σχεδιασμός για μακροζωία, προσαρμογή, αποσυναρμολόγηση, ανακύκλωση και αποσύνθεση), η παράταση ζωής προϊόντος (επισκευή, μίσθωση, ανταλλαγή και ενοικίαση) και η κυκλικότητα στο τέλος του κύκλου ζωής (επαναχρησιμοποίηση, μεταπώληση, ανακύκλωση και ανακατασκευή).

Οι στρατηγικές αυτές βοηθούν στην αποκατάσταση και ανάκτηση πόρων, όπως η επισκευή, η επαναχρησιμοποίηση, η ανακατασκευή και η ανακύκλωση, ώστε να συλληφθεί και να ανακτηθεί η αξία τους. Η επισκευή είναι μια υπηρεσία που παρέχεται για ελάχιστη φθορά για την ανάκτηση των υφαντικών ινών, η επαναχρησιμοποίηση αναφέρεται στη μόδα από δεύτερο χέρι δηλαδή είναι η εξάλειψη των απορριμμάτων μέσω του βέλτιστου σχεδιασμού προϊόντων, υλικών και επιχειρηματικών μοντέλων και συστημάτων που επιτρέπουν στα προϊόντα να χρησιμοποιούνται για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και να παρατείνουν τον κύκλο ζωής του προϊόντος στην αρχική του μορφή ή με μερικές βελτιώσεις ή αλλαγές χωρίς την ανάγκη παραγωγής. Η ανακατασκευή είναι η αποκατάσταση και η αποσυναρμολόγηση των υλικών πίσω στο επίπεδο των συστατικών τους, έτσι ώστε τα νέα προϊόντα να ξαναχτιστούν, και τέλος, η ανακύκλωση είναι όπου τα προϊόντα ανακτώνται στο επίπεδο υλικού τους για να μετατραπούν σε νέα προϊόντα. Ωστόσο, από αυτές τις στρατηγικές κυκλικότητας, η ανακύκλωση έχει τη χαμηλότερη αξία λόγω του αυξημένου κόστους και της απώλειας ενέργειας και εργασίας που σχετίζεται με την αναπαραγωγή ολόκληρης της διαδικασίας παραγωγής για την παραγωγή ενός νέου προϊόντος. (Abdelmeguid et al., 2022)

3.1.5 Νερό και Κυκλική Οικονομία

Μια μελέτη των Neto et al. η οποία ασχολήθηκε με τον εντοπισμό ερευνητικών εργασιών που σχετίζονται με την εφαρμογή πρακτικών Καθαρότερης Παραγωγής, όπως η μείωση της κατανάλωσης νερού και η επαναχρησιμοποίηση του νερού στην βιομηχανία μόδας. Η εφαρμογή των καθαρότερων πρακτικών παραγωγής από τις εταιρείες στοχεύει στην αποφυγή της κατανάλωσης μεγάλων όγκων πόρων και της εκπομπής ρύπων που σχετίζονται με διαδικασίες παραγωγής που δεν είναι πραγματικά αποτελεσματικές. Η υιοθέτηση αυτών των πρακτικών επιτρέπει την επαναχρησιμοποίηση των πόρων που βασίζονται στην έννοια της ΚΟ. Η ένταση της χρήσης του νερού εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένου του είδους των προϊόντων και των διαδικασιών, των τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή, καθώς και των πρακτικών και της ωριμότητας της λειτουργίας διαχείρισης.

Οι βιομηχανίες κλωστοϋφαντουργίας έχουν υψηλό ποσοστό χρήσης νερού ανά μονάδα υφαντικής ύλης που υποβάλλεται σε επεξεργασία. Ως εκ τούτου, οι εκπομπές υγρών λυμάτων και τα επίπεδα ρύπανσης είναι πολύ υψηλά. Επιπλέον, η πιθανότητα μόλυνσης του νερού είναι πολύ υψηλή λόγω της χρήσης πολλών τοξικών υλικών στις διαδικασίες βαφής και φινιρίσματος. (Oliveira Neto et al., 2021)

Έτσι η διαχείριση των υδάτινων πόρων σε πολλές άνυδρες και ημίξηρες περιοχές του πλανήτη ήταν μια μεγάλη πρόκληση για μεγάλο χρονικό διάστημα λόγω των προβλημάτων λειψυδρίας. Σε πολλές περιοχές με λειψυδρία, η εντατική βιομηχανική και αστική ανάπτυξη, μαζί με τη μεγάλη πληθυσμιακή αύξηση, ιδίως στις πόλεις, έχει προκαλέσει σοβαρές πιέσεις στους τοπικούς υδάτινους πόρους. (Garcia & Pargament, 2015a) Το νερό για άρδευση και παραγωγή τροφίμων αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες πιέσεις στους υδάτινους πόρους, με τη γεωργία να αντιπροσωπεύει πάνω από το 70 τοις εκατό των παγκόσμιων απολήψεων γλυκού νερού και έως και το 90 τοις εκατό σε ορισμένες ταχέως αναπτυσσόμενες οικονομίες.

Οι προβλέψεις για την παραγωγή βιοκαυσίμων δείχνουν ότι εάν έως το 2030, το 5% των οδικών μεταφορών τροφοδοτείται από βιοκαύσιμα (ο στόχος της ΕΕ ήταν 10 τοις εκατό έως το 2020), αυτό θα ανέρχεται σε τουλάχιστον 20 τοις εκατό του νερού που χρησιμοποιείται για τη γεωργία παγκοσμίως. Η βιομηχανία είναι επίσης

σημαντικός χρήστης νερού, καθώς αντιπροσωπεύει μεταξύ 10% (Ασία) και 57% (Ευρώπη) της συνολικής κατανάλωσης νερού. (Voulvoulis, 2018a)

Προκειμένου να αντιμετωπιστεί η λειψυδρία, μια από τις πιο ελπιδοφόρες πρακτικές διαχείρισης της προσφοράς που πρέπει να διερευνηθεί είναι η επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων. (Garcia & Pargament, 2015b)

Η ικανότητα επαναχρησιμοποίησης του νερού, ανεξάρτητα από το αν η πρόθεση είναι η αύξηση των αποθεμάτων νερού ή η διαχείριση των θρεπτικών ουσιών στα επεξεργασμένα λύματα (επίσης παράγοντας που οδηγεί στην επαναχρησιμοποίηση του νερού), έχει θετικά οφέλη που είναι επίσης τα βασικά κίνητρα για την εφαρμογή προγραμμάτων επαναχρησιμοποίησης. Αυτά τα οφέλη περιλαμβάνουν τη βελτίωση της γεωργικής παραγωγής, μειωμένη κατανάλωση ενέργειας που σχετίζεται με την παραγωγή, την επεξεργασία και τη διανομή του νερού και σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη, όπως μειωμένα φορτία θρεπτικών συστατικών στα ύδατα υποδοχής λόγω επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων λυμάτων.

Παρόλο που η επαναχρησιμοποίηση του ανακυκλωμένου νερού εφαρμόζεται επί του παρόντος σε πολλές χώρες, οι δυνατότητές του δεν έχουν αξιοποιηθεί ακόμη σε πολλούς τομείς και το ποσοστό επαναχρησιμοποίησης νερού στη συνολική παραγωγή λυμάτων είναι ακόμη μικρό. Ωστόσο, αυτό αλλάζει η παγκόσμια ικανότητα επαναχρησιμοποίησης νερού εκτιμήθηκε ότι αυξήθηκε από 33,7 GL/ημέρα το 2010 σε 54,5 GL/ημέρα το 2015, με τη μεγαλύτερη ανάπτυξη στην Κίνα, τις Ηνωμένες Πολιτείες, τη Μέση Ανατολή, τη Βόρεια Αφρική, τη Δυτική Ευρώπη και τη Νότια Ασία. Με μια μετάβαση σε μια Κυκλική Οικονομία αυτή η άνοδος θα επιταχυνθεί περαιτέρω. (Voulvoulis, 2018b)

Η επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων σύμφωνα με τους Garcia και Pargament χωρίζεται στην άμεση και στην έμμεση. Τα συστήματα έμμεσης επαναχρησιμοποίησης λυμάτων είναι ο καθαρισμός ή η ανάκτηση νερού μετά από αύξηση του φυσικού υδατικού συστήματος επιφανειακών ή υπόγειων υδάτων, αν και μερικές φορές το νερό αντλείται απευθείας από το υδάτινο σώμα για να χρησιμοποιηθεί. Η έμμεση επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων επικεντρώνεται στη βελτίωση της ποιότητας του νερού στο υδατικό σώμα, στην πρόληψη της εξάντλησης και επίσης στην επίτευξη μεγαλύτερου χρόνου κατακράτησης και ενός φυσικού καθαρισμού των λυμάτων.

Τα συστήματα άμεσης επαναχρησιμοποίησης λυμάτων συνίστανται στην άμεση χρήση των ανακτηθέντων λυμάτων για αστικούς ή γεωργικούς σκοπούς. Τα ακατέργαστα ή ελάχιστα επεξεργασμένα λύματα μπορούν επίσης να διατεθούν για άρδευση καλλιεργειών ακολουθώντας ορισμένες τεχνικές οδηγίες για τη μείωση των κινδύνων για την υγεία και το περιβάλλον. Τα οφέλη από την άμεση επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων αναφέρονται τακτικά στη βιβλιογραφία επαναχρησιμοποίησης. Το πιο σημαντικό είναι η διάθεση μιας νέας πηγής παροχής νερού. Επιπλέον, αυτός ο νέος πόρος εγγυάται υψηλό επίπεδο αξιοπιστίας εφοδιασμού. (Garcia & Pargament, 2015c)

Σύμφωνα με τους Radini et al. η περιορισμένη χρήση του ανακτημένου νερού σχετίζεται συχνά με τους κινδύνους που συνδέονται με τους ρύπους που περιέχονται στα λύματα. Αυτό είναι πιο σημαντικό στις αναπτυσσόμενες χώρες, όπου τα λύματα υποβάλλονται σε μερική επεξεργασία ή ακόμη και σε καθόλου επεξεργασία. Επιπλέον, πολλοί τελικοί χρήστες και το ευρύ κοινό θεωρούν συνήθως τα λύματα ως απόβλητα παρά ως πηγή για την ανάκτηση νερού. Για να αλλάξει αυτό το παράδειγμα, η διασφάλιση της ασφάλειας του περιβάλλοντος και της δημόσιας υγείας κατά τη χρήση του ανακτημένου νερού είναι απαραίτητη.

Αυτοί είναι οι κύριοι στόχοι των Σχεδίων Διαχείρισης Κινδύνου Επαναχρησιμοποίησης Νερού, τα οποία είναι υποχρεωτικά για όλες τις εγκαταστάσεις ανακυκλωμένου νερού που εφαρμόζονται στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) μετά την εφαρμογή του Κανονισμού 2020/741 για τις ελάχιστες απαιτήσεις για την επαναχρησιμοποίηση νερού στις 26 Ιουνίου 2023. Εκτός από αυτό, η εφαρμογή ψηφιακών τεχνολογιών εμφανίζεται ως βασικός παράγοντας για τη βελτίωση της τρέχουσας διαχείρισης του νερού και τη διασφάλιση της ασφαλούς επαναχρησιμοποίησης του επεξεργασμένου νερού, καθώς μπορούν να βοηθήσουν στη βελτίωση των τρεχουσών διαδικασιών, διαχείρισης και πολιτικών επαναχρησιμοποίησης του νερού. (Radini et al., 2023)

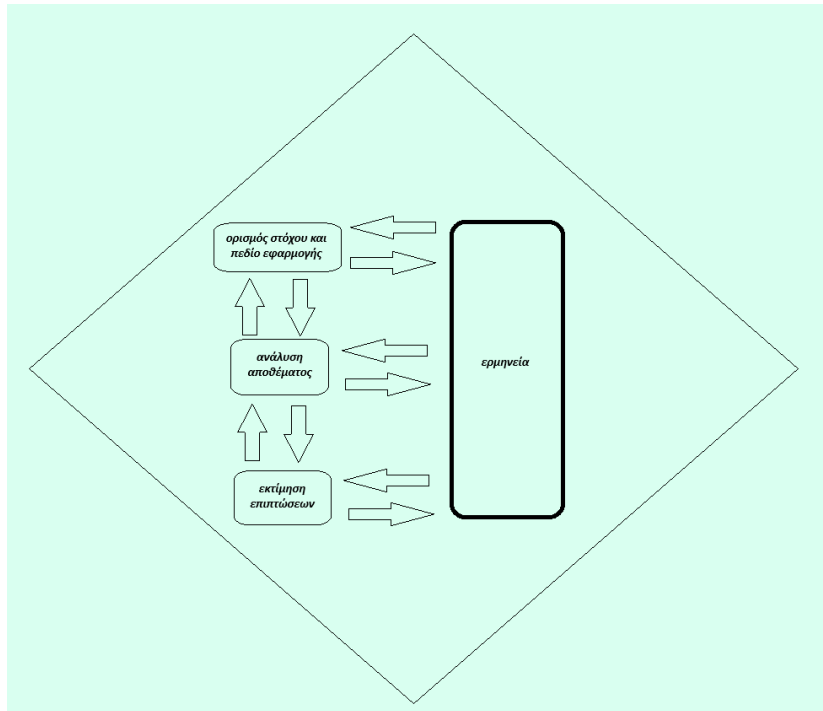
3.1.6 Life Cycle Assessment

Για να μετρηθεί η έκταση της προόδου στην εφαρμογή του μοντέλου της κυκλικής οικονομίας, έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές και μέσα από την ακαδημαϊκή κοινότητα. Αυτά περιλαμβάνουν τη θέσπιση βασικών δεικτών απόδοσης, την εφαρμογή της ψηφιοποίησης για παράδειγμα, Life Cycle Assessment (LCA), τη χρήση

της προσέγγισης των μεγάλων δεδομένων και άλλες σχετικές μεθοδολογίες. Ως εκ τούτου, χωρίς την ποσοτικοποίηση της ροής πληροφοριών των δραστηριοτήτων της κυκλικής οικονομίας, η μετάβαση από τις γραμμικές σε κυκλικές αλυσίδες εφοδιασμού και επιχειρηματικά μοντέλα δεν θα αποδώσουν λόγω έλλειψης μετρήσιμης απόδειξης της κυκλικότητας. Αυτό συμβαίνει γιατί σύμφωνα με τους Paramichael et al. , χωρίς ποσοτικοποίηση και μετρήσιμα δεδομένα, η προσπάθεια κάποιου είναι να « μετρήσει κάτι που δεν υπάρχει ». (Paramichael et al., 2023)

Η τεχνική Αξιολόγησης Κύκλου Ζωής (LCA) αναγνωρίζεται ευρέως ως κύρια προσέγγιση για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της χρήσης πόρων, της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, της ρύπανσης, των λυμάτων και της παραγωγής στερεών αποβλήτων σε όλη τη διάρκεια ζωής ενός προϊόντος. (Gaurav et al., 2021) Σύμφωνα με τους Moutik et al. «η αξιολόγηση του κύκλου ζωής (LCA) ορίζεται ως η συλλογή και αξιολόγηση των εισροών, εκροών και των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός συστήματος προϊόντος καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του, τα τελευταία είναι διαδοχικά και αλληλένδετα στάδια, από την απόκτηση πρώτων υλών ή την παραγωγή από φυσικούς πόρους έως την τελική διάθεση». (Moutik et al., 2023)

Πολλές εταιρείες θεώρησαν πλεονεκτικό να διερευνήσουν τρόπους για να προχωρήσουν πέρα από τη συμμόρφωση χρησιμοποιώντας στρατηγικές πρόληψης της ρύπανσης και δημιούργησαν συστήματα περιβαλλοντικής διαχείρισης για τη βελτίωση των περιβαλλοντικών τους επιδόσεων. Η LCA είναι μια προσέγγιση «cradle-to-grave» για την αξιολόγηση των βιομηχανικών συστημάτων. Το «cradle-to-grave» ξεκινά με τη συλλογή πρώτων υλών από τη γη για τη δημιουργία του προϊόντος και τελειώνει στο σημείο που όλα τα υλικά επιστρέφονται στη γη. Η LCA αξιολογεί όλα τα στάδια της ζωής ενός προϊόντος από την άποψη ότι είναι αλληλεξαρτώμενα, που σημαίνει ότι η μία λειτουργία οδηγεί στην επόμενη. Ακόμα επιτρέπει την εκτίμηση των σωρευτικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκύπτουν από όλα τα στάδια του κύκλου ζωής του προϊόντος, συχνά συμπεριλαμβανομένων των επιπτώσεων που δεν λαμβάνονται υπόψη σε πιο παραδοσιακές αναλύσεις (π.χ. εξόρυξη πρώτης ύλης, μεταφορά υλικού, τελική απόρριψη προϊόντος κ.λπ.). Επίσης παρέχει μια ολοκληρωμένη άποψη των περιβαλλοντικών πτυχών του προϊόντος ή της διαδικασίας και μια πιο ακριβή εικόνα των πραγματικών περιβαλλοντικών συμβιβασμών στην επιλογή προϊόντος και διαδικασίας. (Sharma, 2017)



Εικόνα 4 Δομή LCA (Sharma, 2017)

Η μεθοδολογία συνήθως περιγράφεται σε τέσσερα διαφορετικά βήματα (όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4):

- Ορισμός στόχου και εφαρμογής: Αυτό το βήμα συνίσταται στη χάραξη των ορίων του συστήματος που μελετήθηκε για να διασφαλιστεί ότι κανένα σχετικό μέρος δεν παραλείπεται.

- Ανάλυση αποθέματος: Συχνά βασίζεται σε ισοζύγιο μάζας και ενέργειας, αυτό το βήμα συγκεντρώνει και ποσοτικοποιεί τις εισροές (πρώτες ύλες και ενέργεια) και εκροές (απόβλητα και άλλες εκπομπές) σε σχέση με το σύστημα καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του.

- Εκτίμηση επιπτώσεων: Αυτό το βήμα συνίσταται στη συγκέντρωση και τον προσδιορισμό των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων ποσοτικοποιήθηκε στην ανάλυση απογραφής, σε κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων όπως η κλιματική αλλαγή, η καταστροφή του όζοντος στη στρατόσφαιρα, η δημιουργία του τροποσφαιρικού όζοντος (νέφος), ο ευτροφισμός, η οξίνιση, το άγχος στην ανθρώπινη υγεία και τα οικοσυστήματα, την εξάντληση των πόρων, τη χρήση νερού, τη χρήση γης, τον θόρυβο και άλλα. Η αξιολόγηση επιπτώσεων είναι ένα από τα πιο δύσκολα βήματα της LCA, που συζητείται σε μεγάλο βαθμό στη βιβλιογραφία και υπονοεί πολλές ασυνέπειες

μεταξύ των επαγγελματιών, και γι' αυτό έχουν αναπτυχθεί διαφορετικές μεθοδολογίες για τον κύκλο ζωής εκτίμηση επιπτώσεων (LCIA) την τελευταία δεκαετία.

- Ερμηνεία: Αυτό το τελευταίο μέρος επιτρέπει την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τις περιβαλλοντικές ζημίες που δημιουργούνται από το σύστημα, χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα που παρέχονται από το βήμα αξιολόγησης επιπτώσεων. Η μεθοδολογία και οι περιορισμοί της LCA έχουν περιγράψει και βελτιωθεί ευρέως τις τελευταίες τρεις δεκαετίες και καλύπτονται σε πολλά άρθρα. (Jacquemin et al., 2023)

Οι κυβερνήσεις σε όλο τον κόσμο ενθαρρύνουν τη χρήση της LCA. Όλο και περισσότερο γίνεται βασικό στοιχείο στην περιβαλλοντική πολιτική ή σε εθελοντικές δράσεις στην Ευρωπαϊκή Ένωση, τις ΗΠΑ, την Ιαπωνία, την Κορέα, τον Καναδά, την Αυστραλία και τις επερχόμενες οικονομίες που αναπτύσσονται όπως η Ινδία και πρόσφατα επίσης η Κίνα. (Guinée et al., 2011)

Η αξιολόγηση περιλαμβάνει ολόκληρο τον κύκλο ζωής του προϊόντος από εξόρυξη πρώτων υλών, κατασκευή, μεταφορά και διανομή, χρήση/επαναχρησιμοποίηση/συντήρηση, ανακύκλωση μέχρι την τελική διάθεση. Επιπλέον, το ISO 14040 όρισε επίσης την LCA ως συστηματική προσέγγιση για την αξιολόγηση των εισροών και εκροών υλικών και ενέργειας που σχετίζονται με μια διαδικασία ή προϊόν προς ανάλυση τις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκαλούνται σε όλο τον κύκλο ζωής του. (Amahmoud et al., 2022)

Έχουν επιλεγεί διάφορες μεθοδολογίες βασισμένες σε δείκτες για να αξιολογηθεί η «ικανότητά» τους να μετρήσουν την υιοθέτηση του παραδείγματος της κυκλικής οικονομίας. Έχει αναπτυχθεί μια βάση δεδομένων που αφορά τους δείκτες και χρησιμεύει ως ένα αρχικό βήμα για τον προσδιορισμό των κατάλληλων δεικτών παρέχοντας πληροφορίες σχετικά με τις διάφορες πτυχές που πρέπει να καλύπτονται από τις αξιολογήσεις κυκλικότητας των συστημάτων (π.χ., οικονομικά, περιβαλλοντικά, φυσικά), τους διαφορετικούς πόρους, και τις ιδιαιτερότητες των τομέων. (Elia et al., 2017)

4^ο Κεφάλαιο

4.1 Ποσοτικοί Δείκτες

4.1.1 Ορισμός Δείκτη

Καθώς η έννοια της ΚΟ γίνεται αναπόσπαστο στοιχείο της βιώσιμης επιχειρηματικής πρακτικής, έχουν αναπτυχθεί ειδικά σχέδια δράσης (π.χ. για να καταστεί δυνατή αυτή η μετάβαση. Η πρόοδος των δράσεων ΚΟ υποστηρίζεται και μετράτε από δείκτες ΚΟ, οι οποίοι πρέπει να είναι περιεκτικοί και να ανταποκρίνονται στις ανάγκες των συμμετεχόντων στη ΚΟ. (Nika et al., 2021)

Στην πραγματικότητα, όπως συμβαίνει και με τον ορισμό της κυκλικής οικονομίας έτσι και ο όρος «δείκτης» έχει οριστεί με διάφορους τρόπους στη βιβλιογραφία. Σύμφωνα με τους Saidani et al. ένας δείκτης ορίζεται ως «ένας ποσοτικός ή ποιοτικός παράγοντας ή μεταβλητή που παρέχει ένα απλό και αξιόπιστο μέσο για τη μέτρηση του επιτεύγματος, για την αντανάκλαση των αλλαγών που συνδέονται με μια παρέμβαση ή για την αξιολόγηση της απόδοσης ενός αναπτυξιακού παράγοντα». (Saidani et al., 2019)

Οι δείκτες μπορούν να θεωρηθούν ως αναλυτικά εργαλεία που επικεντρώνονται στη μέτρηση του βαθμού συσχέτισης ενός συστήματος (ή μέρους ενός) με πρακτικές και στρατηγικές που εφαρμόζονται για την περαιτέρω ανάπτυξη της ΚΟ. Υπό αυτή την έννοια, υψηλότερη κυκλικότητα σημαίνει ότι ένα συγκεκριμένο στοιχείο ή σύστημα είναι πιο κοντά στην επίτευξη των στόχων που τίθενται από τα καθοδηγητικά πρότυπα της ΚΟ. (de Oliveira et al., 2021)

Σύμφωνα με τους Cayzer et al. οι δείκτες έχουν την «ικανότητα να συνοψίζουν, να εστιάζουν και να συμπυκνώνουν την τεράστια πολυπλοκότητα του δυναμικού μας περιβάλλοντος σε μια διαχειρίσιμη ποσότητα ουσιαστικών πληροφοριών» αλλά και να χρησιμοποιούνται ως «μέσα για τη μέτρηση της αλλαγής», ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διαχείριση της μετάβασης στη ΚΟ. (Cayzer et al., 2017)

Το πλαίσιο παρακολούθησης της ΕΕ για την κυκλική οικονομία, που κυκλοφόρησε το 2018 περιλαμβάνει δέκα βασικούς δείκτες, που καλύπτουν κάθε φάση του κύκλου ζωής του προϊόντος, αλλά και τις κύριες πτυχές της ανταγωνιστικότητας. Η θέσπιση του πλαισίου παρακολούθησης και των δεικτών έχει, για την τρέχουσα φάση της μετάβασης, τις ακόλουθες βασικές κατευθύνσεις:

- Άμεση, εγγενής παρακολούθηση της μετάβασης μέσω των εδαφικών πόρων που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή και κατανάλωση αγαθών (προϊόντων και υπηρεσιών), με στόχο τη διατήρησή τους.
- Έμμεση (εξωτερική) παρακολούθηση της κατανάλωσης άλλων οικονομικών πόρων που σχετίζονται με την παραγωγή και την κατανάλωση, με στόχο τη διατήρησή τους.
- Παρακολούθηση των επιτευγμάτων που επιτυγχάνονται ως αποτέλεσμα των πολιτικά καθορισμένων στρατηγικών στόχων, με βάση τα καταγεγραμμένα αποτελέσματα και τη δυναμική τους.
- Παρακολούθηση των επιπτώσεων / των δράσεων που έχουν δρομολογηθεί, σχετικά με την αειφόρο ανάπτυξη, καθώς και των διαδεδομένων επιπτώσεων της διατήρησης των υλικών στο φυσικό και κοινωνικό/θεσμικό περιβάλλον.

Η διαδικασία παρακολούθησης της μετάβασης και οι δείκτες που χρησιμοποιούνται σήμερα χαρακτηρίζουν ένα πρώτο στάδιο, της αρχικής μετάβασης, και οι στρατηγικές που εκπονήθηκαν επικεντρώνονται στην παρακολούθηση των υλικών πόρων. Μέσω αυτού του περιορισμού, οι εξεταζόμενες επιπτώσεις είναι είτε άμεσες (διατήρηση υλικών) είτε έμμεσες (επιπτώσεις στο φυσικό και κοινωνικό/θεσμικό περιβάλλον). Το σύστημα δεικτών πρέπει να προσδιορίζει τι μετράτε, πώς εκτελείται η μέτρηση (μέθοδος, πηγές δεδομένων και μονάδες μέτρησης), ποιες είναι οι σχετικές πληροφορίες που εξάγονται και πρέπει να καθορίζουν και να ενημερώνουν πότε (σε ποια χρονικά διαστήματα) γίνονται οι μετρήσεις που εκτελούνται, ώστε η διαδικασία να είναι ελεγχόμενη και η εφαρμογή των αποφάσεων να μην γίνεται καθυστερημένα ή πολύ γρήγορα. (Pacurariu et al., 2021)

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή υπογραμμίζει τη σημασία της ανάπτυξης ενός πλαισίου παρακολούθησης που στοχεύει στη μέτρηση της προόδου προς την ΚΟ με τρόπο που να καλύπτει τις διάφορες διαστάσεις σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής των πόρων, των προϊόντων και των υπηρεσιών. Το πλαίσιο παρακολούθησης θα πρέπει να περιέχει ένα σύνολο δεικτών ομαδοποιημένων σε τέσσερα στάδια και πτυχές της κυκλικής οικονομίας: (1) παραγωγή και κατανάλωση, (2) διαχείριση αποβλήτων, (3) δευτερογενείς πρώτες ύλες και (4) ανταγωνιστικότητα και καινοτομία. Αυτό είναι σε γενικές γραμμές σύμφωνα με τη λογική και τη δομή του σχεδίου δράσης για την ΚΟ.

Για αυτό το νέο μοντέλο διαχείρισης απαιτούνται επομένως δείκτες που να ενσωματώνουν αυτούς τους στόχους.

- Σε μικρο-επίπεδο, κάθε εταιρεία πρέπει να σχεδιάσει ένα σύνολο συγκεκριμένων δεικτών σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά της εταιρείας, τις συνθήκες και τα υπάρχοντα προβλήματα. Συνήθως χρησιμοποιούνται δείκτες που βασίζονται στην αρχή των αποβλήτων 3Rs (μείωση, επαναχρησιμοποίηση, ανάκτηση) αλλά όχι στη ΚΟ γενικά.
- Σε μεσο-επίπεδο, η έννοια στην οποία επικεντρώνεται η μέτρηση είναι αυτή της βιομηχανικής συμβίωσης, που συνίσταται στη χρήση κοινών υποδομών και υπηρεσιών, δηλαδή δεικτών που βοηθούν στον έλεγχο της απόδοσης των εγκαταστάσεων και των βιομηχανικών πάρκων.
- Τέλος, σε μακροοικονομικό επίπεδο, το οποίο αφορά το θέμα σχεδιασμού δεικτών για την αξιολόγηση, την παρακολούθηση και τη βελτίωση των πολιτικών. (Sánchez-Ortiz et al., 2020)

Η επαναχρησιμοποίηση θεωρείται κυρίως ως μια σημαντική στρατηγική κυκλικής οικονομίας, δηλαδή μια στρατηγική που στοχεύει στην ελαχιστοποίηση της χρήσης υλικών και των επιπτώσεων στο περιβάλλον επαναχρησιμοποιώντας προϊόντα εντός της ίδιας αλυσίδας προϊόντων αντί για παραγωγή νέων. Η επαναχρησιμοποίηση γίνεται μόλις ένα προϊόν απορριφθεί από τον ιδιοκτήτη του και αντί να γίνει απόβλητο απορροφάτε από άλλο μέρος, επεκτείνοντας έτσι τη διάρκεια ζωής του προϊόντος και αναβάλλοντας το τέλος του κύκλου ζωής του.

Οι υπάρχοντες δείκτες για τη μέτρηση της κυκλικής επαναχρησιμοποίησης αποτελούνται από δείκτες μικροκλίμακας και δείκτες μακροκλίμακας όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Οι δείκτες μικροκλίμακας βασίζονται στο επίπεδο του προϊόντος, όπως η διάρκεια ζωής του προϊόντος ή οι ποιότητες υλικών. Αυτοί οι δείκτες περιλαμβάνουν τον δείκτη επαναχρησιμοποίησης, τον δείκτη πιθανής επαναχρησιμοποίησης ή το δυναμικό επαναχρησιμοποίησης. Βασίζονται σε περιφερειακό ή εθνικό επίπεδο και ποσοτικοποιούν τη ροή των επαναχρησιμοποιήσιμων αγαθών που είναι αποτελεσματικά σε ισχύ. Είναι σπάνιοι δείκτες καθώς μόνο ένας δείκτης επαναχρησιμοποίησης μέχρι σήμερα μετρά την ποσότητα των προϊόντων που εισέρχονται στην αγορά, δηλαδή ο υποδείκτης για τη

μέτρηση της ποσότητας ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών. (Delanoeijs & Bachus, 2022)

4.1.2 Δείκτης δυναμικής επαναχρησιμοποίησης

Δεδομένης της έλλειψης εργαλείων αξιολόγησης για την υποστήριξη και την παροχή βάσης για πρωτοβουλίες επαναχρησιμοποίησης αποβλήτων οι Park et al. εισήγαγαν ένα νέο ποσοτικό εργαλείο τον «δείκτη πιθανής επαναχρησιμοποίησης». Η υποκείμενη ιδέα του δείκτη δυναμικής επαναχρησιμοποίησης είναι ότι αυτό που δημιουργεί μια ευκαιρία επαναχρησιμοποίησης για ένα απόβλητο υλικό. Ορισμένα υλικά απορρίπτονται σε χώρους υγειονομικής ταφής επειδή δεν ξέρουμε πώς να τα επαναχρησιμοποιήσουμε.

Μετρώντας την έκταση της τεχνολογικής ανάπτυξης, ο δείκτης δυναμικού επαναχρησιμοποίησης εκφράζει τη χρησιμότητα του υλικού με μια πραγματική τιμή μεταξύ 0 και 1. Είναι ίσο με 0 όταν όλα τα υλικά απορρίπτονται και είναι ίσο με 1 όταν όλα τα υλικά μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν. Εάν ένα συγκεκριμένο δευτερεύον υλικό έχει δείκτη δυναμικού επαναχρησιμοποίησης 0,45, αυτό σημαίνει ότι το 45% του υλικού αυτού μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί μέσω των σύγχρονων τεχνολογιών. Με άλλα λόγια, το υλικό θεωρείται κατά 45% «όμοιο με πόρο» και 55% «σαν απόβλητο». Παρόλο που ο δείκτης δυνατότητας επαναχρησιμοποίησης δεν αναλύει άμεσα φυσικά, χημικά ή ορυκτολογικά χαρακτηριστικά ενός υλικού, αντικατοπτρίζει έμμεσα τα χαρακτηριστικά του υλικού ως συνάρτηση της τεχνολογικής ανάπτυξης. Το δυναμικό επαναχρησιμοποίησης αυξάνεται καθώς αυξάνονται οι τεχνολογικές επιλογές, επιτρέποντας περισσότερη ανάκτηση υλικού.

Η περίπτωση μελέτης που ασχολήθηκαν οι συγγραφείς αφορούσε τα υποπροϊόντα καύσης άνθρακα (CCBs). Για τον υπολογισμό του δείκτη δυναμικής επαναχρησιμοποίησης πρέπει να γνωρίζουμε τις τεχνολογίες για την επαναχρησιμοποίηση του υλικού όπου η κάθε τεχνολογία μπορεί να επεξεργαστεί αυτό το υλικό με διαφορετικές μορφές για διαφορετικές χρήσεις με διαφορετικό κόστος. Η συνάρτηση λοιπόν ολοκληρώνεται στο στάδιο εμπορευματοποίησης με βάση τα χαμηλότερα κόστη. Τα CCBs περιλαμβάνουν την ιπτάμενη τέφρα, τέφρα πυθμένα, σκωρία λέβητα και υπολείμματα αποθείωσης καυσαερίων. Τα CCBs διασχίζουν τη γραμμή μεταξύ αποβλήτων και πόρων, καθώς αποτελούν μια από τις μεγαλύτερες ετήσιες ροές αποβλήτων στις Ηνωμένες Πολιτείες, κοντά στους 120 εκατομμύρια

μετρικούς τόνους. Τα CCBs είναι πόροι για τους οποίους οι εφαρμογές επαναχρησιμοποίησης έχουν αναπτυχθεί ευρέως και η επαναχρησιμοποίησή τους έχει εφαρμοστεί ενεργά.

Η μελέτη έλαβε χώρα το 2009 στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής και για την ποσοτικοποίηση του δείκτη δυνατότητας επαναχρησιμοποίησης επιλέχθηκε η πιο ευρέως εφαρμοσμένη τεχνολογία ανά κατηγορία επαναχρησιμοποίησης, και ελήφθη υπόψη στον υπολογισμό. Με αυτόν τον τρόπο, μόνο οι εμπορευματοποιημένες τεχνολογίες επαναχρησιμοποίησης συμπεριλήφθηκαν στον υπολογισμό.

Στην έρευνα χρησιμοποιήθηκε ως βασική εξίσωση:

$$D=(A+B)/C$$

Όπου A = η εκτιμώμενη συνολική πιθανή ζήτηση

B = η συνολική ποσότητα που χρησιμοποιήθηκε το 2009

C = 57.152.639 μετρικοί τόνοι, η συνολική ποσότητα που δημιουργήθηκε το 2009

D = η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης στις ΗΠΑ, 2009

Πίνακας 1 Τιμές πιθανής επαναχρησιμοποίησης για τις 4 κατηγορίες CCBs ανά περίπτωση (Park & Chertow, 2014)

	ιπτάμενη τέφρα	γύψος FGD	τέφρα πυθμένα	σκωρία λέβητα
Περίπτωση 1	0,6-1,0	0,73-0,92	0,91-1,0	1
Περίπτωση 2	0,55-0,97	0,7-0,89	0,82-1,0	1
Περίπτωση 3	0,31-0,39	0,67-0,86	0,24-0,45	1

Κατά την εξέταση όλων των κατηγοριών επαναχρησιμοποίησης που αναφέρθηκαν στη μελέτη, οι τιμές πιθανής επαναχρησιμοποίησης για τα τέσσερα CCBs που αναλύθηκαν ήταν οι περισσότερες υψηλότερες από 0,8, πράγμα που σημαίνει ότι είναι περισσότερο από 80% «όμοιο με πόρο». Όπως υποστηρίζεται από αυτή την υψηλή αξία του δυναμικού επαναχρησιμοποίησης, τα CCBs έχουν ήδη εξελιχθεί σε πόρους σε σημαντικό βαθμό με την ανάπτυξη τεχνολογιών επαναχρησιμοποίησης που ήταν διαθέσιμες στις Ηνωμένες Πολιτείες έως το 2009. (Park & Chertow, 2014)

4.1.3 Δείκτης Κυκλικότητας Υλικού

Το ίδρυμα Ellen MacArthur Foundation και η εταιρία Granta Design εισήγαγαν πρώτοι τον δείκτη κυκλικότητας υλικού (Material Circularity Index, MCI). Ο δείκτης MCI παίρνει μια τιμή μεταξύ 0 και 1, όπου οι υψηλότερες τιμές υποδηλώνουν υψηλότερη κυκλικότητα. Για τον υπολογισμό του MCI χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες πληροφορίες:

- Διαδικασία παραγωγής υλικού, πως και πόση εισροή προέρχεται από παρθένα και ανακυκλωμένα υλικά και επαναχρησιμοποιημένα εξαρτήματα.
- Χρησιμότητα κατά τη φάση της χρήσης, πόσο καιρό χρησιμοποιείται το προϊόν σε σύγκριση με ένα μέσο προϊόν του κλάδου παρόμοιου τύπου. Αυτό λαμβάνει υπόψη την αυξημένη διάρκεια ζωής των προϊόντων, αλλά και την επισκευή/συντήρηση και κοινή κατανάλωση.
- Προορισμός μετά τη χρήση, πόσο υλικό πηγαίνει σε χώρους υγειονομικής ταφής (ή ανάκτησης ενέργειας), πόσα συλλέγονται για ανακύκλωση, ποια συστατικά συλλέγονται για επαναχρησιμοποίηση;
- Αποδοτικότητα της ανακύκλωσης, πόσο αποτελεσματική είναι οι διαδικασίες ανακύκλωσης που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ανακυκλωμένων εισροών των υλικών μετά τη χρήση. (Ellen MacArthur Foundation & Granta Material Intelligence, 2015)

Έτσι με απλά λόγια υπάρχουν τρεις κύριες παράμετροι που απαιτούνται για τον υπολογισμό του MCI ενός προϊόντος: η ποσότητα του παρθένου υλικού που χρησιμοποιείται, η ποσότητα των μη ανακτήσιμων αποβλήτων που δημιουργούνται και ένας παράγοντας χρησιμότητας που αντιπροσωπεύει τη διάρκεια ζωής και την ένταση χρήσης του προϊόντος. Σύμφωνα με πολλούς ερευνητές το MCI θεωρείται ένα από τα πληρέστερα διαθέσιμα πλαίσια κυκλικότητας σε επίπεδο προϊόντος και αντανακλά πολλές σημαντικές πτυχές της κυκλικής οικονομίας.

