



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**

Διπλωματική Εργασία

ΤΙΤΛΟΣ:

Περιβαλλοντικές και ενεργειακές ωφέλειες μιας εταιρείας από την εναλλακτική διαχείριση στερεών αποβλήτων μετάλλου με τη χρήση του μοντέλου WARM

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΧΩΡΙΝΟΣ

Επιβλέπον Καθηγητής Κωνσταντίνος Τσαγκαράκης

ΧΑΝΙΑ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2025

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη στον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Κωνσταντίνο Τσαγκαράκη, για την καθοδήγηση και τις χρήσιμες συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ απευθύνεται στους φίλους και συμφοιτητές μου για την υποστήριξη και την βοήθειά τους σε δύσκολες στιγμές

Τέλος, οφείλω την πιο βαθιά μου ευγνωμοσύνη στην οικογένειά μου για την αμέριστη αγάπη, την υπομονή που έδειξαν και την αδιάκοπη ενθάρρυνση που παρείχαν σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διαχείριση στερεών αποβλήτων αποτελεί διαχρονικά μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις της περιβαλλοντικής πολιτικής, ιδίως για τον βιομηχανικό τομέα. Στον κλάδο των μετάλλων, η πρόκληση αυτή είναι ακόμη πιο έντονη, καθώς: 1) τα μεταλλικά απόβλητα χαρακτηρίζονται από υψηλό ανακτήσιμο δυναμικό και 2) η παραγωγή και κατεργασία τους συνδέονται με υψηλή ενεργειακή κατανάλωση και σημαντικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Η συγκεκριμένη εργασία επικεντρώνεται στην εκτίμηση των περιβαλλοντικών και ενεργειακών ωφελειών που μπορούν να προκύψουν από την διαχείριση μεταλλικών αποβλήτων μιας βιομηχανίας παραγωγής αλουμινίου, μέσω της χρήσης του εργαλείου WARM (Waste Reduction Model) της U.S. EPA. Το WARM επιτρέπει τον υπολογισμό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) για διαφορετικά σενάρια διαχείρισης στερεών αποβλήτων, όπως η ανακύκλωση, η ταφή κ.ά.. Επιπλέον, για καλύτερη κατανόηση των περιβαλλοντικών και ενεργειακών ωφελειών, μετατρέψαμε τα αποτελέσματα των εκπομπών σε ισοδύναμα διαγράμματα που δείχνουν αυτοκίνητα, λίτρα βενζίνης και φιάλες προπάνιου.

Η εργασία βασίστηκε σε πραγματικά δεδομένα του έτους 2024 μεγάλης ελληνικής βιομηχανίας μετάλλων, η οποία παρήγαγε 45.739 τόνους δευτερόχυτων κολόνων αλουμινίου, χρησιμοποιώντας 51.262 τόνους εισερχόμενων υλικών. Η διαφορά των 5.523 τόνων αποτελεί υπολειμματικό υλικό, του οποίου η διαχείριση αποτελεί το βασικό αντικείμενο αξιολόγησης. Τα σενάρια που εξετάζονται σενάρια είναι τα εξής: 1) 0-100% ανακύκλωση, 2) 0-100% ταφή

Στόχος της εργασίας είναι η εύρεση του ποσοστού CO₂ που μπορεί να αποφευχθεί σε κάθε περίπτωση και να καταδειχθεί η βέλτιστη στρατηγική διαχείρισης αποβλήτων.

Λέξεις-κλειδιά: Ανακύκλωση, Waste Reduction Model (WARM), Εκπομπές Αερίων Θερμοκηπίου, Αλουμίνιο, Βιώσιμη Διαχείριση Αποβλήτων.

ABSTRACT

Solid waste management has historically constituted one of the most important challenges of environmental policy, especially for the industrial sector. In the metals sector, this challenge is even more intense, since: (1) metallic waste is characterized by high recoverable potential, and (2) their production and processing are associated with high energy consumption and significant greenhouse gas emissions.

This paper focuses on the assessment of the environmental and energy benefits that can arise from the management of metallic waste of an aluminum production industry, through the use of the WARM (Waste Reduction Model) tool of the U.S. EPA. WARM allows the calculation of carbon dioxide (CO₂) emissions for different solid waste management scenarios, such as recycling, landfilling, etc. In addition, for a better understanding of the environmental and energy benefits, we converted the emission results into equivalent diagrams showing cars, liters of gasoline, and propane cylinders.

The paper was based on real data from the year 2024 of a large Greek metal industry, which produced 45,739 tons of secondary aluminum billets, using 51,262 tons of incoming materials. The difference of 5,523 tons constitutes residual material, the management of which is the main subject of evaluation. The scenarios examined are as follows:

1. 0–100% recycling
2. 0–100% landfilling

The aim of the paper is to determine the percentage of CO₂ that can be avoided in each case and to highlight the optimal waste management strategy.

Keywords: Recycling, Waste Reduction Model (WARM), Greenhouse Gas Emissions, Aluminum, Sustainable Waste Management.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1-ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
1.1 Σκοπός.....	8
1.2 Ανάλυση.....	8
2 - ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	12
2.1 Πηγή και Κατηγοριοποίηση Δεδομένων	13
2.3 Δείκτες και Μετατροπές	13
2.4 Εργαλεία και Λογιστικά Μέσα.....	14
2.5 Περιορισμοί	16
2.6 Πηγές.....	16
3- ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	18
3.1 Περιβαλλοντικό Αποτύπωμα και Ενεργειακή Απόδοση κατά την Ανακύκλωση Αποβλήτων.	18
3.1.1 Μείωση Εκπομπών CO ₂	18
3.1.2 Ισοδύναμα αυτοκίνητα.....	19
3.1.4 Κατανάλωση προπανίου	21
3.2.1 Μείωση Εκπομπών CO ₂	22
3.3 Σύγκριση Αποτελεσμάτων Σεναρίων Διαχείρισης Αποβλήτων με Ανακύκλωση και Ταφή.....	27
4- ΣΥΖΗΤΗΣΗ	31
4.1 Επιχειρησιακή Αξιοποίηση των Αποτελεσμάτων	32
4.2 Αναβάθμιση Εσωτερικών Διαδικασιών	32
4.3 Θέση της Εταιρείας στο Πλαίσιο της Κυκλικής Οικονομίας	32
4.4 Συμμόρφωση και Ευκαιρίες Χρηματοδότησης.....	32
4.5 Προοπτική Εφαρμογής σε Άλλες Επιχειρήσεις και Μακροεπίπεδο Πολιτικής.....	33
5 - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	34

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Αναλογία δεικτών με διοξείδιο του άνθρακα CO ₂	14
Πίνακας 2. Μεταβολή των εκπομπών CO ₂ σε σχέση με το ποσοστό landfill	23
Πίνακας 3. Μεταβολή των ισοδύναμων αυτοκινήτων σε σχέση με το ποσοστό landfill	24
Πίνακας 4. Μεταβολή των ισοδύναμων αυτοκινήτων σε σχέση με το ποσοστό landfill	25
Πίνακας 5. Τιμές Σεναρίου 100% Αύξηση Ανακύκλωσης.	27
Πίνακας 6. Τιμές Σεναρίου 100% Αύξηση Ταφής.	27
Πίνακας 7. Ποιοτική Αξιολόγηση Σεναρίων Ανακύκλωσης και Ταφής.	27
Πίνακας 8. Τιμές για το σενάριο ανακύκλωσης.	29
Πίνακας 9. Τιμές για το σενάριο ταφής.	29

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

Γράφημα 1. Μεταβολή εκπομπών MCO ₂ EQ σε σχέση με το ποσοστό της ανακύκλωσης.....	18
Γράφημα 2. Μεταβολή ισοδύναμων αυτοκινήτων σε σχέση με το ποσοστό της ανακύκλωσης.	19
Γράφημα 3. Μεταβολή καταναλωμένης βενζίνης σε σχέση με το ποσοστό της ανακύκλωσης.	20
Γράφημα 4. Μεταβολή καταναλωμένου προπάνιου σε σχέση με το ποσοστό της ανακύκλωσης	21
Γράφημα 5. Μεταβολή εκπομπών MCO ₂ EQ σε σχέση με το ποσοστό της ταφής.	22
Γράφημα 6. Μεταβολή ισοδύναμων αυτοκινήτων σε σχέση με το ποσοστό της ταφής.	24
Γράφημα 7. Μεταβολή καταναλωμένης βενζίνης σε σχέση με το ποσοστό της ταφής.....	25
Γράφημα 8. Μεταβολή καταναλωμένου προπάνιου σε σχέση με το ποσοστό της ταφής. ...	26
Γράφημα 9. Σύγκριση Ανακύκλωσης και Ταφής σε Μείωση Εκπομπές CO ₂ (tn).	28

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Φύλλο εισαγωγής δεδομένων στο Warm Excel	15
Εικόνα 2. Περίληψη δεδομένων	15
Εικόνα 3. Ανάλυση αποτελεσμάτων.....	16

1-ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Σκοπός

Η παρούσα εργασία αποσκοπεί στην εκτίμηση των περιβαλλοντικών και ενεργειακών επιπτώσεων που προκύπτουν από διαφορετικά σενάρια διαχείρισης μεταλλικών αποβλήτων στο πλαίσιο μιας βιομηχανίας παραγωγής αλουμινίου. Κεντρικό εργαλείο για την αποτίμηση αυτή αποτελεί το μοντέλο WARM (Waste Reduction Model) της U.S. EPA, το οποίο επιτρέπει τον υπολογισμό των εκπομπών CO₂ και της εξοικονόμησης ενέργειας που σχετίζονται με εναλλακτικές επιλογές, όπως η ανακύκλωση και η ταφή.

1.2 Ανάλυση

Η εντατικοποίηση της παραγωγής και της κατανάλωσης παγκοσμίως έχει καταστήσει επιτακτική την ανάγκη για βιώσιμη διαχείριση των φυσικών πόρων, με την ανακύκλωση να αποτελεί κεντρικό εργαλείο σε αυτή την προσπάθεια. Ειδικά για τα μέταλλα – και ακόμη περισσότερο για το αλουμίνιο – οι περιβαλλοντικές, ενεργειακές και οικονομικές ωφέλειες από την ανακύκλωση είναι τεράστιες. Η κυκλική οικονομία, ως σύγχρονο οικονομικό μοντέλο, θέτει ως θεμελιώδη αρχή τη διατήρηση της αξίας των υλικών εντός του συστήματος παραγωγής και κατανάλωσης για όσο το δυνατόν περισσότερο χρόνο. Η πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης στηρίζει σθεναρά την κυκλική οικονομία με εργαλεία όπως το Circular Economy Action Plan (European Commission, 2020), ενώ και σε εθνικό επίπεδο ενισχύεται η υποχρεωτική ανακύκλωση σε επιλεγμένα ρεύματα αποβλήτων, μεταξύ αυτών και τα μέταλλα. Σε αυτό το πλαίσιο, η ανακύκλωση αλουμινίου συνιστά έναν ιδανικό φορέα εφαρμογής της κυκλικής οικονομίας, λόγω της δυνατότητας του μετάλλου να ανακυκλώνεται επ' άπειρον χωρίς σημαντική απώλεια ιδιοτήτων.

Το αλουμίνιο είναι ένα μέταλλο με υψηλή ζήτηση διεθνώς, κυρίως λόγω του μικρού του βάρους και της μεγάλης μηχανικής του αντοχής, που το καθιστούν κατάλληλο για πολλές βιομηχανικές εφαρμογές (Eurostat, 2022). Σύμφωνα με την International Aluminium Institute (2023), περίπου το 75% του συνόλου του αλουμινίου που έχει παραχθεί από το 1888 παραμένει ακόμη σε χρήση, μέσω συστημάτων ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης.

