



**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

---

**Εκτίμηση περιβαλλοντικών και ενεργειακών ωφελειών από την  
εναλλακτική διαχείριση αστικών στερεών αποβλήτων με τη χρήση του  
μοντέλου WARM**

---

**Στεργιάδης Γρηγόριος**  
AM: 2019010102

**Επιβλέπων: Καθηγητής Τσαγκαράκης Κωνσταντίνος**

Χανιά, 2025

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά τις περιβαλλοντικές και ενεργειακές ωφέλειες από τη χρήση εναλλακτικών τρόπων διαχείρισης αστικών στερεών αποβλήτων στο πλαίσιο λειτουργίας ενός αεροδρομίου. Προκειμένου τα αποτελέσματα της εργασίας να αντικατοπτρίζουν πραγματικές συνθήκες, η σχετική μελέτη έγινε σε συνεργασία με το τμήμα Υπηρεσίας Περιβάλλοντος του Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών Α.Ε., το οποίο παρείχε δεδομένα για τα έτη 2022 και 2023. Τα δεδομένα αυτά αποτέλεσαν βάση για την δημιουργία διάφορων σεναρίων διαχείρισης στερεών αποβλήτων, στα οποία συνδυάζονται ποικίλα ποσοστά απορριμμάτων που υπόκεινται σε υγειονομική ταφή, ανακύκλωση ή κομποστοποίηση. Οι παραπάνω συνδυασμοί, στη συνέχεια, αναλυθήκαν μέσω ειδικού λογισμικού ώστε να εκτιμηθούν οι ανάλογες μειώσεις σε εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, οι οποίες θα μπορούσαν να επιτευχθούν, σύμφωνα με τη βάση δεδομένων που έχει δημιουργήσει η Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Πολιτειών (US EPA) από το 1998 έως την πιο πρόσφατη ενημέρωση που έγινε το 2023.

Για τη διεξαγωγή των αποτελεσμάτων, καθώς και για όλους τους απαραίτητους υπολογισμούς, χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό μοντέλο WARM (Waste Reduction Model), το οποίο αναπτύχθηκε από την Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Πολιτειών, έχει τη δυνατότητα λειτουργίας σε περιβάλλον Excel και επιτρέπει την αξιολόγηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου αναφορικά με διάφορες μεθόδους διαχείρισης απορριμμάτων. Τα αποτελέσματα, στη συνέχεια, διαμορφώθηκαν σε διαγράμματα, τα οποία βοήθησαν στην ανάλυση των πληροφοριών και οδήγησαν σε ασφαλή συμπεράσματα, σχετικά με τη μείωση των ετήσιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου που αντιστοιχεί σε κάθε είδος από τα μελετώμενα απορρίμματα. Αναφέροντας κάποια από τα κύρια αποτελέσματα, προέκυψε ότι το χαρτί, τα πλαστικά και τα μεικτά μέταλλα είναι οι κατηγορίες υλικών, των οποίων η ανακύκλωση θα προκαλούσε τις θετικότερες μεταβολές στις εκπομπές αερίων για το αεροδρόμιο. Η θετικότητα των μεταβολών είναι ίδια και σε ενεργειακό πλαίσιο, καθώς το μοντέλο WARM έχει τη δυνατότητα παρουσίασης σε ισοδύναμη εξοικονόμηση καυσίμων. Μέσω της μελέτης, επίσης, διαπιστώθηκε ότι αυξάνοντας τους όγκους απορριμμάτων που οδηγούνται σε ανακύκλωση/κομποστοποίηση, η επιπρόσθετη εξοικονόμηση εκπομπών γίνεται όλο και μικρότερη, με γραμμικό τρόπο.

Η διαδικασία που περιεγράφηκε συμβάλλει στη κατανόηση των αλλαγών που επιφέρουν οι διαφορετικοί συνδυασμοί όγκων αποβλήτων προς ανακύκλωση/κομποστοποίηση, προσφέροντας κάποιες ποσοτικές εκτιμήσεις που αρμόζουν σε εγκαταστάσεις βεληνεκούς όμοιου με αυτό του αεροδρομίου «Ελευθέριος Βενιζέλος».

Λέξεις Κλειδιά: WARM, Waste Reduction Model, διαχείριση απορριμμάτων, αστικά στερεά απόβλητα, στερεά απόβλητα αεροδρομίου, αέρια του θερμοκηπίου, μείωση εκπομπών.

## **Abstract**

The present thesis explores the environmental and energy benefits derived from employing alternative methods of urban solid waste management within the operational framework of an airport. To ensure that the findings reflect real-world conditions, the study was conducted in collaboration with the Environmental Services Department of Athens International Airport, which provided data for the years 2022 and 2023. This data was utilized to develop various solid waste management scenarios, combining different proportions of waste subject to landfill, recycling, or composting. The scenarios were then analyzed using specialized software to assess the potential reductions in greenhouse gas emissions that could be achieved, based on the database established by the United States Environmental Protection Agency (US EPA) from 1998 until the latest update that happened in 2023.

In order to complete the analysis and all the necessary calculations, the Waste Reduction Model (WARM) was, which is a tool developed by the United States Environmental Protection Agency (US EPA). This computational tool, compatible with Microsoft Excel, facilitates the evaluation of greenhouse gas (GHG) emissions associated with various waste management strategies. The results were subsequently visualized in diagrams, which assisted the study of information and led to robust conclusions regarding the reduction of GHG emissions corresponding to each type of studied waste. Among the key findings, it was determined that paper, plastics, and mixed metals are the material categories whose recycling would result in the most significant positive impact on airport emissions. These positive changes are also reflected in an energy context, as the WARM model can present results in terms of equivalent fuel savings. Additionally, the study revealed that, as the volume of waste directed toward recycling or composting increases, the additional emissions savings achieved, gradually decrease following a linear pattern.

The aforementioned process aids in understanding the impact of different combinations of waste volumes directed toward recycling/composting, providing quantitative estimates applicable to facilities of a similar scale to the "Eleftherios Venizelos" airport.

**Keywords:** WARM, Waste Reduction Model, waste management, municipal solid waste, airport solid waste, greenhouse gases, emissions reduction.

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω βαθύτατα όλα τα άτομα που μου συμπαραστάθηκαν όχι μόνο κατά τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της διπλωματικής εργασίας, αλλά και όλης της φοιτητικής μου σταδιοδρομίας.

Αρχικά, δηλώνω ιδιαίτερα ευγνώμων για την συνεργασία μου με τον δόκτορα Κωνσταντίνο Τσαγκαράκη, ο οποίος ήταν ο επιβλέπων καθηγητής για την διπλωματική μου εργασία. Η υποστήριξη του για θέματα τόσο εντός σχολής, όσο και εκτός αυτής, ήταν πολύτιμη για εμένα και οφείλω να την αναγνωρίσω.

Επιπλέον, ευχαριστώ θερμά τον δόκτορα Χαράλαμπο Κάβουρα από το τμήμα Υπηρεσίας Περιβάλλοντος του Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών Α.Ε., για την άριστη επικοινωνία και βοήθεια του, όσον αφορά την απόκτηση όλων των απαραίτητων δεδομένων για τη συγκεκριμένη εργασία.

Τέλος, εκφράζω την ευγνωμοσύνη και την αγάπη μου για όλους τους δικούς μου ανθρώπους, οι οποίοι δεν έπαψαν ποτέ να πιστεύουν σε εμένα, αποτελώντας το στήριγμα μου σε όλα αυτά τα περασμένα χρόνια.