Οι Lavallaias et al. ασχολήθηκαν με τη κυκλική οικονομία του αζώτου και συγκεκριμένα στην παραγωγή ζωοτροφών (ζωοτροφές χοίρων ως τον συγκεκριμένο τύπο τροφής για ανάλυση) μέσω του δείκτη MCI. Στην πρώτη περίπτωση, οι χοιροτροφές (καλαμπόκι, σόγια) παράγονται συμβατικά με τη χρήση παραδοσιακού συνθετικού αζωτούχου λιπάσματος. Η δεύτερη περίπτωση εισάγει την μη επεξεργασμένη ζωική κοπριά ως πρόσθετη πηγή αζωτούχου λιπάσματος για την

παραγωγή καλαμποκιού και σόγιας που χρησιμοποιούνται ως ζωοτροφές για χοίρους. Η τρίτη περίπτωση χρησιμοποιεί μια διαπερατή από αέρια μεμβράνη για να αυξήσει την ανάκτηση αζώτου από την κοπριά των ζώων, παράγοντας θειικό αμμώνιο, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως λίπασμα. Τέλος, η περίπτωση τέταρτη χρησιμοποιεί μέρος του αζώτου που ανακτάται με τη μεμβράνη για την παραγωγή μικροβιακής πρωτεΐνης, η οποία χρησιμοποιείται για να υποκαταστήσει το άλευρο σόγιας στο σκεύασμα τροφής χοίρων. Το υπόλοιπο ανακτηθέν άζωτο από τη διαπερατή από αέρια μεμβράνη εφαρμόζεται ως λίπασμα για την παραγωγή καλαμποκιού.

Πίνακας 2 Αποτελέσματα MCI ανα κιλό ζωοτροφών χοίρων για 4 περιπτώσιολογικές μελέτες (Lavallais & Dunn, 2023)

	Περίπτωση 1	Περίπτωση 2	Περίπτωση 3	Περίπτωση 4
Μάζα αζώτου που απαιτείται για τη γεωργία καλαμποκιού και σόγια (M ,g)	14	14	14	14
Χρησιμοποιούμενο παρθένο άζωτο (V , g)	14	6,3	8,1	7,8
Παραγώμενο απόβλητο άζωτο (W ,g)	5,7	6,5	5,7	5,6
LFI	0,73	0,36	0,48	0,47
MCI	0,37	0,6	0,57	0,58

Όπου LFI ο γραμμικός δείκτης ροής ο οποίος αντικατοπτρίζει τη γραμμικότητα ενός προϊόντος.

Η πρώτη περίπτωση είναι η λιγότερο κυκλική από τις επιλογές και επομένως έχει το χαμηλότερο MCI. Παρά την ελαφρά αύξηση του παραγόμενου απόβλητου αζώτου, το MCI της δεύτερης περίπτωσης είναι 62% υψηλότερο από το πρώτο λόγω της μεγάλης μείωσης του παρθένου αζώτου που καταναλώνεται. Εάν χρησιμοποιούνταν τεχνολογίες αποθήκευσης και εφαρμογής κοπριάς χαμηλών εκπομπών, η βαθμολογία MCI της δεύτερης περίπτωσης θα μπορούσε να αυξηθεί. Πηγαίνοντας από την περίπτωση δύο στην τρίτη περίπτωση, το MCI μειώνεται κατά 5% λόγω των αυξημένων ποσοτήτων παρθένου αζώτου που απαιτούνται για την παραγωγή της ζωοτροφής. Καθώς οι τεχνολογίες ανάκτησης αζώτου συνεχίζουν να γίνονται πιο αποτελεσματικές και να ανακτούν υψηλότερες ποσότητες αζώτου, τα MCI για προϊόντα λιπασμάτων που χρησιμοποιούν αυτήν την τεχνολογία θα μπορούσαν να γίνουν μεγαλύτερα από τα MCI για συστήματα που βασίζονται στην κοπριά.

Η σύζευξη του MCI με την αξιολόγηση του κύκλου ζωής (LCA) μπορεί να δώσει πληροφορίες για το πώς οι αλλαγές στην κυκλικότητα επηρεάζουν βασικές

περιβαλλοντικές μετρήσεις, όπως οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου ή η ένταση νερού και ενέργειας. Ενώ είναι απαραίτητοι δείκτες για την προώθηση της κυκλικής οικονομίας, είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη η αυξανόμενη ζήτηση για προϊόντα, η οποία μπορεί να οδηγήσει στην αύξηση της παραγωγής και να επηρεάσει τη χρήση γης μεταξύ άλλων τύπων κατανάλωσης πόρων. Καθώς ο αριθμός των τεχνολογιών ανάκτησης αζώτου αυξάνεται, πολλοί παράγοντες θα επηρεάσουν ποιο είναι το καταλληλότερο να χρησιμοποιηθεί σε ένα συγκεκριμένο σενάριο. Η ολοκλήρωση μιας αξιολόγησης κύκλου ζωής, μιας τεχνοοικονομικής ανάλυσης και ο υπολογισμός ενός MCI μπορεί να αυξήσει τον χρόνο και τις αναλύσεις πολυπλοκότητας για να καθοδηγήσουν τη λήψη αποφάσεων. Ωστόσο, αυτά τα βήματα βοηθούν στην παροχή μιας ολοκληρωμένης εικόνας για το ποιοι συνδυασμοί πηγών αποβλήτων αζώτου, τεχνολογιών μετατροπής και επιλογών προϊόντων έχουν τη μεγαλύτερη δυνατότητα να βελτιώσουν την κυκλικότητα του αζώτου, ενώ μειώνουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις με τον πιο οικονομικό τρόπο. (Lavallais & Dunn, 2023)

4.1.4 Δείκτης Κυκλοφορίας Νερού

Μία άλλη μελέτη των Kakwani et al. στην οποία τροποποίησαν τον δείκτη κυκλικότητας υλικού και ανέπτυξαν τον δείκτη κυκλοφορίας νερού (WCI). Το WCI παρέχει τις μέγιστες πληροφορίες σε μια ενιαία τιμή δείκτη με εύκολη ερμηνεία για τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων σε πολλούς τομείς. Η υιοθέτηση του WCI σε μεγάλη κλίμακα μπορεί να συμβάλει υπερβολικά στη μείωση της ζήτησης παρθένου νερού.

Μέσω του WCI μπορεί να ληφθεί το ποσοστό του νερού που μειώνεται, επαναχρησιμοποιείται, ανακυκλώνεται, ανακτάται και αποκαθίσταται και, κατά συνέπεια, μπορεί να πραγματοποιηθεί συγκριτική αξιολόγηση. Ο δείκτης που προέκυψε σε αυτή τη μελέτη περιλαμβάνει μηχανικές/ανθρωπογενείς ροές αστικών υδάτων και δεν λαμβάνεται υπόψη η αλληλεπίδρασή του με φυσικές/υδρολογικές παραμέτρους. Οι δραστηριότητες ανακύκλωσης, επαναχρησιμοποίησης και ανάκτησης πραγματοποιούνται εντός των ορίων του συστήματος, ενώ το επεξεργασμένο νερό που αποκαθίσταται και μειώνεται βρίσκεται εκτός των ορίων του συστήματος.

Η έρευνα χρησιμοποίησε 100 σενάρια για την αξιολόγηση των τιμών WCI με τη διακύμανση όλων των 5R. Τα σενάρια ταξινομήθηκαν με αύξουσα σειρά του

αθροίσματος των 4R, δηλαδή επαναχρησιμοποίηση, ανακύκλωση, ανάκτηση και επαναφορά. Η επικύρωση του WCI για το ισοζύγιο μάζας νερού και η διακύμανσή του με το κλάσμα του νερού που μειώνεται, επαναχρησιμοποιείται, ανακυκλώνεται, ανακτάται και αποκαθίσταται, περιεγράφηκε με τη βοήθεια τριών σεναρίων όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 3 Περιγραφή σεναρίων αξιολόγησης και προσκόπτουσες τιμές αποτελεσμάτων (Kakwani & Kalbar, 2022)

Δείκτες	Περιγραφή	Σενάριο 24 S24	Σενάριο 97 S97	Σενάριο 100 S100
Άθροισμα ($F_{Rd} + F_{Ru} + F_{Re} + F_{Rc} + F_{Rst}$)		0,284	0,783	0,735
W_{Re}, W_{Rc}, W_{Rst} (MLD)	Όγκος νερού που σπαταλιέται κατά την ανακύκλωση, την αποκατάσταση και την αποκατάσταση	0	0	0
V (MLD)	Πραγματικό παρθένο νερό	96,66	44,34	40,23
WO (MLD)	Όγκος μη επεξεργασμένου νερού που παράγεται	69,66	21,19	14,44
W (MLD)		96,66	44,34	40,23
LFI	Γραμμικός δείκτης ροής	0,716	0,383	0,312
WCI	Ένδειξη κυκλικότητας νερού	0,284	0,617	0,688
CSR	Κεντρική δυνατότητα αντικατάστασης ανεφοδιασμού	0,688	0,244	0,149
WWPWS	Δυνατότητα λυμάτων για παροχή νερού	0,516	0,183	0,112
IRR	Εσωτερική αναλογία ανακύκλωσης	0,237	0,475	0,522
WWT to WW	Αναλογία των λυμάτων που επεξεργάζονται οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων προς τον συνολικό όγκο λυμάτων που απορρίπτονται	0,315	0,7	0,823
WWR to WWT	Αναλογία επαναχρησιμοποιούμενων λυμάτων προς συνολική επεξεργασία λυμάτων	0,802	0,667	0,682

Τα αποτελέσματα της έρευνας δείχνουν ότι η υψηλότερη τιμή του WCI στα S97 και S100 υποδηλώνει ότι μεγαλύτερη ποσότητα νερού ανακυκλώνεται με τη μορφή δραστηριοτήτων επαναχρησιμοποίησης, ανακύκλωσης, ανάκτησης και αποκατάστασης σε σύγκριση με αυτήν στο S24. Αντίθετα, στο S97 το WCI (0,667) είναι υψηλότερο από το S24 λόγω της αυξημένης ανακυκλοφορίας με τη μορφή κλασμάτων νερού που επαναχρησιμοποιείται ($F_{Ru} = 0,190$), ανακυκλώνεται ($F_{Re} = 0,119$), ανακτάται ($F_{Rc} = 0,166$) και αποκαθίσταται ($F_{Rst} = 0,142$), και επίσης καταναλώνεται μικρότερος όγκος νερού ($C = 115,78$ MLD) επειδή σε αυτό το σενάριο, το μειωμένο κλάσμα (F_{Rd}) είναι 0,166. Αυξημένη κυκλικότητα ($WCI = 0,667$), μειωμένη κατανάλωση παρθένου νερού ($V = 44,34$ MLD) και μειωμένη παραγωγή μη

επεξεργασμένου νερού ($W_0 = 21,19$ MLD) είναι εμφανής στο S97. Αντίθετα, σε σύγκριση με το S97 το μειωμένο κλάσμα ($F_{Rd} = 0,047$) είναι χαμηλότερο στο S100 και το άθροισμα του κλάσματος όλων των 4R είναι υψηλότερο (0,682). και πάλι η τιμή WCI του S100 (0,682) είναι υψηλότερη από αυτή του S97. (Kakwani & Kalbar, 2022)

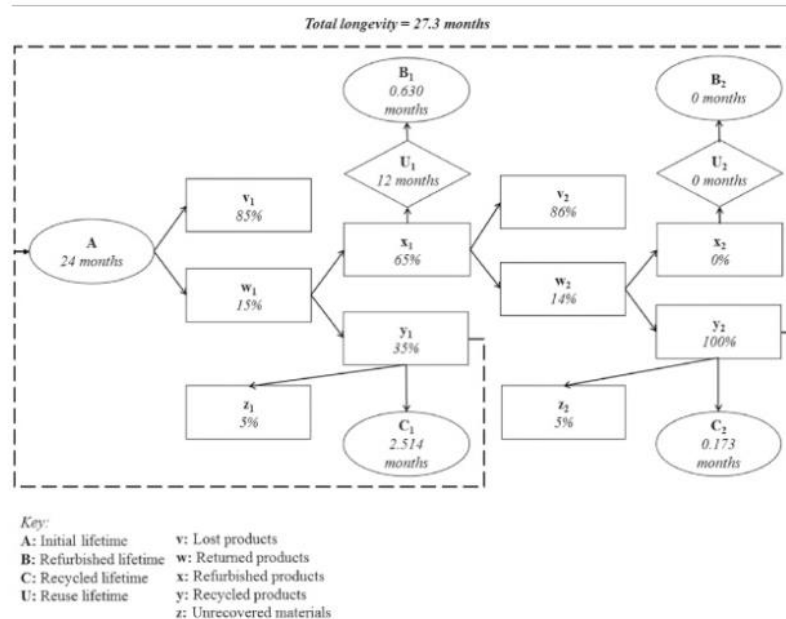
4.1.5 Δείκτης Μακροζωίας

Σύμφωνα με τους Johnson et al. στη μελέτη τους ασχολήθηκαν με τον δείκτη μακροζωίας ο οποίος αξιολογεί την απόδοση και επιδιώκει να δείξει το χρονικό διάστημα για το οποίο ένα υλικό διατηρείται σε ένα σύστημα προϊόντος. Αυτή η διατήρηση είναι ένα μέσο για τη μεγιστοποίηση της εκμετάλλευσης των πόρων στο ίδιο σύστημα προϊόντων μέσω της χρήσης και επαναχρησιμοποίησης του προϊόντος, καθώς και της ανακύκλωσης υλικών. Μια εναλλακτική λύση που διατηρεί έναν πόρο x φορές περισσότερο στο σύστημα από μια άλλη εναλλακτική, είναι επίσης x φορές μεγαλύτερη δημιουργία αξίας από την άποψη της μακροζωίας.

Η μακροζωία των πόρων μέσα σε ένα προϊόν, από τη χρήση έως το τέλος του κύκλου ζωής του, είναι ένα μέτρο της μέσης διάρκειας χρήσης του προϊόντος και του υλικού. Τρεις χρονικοί υπολογισμοί (για τον καθορισμό της διάρκειας ζωής μεταξύ δύο συμβάντων) και δύο κατευθυντικοί υπολογισμοί (για τον καθορισμό της ροής του προϊόντος ή/και των υλικών) επιτρέπουν τον προσδιορισμό της μακροζωίας. Ο δείκτης μακροζωίας είναι ένας δείκτης με βάση την αξία, καθώς η συνάθροιση των δεικτών που βασίζονται στο βάρος και της αξίας ακολουθεί διαφορετική λογική, αλλά ότι και τα δύο είδη δεικτών απαιτούνται για να επιτευχθεί η βέλτιστη χρήση των πόρων.

Πιο συγκεκριμένα τα προς μελέτη υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα πολύτιμα μέταλλα που περιέχονται σε φορητές συσκευές και παρείχαν τα μέσα για την εφαρμογή του δείκτη μακροζωίας. Οι συσκευές κινητών τηλεφώνων περιέχουν μια σειρά υλικών όπως πλαστικά, κεραμικά, επιβραδυντικά φλόγας, κοινά και πολύτιμα μέταλλα (νικέλιο και παλλάδιο) και μέταλλα σπάνιων γαιών (τέρβιο και νεοδύμιο). Τα υλικά που περιέχονται στα τηλέφωνα είναι σημαντικά για οικονομικούς και περιβαλλοντικούς λόγους.

Τα αποτελέσματα του ενδεικτικού παραδείγματος δείχνουν ότι υπάρχουν τρία βασικά στοιχεία που συμβάλλουν στην αύξηση της μακροζωίας: μεγαλύτερη χρήση ενός προϊόντος, μεγαλύτερη ανακύκλωση ενός προϊόντος και μεγαλύτερη ανακατασκευή ενός προϊόντος.



Εικόνα 5 Η εξίσωση μακροζωίας για κινητά τηλέφωνα και πολύτιμα μέταλλα. (Franklin-Johnson et al., 2016)

Η μακροζωία επιδιώκει να καθορίσει τον βαθμό στον οποίο ένα σύστημα είναι κυκλικό ή τον βαθμό στον οποίο τα υλικά που περιέχονται στα προϊόντα παραμένουν εντός αυτού του συστήματος για όσο το δυνατόν περισσότερο. Ένα τέλει κυκλικό σύστημα θα πραγματοποιηθεί όταν η μακροζωία ισούται με το άπειρο. Για έναν οργανισμό που επιθυμεί να αυξήσει τη μακροζωία των υλικών στα προϊόντα του (και όχι στα προϊόντα).

Έτσι ο δείκτης μακροζωίας λόγω της γενικής φύσης του δείκτη, μπορεί να εφαρμοστεί σε μια σειρά υλικών ή/και προϊόντων και βιομηχανιών, επιτρέποντας έτσι την εφαρμογή σε ευρεία κλίμακα, ο δείκτης χρησιμοποιεί το χρόνο για τη μέτρηση της διάρκειας ενός υλικού μέσα σε ένα σύστημα προϊόντος, όπου μεγαλύτερη διατήρηση σημαίνει ότι μεγιστοποιείται και η χρήση πόρων. (Franklin-Johnson et al., 2016)

4.1.6 Δείκτης Επαναχρησιμοποίησης Υλικού συνδυαστικά με Δείκτη Κυκλικότητας Υλικού

Μια μελέτη των Niero & Kalbar σε επίπεδο προϊόντος στην οποία χρησιμοποιήθηκαν δείκτες με βάση τη κυκλικότητα του υλικού και πιο συγκεκριμένα δόθηκε προτεραιότητα σε δύο δείκτες που προορίζονται να χρησιμοποιηθούν σε εταιρικό πλαίσιο, που αναπτύχθηκαν από δύο από τους πιο σημαντικούς παράγοντες

στο πλαίσιο και τη διάδοση της ΚΟ. Οι επιλεγμένοι δείκτες είναι ο Δείκτης Επαναχρησιμοποίησης Υλικού (MRS) και ο προαναφερόμενος MCI.

Το MRS είναι η μέτρηση που χρησιμοποιείται για την ποσοτικοποίηση της επαναχρησιμοποίησης υλικών, δηλαδή το κριτήριο που περιλαμβάνεται στο πιστοποιημένο πρόγραμμα «Cradle to Cradle» που αφορά την αξία ανακύκλωσης των υλικών. Όσον αφορά τον τεχνικό κύκλο, το MRS ποσοτικοποιεί τη δυνατότητα ανακύκλωσης ενός προϊόντος λαμβάνοντας υπόψη δύο μεταβλητές: την εγγενή ανακυκλωσιμότητα (IR) του προϊόντος, δηλαδή το % του προϊόντος που μπορεί να ανακυκλωθεί τουλάχιστον μία φορά μετά το αρχικό στάδιο χρήσης και το % ανακυκλωμένου περιεχομένου (RC). Το MRS δίνεται από τον σταθμισμένο μέσο όρο των δύο μεταβλητών, όπου η πρώτη δίνεται διπλάσιο από το βάρος της δεύτερης, με τελική τιμή που κυμαίνεται από 0 έως 100.

Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του MCI αναφέρονται σε: i) προορισμό μετά τη χρήση, διάκριση μεταξύ των ποσοστών του ποσοστού συλλογής ανακύκλωσης (RCR) και του ποσοστού επαναχρησιμοποίησης (ReR). ii) ποσοστό ανακυκλωμένης πρώτης ύλης (RC). iii) την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας ανακύκλωσης, δηλαδή την απόδοση κατά την ανακύκλωση, και iv) τη χρησιμότητα κατά το στάδιο της χρήσης, δηλαδή την ένταση χρήσης σε σχέση με ένα μέσο προϊόν στην αγορά.

Στη μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκε μια μέθοδος η οποία καλείται MCDA που συχνά χρησιμοποιείται για την αντιμετώπιση πολλαπλών αντικρουόμενων στόχων, τα βάρη των δεικτών επηρεάζουν σημαντικά τις τελικές βαθμίδες της εναλλακτικής λύσης. Η προσέγγιση λήψης αποφάσεων αυτή βασίζεται σε σενάρια για τη σωστή δομή του προβλήματος λήψης αποφάσεων. Τα σενάρια περιγράφουν τις προοπτικές των ενδιαφερομένων ως προς τη βαρύτητα και μπορούν να ληφθούν τελικές κατατάξεις για κάθε ένα από τα σενάρια.

Πίνακας 4 Επισκόπηση των πέντε σεναρίων που μελετήθηκαν και των σχετικών βαρών που αποδίδονται σε κάθε έναν από τους δείκτες (Niero & Kalbar, 2019)

Σενάριο	Δείκτες βάση της κυκλικότητας υλικού		Δείκτες βάση του κύκλου ζωής				
	Βαθμολογία επαναχρησιμοποίησης υλικού (MRS)	Δείκτης κυκλικότητας υλικού (MCI)	Κλιματική Αλλαγή (CC)	Εξάντληση αβιοτικών πόρων (ARD)	Οξίνιση (AC)	Σωματίδια (PM)	Κατανάλωση νερού (WC)
S1	0,143	0,143	0,143	0,143	0,143	0,143	0,143
S2	0,2	0,2	0,15	0,15	0,1	0,1	0,1
S3	0,1	0,1	0,15	0,15	0,2	0,2	0,1
S4	0,1	0,1	0,2	0,2	0,15	0,15	0,1
S5	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1

Η μελέτη περίπτωσης αφορούσε συσκευασίες μπύρας και πιο συγκεκριμένα 8 εναλλακτικές συσκευασίες για μπύρα σε δύο γεωγραφικά πλαίσια, το Ηνωμένο Βασίλειο και την Ινδία, που αφορούν διαφορετικά υλικά και μεγέθη συσκευασίας. Για το MRS οι παράμετροι που απαιτούνται είναι: %RC και %IR (υπολογίζονται λαμβάνοντας υπόψη το ποσοστό του συστατικού της συσκευασίας, δηλαδή την κύρια συσκευασία και το καπάκι/καπάκι που μπορούν να ανακυκλωθούν μετά την αρχική χρήση). Για το MCI οι παράμετροι που απαιτούνται είναι: %RC, %RCR, % ReR, απόδοση κατά την ανακύκλωση και χρησιμότητα.

Πίνακας 5 Αποτελέσματα από τον υπολογισμό των δεικτών (Niero & Kalbar, 2019)

Country	UK	UK	UK	UK	IN	IN	IN	IN
Packaging ID (size)	SK (50 l)	AIC (44cl)	AIC (50cl)	OWGB (33cl)	RGB (65cl)	RGB (33cl)	AIC (50cl)	AIC (44cl)
Alternative n.	A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4
MRS [-]	66	81	81	82	78	78	71	71
MCI [-]	0.55	0.60	0.60	0.60	0.63	0.63	0.57	0.57
CC [kg CO ₂ eq/hl]	2.13E+00	2.97E+01	2.93E+01	7.30E+01	3.03E+01	3.82E+01	3.27E+01	4.22E+01
ARD [kg Sbeq/hl]	8.74E-04	2.22E-03	2.03E-03	2.65E-03	1.29E-03	2.40E-03	2.06E-03	2.95E-03
AC [mol H ⁺ eq/hl]	1.32E-02	1.48E-01	1.48E-01	5.09E-01	2.01E-01	2.51E-01	1.83E-01	2.34E-01
PM [kg PM _{2.5} eq/hl]	1.86E-03	8.51E-03	8.48E-03	2.62E-02	1.07E-02	1.34E-02	1.06E-02	1.35E-02
WC [m ³ /hl]	1.70E-02	3.27E-01	3.28E-01	8.57E-01	3.33E-01	4.15E-01	3.38E-01	4.26E-01

Η χρωματική κωδικοποίηση που χρησιμοποιήθηκε δείχνει την κατάταξη από την καλύτερη (πράσινη) έως τη χειρότερη (κόκκινη) εναλλακτική.

Επειδή τα αποτελέσματα της πρώτης φάσης (δηλαδή μέσω του MCDA) δεν ήταν καθοριστικά και δε επέτρεπαν την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων οι ερευνητές χρησιμοποίησαν και μια μέθοδο η οποία καλείται TOPSIS (Technique for Order by Similarity to Ideal Solution). Η μέθοδος TOPSIS χρησιμοποιεί το μέτρο της Ευκλείδειας απόστασης για τον προσδιορισμό της εναλλακτικής λύσης από τη θετική ιδανική λύση (PIS) και την αρνητική ιδανική λύση (NIS). Το PIS είναι βασικά μια

υποθετική εναλλακτική που διατυπώνεται χρησιμοποιώντας την υψηλότερη βαθμολογία των δεικτών στην περίπτωση δεικτών τύπου οφέλους (δηλ. δείκτες κυκλικότητας υλικού) και τη χαμηλότερη βαθμολογία των δεικτών στην περίπτωση δεικτών τύπου κόστους (δηλ. δείκτες LCA). Ομοίως, το NIS είναι επίσης μια υποθετική εναλλακτική που διατυπώθηκε χρησιμοποιώντας αντίθετη λογική από αυτή του PIS. Στο TOPSIS η εναλλακτική που είναι πιο κοντά στο PIS (δηλαδή μοιάζει με χαρακτηριστικό του PIS) και πιο μακριά από το NIS λαμβάνει την υψηλότερη βαθμολογία.

Πίνακας 6 Αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του TOPSIS δηλαδή κατάταξη στα διαφορετικά σενάρια στάθμισης και εξέταση των 4 εναλλακτικών για το Ηνωμένο Βασίλειο και την Ινδία για τις επιλεγμένες συσκευασίες (Niero & Kalbar, 2019)

Country		UK									
Scenario No.	S1		S2		S3		S4		S5		
Packaging	Alternatives	Score	Alternatives	Score	Alternatives	Score	Alternatives	Score	Alternatives	Score	
SK 50 l	A1	0.941	A1	0.902	A1	0.964	A1	0.961	A1	0.911	
AIC 44cl	A2	0.643	A2	0.614	A2	0.667	A2	0.620	A2	0.632	
AIC 50 cl	A3	0.653	A3	0.629	A3	0.676	A3	0.635	A3	0.640	
OWGB 33cl	A4	0.059	A4	0.097	A4	0.036	A4	0.038	A4	0.088	

Country		India									
Scenario N.	S1		S2		S3		S4		S5		
Packaging	Alternatives	Score	Alternatives	Score	Alternatives	Score	Alternatives	Score	Alternatives	Score	
RGB 65cl	A1	0.919	A1	0.942	A1	0.897	A1	0.934	A1	0.932	
RGB 33cl	A2	0.299	A2	0.341	A2	0.270	A2	0.306	A2	0.345	
AIC 44cl	A3	0.639	A3	0.592	A3	0.668	A3	0.617	A3	0.641	
AIC 50 cl	A4	0.078	A4	0.056	A4	0.100	A4	0.064	A4	0.066	

Συμπερασματικά στη μελέτη συγκρίθηκαν τέσσερις εναλλακτικές συσκευασίες για μπύρα στις αγορές του Ηνωμένου Βασιλείου και της Ινδίας, αντίστοιχα, μέσω δύο τύπων δεικτών: βάσει κυκλικότητας υλικών (MCI και MRS) και βάσει κύκλου ζωής (CC, ARD, AC, PM, WC) και διαπιστώθηκε ότι η κατάταξη αλλάζει σύμφωνα με το σύνολο δεικτών. Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται με την εφαρμογή του MCDA δείχνουν ότι η σύγκρουση μεταξύ των δεικτών μπορεί να επιλυθεί όταν εφαρμόζονται μέθοδοι όπως το TOPSIS. Συνολικά, η εφαρμογή διαφορετικών σεναρίων στάθμισης δεν αλλάζει την κατάταξη των εναλλακτικών επιλογών, επιβεβαιώνοντας έτσι ότι τα αποτελέσματα είναι σταθερά. Η πρότασή τους έτσι για σύζευξη δεικτών κυκλικότητας υλικού με δείκτες LCA μέσω MCDA καταδεικνύει μια πρόοδο στην αξιολόγηση των στρατηγικών ΚΟ σε επίπεδο προϊόντος. (Niero & Kalbar, 2019)

5^ο Κεφάλαιο

5.1 Μελέτες Περίπτωσης συσκευασιών ποτών

5.1.1 Μελέτη 1^{ης} Περίπτωσης: Συσκευασία αλουμινίου

Μία από τις πιο σημαντικές και στρατηγικές βιομηχανίες παραγωγής επικίνδυνων αποβλήτων είναι η βιομηχανία παραγωγής αλουμινίου σύμφωνα με τους Mahinroosta et al.. Το αλουμίνιο (Al) ως το τρίτο πιο άφθονο στοιχείο στη γη δεν μπορεί να βρεθεί ως ελεύθερο στοιχείο στη φύση. Το αλουμίνιο είναι το δεύτερο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο μέταλλο μετά το σίδηρο. Είναι ένα ελαφρύ, αγωγίμο, ανθεκτικό στη διάβρωση, μη μαγνητικό, αδιάβροχο και εύκολα κράμα μετάλλου με υψηλή αναγωγική ισχύ. Έχει επίσης χαμηλή πυκνότητα ($\sim 2,70 \text{ g/cm}^3$) και χαμηλή θερμοκρασία τήξης ($\sim 933 \text{ K}$).

Σε σύγκριση με άλλα υλικά, η παραγωγή αλουμινίου είναι μια βιομηχανία έντασης ενέργειας που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη διαφορά στην ενέργεια μεταξύ πρωτογενούς και δευτερογενούς παραγωγής (περίπου 174–186 MJ/kg για πρωτογενή παραγωγή, σε σύγκριση με 10–20 MJ/kg για δευτερογενή παραγωγή). Ο λόγος για την πολύ λιγότερη ενέργεια που καταναλώνεται από τη δευτερογενή παραγωγή Al είναι ότι η ακατέργαστη μορφή της είναι υπολείμματα Al και πρωτογενές μεταλλικό Al. Ως εκ τούτου, σήμερα, το αλουμίνιο κατασκευάζεται μέσω δύο διαφορετικών οδών: την πρωτογενή παραγωγή Al από την αλουμίνα που εξάγεται από μέταλλευμα βωξίτη και τη δευτερογενή παραγωγή Al από υπολείμματα Al και χρησιμοποιημένα προϊόντα αλουμινίου (ελάσματα, εξώθηση, τόννευση). (Mahinroosta & Allahverdi, 2018b)

Η πρωτογενής διαδικασία παραγωγής αλουμινίου ξεκινά με την εξόρυξη μεταλλεύματος βωξίτη. Κάθε χρόνο, εκατομμύρια τόνοι μεταλλευμάτων βωξίτη μετατρέπονται σε άφθονα κοιτάσματα εξόρυξης, Ως πρώτη ύλη του πρωτογενούς αλουμινίου παραγωγής, το μέταλλευμα βωξίτη περιέχει συνήθως 30-50% οξείδιο του αργιλίου μαζί με μερικές ακαθαρσίες όπως πυρίτιο και σίδηρος. Για να παραχθεί ένας μετρικός τόνος ξηρού βωξίτη απαιτούνται 150 MJ ενέργεια.

Η διαδικασία εξαγωγής αλουμίνας από βωξίτη ονομάζεται διύλιση αλουμίνας. Στην Ευρώπη, ανά τόνο αλουμίνας καταναλώνονται 2,2 τόνοι βωξίτη και 10GJ θερμικής ενέργειας. Η αλουμίνα υποβάλλεται σε περαιτέρω επεξεργασία για να

μετατραπεί σε αλουμίνιο με χυτήριο με διαδικασία ηλεκτρόλυσης. Η διαδικασία ηλεκτρόλυσης είναι μια διαδικασία φορτισμένη με ηλεκτρισμό, μη την άνοδο του άνθρακα να λειτουργεί ως μέρος ηλεκτρολυτικών στοιχείων. Σε αυτή τη διαδικασία η αλουμίνα ανάγεται σε υγρό αλουμίνιο με 99,7% καθαρότητα, ενώ το οξυγόνο που παράγεται λόγω μείωσης της αλουμίνας αντιδρά με την άνοδο να εκπέμπει CO₂. Απαιτούνται περίπου 1,9 τόνοι αλουμίνας για την παραγωγή 1 τόνου αλουμινίου. Η συνολική ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας για την πρωτογενή παραγωγή χρησιμοποιείται στη διαδικασία τήξης, η οποία θεωρείται ως ενεργοβόρα διαδικασία κατά την πρωτογενή παραγωγή. Εν τω μεταξύ, 2,2 τόνοι CO₂ παράγονται ανά ισοδύναμο τόνο μετάλλου αλουμινίου, το οποίο έχει μεγάλη επίδραση και ενισχύει την περιβαλλοντική επιβάρυνση. (Wei, 2012)

Ως μέρος της δέσμευσής μας για την Κυκλική Οικονομία, το European Aluminium στηρίζει την ανάπτυξη συνόλων δεδομένων για απογραφή του κύκλου ζωής. Το αλουμίνιο είναι το τέλειο υλικό για την κυκλική οικονομία. Είναι πλήρως και απεριόριστα ανακυκλώσιμο, διατηρώντας τις αρχικές του ιδιότητες όσες φορές κι αν υποστεί επεξεργασία και χρήση. (European Aluminium, 2021) Αυτό σημαίνει ότι το αλουμίνιο από την πρωτογενή παραγωγή παράγει περίπου 12–16,5 τόνους GHG ανά τόνο παραγόμενου μετάλλου. (Raabe et al., 2022) Η διαδικασία ανακύκλωσης αλουμινίου απαιτεί μόνο το 5% της ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή του πρωτογενές μετάλλου, με αποτέλεσμα τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου να είναι κάτω από 0,5 τόνους CO₂ ισοδύναμο/τόνο ανακυκλωμένου αλουμινίου. (European Aluminium, 2021)

Η Metal Packaging Europe (MPE) είναι η ευρωπαϊκή ομοσπονδία κατασκευαστών συσκευασιών μετάλλων, η MPE είναι πλήρως δεσμευμένη στην παροχή αντικειμενικών και αξιόπιστων πληροφοριών σχετικά με την περιβαλλοντική απόδοση της άκαμπτης μεταλλικής συσκευασίας, δεδομένου του κρίσιμου ρόλου της εντός της κυκλικής οικονομίας. Μέλη της MPE και της GlobalData, διεξήγαγαν μια μελέτη με LCA η οποία καλύπτει το 87% των αλουμινένιων συσκευασιών ποτών που κατασκευάζονται στην Ευρώπη. Η μελέτη LCA καταδεικνύει ξεκάθαρα τη θετική περιβαλλοντική συμβολή της ανακύκλωσης των δοχείων αναψυκτικών από αλουμίνιο, είναι απεριόριστα ανακυκλώσιμα χωρίς σημαντική απώλεια ποιότητας, η οποία επιτρέπει τη σημαντική μείωση της παρθένας παραγωγή αλουμινίου. Η μελέτη αξιολόγησε τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του στις τεχνικές βελτιώσεις που

πραγματοποιήθηκαν τα τελευταία 10 χρόνια (από το 2006 έως το 2016) σε σχέση με την παραγωγή αλουμινίου και το ποσοστό κατασκευής και ανακύκλωσης κονσερβών.

Στη μελέτη εκφράζεται η περιβαλλοντική απόδοση των αλουμινένιων δοχείων σύμφωνα με τη λειτουργική μονάδα που ορίζεται ως: χίλιες (1.000) μονάδες αλουμινένιων δοχείων που χρησιμοποιούνται για να περιέχουν, να προστατεύουν και να διακοσμούν τυπικούς όγκους ποτών (25, 33 και 50 cl). Επίσης, ο ρυθμός ανακύκλωσης αλουμινένιων δοχείων αναψυκτικών στην Ευρώπη ορίζεται στο 72,9% σύμφωνα με τα ευρωπαϊκά στατιστικά στοιχεία του 2014, πράγμα που σημαίνει ότι σχεδόν το 73% των δοχείων που διατίθενται στην αγορά ανακυκλώνονται σε νέα προϊόντα αλουμινίου. Από την άποψη της LCA, η ανακύκλωση δοχείων αναψυκτικών από αλουμίνιο διαδραματίζει θεμελιώδη ρόλο για το περιβάλλον, για παράδειγμα, για κάθε 1000 κονσέρβες που ανακυκλώνονται η μείωση των αερίων του θερμοκηπίου που εκπέμπονται στον αέρα είναι μεταξύ 61-86 kg ισοδύναμου CO₂. (Metal Packaging Europe, 2019).