Οι δευτερόχυτες κολώνες αλουμινίου αποτελούν μια σημαντική κατηγορία προϊόντων που προκύπτουν από την ανακύκλωση και την επανεπεξεργασία αλουμινίου. Η χρήση τους εφαρμόζεται σε μια ευρεία ποικιλία βιομηχανιών, κάτι που οφείλεται στις χρήσιμες ιδιότητές τους, που είναι η αντοχή και το χαμηλό βάρος. Την σημερινή εποχή δίνεται πολύ μεγάλη έμφαση στην μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος στην βιομηχανία, τόσο από εταιρείες όσον και από κυβερνήσεις.

Για αυτό το λόγο δίνεται έμφαση στην παραγωγή δευτερόχυτου αλουμινίου, καθώς αυτή απαιτεί έως και 95% λιγότερη ενέργεια, σε σύγκριση με την καθαρή παραγωγή από βωξίτη.

Το σκραπ αλουμινίου αποτελεί το υπολειμματικό προϊόν κατά την παραγωγή δευτερόχυτων κολόνων αλουμινίου. Σκραπ αλουμινίου ορίζονται τα μεταλλικά υπολείμματα, χρησιμοποιημένα προϊόντα ή απορρίμματα αλουμινίου, που μπορούν να συλλεχθούν και να ανακυκλωθούν για την παραγωγή νέων προϊόντων αλουμινίου. Το σκραπ διακρίνεται σε δύο κύριες κατηγορίες: το πρωτογενές (ή βιομηχανικό) σκραπ και το δευτερογενές (ή μετακαταναλωτικό) σκραπ, και το πρωτογενές θεωρείται υψηλότερης ποιότητας λόγω της χαμηλότερης παρουσίας προσμίξεων (USGS, 2022). Το πρωτογενές προέρχεται από εργοστάσια παραγωγής αλουμινίου, όπου κομμάτια αλουμινίου απομένουν κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας προϊόντων (π.χ., υπολείμματα από την παραγωγή προφίλ αλουμινίου, αποκόμματα από κοπή φύλλων, ελαττωματικά προϊόντα). Το δευτερογενές περιλαμβάνει προϊόντα αλουμινίου που έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί και απορριφθεί από τον πλυθισμό, όπως οικιακά απόβλητα, παλιά αυτοκίνητα κτλπ. Το πρωτογενές σκραπ έχει υψηλότερη καθαρότητα και ανακυκλώνεται ευκολότερα, ενώ το δευτερογενές συχνά περιέχει βαφές, επιχρίσματα ή άλλες προσμίξεις. Απαιτεί επομένως ειδική επεξεργασία, ώστε να αλλάξει σε μια μορφή που να μπορεί να αξιοποιηθεί. Σε αντίθεση με άλλα υλικά όπως το πλαστικό, το σκραπ αλουμινίου δεν χάνει τις φυσικές και χημικές του ιδιότητες, όσες φορές και να επαναχρησιμοποιηθεί.

Το σκραπ αποτελεί παράδειγμα βιομηχανικών πρακτικών που υποστηρίζουν την ανακύκλωση εντός της ίδιας εφοδιαστικής αλυσίδας (closed-loop recycling). Σύμφωνα με μελέτη των Bertram et al. (2009), η χρήση προκραμμάτων στη μεταλλουργική παραγωγή μειώνει αισθητά το ενεργειακό αποτύπωμα και διευκολύνει την ποιότητα του τελικού κράματος.

Η ποιότητα του ανακυκλωμένου αλουμινίου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη σύνθεση του εισερχόμενου σκραπ. Η διαλογή, ο καθαρισμός και η επεξεργασία του σκραπ αποτελούν κρίσιμα βήματα για τη βελτιστοποίηση της ποιότητας του τελικού προϊόντος, ενώ η τεχνολογία που εφαρμόζεται σήμερα ενσωματώνει συχνά αισθητήρες, τεχνητή νοημοσύνη και αυτοματοποιημένα συστήματα φασματομετρικής ανάλυσης (Cui & Forssberg, 2003). Η διαδικασία ανακύκλωσης αλουμινίου είναι σημαντικά λιγότερο ενεργοβόρα από την παραγωγή πρωτογενούς αλουμινίου από βωξίτη. Συγκεκριμένα, η ανακύκλωση απαιτεί μόλις το 5% της ενέργειας που απαιτείται για την πρωτογενή παραγωγή (European Aluminium Association, 2021). Αυτή η εξοικονόμηση ενέργειας συνεπάγεται και σημαντική μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, ένα στοιχείο κρίσιμης σημασίας για τη στρατηγική απανθρακοποίησης της βιομηχανίας μετάλλων στην Ευρώπη.

Για την ποσοτική ανάλυση των περιβαλλοντικών ωφελειών των διαφόρων επιλογών διαχείρισης αποβλήτων, χρησιμοποιούνται εργαλεία όπως το Waste Reduction Model (WARM). Το WARM αναπτύχθηκε από την Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος των ΗΠΑ (EPA) και αξιοποιείται ευρέως στη διεθνή βιβλιογραφία για τον υπολογισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και την εκτίμηση εξοικονόμησης ενέργειας από την εφαρμογή στρατηγικών διαχείρισης απορριμμάτων (US EPA, 2023). Το μοντέλο βασίζεται σε συγκριτική ανάλυση κύκλου ζωής (life cycle assessment – LCA) και περιλαμβάνει ποσοτικά δεδομένα για μια πληθώρα υλικών, μεταξύ αυτών και τα “aluminum ingots” και “mixed metals”.

Το WARM χρησιμοποιείται από δήμους και περιφέρειες (π.χ. Los Angeles, Portland, New York) για εκτίμηση σεναρίων διαχείρισης MSW, επιχειρήσεις και βιομηχανίες για την εκτίμηση περιβαλλοντικών στρατηγικών (π.χ. ανακύκλωση σκραπ), ερευνητές σε μελέτες LCA, carbon footprint και ESG, συμβούλους περιβάλλοντος σε μελέτες συμμόρφωσης ή βιωσιμότητας.

Το μοντέλο προσφέρει στον χρήστη τη δυνατότητα να καταχωρίσει την ποσότητα αποβλήτων σε τόνους και να επιλέξει τον τρόπο διαχείρισής τους, διανέμοντάς τους στις εξής βασικές κατηγορίες:

- **Tons Recycled:** Ανακύκλωση υλικών που επανεισάγονται στην παραγωγική αλυσίδα.
- **Tons Landfilled:** Ταφή σε ΧΥΤΑ, με επακόλουθες εκπομπές CH₄ και CO₂.
- **Tons Combusted:** Θερμική επεξεργασία με ή χωρίς ανάκτηση ενέργειας.
- **Tons Composted:** Αερόβια κομποστοποίηση για οργανικά υλικά.
- **Tons Anaerobically Digested:** Αναερόβια ζύμωση για παραγωγή βιοαερίου.

Η κατανομή των αποβλήτων σε αυτές τις κατηγορίες επιτρέπει τον υπολογισμό των καθαρών εκπομπών και της ενέργειας που αντιστοιχεί σε κάθε επιλογή.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η πιο πρόσφατη έκδοση του WARM (v16) που διατίθεται σε Excel format με διαδραστικά φύλλα εισόδου και εξόδου, online εργαλείο μέσω της ιστοσελίδας της EPA, και οδηγούς τεκμηρίωσης (User’s Guide, Source Documentation, Assumptions Reports)

Η ανάλυση αποτελεσμάτων μπορεί να γίνει σε:

- **MTCO_{2e}** (μετρικούς τόνους ισοδυνάμου διοξειδίου του άνθρακα)
- **MMBtu ή kWh** (κατανάλωση/εξοικονόμηση ενέργειας)

Η πιο αντιπροσωπευτική και τεχνικά ακριβής κατηγορία στο μοντέλο WARM είναι εκείνη των “Mixed Metals”, η οποία περιλαμβάνει ρεύματα μετάλλων μεικτής προέλευσης και χαμηλότερης διαχειριστικής ποιότητας, που είτε υπόκεινται σε πολύπλοκες διεργασίες ανάκτησης είτε οδηγούνται σε τελική διάθεση.

Η χρήση του WARM στην παρούσα εργασία προσέφερε μια τεκμηριωμένη μέθοδο υπολογισμού της διαφοράς περιβαλλοντικού αποτυπώματος μεταξύ σεναρίων πλήρους ανακύκλωσης και ταφής . Οι εκπομπές CO₂ μετατράπηκαν επιπρόσθετα σε ισοδύναμα δείκτες όπως λίτρα βενζίνης, αριθμός αυτοκινήτων και φιάλες προπανίου, προκειμένου να κατανοηθούν πιο απτά οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

2 - ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, ιδιαίτερη σημασία αποδόθηκε στην τοποθεσία των 5523 τόνων υπολειπόμενου υλικού που προέκυψαν από βιομηχανική επεξεργασία αλουμινίου κατά το έτος 2024 σε σωστές κατηγορίες στο Warm. Η ποσότητα αυτή αντιστοιχεί στη διαφορά μεταξύ του συνόλου των εισερχόμενων υλικών και των τελικών παραγόμενων δευτερόχυτων κολώνων αλουμινίου (45739 tn). Η αξιολόγηση αυτού του υπολείμματος κρίθηκε κομβική για την ακρίβεια προσομοίωσης κατά τη μοντελοποίηση με χρήση του WARM.

Αντικειμενικά, οι 5523 τόνοι δεν αποτελούν καταναλωτικά απόβλητα, ούτε τελικά προϊόντα που επέστρεψαν στο ρεύμα των απορριμμάτων. Αντίθετα, πρόκειται για παραγωγικό υπόλειμμα που προκύπτει κατά τη διάρκεια της μεταλλουργικής επεξεργασίας και συνίσταται από υπολείμματα κράματος, σκουριές, υπολειμματικό σκραπ μη κατάλληλο για επανατήξη, καθώς και τεχνικά μη αξιοποιήσιμο υλικό από τις πρώτες ύλες. Η σύνθεσή του είναι ετερογενής και χαρακτηρίζεται από ποικιλομορφία τόσο σε επίπεδο καθαρότητας όσο και φυσικής μορφής (τεμαχισμένα κομμάτια, λερωμένα, με επιμείξεις κ.λπ.).

Για τον λόγο αυτό, το συγκεκριμένο ρεύμα δεν μπορεί να ενταχθεί στις κατηγορίες Aluminum Cans, Aluminum Foil ή ακόμα και πλήρως διαχωρισμένων Aluminum Ingots, αφού δεν πληροί τις απαιτήσεις καθαρότητας και τεχνικής δυνατότητας άμεσης επαναχρησιμοποίησης (European Aluminum, n.d.).

Με βάση αυτό το σκεπτικό, οι 5523 τόνοι χρησιμοποιήθηκαν σε διακριτά σενάρια εισαγωγής στο WARM 1 και 2, τόσο ως “Mixed Metals – Recycled” όσο και ως “Mixed Metals – Landfilled”, καθώς και σε ενδιάμεσες κατανομές (π.χ. 70/30, 50/50) για να εξεταστεί το δυναμικό περιβαλλοντικής ωφέλειας και η διακύμανση των αποτελεσμάτων με βάση την ποιότητα και την αποδοτικότητα των διαδικασιών διαχωρισμού. Η επιλογή αυτής της προσέγγισης ενισχύει τον ρεαλισμό της ανάλυσης και επιτρέπει την αποτύπωση της πραγματικής επίδρασης της βελτιωμένης διαλογής και εναλλακτικής διαχείρισης, σε όρους εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και εξοικονόμησης ενέργειας.