## **Περιεχόμενα**

<b>Κεφάλαιο 1 .....</b>	<b>2</b>
<b>Εισαγωγή .....</b>	<b>2</b>
<b>Κεφάλαιο 2 .....</b>	<b>11</b>
<b>Μεθοδολογία και Υπολογισμοί.....</b>	<b>11</b>
<b>Κεφάλαιο 3 .....</b>	<b>14</b>
<b>Ανάλυση Αποτελεσμάτων.....</b>	<b>14</b>
<b>3.1. Εκτίμηση Περιβαλλοντικών Ωφελειών.....</b>	<b>14</b>
<b>3.2. Σύνοψη Εξοικονόμησης Εκπομπών ανά Υλικό .....</b>	<b>28</b>
<b>Κεφάλαιο 4 .....</b>	<b>31</b>
<b>Συμπεράσματα .....</b>	<b>31</b>
 <b>Παράρτημα 1.....</b>	 <b>32</b>
<b>Παράρτημα 2.....</b>	<b>35</b>
<b>Παράρτημα 3.....</b>	<b>47</b>
 <b>Βιβλιογραφία.....</b>	 <b>51</b>

## Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1	Δεδομένα προς ανάλυση .....	11
Πίνακας 2	Αποτελέσματα εξοικονόμησης συνολικού συνδυασμού σε $\text{MTCO}_2\text{E}$ .....	13
Πίνακας 3	Ποσοστιαίες μεταβολές χαρτιού, 2022 .....	24
Πίνακας 4	Ποσοστιαίες μεταβολές πλαστικών, 2022 .....	24
Πίνακας 5	Ποσοστιαίες μεταβολές για άλλα μέταλλα, 2022 .....	25
Πίνακας 6	Ποσοστιαίες μεταβολές χαρτιού, 2023 .....	25
Πίνακας 7	Ποσοστιαίες μεταβολές πλαστικών, 2023 .....	25
Πίνακας 8	Ποσοστιαίες μεταβολές για άλλα μέταλλα, 2023 .....	25
Πίνακας 9	Μείωση εκπομπών ανά τόνο υλικού σε $\text{MTCO}_2\text{E}$ .....	28
Πίνακας 10	Μείωση εκπομπών ανά τόνο υλικού σε επιβατικά οχήματα .....	28
Πίνακας 11	Μείωση εκπομπών ανά τόνο υλικού σε γαλόνια βενζίνης .....	29
Πίνακας 12	Μείωση εκπομπών ανά τόνο υλικού σε φιάλες προπάνιου .....	29
Πίνακας 13	Κατάταξη υλικών συναρτήσει φύσης και παραγόμενης ποσότητας .....	30
Πίνακας Π1	Εξοικονομήσεις εκπομπών από κάθε υλικό σε $\text{MTCO}_2\text{E}$ , 2022 .....	32
Πίνακας Π2	Εξοικονομήσεις εκπομπών από κάθε υλικό σε επιβατικά οχήματα, 2022 .....	32
Πίνακας Π3	Εξοικονομήσεις εκπομπών από κάθε υλικό σε γαλόνια βενζίνης, 2022 .....	32
Πίνακας Π4	Εξοικονομήσεις εκπομπών από κάθε υλικό σε φιάλες προπάνιου, 2022 .....	33
Πίνακας Π5	Εξοικονομήσεις εκπομπών από κάθε υλικό σε $\text{MTCO}_2\text{E}$ , 2022 .....	33
Πίνακας Π6	Εξοικονομήσεις εκπομπών από κάθε υλικό σε επιβατικά οχήματα, 2022 .....	33
Πίνακας Π7	Εξοικονομήσεις εκπομπών από κάθε υλικό σε γαλόνια βενζίνης, 2022 .....	34
Πίνακας Π8	Εξοικονομήσεις εκπομπών από κάθε υλικό σε φιάλες προπάνιου, 2022 .....	34

## Ευρετήριο Διαγραμμάτων

<b>Διάγραμμα 1</b> Αστικοί (κόκκινο) και αγροτικοί (πράσινο) πληθυσμοί του κόσμου, 1950-2050 (Ηνωμένα Έθνη, 2018).....	9
<b>Διάγραμμα 2</b> Παραγωγή αστικών αποβλήτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση, 2004 και 2022 (Eurostat, 2024) .....	9
<b>Διάγραμμα 3</b> Συνδυαστική μείωση εκπομπών αερίων σε $\text{MTCO}_2\text{E}$ .....	14
<b>Διάγραμμα 4</b> Συνδυαστική μείωση εκπομπών αερίων σε επιβατικά οχήματα .....	15
<b>Διάγραμμα 5</b> Συνδυαστική μείωση εκπομπών αερίων σε γαλόνια βενζίνης .....	15
<b>Διάγραμμα 6</b> Συνδυαστική μείωση εκπομπών αερίων σε φιάλες προπάνιου .....	16
<b>Διάγραμμα 7</b> Μεταβολές εκπομπών $\text{MTCO}_2\text{E}$ για ανακύκλωση χαρτιού.....	17
<b>Διάγραμμα 8</b> Μεταβολές εκπομπών $\text{MTCO}_2\text{E}$ για ανακύκλωση πλαστικών .....	17
<b>Διάγραμμα 9</b> Μεταβολές εκπομπών $\text{MTCO}_2\text{E}$ για ανακύκλωση ελαστικών.....	18
<b>Διάγραμμα 10</b> Μεταβολές εκπομπών $\text{MTCO}_2\text{E}$ για ανακύκλωση αλουμινίου.....	19
<b>Διάγραμμα 11</b> Μεταβολές εκπομπών $\text{MTCO}_2\text{E}$ για ανακύκλωση μεικτών μετάλλων .....	19
<b>Διάγραμμα 12</b> Μεταβολές εκπομπών $\text{MTCO}_2\text{E}$ για ανακύκλωση γυαλιού.....	20
<b>Διάγραμμα 13</b> Μεταβολές εκπομπών $\text{MTCO}_2\text{E}$ για ανακύκλωση βιολογικών αποβλήτων.....	21
<b>Διάγραμμα 14</b> Μεταβολές εκπομπών $\text{MTCO}_2\text{E}$ για ανακύκλωση μεικτών ηλεκτρικών αποβλήτων .....	21
<b>Διάγραμμα 15</b> Σύγκριση μεταβολών εκπομπών σε $\text{MTCO}_2\text{E}$ : α. 2022, β. 2023 .....	22
<b>Διάγραμμα 16</b> Σύγκριση μεταβολών εκπομπών σε επιβατικά οχήματα: α. 2022, β. 2023.....	23
<b>Διάγραμμα 17</b> Σύγκριση μεταβολών εκπομπών σε γαλόνια βενζίνης: α. 2022, β. 2023.....	23
<b>Διάγραμμα 18</b> Σύγκριση μεταβολών εκπομπών φιάλες προπάνιου: α. 2022, β. 2023 .....	24
<b>Διάγραμμα 19</b> Ποσοστά συμβολής υλικών στην εξοικονόμηση εκπομπών: α.2022, β.2023 ... ..	26
<b>Διάγραμμα Π1</b> Μεταβολές εκπομπών σε επιβατικά οχήματα από ανακύκλωση χαρτιού.....	35
<b>Διάγραμμα Π2</b> Μεταβολές εκπομπών σε γαλόνια βενζίνης από ανακύκλωση χαρτιού .....	35
<b>Διάγραμμα Π3</b> Μεταβολές εκπομπών σε φιάλες προπάνιου από ανακύκλωση χαρτιού .....	36
<b>Διάγραμμα Π4</b> Μεταβολές εκπομπών σε επιβατικά οχήματα από ανακύκλωση πλαστικών ..	36
<b>Διάγραμμα Π5</b> Μεταβολές εκπομπών σε γαλόνια βενζίνης από ανακύκλωση πλαστικών .....	37
<b>Διάγραμμα Π6</b> Μεταβολές εκπομπών σε φιάλες προπάνιου από ανακύκλωση πλαστικών.....	37
<b>Διάγραμμα Π7</b> Μεταβολές εκπομπών σε επιβατικά οχήματα από ανακύκλωση ελαστικών ..	38
<b>Διάγραμμα Π8</b> Μεταβολές εκπομπών σε γαλόνια βενζίνης από ανακύκλωση ελαστικών .....	38
<b>Διάγραμμα Π9</b> Μεταβολές εκπομπών σε φιάλες προπάνιου από ανακύκλωση ελαστικών .....	39
<b>Διάγραμμα Π10</b> Μεταβολές εκπομπών σε επιβατικά οχήματα από ανακύκλωση αλουμινίου .....	39
<b>Διάγραμμα Π11</b> Μεταβολές εκπομπών σε γαλόνια βενζίνης από ανακύκλωση αλουμινίου....	40
<b>Διάγραμμα Π12</b> Μεταβολές εκπομπών σε φιάλες προπάνιου από ανακύκλωση αλουμινίου ..	40
<b>Διάγραμμα Π13</b> Μεταβολές εκπομπών σε επιβατικά οχήματα από ανακύκλωση μεικτών μετάλλων .....	41
<b>Διάγραμμα Π14</b> Μεταβολές εκπομπών σε γαλόνια βενζίνης από ανακύκλωση μεικτών μετάλλων .....	41