Η Metal Packaging Europe παρουσιάζει εντυπωσιακή μείωση του αποτύπωμα άνθρακα κονσερβών άνω των 10 ετών από το 2006 έως το 2016. Η μελέτη εξέτασε τη μέση περιβαλλοντική απόδοση τριών μεγεθών τυπικών κουτιών 250ml, 330ml και 500ml, από εξαγωγή πρώτων υλών μέχρι το τέλος της ζωής τους, αν και όχι σε σύγκριση με γυάλινες φιάλες ή PET. Το αποτύπωμα άνθρακα συρρικνώθηκε κατά 31% κατά μέσο όρο για τους τρεις όγκους, σύμφωνα με τον στόχο της βιομηχανίας να μειώσει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ενώ εξακολουθεί να αυξάνεται η παραγωγή. Η ανακύκλωση είναι το κλειδί εδώ, με πιθανή μείωση στον αντίκτυπο της κλιματικής αλλαγής έως 6% για κάθε αύξηση 5% του ποσοστού ανακύκλωσης. Η μελέτη εντόπισε επίσης ένα 12% μείωση της παροχής πλινθωμάτων αλουμινίου και μείωση 35% στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας χάρη στην αποδοτικότητα της παραγωγής· και σχεδόν 50% αύξηση του ποσοστού ανακύκλωσης σε όλη την Ευρώπη. (Hydro, 2021)

Σύμφωνα με τον Wei et al. με βάση τα σχέδια παραγωγής, η μελλοντική παγκόσμια παραγωγή αλουμινίου εκτιμάται ότι θα φτάσει τους 120 MT το 2025 σε σύγκριση με δυναμικότητα 45,3 MT στο έτος 2006, με ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης 4,1% και συνολική αύξηση 160%. Η εκτίμηση του Bureau of International Recycling (BIR) δείχνει ότι η παραγωγή 1 κιλού Al στην πρωτογενή παραγωγή απαιτεί υδροηλεκτρικό

ρεύμα 150MJ με απόδοση 89%. Εναλλακτικές λύσεις για υδροηλεκτρική ενέργεια, μαύρος άνθρακας ή φυσικό αέριο, έχει σχετικά χαμηλή απόδοση. Ο μαύρος άνθρακας καταναλώνει 211MJ/kg με απόδοση 35% και φυσικό αέριο απαιτεί 150MJ/kg με απόδοση 54%. Η κατανάλωση ενέργειας της δευτερογενούς παραγωγής έχει υπολογιστεί σε 6 και 10 MJ/kg με απόδοση 60%-80%. Έχει αναφερθεί σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας περίπου 90-95% δευτερογενές αλουμίνιο σε σύγκριση με το πρωτογενές αλουμίνιο, το οποίο παρουσιάζει μεγάλη έλξη σήμερα και θα είναι μια πιθανή ρουτίνα παραγωγής στο μέλλον. Μεταξύ των σημερινών παγκόσμιων 60-εκατομμυρίων σε προμήθεια αλουμινίου, το 50% προέρχεται από δευτερογενή παραγωγή και ανακύκλωση αλουμινίου. (Wei, 2012)

Εάν έπρεπε να αντικατασταθούν εκατομμύρια δοχεία αλουμινίου από ολοκαίνουργια δοχεία κατασκευασμένα εξ ολοκλήρου από παρθένα υλικά, η ποσότητα ενέργειας που σπαταλάτε μέσω αυτής της διαδικασίας θα εκτοξευόταν στα ύψη. Η ανακύκλωση αλουμινίου εξοικονομεί περισσότερο από το 90% της ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή αλουμινίου από παρθένους φυσικούς πόρους. Η ίδια ποσότητα ενέργειας που χρησιμοποιείται για την κατασκευή ενός μόνο κουτιού αλουμινίου από μετάλλευμα βωξίτη είναι η ίδια ενέργεια που χρησιμοποιείται για την κατασκευή 20 δοχείων από ανακυκλωμένο αλουμίνιο. Υπολογίζεται επίσης ότι εάν όλα τα δοχεία που αποστέλλονταν σε χώρους υγειονομικής ταφής είχαν ανακυκλωθεί, η ποσότητα ενέργειας που εξοικονομείται από αυτό θα μπορούσε να παράσχει ενέργεια σε 1,3 εκατομμύρια αμερικανικά σπίτια. Ως βιώσιμο μέταλλο, είναι πολύ λιγότερο δαπανηρό και πολύ πιο ενεργειακά αποδοτική, η παραγωγή προϊόντων από ανακυκλωμένο αλουμίνιο.

Η ανάκτηση και η επαναχρησιμοποίηση των ανακυκλώσιμων πόρων είναι μέσα για την επίλυση της αντίφασης μεταξύ των απαιτήσεων της διαδικασίας οικονομικής ανάπτυξης και της περιορισμένης χρήσης των φυσικών πόρων. Σύμφωνα με μελέτες της Ευρωπαϊκής Ένωσης Αλουμινίου (EAA), το αλουμίνιο που διατίθεται μετά την κατανάλωση για τη διαδικασία ανακύκλωσης θα μπορούσε να υπερδιπλασιαστεί έως το 2050 στην Ευρώπη, από 3,8 εκατομμύρια τόνους ετησίως σε 8,6 εκατομμύρια τόνους ετησίως. (Padamata et al., 2021)

Τα δοχεία αλουμινίου ανακυκλώνονται σε κλειστό κύκλωμα μετά τη διαδικασία ανακύκλωσης και το αλουμίνιο μπορεί να εγχυθεί ξανά ή μπορεί να

χρησιμοποιηθεί για άλλα προϊόντα. Το ανακυκλώσιμο αλουμίνιο μπορεί να προέρχεται από ένα ευρύ φάσμα πηγών, συμπεριλαμβανομένων των βιομηχανιών και των ιδιωτικών νοικοκυριών. Περιλαμβάνουν επίσης μεταλλικά δοχεία που χρησιμοποιούνται ως συσκευασία από μεγάλους κατασκευαστές ποτών (χυμούς και μπύρα). Τα αλουμινένια δοχεία ποτών είναι, όπως τα PET, πανταχού παρόντα, αλλά οι ομοιότητες σταματούν εδώ. Σε αντίθεση με το πλαστικό, το αλουμίνιο μπορεί να ανακυκλωθεί στο άπειρο χωρίς να υποβαθμιστεί καθόλου.

Έτσι, από όλες τις ανακυκλώσιμες συσκευασίες, τα δοχεία αλουμινίου έχουν γίνει η πιο καινοτόμος και ανθεκτική συσκευασία. Το αλουμίνιο μπορεί να ανακυκλωθεί επ' αόριστον χωρίς να χάσει τις ιδιότητές του σε αντίθεση με άλλα ανακυκλώσιμα υλικά όπως πλαστικό, χαρτί ή γυαλί, τα οποία μπορούν να ανακυκλωθούν για περιορισμένο αριθμό φορών. Η βιομηχανία αλουμινίου έχει όλο το ενδιαφέρον να προωθήσει την ανακύκλωση ως μέρος της βιομηχανικής στρατηγικής. Στην Ευρώπη, περίπου το 50% του συνολικού αλουμινίου που χρησιμοποιείται για την παραγωγή νέων δοχείων αναψυκτικών και άλλων προϊόντων συσκευασίας αλουμινίου προέρχεται από ανακυκλωμένο αλουμίνιο.

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση το ποσοστό ανάκτησης των απορριμμάτων κυμαίνεται μεταξύ 40-70%, τα τελευταία στατιστικά στοιχεία που δείχνουν ότι ο ρυθμός ανακύκλωσης δοχείων αλουμινίου φτάνει περίπου 65%. Παγκοσμίως, δύο στα τρία δοχεία ανακυκλώνονται, αλλά μόνο ένα στα τρία για παράδειγμα ανακυκλώνεται στη Ρουμανία, ή περίπου το 30–35%. (Bulei et al., 2018)

Σύμφωνα με τους Hasan et al. η ανακύκλωση του αλουμινίου εξοικονομεί έως και 95% της ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή πρωτογενούς μετάλλου, επειδή η ανακύκλωση του αλουμινίου απαιτεί μόνο το 5% της ενέργειας για την παραγωγή δευτερογενούς μετάλλου σε σύγκριση με το πρωτογενές μέταλλο και παράγει μόνο το 5% των αερίων θερμοκηπίου εκπομπών. Η ανακύκλωση ενός κιλού αλουμινίου μπορεί να εξοικονομήσει περίπου 8 κιλά βωξίτη, 4 κιλά χημικών προϊόντων και 14 κιλοβατώρες ηλεκτρικής ενέργειας.

Το ποσοστό ανακύκλωσης των δοχείων αλουμινίου είναι υψηλότερο από οποιοδήποτε άλλο χρησιμοποιημένο υλικό συσκευασίας λόγω της υψηλής αξίας του παλιοσίδηρου και αυτό συνοδεύεται από περισσότερες πιο ανεπτυγμένες τεχνολογίες διαλογής και ανάκτησης, για παράδειγμα είκοσι δοχεία αλουμινίου μπορούν να

ανακυκλωθούν με την ίδια ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή ενός νέου κουτιού από πρώτες ύλες.

Η ανακύκλωση δοχείων αναψυκτικών αλουμινίου είναι κερδοφόρα και επιτυχημένη βιομηχανία και οι περισσότερες βιομηχανικές χώρες έχουν μια εθνική ένωση ανακύκλωσης κονσερβών που προσφέρει στους συλλέκτες επαφή με οργανισμούς αγορών, αλλά εξακολουθούν να διαφέρουν από χώρα σε χώρα ανάλογα με τα προγράμματα συλλογής, διαλογής και ανακύκλωσης που εφαρμόζονται και την πρόοδο της εφαρμογής του. Τα δοχεία αλουμινίου μπορούν να συμπιεστούν σε μπάλες ή να τεμαχιστούν για να μειωθούν οι απαιτήσεις αποθήκευσης και μετατροπής στο σημείο που λιώνουν για επαναχρησιμοποίηση. (Bdeir, 2008)

5.1.2 Μελέτη 2^{ης} Περίπτωσης: Πλαστικές φιάλες PET

Η αυξανόμενη διεθνής πίεση για μείωση της χρήσης πλαστικών συσκευασιών μιας χρήσης, δεδομένων των επιζήμιων περιβαλλοντικών επιπτώσεών τους, οδήγησε στην ενθάρρυνση της επαναχρησιμοποίησης η οποία εντάσσεται πλέον στις μακροχρόνιες απαιτήσεις για αυξημένη ανακύκλωση. (Beswick-Parsons et al., 2023) Τα πλαστικά χρησιμοποιούνται παντού στη συσκευασία λόγω των ελαφριών, ανθεκτικών, χαμηλού κόστους και προστατευτικών ιδιοτήτων τους. Ωστόσο, οι αρνητικές περιβαλλοντικές και κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις της συσκευασίας μίας χρήσης προκαλούν αυξανόμενη ανησυχία. (Bradley & Corsini, 2023)

Η μεγάλη ποσότητα της παραγωγής πλαστικών προκαλεί περιβαλλοντικά προβλήματα σε όλο τον κόσμο σε κάθε τους στάδιο από την εξόρυξη, έως την παραγωγή και κατανάλωση αλλά και στο τέλος τους, δηλαδή στη διάθεση. Πρώτα απ' όλα, τα παραδοσιακά πλαστικά κατασκευάζονται με τη διαδικασία που βασίζεται στα ορυκτά καύσιμα, η μη ανανεώσιμη ενέργεια που καταναλώνεται στην εξόρυξη ορυκτών καυσίμων και πολλά από τα αέρια του θερμοκηπίου που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα συμβάλουν στην κλιματική αλλαγή. Επιπλέον, στο τέλος της ζωής τους, δεν ανακυκλώνεται όλο το πλαστικό, μέρος του καταλήγει σε χώρους υγειονομικής ταφής, μολύνοντας το έδαφος ή στον αποτεφρωτή, μολύνοντας ξανά την ατμόσφαιρα, αλλά στη χειρότερη περίπτωση πετιέται στο περιβάλλον. (Stefanini et al., 2021a)

Σύμφωνα με εκτιμήσεις του Παγκόσμιου Οικονομικού Φόρουμ, η πλαστική παραγωγή αντιπροσωπεύει το 4–8% της παγκόσμιας παραγωγής πετρελαίου. Από

αυτές, οι πλαστικές συσκευασίες μίας χρήσης αντιπροσωπεύουν το 40% όλων των πλαστικών που παράγονται, με πάνω από 161 τόνους. (Bradley & Corsini, 2023)

Σύμφωνα με την ENSO Bottles, στη δεκαετία του 1960 η παραγωγή πλαστικών φιαλών ήταν αμελητέα αλλά με τα χρόνια σημειώθηκε ανησυχητική αύξηση στις φιάλες που παράγονται και πωλούνται, αλλά με το ποσοστό ανακύκλωσης τους να παραμένει χαμηλό.

Τα κύρια μειονεκτήματα των πλαστικών μπουκαλιών είναι η διάτμηση του χρόνου που χρειάζονται για να αποσυντεθεί με μέσο όρο ένα πλαστικό μπουκάλι να χρειάζεται 500 χρόνια. Η αποσύνθεση μπορεί να προκληθεί από διάφορους παράγοντες, όπως οι τύποι πλαστικού, το κλίμα και τα οξέα στη χωματερή. Το πλαστικό κατασκευάζεται με χρήση λαδιού από προϊόντα και υλικό φυσικού αερίου που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε πολλά άλλες εφαρμογές.

Το τυπικό πλαστικό μπουκάλι μιας χρήσης προορίζεται για μία χρήση, και όχι για πολλές. Τα ανακυκλωμένα πλαστικά μπουκάλια δεν ξαναγεμίζονται και τα αδύναμα πλαστικά μπουκάλια δεν οδηγούνται καλά σε επαναχρησιμοποίηση στο σπίτι. Τα μπουκάλια νερού, για παράδειγμα, επαναχρησιμοποιούνται συχνά στο σπίτι αλλά γίνονται όλο και λιγότερο στιβαρά με την πάροδο του χρόνου και τελικά πετιούνται.

Σύμφωνα με τους Farooq et al. η ανακύκλωση πλαστικού δεν είναι τόσο απλή. Πολλά από τα πλαστικά μπουκάλια που τοποθετούνται σε κουτιά ανακύκλωσης δεν ανακυκλώνονται καθόλου, καθώς τα περισσότερα δεν μπορούν να ανακυκλωθούν και αυτά που ανακυκλώνονται δεν χρησιμοποιούνται για την κατασκευή νέων μπουκαλιών. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να χρησιμοποιηθούν περισσότερες πρώτες ύλες για τη δημιουργία νέων πλαστικών μπουκαλιών κάτι το οποίο δεν συμβαίνει εύκολα με άλλα ανακυκλωμένα υλικά, όπως το γυαλί ή ο κασσίτερος. (farooq et al., 2020)

Η επαναχρησιμοποίηση των ειδών συσκευασίας διαδραματίζει βασικό ρόλο στην επίτευξη της βιώσιμης διαχείρισης πόρων, και έναν από τους κύριους στόχους έννοια της κυκλικής οικονομίας. Σε αντίθεση με άλλους τομείς, η αγορά ποτών εξακολουθεί να κυριαρχείται σε μεγάλο βαθμό από μιας χρήσης συσκευασίες. (Tua et al., 2020a)

Σύμφωνα με τους Coelho et al. οι επαναχρησιμοποιήσιμες μορφές συσκευασίας έχουν χρησιμοποιηθεί ιστορικά σε πολλές εφαρμογές και εξακολουθούν να

βρίσκονται, τόσο στο B2B (Business-to-Business, συμπεριλαμβανομένων δευτερευουσών συσκευασιών ή συσκευασίας μεταφοράς, π.χ. κιβώτια, παλέτες) όσο και στο B2C (Business-to-Consumer, επίσης που ονομάζεται πρωτογενής συσκευασία, π.χ. μπουκάλια μπύρας). Ωστόσο, οι επαναχρησιμοποιήσιμες συσκευασίες αναγνωρίζονται ως μια πιο αποτελεσματική επιλογή για τη μείωση των επιπτώσεων του όγκου των υλικών συσκευασίας και της ενέργειας που χρησιμοποιείται, ενώ παράλληλα αποτρέπονται οι εκπομπές παραγωγής.

Υπολογίζεται ότι τουλάχιστον το 20% των πλαστικών συσκευασιών θα μπορούσε να αντικατασταθεί από επαναχρησιμοποιήσιμα συστήματα. Το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο έχει ζητήσει αύξηση του μεριδίου της επαναχρησιμοποίησης στο 10% έως το 2030. Η επαναχρησιμοποιήσιμη συσκευασία μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σύστημα προϊόντος-υπηρεσίας, στο οποίο αντί να πωλείται απλώς ένα προϊόν, παρέχεται μια υπηρεσία στον καταναλωτή. (Coelho, Corona, ten Klooster, et al., 2020a)

Σε όλη την Ευρώπη, το μερίδιο αγοράς των επαναχρησιμοποιήσιμων δοχείων για ποτά μειώθηκε από 41% (90 δισεκατομμύρια μονάδες πωλήθηκαν) το έτος 2000 σε 21% (55 δισεκατομμύρια μονάδες) το έτος 2015. Παρά την πτώση αυτή, τα επαναχρησιμοποιήσιμα μπουκάλια μπορούν να αποτελέσουν μια έγκυρη βιώσιμη εναλλακτική λύση για τα μπουκάλια μίας χρήσης. Για παράδειγμα, στη συσκευασία μπύρας, μια πρόσφατη γερμανική μελέτη έδειξε καλές περιβαλλοντικές επιδόσεις για γυάλινες φιάλες σε περίπτωση τοπικών αγορών (σε απόσταση 100 χλμ.) και τουλάχιστον 25 παρόμοια αποτελέσματα αναφέρθηκαν και για το γαλλικό πλαίσιο. Ένα σύστημα βασισμένο σε γυάλινες φιάλες μπύρας με 20 επαναχρησιμοποιήσεις και απόσταση διανομής έως 250 χλμ. έδειξε χαμηλότερες επιπτώσεις σε σύγκριση με ένα ισοδύναμο σύστημα που βασίζεται σε γυάλινες φιάλες μίας χρήσης με μείωση 86% για την οξίνιση, 79% για την κλιματική αλλαγή και 76% για την κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας. Επίσης, στον τομέα των ανθρακωμένων αναψυκτικών, τα αναγεννημένα γυάλινα μπουκάλια είχαν ως αποτέλεσμα μια βιώσιμη επιλογή. (Tua et al., 2020b)

Περιβαλλοντικά, οι διαθέσιμες μελέτες δείχνουν ότι γενικά ένα επαναχρησιμοποιήσιμο σύστημα συσκευασίας έχει μικρότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο από τα συστήματα μίας χρήσης. Οι βασικοί ανταγωνισμοί είναι οι επιπτώσεις που σχετίζονται με την παραγωγή και διάθεση υλικών από τη μία πλευρά

και οι επιπτώσεις της αυξημένης μεταφοράς από την άλλη. Επιπλέον, η απόρριψη και η ανακύκλωση τόσο του επαναχρησιμοποιήσιμου όσο και του συστήματος μιας χρήσης είναι σημαντική. (Coelho, Corona, ten Klooster, et al., 2020b)

Για να συμβάλει στη μείωση αυτή, η ΕΕ έχει καθορίσει πολιτικές κυκλικής οικονομίας με στόχο την αύξηση των ποσοστών ανακύκλωσης των συσκευασιών. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό και αποτελεσματικό στην περίπτωση των πλαστικών, δεδομένου έχουν αναγνωριστεί ως κύριοι παράγοντες που συμβάλλουν στην περιβαλλοντική ρύπανση. Δυστυχώς, το ποσοστό ανακύκλωσης πλαστικών συσκευασιών στην Ευρώπη ήταν μόνο 34,6 % το 2020 , το οποίο είναι πολύ χαμηλότερο από τον στόχο της ΕΕ για 50% έως το 2025. (Ingrao & Wojnarowska, 2023a)

Οι συσκευασίες από τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET) αντιπροσώπευαν το 44,7% των συσκευασιών αναψυκτικών μίας χρήσης στις ΗΠΑ το 2021 και το 12% των παγκόσμιων στερεών αποβλήτων. Το μπουκάλι PET έχει πολλές ιδιότητες που το καθιστούν μια φιλική προς το περιβάλλον επιλογή, καθώς έχει καλές ιδιότητες φραγμού, καθώς η μονό – στρωματική και μονό - υλική σύνθεση του επιτρέπει την πιο εύκολη ανακύκλωσή του. (Benyathiar et al., 2022a)

Στα δοχεία PET από πρώτες ύλες που προέρχονται από ορυκτά καύσιμα, η μέση ζήτηση πρωτογενούς ενέργειας (λαμβάνοντας υπόψη την ανώτερη θερμογόνο δύναμη των καυσίμων είναι 71,2 MJ/kg πολυμερούς. Αυτά τα δεδομένα αφορούν τη μέθοδο παραγωγής PET απευθείας από τερεφθαλικό οξύ και αιθυλενογλυκόλη.

Στην πράξη, υπάρχουν εγκαταστάσεις για την παραγωγή PET που βασίζονται σε ακατέργαστα υλικά που λαμβάνονται αποκλειστικά από την επεξεργασία αργού πετρελαίου και εκείνων όπου η πηγή των πρώτων υλών είναι τόσο αργό πετρέλαιο όσο και φυσικό αέριο. Οι ενεργειακές ανάγκες (71,2 MJ/kg κατά μέσο όρο) καλύπτονται κυρίως με ενέργεια από μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (69,6 MJ/kg κατά μέσο όρο) και, σε μικρή έκταση, με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (1,6 MJ/kg κατά μέσο όρο). Η ενέργεια από μη ανανεώσιμες πηγές είναι το άθροισμα της ενέργειας της πρώτης ύλης και της ενέργειας που χρησιμοποιείται για την υλοποίηση της διαδικασίας παραγωγής PET.

Στη δομή της κατανάλωσης φορέων πρωτογενούς ενέργειας για την παραγωγή 1 kg PET, το μεγαλύτερο μερίδιο λαμβάνεται από την ενέργεια από αργό πετρέλαιο, περίπου 66,1% (47,07 MJ), μικρότερο μερίδιο καταλαμβάνει η ενέργεια από το φυσικό

αέριο (23,4%), από λιθάνθρακα (2,33%), λιγνίτη (1,52%) και άλλες πηγές (6,57%). (Marczak, 2022)

Σήμερα, σύμφωνα με το Welle τα μπουκάλια PET χρησιμοποιούνται για αναψυκτικά, μεταλλικό νερό, ενεργειακά ποτά, παγωμένα τσάγια καθώς και για πιο ευαίσθητα ροφήματα όπως μπύρα, κρασί και χυμούς. Η ποσότητα των φιαλών PET για ποτά εξακολουθεί να αυξάνεται παγκοσμίως. Για μεγάλο χρονικό διάστημα, ωστόσο, η ανακύκλωση υλικών συσκευασίας μετά την κατανάλωση τους ήταν δυνατή μόνο για γυάλινες φιάλες και βάζα, όπως και για μεταλλικά δοχεία. Για τις συσκευασίες πολυμερών, η ανακύκλωση υλικών συσκευασίας μετά την κατανάλωση σε εφαρμογές συσκευασίας άμεσης επαφής με τρόφιμα ήταν αδύνατη λόγω έλλειψης κατανόησης της μόλυνσης από πολυμερή συσκευασίας κατά την πρώτη χρήση ή τις ανακλήσεις. (Welle, 2011)

Σε σύγκριση με το γυαλί, το μπουκάλι PET είναι ελαφρύ και έχει χαμηλότερο αποτύπωμα άνθρακα στην παραγωγή και τη μεταφορά. Με τις σύγχρονες εξελίξεις στις διαδικασίες απολύμανσης του ανακυκλωμένου PET μετά την κατανάλωση (rPET ή PCR), έχει γίνει ένα ασφαλές υλικό για επαναχρησιμοποίηση ως συσκευασία ποτών. (Benyathiar et al., 2022b)

Οι φιάλες PET είναι τα πιο οικονομικά απόβλητα και οι εγκαταστάσεις ανάκτησης μπορούν να επιτύχουν καθαρότητα ροής 95 % και ποσοστό ανάκτησης 93%. Αυτές και άλλες σχετικές ανησυχίες δίνουν έμφαση στην ανάγκη να προωθηθούν σενάρια βιώσιμης απόρριψης που προσανατολίζονται στην ανακύκλωση και έτσι στην παραγωγή ποιοτικών δευτερογενών πρώτων υλών που, επομένως, μπορούν να αντιπροσωπεύουν έγκυρες εναλλακτικές λύσεις στα προϊόντα που προέρχονται από πετρέλαιο. (Ingrao & Wojnarowska, 2023b)

Κάθε λεπτό, ένα εκατομμύριο φιάλες PET καταναλώνονται σε όλο τον κόσμο. Παγκοσμίως, το 2007, περίπου το 10% των χρησιμοποιημένων φιαλών PET συλλέχθηκαν και ανακυκλώθηκαν σε 3,6 εκατομμύρια τόνους νιφάδων PET. Περίπου το 72% αυτών των νιφάδων PET μετατράπηκαν σε ίνες, περίπου το 10% μετατράπηκαν σε ανακυκλωμένα μπουκάλια και το 18% σε άλλα προϊόντα (π.χ. φύλλα και ταινίες). Αναμένεται ότι στο μέλλον όλο και περισσότερα χρησιμοποιημένα μπουκάλια θα ανακυκλώνονται ξανά σε μπουκάλια. (Shen et al., 2011)

Μια εκτίμηση είναι ότι περισσότερα από 480 δισεκατομμύρια πλαστικά μπουκάλια πόσιμου πωλήθηκαν το 2016 σε όλο τον κόσμο από περίπου 300 δισεκατομμύρια μπουκάλια μια δεκαετία πριν και έφθασαν σε περίπου 500 δισεκατομμύρια πλαστικά μπουκάλια που πωλήθηκαν το 2020 και 583,3 δισεκατομμύρια έως το 2021. Ωστόσο, τα ανακυκλωμένα μπουκάλια αντιπροσωπεύουν μόνο ένα κλάσμα αυτών που πωλούνται με ένα καλό ποσοστό της εκτιμώμενης παγκόσμιας ημερήσιας παραγωγής περίπου ενός δισεκατομμυρίου φιαλών PET μιας χρήσης να μην ανακυκλώνονται. Προκειμένου να ικανοποιηθούν οι ολόενα και πιο απαιτητικοί περιβαλλοντικοί κανονισμοί, ο επανασχεδιασμός προϊόντων μαζικής παραγωγής για βιώσιμη επαναχρησιμοποίηση παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον. (Hamade et al., 2020a)

Επί του παρόντος, τόσο οι πρωτοβουλίες του κλάδου όσο και οι ρυθμιστικοί φορείς στοχεύουν στη χρήση υψηλότερου ποσοστού ανακυκλωμένου περιεχομένου PET για να διασφαλίσουν τη διατήρηση ενός συστήματος κλειστού βρόχου. Συγκεκριμένα, η ανακύκλωση από «μπουκάλι σε μπουκάλι» για PET στη ποιότητα τροφίμων θεωρείται ένας εξαιρετικά αποτελεσματικός τρόπος για τη διασφάλιση υψηλής ποιότητας ανακυκλωμένου υλικού. Ορισμένοι παραγωγοί χρησιμοποιούν έως και 100% rPET για τα εμφιαλωμένα προϊόντα τους και η χρήση του rPET για πλαστικές συσκευασίες στην Ευρώπη έχει αυξηθεί εντυπωσιακά τα τελευταία χρόνια. Η μέση ανακυκλωμένη περιεκτικότητα σε ευρωπαϊκά μπουκάλια PET ήταν 11% το 2018. Αρκετές πρωτοβουλίες του κλάδου και εταιρείες του ιδιωτικού τομέα έχουν δεσμευτεί να αυξήσουν τα ποσοστά ανακύκλωσης και το ανακυκλωμένο περιεχόμενο στα προϊόντα τους. Εκεί, στοχεύουν στην ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση του 65% του υλικού συσκευασίας PET έως το 2030, εκ των οποίων το 30% στοχεύει σε κλειστό βρόχο και το 25% του περιεχομένου ανακύκλωσης μετά την κατανάλωση να είναι ο στόχος για τα πλαστικά γενικά έως το 2025. (Pinter et al., 2021)

Με διαφορετικά σενάρια τέλους ζωής (επαναχρησιμοποίηση, ανακύκλωση ή ανακατασκευή), το δυναμικό «Energy End of Life» είναι ένα μέτρο της ενέργειας που θα μπορούσε ενδεχομένως να ανακτηθεί στο τέλος της ζωής ενός προϊόντος. Σύμφωνα με μια μελέτη των Hamade et al. ακόμη και για μία επαναχρησιμοποίηση μιας τυπικής 500 ml φιάλη PET, τα ευρήματά υπολογίζουν ότι μια επαναχρησιμοποίηση φιάλης 500 ml θα εξοικονομήσει περίπου 1 MJ ανά φιάλη. Σε σύγκριση με την επιλογή της ανακύκλωσης, οι εκτιμήσεις υπολογίζουν 74% περισσότερη εξοικονόμηση ενέργειας

και παράγουν 182% λιγότερο CO₂ για μία επιλογή επαναχρησιμοποίησης. Για τον εκτιμώμενο κόσμο ημερήσια παραγωγή ενός δισεκατομμυρίου φιαλών, με την προϋπόθεση ότι όλα τα μπουκάλια επαναχρησιμοποιούνται μόνο μία φορά, η εξοικονόμηση ενέργειας που προκύπτει υπολογίζεται σε $0,365 * 10^{18}$ J (ή 0,365 Exa Joules) ενέργειας. Ομοίως, $0,033 \text{ kg CO}_2$ ανά φιάλη ή $0,033 \text{ kg CO}_2 * 365 * 10^9 = 1,1 * 10^{10} \text{ kg CO}_2$ εξοικονόμηση μπορεί να πραγματοποιηθεί ετησίως. Αναλογικά πολλαπλάσια αυτής της εξοικονόμησης ενέργειας και CO₂ μπορούν να πραγματοποιηθούν για πολλαπλές επαναχρησιμοποιήσεις με το ίδιο μπουκάλι PET. Για παράδειγμα, πέντε επαναχρησιμοποιήσεις μιας φιάλης PET 500 mL θα οδηγούσαν σε παγκόσμια ετήσια εκτίμηση εξοικονόμησης ενέργειας 1,82 Exa Joules. (Hamade et al., 2020b)

Επιπλέον, οι περιβαλλοντικές του επιδόσεις μπορούν να βελτιωθούν χρησιμοποιώντας ανακυκλωμένο PET στη διαδικασία παραγωγής φιαλών. Ωστόσο, κοιτάζοντας μόνο την ενσωματωμένη ενεργειακή παράμετρο (που ορίζεται ως το άθροισμα όλων των ενεργειών που απαιτούνται για την παραγωγή της συσκευασίας), το αλουμίνιο είναι το υλικό συσκευασίας με τη χαμηλότερη τιμή ανά λίτρο ποτού. Μια περιβαλλοντικά ανταγωνιστική εναλλακτική λύση στη φιάλη PET θα μπορούσε να είναι η επαναχρησιμοποιήσιμη συσκευασία. Πράγματι, οι Ferrara et al. επεσήμανε ότι αυτές οι εναλλακτικές λύσεις μπορούν να έχουν τελικά περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη αντί για τη συσκευασία μιας χρήσης. (Ferrara et al., 2021)

Έχουν καθοριστεί υποχρεωτικοί στόχοι ανακύκλωσης για συγκεκριμένους τύπους υλικών συσκευασίας για το 2025 και το 2030. Προκειμένου να ανταποκριθούν στη φιλοδοξία της ΕΕ να κινηθεί προς μια κυκλική οικονομία, οι στόχοι που είχαν τεθεί προηγουμένως για το 2025 αναθεωρήθηκαν προς τα πάνω. Για το 2030, για παράδειγμα, ο στόχος για το ποσοστό ανακύκλωσης όλων των απορριμμάτων συσκευασίας έχει αυξηθεί από 65% σε 75%, συνεπάγοντας αυξήσεις στους στόχους για διαφορετικά υλικά συσκευασίας. Οι στόχοι για τις συσκευασίες από αλουμίνιο και γυαλί έχουν αυξηθεί από 75% σε 85%, ενώ για τις πλαστικές συσκευασίες ο στόχος για το 2025 έχει αυξηθεί από 50% σε 55%.

Εν τω μεταξύ, αναπτύχθηκε μια νέα στρατηγική για την αντιμετώπιση των πλαστικών απορριμμάτων, με στόχο τα 100% επαναχρησιμοποιήσιμα ή εύκολα ανακυκλώσιμα πλαστικά απόβλητα το 2030. Η «Οδηγία για τα πλαστικά μίας χρήσης»

του 2019 όρισε νέους στόχους για τα ποσοστά συλλογής πλαστικών φιαλών 77% έως το 2025 και 90% έως το 2029 και για ανακυκλωμένο περιεχόμενο για μπουκάλια τερεφθαλικού πολυαιθυλενίου, 25% έως το 2025 και 30% έως το 2030. Επιπλέον, προβλέπονται ειδικές απαιτήσεις σχεδιασμού για τις φιάλες PET. (Sazdovski et al., 2021)

Για κάθε φιάλη PET 500mL, η επιλογή ανακύκλωσης με μέθοδο EOL, επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενέργειας 0,53 MJ ενώ για την επιλογή επαναχρησιμοποίησης επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενέργειας 0,925 MJ. Τα ευρήματα υποστηρίζουν επίσης την επαναχρησιμοποίηση συγκρίνοντας τις τιμές παραγωγής CO₂ για αυτά τα σενάρια EOL. Αποτύπωμα CO₂ 0,0117 CO₂ kg και 0,0331 CO₂ kg πραγματοποιούνται για την επιλογή ανακύκλωσης και την επιλογή μίας επαναχρησιμοποίησης, αντίστοιχα. (Hamade et al., 2020c)

5.1.3 Μελέτη 3ης Περίπτωσης: Γυάλινες φιάλες

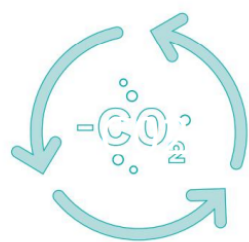
Η βιομηχανία παραγωγής γυαλιού είναι μια βιομηχανία έντασης ενέργειας και κεφαλαίου που έχει έναν από τους υψηλότερους όγκους παραγωγής κατά κεφαλήν παγκοσμίως. Ο κλίβανος, όπου γίνεται η τήξη και το φινίρισμα του γυαλιού, ευθύνεται για την πλειονότητα της κατανάλωσης ενέργειας. Στην παραγωγή γυάλινων δοχείων, αυτό το μέρος της διαδικασίας συνήθως καταναλώνει περίπου το 75-80% της ενέργειας. (Uthayakumar, 2020) Σήμερα, η κουλτούρα της ανακύκλωσης γυαλιού έχει αυξηθεί παγκοσμίως, επειδή έχει δεσμευτεί να αναπτύξει τεχνολογίες για συμμόρφωση με τις περιβαλλοντικές πολιτικές. Σε αυτό το πλαίσιο, είναι απαραίτητο να δημιουργηθούν νέες στρατηγικές ανακύκλωσης γυαλιού επειδή δεν είναι βιοδιασπώμενο και παραμένει σταθερό για μεγάλο χρονικό διάστημα. (Guerrero et al., 2021)

Ερευνητές στο Πανεπιστήμιο του Southampton εντόπισαν το γυαλί ως το πιο επιβλαβές για το περιβάλλον υλικό για δοχεία ποτών υπό πίεση, όταν ληφθούν υπόψη σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής τους. Τα γυάλινα μπουκάλια κατατάχθηκαν τελευταία στην ανάλυση, καθώς καταναλώνουν συγκριτικά τους περισσότερους πόρους και ενέργεια για να παραχθούν. Τα ανακυκλωμένα δοχεία αλουμινίου ήταν το λιγότερο επιβλαβές για το περιβάλλον δοχείο μιας χρήσης που εξετάστηκε στην έρευνα. (University of Southampton, 2020)

Το γυαλί μιας χρήσης έχει αποδειχθεί ότι έχει το υψηλότερο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε σύγκριση με άλλα μιας χρήσης υλικά σύμφωνα με τον Srebny. Από την άλλη πλευρά, το επαναχρησιμοποιούμενο γυαλί προσφέρει τη μεγαλύτερη δυνατότητα μείωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, οι επαναχρησιμοποιούμενες γυάλινες φιάλες παράγουν 85% λιγότερες εκπομπές άνθρακα από τις αντίστοιχες μιας χρήσης, 75% λιγότερες εκπομπές άνθρακα από πλαστικό PET και 57% λιγότερες εκπομπές άνθρακα από δοχεία αλουμινίου. (Srebny, 2020)

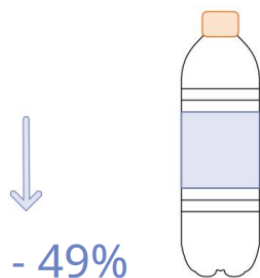
Η αναθεώρηση του Κανονισμού Συσκευασιών και Απορριμμάτων Συσκευασίας (PPWR) πρέπει να καλύπτει όλες τις συσκευασίες, η τρέχουσα πρόταση παρέχει μεγαλύτερη προτίμηση στη μεταχείριση του γυάλινου μιας χρήσης εξαιρώντας το από το κυκλικές απαιτήσεις που εφαρμόζονται σε μεταλλικές και πλαστικές συσκευασίες ποτών (π.χ. συστήματα υποχρεωτικής επιστροφής κατάθεσης [DRS]), καθώς και με την απόρριψη αλκοολούχων ποτών (τα περισσότερα από τα οποία είναι συσκευασμένα σε γυάλινα μπουκάλια) από τους στόχους επαναχρησιμοποίησης. Αυτό το πλεονέκτημα δίνει άδικο προτεραιότητα στο γυαλί παρά το σημαντικά υψηλότερο αποτύπωμα άνθρακα σε σύγκριση με το άλλα υλικά. (Morawski et al., 2023)

Οι επαναχρησιμοποιούμενες γυάλινες φιάλες έναντι των γυάλινων μπουκαλιών μιας χρήσης παρουσίασαν τη σημαντικότερη μείωση στις εκπομπές CO₂ από όλες τις συσκευασίες. Το γυαλί μιας χρήσης έχει τη μεγαλύτερη συνολική επίδραση σε σύγκριση με οποιοδήποτε άλλο υλικό συσκευασίας. Αυτό αποδίδεται στη φάση παραγωγής γυαλιού. Ωστόσο, το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη μειώνεται με τον αριθμό των φορών που επαναχρησιμοποιείται ένα γυάλινο μπουκάλι. (Morlet, 2020)

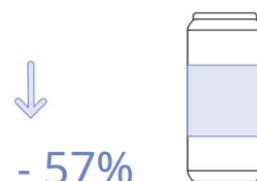


- 80,5%

Μείωση των εκπομπών CO2 από την παραγωγή γυαλιού μετά την επαναχρησιμοποίηση ενός μπουκαλιού 20 φορές.