2.1 Πηγή και Κατηγοριοποίηση Δεδομένων

Τα δεδομένα προέρχονται από πραγματικά στοιχεία παραγωγής ελληνικής βιομηχανίας αλουμινίου. Συγκεκριμένα:

- Εισερχόμενη πρώτη ύλη:
 - Scrap: 46.588 τόνοι
 - Πρωτόχυτο αλουμίνιο: 4.484 τόνοι
 - Προκράμματα: 190 τόνοι
→ Σύνολο: 51.262 τόνοι
- Παραγόμενα προϊόντα (δευτερόχυτες κολώνες): 45.739 τόνοι
→ Διαφορά / Απόβλητα: 5.523 τόνοι

Η ποσότητα αυτή αντιστοιχεί σε υπολείμματα παραγωγής και όχι σε καταναλωτικά απόβλητα. Το υλικό έχει ανομοιογενή σύσταση και περιέχει κράματα, σκωρίες, κατεργασμένα απορρίμματα και εν δυνάμει ανακυκλώσιμο υλικό μικτής ποιότητας.

2.2 Εργαλείο περιβαλλοντικής εκτίμησης επιπτώσεων WARM

Οι υπολογισμοί έγιναν στην έκδοση WARM Excel (v16), με είσοδο 5.523 τόνους στην κατηγορία “Mixed Metals” και κατανομή σε 2 βασικά σενάρια:

- Σενάριο A: 100% Ανακύκλωση
- Σενάριο B: 100% Ταφή

Επιπλέον, εισήχθησαν ενδιάμεσες διαβαθμίσεις 10%–90% για ανακύκλωση και ταφή, με βήμα 10%, ώστε να παρατηρηθεί η γραμμικότητα ή μη των αποτελεσμάτων.

Σκοπός ήταν να αναλυθεί η επίδραση κάθε στρατηγικής στη μεταβολή των εκπομπών CO₂ και της ενεργειακής κατανάλωσης, αλλά και να μελετηθεί η τάση της ωφέλειας ή της επιβάρυνσης ανάλογα με το ποσοστό κάθε επιλογής.

2.3 Δείκτες και Μετατροπές

Το WARM επιστρέφει ως κύρια έξοδο:

- Εκπομπές CO₂ σε MTCO₂e
- Καθαρή κατανάλωση ή εξοικονόμηση ενέργειας σε MMBtu

Για την καλύτερη κατανόηση των επιπτώσεων, τα αποτελέσματα μετατράπηκαν σε ισοδύναμα κατανόησης (Πίνακας 1) βάσει της επίσημης αριθμομηχανής της EPA (GreenhouseGasEquivalenciesCalculator, n.d.)

Πίνακας 1. Αναλογία δεικτών με διοξείδιο του άνθρακα CO₂

Δείκτης	Πηγή / Μετατροπή
Αυτοκίνητα/χρόνο	1 αυτοκίνητο = 4.6 tn CO ₂
Λίτρα βενζίνης	1 λίτρο = 2.31 kg CO ₂
Φιάλη Προπανίου	1 φιάλη (19 lbs) ≈ 6.6 kg CO ₂

Τα αποτελέσματα αποτυπώθηκαν σε πίνακες και γραφήματα (στήλες, radar chart), ώστε να συγκριθούν αριθμητικά και οπτικά τα σενάρια.

2.4 Εργαλεία και Λογιστικά Μέσα

Για την επεξεργασία των δεδομένων και την παραγωγή των γραφημάτων χρησιμοποιήθηκαν:

1) **Excel:** Χρησιμοποιήθηκε για την οργάνωση των δεδομένων παραγωγής και αποβλήτων, τον υπολογισμό συνολικών ποσοτήτων, τη δημιουργία πινάκων σεναρίων (π.χ. 10%–100% ανακύκλωση/ταφή) και την κατασκευή διαγραμμάτων (column charts, radar charts κ.ά.) που απεικονίζουν την εξέλιξη των εκπομπών CO₂ και άλλων δεικτών.

2) **WARM Excel Model (v16):** Στο εργαλείο αυτό καταχωρήθηκαν οι ποσότητες αποβλήτων (π.χ. 5.523 tn ως Mixed Metals και 45.739 tn ως Aluminum Ingots) για τον υπολογισμό εκπομπών CO₂ και εξοικονόμησης ενέργειας ανά σενάριο διαχείρισης. Για παράδειγμα, έγινε σύγκριση πλήρους ανακύκλωσης με πλήρη ταφή ώστε να εξαχθούν τα σχετικά αποτελέσματα.

3) **EPA GHG Calculator (online):** Το εργαλείο αυτό χρησιμοποιήθηκε για τη μετατροπή των εκπομπών CO₂ που υπολόγισε το WARM σε πρακτικά ισοδύναμα όπως αριθμός αυτοκινήτων, λίτρα βενζίνης και φιάλες προπανίου, διευκολύνοντας έτσι την επικοινωνία των αποτελεσμάτων με μη τεχνικό κοινό.

4) **Μέσα επαλήθευσης (EPA emission factors):** Χρησιμοποιήθηκαν για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων του WARM (Εικόνα 1) και των μετατροπών σε ισοδύναμα, διασταυρώνοντας τα νούμερα με επίσημους πίνακες εκπομπών και ενεργειακών τιμών της EPA, ώστε να διασφαλιστεί η ακρίβεια και αξιοπιστία των υπολογισμών.

The screenshot shows the 'Waste Reduction Model (WARM) -- Results' section of an Excel spreadsheet. It includes summary totals for GHG emissions and a detailed table of per-ton estimates for various materials.

Waste Reduction Model (WARM) -- Results							
Total GHG Emissions from Baseline MSW Generation and Management (MTCO ₂ E):							(24,252.39)
Total GHG Emissions from Alternative MSW Generation and Management (MTCO ₂ E):							111.87
Incremental GHG Emissions (MTCO ₂ E):							24,364.25
MTCO ₂ E = metric tons of carbon dioxide equivalent							
Per Ton Estimates of GHG Emissions for Baseline and Alternative Management Scenarios							
Material	GHG Emissions per Ton of Material Produced (MTCO ₂ E)	GHG Emissions per Ton of Material Source Reduced (MTCO ₂ E)	GHG Emissions per Ton of Material Recycled (MTCO ₂ E)	GHG Emissions per Ton of Material Landfilled (MTCO ₂ E)	GHG Emissions per Ton of Material Composted (MTCO ₂ E)	GHG Emissions per Ton of Material Anaerobically Digested (MTCO ₂ E)	GHG Emission per Ton of Material (MTCO ₂ E)
Corrugated Containers	9.58	-0.58	-3.14	0.98	-0.49	NA	NA
Magazines/third-class mail	8.57	-8.57	-3.07	-0.43	-0.35	NA	NA
Newspaper	4.68	-4.68	-2.71	-0.85	-0.56	NA	NA
Office Paper	7.95	-7.95	-2.88	1.13	-0.47	NA	NA
Phonebooks	6.17	-6.17	-2.62	-0.85	-0.56	NA	NA
Textbooks	9.02	-9.02	-3.10	1.13	-0.47	NA	NA
Mixed Paper (general)	6.07	-6.07	-3.55	0.87	-0.49	NA	NA
Mixed Paper (primarily residential)	6.00	-6.00	-3.55	0.82	-0.49	NA	NA
Mixed Paper (primarily from offices)	7.37	-7.37	-3.56	0.91	-0.48	NA	NA
Food Waste	3.66	-3.66	NA	0.50	-0.13	-0.15	-0.04
Food Waste (non-meat)	0.76	-0.76	NA	0.50	-0.13	-0.15	-0.04
Food Waste (meat only)	15.10	-15.10	NA	0.46	-0.13	-0.15	-0.04
Beef	39.09	-39.09	NA	0.42	-0.13	-0.15	-0.04
Poultry	2.45	-2.45	NA	0.48	-0.13	-0.15	-0.04
Grains	0.62	-0.62	NA	1.37	-0.13	-0.15	-0.04
Bread	0.66	-0.66	NA	0.89	-0.13	-0.15	-0.04
Fruits and Vegetables	0.44	-0.44	NA	0.23	-0.13	-0.15	-0.04

Εικόνα 3. Ανάλυση αποτελεσμάτων

2.5 Περιορισμοί

Το WARM είναι σχεδιασμένο με βάση δεδομένα των ΗΠΑ, επομένως ενδέχεται να υπάρχουν μικρές αποκλίσεις σε σχέση με τις συνθήκες της ελληνικής βιομηχανίας. Ωστόσο, λόγω του συγκριτικού χαρακτήρα της ανάλυσης (όχι απόλυτου), οι εκτιμήσεις παραμένουν χρήσιμες και αντιπροσωπευτικές.

Επιπλέον, η κατανομή των βασικών σεναρίων σε ποσοστά (π.χ. 10%–100%) είναι θεωρητική και δεν αποτελεί στρατηγική της βιομηχανίας. Σκοπός της είναι η διευκόλυνση της μοντελοποίησης και ανάλυσης των αποτελεσμάτων.

2.6 Πηγές

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, χρησιμοποιήθηκαν επιλεγμένες επιστημονικές και θεσμικές πηγές που συνδέονται άμεσα με τη διαχείριση μεταλλικών αποβλήτων, την ανακύκλωση και την εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Το κύριο εργαλείο που αξιοποιήθηκε είναι το Waste Reduction Model (WARM), το οποίο αναπτύχθηκε από την U.S. Environmental Protection Agency (EPA) και αποτελεί ένα από τα πιο αξιόπιστα εργαλεία εκτίμησης εκπομπών CO₂ για διαφορετικά σενάρια διαχείρισης αποβλήτων. Βασικά τεχνικά στοιχεία του εργαλείου αντλήθηκαν από το WARM User's Guide και την τεκμηρίωση των εκδόσεων του μοντέλου. Για τις μετατροπές των εκπομπών CO₂ σε ισοδύναμα,

χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τον Greenhouse Gas Equivalencies Calculator της ίδιας υπηρεσίας (EPA, 2023).

Σε επίπεδο πολιτικής και ευρωπαϊκού πλαισίου, αξιοποιήθηκαν έγγραφα στρατηγικής της Ευρωπαϊκής Επιτροπής όπως το Circular Economy Action Plan (2020) και οι οδηγίες 2008/98/ΕΚ και 2018/851/ΕΕ για τη διαχείριση αποβλήτων. Οι πηγές αυτές βοήθησαν στην τοποθέτηση του θέματος στο ευρύτερο πλαίσιο των ευρωπαϊκών στόχων βιωσιμότητας.

Για την τεκμηρίωση της σημασίας της ανακύκλωσης μετάλλων — και ιδίως του αλουμινίου — χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από τον Διεθνή Οργανισμό Αλουμινίου (International Aluminium Institute), καθώς και μελέτες σχετικές με την εξοικονόμηση ενέργειας και τη μείωση εκπομπών από την ανακύκλωση.