<b>Διάγραμμα Π15</b> Μεταβολές εκπομπών σε φιάλες προπάνιου από ανακύκλωση μεικτών μετάλλων .....	42
<b>Διάγραμμα Π16</b> Μεταβολές εκπομπών σε επιβατικά οχήματα από ανακύκλωση γυαλιού .....	42
<b>Διάγραμμα Π17</b> Μεταβολές εκπομπών σε γαλόνια βενζίνης από ανακύκλωση γυαλιού .....	43
<b>Διάγραμμα Π18</b> Μεταβολές εκπομπών σε φιάλες προπάνιου από ανακύκλωση γυαλιού .....	43
<b>Διάγραμμα Π19</b> Μεταβολές εκπομπών σε επιβατικά οχήματα από κομποστοποίηση βιολογικών αποβλήτων .....	44
<b>Διάγραμμα Π20</b> Μεταβολές εκπομπών σε γαλόνια βενζίνης από κομποστοποίηση βιολογικών αποβλήτων .....	44
<b>Διάγραμμα Π21</b> Μεταβολές εκπομπών σε φιάλες προπάνιου από κομποστοποίηση βιολογικών αποβλήτων .....	45
<b>Διάγραμμα Π22</b> Μεταβολές εκπομπών σε επιβατικά οχήματα από ανακύκλωση μεικτών ηλεκτρονικών αποβλήτων .....	45
<b>Διάγραμμα Π23</b> Μεταβολές εκπομπών σε γαλόνια βενζίνης από ανακύκλωση μεικτών ηλεκτρονικών αποβλήτων .....	46
<b>Διάγραμμα Π24</b> Μεταβολές εκπομπών σε φιάλες προπάνιου από ανακύκλωση μεικτών ηλεκτρονικών αποβλήτων .....	46



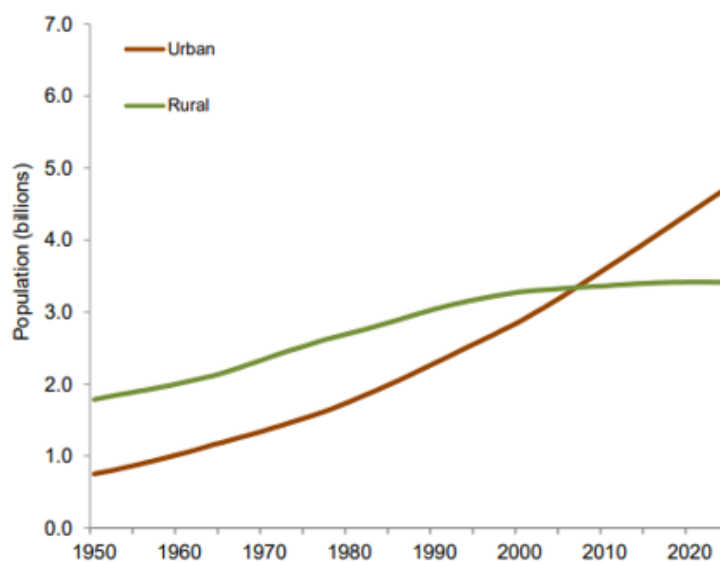
## Ευρετήριο Εικόνων

<b>Εικόνα Π1</b> Το WARM στο περιβάλλον του Microsoft Excel.....	47
<b>Εικόνα Π2</b> Δήλωση μεταβλητής για εκπομπές που σχετίζονται με τον ηλεκτρισμό .....	47
<b>Εικόνα Π3</b> Επιλογές μορφής υλικών για μείωση πηγής .....	48
<b>Εικόνα Π4</b> Δήλωση μεταβλητής για σύστημα ελέγχου αερίων χώρου υγειονομικής ταφής (LFG).....	48
<b>Εικόνα Π5</b> Δήλωση μεταβλητής για ανάκτηση αερίων .....	48
<b>Εικόνα Π6</b> Επιλογές απόδοσης για τη συλλογή αερίων .....	48
<b>Εικόνα Π7</b> Επιλογές για την κατάσταση υγρασίας του χώρου υγειονομικής ταφής.....	49
<b>Εικόνα Π8</b> Επιλογές για το είδος της αναερόβιας χώνευσης .....	49
<b>Εικόνα Π9</b> Επιλογές σχετικά με το προϊόν της αναερόβιας χώνευσης .....	49
<b>Εικόνα Π10</b> Δήλωση μεταβλητής σχετικά με τις αποστάσεις μετακίνησης των απορριμμάτων .....	49
<b>Εικόνα Π11</b> Αποτελέσματα υπολογισμών και ισοδύναμα εξοικονόμησης .....	50