Μείωση των εκπομπών CO2 από επαναχρησιμοποίηση γυάλινη φιάλη έναντι PET μιας χρήσης, με βάση 20 κύκλους.

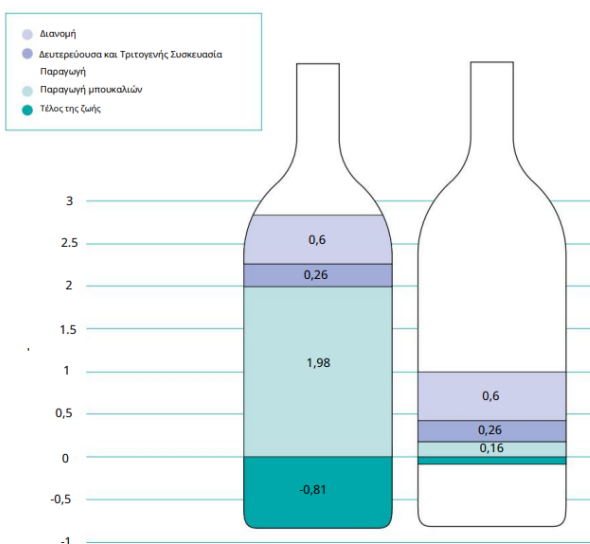


Μείωση των εκπομπών CO2 από μια επαναχρησιμοποιήσιμη γυάλινη φιάλη έναντι αλουμινίου μιας χρήσης, με βάση 20 κύκλους.

Εικόνα 6 Τα επαναχρησιμοποιήσιμα γυάλινα μπουκάλια έναντι των γυάλινων μπουκαλιών μιας χρήσης, των πλαστικών PET μιας χρήσης και του αλουμινένιων δοχείων μιας χρήσης. (Morlet, 2020)

Εκπομπές ανά στάδιο του κύκλου ζωής

Βασισμένο σε ένα μπουκάλι κρασιού 75cl



Γυάλινη φιάλη μιας χρήσης Επαναχρησιμοποιήσιμη γυάλινη φιάλη

Εικόνα 7 Μπουκάλι κρασιού 75 cl μιας χρήσης και επαναχρησιμοποιήσιμη. (Morlet, 2020)

Η ανακύκλωση γυαλιού φέρνει περιβαλλοντικά, οικονομικά και κοινωνικά οφέλη. Το γυαλί είναι 100% ανακτήσιμο και μπορεί να ανακυκλωθεί ατελείωτα χωρίς να χάσει τις ιδιότητες ή τη λειτουργικότητά του. Με κάθε 3000 γυάλινες φιάλες κανονικού μεγέθους που ανακυκλώνονται (75 cm [cl]/μπουκάλι), εξοικονομούμε 1000 kg συσσώρευσης απορριμμάτων. Από την άποψη της υγείας, η ανακύκλωση γυαλιού μειώνει τη ρύπανση του αέρα και του νερού, η οποία μεταφράζεται σε οφέλη για την υγεία και εξοικονόμηση κόστους για υγειονομική περίθαλψη. Η ανακύκλωση γυαλιού μειώνει την ποσότητα των τοξικών σωματιδίων και αερίων που απελευθερώνονται

στον αέρα κατά περίπου 20% και ταυτόχρονα περιορίζει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ή την υπερθέρμανση του πλανήτη. Για κάθε τόνο ανακυκλωμένου γυαλιού (cullet), εξοικονομούνται 670 kg διοξειδίου του άνθρακα από την είσοδο στην ατμόσφαιρα. Η ποιότητα του πόσιμου νερού βελτιώνεται επίσης κατά περίπου 50% λόγω της ανακύκλωσης γυαλιού, μειώνοντας τον κίνδυνο μόλυνσης ή χημικής δηλητηρίασης για τον καταναλωτή. (Aguilar-Jurado et al., 2019a)

Όπως ορίζεται στην ιεραρχία των αποβλήτων, η στροφή προς την επαναχρησιμοποίηση θα πρέπει σταδιακά να γίνει ο κανόνας τις επόμενες δεκαετίες. Οι γυάλινες συσκευασίες διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη συνεχιζόμενη μετάβαση προς βιώσιμα συστήματα. Ωστόσο, για να συμβάλει αποτελεσματικά στους στόχους βιωσιμότητας, το γυαλί πρέπει να απομακρυνθεί από τις εφαρμογές μιας χρήσης και να επικεντρωθεί σε αυτές των συστημάτων επαναχρησιμοποίησης. Οι πολιτικές της Ευρωπαϊκής Ένωσης θα πρέπει να πρωτοστατήσουν στην ενθάρρυνση των παραγωγών γυαλιού και των χρηστών δοχείων και να υιοθετήσουν το επαναχρησιμοποιήσιμο γυαλί και την εφαρμογή μέτρων που υποστηρίζουν την ανακύκλωση υψηλής ποιότητας. (Morawski et al., 2023)

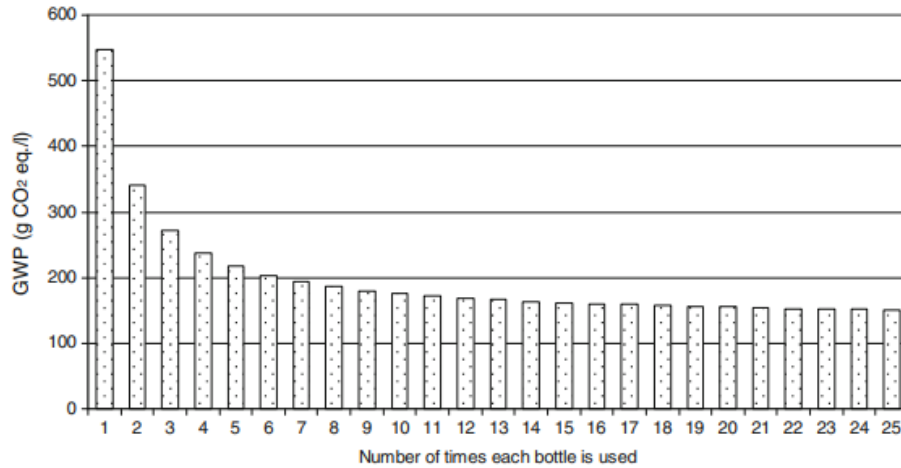
Η ανακύκλωση γυαλιού μειώνει επίσης τη ρύπανση της γης και ενθαρρύνει μια κυκλική οικονομία μειώνοντας την κατανάλωση των φυσικών πόρων που είναι απαραίτητοι για την παραγωγή γυαλιού όπως η άμμος, ο ασβεστόλιθος, το ανθρακικό νάτριο κ.λπ. έτσι προσφέρει τόσο οικονομική εξοικονόμηση όσο και μειωμένη υποβάθμιση του εδάφους. Επιπλέον, σε σύγκριση με τις πρώτες ύλες που είναι απαραίτητες για την κατασκευή γυαλιού, το cullet έχει χαμηλότερο σημείο τήξης, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα εξοικονόμηση ενέργειας 26,6%. Αυτό μεταφράζεται σε 136 λίτρα πετρελαίου που εξοικονομούνται για κάθε τόνο γυαλιού που ανακυκλώνεται. (Aguilar-Jurado et al., 2019b)

Ο διεθνής οργανισμός για τη διατήρηση των ωκεανών Oceana με μια πρόσφατη αξιολόγηση LCA σύγκρινε το αποτύπωμα άνθρακα, την κατανάλωση νερού και τη παραγωγή απορριμμάτων για επαναχρησιμοποιήσιμα γυάλινα μπουκάλια, με ανακυκλώσιμα μπουκάλια PET μιας χρήσης και δοχεία αλουμινίου. Η αξιολόγηση διαπίστωσε ότι τα επαναχρησιμοποιήσιμα γυάλινα μπουκάλια, αν και ζυγίζουν περισσότερο, παράγααν το λιγότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο όσον αφορά την κατανάλωση και τη σπατάλη νερού κατά τη παραγωγής η οποία μειώθηκε κατά 37%.

Εξετάζοντας τη συγκεκριμένη περίπτωση επαναχρησιμοποιήσιμων φιαλών PET σε σύγκριση με μίας χρήσης μπουκάλια, αυτές οι αναλύσεις διαπίστωσαν ότι τα επαναχρησιμοποιήσιμα εξοικονομούν έως και 40% των πρώτων υλών και 50% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Τέλος τα επαναχρησιμοποιήσιμα μπουκάλια είχαν χαμηλότερα ίχνη άνθρακα από τα πλαστικά μπουκάλια μιας χρήσης, με 68,7 kgCO₂e/1000 λίτρα για επαναχρησιμοποιήσιμα PET, 85 kgCO₂e/1000 λίτρα για επαναχρησιμοποιήσιμα γυάλινα μπουκάλια και 139 kgCO₂e/1000 λίτρα για PET μιας χρήσης. (Oceana Protecting the World's Ocean, 2020)

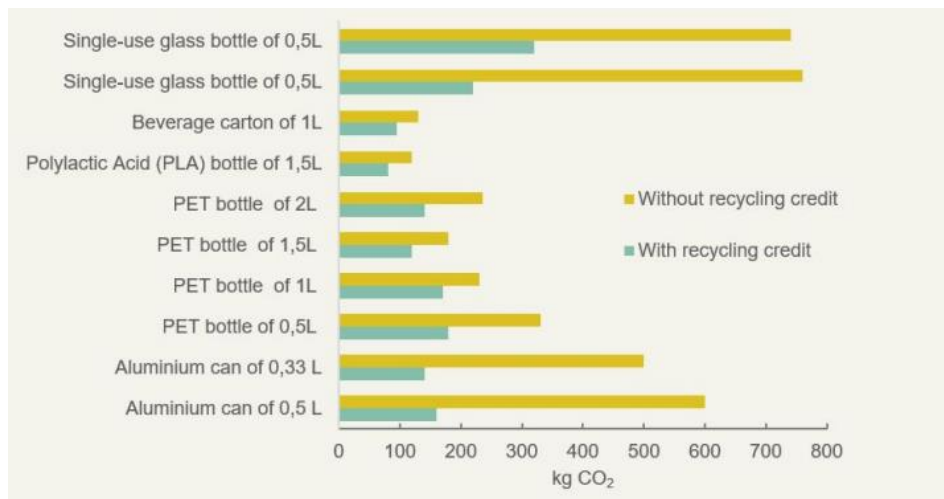
Δεδομένου ότι η επαναχρησιμοποίηση γυάλινων μπουκαλιών είναι καλύτερη από την ανακύκλωση από περιβαλλοντική άποψη, μένει να κατανοήσουμε για πόσους κύκλους είναι βολικό να υιοθετήσουμε αυτήν τη μέθοδο απόρριψης. Με την επαναχρησιμοποίηση της γυάλινης φιάλης μόνο μία φορά, η πρόσκρουση μπορεί να μειωθεί κατά 40%. Σύμφωνα με τη μελέτη των Stefanini et al. τα αποτελέσματα της οποίας δείχνουν ότι εάν η γυάλινη φιάλη επαναχρησιμοποιηθεί τρεις φορές, έχει αντίκτυπο παρόμοιο με τα δοχεία αλουμινίου ή τα μπουκάλια PET. Η καλύτερη λύση είναι να επαναχρησιμοποιήσουμε γυάλινα μπουκάλια 1-5 φορές, ανάλογα με τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας της επέμβασης. (Stefanini et al., 2021b)

Σύμφωνα με τους Amienyo et al. οι οποίοι αναφέρουν ότι με την επαναχρησιμοποίηση του γυάλινου μπουκαλιού μόνο μία φορά, η υπερθέρμανση του πλανήτη, το δυναμικό μειώνεται κατά περίπου 40%, ωστόσο το όφελος δεν αυξάνεται με τον ίδιο ρυθμό για τη δεύτερη επαναχρησιμοποίηση και σταθεροποιείται πλήρως μετά από οκτώ επαναχρησιμοποιήσεις. (Amienyo et al., 2013) Καθώς ο αριθμός των κύκλων αυξάνεται, ο αντίκτυπος από την παραγωγή κατανέμεται στην αυξημένο διάρκεια ζωής και οι επιπτώσεις στη συνέχεια συνδέονται με τη μεταφορά και τον καθαρισμό (Coelho, Corona, ten Klooster, et al., 2020b)



Γραφήμα 1: Δυνητική απεικόνιση της επίδρασης του επαναχρησιμοποιημένου γυάλινου μπουκαλιού για την υπερθέρμανση του πλανήτη (Amienyo et al., 2013)

Όσο υψηλότερο ήταν το ποσοστό ανακυκλωμένου περιεχομένου οποιουδήποτε υλικού τόσο μειώνεται ο αντίκτυπος της παραγωγής. Αυτό οφείλεται στην αποτροπή διεργασιών ανάκτησης νέου υλικού. Αυτό υποστηρίζεται από τη βιβλιογραφία για γυαλί και πλαστικό. Για το γυαλί, κάθε μερίδιο 10% του γυαλιού μειώνει την ενέργεια κατανάλωση κατά 3%, εκπομπές CO₂ κατά 5%, ατμοσφαιρική ρύπανση κατά 20% και ρύπανση των υδάτων κατά 50% (Westbroek et al., 2021).



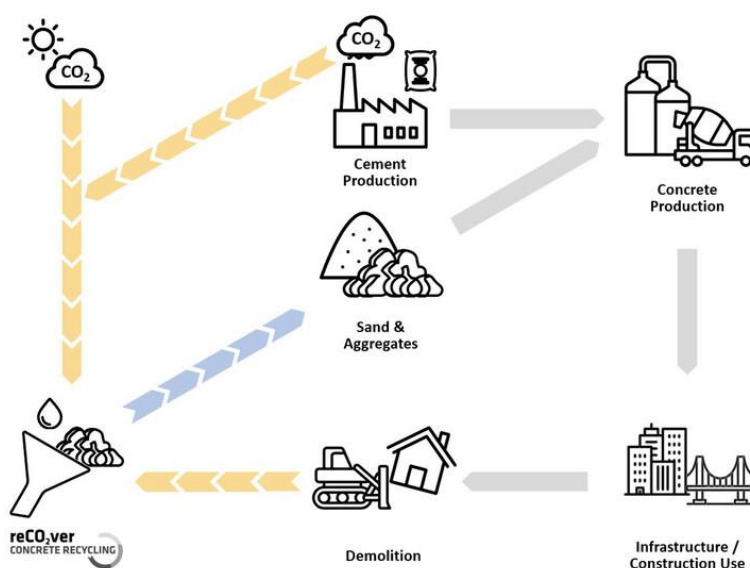
Γράφημα 2: Επιπτώσεις στις εκπομπές CO₂ σε ένα σύστημα συσκευασίας ποτών πριν και μετά από την ανακύκλωση (Coelho, Corona, & Worrell, 2020)

6^ο Κεφάλαιο

6.1 Μελέτες Περιπτώσεων: Οικοδομικών Υλικών

6.1.1 Μελέτη 4^{ης} Περίπτωσης: Τσιμέντο

Καθώς η αστικοποίηση αλλάζει το παγκόσμιο τοπίο, η ζήτηση για επέκταση του δομημένου περιβάλλοντος αυξάνεται. Αυτή η απαίτηση αντικατοπτρίζει τόσο την ανάγκη επισκευής υποδομών (π.χ. δρόμους, κτίρια) σε χώρες όπου τα παλιά συστήματα έχουν χάσει τη λειτουργικότητά τους όσο και την ανάγκη δημιουργίας νέας υποδομής σε χώρες που επεκτείνουν τα υπάρχοντα συστήματα. Για να καλυφθεί αυτή η αυξημένη ζήτηση σε συστήματα υποδομής, η παραγωγή των πιο κοινών υλικών υποδομής έχει αυξηθεί, με τον ρυθμό παραγωγής τσιμέντου να ξεπερνά όχι μόνο όλα τα άλλα υλικά, αλλά και την αύξηση του πληθυσμού. (Miller et al., 2018)



Εικόνα 7 Κύκλος επαναχρησιμοποίησης τσιμέντου (Verma et al., 2020)

Η βιομηχανία τσιμέντου έχει χαρακτηριστικά υψηλής ενεργειακής κατανάλωσης και υψηλών εκπομπών, επομένως η βιομηχανία όχι μόνο επιταχύνει την εξάντληση των μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αλλά προκαλεί επίσης περιφερειακή ατμοσφαιρική ρύπανση και παγκόσμιες εκπομπές άνθρακα. (Xiang et al., 2024)

Σύμφωνα με τους Mossie et al. & Verma et al. η βιομηχανία τσιμέντου καταναλώνει περίπου το 7% της παγκόσμιας βιομηχανικής κατανάλωσης ενέργειας, υποδεικνύοντας ότι ο κλάδος είναι υψηλής έντασης ενέργειας (Mossie et al., 2023a)

και απαιτεί την ανάγκη για μεγάλες ποσότητες πόρων, συνεπώς, προκαλεί σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Περίπου το 11% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας στις βιομηχανίες αντιστοιχεί μόνο στην τσιμεντοβιομηχανία. (Verma et al., 2020) Στη διαδικασία παραγωγής τσιμέντου, έχουν χρησιμοποιηθεί διαφορετικές πηγές ενέργειας, είτε με τη μορφή ηλεκτρικής ενέργειας είτε με τη μορφή θερμικής ενέργειας. (Mossie et al., 2023b)

Σύμφωνα με τους Porto et al. η παγκόσμια παραγωγή τσιμέντου, η οποία έφτασε τα 4.050 Mt το 2018, ευθύνεται για το 27% εκπομπών, ο μεγαλύτερος κλάδος ο οποίος συνεισφέρει με περίπου 2,3 Gt που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή κλίνκερ. Διαπιστώθηκε ότι τα ορυκτά καύσιμα αντιπροσωπεύουν το μεγαλύτερο μερίδιο και μόλις ένα 3% προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές. Ωστόσο, τα μη ανανεώσιμα απόβλητα αποκτούν εξέχουσα θέση, κατέχοντας μερίδιο περίπου 6% αυτών των εισροών. Είναι επίσης σημαντικό να σημειωθεί ότι η ενεργειακή ένταση του τσιμέντου συνδέεται άμεσα με την αναλογία κλίνκερ προς τσιμέντο, η οποία έχει παγκόσμιο μέσο όρο 0,7. Επομένως, η συνολική ενεργειακή ένταση της παραγωγής τσιμέντου είναι περίπου 4,86 GJ/t τσιμέντο. (Marenco-Porto et al., 2023)

Για την παραγωγή ενός τόνου τσιμέντου σε μια μονάδα ξηρής επεξεργασίας τσιμέντου, απαιτούνται κατά μέσο όρο 110 kWh ηλεκτρικής ενέργειας και 3,4 GJ (δηλαδή, 81,21 kg ισοδύναμου πετρελαίου) θερμικής ενέργειας, η οποία υπόκειται σε αλλαγές ανάλογα με τον τύπο της τεχνολογίας, και της πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται. Η θερμική ενέργεια χρησιμοποιείται κυρίως στο στάδιο της πυροεπεξεργασίας ή πύρωσης που αντιπροσωπεύει το 93–99% της συνολικής κατανάλωσης θερμικής ενέργειας. Η ηλεκτρική ενέργεια καταναλώνεται κυρίως σε τρία στάδια: το στάδιο λείανσης τσιμέντου (38%), το στάδιο προετοιμασίας της πρώτης ύλης (33%) και το στάδιο πυροεπεξεργασίας (22%). Αντίστοιχα, το κόστος της ενέργειας σε αυτόν τον κλάδο είναι υψηλό και αντιπροσωπεύει σχεδόν το 30–40% του συνολικού κόστους παραγωγής. (Mossie et al., 2023b)

Η διαδικασία παραγωγής τσιμέντου είναι πολύ σύνθετη και αποτελείται από πρώτες ύλες με διαφορετικές ιδιότητες, διάφορες μεθόδους πυρο-επεξεργασίας και διαφορετική ποικιλία πόρων. Κατά προσέγγιση, η διαδικασία απαιτεί 3,2-6,3 GJ ενέργειας και περίπου 1,7 τόνους πρώτων υλών (κυρίως ασβεστόλιθου) ανά τόνο παραγόμενου κλίνκερ. Όντας μια ενεργοβόρα βιομηχανία (παραγωγή τσιμέντου), η

ζήτηση θερμικής ενέργειας μπορεί να είναι περίπου 20-25% της συνολικού κόστους παραγωγής τσιμέντου. (Verma et al., 2020)

Η υψηλή θερμοκρασία που απαιτείται για τη κατασκευή τσιμέντου καθιστά τη διαδικασία ενεργοβόρα. Η μέση ενέργεια που απαιτείται για να φτιαχτεί ένας τόνος τσιμέντου ήταν 4,45 εκατομμύρια Btu το 2010. Η κατανάλωση ενέργειας, για τη παραγωγή τσιμέντου των ΗΠΑ αντιπροσωπεύει περίπου το 2,4% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας. Λόγω των αυστηρών απαιτήσεων ποιότητας των προϊόντων, το τσιμέντο παράγεται από κλιβάνους που χρησιμοποιούν εναλλακτικά υλικά ή καύσιμα τα οποία πρέπει να είναι ίσης ποιότητας με το τσιμέντο από κλιβάνους που χρησιμοποιούν συμβατικά υλικά ή καύσιμα. (Paradopoulos, 2011)

Σύμφωνα με τους Atmaca et al. περίπου το 2% της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται σε ολόκληρο τον κόσμο χρησιμοποιείται κατά τη διαδικασία άλεσης των πρώτων υλών. Ενώ η συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για την παραγωγή τσιμέντου είναι περίπου 100 kWh/τόνο τσιμέντου, περίπου τα δύο τρίτα χρησιμοποιούνται για τη μείωση του μεγέθους των σωματιδίων. Περίπου το 65% της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται σε ένα εργοστάσιο τσιμέντου χρησιμοποιείται για την άλεση άνθρακα, πρώτων υλών και κλίνκερ. (Atmaca & Kanoglu, 2012)

Το μερίδιο της ενέργειας που καταναλώνεται σε ένα εργοστάσιο κλιβάνου κλίνκερ τσιμέντου σύμφωνα με τον Radwan φτάνει το 70-78% της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται στη διαδικασία παραγωγής τσιμέντου στο σύνολό της. Το υπόλοιπο (22-30%) είναι το μερίδιο της ηλεκτρικής ενέργειας. Από την άλλη πλευρά, για την καύση της μονάδας κλιβάνου κλίνκερ, η θερμική ενέργεια αντιπροσωπεύει το 92-96% της απαιτούμενης ενέργειας και η ηλεκτρική ενέργεια αντιπροσωπεύει μόνο το 4-8%. (Radwan, 2012)

Σύμφωνα με τους Madloul et al. Ως κλάδος έντασης ενέργειας, συνήθως αυτό το τμήμα της βιομηχανίας αντιπροσωπεύει το 50-60% του συνολικού κόστους παραγωγής. Η θερμική ενέργεια αντιπροσωπεύει περίπου το 20-25% του κόστους παραγωγής τσιμέντου. Η τυπική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ενός σύγχρονου εργοστασίου τσιμέντου είναι περίπου 110-120 kWh ανά τόνο τσιμέντου. Η κύρια θερμική ενέργεια χρησιμοποιείται κατά τη διαδικασία καύσης, ενώ η ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται για την άλεση τσιμέντου. Η πυροεπεξεργασία

καταναλώνει το μεγαλύτερο μέρος της θερμικής ενέργειας. Περίπου το 33% της ενέργειας χρησιμοποιείται για υλικά λειτουργίας και το 38% για εξοπλισμό σύνθλιψης και λείανσης κλίνκερ (38%). Ένα άλλο 22% της ενέργειας δαπανάται για πυροεπεξεργασία. Αυτό μπορεί να στοχεύει στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας με την εφαρμογή οικονομικά βιώσιμων και ενεργειακά αποδοτικών τεχνολογιών. Μπορούν να αναπτυχθούν νέες τεχνολογίες για τη μείωση της ενεργειακής του κατανάλωσης καθώς καταναλώνεται σημαντική ενέργεια κατά τη λειτουργία άλεσης στη διαδικασία παραγωγής τσιμέντου. (Madloul et al., 2011)

Η ενέργεια που απαιτείται για την επίτευξη θερμοκρασιών πυροσυσσώματωσης (περίπου 1450 °C) και όλες οι διεργασίες πριν και μετά τη διαδικασία πυροσυσσώματωσης συνεπάγονται την καύση σημαντικών ποσοτήτων ορυκτών καυσίμων, τόσο άμεσα (παραγωγή θερμικής ενέργειας) όσο και έμμεσα (μέσω παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας). Οι εκπομπές που προκύπτουν από τη θερμική επεξεργασία της πρώτης ύλης για τη λήψη του κλίνκερ, που αναφέρονται ως εκπομπές ενέργειας, μπορούν να προσθέσουν επιπλέον 60%-90% CO₂ στις εκπομπές της διεργασίας, ανάλογα με την τεχνολογία που χρησιμοποιείται. (Sousa & Bogas, 2021)

Η μονάδα παραγωγής τσιμέντου έχει υψηλότερο δυναμικό να διαχειριστεί όλες αυτές τις τάσεις ως ένα ολοκληρωμένο σύστημα για να την εξοικονόμηση ενέργειας, τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και την ανάκτηση των αποβλήτων. Σύμφωνα με τα στοιχεία των Cambureau, περίπου το ένα τρίτο όλων των απορριμμάτων στην Ευρώπη προέρχεται από κατασκευή και κατεδάφιση. Τα ποσοστά ανάκτησης είναι 95% στην Ολλανδία, για παράδειγμα, έναντι ενός ευρωπαϊκού μέσου όρου μεταξύ 30% και 60%. Ως εκ τούτου, οι παραγωγοί στον κατασκευαστικό κλάδο θα πρέπει να συνεργαστούν και να βελτιώσουν την συλλογή και διαλογή των απορριμμάτων κατεδάφισης για τη δημιουργία ενός οικονομικά βιώσιμου συστήματος που ενθαρρύνει τη χρήση των απορριμμάτων. (Cembureau, 2016)

Σε αυτό το πλαίσιο, η βιομηχανία σκυροδέματος είναι ένας βασικός τομέας δεδομένου ότι είναι, το δεύτερο πιο καταναλωτικό υλικό παγκοσμίως, μόλις υπολείπεται του νερού, με περισσότερους από 30 δισεκατομμύρια τόνους που υπολογίζεται ότι καταναλώνονται ετησίως παγκοσμίως και είναι υπεύθυνη για το 9-10% των παγκόσμιων εκπομπών CO₂ και γενικώς τα περισσότερα εκπεμπόμενα GHG. Η πλειονότητα των συστατικών σκυροδέματος (αδρανών) συνεπάγεται κυρίως την

κατανάλωση μεγάλων ποσοτήτων φυσικής πρώτης ύλης, με εκτιμώμενη κατανάλωση 2,4 τόνων ανά κυβικό μέτρο σκυροδέματος. Αλλά το σκυρόδεμα ενσωματώνει το μεγαλύτερο μέρος των άνω των 4 δισεκατομμυρίων τόνων τσιμέντου που παράγονται ετησίως παγκοσμίως, το οποίο είναι υπεύθυνο για πάνω από το 75% των εκπομπών CO₂ από σκυρόδεμα. Στην πραγματικότητα, η παραγωγή τσιμέντου από μόνη της είναι υπεύθυνη για το 7-8% όλων των ανθρωπογενών εκπομπών CO₂. (Sousa et al., 2023)

Χρησιμοποιώντας τα απόβλητα ως καύσιμο, η τσιμεντοβιομηχανία συμβάλλει για την ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού, η οποία ευθυγραμμίζεται πλήρως το πρόσφατα δημοσιευμένο πακέτο για την Energy Union. Το 2014, η ευρωπαϊκή βιομηχανία τσιμέντου χρησιμοποίησε μια ενέργεια ισοδύναμη περίπου 15,8 Mt άνθρακα, ένα μη ανανεώσιμο απολίθωμα καυσίμων, για την παραγωγή 172 Mt τσιμέντου. Εναλλακτικά καύσιμα, συμπεριλαμβανομένης της βιομάζας αποβλήτων, αποτελούσε το 41% αυτού του συνόλου στην Ευρώπη, εξοικονομώντας περίπου 6,5 εκατομμύρια τόνους άνθρακα. Το 2014 διαμορφώθηκε στο 37% με αποτέλεσμα 18 Mt αποφευχθείσες εκπομπές CO₂ κάθε χρόνο. Οι εκπομπές από τη βιομάζα των αποβλήτων είναι κλιματικά ουδέτερες. Το 14% των εναλλακτικών καυσίμων που χρησιμοποιεί η ευρωπαϊκή βιομηχανία τσιμέντου αποτελούνται από βιομάζα από απόβλητα. (Cembureau, 2016)

Οι εκπομπές GHG του τσιμέντου, ιδίως το CO₂, προέρχονται από δύο κύριες πηγές, τις εκπομπές που σχετίζονται με τα καύσιμα και τις εκπομπές που σχετίζονται με τη διαδικασία. Εκτός από τις εκπομπές GHG, που είναι το πιο σχετικό περιβαλλοντικό ζήτημα με την παραγωγή σκυροδέματος και το σχετικό τσιμέντο που απαιτείται, το σκυρόδεμα ευθύνεται επίσης για περίπου 3% της παγκόσμιας ζήτησης ενέργειας και 2% της παγκόσμιας ζήτησης νερού, αντίστοιχα και πάνω από 5% των παγκόσμιων ανθρωπογενών εκπομπών PM₁₀. (Sousa et al., 2023)

Τα πιθανά οφέλη από την ανάκτηση και την επαναχρησιμοποίηση δομικών προϊόντων κτιρίων είναι μια ελκυστική πρόταση σύμφωνα με τους Hopkinson et al. , για διάφορους λόγους. Τα δομικά προϊόντα αποτελούν υψηλό ποσοστό του κόστους κατασκευής και έχουν υψηλή ενσωματωμένη ενέργεια. Ο χάλυβας και το αλουμίνιο μαζί ευθύνονται για περίπου το 51% της συνολικής ενσωματωμένης ενέργειας στα οικοδομικά υλικά, με το σκυρόδεμα να είναι υπεύθυνο για περίπου 17%. Ενώ η άμεση συντήρηση και επαναχρησιμοποίηση των προϊόντων έχει σημαντικά περιβαλλοντικά

οφέλη έναντι της ανακύκλωσης, μόνο ένα μικρό ποσοστό στο Ηνωμένο Βασίλειο (περίπου 3 Mt) ανακτάται για άμεση επαναχρησιμοποίηση, κυρίως για προϊόντα πολιτιστικής κληρονομιάς ή εύκολα αποσυναρμολογούμενες κατασκευές, όπως χαλύβδινα τμήματα από κουφώματα πυλών (περίπου Το 4% του συνόλου του χάλυβα στα κτίρια επαναχρησιμοποιείται έναντι του 92% που ανακυκλώνεται). Υπάρχει ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον και πρακτική για μεθόδους σχεδιασμού για αποδόμηση για να διασφαλιστεί η μελλοντική κυκλικότητα, αν και πολλά από αυτά επικεντρώνονται στη χρήση νέων υλικών και προϊόντων, αντί να χρησιμοποιούν κτίρια τα οποία βρίσκονται στο τέλος ζωής τους ως πιθανή πρώτη ύλη. (Hopkinson et al., 2018)

Η επαναχρησιμοποίηση στοιχείων σκυροδέματος στην κατασκευή νέων κτιρίων, όταν αυτό φτάνει στο τέλος της ζωής του, το οποίο συνήθως δεν οφείλεται σε ζημιά, υποβάθμιση ή φυσική κατάσταση αλλά μάλλον σε νέες χωρικές ανάγκες, εξοικονόμησης ενέργειας και συμπύκνωσή των αστικών περιέχων, αποτρέπει τη δημιουργία μεγάλου όγκου αποβλήτων. Η ανάγκη μείωσης των απόβλητων, η εξόρυξη πρώτων υλών και η ελαχιστοποίηση του κινδύνου μελλοντικής έλλειψης εφοδιασμού υλικών μπορεί να επιτευχθεί με την επαναχρησιμοποίηση εξαρτημάτων σκυροδέματος. Η επαναχρησιμοποίηση στοιχείων σκυροδέματος σε νέες κατασκευές επεκτείνει τη διάρκεια ζωής του σκυροδέματος και καθυστερεί τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου μειώνοντας την ανάγκη για τη παραγωγή νέων υλικών. Ο κύριος ορισμός της επαναχρησιμοποίησης λοιπόν είναι να επαναχρησιμοποιήσει ένα προϊόν και να του δώσει την ίδια λειτουργία που είχε πριν. (Mostert et al., 2021)

Σύμφωνα με τους Küpfer et al. η στρατηγική επαναχρησιμοποίησης αναγνωρίζεται από τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας ως βασικός ερευνητικός άξονας για μεγαλύτερη απόδοση υλικών. Πράγματι, τα κτίρια, ειδικά σε αστικές περιοχές με υψηλή πίεση γης, συνήθως κατεδαφίζονται για λόγους που δεν σχετίζονται με την ποιότητα του υλικού και τη δομική απόδοση. Τα φέροντα συστήματα τους είναι γενικά καλά προστατευμένα από τις καιρικές συνθήκες κατά τη διάρκεια της ζωής τους και τα εξαρτήματά τους κυρίως το σκυρόδεμα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν περισσότερο, δηλαδή να επαναχρησιμοποιηθούν σε νέα έργα. Πρώιμες μελέτες σχετικά με την τμηματική επαναχρησιμοποίηση του εξαγόμενου σκυροδέματος σε νέες κατασκευές (PRECS) καταδεικνύουν ταυτόχρονες μειώσεις της παραγωγής απορριμμάτων, της κατανάλωσης πρώτων υλών και των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου. (Küpfer et al., 2023a)

Η ενέργεια καταναλώνεται άμεσα κατά την κατασκευή, χρήση και κατεδάφιση κτιρίου ενώ έμμεσα μέσω της παραγωγής και της κατασκευής των υλικών (ενσωματωμένη ενέργεια) που χρησιμοποιούνται στα κτίρια. Η οικοδομική βιομηχανία καταναλώνει το 40% των υλικών που εισέρχονται στην παγκόσμια οικονομία, ενώ εκτιμάται ότι μόνο το 20-30% αυτών των υλικών ανακυκλώνονται ή επαναχρησιμοποιούνται στο τέλος της ζωής ενός κτιρίου (Papadaki et al., 2022)

Η στρατηγική επαναχρησιμοποίησης αναγνωρίζεται από τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας ως βασικός ερευνητικός άξονας για μεγαλύτερη απόδοση υλικών (IEA, 2019). Καθώς τα φέροντα υλικά αντιπροσωπεύουν το μεγαλύτερο μερίδιο των ενσωματωμένων αερίων θερμοκηπίου στα κτίρια, η επαναχρησιμοποίησή τους δυνητικά επιτρέπει τα υψηλότερα περιβαλλοντικά οφέλη, όπως έχει ήδη μετρηθεί από πολλά κατασκευασμένα έργα και μελέτες προσομοίωσης. (Küpfer et al., 2023b)

6.1.2 Μελέτη 5^{ης} Περίπτωσης: Θερμομονωτικά Υλικά

Επί του παρόντος, στην Ευρωπαϊκή Ένωση, περίπου το 40% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας προκαλείται από κτίρια κατοικιών, τριτογενή κτίρια, καταστήματα, γραφεία και άλλα βοηθητικά κτίρια, (Ferrández et al., 2022) τα οποία ευθύνονται για το 40% της συνολικής τελικής κατανάλωσης ενέργειας στην ΕΕ. (Porrás-Amores et al., 2021a) Οι κατασκευές είναι ο δεύτερος μεγαλύτερος κλάδος στην κατανάλωση πλαστικών, παραμένοντας στο εύρος του 16% έως 23%. Επίσης, αυτός ο τομέας καταναλώνει περίπου το 30% και το 40% της κατανάλωσης ενέργειας, που ευθύνεται για περισσότερο από το 33% των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου που σχετίζονται με την ενέργεια στον κόσμο. (Marín-Calvo et al., 2023a)

Ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας ανέφερε ότι το 2021 ο τομέας των κτιρίων είναι, άμεσα και έμμεσα, υπεύθυνος για περίπου το ένα τρίτο των συνολικών τελικών εκπομπών CO₂ που σχετίζονται με την ενέργεια και τις διεργασίες, υποδιαιρούμενες ως εξής, 8 % από τη χρήση ορυκτών καυσίμων σε κτίρια, το 19 % από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας που χρησιμοποιείται στα κτίρια και το 6 % αφορά την κατασκευή τσιμέντου, χάλυβα και αλουμινίου που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή κτιρίων. (Frasca et al., 2023) Υπολογίζεται ότι τα κτίρια καταναλώνουν τουλάχιστον το 40% της ενέργειας και το 16% του νερού που χρησιμοποιείται ετησίως. Η ενεργειακή ανάπτυξη στις περισσότερες αναπτυγμένες χώρες αντιπροσώπευε

περίπου το 13,6% της συνολική κατανάλωσης ενέργειας και το 48% της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται σε εμπορικά κτίρια και κτίρια κατοικιών. (Fadzil et al., n.d.)