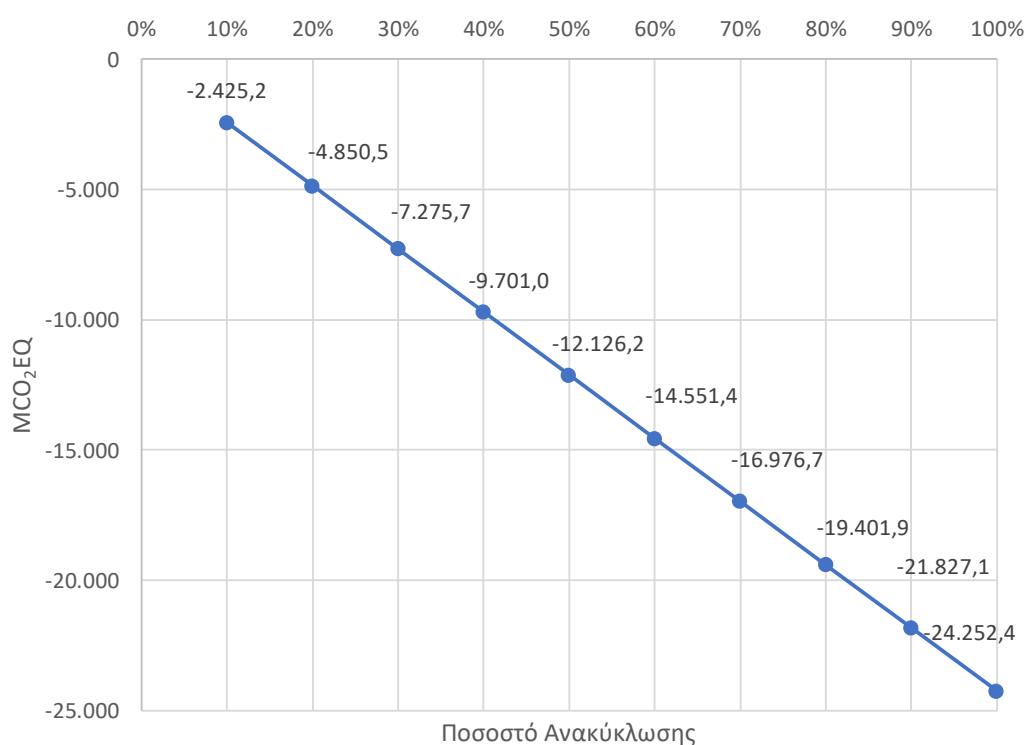
Τέλος, δεδομένα σχετικά με την εταιρεία και τις ποσότητες των υλικών προήλθαν από εσωτερική επικοινωνία και τεκμηριώθηκαν με αναγωγή στις κατάλληλες κατηγορίες του WARM

3- ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Περιβαλλοντικό Αποτύπωμα και Ενεργειακή Απόδοση κατά την Ανακύκλωση Αποβλήτων.

3.1.1 Μείωση Εκπομπών CO₂

Το Γράφημα 1 απεικονίζει την επίδραση της ανακύκλωσης των mixed metals στη μείωση των εκπομπών CO₂ σε τόνους ανά ποσοστό ανακύκλωσης.



Γράφημα 1. Μεταβολή εκπομπών MCO₂EQ σε σχέση με το ποσοστό της ανακύκλωσης.

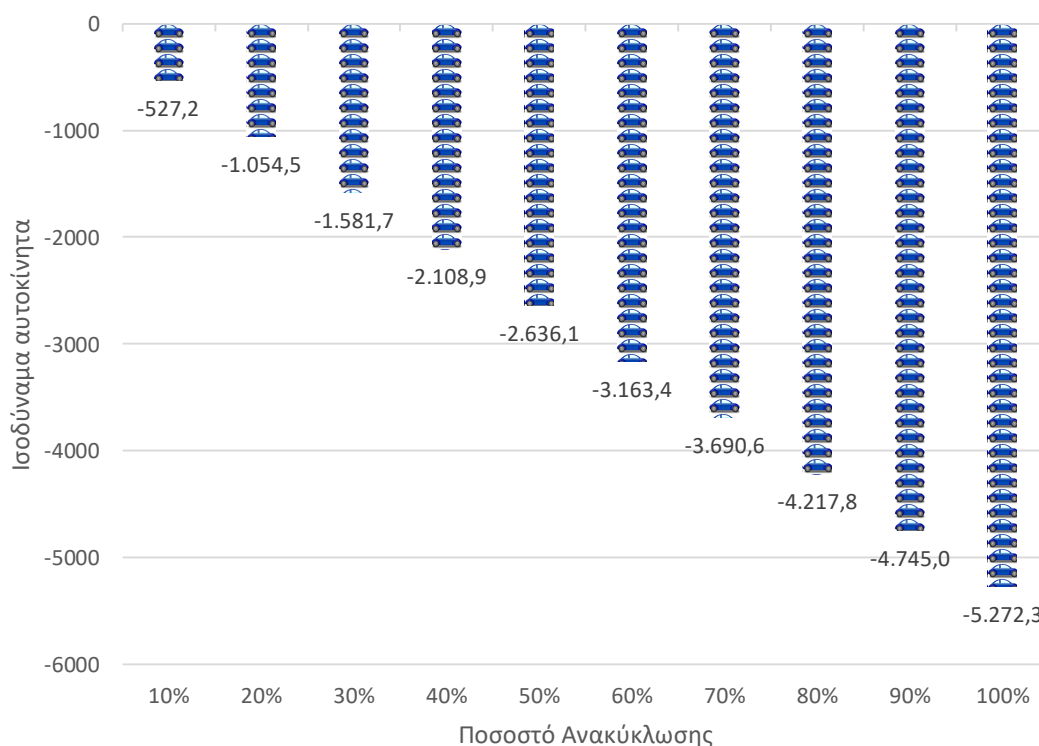
Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η ποσοτική μείωση εκπομπών CO₂ σε σχέση με την ποσοστιαία αύξηση της ποσότητας των mixed metals (0%-100%) κατά τη μέθοδο ανακύκλωσης. Υπάρχει γραμμική και καθοδική τάση: όσο αυξάνεται η ποσότητα υλικών ανακύκλωσης, οι εκπομπές CO₂ μειώνονται δραστικά:

- Για το αρχικό σενάριο αύξησης υλικού ανακύκλωσης κατά 10%, παρατηρείται μείωση 2.435 τν εκπομπών CO₂.

- Οι εκπομπές μειώνονται σημαντικά όσο αυξάνεται η ποσότητα ανακύκλωσης των mixed metals. Για παράδειγμα, παρατηρείται μείωση εκπομπών κατά 24.252 tn στο σενάριο 100% αύξησης ποσότητας ανακυκλώσιμου υλικού.
- Η απόσταση ανάμεσα στα σημεία δείχνει ότι το μοντέλο προβλέπει ομοιόμορφη απόδοση κατά την αύξηση των ποσοστών ανακύκλωσης, χαρακτηριστικό του WARM για σταθερές ροές υλικού.
- Η ανακύκλωση μεταλλικών αποβλήτων (σε αυτή την περίπτωση mixed metals) έχει σημαντική θετική επίδραση στο ανθρακικό αποτύπωμα.

3.1.2 Ισοδύναμα αυτοκίνητα

Το Γράφημα 2 απεικονίζει την επίδραση της ανακύκλωσης των mixed metals στη μείωση περιβαλλοντικού αποτυπώματος σε ισοδύναμα αυτοκίνητα.



Γράφημα 2. Μεταβολή ισοδύναμων αυτοκινήτων σε σχέση με το ποσοστό της ανακύκλωσης.

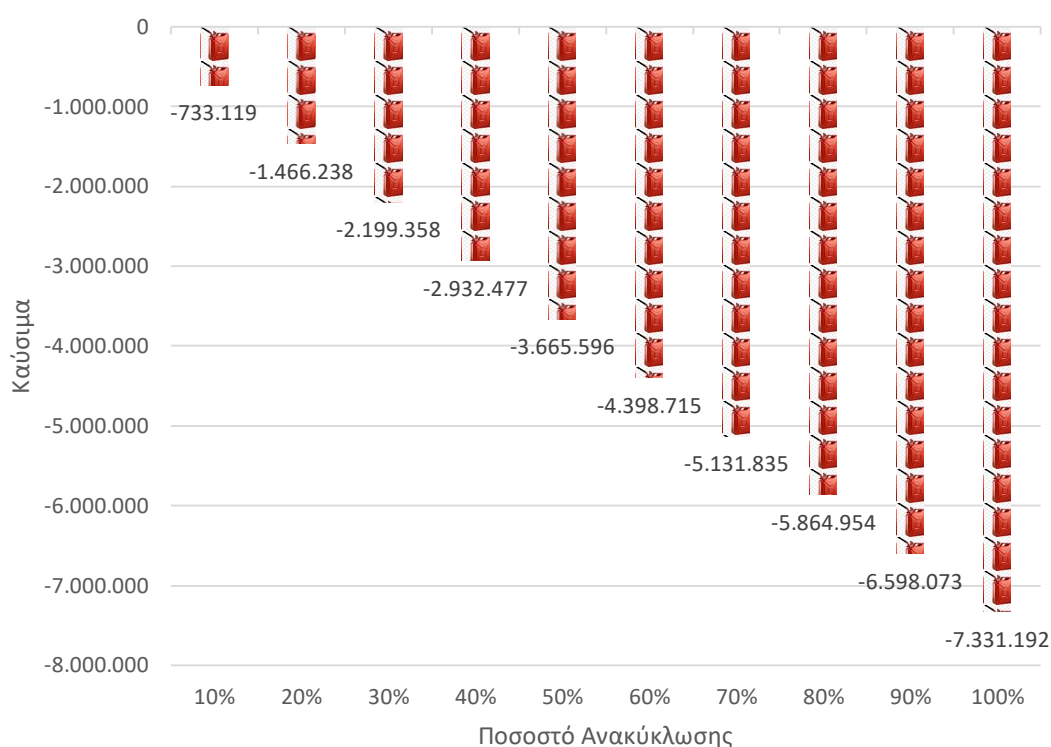
Παρουσιάζει το περιβαλλοντικό όφελος της ανακύκλωσης των mixed metals σε όρους ισοδύναμων αυτοκινήτων. Το μέτρο αυτό προκύπτει από τη μετατροπή των εκπομπών CO₂ σε οχήματα με τη χρήση του WARM, σύμφωνα με πρότυπα της EPA (EPA, n.d.)

- Παρατηρείται σταθερή αύξηση του αριθμού των αυτοκινήτων που "αντιπροσωπεύουν" τη μείωση CO₂ καθώς αυξάνεται το ποσοστό ανακύκλωσης.
- 10% αύξηση ανακύκλωσης αντιστοιχεί σε ~527 αυτοκίνητα, εκαι για 100% αύξηση ανακύκλωσης, εξοικονομούνται ~5.272 αυτοκίνητα.
- Η καμπύλη είναι γραμμική — υποδηλώνοντας ότι κάθε πρόσθετο 10% ανακύκλωσης φέρνει αντίστοιχη αύξηση στο περιβαλλοντικό όφελος.

Η αύξηση ανακύκλωσης κατά 100% των αποβλήτων mixed metals ισοδυναμεί με εξοικονόμηση πάνω από 5.200 οχημάτων.

3.1.3 Κατανάλωση καυσίμων

Το Γράφημα 3 απεικονίζει την επίδραση της ανακύκλωσης των mixed metals στη μείωση κατανάλωσης καυσίμων.