## Κεφάλαιο 1

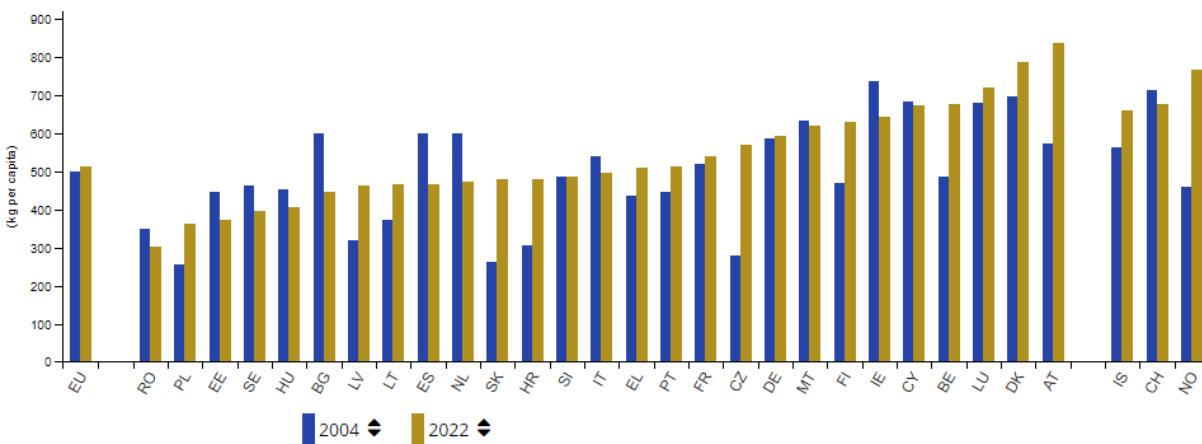
### Εισαγωγή

Κατά τις τελευταίες δεκαετίες, γίνεται όλο και πιο αντιληπτό το φαινόμενο της αύξησης των πληθυσμών και της συγκέντρωσης κατοίκων σε μεγαλουπόλεις. Η αλλαγή στους πληθυσμούς, σε συνδυασμό με παράγοντες όπως η επέκταση των αγορών και η υπερκατανάλωση που χαρακτηρίζουν τη σημερινή εποχή, φαίνεται να προκαλεί αυξημένη παραγωγή και συσσώρευση των αποβλήτων στις πόλεις. Το φλέγον αυτό θέμα αναπαρίσταται στα Διαγράμματα 1 και 2, τα οποία απεικονίζουν την διαχρονική αύξηση των αστικών πληθυσμών και την παραγωγή των ανάλογων ρύπων εντός των Ευρωπαϊκών συνόρων.



**Διάγραμμα 1.** Αστικοί (κόκκινο) και αγροτικοί (πράσινο) πληθυσμοί του κόσμου, 1950-2050 (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, 2018)

Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 1, από το 1950 έως το 2020, οι αστικοί πληθυσμοί έχουν πεναπλασιαστεί, ενώ στην ίδια χρονική διάρκεια, οι αγροτικοί πληθυσμοί έχουν αυξηθεί μόλις 50%. Σύμφωνα με τις προβλέψεις ειδικών (United Nations, Department of Economic and Social Affairs), παρόμοιες τάσεις για τα δύο είδη πληθυσμών θα συνεχιστούν και στο μέλλον, με τις διαφορές να είναι όλο και μεγαλύτερες.



**Διάγραμμα 2.** Παραγωγή αστικών αποβλήτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση, 2004 και 2022 (Eurostat, 2024)

Παρόλο που αρκετές χώρες έχουν καταφέρει να ελαττώσουν την ετήσια παραγωγή αποβλήτων στις πόλεις τους από το 2004 έως το 2022, στο ίδιο διάστημα η πλειοψηφία φαίνεται να παράγει όμοιες ή σημαντικά μεγαλύτερες ποσότητες απορριμμάτων. Ως εκ τούτου, το μοντέλο της παραδοσιακής διαχείρισης αστικών στερεών αποβλήτων, το οποίο αξιοποιεί κυρίως μεθόδους υγειονομικής ταφής και καύσης, γίνεται όλο και πιο μη βιώσιμο, με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του να αυξάνονται. Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει ήδη αρχίσει τις προσπάθειες απομάκρυνσης από τους παραδοσιακούς τρόπους διαχείρισης απορριμμάτων, με αποτέλεσμα να υπάρχει σήμερα αυξημένο ενδιαφέρον για την εφαρμογή εναλλακτικών μεθόδων, όπως αυτών της ανακύκλωσης και της κομποστοποίησης, οι οποίες μπορούν να μειώσουν τον όγκο των αποβλήτων και να προσφέρουν περιβαλλοντικά και ενεργειακά οφέλη. Ενδεικτικά αναφέρονται: η μείωση κατανάλωσης φυσικών πόρων, ο περιορισμός της αλλοίωσης του τοπίου και των οικοσυστημάτων, η ενίσχυση της οικονομικής ανάπτυξης και η παραγωγή πιο ανθεκτικών και καινοτόμων προϊόντων.

Δρώντας παράλληλα με το επίκαιρο πρόβλημα υπό συζήτηση, η διπλωματική αυτή εργασία έχει ως σκοπό την παρουσίαση μιας ποσοτικής αξιολόγησης για τις ετήσιες μειώσεις εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, οι οποίες θα μπορούσαν να προκληθούν από διάφορους συνδυασμούς εναλλακτικής διαχείρισης αστικών στερεών αποβλήτων. Οι υπολογισμοί που αφορούν τις εξοικονομήσεις εκπομπών πραγματοποιήθηκαν μέσω του υπολογιστικού μοντέλου WARM, το οποίο έχει τη δυνατότητα να εκφράσει τα σχετικά αποτελέσματα σε μονάδες μέτρησης που είναι ευρέως κατανοητές, όπως τα επιβατικά οχήματα και τα βαρέλια βενζίνης. Η μελέτη εστιάζει τόσο στις ποσότητες απορριμμάτων που ανακυκλώνονται, όσο και στα υλικά, τα οποία απαρτίζουν τις ποσότητες αυτές. Τα είδη απορριμμάτων για τα οποία αντλήθηκαν δεδομένα είναι το χαρτί, τα πλαστικά, τα ελαστικά, το αλουμίνιο, τα μεικτά ή άλλα μέταλλα, το γυαλί, τα βιολογικά απόβλητα και τα μεικτά ηλεκτρονικά απόβλητα. Όλα τα δεδομένα που αναφέρθηκαν ισχύουν για τα έτη 2022 και 2023 και αποτελούν μια ευγενική χορηγία από το τμήμα Υπηρεσίας Περιβάλλοντος του Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών.

## Κεφάλαιο 2

### Μεθοδολογία και Υπολογισμοί

Για την εξασφάλιση της μέγιστης δυνατής αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων, λήφθηκαν αρχικά τα πιο πρόσφατα δεδομένα για τα παραγόμενα απόβλητα του Αερολιμένα Αθηνών κατά τα έτη 2022 και 2023. Με αυτόν τον τρόπο, η μελέτη αποφεύγει την επίδραση εξωγενών παραγόντων, όπως το μεγαλύτερο μέρος της πανδημίας COVID-19, και παρέχει αποτελέσματα τα οποία πλησιάζουν όσο το δυνατό περισσότερο τις τρέχουσες συνθήκες. Επιπλέον, η ανάλυση δεδομένων από πολλαπλά έτη προσφέρει τη δυνατότητα σύγκρισης και εξαγωγής συμπερασμάτων, μειώνοντας τον κίνδυνο σφαλμάτων που μπορεί να προκύψουν από μεμονωμένα γεγονότα ή ιδιαιτερότητες που ενδέχεται να χαρακτηρίζουν μία συγκεκριμένη χρονιά.

Αφού τα δεδομένα συλλέχθηκαν με επιτυχία (Δρ. Κάβουρας Χ., 2024), αυτά οργανώθηκαν σε φύλλα εργασίας Excel, βάσει της χρησιμότητάς τους, ώστε να μπορούν να οριστούν ως παράμετροι στο υπολογιστικό μοντέλο WARM (ακρωνύμιο για Waste Reduction Model) (βλ. Παράρτημα 3). Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται τα σχετικά δεδομένα.