Οι τομείς των κατασκευών, της ενέργειας και της βιομηχανίας παράγουν περίπου το 50% των αποβλήτων που παράγονται στην Ευρώπη, και συγκεκριμένα τα απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων (CDW) αντιπροσωπεύουν το 33% των αποβλήτων που παράγονται στην ΕΕ. Για το λόγο αυτό, η ΕΕ θεώρησε τη ροή CDW ως προτεραιότητα δράσης. Στην πραγματικότητα, κατά την τελευταία δεκαετία, η έντονη δραστηριότητα στον τομέα των κατασκευών στην Ευρώπη παρήγαγε περίπου 827 εκατομμύρια τόνους CDW κατά μέσο όρο ετησίως και μόνο το 50% αυτών ανακτήθηκε. (Porras-Amores et al., 2021b)

Σύμφωνα με τους Ramirez et al. η ανακύκλωση ή η επαναχρησιμοποίηση αυτών των δομικών απορριμμάτων δεν είναι μόνο θεμελιώδης για τη μείωση της ποσότητας εξόρυξης των πρώτων υλών, αλλά και για την αποφυγή της εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα ως συνέπεια της μη παραγωγής οικοδομικών υλικών. Για το λόγο αυτό, είναι θεμελιώδες να βρεθούν εναλλακτικά υλικά που προωθούν και ενθαρρύνουν την ελαχιστοποίηση της χρήσης των φυσικών πόρων, για την επιδίωξη της επαναχρησιμοποίησης, ανακύκλωσης ή ανάκτησης απορριμμάτων κατασκευών και κατεδαφίσεων. (Ramirez et al., 2021a)

Καθώς η ενέργεια γίνεται εξαιρετικά πολύτιμη, είναι απαραίτητο να αναπτυχθεί μια λύση για την εξοικονόμηση ενέργειας, ειδικά στον κτιριακό τομέα. Πράγματι, η απαίτηση για πράσινα κτίρια επεκτείνεται παγκοσμίως. Η χρήση θερμομονωτικών υλικών έχει γίνει ολοένα και πιο διαδεδομένη στα κτίρια ως μια καινοτόμος λύση για την εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια. Η θερμομόνωση είναι ένα υλικό ή ένα συγκρότημα υλικών που επιβραδύνει τη διάδοση της θερμότητας μέσω αγωγιμότητας, μεταφοράς και ακτινοβολίας όταν εφαρμόζεται σωστά. Αυτά τα προϊόντα συμβάλλουν στη μείωση της εξάρτησης από τη θέρμανση, τον εξαερισμό και τον κλιματισμό. Διατηρούν έτσι την ενέργεια και ελαχιστοποιούν τη χρήση των φυσικών πόρων αλλά το πιο σημαντικό, μετριάζουν την εκπομπή ρύπων στο περιβάλλον ενός κτιρίου. Η απόρριψη κτιρίων θα μπορούσε να έχει άλλες αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Τα οικοδομικά υλικά μπορεί να αποδειχθούν απόβλητα και ως εκ τούτου να μην είναι άμεσα διαθέσιμα για απόρριψη. Δυστυχώς, πολλά ανόργανα υλικά χρησιμοποιούνται

για την παραγωγή θερμομόνωσης, τα περισσότερα από αυτά τα υλικά προέρχονται από ορυκτοβάμβακα (52%) και πλαστικά (41%), αυτά τα υλικά δεν είναι βιώσιμα και οδηγούν σε περαιτέρω ρύπανση και προβλήματα υγείας. (Biyada et al., 2023a)

Ο πρωταρχικός σκοπός της θερμομόνωσης σύμφωνα με τους Schritt et al. είναι η αύξηση της ενεργειακής απόδοσης με την επιβράδυνση της μεταφοράς θερμότητας μέσω του περιβλήματος των κτιρίων. Υπάρχουν τρεις τρόποι μεταφοράς θερμότητας, δηλαδή η αγωγή, η συναγωγή και η ακτινοβολία. Η αγωγή προκύπτει από τις αλληλεπιδράσεις σωματιδίων σε μια ουσία (αέριο, υγρό ή στερεό) που προκύπτει από τις κινήσεις των σωματιδίων. Έτσι, η θερμότητα μεταφέρεται από πιο ενεργητικά σωματίδια στα λιγότερο ενεργητικά. Συναγωγή είναι η μεταφορά θερμότητας μεταξύ μιας στερεής επιφάνειας και ενός ρευστού σε κίνηση. Σε αυτή την περίπτωση, η θερμότητα μεταφέρεται με ένα συνδυασμό αγωγιμότητας από το στερεό στο ρευστό και τη μαζική κίνηση των σωματιδίων του ρευστού. Η συναγωγή διατηρεί τη διαφορά θερμοκρασίας και τη μεταφορά θερμότητας μεταφέροντας τα θερμαινόμενα σωματίδια και αντικαθιστώντας τα με ψυχρότερα. Η θερμική ακτινοβολία είναι μεταφορά θερμότητας με ηλεκτρομαγνητικά κύματα και δεν απαιτεί μέσο. Κάθε αέριο, υγρό ή στερεό, με μη μηδενική απόλυτη θερμοκρασία, εκπέμπει θερμική ακτινοβολία. (Schritt & Pleissner, 2022)

Η διαδικασία σχεδιασμού είναι απαραίτητη για την αποφυγή ή τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. θέτει επίσης τις βάσεις για την ενίσχυση της βιωσιμότητας του κύκλου ζωής των οικοδομικών υλικών και των κτιριακών λειτουργιών. Ο σχεδιασμός και η επιλογή υλικού μπορούν να μειώσουν τις περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις κατά την κατασκευή, την λειτουργία και την αποδόμηση. Η χρήση ανακυκλωμένων υλικών μειώνει τη χρήση παρθένων υλικών και την κατανάλωση ενέργειας, οδηγώντας σε μετριασμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Huang et al., 2020)

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά της χρήσης φυσικών ινών, εκτός από τη θερμική τους αντοχή, είναι ότι έχουν χαμηλή ενέργεια (γκρίζα ενέργεια ή ενσωματωμένη ενέργεια) στη διαδικασία παραγωγής, μεταφοράς και λήψης του τελικού προϊόντος. Κατά το σχεδιασμό και τον κλιματισμό των κτιρίων, από την άποψη της μεταφοράς θερμότητας, είναι απαραίτητο να λαμβάνονται υπόψη όλα τα υλικά που χρησιμοποιούνται κατά την κατασκευή (συγκεκριμένα τα πάχη και ο συντελεστής

θερμικής αγωγιμότητας κάθε υλικού), καθώς και οι εξωτερικές και εσωτερικές θερμοκρασίες. Από την άλλη πλευρά, περίπου το 20% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας στα κτίρια παγκοσμίως αντιστοιχεί στη χρήση κλιματιστικών. Σε αυτή την περίπτωση, ο ρόλος των θερμομονωτικών υλικών στο κέλυφος του κτιρίου είναι σημαντικός. Το περίβλημα αναγνωρίζεται ως βασικό μέρος για την ενίσχυση της θερμικής τους απόδοσης, καθώς δαπανά μεταξύ 50% και 60% της συνολικής μεταφοράς θερμότητας. (Marín-Calvo et al., 2023b)

Για να ξεπεραστούν οι προκλήσεις που σχετίζονται με τη διαχείριση απορριμμάτων, αρκετοί ερευνητές έχουν προσανατολιστεί στην παραγωγή μονώσεων από γεωργικά και βιομηχανικά απόβλητα με την επαναχρησιμοποίησή τους αντί για την απόρριψη ή την αποτέφρωση που μπορεί να μειώσει την οικονομική τους αξία και να οδηγήσει σε περιβαλλοντική επιβάρυνση, έτσι η χρήση φυσικών και τοπικών αποβλήτων οδηγεί στη μείωση της κατανάλωσης πετρελαίου και γενικά των μη ανανεώσιμων πηγών. (Biyada et al., 2023b)

Υπό αυτή την έννοια, έχουν διεξαχθεί πολυάριθμες μελέτες με επίκεντρο την ανάπτυξη νέων βιώσιμων υλικών που ενσωματώνουν απόβλητα, προκειμένου να βελτιωθούν οι φυσικές, μηχανικές ή χημικές τους ιδιότητες και έτσι να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορες εφαρμογές. Σχετικά με την ενσωμάτωση απορριμμάτων σε γύψους και σοβάδες, υπάρχουν μελέτες που αναλύουν την ενσωμάτωση απορριμμάτων χαρτιού, φελλού, υφαντικών ινών, ξύλου, φλοιού ρυζιού, πριονιδιού, ίνες άχρου, ίνες φοίνικα, γραφίτη, κεραμικού γύψου, ορυκτές ίνες και πλαστικά. Όσον αφορά την ενσωμάτωση ανακυκλωμένων υλικών σε τσιμεντοκονίαμα ή ασβεστοκονίαμα, υπάρχουν μελέτες που αναλύουν την προσθήκη απορριμμάτων από πολυμερείς ίνες, ανακυκλωμένα αδρανή, κεραμικά, ορυκτοβάμβακα, υφαντικές ίνες, ζωικές ίνες, ίνες γυαλιού, ανακυκλωμένη κυτταρίνη και φυτικές ίνες. Εκτός από τα πιθανά τεχνικά οφέλη που μπορεί να προσφέρει ένα συγκεκριμένο απόβλητο στο παραδοσιακό υλικό (γύψος, ασβέστης ή τσιμέντο), η αντικατάσταση του παραδοσιακού υλικού από ανακυκλωμένο υλικό αντιπροσωπεύει εξοικονόμηση ενέργειας και οικονομίας λόγω της μείωσης της ποσότητας της πρώτης ύλης. (Porras-Amores et al., 2021c)

Η σχολαστική μόνωση των κτιρίων θα εξοικονομούσε περίπου το 65% της κατανάλωσης ενέργειας των νοικοκυριών. Σχεδόν όλα τα διαθέσιμα θερμομονωτικά

υλικά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ευρέως σε τέσσερις ομάδες, που περιλαμβάνουν ανόργανα, οργανικά, συνδυασμένα και προηγμένα υλικά. (Biyada et al., 2023c)

Θα πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη ότι η ανθεκτικότητα του υλικού είναι θεμελιώδης παράγοντας για την καθιέρωση της απόδοσής του καθ' όλη τη διάρκεια της ωφέλιμης ζωής του. Διότι εάν ένα υλικό έχει ήδη μεγάλη διάρκεια ζωής, η παραγωγή και η σπατάλη ρύπανσης μπορούν να αποφευχθούν. Επί του παρόντος υπάρχει ένας αριθμός μελετών, που αναλύουν τις ιδιότητες ανθεκτικότητας των κονιαμάτων που κατασκευάζονται με απόβλητα από διάφορες πηγές. Έχουν βρεθεί μελέτες ανθεκτικότητας που δείχνουν ότι η ενσωμάτωση απορριμμάτων γυαλιού και ανακυκλωμένων αδρανών βελτιώνει την αντίσταση στα οξέα και μειώνει τη συρρίκνωση λόγω της ξήρανσης του κονιάματος. Υπάρχουν επίσης ερευνητικές εργασίες που επιβεβαιώνουν ότι τα απόβλητα μαρμάρου σε σκόνη βελτιώνουν τις σκληρυμένες ιδιότητες του κονιάματος, αν και η αντοχή του μειώνεται λόγω της αύξησης του πορώδους. Έχει επίσης αποδειχθεί ότι η ανθεκτικότητα των κονιαμάτων που περιέχουν απόβλητα ανακυκλωμένης άμμου παρουσιάζει πολύ παρόμοια αντοχή με εκείνα που περιέχουν μη ανακυκλωμένη άμμο. (Ramírez et al., 2021b)

Σύμφωνα με τους Biyada et al τα υφάσματα από την κλωστοϋφαντουργία έχουν προσελκύσει την προσοχή των παραγωγών θερμομόνωσης που χρησιμοποιούνται στον κατασκευαστικό τομέα εδώ και δεκαετίες και η χρήση τους έχει επεκταθεί δραματικά. Ως εκ τούτου, αυτά τα υλικά, ειδικά τα ανακυκλωμένα κλωστοϋφαντουργικά απόβλητα, έχουν επιλεγεί για να ενισχύσουν τα κτίρια λόγω των καλών ιδιοτήτων τους όπως η απορρόφηση τοξικότητας, ο καθαρισμός του αέρα, η θερμική αγωγιμότητα ($0,14 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), η υψηλή θερμική ικανότητα ($844 \text{ J/Kg}\cdot\text{K}$).), η υγραυμετρική άνεση, η απορρόφηση κραδασμών και οι ραδιενεργές εκπομπές. Το ινώδες στρώμα ενισχύει τον συντελεστή ηχοαπορρόφησης, καθώς και τον σεβασμό για το περιβάλλον και τη βιώσιμη ανάπτυξη. (Biyada et al., 2023d)

Η ανακύκλωση των κλωστοϋφαντουργικών απορριμμάτων σε μονωτικά υλικά κτιρίων έχει πιθανά οφέλη σε περιβαλλοντικούς, υγειονομικούς, κοινωνικούς και οικονομικούς τομείς. Η χρήση υψηλής ποιότητας θερμομονωτικών και ακουστικών υλικών μπορεί να μειώσει την πίεση στο περιβάλλον, την κατανάλωση ενέργειας, τον χώρο που απαιτείται για την υγειονομική ταφή, τα παρθένα ινώδη υλικά, τα αέρια του θερμοκηπίου, τη ρύπανση (θόρυβος, αέρας, νερό, γη), μπορεί να εξοικονομήσει

πετρέλαιο, καύσιμα και φυσικούς πόρους, και μπορεί να βελτιώσει την υγεία του ανθρώπινου οικότοπου. (Islam & Bhat, 2019)

Στην παραγωγή κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων, παράγεται τεράστια ποσότητα απορριμμάτων μαλλιού, τα οποία απεικονίζουν απειλή τόσο για την υγεία όσο και για το περιβάλλον. Είναι επίσης γνωστό ότι είναι ένα βιώσιμο, επαναχρησιμοποιήσιμο και φιλικό προς το περιβάλλον υλικό, το οποίο προσελκύει ολοένα και περισσότερο τους κατασκευαστές υλικών. Τα υλικά αυτά έχουν χρησιμοποιηθεί ως θερμικά και ακουστικά μονωτικά στην οικοδομική και αυτοκινητοβιομηχανία ή ως γεωφάσματα. Αυτό αποκάλυψε ότι η θερμομόνωση από μαλλί προβάτου έχει εξαιρετικά χαρακτηριστικά ακουστικής και θερμομόνωσης παρόμοια με εκείνα του ορυκτού/πετροβάμβακα και σε ορισμένες περιπτώσεις την υπερέρχει, καθώς και το γεγονός ότι το μαλλί προβάτου έχει λιγότερο επιβλαβείς πτυχές για την υγεία. (Biyada et al., 2023e)

Αν και το ύφασμα χρησιμοποιείται παραδοσιακά σε κτίρια για αισθητικές ανάγκες, αλλά παρουσιάζει επίσης πολλές λειτουργικές επιδόσεις. Υπάρχει πολλή έρευνα που έχει διεξαχθεί σχετικά με τα χαρακτηριστικά μόνωσης μη υφασμένων υφασμάτων, υφασμάτων και πλεκτών, ωστόσο έχει γίνει πολύ λιγότερη έρευνα γίνεται για τη χρήση κλωστοϋφαντουργικών απορριμμάτων ως μονωτικού υλικού. Η αξιολόγηση των μονωτικών υλικών σύμφωνα με τα κριτήρια βιωσιμότητας δείχνει ότι κανένα υλικό δεν πληρεί όλα τα κριτήρια βιωσιμότητας, αλλά ορισμένα υλικά είναι πιο βιώσιμα από άλλα. Λόγω των αρνητικών επιπτώσεων που έχουν στην ανθρώπινη υγεία καθώς και του βαθμού στον οποίο επηρεάζουν την υπερθέρμανση του πλανήτη και ότι είτε δεν μπορούν να ανακυκλωθούν καθόλου είτε δεν είναι επαναχρησιμοποιήσιμα, τα συμβατικά μονωτικά υλικά έχουν μάλλον κακή βαθμολογία όσον αφορά τη βιωσιμότητα στο πλαίσιο της αξιολόγησης του κύκλου ζωής. Τα μονωτικά υλικά που είναι οργανικά, καινοτόμα και που περιέχουν ανακυκλωμένα εξαρτήματα είναι πιο βιώσιμα από τα συμβατικά μονωτικά υλικά. Τα μονωτικά υλικά από ανακυκλωμένα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα θεωρούνται ως αειφόρα υλικά σύμφωνα με την LCA, κυρίως λόγω της δυνατότητας ανακύκλωσης, επαναχρησιμοποίησης και της χαμηλής αξίας της ενσωματωμένης ενέργειας. (Jordeva et al., 2019)

Τα γεωργικά υπολείμματα από την άλλη είναι μια από τις μεγαλύτερες περιβαλλοντικές προκλήσεις επί του παρόντος για τους αγρότες, επειδή τα οργανικά

απόβλητα θεωρούνται επικίνδυνα και η απόρριψή τους είναι πολύ δαπανηρή. Ως εκ τούτου, η επαναχρησιμοποίηση των απορριμμάτων είναι ο καλύτερος τρόπος για την ανακύκλωση αυτών των υλικών. Κοινώς, κάθε περιοχή διακρίνεται από μια ποικιλία καλλιεργειών που μπορούν να παρέχουν την κατάλληλη πρώτη ύλη. Τα γεωργικά απόβλητα μπορούν να αποτελέσουν πολύτιμο υποκατάστατο των συμβατικών μονωτικών υλικών, είναι ετησίως ανανεώσιμα και κομποστοποιήσιμα και έχουν φυσικά χαμηλή θερμική αγωγιμότητα. Από αυτή την άποψη, το κυρίαρχο υλικό είναι το άχυρο, το οποίο χρησιμοποιείται εδώ και αιώνες. Συχνά είναι άχυρο ηλίανθου ή άχυρο ρυζιού, υλικά γνωστά για τη χαμηλή θερμική τους αγωγιμότητα. (Biyada et al., 2023f)

Από αυτά, τα μονωτικά υλικά από γεωργικές πρώτες ύλες, που ονομάζονται επίσης «μονωτικό υλικό βιολογικής βάσης», αντιπροσώπευαν μόνο το 6% (2012), το 8% (2017) και το 10% (2020) της αγοράς μονωτικών υλικών, με τις προσδοκίες να ενθαρρύνονται από τις πολιτικές της ΕΕ του 13% το 2030, εκ των οποίων το 40-50% θα πρέπει να βασίζεται σε ξύλο και άλλα κυτταρινικά υλικά. (Petcu et al., 2023)

6.1.3 Μελέτη 6^{ης} Περίπτωσης: Χάλυβας

Η κατασκευή του κτιρίου οδηγεί στην τρέχουσα κατανάλωση ενέργειας και σε εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (GHG), που αντιπροσωπεύουν το 36% της συνολικής χρήσης ενέργειας και το 37% των παγκόσμιων εκπομπών GHG, αντίστοιχα. Περίπου, το 10% αυτών των εκπομπών σχετίζεται με τις εκπομπές άνθρακα που προκαλούνται από την παραγωγή υλικών στα κτίρια, η τρέχουσα ποσότητα ενσωματωμένων εκπομπών άνθρακα σε ένα νέο κτίριο είναι 600 kg CO₂e/m² κατά μέσο όρο, από αυτό το 70% αυτού του ενσωματωμένου άνθρακα εκπέμπεται εκ των προτέρων, κατά τα στάδια παραγωγής και κατασκευής του κτιρίου. Επιπλέον, οι κατασκευαστικές δραστηριότητες καταναλώνουν σημαντική ποσότητα φυσικών πόρων και παράγουν τη μεγαλύτερη ποσότητα αποβλήτων μεταξύ όλων των άλλων τομέων. (Kanyilmaz et al., 2023a)

Επομένως, υπάρχει ανάγκη να αλλάξει ριζικά το πρότυπο χρήσης υλικών για να καταστεί δυνατή η κυκλική οικονομία στις κατασκευές, πράγμα που σημαίνει ότι η διαδικασία ανακύκλωσης υλικών (αναπαραγωγή ή ανακατασκευή) θα αλλάξει σε άμεση επαναχρησιμοποίηση δομικών μελών για πιθανή αύξηση της παραγωγικότητας,

της κερδοφορίας και της μειωμένη κατανάλωση υλικών σε νέες κατασκευές. (Selvaraj & Chan, 2024)

Η αποδόμηση του κτιρίου και η προετοιμασία για επαναχρησιμοποίηση μπορεί να είναι δαπανηρή με τις τρέχουσες κατασκευαστικές τεχνολογίες. Λόγω της πρακτικής δυσκολίας στην επαναχρησιμοποίηση κατασκευών από σκυρόδεμα, λόγω ζητημάτων αποσυναρμολόγησης και σύνδεσης, ζημιών κατά την αποδόμηση αλλά και της μεταφοράς, οι χαλύβδινες κατασκευές είναι κατάλληλες και προτιμώνται έναντι του σκυροδέματος για εφαρμογές επαναχρησιμοποίησης. Η τελευταία έκθεση προτείνει ότι μόνο το 20-30% των εξαρτημάτων σκυροδέματος μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί και συμπεραίνει ότι το κόστος επαναχρησιμοποίησης των κατασκευών από σκυρόδεμα είναι υψηλό και δημιουργεί επίσης μεγάλη ποσότητα απορριμμάτων κατά την αποδόμηση.

Από την άλλη πλευρά, τα ενσωματωμένα προβλήματα βελτιστοποίησης ενέργειας σχετίζονται με τη μείωση της ενέργειας που απαιτείται κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του δομικού υλικού. Αξίζει να σημειωθεί ότι η κατασκευαστική βιομηχανία ευθύνεται για περίπου το 40% της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας. Το μερίδιο της ενσωματωμένης ενέργειας αυξάνεται καθώς η λειτουργική ενέργεια του κτιρίου γίνεται πιο αποδοτική, όπου για έξυπνα κτίρια με ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας λειτουργίας, η ενσωματωμένη υλική ενέργεια συμβάλλει από το 74% έως το 100% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας της κατασκευής. (Elsayed et al., 2021a)

Κάθε χρόνο παράγονται πάνω από 1500 εκατομμύρια τόνοι χάλυβα, προκαλώντας το 9% των παγκόσμιων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα από την ενέργεια και τις διεργασίες. Ο μισός χάλυβας χρησιμοποιείται από την κατασκευαστική βιομηχανία, εκ των οποίων το 60% χρησιμοποιείται σε κτίρια, επομένως η χρήση λιγότερου χάλυβα στα κτίρια θα μείωνε σημαντικά τις εκπομπές άνθρακα. (Moynihan & Allwood, 2014) Η ετήσια κατανάλωση ανοξειδωτού χάλυβα έχει αυξηθεί με σύνθετο ρυθμό ανάπτυξης 5% τα τελευταία 20 χρόνια, ξεπερνώντας τον ρυθμό ανάπτυξης άλλων υλικών. Ο ρυθμός ανάπτυξης του ανοξειδωτού χάλυβα που χρησιμοποιείται στις κατασκευές ήταν ακόμη πιο γρήγορος, κυρίως λόγω της ταχείας ανάπτυξης στην Κίνα. Υπολογίζεται ότι το 2006, περίπου 4 εκατομμύρια τόνοι ανοξειδωτού χάλυβα μπήκαν σε κατασκευαστικές εφαρμογές παγκοσμίως, το 14% της συνολικής ποσότητας που καταναλώθηκε. Υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ των διαφόρων χωρών στο

μερίδιο του ανοξειδώτου χάλυβα που χρησιμοποιείται στις κατασκευές. Στην Κίνα περισσότερο από το 20% πηγαίνει στις κατασκευές, ενώ στη Γερμανία το ποσοστό είναι λιγότερο από 7%. (Baddoo, 2008)

Ο τομέας σιδήρου και χάλυβα αντιπροσωπεύει άμεσα 2,6 Gt εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ετησίως, 7% του παγκόσμιου συνόλου από το ενεργειακό σύστημα και περισσότερες από τις εκπομπές από όλες τις οδικές εμπορευματικές μεταφορές. Ο τομέας του χάλυβα είναι σήμερα ο μεγαλύτερος βιομηχανικός καταναλωτής άνθρακα, που καλύπτει περίπου το 75% της ενεργειακής του ζήτησης. Ο άνθρακας χρησιμοποιείται για την παραγωγή θερμότητας και για την παραγωγή οπτάνθρακα, ο οποίος είναι καθοριστικός στις χημικές αντιδράσεις που είναι απαραίτητες για την παραγωγή χάλυβα από σιδηρομετάλλευμα. (International Energy Agency, n.d.)

Ως μεγάλα συστήματα εισροής και παραγωγής ενέργειας υλικών, οι εταιρείες χάλυβα περιλαμβάνουν πολύπλοκα δίκτυα διανομής ενέργειας που χρησιμοποιούν πολλαπλές διαφορετικές πηγές ενέργειας. Μεταξύ αυτών, το 34% της πρωτογενούς ενέργειας (καθαρισμένος άνθρακας και άνθρακας ανθρακίτη) μετατρέπεται σε αέρια υποπροϊόντα κατά τη διαδικασία παραγωγής σιδήρου και χάλυβα. Στη διαδικασία παραγωγής αυτή, υπάρχει συχνά πλεόνασμα ή έλλειψη δευτερογενούς ενέργειας, που θα οδηγήσει σε αύξηση του λειτουργικού κόστους και του κόστους περιβαλλοντικής ρύπανσης. (Hu et al., 2019)

Η ανακύκλωση και η επαναχρησιμοποίηση απορριμμάτων κατασκευών και κατεδαφίσεων σύμφωνα με τους Eckelman et al. εξοικονομεί τη χωρητικότητα των χωματερών και μειώνει τις ενεργειακές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις αποφεύγοντας την ανάγκη για νέα υλικά. Η ενσωματωμένη ενέργεια τυπικά ανέρχεται σε <20% της συνολικής ενέργειας του κύκλου ζωής των σύγχρονων κτιρίων. Ωστόσο, καθώς σχεδιάζονται και κατασκευάζονται πιο ενεργειακά αποδοτικά κτίρια και μειώνεται η ζήτηση για λειτουργική ενέργεια, οι αναλογικές επιπτώσεις της ενσωματωμένης ενέργειας θα αυξάνονται, όπως και τα οφέλη από την επαναχρησιμοποίηση των δομικών υλικών. (Eckelman et al., 2018)

Οι ερευνητές διαπίστωσαν ότι η ενσωματωμένη ενέργεια του δομικού χάλυβα είναι υψηλότερη από αυτή του σκυροδέματος και όχι μόνο υψηλότερη από το σκυρόδεμα, αλλά διαπιστώθηκε ότι είναι η υψηλότερη μεταξύ όλων των δομικών

υλικών. Για παράδειγμα, μια μελέτη στην Αυστραλία δείχνει ότι η ενσωματωμένη ενεργειακή ένταση για δομικό χάλυβα είναι 2000% υψηλότερη από το σκυρόδεμα κατά μέσο όρο. Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν είναι απαραίτητα ότι στη συνολική διαδικασία κατασκευής, ο χάλυβας αποδίδει τις υψηλότερες ενσωματωμένες ενεργειακές τιμές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ποσότητα του χάλυβα που απαιτείται στο στάδιο του σχεδιασμού είναι συνήθως μικρότερη από άλλα υλικά λόγω της υψηλής αντοχής του. (Elsayed et al., 2021b)

Η πλειονότητα του χάλυβα που αποθηκεύεται στο κτιριακό απόθεμα για όλη τη διάρκεια ζωής του κτιρίου, οδηγείται όπου είναι οικονομικά εφικτό, να ανακτηθεί και να ανακυκλωθεί στο τέλος της ζωής του κτιρίου, υποβάλλοντας σε μια ενεργοβόρα διαδικασία για τη δημιουργία νέων προϊόντων χάλυβα. Σύμφωνα με τους Tingley et al. οι οποίοι υπογραμμίζουν ότι τα περιβαλλοντικά οφέλη της επαναχρησιμοποίησης, μπορούν να οδηγήσουν μέχρι σε 96% εξοικονόμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την επαναχρησιμοποίηση τμημάτων χάλυβα σε σύγκριση με την προμήθεια νέου χάλυβα. (Tingley & Allwood, 2014)

Η παραγωγή χάλυβα είναι μια ενεργοβόρα διαδικασία, ωστόσο, η εξελιγμένη ενέργεια στα συστήματα διαχείρισης τα οποία διασφαλίζουν την αποτελεσματική χρήση και ανάκτηση της ενέργειας καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας παραγωγής χάλυβα για επαναχρησιμοποίηση, όπου είναι δυνατόν. Η ενέργεια αποτελεί σημαντικό μέρος του κόστους παραγωγής του χάλυβα, από 20% σε 40%. Έτσι, οι βελτιώσεις στην ενεργειακή απόδοση έχουν ως αποτέλεσμα μειωμένο κόστος παραγωγής. Η ενεργειακή απόδοση των εγκαταστάσεων χαλυβουργίας ποικίλλει ανάλογα με την οδό παραγωγής, τον τύπο του σιδηρομεταλλεύματος και τον άνθρακα που χρησιμοποιείται, για το μείγμα προϊόντων χάλυβα, στη τεχνολογία ελέγχου λειτουργίας, και στην αποδοτικότητα των υλικών. Η ενέργεια καταναλώνεται επίσης έμμεσα για την εξόρυξη, προετοιμασία και μεταφορά πρώτων υλών (περίπου 8% των η συνολική ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή του χάλυβα, συμπεριλαμβανομένου του ακατέργαστου στις διεργασίες εξόρυξης υλικών και παραγωγής χάλυβα). Περίπου το 50% της εισροής ενέργειας μιας ολοκληρωμένης εγκατάστασης προέρχεται από άνθρακα, 35% από ηλεκτρική ενέργεια, 5% από φυσικό αέριο και 5% από άλλα αέρια. (World Steel Association, 2018)

Ο χάλυβας μπορεί να κατασκευαστεί εξ ολοκλήρου από ανακυκλωμένο σκραπ (δευτερογενής χάλυβας) ή από μείγμα ανακυκλωμένου σκραπ και νέου χάλυβα που δημιουργείται από σίδηρο (πρωτογενής χάλυβας). Η παραγωγή σιδήρου είναι μέρος της πρωτογενούς διαδικασίας παραγωγής χάλυβα και 1200 Mt σιδήρου παράγονται ετησίως στη διαδικασία υψικαμίνων (BF) με τη χρήση οπτάνθρακα για τη μείωση του σιδηρομεταλλεύματος. Ακόμα 100Mt παρασκευάζονται με αναγωγή του σιδηρομεταλλεύματος, συχνά με φυσικό αέριο (CH₄), στη διαδικασία άμεσης αναγωγής σιδήρου (DRI) για την παραγωγή στερεού «σπογγώδους» σιδήρου. Ανάλογα με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία πρωτογενούς χάλυβα από σίδηρο, είτε βασικού κλίβανου οξυγόνου (BOF) είτε φούρνου ηλεκτρικού τόξου (EAF), ο ενσωματωμένος συντελεστής άνθρακα (ECF) για το χάλυβα είναι σχεδόν 2500 kg CO₂e/ t και 1000 kgCO₂e/t από διεργασίες BF-BOF και DRI-EAF, αντίστοιχα. (Kanyilmaz et al., 2023b)

Η παραγωγή χάλυβα από σκραπ απαιτεί περίπου το ένα όγδοο της ενέργειας που παράγεται από σιδηρομετάλλευμα, κυρίως με τη μορφή ηλεκτρικής ενέργειας και όχι άνθρακα για τη παραγωγή. Αυτό το όφελος έχει ως αποτέλεσμα υψηλά ποσοστά ανακύκλωσης (περίπου 80-90% παγκοσμίως). Ωστόσο, το σκραπ δεν μπορεί να καλύψει τις απαιτήσεις εισροών πρώτων υλών του κλάδου μόνο, επειδή η παραγωγή χάλυβα σήμερα είναι υψηλότερη από τα προϊόντα που ανακυκλώνονται αυτήν τη στιγμή. Αυτό σημαίνει ότι η ανακύκλωση από μόνη της δεν μπορεί να βασίζεται στη μείωση των εκπομπών από τον τομέα στον βαθμό που απαιτείται για την επίτευξη των κλιματικών στόχων. (International Energy Agency, n.d.)