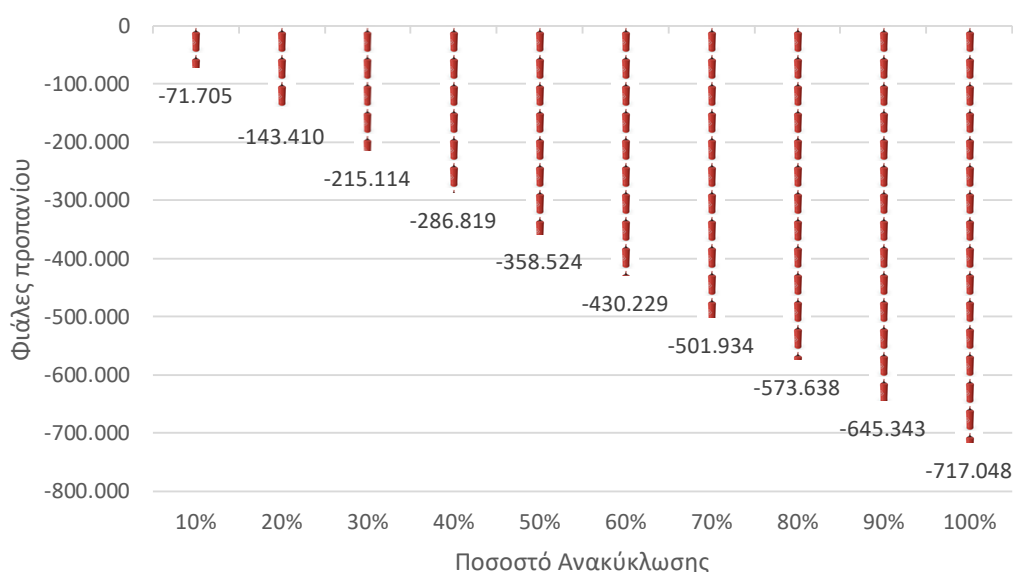
Γράφημα 3. Μεταβολή καταναλωμένης βενζίνης σε σχέση με το ποσοστό της ανακύκλωσης.

Το γράφημα απεικονίζει τη συσχέτιση ποσοστού αύξησης ανακύκλωσης των mixed metals με την εξοικονόμηση καυσίμου σε λίτρα βενζίνης, βάσει των εκπομπών CO₂ που αποφεύγονται, σύμφωνα με τη μεθοδολογία της EPA.

- Υπάρχει γραμμική και καθοδική πορεία, η οποία καταδεικνύει σταθερή αύξηση του οφέλους καθώς το ποσοστό ανακύκλωσης αυξάνεται.
- Για 10% ανακύκλωση, εξοικονομούνται περίπου 733.119 λίτρα βενζίνης, το οποίο αντιστοιχεί σε εξοικονόμηση ~1.246.302 €, κάτι που προκύπτει από την τωρινή τιμή του λίτρου βενζίνης, 1. Ευρώ/L
- Στο 100% ανακύκλωσης, το νούμερο φτάνει τα 7.331.192 λίτρα (12.463.026 €), μια τιμή εξαιρετικά σημαντική από ενεργειακή και περιβαλλοντική σκοπιά.
- Τα λίτρα βενζίνης που εξοικονομούνται αποτελούν έμμεσο δείκτη ενεργειακής απόδοσης: η ανακύκλωση των μετάλλων μειώνει την ανάγκη για κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας.
- Το όφελος ισοδυναμεί με κατανάλωση πάνω από 4.000 επιβατικών οχημάτων για έναν χρόνο, καθώς και περίπου 20.000 πλήρη γεμίσματα σε ρεζερβουάρ 50 λίτρων.

3.1.4 Κατανάλωση προπανίου

Το Γράφημα 4 απεικονίζει την επίδραση της ανακύκλωσης των mixed metals στη μείωση κατανάλωσης προπανίου.



Γράφημα 4. Μεταβολή καταναλωμένου προπανίου σε σχέση με το ποσοστό της ανακύκλωσης

Το Γράφημα 4 αποτυπώνει τη σχέση μεταξύ ποσοστού αύξησης ανακύκλωσης των mixed metals και της αντίστοιχης εξοικονόμησης φιαλών προπανίου, με βάση τη μετατροπή των αποτρεπόμενων εκπομπών CO₂ σε ενεργειακά ισοδύναμα.

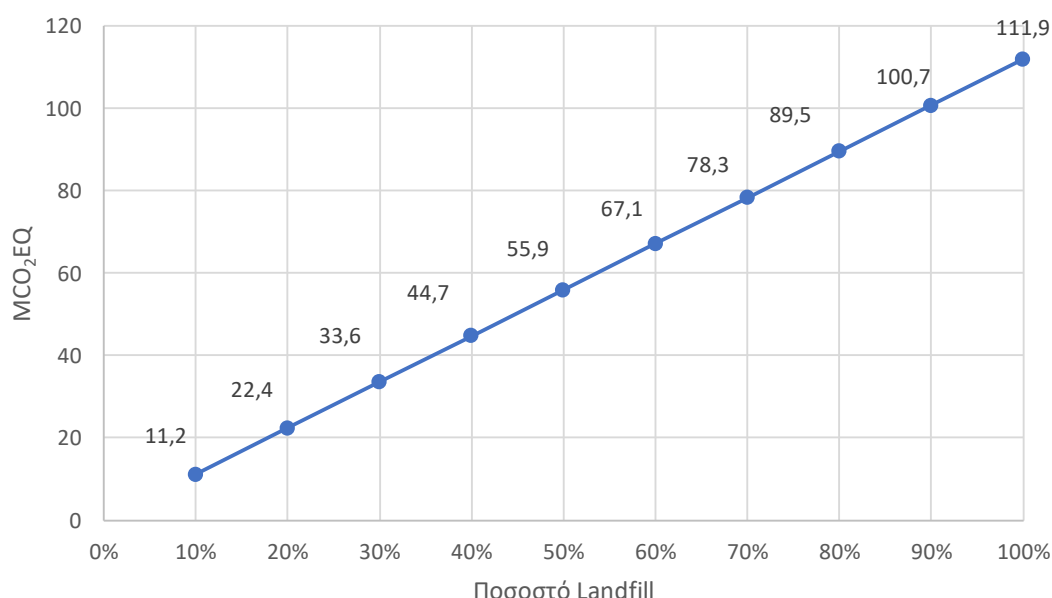
- Για κάθε αύξηση 10% στην ανακύκλωση, εξοικονομείται ένας σημαντικός αριθμός φιαλών προπανίου, με σχεδόν γραμμική αύξηση.
- Από ~71.700 φιάλες στο 10% ανακύκλωσης, φτάνουμε τις 717.048 φιάλες στο 100%, που αποτελεί το μέγιστο όφελος.
- Το προπάνιο είναι μη ανανεώσιμο ορυκτό καύσιμο και αποτελεί ενδεικτικό ενεργειακό μέτρο με ευρεία χρήση σε βιομηχανίες, αγροτικά και οικιακά περιβάλλοντα, επομένως αυτή η απεικόνιση έχει μεγάλη πρακτική αξία.

Η αύξηση ανακύκλωσης δεν ευνοεί μόνο τις εκπομπές άνθρακα, αλλά και την ενεργειακή αυτάρκεια.

3.2 Περιβαλλοντικό Αποτύπωμα και Ενεργειακή Απόδοση κατά την Ταφή Αποβλήτων

3.2.1 Μείωση Εκπομπών CO₂

Το Γράφημα 5 απεικονίζει την επίδραση της ταφής των mixed metals στη μείωση των εκπομπών CO₂ σε τόνους ανά ποσοστό ταφής.



Γράφημα 5. Μεταβολή εκπομπών MCO₂EQ σε σχέση με το ποσοστό της ταφής.

Το Γράφημα 5 αποτυπώνει με ακρίβεια τη γραμμική αύξηση των εκπομπών CO₂, ανάλογα με το ποσοστό των απορριμμάτων που οδηγούνται σε ταφή (landfilling) και όχι σε ανακύκλωση. Η ανάλυση αφορά τους 5523 tn μεικτών μεταλλικών αποβλήτων, οι οποίοι εξετάζονται σε σενάρια από 10% έως 100% ταφής. Οι τιμές του αρχικού, του τελικού και του μεσαίου σεναρίου αναφέρονται στον Πίνακα 2.

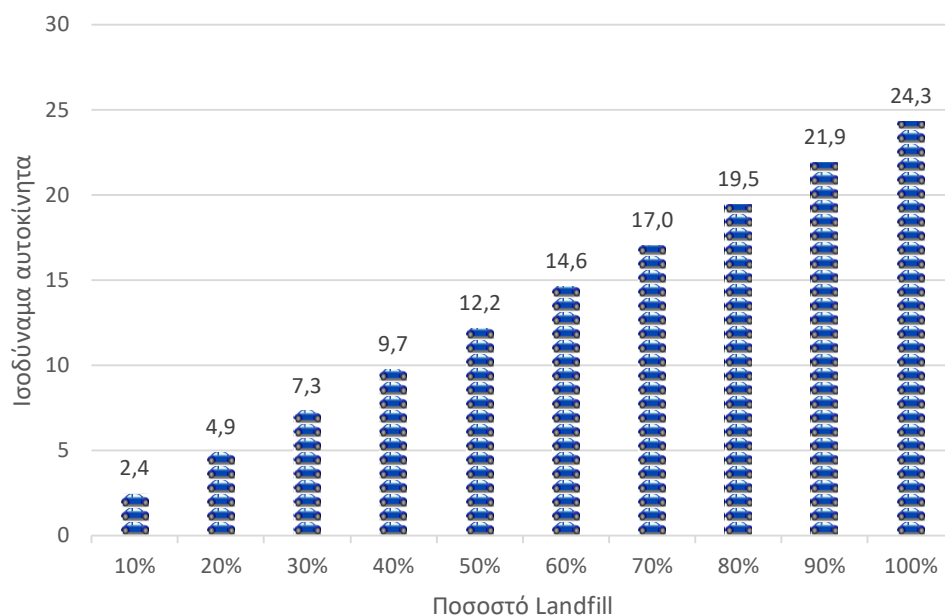
Πίνακας 2. Μεταβολή των εκπομπών CO₂ σε σχέση με το ποσοστό landfill

Ποσοστό Landfill	Εκπομπές CO ₂ (tn)
10%	11.19 tn
50%	55.93 tn
100%	111.87 tn

Η αύξηση είναι σχεδόν απόλυτα γραμμική, γεγονός που δείχνει ότι κάθε πρόσθετος τόνος ταφής έχει σταθερό περιβαλλοντικό κόστος. Το γράφημα δείχνει ξεκάθαρα ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό των σύμμεικτων μεταλλικών αποβλήτων που οδηγείται σε ταφή, οι εκπομπές CO₂ αυξάνονται αναλογικά. Στην περίπτωση 100% ταφής, η εταιρεία ευθύνεται για παραγωγή 111,87 tn CO₂, ποσότητα σημαντική σε βιομηχανική κλίμακα. Αντίστροφα, η ανακύκλωση θα είχε αποτρέψει αυτή την εκπομπή και επιπλέον θα προσέφερε περιβαλλοντικό όφελος. Η γραμμική τάση τεκμηριώνει τη δυνατότητα πρόβλεψης των επιπτώσεων και ενισχύει τη χρησιμότητα του μοντέλου WARM στη λήψη αποφάσεων για στρατηγική διαχείρισης αποβλήτων.

3.2.2 Ισοδύναμα αυτοκίνητα

Το Γράφημα 6 απεικονίζει την επίδραση της ταφής των mixed metals στη μείωση περιβαλλοντικού αποτυπώματος σε ισοδύναμα αυτοκίνητα.



Γράφημα 6. Μεταβολή ισοδύναμων αυτοκινήτων σε σχέση με το ποσοστό της ταφής.