Πίνακας 1. Δεδομένα προς ανάλυση

Ανακυκλώσιμα Απορρίμματα (τόνοι)	Έτος		Ποσοστιαία Διαφορά
	2022	2023	
Χαρτί	1851	1955,74	5,66%
Πλαστικά	1869	2179,15	16,59%
Ελαστικά	12	9,12	-24,00%
Αλουμίνιο	19	19,64	3,37%
Άλλα Μέταλλα	874	574,66	-34,25%
Γυαλί	245	291,71	19,07%
Βιολογικά Απόβλητα	477	651,07	36,49%
Μεικτά Ηλεκτρονικά Απόβλητα	91	107,3	17,91%
Σύνολο	5438	5788,39	-

Το μοντέλο WARM, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση των παραπάνω στοιχείων, είναι ένα εργαλείο που αναπτύχθηκε από την Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Πολιτειών (US EPA) και προσφέρει υψηλού επιπέδου συγκριτικές εκτιμήσεις για τις ενδεχόμενες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG), την εξοικονόμηση ενέργειας και τις οικονομικές συνέπειες που σχετίζονται με τη διαχείριση υλικών, εξίσου σε παραδοσιακές και εναλλακτικές πρακτικές. Αυτές οι πρακτικές περιλαμβάνουν τη μείωση των απορριμμάτων στην πηγή, την ανακύκλωση, την κομποστοποίηση, την αναερόβια χώνευση, την καύση και την ταφή σε χώρους υγειονομικής ταφής.

Για τους σκοπούς της εργασίας, αναφέρονται συνοπτικά οι μεθοδολογίες που ακολούθησε Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Πολιτειών για να υπολογίσει τους συντελεστές ανακύκλωσης και κομποστοποίησης, οι οποίοι οδηγούν στην διεξαγωγή

αποτελεσμάτων. Όσον αφορά την ανακύκλωση, το WARM αξιοποιεί δεδομένα για τις εκπομπές αερίων που σχετίζονται με τη διαχείριση υλικών, από τη στιγμή που συλλέγεται το κάθε υλικό μέχρι τη μετατροπή του σε ένα νέο προϊόν προς χρήση. Στη διαδικασία αυτή λαμβάνονται υπόψη οι εκπομπές που προκύπτουν κατά τη συλλογή, τη μεταφορά, την επεξεργασία και την τελική ανακύκλωση του υλικού σε ένα καινούργιο προϊόν. Αναφορικά με την κομποστοποίηση, το WARM χρησιμοποιεί καταγεγραμμένα δεδομένα για όλα τα στάδια της διαδικασίας κομποστοποίησης που ενδέχεται να επηρεάσουν τη ροή εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Τα κυριότερα από αυτά τα στάδια είναι: η συλλογή και μεταφορά των οργανικών υλικών προς τον κεντρικό χώρο κομποστοποίησης, η μηχανική ανάδευση του σωρού κομποστοποίησης μέσω μηχανικής διαδικασίας και η αποθήκευση άνθρακα μετά την εφαρμογή του λιπάσματος στο έδαφος (U.S Environmental Protection Agency Office of Resource Conservation and Recovery, 2023). Περισσότερες πληροφορίες για το πως συλλέχθηκαν και οργανώθηκαν τα προαναφερόμενα δεδομένα μπορούν να βρεθούν στα έγγραφα «Background Chapters» και «Management Practices Chapters», τα οποία περιλαμβάνεται στη βιβλιογραφία.

Το WARM κυκλοφορεί ως αυτούσιο πρόγραμμα και ως λογιστικό φύλλο Excel. Για την παρούσα διπλωματική εργασία έγινε χρήση της Excel μορφής του μοντέλου, στην πιο πρόσφατη έκδοση της μέχρι στιγμής (έκδοση 16). Η μορφή αυτή αποτελεί ένα αρκετά χρήσιμο, αλλά και εύχρηστο εργαλείο, το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί από άτομα ποικίλου επιπέδου εμπειρίας και γνώσεων, καθώς τα αποτελέσματα που παράγονται από το μοντέλο WARM είναι άμεσα συγκρίσιμα με μονάδες μέτρησης που μπορεί να συναντήσει κάποιος άνθρωπος στην καθημερινή ζωή. Για παράδειγμα, στο πλαίσιο αυτής της εργασίας, η πιθανή μείωση σε εκπομπές αερίων υπολογίστηκε σε ισοδύναμα εξοικονόμησης μετρικών τόνων διοξειδίου του άνθρακα (MTCO<sub>2</sub>E), επιβατικών οχημάτων, γαλονιών βενζίνης και φιαλών προπάνιου. Το ισοδύναμο σε γαλόνια βενζίνης είναι αρκετά σημαντικό, καθώς η πληροφορία που προσφέρει σχετίζεται και με ενεργειακές ωφέλειες. Αυτό γιατί η συγκεκριμένη ισοδυναμία ενέργειας εκφράζει ποσότητες καυσίμων, των οποίων η χρήση θα μπορούσε να αποφευχθεί, εφαρμόζοντας κάποιο από τα εναλλακτικά σενάρια που αναλύονται παρακάτω.

Ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιήθηκαν οι υπολογισμοί του WARM για αυτή την εργασία προϋποθέτει τη σύγκριση τιμών ανάμεσα σε ένα αρχικό σενάριο και σε ένα εναλλακτικό σενάριο. Στο αρχικό σενάριο, όλη η ποσότητα των αποβλήτων οδηγείται σε υγειονομική ταφή, ενώ στο εναλλακτικό σενάριο, ο αναλυτής ορίζει διαφορετικά ποσοστά αποβλήτων, τα οποία μπορούν να δεχτούν ποικίλους τρόπους διαχείρισης. Έτσι, κάθε μία από τις τιμές που εμπεριέχονται στον Πίνακα 1 εισήχθη στο λογιστικό φύλλο του WARM και τροποποιήθηκε κατάλληλα ώστε να μελετηθούν πέντε τελικά σενάρια. Πρόκειται για τρία ρεαλιστικά σενάρια που μπορούν να εφαρμοστούν με βάση τα σημερινά δεδομένα και για δύο σενάρια «υπέρβασης», τα οποία, αν και είναι δύσκολα υλοποιήσιμα, συμπεριλαμβάνονται στην μελέτη για λόγους επιστημονικού ενδιαφέροντος και πρόβλεψης.

- Ποσότητα 20% προς ανακύκλωση ή κομποστοποίηση
  - Ποσότητα 40% προς ανακύκλωση ή κομποστοποίηση
  - Ποσότητα 60% προς ανακύκλωση ή κομποστοποίηση
- ρεαλιστικά σενάρια

- Ποσότητα 80% προς ανακύκλωση ή κομποστοποίηση
  - Ποσότητα 100% προς ανακύκλωση ή κομποστοποίηση
- } σενάρια «υπέρβασης»

Σημειώνεται ότι, λόγω έλλειψης πραγματικών στοιχείων ως προς τις αποστάσεις μεταξύ αεροδρομίου και χώρων υγειονομικής ταφής, ανακύκλωσης και κομποστοποίησης, οι αντίστοιχες μεταβλητές απόστασης του μοντέλου ορίστηκαν σύμφωνα με τις πρότυπες τιμές που παρέχονται, οι οποίες είναι περίπου 32 χιλιόμετρα προς όλες τις αντίστοιχες κατευθύνσεις.

Παρακάτω δίνεται ενδεικτικά ο Πίνακας 2, στον οποίο παρατίθενται τα αποτελέσματα εξοικονόμησης του WARM, σχετικά με την εναλλακτική διαχείριση του συνδυασμού απορριμμάτων που περιγράφουν τα δεδομένα της εργασίας. Η μέγιστη μείωση σε εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, όσον αφορά τα ρεαλιστικά σενάρια, προσεγγίζει συνολικά τους 7.500 μετρικούς τόνους διοξειδίου του άνθρακα (MTCO<sub>2</sub>E) και για τα δύο έτη.