Επιπλέον, όσον αφορά τη χρήση «μετάλλων», τουλάχιστον το 70% του συνολικού υλικού πρέπει να προέρχεται από δευτερεύουσες πηγές (επαναχρησιμοποίηση και ανακύκλωση). Ως αποτέλεσμα, ο κατασκευαστικός κλάδος ελέγχεται περισσότερο από ποτέ για να μειώσει την κατανάλωση πόρων, την κατασκευή και τα απόβλητα που σχετίζονται με την κατεδάφιση. Η ανακαίνιση κτιρίων υφιστάμενων κτιρίων και η προσαρμοστική επαναχρησιμοποίηση υλικών και εξαρτημάτων ενός κτιρίου μπορεί να συμβάλει στην επιβράδυνση της κατανάλωσης πόρων και στις αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις λόγω της απόρριψης υλικών, και η νέα μεταποίηση του 50% της συνολικής χρήσης υλικών στην Ευρώπη σχετίζεται με κτίρια και άλλες αστικές υποδομές και οι κατασκευαστικές δραστηριότητες παράγουν τη μεγαλύτερη ποσότητα αποβλήτων μεταξύ όλων των άλλων τομέων. Η

μείωση του ενσωματωμένου άνθρακα, της κατανάλωσης πόρων και άλλων περιβαλλοντικών επιπτώσεων μπορεί να επιτευχθεί με την ανάκτηση κτιριακών απορριμμάτων που προκαλούνται από κατεδάφιση μέσω επαναχρησιμοποίησης υλικών, ανακύκλωσης ή επαναχρησιμοποίησης κτιρίων μέσω επιλεκτικής αποδόμησης και επαναχρησιμοποίησης συστημάτων κτιρίου. (Kanyilmaz et al., 2023b)

Το κύριο κίνητρο για τους ερευνητές που εξετάζουν την επαναχρησιμοποίηση του χάλυβα είναι τα περιβαλλοντικά οφέλη η ενέργεια, ο άνθρακας και άλλες περιβαλλοντικές επιπτώσεις που εξοικονομούνται. Η αυξημένη αποδόμηση όχι μόνο θα παρείχε περισσότερο επαναχρησιμοποιούμενο χάλυβα, αλλά θα διευκόλυνε τη διάσωση πρόσθετων άλλων δομικών υλικών. Προκειμένου να αυξηθεί η μελλοντική ευκολία της αποδόμησης, τα κτίρια που έχουν σχεδιαστεί τώρα θα πρέπει να σχεδιαστούν για αποδόμηση και επαναχρησιμοποίηση. Αυτό θα έπρεπε ιδανικά να εφαρμόζεται σε όλα τα εξαρτήματα του κτιρίου και θα παρείχε επίσης κάποια προσαρμοστικότητα κατά τη χρήση, καθώς και ευκολότερη πρόσβαση σε υπηρεσίες αναβάθμισης. (Tingley & Allwood, 2014)

Ο χάλυβας ανακτάται εύκολα με μαγνήτες και είναι 100% ανακυκλώσιμο. Μπορεί να ανακυκλωθεί άπειρα φορές χωρίς απώλεια ποιότητας. Ο χάλυβας είναι το πιο ανακυκλωμένο υλικό στον κόσμο, με περίπου 650 Mt να ανακυκλώνονται ετησίως, συμπεριλαμβανομένων των σκραπ πριν και μετά την κατανάλωση. Η ανακύκλωση αυτού του χάλυβα αντιπροσωπεύει σημαντική ενέργεια και ακατέργαστη εξοικονόμηση υλικών, πάνω από 1.400 κιλά σιδηρομεταλλεύματος, 740 κιλά άνθρακα και εξοικονομούνται 120 κιλά ασβεστόλιθου για κάθε 1.000 κιλά σκραπ χάλυβα κατασκευασμένο σε νέο χάλυβα. (World Steel Association, 2018)

Η επαναχρησιμοποίηση των φερόντων κατασκευών είναι κρίσιμη λόγω της σημαντικής συμβολής αυτών των στοιχείων στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των κτιρίων, λαμβάνοντας υπόψη της σημαντικής μάζα υλικών και της ενεργοβόρας διαδικασίας κατασκευής τους. Σύμφωνα με την αξιολόγηση του κύκλου ζωής περιπτώσιολογικών μελετών, οι δομές που ελήφθησαν χρησιμοποιώντας τα επαναχρησιμοποιημένα στοιχεία έδειξαν μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων έως και 63%, σε σύγκριση με το βάρος και τις βελτιστοποιημένες λύσεις από νέα στοιχεία. (Kanyilmaz et al., 2023b)

Η επαναχρησιμοποίηση του χάλυβα μπορεί να αντιπροσωπεύει μια πρόκληση, αφού εκτός από τη μείωση του περιβαλλοντικού κόστους όσον αφορά την κατανάλωση πρώτων υλών και ενέργειας, μειώνει, κατά σχετικό τρόπο, την παραγωγή απορριμμάτων από κατεδαφίσεις κτιρίων. Ειδικότερα, πολλές αβεβαιότητες προκύπτουν κατά την αξιολόγηση της κατανάλωσης ενέργειας λόγω της διαδικασίας αποσυναρμολόγησης, δηλαδή εξαρτώνται έντονα εκτός από τον τύπο, το μέγεθος, την τοποθεσία και το όριο οι συνθήκες της υπό εξέταση δομής στις εγκαταστάσεις των εταιρειών διάλυσης. (Pongiglione & Calderini, 2014)

Η πρώτη διαθέσιμη Περιβαλλοντική Δήλωση Προϊόντος (EPD) για τον επαναχρησιμοποιημένο χάλυβα από το EMR αναφέρει τιμές δυναμικού υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP) περίπου 50 kgCO₂e/t. Αυτή η τιμή δείχνει ότι η επαναχρησιμοποίηση του χάλυβα μπορεί να προσφέρει σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη, με πιθανές μειώσεις στα GWP έως και 95%, 90% και 75%, αντίστοιχα, σε σύγκριση με την πρωτογενή παραγωγή χάλυβα, τον ανακυκλωμένο χάλυβα και τον ανακυκλωμένο χάλυβα με βάση τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. (Kanyilmaz et al., 2023b)

Σχετικά με τη μεταφορά, πρέπει να σημειωθεί ότι αντιπροσωπεύει καθοριστικό παράγοντα στην επιλογή της προσέγγισης που θα υιοθετηθεί. Στην πραγματικότητα, ανάλογα με την απόσταση μεταξύ της κατασκευής και του εργοταξίου παραγωγής (είτε του μύλου είτε της αποθήκης επαναχρησιμοποιημένου χάλυβα), η εξοικονόμηση ενέργειας που σχετίζεται με τις μεταφορές μπορεί να υπερβαίνει αυτές που επιτυγχάνονται μέσω της επαναχρησιμοποίησης υλικών. Λόγω της εγγύτητας του νέου κτιρίου με την αποσυναρμολόγηση, αμελητέες ποσότητες ενέργειας θα συνδέονται με τη μεταφορά στην προσέγγιση επαναχρησιμοποίησης. Αντίθετα η κατανάλωση ενέργειας που σχετίζεται με τη μεταφορά νέου χάλυβα θα μπορούσε να είναι μεγάλη, ανάλογα με το πού αγοράζεται ο χάλυβας. Υπό το πρίσμα αυτών των υποθέσεων, είναι δυνατό να γίνει εκτίμηση της περιβαλλοντικής εξοικονόμησης με την στρατηγική της επαναχρησιμοποίησης λαμβάνοντας υπόψη την ποσότητα καινούργιου χάλυβα που χρησιμοποιείται μόνο. Ειδικότερα, σε νέο χάλυβα οι ποσότητες μάζας και ενέργειας και τις εκπομπές CO₂ που σχετίζονται με αυτό μπορεί να υπολογιστεί η παραγωγή.

Η προσέγγιση της επαναχρησιμοποίησης επιτρέπει την εξοικονόμηση έως και 30% του νέου χάλυβα (199 t). Λόγω της τοποθεσίας της μελέτης περίπτωσης της των

Pongiglione et al. , χρησιμοποιήθηκαν ευρωπαϊκά δεδομένα. Ειδικότερα, η εκτίμηση έγινε σύμφωνα με τα μέσα δεδομένα της απογραφής του κύκλου ζωής για προφίλ χάλυβα που παρέχονται από την World Steel Association που συνεπάγονται 14,8 MJ κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας και 1.158 kg ισοδύναμες εκπομπές CO₂ για προφίλ χάλυβα 1 kg (ποσοστό 84% σκραπ στο νέο χάλυβας θεωρείται). Η μελέτη έδειξε ότι η ποσότητα του νέου χάλυβα ήταν 30% μικρότερη σε ένα μοντέλο A που αντιπροσωπεύει την προσέγγιση επαναχρησιμοποίησης, από ότι σε ένα μοντέλο B που αντιπροσωπεύει μια τυπική προσέγγιση σχεδιασμού, υπολογίστηκε ότι το πρώτο αντιπροσωπεύει 30% μείωση στην κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας (4265 GJ έναντι 6024 GJ) και εκπομπές CO₂ (333,5 t έναντι 471,3 t). Όπως ήδη δηλώνεται, θα πρέπει να θεωρηθεί ότι η περαιτέρω μείωση της ενέργειας η κατανάλωση θα επιτυγχάνονταν με τη συμπερίληψη της μεταφοράς στον υπολογισμό. (Pongiglione & Calderini, 2014)

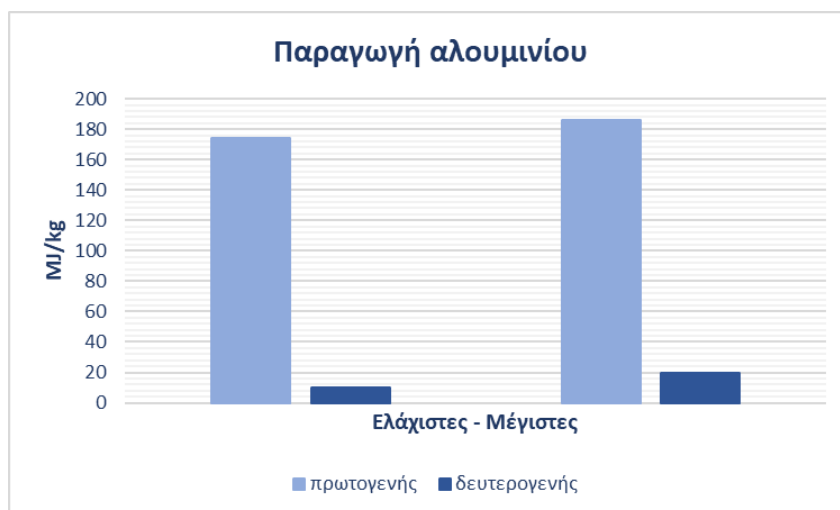
7^ο Κεφάλαιο

7.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων

7.1.1 Συσκευασίες Ποτών

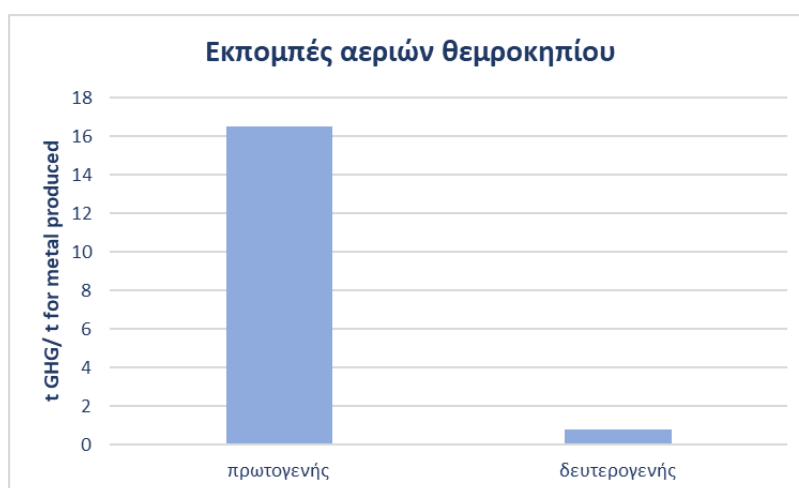
Μετά τη διερεύνηση της βιβλιογραφικής ανασκόπησης και όσο αφορά τις συσκευασίες, η σύνοψη των αποτελεσμάτων η οποία παρατίθεται στην συνέχεια έδειξε ότι για όλες τις συσκευασίες – φιάλες ποτών η περιβαλλοντική βιωσιμότητα είναι εφικτή μέσω της κυκλικής οικονομίας (επαναχρησιμοποίηση / ανακύκλωση). Με την κατανόηση ότι η συσκευασία από μόνη της αντιπροσωπεύει το 36% των αστικών στερεών απορριμμάτων στην Ευρώπη, τα αποτελέσματα παραθέτουν στο πώς και πότε η επαναχρησιμοποίηση των συσκευασιών είναι καλύτερη εναλλακτική λύση έναντι των συσκευασιών μιας χρήσης. Η επαναχρησιμοποιήσιμη συσκευασία έχει προταθεί ως επιλογή για τη σημαντική μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Πιο συγκεκριμένα για τις συσκευασίες αλουμινίου στις τωρινές παγκόσμιες προμήθειες εκατομμυρίων αλουμινίων το 50% προέρχεται από δευτερογενή παραγωγή και ανακύκλωση αλουμινίου. Ο στόχος της κυκλικής οικονομίας του προϊόντος αυτού με τη πάροδο του χρόνου επιτυγχάνεται ολοένα και περισσότερο.



Γράφημα 3

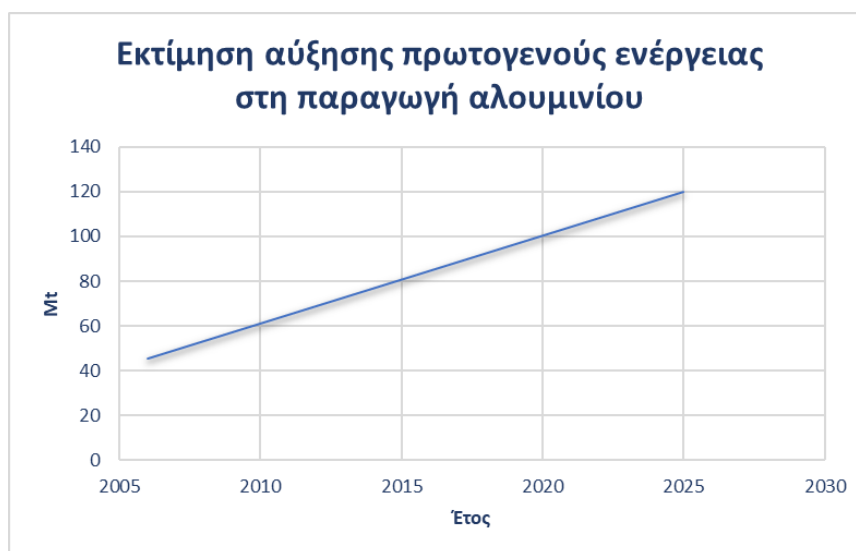
Όπως φαίνεται και από το Γράφημα 3 η διαφορά μεταξύ πρωτογενούς και δευτερογενούς ενεργειακής κατανάλωσης είναι θεαματικά μεγάλη, ενώ η διακύμανση της πρωτογενούς παραγωγής 174-186 MJ/kg έναντι της δευτερογενούς παραγωγής 10-20 MJ/kg. Στη πρώτη περίπτωση οι τιμές έχουν τόση μεγάλη διαφορά καθώς όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 5.1.1 το αλουμίνιο παράγεται από μεταλλεύματα βωξίτη, έτσι η ενέργεια που απαιτείται για την εξόρυξη και την επεξεργασία έως ότου φτάσουμε στο τελικό προϊόν, δηλαδή το αλουμίνιο και ακόμα πιο συγκεκριμένα στο παραπροϊόν της συσκευασίας είναι τεράστια. Αντίθετα στη επεξεργασία για τη δευτερογενή παραγωγή έχοντας μόνο το παραπροϊόν υπό επεξεργασία γλυτώνουμε όλη την υπόλοιπη ενέργεια που αναφέρθηκε παραπάνω.



Γράφημα 4

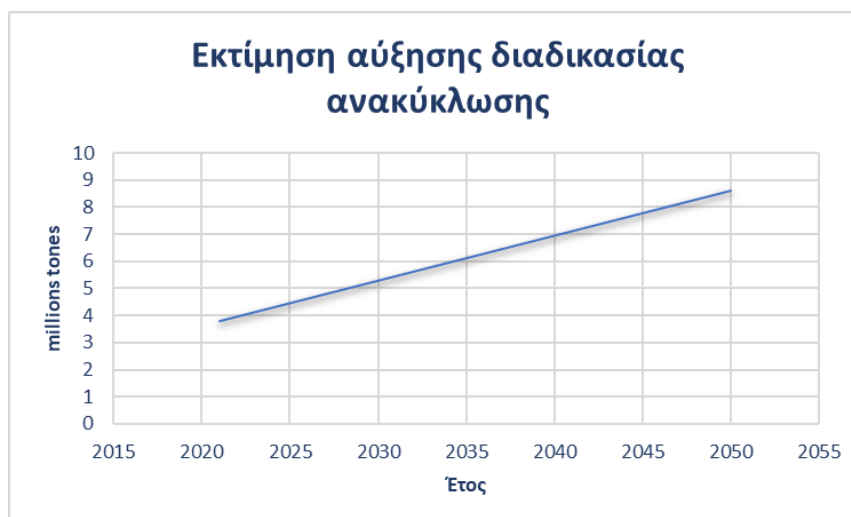
Καθώς οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου έχουν άμεση συσχέτιση με τη παραγωγική διαδικασία αλλά και με το τέλος ζωής του προϊόντος όπως παρατηρούμε

και από το Γράφημα 4 σημειώνεται και εδώ τεράστια διαφορά μεταξύ της πρωτογενούς και δευτερογενούς παραγωγής της τάξης 0,83-16,5 t GHG / t for metal produced. Όπως αναφέραμε η παραγωγή έχει τεράστιο μερίδιο στις αυξημένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, αλλά σημαντικό λόγο διαδραματίζει επίσης το γεγονός ότι στην δευτερογενή παραγωγή παρατείνεται το τέλος ζωής του προϊόντος καθώς είτε ανακυκλώνεται είτε επαναχρησιμοποιείται.



Γράφημα 5

Λόγω των αυξημένων απαιτήσεων και καθώς η ζήτηση των προϊόντων αλουμινίου (και όχι μόνο) έχει αυξηθεί για να μπορέσει να καλύψει τις ανάγκες μας η παραγωγή του αλουμινίου αυξάνεται και μαζί και η πρωτογενής κατανάλωση. Σύμφωνα με τα στοιχεία των διάφορων μελετών οι οποίες εκτίμησαν ότι το ποσό της πρωτογενούς ενέργειας έως το 2025 θα έφτανε 120 MJ/kg σε σχέση με το 2006 που ήταν 45,4 MJ/kg (στα πλαίσια της 20 ετίας δηλαδή είχαμε ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης 4,1% και συνολική αύξηση 160%), κάτι το οποίο είδαμε σε άλλες μελέτες ότι ήδη το έτος 2018 ξεπεράστηκε κατά πολύ και συγκεκριμένα η εκτίμηση σε σχέση με τη πραγματικότητα είχε μια ποσοστιαία διαφορά της τάξης των 66 MJ/kg.



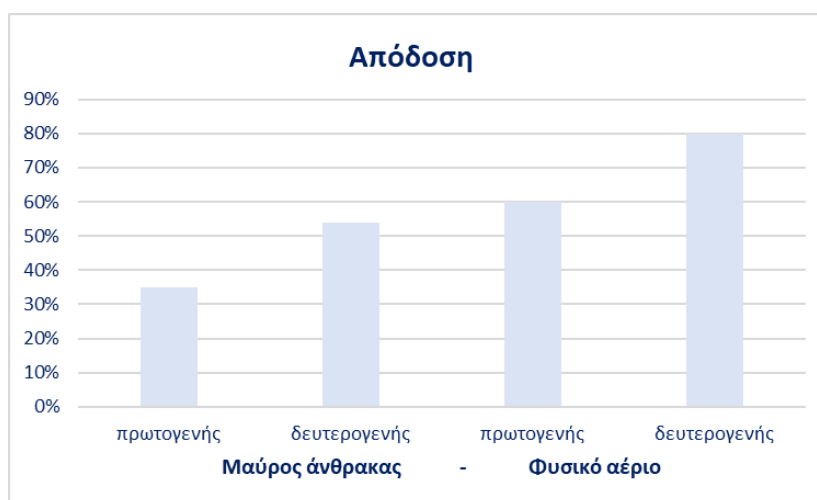
Γράφημα 6

Βλέποντας από το Γράφημα 6 την εκτίμηση της αύξησης στην διαδικασία ανακύκλωσης από το 2021 έως το 2050 η οποία αυξάνεται κατά 4,8 εκατομμύρια τόνους και σε σύγκριση με το Γράφημα 5 κάνοντας μια υποκειμενική αξιολόγηση (λόγω ελλιπών συμπληρωματικών δεδομένων) η αύξηση της πρωτογενούς ενέργειας δεν θα έπρεπε να είχε αυξηθεί καθώς εκτιμάται αύξηση της ανακύκλωσης κάτι το οποίο θα έπρεπε θεωρητικά να αυξήσει τη δευτερογενή παραγωγή και να διατηρήσει τη πρωτογενή ενέργεια στη παραγωγή σε χαμηλότερα επίπεδα.

Στο Γράφημα 7 & 8 έχουμε άλλη μια σύγκριση της κατανάλωσης του μαύρου άνθρακα και του φυσικού αερίου σε σχέση με τη φάση της πρωτογενούς και δευτερογενούς παραγωγής, και εδώ οι τιμές έχουν μεγάλη διαφορά με το μαύρο άνθρακα να καταναλώνει 211MJ/kg με απόδοση 35% και φυσικό αέριο απαιτεί 150MJ/kg με απόδοση 54%. Η κατανάλωση ενέργειας της δευτερογενούς παραγωγής έχει υπολογιστεί σε 6 και 10 MJ/kg με απόδοση 60%-80% αντίστοιχα. Έτσι παρατηρούμε η απόδοση στη δευτερογενή παραγωγή είναι καλύτερη σε σχέση με τη πρωτογενή.



Γράφημα 7

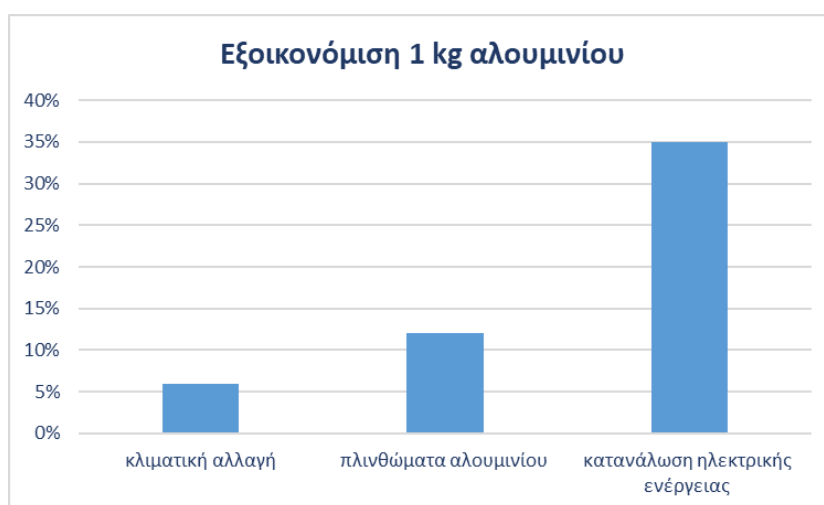


Γράφημα 8

Αντίστοιχα στο γράφημα 9 & 10 η ανακύκλωση ενός κιλού αλουμινίου εξοικονομεί περίπου 8 κιλά βωξίτη, 4 κιλά χημικών και 14 κιλοβατώρες ηλεκτρικής ενέργειας. Η ανακύκλωση αλουμινίου εξοικονομεί έως και 95% της ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή παρθένου μετάλλου, καθώς απαιτεί μόνο το 5% της ενέργειας για την παραγωγή δευτερογενούς μετάλλου και παράγει μόνο το 5% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου σε σύγκριση με το παρθένο μέταλλο. Για κάθε αύξηση 5% στα ποσοστά ανακύκλωσης, εξακολουθούμε να έχουμε τη δυνατότητα να μειώσουμε τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής έως και 6%, μείωση 12% στην παροχή πλινθωμάτων αλουμινίου, μείωση 4% στο βάρος του κιβωτίου και 35% μείωση στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας λόγω της αυξημένης απόδοσης παραγωγής.



Γράφημα 9



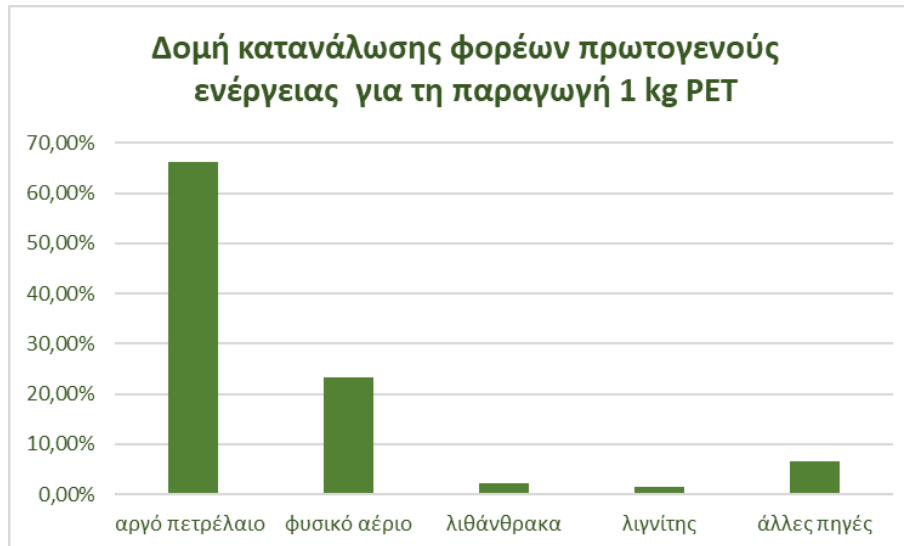
Γράφημα 10

Για τις συσκευασίες πλαστικών PET η μέση ζήτηση σε πρωτογενή ενέργεια με βάση το Γράφημα 11 είναι 71,2 MJ/kg στην οποία το 69,6 MJ/kg κατά μέσο όρο αφορά συμβατική ενέργεια και το 1,6 MJ/kg κατά μέσο όρο ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η παραγωγή δοχείων PET προέρχεται αποκλειστικά από πρώτες ύλες που λαμβάνονται από την επεξεργασία αργού πετρελαίου και του οποίου οι πηγές πρώτης ύλης είναι το αργό πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Έτσι συμπεραίνουμε ότι εκτός από την επιτακτική ανάγκη για την μείωση των πρώτων υλών σε συσκευασίες χρειάζεται να μειώσουμε και να αλλάξουμε και το τρόπο με τον οποίο τα παράγουμε.



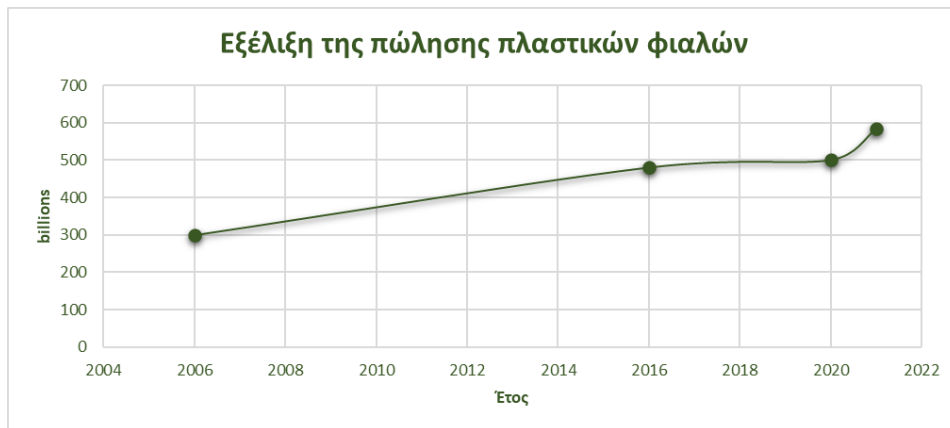
Γράφημα 11

Στο Γράφημα 12 έχουμε την δομή της κατανάλωσης για τη πρωτογενή ενέργεια η οποία αντιστοιχεί σε 1 kg PET, η ενέργεια του αργού πετρελαίου αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο ποσοστό, περίπου 66,1% (47,07 MJ) και η ενέργεια φυσικού αερίου αντιπροσωπεύει μικρότερο ποσοστό (23,4 MJ). %, από λιθάνθρακα (2,33%), λιγνίτη (1,52%), άλλες πηγές (6,57%).



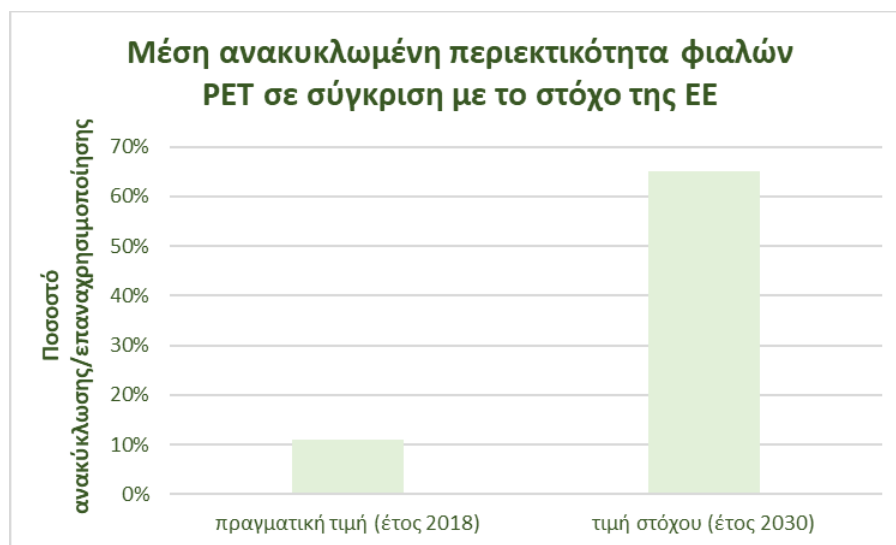
Γράφημα 12

Όπως παρατηρούμε από το Γράφημα 13 η πώληση των πλαστικών φιαλών είναι τεράστια, και για την τήρηση των ολοένα και πιο αυστηρών περιβαλλοντικών κανονισμών, υπάρχει σημαντικό ενδιαφέρον για επανασχεδιασμό προϊόντων μαζικής παραγωγής για βιώσιμη επαναχρησιμοποίηση.



Γράφημα 13

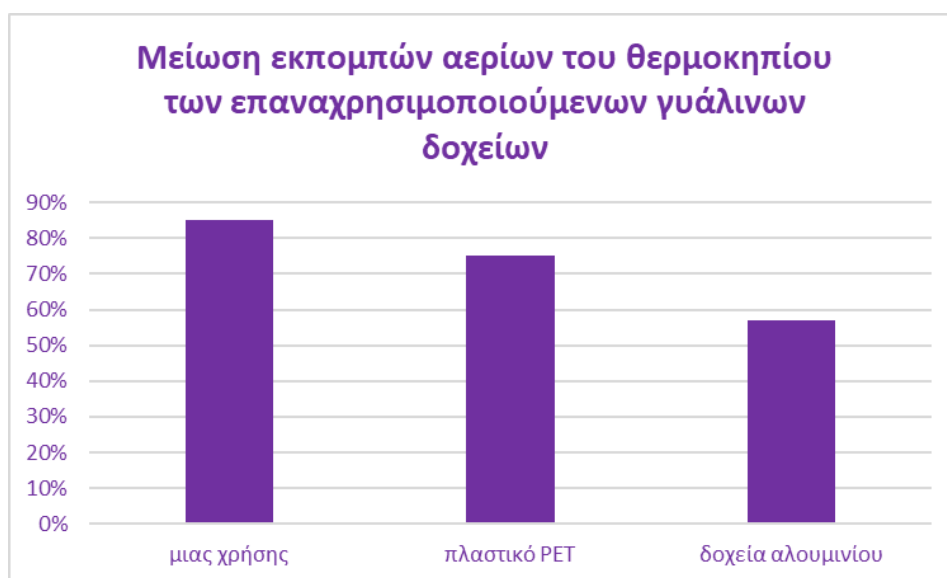
Σύμφωνα με το Σχήμα 14, βλέπουμε ότι η μέση τιμή των ανακυκλωμένων φιαλών το 2018 ήταν 11%. Στόχος της ΕΕ είναι να ανακυκλώσει και να επαναχρησιμοποιήσει το 65% των συσκευασιών PET έως το 2030, εκ των οποίων το 30% να είναι κλειστού βρόχου και να επιτύχει έως το 2025, κατανάλωση πλαστικών με το συνολικό ποσοστό ανάκτησης τους να φτάνει το 25%. Εν τω μεταξύ, έχει αναπτυχθεί μια νέα στρατηγική για την αντιμετώπιση των πλαστικών απορριμμάτων, με στόχο την επίτευξη 100% επαναχρησιμοποιήσιμων ή εύκολα ανακυκλώσιμων πλαστικών απορριμμάτων έως το 2030. Η οδηγία για τα πλαστικά μίας χρήσης του 2019 θέτει στόχους ανακύκλωσης πλαστικών φιαλών (77% έως το 2025 και 90% έως το 2029) και νέους στόχους για τα ποσοστά ανακύκλωσης φιαλών PET (25% έως το 2025 και 30% έως το 2030).



Γράφημα 14

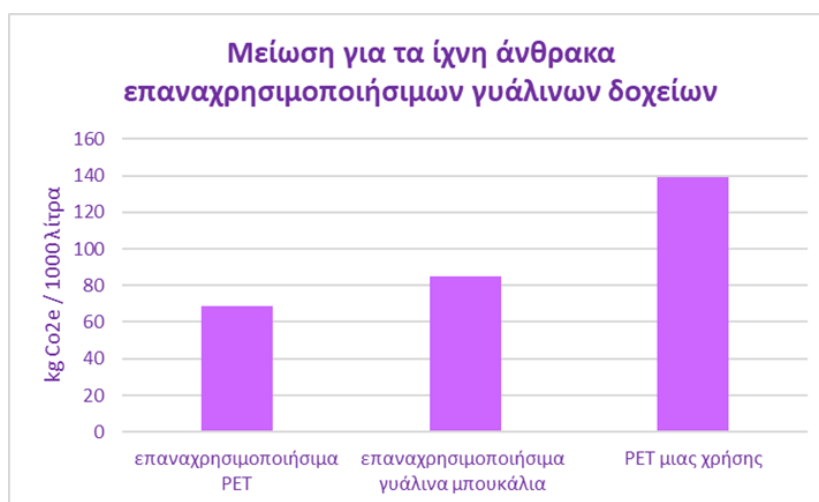
Το γυαλί μίας χρήσης έχει αποδειχθεί ότι έχει το υψηλότερο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε σύγκριση με άλλα υλικά μίας χρήσης. Τα επαναχρησιμοποιήσιμα γυάλινα

μπουκάλια έχουν 85% χαμηλότερο αποτύπωμα άνθρακα από τα γυάλινα μπουκάλια μίας χρήσης, 75% χαμηλότερο αποτύπωμα άνθρακα από το πλαστικό PET και 57% χαμηλότερο αποτύπωμα άνθρακα από τα δοχεία αλουμινίου όπως φαίνεται και στο Γράφημα 15.



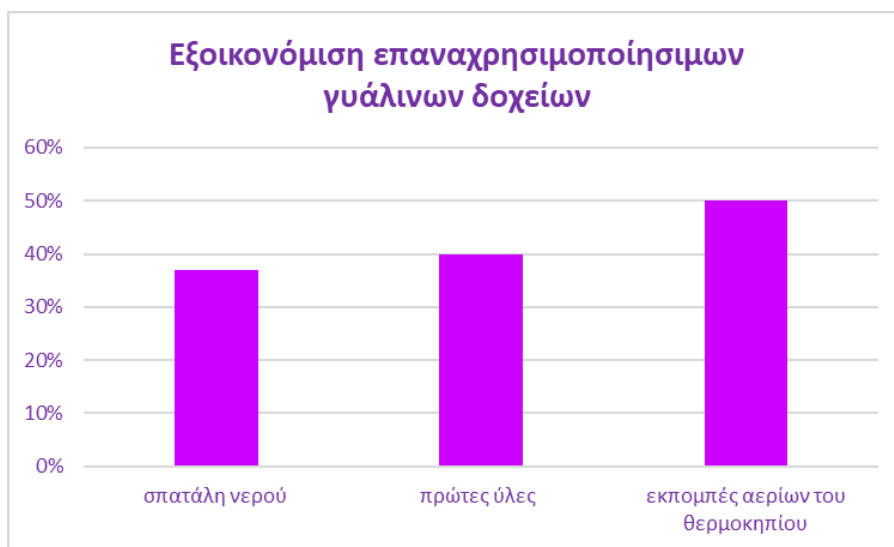
Γράφημα 15

Σύμφωνα και με το γράφημα 16, τα επαναχρησιμοποιήσιμα μπουκάλια είχαν χαμηλότερα ίχνη άνθρακα από τα πλαστικά μπουκάλια μιας χρήσης, με 68,7 kgCO₂e/1000 λίτρα για επαναχρησιμοποιήσιμα PET, 85 kgCO₂e/1000 λίτρα για επαναχρησιμοποιήσιμα γυάλινα μπουκάλια και 139 kgCO₂e/1000 λίτρα για PET μιας χρήσης. Τη μεγαλύτερη μείωση την έχουν τα επαναχρησιμοποιήσιμα PET μπουκάλια, ακολουθούν τα επαναχρησιμοποιήσιμα γυάλινα μπουκάλια και τέλος είναι τα PET μιας χρήσης.



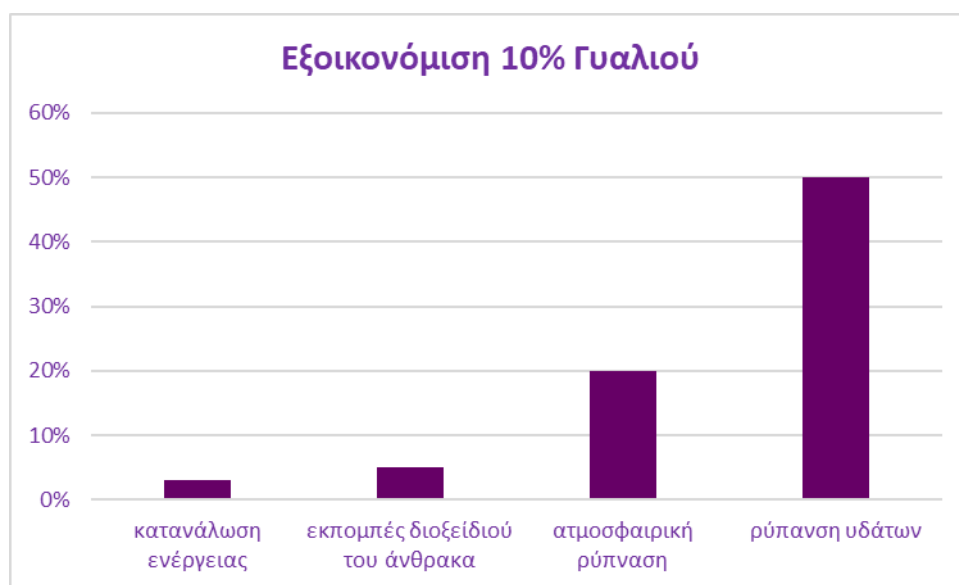
Γράφημα 16

Από τα επαναχρησιμοποιήσιμα γυάλινα μπουκάλια έχουμε σημαντική εξοικονόμηση καθώς έχουμε μείωση πρώτων υλών για τη παραγωγή τους, η παραγωγή αυτή οδηγεί σε λιγότερες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, με σημαντικότερη όλων τη μείωση της σπατάλης σε νερό.



Γράφημα 17

Πιο συγκεκριμένα για μια ποσότητα των 10% γυαλιού έχουμε 3% μείωση της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνουμε, 5% λιγότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, με αποτέλεσμα να οδηγούμαστε σε 20% μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και 50% σε λιγότερη μείωση των υδάτων.