Συγκεκριμένα δείχνει τον αριθμό επιβατικών αυτοκινήτων που αντιστοιχεί στις εκπομπές CO₂ που προκαλούνται από την ταφή του ποσού των 5523 tn σύμμεικτων μετάλλων. Η μετατροπή βασίζεται σε πρότυπα WARM της U.S. EPA, όπου 1 tn CO₂ ~ εκπομπές από ένα αυτοκίνητο σε ένα έτος.

Οι τιμές του αρχικού, του τελικού και του μεσαίου σεναρίου αναφέρονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3. Μεταβολή των ισοδύναμων αυτοκινήτων σε σχέση με το ποσοστό landfill

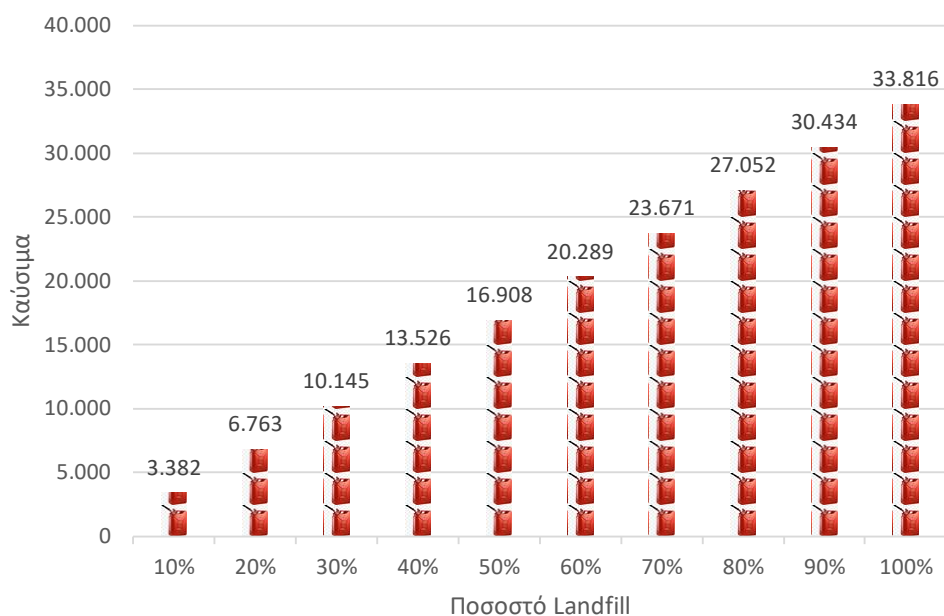
Ποσοστό Ταφής	Αυτοκίνητα (ισοδύναμο CO ₂)
10%	2.43
50%	12.16
100%	24.32

Η συσχέτιση είναι πλήρως γραμμική, και δείχνει ότι για κάθε +10% ταφής, προστίθενται ~2,4 "αυτοκίνητα CO₂".

Το γράφημα αυτό δείχνει με πρακτικούς όρους το περιβαλλοντικό κόστος της απόφασης για ταφή των μεικτών μεταλλικών αποβλήτων. Αν η εταιρεία δεν ανακυκλώσει καθόλου, η περιβαλλοντική επιβάρυνση αντιστοιχεί σε εκπομπές CO₂ ίσες με τις ετήσιες εκπομπές περισσότερων από 24 αυτοκινήτων. Το σενάριο ταφής ακόμη και του 50% προκαλεί αντίστοιχες εκπομπές με ~12 αυτοκίνητα, τονίζοντας τη σημασία της εναλλακτικής διαχείρισης ως εργαλείο για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής.

3.2.3 Κατανάλωση καυσίμων

Το Γράφημα 7 απεικονίζει την επίδραση της ταφής των mixed metals στη μείωση κατανάλωσης καυσίμων.



Γράφημα 7. Μεταβολή καταναλωμένης βενζίνης σε σχέση με το ποσοστό της ταφής.

Αποτυπώνει την ποσότητα καυσίμου (βενζίνης) που αντιστοιχεί στις εκπομπές CO₂ που προκαλούνται από την ταφή των 5523 tn σύμμεικτων μετάλλων. Οι τιμές του αρχικού, του τελικού και του μεσαίου σεναρίου αναφέρονται στον Πίνακα 4

Πίνακας 4. Μεταβολή των ισοδύναμων αυτοκινήτων σε σχέση με το ποσοστό landfill

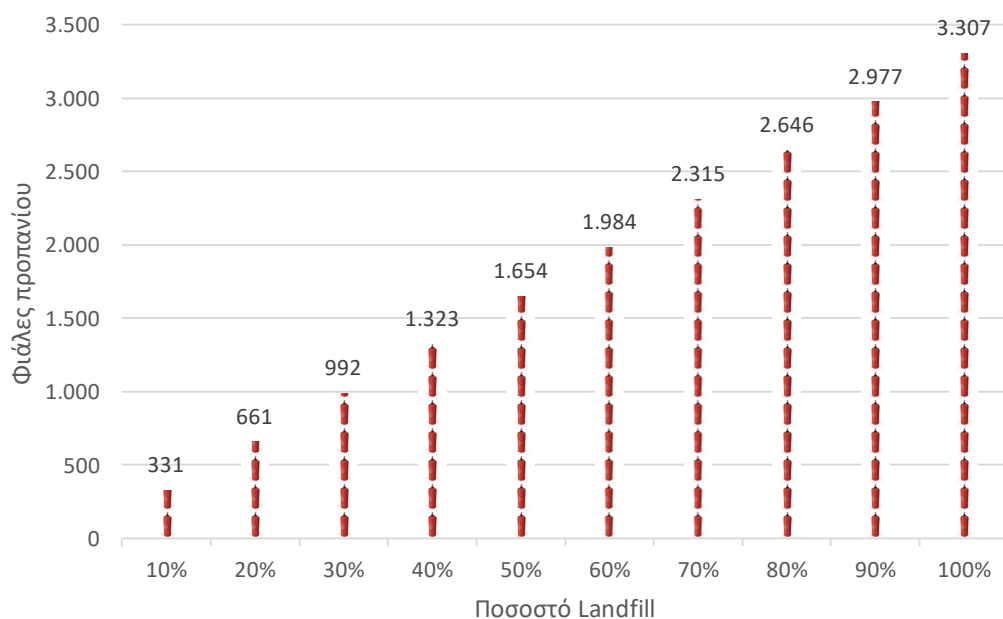
Ποσοστό Ταφής	Λίτρα Βενζίνης (ισοδύναμο CO ₂)
10%	3.382 λίτρα
50%	16.908 λίτρα
100%	33.816 λίτρα

Η σχέση είναι πλήρως γραμμική, υποδεικνύοντας σταθερή επιβάρυνση ανά τόνο. Το γράφημα αποδίδει την περιβαλλοντική επιβάρυνση της ταφής σε ενεργειακούς όρους, μεταφράζοντας τις εκπομπές CO₂ σε λίτρα βενζίνης. Αν όλα τα σύμμεικτα μεταλλικά απόβλητα οδηγηθούν σε ταφή, προκαλείται ενεργειακή επιβάρυνση ισοδύναμη με την καύση ~33.816 λίτρων βενζίνης. Πρόκειται

για ένα ιδιαίτερα σημαντικό μέγεθος, ιδίως αν συγκριθεί με το σενάριο πλήρους ανακύκλωσης, όπου το όφελος ανέρχεται σε πάνω από 7 εκατομμύρια λίτρα που αποφεύγονται.

3.2.4 Κατανάλωση προπανίου

Το Γράφημα 4 απεικονίζει την επίδραση της ταφής των mixed metals στη μείωση κατανάλωσης προπανίου.



Γράφημα 8. Μεταβολή καταναλωμένου προπανίου σε σχέση με το ποσοστό της ταφής.

Το γράφημα παρουσιάζει την ποσότητα προπανίου (σε φιάλες των 20 λίτρων) που ισοδυναμεί με τις εκπομπές CO₂ από την ταφή των 5523 tn μεικτών μεταλλικών αποβλήτων. Δείχνει την ενεργειακή κατανάλωση σε μονάδες οικείες στο ευρύ κοινό, αποτυπώνοντας την ισοδύναμη περιβαλλοντική ζημιά της ταφής των mixed metals σε αριθμό φιαλών προπανίου. Η ταφή του συνόλου των 5523 tn αντιστοιχεί σε πάνω από 3.300 φιάλες προπανίου, αριθμός που δείχνει τη δυνητική απώλεια περιβαλλοντικού και ενεργειακού οφέλους όταν απουσιάζει η εναλλακτική διαχείριση.

Τα γραφήματα τεκμηριώνουν τη βιωσιμότητα της επιλογής ανακύκλωσης έναντι της ταφής, και τη σημασία της για στρατηγικούς ESG στόχους (βάλτε εδώ citation στη βιβλιογραφία με τους ESG στόχους).

3.3 Σύγκριση Αποτελεσμάτων Σεναρίων Διαχείρισης Αποβλήτων με Ανακύκλωση και Ταφή

Η ανακύκλωση οδηγεί στη μέγιστη εξοικονόμηση εκπομπών CO₂ και ενεργειακών ισοδυνάμων και οι τιμές του βέλτιστου σεναρίου αναγράφονται στον Πίνακα 5.

Πίνακας 5. Τιμές Σεναρίου 100% Αύξηση Ανακύκλωσης.

Δείκτης	Τιμή (100%)
CO ₂	-24.252 tn
Αυτοκίνητα	-5.272
Λίτρα βενζίνης	-7.331.192
Φιάλες προπανίου	-717.048

Η ανακύκλωση αξιοποιεί το υλικό κυκλικά, αποτρέποντας τόσο τις εκπομπές όσο και τη χρήση πρωτογενούς ενέργειας για νέα παραγωγή. Παρουσιάζει το μεγαλύτερο συνολικό περιβαλλοντικό όφελος, ιδίως σε CO₂.

Η ταφή είναι το χειρότερο σενάριο περιβαλλοντικά, καθώς όχι μόνο δεν προσφέρει όφελος, αλλά προσθέτει εκπομπές CO₂ και ενέργειας. Οι τιμές για την ταφή όλης της ποσότητας που διαχειριστήκαμε αναγράφεται στον Πίνακα 6.