**Πίνακας 2.** Αποτελέσματα εξοικονόμησης συνολικού συνδυασμού σε MTCO<sub>2</sub>E

Εξοικονόμηση σε MTCO <sub>2</sub> E	Σενάρια ανακύκλωσης/κομποστοποίησης				
	20%	40%	60%	80%	100%
Έτος					
<b>2022</b>	2.559,43	5.118,86	7.678,29	10.237,71	12.797,14
<b>2023</b>	2.446,60	4.893,19	7.339,79	9.786,38	12.232,98

Με παρεμφερή τρόπο προέκυψαν αντίστοιχα αποτελέσματα για την εξοικονόμηση που προσφέρει η εναλλακτική διαχείριση κάθε είδους απορρίμματος ξεχωριστά. Τα αποτελέσματα αυτά καταγράφονται λεπτομερώς στο Παράρτημα 1, το οποίο περιέχει πίνακες για όλα τα ισοδύναμα εξοικονόμησης. Η απόρροια της διαδικασίας που περιεγράφηκε έως τώρα αποτυπώνεται στα διαγράμματα που παρουσιάζονται και συζητούνται στο Κεφάλαιο 3. Τα εν λόγω διαγράμματα βοηθούν, τόσο τον μελετητή, όσο και κάθε πιθανό αναγνώστη της εργασίας, ώστε να διαμορφώσει εύκολα μια εικόνα, η οποία συνδέει τις πληροφορίες που προέρχονται από την ανάλυση του WARM.

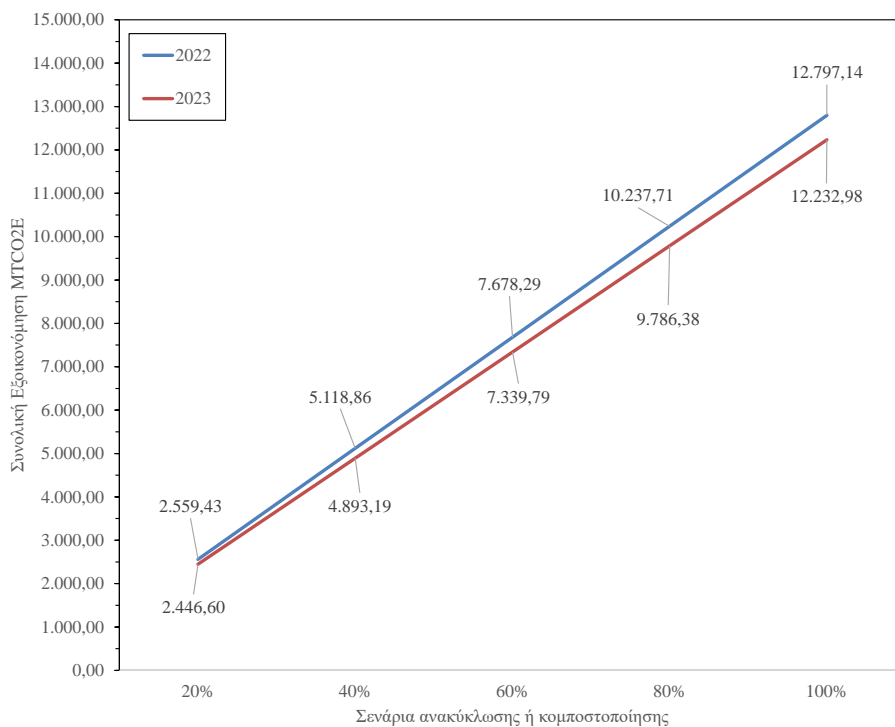
Τέλος, με το πέρας της παρουσίασης των διαγραμμάτων, έγινε μια επιπρόσθετη αναφορά στη μείωση εκπομπών που μπορεί να επιτευχθεί ανά τόνο ανακύκλωσης/κομποστοποίησης κάθε υλικού. Η έμφαση αυτή θέτει στο επίκεντρο της προσοχής την αποδοτικότητα κάθε είδους αποβλήτου, με σκοπό να σχηματιστεί μια σφαιρική γνώση γύρω από τα όρια, στα οποία κυμαίνεται αυτή εργασία. Έτσι, παρέχονται κάποια επιπλέον στοιχεία, τα οποία καλύπτουν την περίπτωση που ο αρχικός συνδυασμός των παραγόμενων απορριμμάτων ήταν διαφορετικός.