Γράφημα 18

Μεγάλο μέρος των συσκευασιών καταλήγει είτε σε χώρους υγειονομικής ταφής είτε στο περιβάλλον, με επιβλαβή επιπτώσεις στη ποιότητα του εδάφους, στην ατμόσφαιρα, στο ευρύτερο περιβάλλον, ακόμα και στην υγεία μας. Τα πλαστικά αντιπροσωπεύουν 12% των παγκόσμιων στερεών αποβλήτων, το γυαλί το 5,2% ενώ τα κουτιά αλουμινίου 1,8% για το έτος 2018. Με τη μέθοδο της ανακύκλωσης, το αποτύπωμα άνθρακα παρουσίασε μείωση κατά 31% σε τρία τυπικά μεγέθη κουτιών αλουμινίου, καθώς η ζήτηση και κατ' επέκταση η παραγωγή αυξάνεται στόχος της βιομηχανίας είναι η όσο το δυνατόν μεγαλύτερη μείωση των εκπομπών διοξειδίου άνθρακα.

Όπως είδαμε οι συσκευασίες μπορούν να είναι από γυαλί από πλαστικό ή από αλουμίνιο. Όσο αφορά το γυαλί και το πλαστικό έχουμε συσκευασίες μιας χρήσης και συσκευασίες πολλών χρήσεων (δηλαδή επαναχρησιμοποιήσιμες). Σε σύγκριση με το γυαλί, τα μπουκάλια PET είναι ελαφρύτερα και έχουν χαμηλότερο αποτύπωμα άνθρακα κατά την παραγωγή και τη μεταφορά. Οι σύγχρονες εξελίξεις στις διαδικασίες απολύμανσης κατά την ανακύκλωση του ανακυκλωμένου PET μετά την κατανάλωση (rPET ή PCR) έχουν καταστήσει το PET ένα ασφαλές υλικό για επαναχρησιμοποίηση ως συσκευασία ποτών. Τα γυάλινα μπουκάλια καταλαμβάνουν την τελευταία θέση στις αναλύσεις, καθώς καταναλώνουν σχετικά περισσότερους πόρους και ενέργεια για την παραγωγή τους. Τα ανακυκλωμένα δοχεία αλουμινίου ήταν τα λιγότερο επιβλαβή για το περιβάλλον δοχεία μίας χρήσης.

Η σύγκριση των επαναχρησιμοποιούμενων και των γυάλινων μπουκαλιών μίας χρήσης έδειξε τη σημαντικότερη μείωση των εκπομπών CO₂ από όλα τα υλικά συσκευασίας. Το γυαλί μίας χρήσης έχει τις υψηλότερες συνολικές επιπτώσεις σε σύγκριση με οποιοδήποτε άλλο υλικό συσκευασίας. Αυτό οφείλεται στο στάδιο παραγωγής του γυαλιού. Ωστόσο, καθώς αυξάνεται ο αριθμός των φορών επαναχρησιμοποίησης των γυάλινων φιαλών, το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη μειώνεται. Καθώς η επαναχρησιμοποίηση του γυαλιού μπουκαλιών είναι ανώτερη από την ανακύκλωση από άποψη προστασίας του περιβάλλοντος. Οι επιπτώσεις της επαναχρησιμοποίησης των γυάλινων φιαλών μόνο μία φορά μπορούν να μειωθούν κατά 40%.

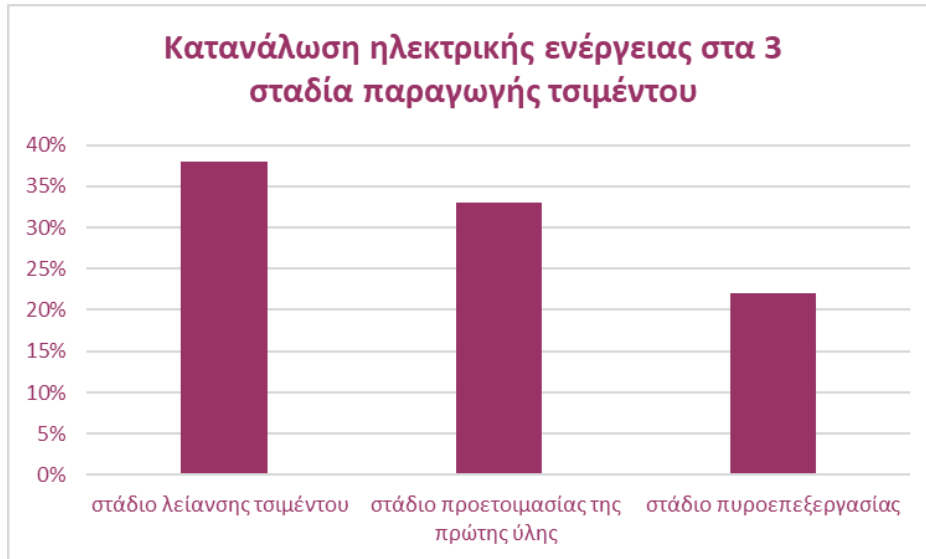
Με βάση το Γράφημα 1 (Ενότητα 5.1.3) βλέπουμε ότι στη πρώτη χρήση της φιάλης έχουμε και τη μεγαλύτερη επίδραση στο δυναμικό υπερθέρμανσής του

πλανήτη, στη δεύτερη χρήση της φιάλης έχουμε ραγδαία μείωση σε σχέση με τη πρώτη, και μέχρι την ογδόη χρήση η μείωση είναι ελαχίστη αλλά υπαρκτή, μετά από την ογδόη γίνεται ακόμα μικρότερη και από την δέκατη τέταρτη χρήση και έπειτα η μείωση είναι αμελητέα.

Το Γράφημα 2 της ίδιας ενότητας δείχνει πώς η απόδοση των εκπομπών (κατά προσέγγιση αποφευχθείσα επιβάρυνση) που αποφεύγονται από τα συστήματα συσκευασίας ποτών μέσω της ανακύκλωσης μπορεί να μειώσει τον αντίκτυπό τους κατά δύο έως τρεις φορές, ειδικά για υλικά αλουμινίου και γυαλιού των οποίων οι διαδικασίες παραγωγής είναι ιδιαίτερα ενεργοβόρες.

7.1.2 Οικοδομικά Υλικά

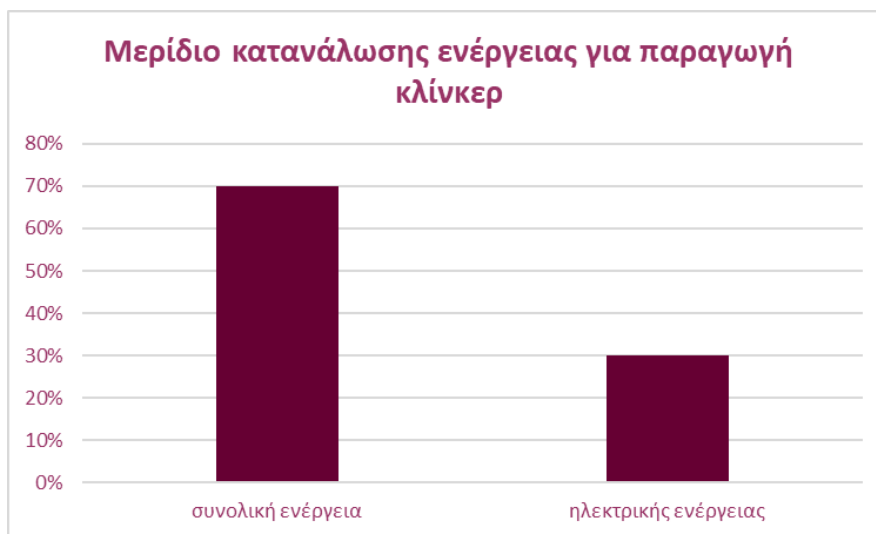
Μετά τη διερεύνηση της βιβλιογραφικής ανασκόπησης και όσο αφορά τα οικοδομικά υλικά παρατηρήθηκε πόσο σημαντικός είναι ο μετριασμός του κλίματος και η αποτελεσματική χρήση των πόρων στον κτιριακό τομέα έχουν γίνει κεντρικό ζήτημα για την αειφόρο ανάπτυξη. Η προώθηση μιας κυκλικής οικονομίας και η μείωση της υπερθέρμανσης του πλανήτη είναι ταυτόχρονα μια ολόενα και πιο σημαντική πρόκληση για την κατασκευή, την κατεδάφιση και την ανακύκλωση κτιρίων καθώς και στις τρεις αυτές φάσεις, η κατανάλωση, οι εκπομπές αερίων αλλά και το κόστος είναι πολύ σημαντικά. Για τη δημιουργία ενός κτιρίου απαιτούμε τεραστία ποσά ενέργειας για τις πρώτες ύλες και την παραγωγή των προϊόντων, στη συνέχεια και ενώ το κτίριο βρίσκεται σε χρήση συνεχίζει να καταναλώνει μεγάλα ποσά ενέργειας με βασικό στοιχείο τη θερμομόνωση του, και τέλος τα περισσότερα κτίρια κατεδαφίζονται έτσι οι πρώτες ύλες που είχαμε χρησιμοποιήσει καταλήγουν σε χώρους υγειονομικής ταφής ανεκμετάλλευτά και προκαλώντας τεράστια προβλήματα στο περιβάλλον.



Γράφημα 19

Όπως φαίνεται στο Γράφημα 19 η κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη παραγωγή τσιμέντου χωρίζεται σε τρία στάδια, με τα δύο πρώτα στάδια να καταναλώνουν 38% και 33% αντίστοιχα. Αν όμως αντί για πρώτες ύλες χρησιμοποιούσαμε το τσιμέντο που έχουμε απορρίψει (από τις φάσεις κατεδάφισης) θα μειωνόταν δραματικά.

Σύμφωνα με το Κεφάλαιο 6.1.1 που έγινε πλήρη παρουσίαση της παραγωγής τσιμέντου παρατηρήσαμε ότι στη δημιουργία του η θερμικές επεξεργασίες είναι περισσότερες αυτό λοιπόν οδηγεί όπως βλέπουμε και στα παρακάτω γραφήματα σε μεγαλύτερο μερίδιο κατανάλωσης θερμικής ενέργειας έναντι ηλεκτρικής.



Γράφημα 20

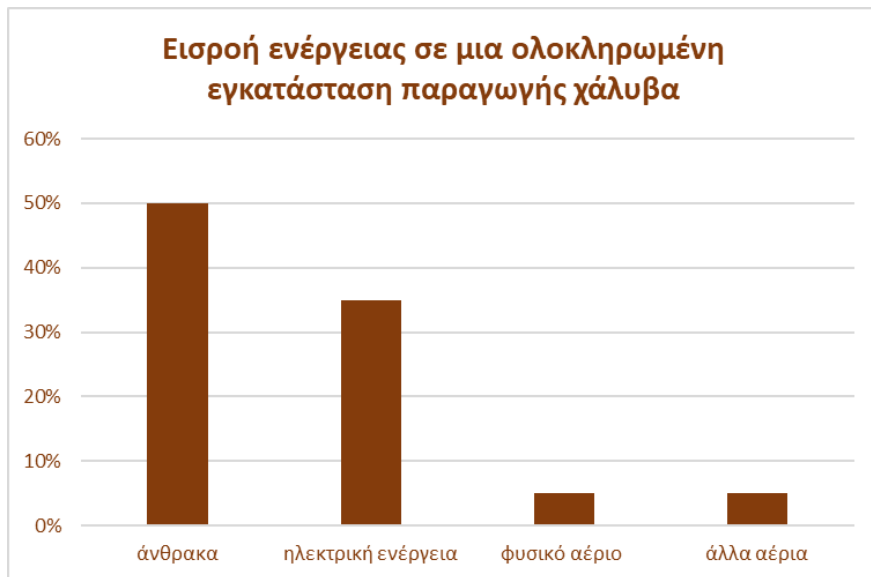


Γράφημα 21

Στις τελικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα προς το περιβάλλον τη μεγαλύτερη συνεισφορά έχουμε από την παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, καθώς μέσω αυτών οδηγούμαστε στην όποια επεξεργασία των πρώτων υλών. Αν η επεξεργασία αυτή γίνεται μέσω ορυκτών καυσίμων οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα αυξάνονται ώστε τελικά να οδηγηθούμε στη κατασκευή του εκάστοτε υλικού. Όπως καταλαβαίνουμε τα ποσά αυτά αυξάνονται ανάλογα, γι' αυτό η ανάγκη μείωσης των παρθένων πρώτων υλών γίνεται επιτακτική. Οι τιμές αυτές έτσι λόγω της κυκλικής οικονομίας θα μπορούσαν να μειωθούν καθώς η αντικατάσταση της παροχής ηλεκτρικής – θερμικής ενέργειας από ΑΠΕ, η αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων από βιομάζα και η κατασκευή των υλικών να αντικατασταθεί από επαναχρησιμοποιήσιμα υλικά.



Γράφημα 22

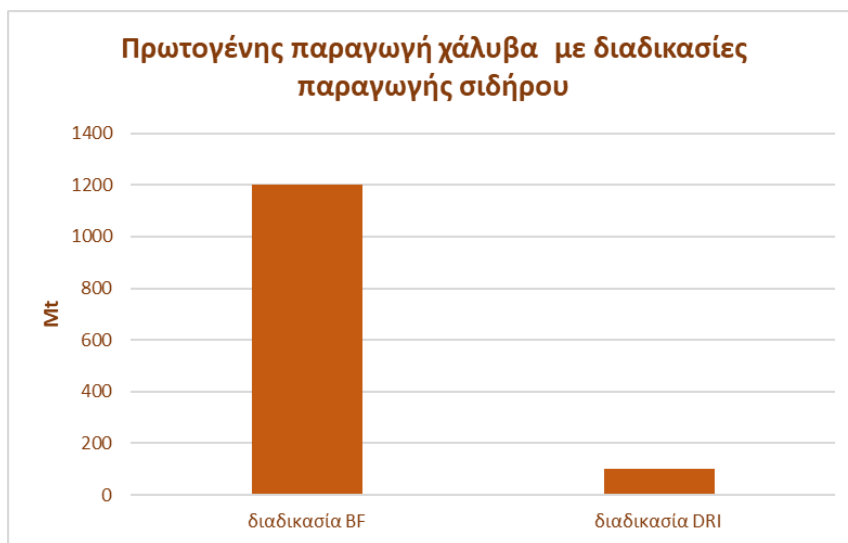


Γράφημα 23

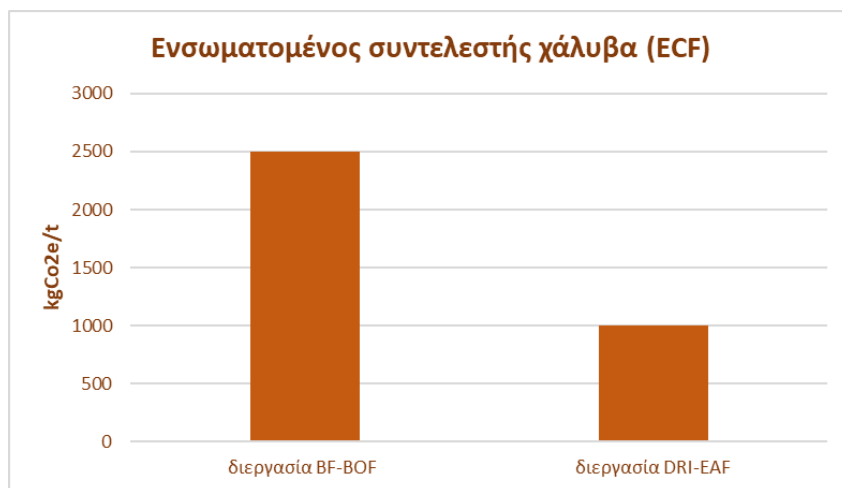
Η ενεργειακή απόδοση των εγκαταστάσεων χαλυβουργίας αλλάζει ανάλογα με την οδό παραγωγής, τον τύπο του σιδηρομεταλλεύματος και τον άνθρακα που χρησιμοποιείται, για το μείγμα προϊόντων χάλυβα. Ο άνθρακας έχει τη μεγαλύτερη εισροή ενέργειας, στη συνέχεια η ηλεκτρική ενέργεια και τέλος το φυσικό αέριο με τη μικρότερη εισροή ενέργειας.

Η παραγωγή χάλυβα συμπεριλαμβάνει στη διαδικασία του και παραγωγή σιδήρου (πρωτογενής παραγωγή) η κατανάλωση στη πρώτη διαδικασία είναι μεγαλύτερη όπως βλέπουμε και στα Γραφήματα 24 καθώς χρησιμοποιείτε οπτάνθρακας ο οποίος είναι άνθρακας με υψηλή περιεκτικότητα για τη μείωση του σιδήρου, αντίθετα στη δεύτερη διαδικασία έχουμε αναγωγή του σιδήρου μέσω φυσικού αερίου. Ο άνθρακας στην οποία του σύσταση όπως είδαμε και παραπάνω καταναλώνει τεράστια ποσά ενέργειας ενώ το φυσικό αέριο δεν έχει τόσο μεγάλη συμμετοχή στη γενικότερη παραγωγή.

Στο Γράφημα 25 έχουμε τη μέθοδο την οποία επεξεργάζονται οι ανώτερες διαδικασίες παραγωγής σιδήρου, ο ενσωματωμένος συντελεστής είναι πάλι μεγαλύτερος με βάση της διαδικασίας που ακολουθήθηκε. Αν και οι εκπομπές είναι κοντά 2500 kg CO₂e/ t και 1000 kgCO₂e/t. Αν και η κατανάλωση της διαδικασίας BF είναι κατά πολύ μεγαλύτερη θα περιμέναμε ότι και οι εκπομπές θα είχαν σημαντική απόκλιση, κάτι το οποίο δεν συμβαίνει και αυτός ίσως οφείλεται στην μέθοδο την οποία πραγματοποιείται (φούρνου ηλεκτρικού τόξου)

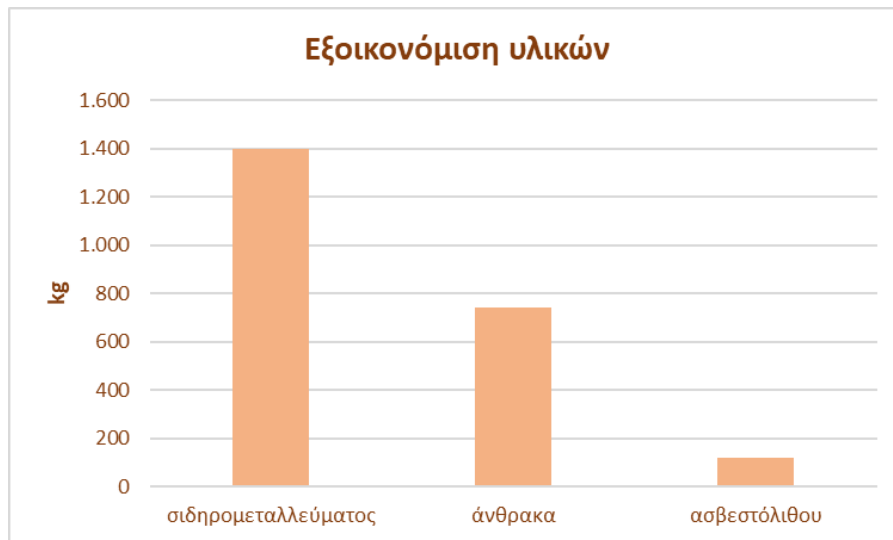


Γράφημα 24



Γράφημα 25

Καθώς ο χάλυβας μπορεί να ανακυκλωθεί στο 100%, παρατηρούμε ότι η εξοικονόμηση που μπορεί να προσφέρει είναι πολύ σημαντική. Για κάθε 1000 kg σκραπ χάλυβα κατασκευασμένο σε νέο χάλυβα έχουμε εξοικονόμηση 1.400 κιλών σιδηρομεταλλεύματος, 740 κιλών άνθρακα και 120 κιλών ασβεστόλιθου. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω και τα τρία αυτά αποτελούν βασικά και αναπόσπαστα στοιχεία στη παραγωγή χάλυβα και κατ' επέκταση στην δημιουργία κτιρίων.

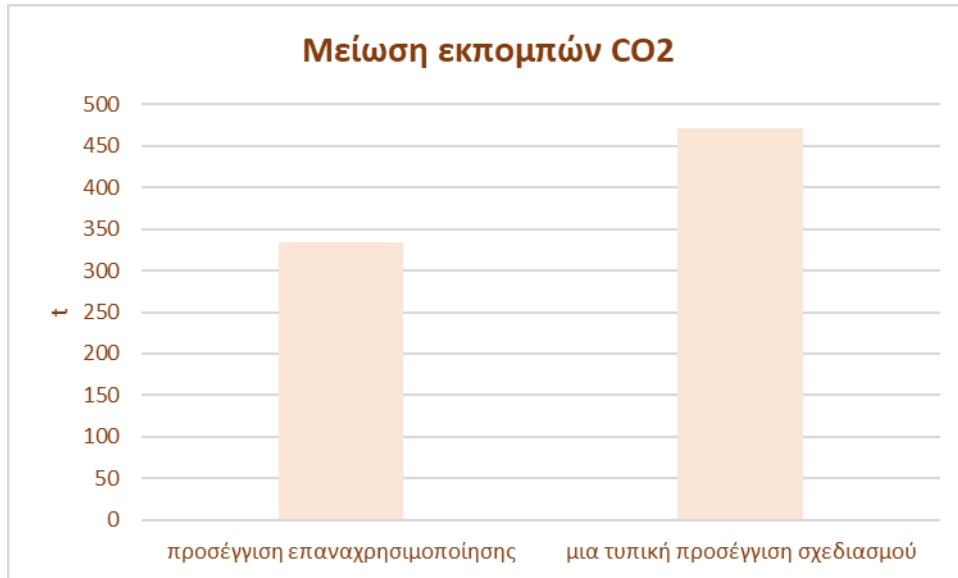


Γράφημα 26

Όσο αφορά την επαναχρησιμοποίηση χάλυβα βάση των μελετών η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας κυμαίνεται στα 14,8 MJ και οι ισοδύναμες εκπομπές CO₂ 1.158 kg για 1 kg χάλυβα. Παρατηρούμε έτσι από τα Γραφήματα 27 – 28 ότι η προσέγγιση της επαναχρησιμοποίησης είναι καλύτερη με 4265 GJ έναντι 6024 GJ που αντιπροσωπεύει μείωση της τάξης του 30%. Το ίδιο ισχύει για τις εκπομπές CO₂ καθώς για τη προσέγγιση της επαναχρησιμοποίησης έχουμε 333,5 t έναντι 471,3 t.



Γράφημα 27



Γράφημα 28

Αν και όπως αναφέρθηκε σε πολλά σημεία της εργασίας η επαναχρησιμοποίηση θεωρείται καλύτερη της ανακύκλωσης καθώς περιλαμβάνει ελάχιστη ή καθόλου επεξεργασία. Η επαναχρησιμοποίηση προσφέρει ακόμη μεγαλύτερο περιβαλλοντικό πλεονέκτημα από την ανακύκλωση, καθώς δεν υπάρχουν (ή πολύ λίγες) περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με την επεξεργασία. Η ανακύκλωση όσο αφορά το χάλυβα έχει κυρίαρχο λόγο στο τομέα κατασκευής.



Γράφημα 29

Ο κατασκευαστικός κλάδος καταναλώνει το 40% των υλικών που εισέρχονται στην παγκόσμια οικονομία και εκτιμάται ότι μόνο το 20-30% αυτών των υλικών ανακυκλώνεται ή επαναχρησιμοποιείται στο τέλος της ωφέλιμης ζωής ενός κτιρίου. Ο

τομέας των κατασκευών, της ενέργειας και της βιομηχανίας παράγει περίπου το 50% των αποβλήτων που παράγονται στην Ευρώπη, με τα απόβλητα CDW ειδικότερα να αντιπροσωπεύουν το 33% των αποβλήτων που παράγονται στην ΕΕ. Ως εκ τούτου, η ΕΕ θεωρεί το ρεύμα CDW ως προτεραιότητα για δράση, τα ποσοστά ανάκτησης είναι 95% στην Ολλανδία, για παράδειγμα, έναντι ενός ευρωπαϊκού μέσου όρου μεταξύ 30% και 60%. Η τσιμεντοβιομηχανία καταναλώνει περίπου το 7% της παγκόσμιας βιομηχανικής κατανάλωσης ενέργειας, γεγονός που υποδηλώνει ότι η βιομηχανία είναι ενεργοβόρα και απαιτεί μεγάλες ποσότητες πόρων, γεγονός που έχει σημαντικό αντίκτυπο στο περιβάλλον.

Την τελευταία δεκαετία, η Ευρώπη γνώρισε σημαντική αύξηση της κατασκευαστικής δραστηριότητας, με αποτέλεσμα κατά μέσο όρο ετησίως περίπου 827 εκατομμύρια τόνους οικοδομικών απορριμμάτων. Ωστόσο, μόνο τα μισά από αυτά τα απόβλητα ανακτώνται αποτελεσματικά. Είναι ζωτικής σημασίας να δοθεί προτεραιότητα στην ανακύκλωση και την επαναχρησιμοποίηση αυτών των αποβλήτων, όχι μόνο για να ελαχιστοποιηθεί η εξόρυξη πρώτων υλών αλλά και για να αποτραπεί η απελευθέρωση αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα που θα συνέβαινε εάν παράγονταν νέα δομικά υλικά. Η απόρριψη δομικών υλικών δεν είναι απλή υπόθεση, καθώς έχουν τη δυνατότητα να γίνουν απόβλητα. Δυστυχώς, σημαντικό μέρος των μονωτικών υλικών, τα οποία αποτελούνται κυρίως από ορυκτοβάμβακα (52%) και πλαστικά (41%), συμβάλλουν σε αυτό το ζήτημα. Ως εκ τούτου, είναι επιτακτική ανάγκη να ενσωματωθούν βιώσιμες πρακτικές στη διαδικασία σχεδιασμού της μόνωσης προκειμένου να μετριαστούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις και να ενισχυθεί η συνολική βιωσιμότητα των δομικών υλικών και έργων σε όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους.

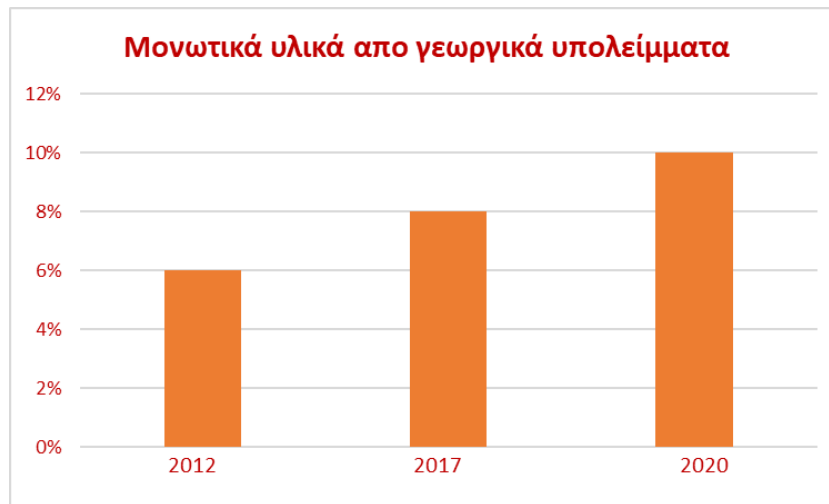
Προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι δυσκολίες που συνδέονται με τη διαχείριση των απορριμμάτων, πολλοί ερευνητές έχουν στρέψει την προσοχή τους στη δημιουργία μονωτικών υλικών που χρησιμοποιούν γεωργικά και βιομηχανικά απόβλητα. Αντί να απορρίπτονται ή να αποτεφρώνονται αυτά τα απόβλητα, επαναχρησιμοποιούνται, οδηγώντας σε μείωση τόσο των οικονομικών όσο και των περιβαλλοντικών συνεπειών. Αυτή η προσέγγιση περιλαμβάνει τη χρήση τοπικών και φυσικών αποβλήτων υλικών, μειώνοντας έτσι την εξάρτηση από το πετρέλαιο και άλλους μη ανανεώσιμους πόρους. Με την εφαρμογή σχολαστικών τεχνικών μόνωσης

στα κτίρια, εκτιμάται ότι η κατανάλωση ενέργειας των νοικοκυριών θα μπορούσε να μειωθεί κατά περίπου 65%.

Όσο αφορά την θερμομόνωση όπως είδαμε και στην ενότητα 6.1.3 πολλά υλικά έχουν αντικαταστήσει τα συμβατικά υλικά. Υλικά που μπορούν να συμβάλουν σε αυτή την αντικατάσταση, δηλαδή να επαναχρησιμοποιηθούν με σκοπό τη χρήση τους σε μόνωση είναι τα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα και τα γεωργικά υπολείμματα. Η επαναχρησιμοποίηση των κλωστοϋφαντουργικών απορριμμάτων σε μονωτικά υλικά κτιρίων προσφέρει:

- Μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων
- Μείωση την κατανάλωση ενέργειας
- Μείωση των απορριμμάτων που είναι προς διάθεση σε χώρους υγειονομικής ταφής
- Μείωση των παρθένων υλικών
- Μείωση των αερίων του θερμοκηπίου
- Μείωση της ρύπανσης σε αέρα, νερό και έδαφος
- Μείωση και εξοικονόμηση σε ορυκτά καύσιμα όπως το πετρέλαιο

Αντίστοιχα όσο αφορά τα γεωργικά υπολείμματα αποτελούν το καλύτερο τρόπο για η επαναχρησιμοποίηση τους καθώς θεωρούνται επικίνδυνα και η απόρριψή τους είναι πολύ δαπανηρή. Όπως φαίνεται και στο Γράφημα 30 η χρήση των γεωργικών υπολειμμάτων στη χρήση μονωτικών υλικών αυξήθηκε από το 2012 έως του 2020 κατά 4%, με πρόβλεψη ανόδου κατά 3% έως το 2030, αν και η εκτίμηση στα πλαίσια της δεκαετίας δεν είναι μεγάλη η συνεισφορά και μείωση των απορριμμάτων είναι εξίσου σημαντική.



Γράφημα 30

8^ο Κεφάλαιο

Συμπεράσματα και επόμενα βήματα

Χρειαστήκαμε δεκαετίας ανεπανόρθωτης εξάντλησης των φυσικών πόρων ώστε να καταλάβουμε ότι η γραμμική οικονομία δεν είναι πλέον βιώσιμη. Οι τεράστιες ποσότητες κατανάλωσης πρώτων υλών έχουν οδηγήσει σε τεράστιες ποσότητες κατανάλωσης ενέργειας και κατ' επέκταση αντίστοιχα σε τεράστιους όγκους αποβλήτων. Εκεί ακριβώς στοχεύει η μετάβαση στο μοντέλο της κυκλικής οικονομίας.

Η κυκλική οικονομία προσφέρει μια ολιστική και ολοκληρωμένη προσέγγιση της βιώσιμης ανάπτυξης, που περιλαμβάνει περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές διαστάσεις. Με τη μετάβαση από ένα γραμμικό σε ένα κυκλικό μοντέλο, οι κοινωνίες μπορούν να επιτύχουν μεγαλύτερη αποδοτικότητα πόρων, ανθεκτικότητα και ευημερία για τις σημερινές και τις μελλοντικές γενιές. Αυτό συμβαίνει λόγω της ελαχιστοποίησης της σπατάλης και της μεγιστοποίησης της αξίας των πόρων διατηρώντας τους σε χρήση για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα μέσω της ανακύκλωσης και της επαναχρησιμοποίησης. Εφόσον οι επιπτώσεις λειτουργούν αναλογικά η μικρότερη σπατάλη οδηγεί και σε ελαχιστοποίηση της παραγωγής απορριμμάτων και της διάθεσης των χωματερών. Χωρίς την εφαρμογή της κυκλικής οικονομίας οι χώροι υγειονομικής ταφής και οι αποτεφρωτήρες θα φέρουν το μεγαλύτερο βάρος αυτών των αποβλήτων, οδηγώντας σε υποβάθμιση της γης, σε ατμοσφαιρική ρύπανση και σε εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, συμβάλλοντας στην

κλιματική αλλαγή και σε ζητήματα δημόσιας υγείας, αντίθετα με την εφαρμογή της κυκλικής οικονομίας προωθείται η μακροζωία του προϊόντος, ο σχεδιασμός για αποσυναρμολόγηση για την ανάκτηση υλικών, με στόχο το κλείσιμο του βρόχου στις ροές απορριμμάτων, μειώνοντας την επιβάρυνση των χωματερών και των αποτεφρωτηρίων.

Για να μπορέσει όμως να γίνει η εφαρμογή αυτή, η θέση των κυβερνήσεων και των υπεύθυνων χάραξης πολιτικής είναι βασική καθώς αυτοί είναι που διαδραματίζουν το κρίσιμο ρόλο στη διευκόλυνση της μετάβασης σε μια κυκλική οικονομία μέσω υποστηρικτικών πολιτικών, κανονισμών και κινήτρων. Αυτό περιλαμβάνει μέτρα όπως η εκτεταμένη ευθύνη του παραγωγού, τα πρότυπα οικολογικού σχεδιασμού και τα οικονομικά κίνητρα για βιώσιμες πρακτικές. Η οικονομική ανάπτυξη και η καινοτομία ενισχύονται με νέα επιχειρηματικά μοντέλα, δημιουργία θέσεων εργασίας και ευκαιρίες στην αγορά. Ενθαρρύνει ακόμα την ανάπτυξη βιώσιμων προϊόντων και υπηρεσιών, ενισχύοντας έτσι την ανταγωνιστικότητα και την ανθεκτικότητα στην παγκόσμια αγορά.

Η επαναχρησιμοποίηση προϊόντων απαιτεί λιγότερη ενέργεια σε σύγκριση με την κατασκευή νέων. Αποφεύγονται οι ενεργοβόρες διεργασίες που σχετίζονται με την εξόρυξη, τη διύλιση και την κατασκευή, με αποτέλεσμα σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας και χαμηλότερες εκπομπές άνθρακα. Η επαναχρησιμοποίηση μπορεί να είναι πιο οικονομική από την αγορά νέων αντικειμένων. Δίνει τη δυνατότητα σε άτομα, επιχειρήσεις και κοινότητες να εξοικονομήσουν χρήματα χρησιμοποιώντας υπάρχοντες πόρους αντί να αγοράζουν νέους. Επιπλέον, η επισκευή ή η ανακατασκευή των αντικειμένων μπορεί συχνά να είναι λιγότερο δαπανηρή από την αντικατάστασή τους.

Σε αρκετά σημεία αναρωτηθήκαμε γιατί η ανακύκλωση είναι πιο διαδεδομένη από την επαναχρησιμοποίηση, αφού από πολλές μελέτες είδαμε ότι η δεύτερη είναι πιο αποτελεσματική. Πολλές κυβερνητικές πολιτικές, ενδέχεται να δίνουν προτεραιότητα στην ανακύκλωση έναντι της επαναχρησιμοποίησης. Ακόμα οι υποδομές ανακύκλωσης, όπως τα συστήματα συλλογής και οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας, είναι πιο ανεπτυγμένα και άμεσα διαθέσιμα σε σύγκριση με τα συστήματα επαναχρησιμοποίησης. Συχνά είναι πιο βολικό για τα άτομα και τις επιχειρήσεις να απορρίπτουν αντικείμενα μέσω προγραμμάτων ανακύκλωσης αντί να αναζητούν

ευκαιρίες για επαναχρησιμοποίηση. Η υιοθέτηση πρακτικών επαναχρησιμοποίησης σε ατομικό, κοινοτικό και κοινωνικό επίπεδο καταλαβαίνουμε ότι είναι απαραίτητη για την οικοδόμηση ενός πιο ανθεκτικού και περιβαλλοντικά υπεύθυνου κόσμου.

Κάθε επιλογή επαναχρησιμοποιήσιμης συσκευασίας έχει τα περιβαλλοντικά της οφέλη αλλά και μειονεκτήματα. Τα επαναχρησιμοποιούμενα γυάλινα μπουκάλια προσφέρουν ανακυκλωσιμότητα και αδράνεια, αλλά είναι βαρύτερα και πιο εύθραυστα. Οι επαναχρησιμοποιούμενες φιάλες PET είναι ελαφριές και ανθεκτικές στη θραύση, αλλά απαιτούν ορυκτά καύσιμα για την παραγωγή τους. Τα επαναχρησιμοποιήσιμα δοχεία αλουμινίου είναι ελαφριά και εξαιρετικά ανακυκλώσιμα, αλλά έχουν υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις για παραγωγή. Η πιο βιώσιμη επιλογή μπορεί να εξαρτάται από παράγοντες όπως η τοπική υποδομή ανακύκλωσης, οι αποστάσεις μεταφοράς και οι πρακτικές διαχείρισης στο τέλος του κύκλου ζωής τους.

Τα κτίρια πρέπει να σχεδιάζονται με σκοπό την εύκολη αποσυναρμολόγηση και επαναχρησιμοποίηση των υλικών. Αυτό περιλαμβάνει την επιλογή υλικών που είναι ανθεκτικά, ανακυκλώσιμα και μη τοξικά, καθώς και τη χρήση αρθρωτών τεχνικών κατασκευής που επιτρέπουν την εύκολη συναρμολόγηση και αποσυναρμολόγηση. Ο σχεδιασμός για προσαρμοστικότητα και ευελιξία μπορεί επίσης να επεκτείνει τη διάρκεια ζωής των κτιρίων, καλύπτοντας μελλοντικές αλλαγές στη χρήση ή τη χρήση.