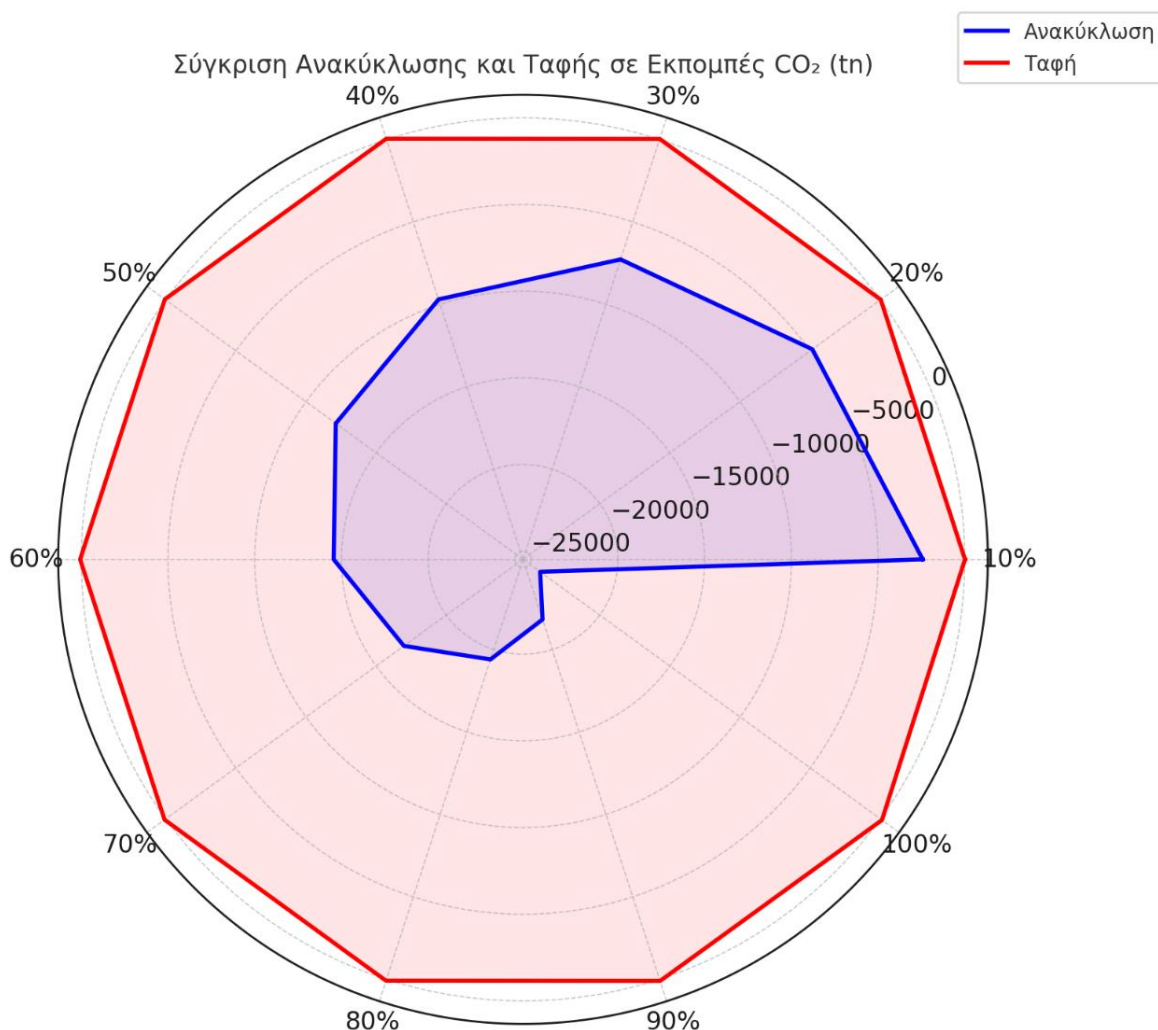
Πίνακας 6. Τιμές Σεναρίου 100% Αύξηση Ταφής.

Δείκτης	Τιμή (100%)
CO ₂	+111.87 tn
Αυτοκίνητα	+24.32
Λίτρα βενζίνης	+33.816
Φιάλες προπανίου	+3.307

Η ταφή αντιπροσωπεύει καθαρή περιβαλλοντική ζημία, επιβαρύνοντας την εταιρεία τόσο με εκπομπές όσο και με απώλεια υλικού και ενέργειας (Πίνακας 7)

Πίνακας 7. Ποιοτική Αξιολόγηση Σεναρίων Ανακύκλωσης και Ταφής.

Σενάριο	Περιβαλλοντικό Όφελος	Ενεργειακή Απόδοση	Καταλληλότητα
Ανακύκλωση	☆☆☆☆☆ (Άριστο)	☆☆☆☆☆	Ιδανικό για κυκλική οικονομία
Ταφή	☆ (Χαμηλό)	☆	Να αποφεύγεται



Γράφημα 9. Σύγκριση Ανακύκλωσης και Ταφής σε Μείωση Εκπομπές CO₂ (tn).

Το γράφημα 9 παρουσιάζει την οπτική σύγκριση των μεταξύ της διαχείρισης αποβλήτων με ανακύκλωση vs ταφή. Η ανακύκλωση, ήδη από το 10% εφαρμογής, αποτρέπει την έκλυση 2.425,24 τόνων CO₂, ενώ στο 100% η αποφυγή φτάνει τους 24.252,38 τόνους. Αντιθέτως, η ταφή φαίνεται να παρουσιάζει εντελώς διαφορετική κατανομή. Η διαφορά μεταξύ των δύο μεθόδων για το ίδιο υλικό και βάρος αγγίζει τα 24.364,25 tn CO₂, στοιχείο που αποδεικνύει τη δραστική ωφέλεια της ανακύκλωσης ως προς το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της διαχείρισης αποβλήτων.

Το γράφημα 9 αναδεικνύει την αντίθετη κατεύθυνση των δύο πρακτικών: όσο αυξάνεται το ποσοστό ανακύκλωσης, οι εκπομπές μειώνονται γραμμικά, ενώ στην περίπτωση της ταφής τείνουν να είναι

σταθερές. Η ανάλυση αυτή τεκμηριώνει ότι η επιλογή της ανακύκλωσης δεν έχει μόνο θεωρητικά πλεονεκτήματα, αλλά μετρήσιμα περιβαλλοντικά οφέλη.

Ακολουθούν αναλυτικά οι τιμές για όλα τα σενάρια που μελετήθηκαν. (Πίνακες 8 & 9)

Πίνακας 8. Τιμές για το σενάριο ανακύκλωσης.

Ποσοστό Αύξησης	Εκπομπές CO ₂ (tn)	Αυτοκίνητα	Βενζίνη (L)	Προπάνιο (Φιάλες)
10%	-2,425	-527	-733,119	-71,705
20%	-4,850	-1054	-1,466,238	-143,410
30%	-7,276	-1582	-2,199,358	-215,114
40%	-9,701	-2109	-2,932,477	-286,819
50%	-12,126	-2636	-3,665,596	-358,524
60%	-14,551	-3163	-4,398,715	-430,229
70%	-16,977	-3691	-5,131,835	-501,934
80%	-19,402	-4218	-5,864,954	-573,638
90%	-21,827	-4745	-6,598,073	-645,343
100%	-24,252	-5272	-7,331,192	-717,048

Πίνακας 9. Τιμές για το σενάριο ταφής.

Ποσοστό Αύξησης	Εκπομπές CO ₂ (tn)	Αυτοκίνητα	Βενζίνη (L)	Προπάνιο (Φιάλες)
10%	11.19	2.43	3,382	331
20%	22.37	4.86	6,763	661
30%	33.56	7.30	10,145	992
40%	44.75	9.73	13,526	1,323
50%	55.93	12.16	16,908	1,654
60%	67.12	14.59	20,289	1,984
70%	78.31	17.02	23,671	2,315
80%	89.49	19.45	27,052	2,646
90%	100.68	21.89	30,434	2,977
100%	111.87	24.32	33,816	3,307

Τέλος, η χρήση του μοντέλου WARM παρέχει αξιόπιστο εργαλείο τεκμηρίωσης για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών ωφελειών για επιχειρήσεις, οργανισμούς και πολιτικούς φορείς. Η στρατηγική

στροφή προς τη μεγιστοποίηση της ανακύκλωσης των μετάλλων μπορεί να ενισχυθεί ουσιαστικά μέσω τέτοιων μετρήσεων και διαγραμμάτων, ενισχύοντας τον σχεδιασμό δράσεων σε περιβαλλοντικό και επιχειρησιακό επίπεδο.

4- ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη χρήση του μοντέλου WARM αποκτούν πραγματική αξία όταν αξιολογηθούν υπό το πρίσμα των επιχειρησιακών πρακτικών και των στρατηγικών στόχων της εταιρείας. Η καταγραφή και αξιολόγηση των εκπομπών CO₂ και της ενεργειακής επίπτωσης των διαφορετικών σεναρίων διαχείρισης αποβλήτων, δεν αποτελεί απλώς μια ακαδημαϊκή άσκηση, αλλά ένα ισχυρό εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων. Η εταιρεία ήδη εφαρμόζει πρακτικές κυκλικής οικονομίας με αξιοσημείωτη αξιοποίηση scrap και υψηλά ποσοστά παραγωγής δευτερόχυτου αλουμινίου. Ωστόσο, η παρούσα ανάλυση αναδεικνύει ότι υπάρχει περιθώριο περαιτέρω περιβαλλοντικής βελτιστοποίησης, ειδικά σε ό,τι αφορά τα υπολείμματα υλικού που μέχρι τώρα αντιμετωπίζονται ως απώλειες ή απόβλητα. Η δυνατότητα προσομοίωσης διαφόρων ποσοστών ανακύκλωσης και ταφής, καθώς και η αντιστοίχισή τους σε μεγέθη (ισοδύναμα CO₂, κατανάλωση καυσίμων, κτλπ) προσφέρει ένα χειροπιαστό πλαίσιο αξιολόγησης της περιβαλλοντικής αποδοτικότητας των επιλογών. Αυτό επιτρέπει στη διοίκηση να προχωρήσει σε ενέργειες που συνδυάζουν την περιβαλλοντική συμμόρφωση με την επιχειρηματική αποδοτικότητα. Η χρήση του WARM μπορεί επίσης να λειτουργήσει ως εσωτερικός μηχανισμός αξιολόγησης στο πλαίσιο της περιβαλλοντικής διαχείρισης ή ακόμη και της κατάρτισης ESG εκθέσεων. Επιπλέον, δημιουργεί ένα προηγούμενο για τη διαρκή παρακολούθηση των περιβαλλοντικών δεικτών και την ενσωμάτωσή τους σε συστήματα λήψης αποφάσεων. Τέλος, τα ευρήματα δεν περιορίζονται μόνο στο συγκεκριμένο μοντέλο ή τις σημερινές συνθήκες. Αντιθέτως, ανοίγουν τη συζήτηση για μακροπρόθεσμη στρατηγική, όπως ενίσχυση συνεργασιών με φορείς ανακύκλωσης, αξιοποίηση επιδοτήσεων για κυκλικές υποδομές ή ακόμα και επένδυση σε πιο εξελιγμένα ψηφιακά εργαλεία διαχείρισης υλικών.

Η προσομοίωση διαφορετικών σεναρίων στο WARM για αυτούς τους 5.523 τόνους ως Mixed Metals κατέδειξε ότι η ανακύκλωση οδηγεί σε σημαντική μείωση εκπομπών CO₂, με αποφυγή έως και 24.252 τόνων CO₂, ενώ αντίθετα, η ταφή οδηγεί σε καθαρή παραγωγή 111 τόνων CO₂. Η απόδοση των αποτελεσμάτων σε πρακτικά ισοδύναμα (χιλιάδες λίτρα βενζίνης, φιάλες προπανίου και αριθμό αυτοκινήτων) ενισχύει περαιτέρω την αντιληπτή αξία των περιβαλλοντικών ωφελειών.

Η εταιρεία έχει ήδη υιοθετήσει έναν βασισμένο στην ανακύκλωση παραγωγικό σχεδιασμό, αλλά τα ευρήματα της παρούσας εργασίας αποδεικνύουν πως η στοχευμένη βελτιστοποίηση της διαχείρισης των μεταλλικών υπολειμμάτων μπορεί να ενισχύσει περαιτέρω το περιβαλλοντικό της προφίλ. Εάν, για παράδειγμα, το σύνολο του απομένοντος scrap κατευθυνόταν σε μονάδες ανακύκλωσης, το καθαρό περιβαλλοντικό όφελος θα αντιστοιχούσε σε 7,3 εκατομμύρια λίτρα βενζίνης ή την απόσυρση 5.272 οχημάτων για ένα έτος — μεγέθη που μπορούν να αξιοποιηθούν στο πλαίσιο εταιρικής κοινωνικής ευθύνης ή έκδοσης απολογισμών βιωσιμότητας (π.χ. ESG reporting).