## Κεφάλαιο 3

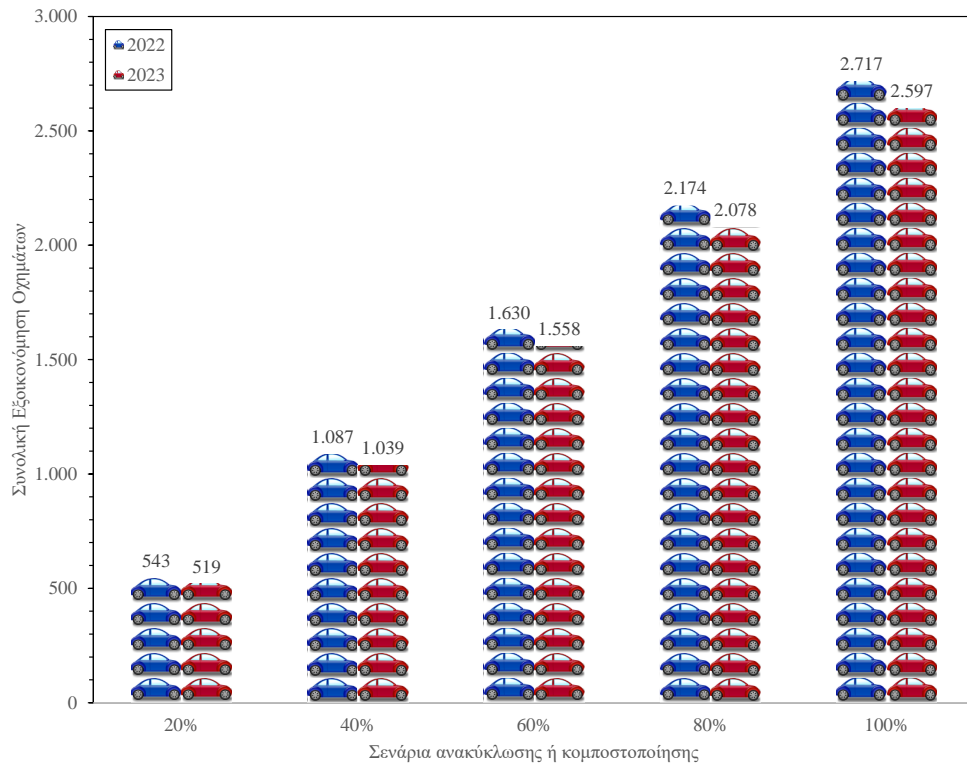
### Ανάλυση Αποτελεσμάτων

#### 3.1. Εκτίμηση Περιβαλλοντικών Ωφελειών

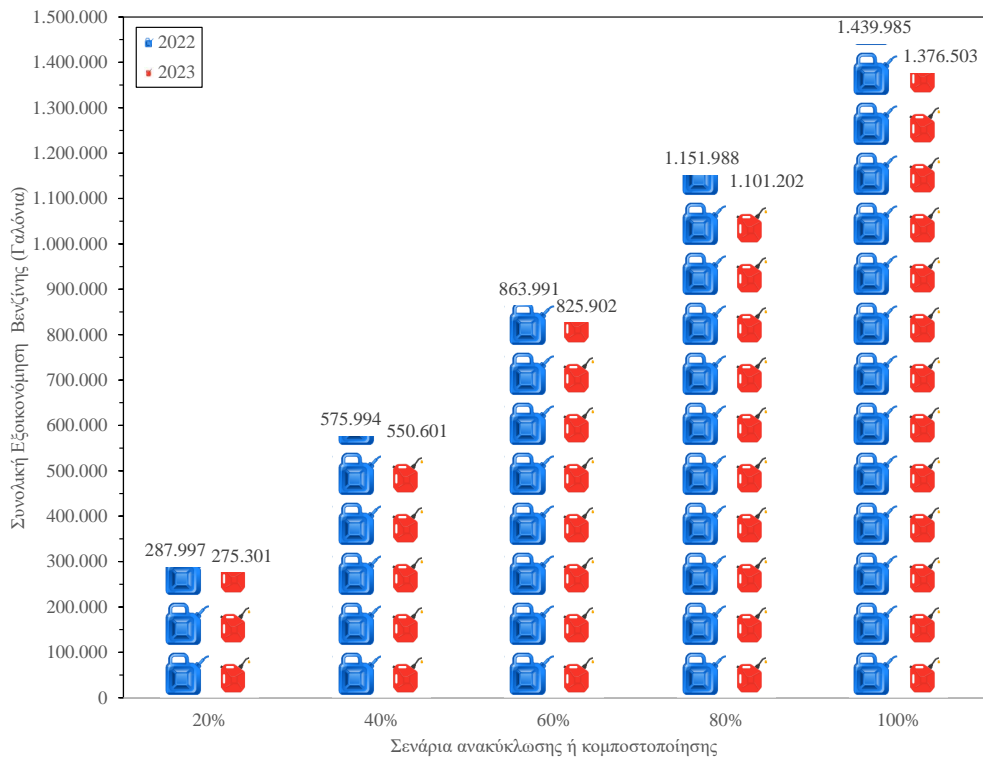
Χρησιμοποιώντας τις τελικές τιμές από τους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν μέσω του WARM, δημιουργήθηκαν τέσσερα είδη διαγραμμάτων, τα οποία περιγράφουν την θεωρητική μείωση στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, σε σχέση με το ποσοστό ανακύκλωσης ή κομποστοποίησης που ορίστηκε για εκάστοτε σενάριο. Τα Διαγράμματα 3 - 6 αναπαριστούν τις εξοικονομήσεις που σχετίζονται με τον συνδυασμό όλων των ειδών απορριμμάτων, στα ισοδύναμα που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 2.