Η εφαρμογή αποτελεσματικών στρατηγικών διαχείρισης απορριμμάτων για την ελαχιστοποίηση των απορριμμάτων κατασκευής και κατεδάφισης και τη μεγιστοποίηση της ανάκτησης και ανακύκλωσης υλικών. Αυτό περιλαμβάνει τον διαχωρισμό των ροών αποβλήτων επί τόπου, την προώθηση της επαναχρησιμοποίησης και της ανακύκλωσης υλικών και τη συνεργασία με τοπικές εγκαταστάσεις και οργανισμούς ανακύκλωσης για την εκτροπή των απορριμμάτων από τους χώρους υγειονομικής ταφής.

Με την ενσωμάτωση των αρχών της κυκλικής οικονομίας στο σχεδιασμό, την κατασκευή και τη λειτουργία κτιρίων, οι ενδιαφερόμενοι μπορούν να δημιουργήσουν κτίρια που είναι πιο αποδοτικά από πλευράς πόρων, ανθεκτικά και βιώσιμα, συμβάλλοντας στη μετάβαση προς ένα κυκλικό δομημένο περιβάλλον.

Συνοψίζοντας η κυκλική οικονομία μπορεί να συμβάλει σε σημαντικές μειώσεις στην κατανάλωση νερού σε διάφορους κλάδους συμβάλλει στη διασφάλιση της ποιότητας του νερού και στην ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των βιομηχανικών δραστηριοτήτων στα υδάτινα οικοσυστήματα. Ακόμα συμβάλει στη μείωση της ζήτησης νέας γης για εξορυκτικές δραστηριότητες και βοηθά στην εκτροπή των υλικών από τους χώρους υγειονομικής ταφής, μειώνοντας έτσι την ανάγκη για επέκταση των χωματερών και διατηρώντας πολύτιμους πόρους γης.

Τέλος δίνει έμφαση στην ενεργειακή απόδοση, τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τη μείωση της εξάρτησης από ορυκτά καύσιμα, οδηγώντας σε χαμηλότερες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου που σχετίζονται με την εξόρυξη πόρων, την παραγωγή και τη διαχείριση αποβλήτων, και συμβάλλει στον μετριασμό της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και στη βελτίωση της ποιότητας του αέρα, οδηγώντας σε οφέλη για την υγεία για τις κοινότητες και τα οικοσυστήματα.

Το σημαντικότερο βέβαια όλων των παραπάνω είναι η προώθηση της συλλογικής και κοινωνικής ευθύνης. Οι κοινότητες μπορούν να συνεργαστούν για να αντιμετωπίσουν τις περιβαλλοντικές προκλήσεις, να διατηρήσουν τους πόρους και να οικοδομήσουν ένα πιο βιώσιμο μέλλον για όλους. Μέσω της συνεργασίας, της εκπαίδευσης και της συντονισμένης δράσης, άτομα και οργανισμοί μπορούν να παίξουν τον ρόλο τους στην προώθηση της επαναχρησιμοποίησης ως θεμελιώδους συνιστώσας της υπεύθυνης διαχείρισης απορριμμάτων και της διατήρησης του περιβάλλοντος.

Η στροφή της συμπεριφοράς των καταναλωτών προς πιο βιώσιμα καταναλωτικά πρότυπα είναι θεμελιώδης για την επιτυχία της κυκλικής οικονομίας. Οι εκστρατείες ευαισθητοποίησης και οι διαφανείς πληροφορίες σχετικά με τους κύκλους ζωής των προϊόντων μπορούν να δώσουν τη δυνατότητα στους καταναλωτές να κάνουν ενημερωμένες επιλογές και να απαιτούν προϊόντα και υπηρεσίες φιλικά προς το περιβάλλον.

Η αλλαγή των κοινωνικών στάσεων και συμπεριφορών για την αποδοχή της επαναχρησιμοποίησης απαιτεί σημαντικές πολιτιστικές αλλαγές και εκπαιδευτικές πρωτοβουλίες, ώστε να καταφέρουμε να ξεφορτωθούμε τη κουλτούρα μιας χρήσης που έχει καταστεί ως η εύκολη λύση.

Βιβλιογραφία

- Abdelmeguid, A., Afy-Shararah, M., & Salonitis, K. (2022). Investigating the challenges of applying the principles of the circular economy in the fashion industry: A systematic review. *Sustainable Production and Consumption*, 32, 505–518. <https://doi.org/10.1016/J.SPC.2022.05.009>
- Aguilar-Jurado, M. Á., Gil-Madrona, P., Ortega-Dato, J. F., & Zamorano-García, D. (2019a). Effects of an Educational Glass Recycling Program against Environmental Pollution in Spain. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(24). <https://doi.org/10.3390/IJERPH16245108>
- Amahmoud, A., El Attar, M. M., Meleishy, A., & Professor, A. (n.d.). *The Evolution of Life Cycle Assessment Approach: A Review of Past and Future Prospects*. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/992/1/012002>
- Amienyo, D., Gujba, H., Stichnothe, H., & Azapagic, A. (2013). Life cycle environmental impacts of carbonated soft drinks. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(1), 77–92. <https://doi.org/10.1007/S11367-012-0459-Y>
- Arruda, E. H., Melatto, R. A. P. B., Levy, W., & Conti, D. de M. (2021). Circular economy: A brief literature review (2015–2020). *Sustainable Operations and Computers*, 2, 79–86. <https://doi.org/10.1016/J.SUSOC.2021.05.001>
- Atmaca, A., & Kanoglu, M. (2012). Reducing energy consumption of a raw mill in cement industry. *Energy*, 42(1), 261–269. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2012.03.060>
- Baddoo, N. R. (2008). Stainless steel in construction: A review of research, applications, challenges and opportunities. *Journal of Constructional Steel Research*, 64(11), 1199–1206. <https://doi.org/10.1016/J.JCSR.2008.07.011>
- Battesini Teixeira, T. G., de Medeiros, J. F., Kolling, C., Duarte Ribeiro, J. L., & Morea, D. (2023). Redesign in the textile industry: Proposal of a methodology for the insertion of circular thinking in product development processes. *Journal of Cleaner Production*, 397, 136588. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2023.136588>
- Benyathiar, P., Kumar, P., Carpenter, G., Brace, J., & Mishra, D. K. (2022a). Polyethylene Terephthalate (PET) Bottle-to-Bottle Recycling for the Beverage Industry: A Review. *Polymers* 2022, Vol. 14, Page 2366, 14(12), 2366. <https://doi.org/10.3390/POLYM14122366>
- Beswick-Parsons, R., Jackson, P., & Evans, D. M. (2023). Understanding national variations in reusable packaging: Commercial drivers, regulatory factors, and provisioning systems. *Geoforum*, 145, 103844. <https://doi.org/10.1016/J.GEOFORUM.2023.103844>
- Biyada, S., Merzouki, M., & Urbonavičius, J. (2023a). New Resources for Sustainable Thermal Insulation Using Textile and Agricultural Waste in a New Circular Economy Approach: An Overview. *Processes* 2023, Vol. 11, Page 2683, 11(9), 2683. <https://doi.org/10.3390/PR11092683>

- Bocken, N. M. P., de Pauw, I., Bakker, C., & van der Grinten, B. (2016). Product design and business model strategies for a circular economy. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 33(5), 308–320. <https://doi.org/10.1080/21681015.2016.1172124>
- Bradley, C. G., & Corsini, L. (2023). A literature review and analytical framework of the sustainability of reusable packaging. *Sustainable Production and Consumption*, 37, 126–141. <https://doi.org/10.1016/J.SPC.2023.02.009>
- Bulei, C., Todor, M. P., Heput, T., & Kiss, I. (2018). Recovering Aluminium for Recycling in Reusable Backyard Foundry that Melts Aluminium Cans. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 416(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/416/1/012099>
- Cayzer, S., Griffiths, P., & Beghetto, V. (2017). Design of indicators for measuring product performance in the circular economy. *International Journal of Sustainable Engineering*, 10(4–5), 289–298. <https://doi.org/10.1080/19397038.2017.1333543>
- Circular economy: A multilevel approach for natural resources and wastes under an agri-food perspective. (2024). *Water-Energy Nexus*. <https://doi.org/10.1016/J.WEN.2023.12.003>
- Coelho, P. M., Corona, B., ten Klooster, R., & Worrell, E. (2020a). Sustainability of reusable packaging—Current situation and trends. *Resources, Conservation & Recycling: X*, 6, 100037. <https://doi.org/10.1016/J.RCRX.2020.100037>
- Coelho, P. M., Corona, B., & Worrell, E. (2020). *A review of environmental impacts REUSABLE VS SINGLE-USE PACKAGING*.
- Coenen, T. B. J., Haanstra, W., Jan Braaksma, A. J. J., & Santos, J. (2020). CEIMA: A framework for identifying critical interfaces between the Circular Economy and stakeholders in the lifecycle of infrastructure assets. *Resources, Conservation and Recycling*, 155, 104552. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2019.104552>
- de Oliveira, C. T., Dantas, T. E. T., & Soares, S. R. (2021). Nano and micro level circular economy indicators: Assisting decision-makers in circularity assessments. *Sustainable Production and Consumption*, 26, 455–468. <https://doi.org/10.1016/J.SPC.2020.11.024>
- De Pascale, A., Di Vita, G., Giannetto, C., Ioppolo, G., Lanfranchi, M., Limosani, M., & Szopik-Depczyńska, K. (2023a). The circular economy implementation at the European Union level. Past, present and future. *Journal of Cleaner Production*, 423, 138658. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2023.138658>
- Debrah, J. K., Vidal, D. G., & Dinis, M. A. P. (2021). Raising Awareness on Solid Waste Management through Formal Education for Sustainability: A Developing Countries Evidence Review. *Recycling 2021, Vol. 6, Page 6, 6(1)*, 6. <https://doi.org/10.3390/RECYCLING6010006>

- Delanoetje, J., & Bachus, K. (2022). Measuring circular reuse magnitude and replacement rate: A new method. *Resources, Conservation and Recycling*, *184*, 106414. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2022.106414>
- Di Domenico, L., Raberto, M., & Safarzynska, K. (2023a). Resource scarcity, circular economy and the energy rebound: A macro-evolutionary input-output model. *Energy Economics*, *128*, 107155. <https://doi.org/10.1016/J.ENERCO.2023.107155>
- Eckelman, M. J., Brown, C., Troup, L. N., Wang, L., Webster, M. D., & Hajjar, J. F. (2018). Life cycle energy and environmental benefits of novel design-for-deconstruction structural systems in steel buildings. *Building and Environment*, *143*, 421–430. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2018.07.017>
- Edirisinghe, L. G. L. M., de Alwis, A. A. P., Wijayasundara, M., & Hemali, N. A. (2024a). Quantifying circularity factor of waste: Assessing the circular economy potential of industrial zones. *Cleaner Environmental Systems*, *12*, 100160. <https://doi.org/10.1016/J.CESYS.2023.100160>
- Elia, V., Gnoni, M. G., & Tornese, F. (2017). Measuring circular economy strategies through index methods: A critical analysis. *Journal of Cleaner Production*, *142*, 2741–2751. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.10.196>
- Elsayed, A. M., Elanwar, H. H., Marzouk, M., & Safar, S. S. (2021a). Sustainable layout design of steel buildings through embodied energy and costs optimization. *Cleaner Engineering and Technology*, *5*, 100308. <https://doi.org/10.1016/J.CLET.2021.100308>
- Fadzil, M. A., Norliyati, M. A., Hilmi, M. A., Ridzuan, A. R., Wan Ibrahim, M. H., & Assrul, R. Z. (n.d.). *Energy Consumption of Insulated Material Using Thermal Effect Analysis*.
- farooq, umar, zeeshan, prof., farooq, umar, & zeeshan, prof. (2020). REUSE OF NON-DEGRADABLE WASTE PET BOTTLES AS A CONSTRUCTION MATERIAL. *JETIR*, *7*(10), 1911–1930. <https://www.jetir.org/view?paper=JETIR2010248>
- Ferrández, D., Yedra, E., Morón, C., Zaragoza, A., & Kosior-Kazberuk, M. (2022). Circular Building Process: Reuse of Insulators from Construction and Demolition Waste to Produce Lime Mortars. *Buildings 2022*, Vol. 12, Page 220, *12*(2), 220. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS12020220>
- Ferrara, C., De Feo, G., & Picone, V. (2021). LCA of Glass Versus PET Mineral Water Bottles: An Italian Case Study. *Recycling 2021*, Vol. 6, Page 50, *6*(3), 50. <https://doi.org/10.3390/RECYCLING6030050>
- Ferronato, N., & Torretta, V. (2019). Waste Mismanagement in Developing Countries: A Review of Global Issues. *International Journal of Environmental Research and Public Health 2019*, Vol. 16, Page 1060, *16*(6), 1060. <https://doi.org/10.3390/IJERPH16061060>
- Figge, F., Thorpe, A. S., & Gutberlet, M. (2023). Definitions of the circular economy: Circularity matters. *Ecological Economics*, *208*, 107823. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLECON.2023.107823>

- Franklin-Johnson, E., Figge, F., & Canning, L. (2016). Resource duration as a managerial indicator for Circular Economy performance. *Journal of Cleaner Production*, *133*, 589–598. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.05.023>
- Frasca, F., Bartolucci, B., Parracha, J. L., Ogut, O., Mendes, M. P., Siani, A. M., Tzortzi, J. N., Bertolin, C., & Flores-Colen, I. (2023). A quantitative comparison on the use of thermal insulation materials in three European countries through the TEnSE approach: Challenges and opportunities. *Building and Environment*, *245*, 110973. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2023.110973>
- Garcia, X., & Pargament, D. (2015a). Reusing wastewater to cope with water scarcity: Economic, social and environmental considerations for decision-making. *Resources, Conservation and Recycling*, *101*, 154–166. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2015.05.015>
- Gaurav, G., Bihari Singh, A., Mistry, S., Gupta, S., Dangayach, G. S., & Meena, M. L. (2021). Recent progress of scientific research on life cycle assessment. *Materials Today: Proceedings*, *47*, 3161–3170. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.06.208>
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, *143*, 757–768. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.12.048>
- Ghisellini, P., Ripa, M., & Ulgiati, S. (2018). Exploring environmental and economic costs and benefits of a circular economy approach to the construction and demolition sector. A literature review. *Journal of Cleaner Production*, *178*, 618–643. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.11.207>
- Guerrero, J. G., Reséndiz, J. R., Reséndiz, H. R., Álvarez-Alvarado, J. M., & Abreo, O. R. (2021). Sustainable Glass Recycling Culture-Based on Semi-Automatic Glass Bottle Cutter Prototype. *Sustainability 2021, Vol. 13, Page 6405*, *13*(11), 6405. <https://doi.org/10.3390/SU13116405>
- Guinée, J. B., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., Ekvall, T., & Rydberg, T. (2011). Life cycle assessment: Past, present, and future. *Environmental Science and Technology*, *45*(1), 90–96. https://doi.org/10.1021/ES101316V/ASSET/IMAGES/LARGE/ES-2010-01316V_0003.JPEG
- Hamade, R., Hadchiti, R., & Ammouri, A. (2020a). Making the Environmental Case for Reusable PET Bottles. *Procedia Manufacturing*, *43*, 201–207. <https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2020.02.137>
- Harris, S., Martin, M., & Diener, D. (2021). Circularity for circularity's sake? Scoping review of assessment methods for environmental performance in the circular economy. *Sustainable Production and Consumption*, *26*, 172–186. <https://doi.org/10.1016/J.SPC.2020.09.018>

- Hopkinson, P., Chen, H. M., Zhou, K., Wang, Y., & Lam, D. (2018). Recovery and reuse of structural products from end-of-life buildings. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Engineering Sustainability*, 172(3), 119–128. <https://doi.org/10.1680/JENSU.18.00007>
- Hu, Z., He, D., Feng, K., Liu, P., & Jia, Y. (2019). Optimal Design Model of the Energy Systems in Iron and Steel Enterprises. *Applied Sciences* 2019, Vol. 9, Page 4778, 9(22), 4778. <https://doi.org/10.3390/APP9224778>
- Huang, B., Gao, X., Xu, X., Song, J., Geng, Y., Sarkis, J., Fishman, T., Kua, H., & Nakatani, J. (2020). A Life Cycle Thinking Framework to Mitigate the Environmental Impact of Building Materials. *One Earth*, 3(5), 564–573. <https://doi.org/10.1016/J.ONEEAR.2020.10.010/ATTACHMENT/21466AA9-D9C5-4970-8BCF-99FCF0DB5908/MMC1.PDF>
- Hysa, E., Kruja, A., Rehman, N. U., & Laurenti, R. (2020a). Circular Economy Innovation and Environmental Sustainability Impact on Economic Growth: An Integrated Model for Sustainable Development. *Sustainability* 2020, Vol. 12, Page 4831, 12(12), 4831. <https://doi.org/10.3390/SU12124831>
- Ingrao, C., & Wojnarowska, M. (2023a). Findings from a streamlined life cycle assessment of PET-bottles for beverage-packaging applications, in the context of circular economy. *Science of The Total Environment*, 892, 164805. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.164805>
- International Energy Agency. (n.d.). *Iron and Steel Technology Roadmap – Analysis - IEA*. Retrieved February 29, 2024, from <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>
- Islam, S., & Bhat, G. (2019). Environmentally-friendly thermal and acoustic insulation materials from recycled textiles. *Journal of Environmental Management*, 251, 109536. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2019.109536>
- Jacquemin, L., Pontalier, P.-Y., & Sablayrolles, C. (n.d.). *Life cycle assessment (LCA) applied to the process industry: a review*. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0432-9>
- Jordeva, S., Golomeova-Longurova, S., Kertakova, M., Mojsov, K., & Efremov, J. (2019). Textile as a sustainable insulating material for buildings. *Tekstilna Industrija*, 67(2), 20–28. <https://doi.org/10.5937/TEKSTIND1902020J>
- Kabirifar, K., Mojtahedi, M., Wang, C., & Tam, V. W. Y. (2020). Construction and demolition waste management contributing factors coupled with reduce, reuse, and recycle strategies for effective waste management: A review. *Journal of Cleaner Production*, 263, 121265. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.121265>
- Kakwani, N. S., & Kalbar, P. P. (2022). Measuring urban water circularity: Development and implementation of a Water Circularity Indicator. *Sustainable Production and Consumption*, 31, 723–735. <https://doi.org/10.1016/J.SPC.2022.03.029>

- Kanyilmaz, A., Birhane, M., Fishwick, R., & del Castillo, C. (2023a). Reuse of Steel in the Construction Industry: Challenges and Opportunities. *International Journal of Steel Structures*, 23(5), 1399–1416. <https://doi.org/10.1007/S13296-023-00778-4>
- Kumar, S., Darshna, A., & Ranjan, D. (2023). A review of literature on the integration of green energy and circular economy. *Heliyon*, 9(11), e21091. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2023.E21091>
- Küpfer, C., Bastien-Masse, M., & Fivet, C. (2023a). Reuse of concrete components in new construction projects: Critical review of 77 circular precedents. *Journal of Cleaner Production*, 383, 135235. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.135235>
- Kusumo, F., Mahlia, T. M. I., Pradhan, S., Ong, H. C., Silitonga, A. S., Fattah, I. M. R., Nghiem, L. D., & Mofijur, M. (2022). A framework to assess indicators of the circular economy in biological systems. *Environmental Technology & Innovation*, 28, 102945. <https://doi.org/10.1016/J.ETI.2022.102945>
- Lavallais, C. M., & Dunn, J. B. (2023). Developing product level indicators to advance the nitrogen circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*, 198, 107167. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2023.107167>
- Madloul, N. A., Saidur, R., Hossain, M. S., & Rahim, N. A. (2011). A critical review on energy use and savings in the cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 2042–2060. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2011.01.005>
- Mahinroosta, M., & Allahverdi, A. (2018a). Hazardous aluminum dross characterization and recycling strategies: A critical review. *Journal of Environmental Management*, 223, 452–468. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2018.06.068>
- Malhi, G. S., Kaur, M., & Kaushik, P. (2021). Impact of Climate Change on Agriculture and Its Mitigation Strategies: A Review. *Sustainability 2021, Vol. 13, Page 1318*, 13(3), 1318. <https://doi.org/10.3390/SU13031318>
- Marczak, H. (2022). Energy Inputs on the Production of Plastic Products. *Journal of Ecological Engineering*, 23(9), 146–156. <https://doi.org/10.12911/22998993/151815>
- Marenco-Porto, C. A., Fierro, J. J., Nieto-Londoño, C., Lopera, L., Escudero-Atehortua, A., Giraldo, M., & Jouhara, H. (2023). Potential savings in the cement industry using waste heat recovery technologies. *Energy*, 279, 127810. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2023.127810>
- Marín-Calvo, N., González-Serrud, S., & James-Rivas, A. (2023a). Thermal insulation material produced from recycled materials for building applications: cellulose and rice husk-based material. *Frontiers in Built Environment*, 9, 1271317. <https://doi.org/10.3389/FBUIL.2023.1271317/BIBTEX>
- Mhatre, P., Panchal, R., Singh, A., & Bibyan, S. (2021). A systematic literature review on the circular economy initiatives in the European Union. *Sustainable Production and Consumption*, 26, 187–202. <https://doi.org/10.1016/J.SPC.2020.09.008>

- Miller, S. A., John, V. M., Pacca, S. A., & Horvath, A. (2018). Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050. *Cement and Concrete Research*, *114*, 115–124. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2017.08.026>
- Morawski, C., Copello, L., & Simon, J. M. (2023). *Reinventing glass* .
- Morlet, A. (2020). *Reimagining reuse for the circular economy of glass Stakeholder Perspectives Series*.
- Morseletto, P. (2023). Sometimes linear, sometimes circular: States of the economy and transitions to the future. *Journal of Cleaner Production*, *390*, 136138. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2023.136138>
- Mossie, A. T., Khatiwada, D., Palm, B., & Bekele, G. (2023a). Investigating energy saving and climate mitigation potentials in cement production – A case study in Ethiopia. *Energy Conversion and Management*, *287*, 117111. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2023.117111>
- Mostert, C., Sameer, H., Glanz, D., & Bringezu, S. (2021). Climate and resource footprint assessment and visualization of recycled concrete for circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*, *174*, 105767. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2021.105767>
- Moutik, B., Summerscales, J., Graham-Jones, J., & Pemberton, R. (2023). Life Cycle Assessment Research Trends and Implications: A Bibliometric Analysis. *Sustainability* *2023*, Vol. 15, Page 13408, *15*(18), 13408. <https://doi.org/10.3390/SU151813408>
- Moynihan, M. C., & Allwood, J. M. (2014). Utilization of structural steel in buildings. *Proceedings. Mathematical, Physical, and Engineering Sciences / The Royal Society*, *470*(2168). <https://doi.org/10.1098/RSPA.2014.0170>
- Niero, M., & Kalbar, P. P. (2019). Coupling material circularity indicators and life cycle based indicators: A proposal to advance the assessment of circular economy strategies at the product level. *Resources, Conservation and Recycling*, *140*, 305–312. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2018.10.002>
- Nika, C. E., Expósito, A., Kissler, J., Bertino, G., Oral, H. V., Dehghanian, K., Vasilaki, V., Iacovidou, E., Fatone, F., Atanasova, N., & Katsou, E. (2021). Validating circular performance indicators: The interface between circular economy and stakeholders. *Water (Switzerland)*, *13*(16), 2198. <https://doi.org/10.3390/W13162198/S1>
- Oceana Protecting the World's Ocean. (2020). *How the soft drink industry can-right now-reduce marine plastic pollution by billions of bottles each year*.
- Oliveira Neto, G. C. de, Cesar da Silva, P., Tucci, H. N. P., & Amorim, M. (2021). Reuse of water and materials as a cleaner production practice in the textile industry contributing to blue economy. *Journal of Cleaner Production*, *305*, 127075. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.127075>

- Pacurariu, R. L., Vatca, S. D., Lakatos, E. S., Bacali, L., & Vlad, M. (2021). A Critical Review of EU Key Indicators for the Transition to the Circular Economy. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2021, Vol. 18, Page 8840, 18(16), 8840. <https://doi.org/10.3390/IJERPH18168840>
- Padamata, S. K., Yasinskiy, A., & Polyakov, P. (2021). A Review of Secondary Aluminum Production and Its Byproducts. *JOM*, 73(9), 2603–2614. <https://doi.org/10.1007/S11837-021-04802-Y/TABLES/4>
- Papadaki, D., Nikolaou, D. A., & Assimakopoulos, M. N. (2022). Circular Environmental Impact of Recycled Building Materials and Residential Renewable Energy. *Sustainability* 2022, Vol. 14, Page 4039, 14(7), 4039. <https://doi.org/10.3390/SU14074039>
- Papamichael, I., Voukkali, I., Loizia, P., Stylianou, M., Economou, F., Vardopoulos, I., Klontza, E. E., Lekkas, D. F., & Zorpas, A. A. (2023). Measuring Circularity: Tools for monitoring a smooth transition to Circular Economy. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 36, 101330. <https://doi.org/10.1016/J.SCP.2023.101330>
- Park, J. Y., & Chertow, M. R. (2014). Establishing and testing the “reuse potential” indicator for managing wastes as resources. *Journal of Environmental Management*, 137, 45–53. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2013.11.053>
- Petcu, C., Hegyi, A., Stoian, V., Dragomir, C. S., Ciobanu, A. A., Lăzărescu, A. V., & Florean, C. (2023). Research on Thermal Insulation Performance and Impact on Indoor Air Quality of Cellulose-Based Thermal Insulation Materials. *Materials*, 16(15), 5458. <https://doi.org/10.3390/MA16155458>
- Pinter, E., Welle, F., Mayrhofer, E., Pechhacker, A., Motloch, L., Lahme, V., Grant, A., & Tacker, M. (2021). Circularity Study on PET Bottle-To-Bottle Recycling. *Sustainability* 2021, Vol. 13, Page 7370, 13(13), 7370. <https://doi.org/10.3390/SU13137370>
- Pongiglione, M., & Calderini, C. (2014). Material savings through structural steel reuse: A case study in Genoa. *Resources, Conservation and Recycling*, 86, 87–92. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2014.02.011>
- Porras-Amores, C., Martin Garcia, P., Villoria Sáez, P., Del Rio Merino, M., & Vitiello, V. (2021a). Assessing the Energy Efficiency Potential of Recycled Materials with Construction and Demolition Waste: A Spanish Case Study. *Applied Sciences* 2021, Vol. 11, Page 7809, 11(17), 7809. <https://doi.org/10.3390/APP11177809>
- Raabe, D., Ponge, D., Uggowitzer, P. J., Roscher, M., Paolantonio, M., Liu, C., Antrekowitsch, H., Kozeschnik, E., Seidmann, D., Gault, B., De Geuser, F., Deschamps, A., Hutchinson, C., Liu, C., Li, Z., Prangnell, P., Robson, J., Shanthraj, P., Vakili, S., ... Pogatscher, S. (2022). Making sustainable aluminum by recycling scrap: The science of “dirty” alloys. *Progress in Materials Science*, 128, 100947. <https://doi.org/10.1016/J.PMATSCI.2022.100947>

- Radini, S., González-Camejo, J., Andreola, C., Eusebi, A. L., & Fatone, F. (2023). Risk management and digitalisation to overcome barriers for safe reuse of urban wastewater for irrigation – A review based on European practice. *Journal of Water Process Engineering*, 53, 103690. <https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2023.103690>
- Radwan, A. M. (n.d.). *Different Possible Ways for Saving Energy in the Cement Production*. Retrieved January 20, 2024, from www.pelagiaresearchlibrary.com
- Rakhshan, K., Morel, J. C., & Daneshkhah, A. (2021). Predicting the technical reusability of load-bearing building components: A probabilistic approach towards developing a Circular Economy framework. *Journal of Building Engineering*, 42, 102791. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.102791>
- Ramírez, C. P., Río Merino, M. del, Arrebola, C. V., Barriguete, A. V., & Benito, P. A. (2021a). Durability of cement mortars reinforced with insulation waste from the construction industry. *Journal of Building Engineering*, 40, 102719. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.102719>
- Ramírez, C. P., Río Merino, M. del, Arrebola, C. V., Barriguete, A. V., & Benito, P. A. (2021b). Durability of cement mortars reinforced with insulation waste from the construction industry. *Journal of Building Engineering*, 40, 102719. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.102719>
- Reh, L. (2013). Process engineering in circular economy. *Particuology*, 11(2), 119–133. <https://doi.org/10.1016/J.PARTIC.2012.11.001>
- Roberts, M., Allen, S., Clarke, J., Searle, J., & Coley, D. (2023). Understanding the global warming potential of circular design strategies: Life cycle assessment of a design-for-disassembly building. *Sustainable Production and Consumption*, 37, 331–343. <https://doi.org/10.1016/J.SPC.2023.03.001>
- Saidani, M., Yannou, B., Leroy, Y., Cluzel, F., & Kendall, A. (2019). A taxonomy of circular economy indicators. *Journal of Cleaner Production*, 207, 542–559. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.10.014>
- Sakthivelmurugan, E., Senthilkumar, G., & Karthick, K. N. (2022). Analysis of the impact of circular economy over linear economy in the paper processing industry. *Materials Today: Proceedings*, 66, 1446–1452. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2022.05.449>
- Sanchez, B., & Haas, C. (2018). A novel selective disassembly sequence planning method for adaptive reuse of buildings. *Journal of Cleaner Production*, 183, 998–1010. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.02.201>
- Sánchez-Ortiz, J., Rodríguez-Cornejo, V., Del Río-Sánchez, R., & García-Valderrama, T. (2020). Indicators to Measure Efficiency in Circular Economies. *Sustainability* 2020, Vol. 12, Page 4483, 12(11), 4483. <https://doi.org/10.3390/SU12114483>

- Sazdovski, I., Bala, A., & Fullana-i-Palmer, P. (2021). Linking LCA literature with circular economy value creation: A review on beverage packaging. *Science of The Total Environment*, 771, 145322. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.145322>
- Schritt, H., & Pleissner, D. (2022). Recycling of organic residues to produce insulation composites: A review. *Cleaner Waste Systems*, 3, 100023. <https://doi.org/10.1016/J.CLWAS.2022.100023>
- Selvaraj, S., & Chan, T. M. (2024). Recommendations for Implementing Circular Economy in Construction: Direct Reuse of Steel Structures. *Journal of Constructional Steel Research*, 214, 108439. <https://doi.org/10.1016/J.JCSR.2023.108439>
- Sharma, P. (2017). (PDF) *A study on Life Cycle Assessment*. https://www.researchgate.net/publication/330760490_A_study_on_Life_Cycle_Assessment
- Shen, L., Nieuwlaar, E., Worrell, E., & Patel, M. K. (2011). Life cycle energy and GHG emissions of PET recycling: Change-oriented effects. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(6), 522–536. <https://doi.org/10.1007/S11367-011-0296-4/FIGURES/9>
- Skare, M., Gavurova, B., & Rigelsky, M. (2024a). Quantification of the impact of innovations in industry and infrastructure for sustainable circular economy production and consumption. *Journal of Innovation & Knowledge*, 9(1), 100456. <https://doi.org/10.1016/J.JIK.2023.100456>
- Sousa, V., & Bogas, J. A. (2021). Comparison of energy consumption and carbon emissions from clinker and recycled cement production. *Journal of Cleaner Production*, 306, 127277. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.127277>
- Sousa, V., Bogas, J. A., Real, S., Meireles, I., & Carriço, A. (2023). Recycled cement production energy consumption optimization. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 32, 101010. <https://doi.org/10.1016/J.SCP.2023.101010>
- Srebny, V. (2020). *ZWE report identifies climate benefits of reusable packaging | Food Packaging Forum*. <https://www.foodpackagingforum.org/news/zwe-report-identifies-climate-benefits-of-reusable-packaging>
- Stefanini, R., Borghesi, G., Ronzano, A., & Vignali, G. (2021a). Plastic or glass: a new environmental assessment with a marine litter indicator for the comparison of pasteurized milk bottles. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(4), 767–784. <https://doi.org/10.1007/S11367-020-01804-X/FIGURES/9>
- Suárez-Eiroa, B., Fernández, E., Méndez-Martínez, G., & Soto-Oñate, D. (2019). Operational principles of circular economy for sustainable development: Linking theory and practice. *Journal of Cleaner Production*, 214, 952–961. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.12.271>
- Tao, Z., Ren, Z. X., Chen, Y., Huang, X., & Liu, X. (2023). Pathway to sustainable economic growth: Linkage among energy consumption, carbon emissions, climate change and

- technological innovation. *Energy Strategy Reviews*, 50, 101253.
<https://doi.org/10.1016/J.ESR.2023.101253>
- Thamarai, M., & Naresh, V. S. (2023). Smart self-power generating garbage management system using deep learning for smart cities. *Microprocessors and Microsystems*, 98, 104816. <https://doi.org/10.1016/J.MICPRO.2023.104816>
- Tingley, D. D., & Allwood, J. (2014, September). (PDF) *Reuse of structural steel: the opportunities and challenges*.
https://www.researchgate.net/publication/279441808_Reuse_of_structural_steel_the_opportunities_and_challenges
- Tua, C., Grosso, M., & Rigamonti, L. (2020a). Reusing glass bottles in Italy: A life cycle assessment evaluation. *Procedia CIRP*, 90, 192–197.
<https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2020.01.094>
- University of Southampton. (2020). *Glass bottles shamed as worst fizzy drink container for the environment | Engineering | University of Southampton*.
<https://www.southampton.ac.uk/engineering/news/2020/12/01-glass-bottles-worse-for-environment.page>
- Uthayakumar, A. (2020). (PDF) *Life Cycle Assessment of Glass bottle*.
https://www.researchgate.net/publication/344552941_Life_Cycle_Assessment_of_Glass_bottle
- Vallini, J., Willson, V., Fernández Luco, L., Saralegui, A. B., Boeykens, S. P., & Piol, M. N. (2023). Demolition waste for adsorption of metals: A step towards the circular economy. *Journal of Environmental Management*, 342, 118200.
<https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2023.118200>
- Verma, Y. K., Mazumdar, B., & Ghosh, P. (2020). Thermal energy consumption and its conservation for a cement production unit. *Environmental Engineering Research*, 26(3).
<https://doi.org/10.4491/EER.2020.111>
- Voulvoulis, N. (2018a). Water reuse from a circular economy perspective and potential risks from an unregulated approach. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2, 32–45. <https://doi.org/10.1016/J.COESH.2018.01.005>
- Wei, W. (n.d.). *Energy Consumption and Carbon Footprint of Secondary Aluminum Cast House Master Thesis*.
- Welle, F. (2011). Twenty years of PET bottle to bottle recycling—An overview. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(11), 865–875.
<https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2011.04.009>
- Westbroek, C. D., Bitting, J., Craglia, M., Azevedo, J. M. C., & Cullen, J. M. (2021). Global material flow analysis of glass: From raw materials to end of life. *Journal of Industrial Ecology*, 25(2), 333–343. <https://doi.org/10.1111/JIEC.13112>

World Steel Association. (2018). *Energy inputs as reducing agents*.

Xiang, Q., Pan, H., Ma, X., Yang, M., Lyu, Y., Zhang, X., Shui, W., Liao, W., Xiao, Y., Wu, J., Zhang, Y., & Xu, M. (2024). Impacts of energy-saving and emission-reduction on sustainability of cement production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 191, 114089. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2023.114089>

Zeller, V., Towa, E., Degrez, M., & Achten, W. M. J. (2019). Urban waste flows and their potential for a circular economy model at city-region level. *Waste Management*, 83, 83–94. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2018.10.034>

Καλλιπολίτου, Ν. (2022). *Κυκλική Οικονομία: Άλλο ένα buzz word; - Be Conscious*. <https://www.beconscious.gr/be-eco/493-kykliki-oikonomia-allo-ena-buzz-word>

Bdeir, L. M., Mohammed, K. A. (2008). Recycling of Aluminum Beverage Cans. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 12(3), 157-163. https://www.researchgate.net/publication/283886711_Recycling_of_aluminum_beverage_cans

Ellen MacArthur Foundation (2013). The Circular Design Guide. <https://www.circulardesignguide.com/>

Υπουργείο Ενέργειας, Εμπορίου και Βιομηχανίας. (2023). Κυκλική Οικονομία. https://meci.gov.cy/assets/modules/wnp/articles/202109/290/docs/circular_economy_-_info.pdf

European Commission. (2020). Categorisation System for the Circular Economy. https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/categorisation_system_for_the_ce.pdf

Ellen MacArthur Foundation & Granta Material Intelligence. (2015). Circularity Indicators An Approach to Measuring Circularity, Project Overview. <https://emf.thirdlight.com/link/yybss1obhtdv-ub419h/@/preview/1?o>

European Aluminium. (2021). Environmental Profile Report for the Aluminum Refining Industry, Life Cycle Inventory data (2017-2019) for the production of cast alloys ingot from scrap and waste. https://european-aluminium.eu/wp-content/uploads/2022/08/2021-11-16_european-aluminium_environmental-profile-report-for-the-aluminium-refining-industry-1.pdf

Metal Packaging Europe. (2019). Life Cycle Assessment of Aluminum Beverage Cans in Europe. https://www.metalpackagingeurope.org/sites/default/files/2020-01/20190723_Metal%20Packaging%20Europe_Alum%20Bev%20Cans%20LCA_Executive%20Summary.pdf

Hydro. (2021). The benefits of using aluminum for beverage cans.

<https://www.hydro.com/globalassets/download-center/publications/210218-hydro-papers-cans-nov2020-eng.pdf>

Papadopoulos, A. (2011). Report on Sustainable Manufacturing.

https://www.cement.org/docs/default-source/fc_cemmanuf_pdfs/manufacturing/sustainreport11_final.pdf

Cembureau. (2016). Cement, concrete & the circular economy.

https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/cement_concrete_the_circular_economy.pdf