4.1 Επιχειρησιακή Αξιοποίηση των Αποτελεσμάτων

Η προσομοίωση διαφορετικών σεναρίων (π.χ. 10%–100% ανακύκλωση ή ταφή) κατέδειξε ότι η ανακύκλωση ακόμη και μέρους του απορριπτόμενου υπολειμματικού υλικού (όπως τα 5.523 tn απόβλητα μετά την παραγωγή δευτερόχυτων στη μελετώμενη περίπτωση) οδηγεί σε δραστική μείωση των εκπομπών CO₂, συγκρίσιμη με τη μείωση χιλιάδων αυτοκινήτων από το οδικό δίκτυο ή εκατομμυρίων λίτρων κατανάλωσης καυσίμων. Αυτό σημαίνει πως η επιχείρηση, πέρα από την πρωτογενή παραγωγή, έχει τη δυνατότητα να μετατρέψει τα ίδια της τα απόβλητα σε “περιβαλλοντικά assets” — στοιχεία που αυξάνουν την αξία της στον άξονα της βιωσιμότητας, ενισχύουν το κοινωνικό της προφίλ και προσφέρουν υλικό για στρατηγική επικοινωνία σε ESG εκθέσεις.

4.2 Αναβάθμιση Εσωτερικών Διαδικασιών

Η ανάλυση δημιουργεί επίσης ενδοεταιρικές προοπτικές βελτιστοποίησης. Μέσα από την ποσοτική τεκμηρίωση του κόστους και της ωφέλειας ανά σενάριο, δίνεται η δυνατότητα στην επιχείρηση:

- Να αξιολογήσει πιο αποδοτικά το όφελος από αύξηση ποσοστών ανάκτησης σκραπ.
- Να εντοπίσει τα σημεία του κύκλου παραγωγής όπου παράγεται περιττό scrap ή γίνεται μη βέλτιστη διαχείριση υλικών.
- Να τεκμηριώσει τη σκοπιμότητα επενδύσεων σε μηχανισμούς διαχωρισμού, καθαρισμού και επαναχύτευσης του μεταλλικού αποβλήτου.

Σε κάθε περίπτωση, τα δεδομένα υποδεικνύουν ότι ακόμα και μικρές αλλαγές στην τακτική διαχείρισης των υπολειμμάτων έχουν σημαντικές περιβαλλοντικές και ενεργειακές συνέπειες.

4.3 Θέση της Εταιρείας στο Πλαίσιο της Κυκλικής Οικονομίας

Η συσχέτιση των ευρημάτων με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας φανερώνει πως η εταιρεία βρίσκεται ήδη σε μια μεταβατική φάση προς το κυκλικό μοντέλο παραγωγής, μέσω της χρήσης scrap, των δευτερόχυτων ροών και της μείωσης της εξάρτησης από πρωτόχυτο αλουμίνιο. Η ενίσχυση της ανακύκλωσης των ίδιων των απορριμμάτων της προσφέρει στρατηγικό πλεονέκτημα εντός και εκτός Ελλάδας, σε ένα διεθνές περιβάλλον που επιβραβεύει την “πράσινη” παραγωγή.

4.4 Συμμόρφωση και Ευκαιρίες Χρηματοδότησης

Η τεκμηρίωση των περιβαλλοντικών επιδόσεων προσφέρει και προστιθέμενη αξία για την εταιρεία στο πλαίσιο της συμμόρφωσης με την ευρωπαϊκή νομοθεσία, καθώς και στα κριτήρια ESG και

βιωσιμότητας. Η επένδυση στη βελτιστοποίηση της διαχείρισης αποβλήτων μετάλλου μπορεί να υποστηριχθεί μέσω χρηματοδοτικών εργαλείων, επιδοτήσεων του Ταμείου Ανάκαμψης ή Προγραμμάτων LIFE.

4.5 Προοπτική Εφαρμογής σε Άλλες Επιχειρήσεις και Μακροεπίπεδο Πολιτικής

Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης, παρότι προέρχονται από την ανάλυση μιας συγκεκριμένης επιχείρησης, είναι μεταφέρσιμα και σε άλλους παραγωγικούς κλάδους με ανάλογη δομή αποβλήτων. Ο κλάδος των μετάλλων και ειδικότερα των μη σιδηρούχων μετάλλων, όπως το αλουμίνιο, χαρακτηρίζεται από υψηλή ενεργειακή ένταση και σημαντικά απόβλητα που διαθέτουν υψηλή αξία ανακύκλωσης. Η εφαρμογή εργαλείων όπως το WARM μπορεί να βοηθήσει:

- Άλλες μεταλλουργικές ή βιομηχανικές εταιρείες να ποσοτικοποιήσουν τις περιβαλλοντικές συνέπειες των αποφάσεων τους.
- Μικρομεσαίες επιχειρήσεις να λάβουν χρηματοδοτούμενες αποφάσεις για το αν συμφέρει επένδυση σε εξοπλισμό ανακύκλωσης ή συνεργασία με συστήματα εναλλακτικής διαχείρισης.
- Διαχειριστές εγκαταστάσεων αποβλήτων να σχεδιάσουν σενάρια με γνώμονα τη μέγιστη μείωση των εκπομπών, προσαρμόζοντας τις τεχνικές επεξεργασίας.

Σε μακροεπίπεδο, τέτοιες ποσοτικές αναλύσεις μπορούν να υποστηρίξουν:

- Δημόσιες πολιτικές και στρατηγικές για την ενίσχυση της κυκλικής οικονομίας, με πραγματικά δεδομένα από επιχειρήσεις.
- Την αναθεώρηση κανονισμών και καθορισμό στόχων βάσει αποδείξεων (evidence-based policy).
- Την αξιολόγηση περιβαλλοντικών επιδόσεων κλάδων της βιομηχανίας από εποπτικές αρχές ή εθνικούς φορείς.
- Τη χάραξη πράσινων κινήτρων (φοροαπαλλαγές, ενισχύσεις) για επιχειρήσεις που επενδύουν στην ανακύκλωση και επαναξιοποίηση αποβλήτων.

5 - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία ανέδειξε τη σημασία της εναλλακτικής διαχείρισης στερεών αποβλήτων μετάλλου μέσα από την οπτική της ποσοτικοποίησης των περιβαλλοντικών και ενεργειακών ωφελειών με τη χρήση του μοντέλου WARM. Η εφαρμογή της μεθοδολογίας σε δεδομένα πραγματικής εταιρείας παραγωγής δευτερόχυτου αλουμινίου ανέδειξε με σαφήνεια τη διαφορά μεταξύ των διαχειριστικών σεναρίων (ανακύκλωση, ταφή, καύση) τόσο σε όρους εκπομπών CO₂ όσο και σε δείκτες ισοδυναμίας, όπως αριθμός οχημάτων, λίτρα βενζίνης και φιάλες προπανίου που εξοικονομούνται.

Η ανάλυση κατέδειξε ότι η ανακύκλωση μεικτών μετάλλων (mixed metals), ακόμα και σε ποσοστά κάτω του 100%, μπορεί να προσφέρει σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη σε σύγκριση με την υγειονομική ταφή. Συγκεκριμένα, για το σύνολο των 5523 τόνων υπολειπόμενου υλικού που εξετάστηκαν, η πλήρης ανακύκλωση θα απέφερε αποφυγή εκπομπών της τάξης των ~24.252 τόνων CO₂, σε αντίθεση με τους ~112 τόνους CO₂ από την πλήρη ταφή.

Επιπλέον, η επιλογή της κατάλληλης κατηγορίας στο WARM (π.χ. Mixed Metals αντί Aluminum Ingots) αποδείχθηκε καθοριστικής σημασίας, αφού η ποιότητα και η σύσταση του υλικού καθορίζουν το ρεαλιστικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα κάθε επιλογής. Το μοντέλο ανέδειξε επίσης την επίδραση της σύστασης της πρώτης ύλης (πρωτόχυτο αλουμίνιο, σκραπ, προκράμματα) στην απόδοση της τελικής παραγωγής και στη δημιουργία μεταπαραγωγικού σκραπ.

Η εργασία αυτή δεν περιορίστηκε στη θεωρητική διερεύνηση, αλλά υλοποιήθηκε σε πλήρως εφαρμοσμένο επίπεδο, ενισχύοντας τη δυνατότητα χρήσης του WARM ως εργαλείου υποστήριξης αποφάσεων για τις ίδιες τις επιχειρήσεις. Μέσω σεναρίων, πινάκων και διαγραμμάτων, έγινε κατανοητό πώς μια εταιρεία μπορεί να ελέγξει και να μειώσει τις περιβαλλοντικές της επιπτώσεις, λαμβάνοντας υπόψη τις επιλογές στη διαχείριση των μεταλλικών αποβλήτων της.

Σε μακροσκοπικό επίπεδο, η εργασία προτείνει ένα μοντέλο με δυνατότητα γενίκευσης σε άλλες επιχειρήσεις του μεταλλουργικού τομέα στην Ελλάδα και την Ευρώπη. Η αξιοποίηση εργαλείων σαν το WARM μπορεί να ενσωματωθεί στο στρατηγικό σχεδιασμό των εταιρειών, να ενισχύσει τα ESG χαρακτηριστικά τους και να συμβάλει στη συλλογική επίτευξη των εθνικών και ευρωπαϊκών στόχων για κυκλική οικονομία και κλιματική ουδετερότητα.

Η μελλοντική έρευνα μπορεί να στραφεί σε μοντέλα όπως το WARM αλλά με τοπική παραμετροποίηση για ευρωπαϊκά ή ελληνικά δεδομένα, καθώς η έκδοση του εργαλείου της ΕΡΑ αφορά κυρίως τις ΗΠΑ. Επιπλέον, προτείνεται η ενσωμάτωση οικονομικών παραμέτρων (κόστος ανά τόννο επεξεργασίας, επενδυτικό κόστος εξοπλισμού, κόστος εκπομπών CO₂) ώστε να μπορούν να εξαχθούν και χρηματοοικονομικά συμπεράσματα παράλληλα με τα περιβαλλοντικά. Τέλος, η επέκταση της μεθοδολογίας σε άλλες μορφές μετάλλων ή βιομηχανικών αποβλήτων θα εμπλούτιζε περαιτέρω τη βιβλιογραφία και την πρακτική αξία του εργαλείου.

6 - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- US EPA. (2023). *Greenhouse Gas Equivalencies Calculator*. <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gas-equivalencies-calculator>
- European Aluminium Association. (2021). *Recycling Aluminium: A Pathway to CO₂ Reduction*. <https://european-aluminium.eu>
- European Commission. (2015). *European Reference Model on Municipal Waste Management*. <https://ec.europa.eu/environment/waste/models.htm>
- European Commission. (2020). *Circular Economy Action Plan: For a cleaner and more competitive Europe*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0098>
- European Commission. (2021). *European Green Deal*. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
- European Parliament and Council. (2008). *Directive 2008/98/EC on waste*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32008L0098>
- Franklin Associates. (2006). *MSW Decision Support Tool (MSW-DST)*. U.S. EPA.
- ICF International. (2019). *Documentation for Greenhouse Gas Emission and Energy Factors Used in the Waste Reduction Model (WARM)*. U.S. EPA.
- International Aluminium Institute. (2023). *Aluminium Recycling: Key Environmental and Economic Facts*. <https://international-aluminium.org>
- US. Environmental Protection Agency (EPA). (2020). *WARM Version 16: Waste Reduction Model*. <https://www.epa.gov/warm>
- UNEP. (2013). *Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure*. <https://www.resourcepanel.org/reports/metal-recycling>
- United States Geological Survey (USGS) (2022) <https://pubs.usgs.gov/publication/mcs2022>
- Cui & Forssberg (2003) <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S030438940300061X>