**Διάγραμμα 3.** Συνδυαστική μείωση εκπομπών αερίων σε MTCO2E

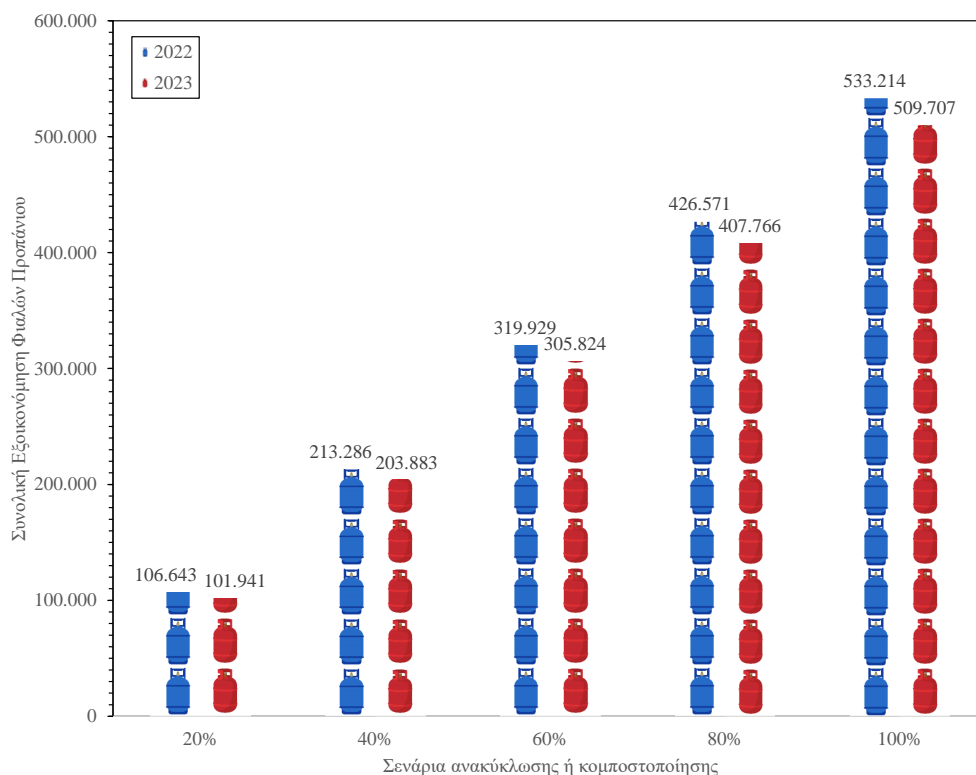


**Διάγραμμα 4.** Συνδυαστική μείωση εκπομπών αερίων σε επιβατικά οχήματα



**Διάγραμμα 5.** Συνδυαστική μείωση εκπομπών αερίων σε γαλόνια βενζίνης

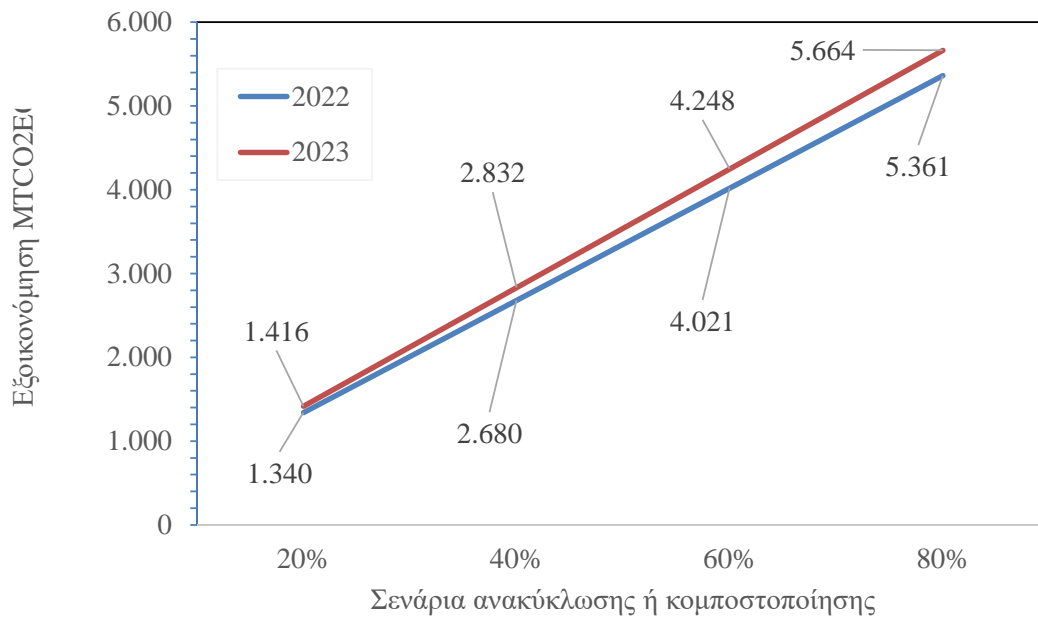




**Διάγραμμα 6.** Συνδυαστική μείωση εκπομπών αερίων σε φιάλες προπάνιου

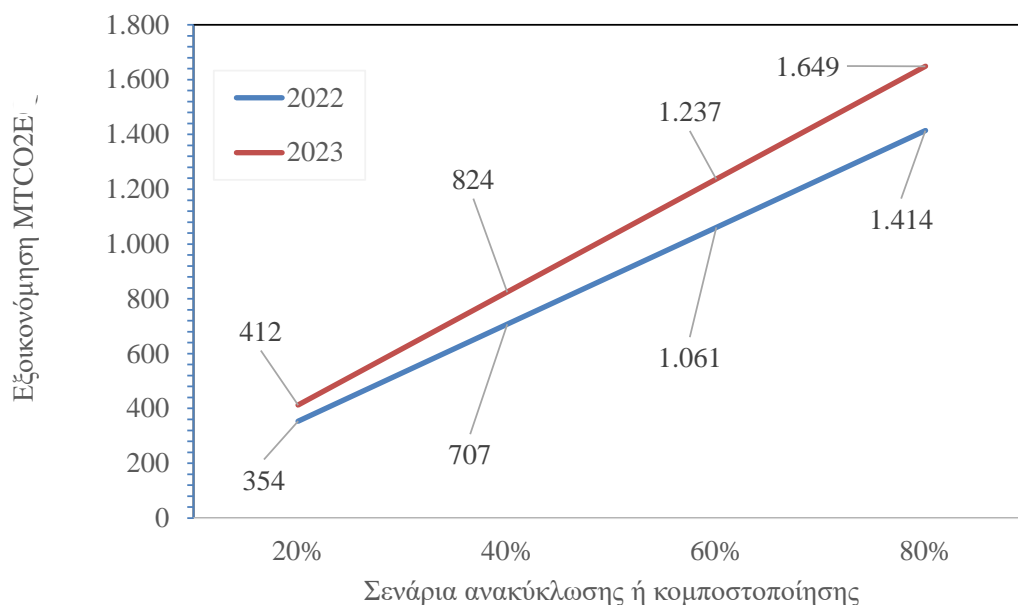
Τα Διαγράμματα 3 – 6 δείχνουν ότι οι 7.500 μετρικοί τόνοι διοξειδίου του άνθρακα, οι οποίοι αναφέρθηκαν πριν, ισοδυναμούν με την αφαίρεση ετήσιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από περίπου 1.600 επιβατικά οχήματα, 850.000 γαλόνια βενζίνης ή 310.000 φιάλες προπάνιου. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα για τα δύο έτη, οι πιθανές εξοικονομήσεις κάθε σεναρίου φαίνεται να είναι παρόμοιες, με τις τιμές που αντιστοιχούν στο έτος 2022 να είναι ελαφρώς υψηλότερες. Η διαφορά αυτή προκαλεί ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς το έτος 2023 παράχθηκαν συνολικά περίπου 350 τόνοι απορριμμάτων παραπάνω (βλ. Πίνακα 2), των οποίων η εναλλακτική διαχείριση θα έπρεπε να οδηγήσει, με μια πρόχειρη σκέψη, σε μεγαλύτερες μειώσεις εκπομπών. Προφανώς, εφόσον δεν ισχύει το προαναφερθέν, γίνεται κατανοητό ότι, πέρα από τις συνολικές ποσότητες των στερεών αποβλήτων, σημαντικό ρόλο θα πρέπει να παίζει και η σύσταση του συνδυασμού των παραγόμενων απορριμμάτων, με κάποια υλικά να προσφέρουν περισσότερη εξοικονόμηση από κάποια άλλα. Η υπόθεση αυτή εμφανίζεται ξανά στη συνέχεια της μελέτης και αναλύεται περαιτέρω στην Ενότητα 3.2.

Μία ακόμη παρατήρηση σχετικά με τα παραπάνω διαγράμματα είναι πως κάθε εξοικονόμηση προκύπτει ανάλογη με την αύξηση του ποσοστού ανακύκλωσης/κομποστοποίησης, κάτι το οποίο συνάδει, αυτή τη φορά, με το αναμενόμενο αποτέλεσμα. Όμοιες σχέσεις ισχύουν και για κάθε υλικό ξεχωριστά, με τις αντίστοιχες μειώσεις εκπομπών να φαίνονται στα Διαγράμματα 7 – 14, γεγονός που επαληθεύει την αξιοπιστία τόσο της υπολογιστικής διαδικασίας, όσο και των αποτελεσμάτων που απορρέουν από αυτήν.



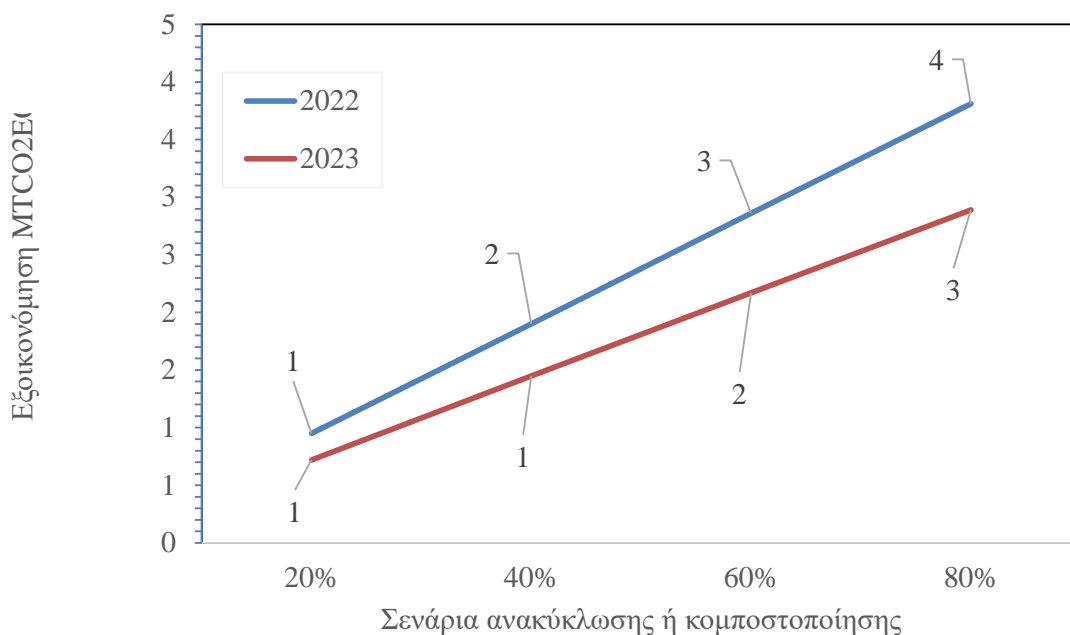
**Διάγραμμα 7.** Μεταβολές εκπομπών MTCE για ανακύκλωση χαρτιού

Απομονώνοντας το χαρτί, η ανακύκλωση του φαίνεται να έχει αρκετά καλή επίδραση, όταν συγκρίνεται με τα υπόλοιπα είδη απορριμμάτων που ακολουθούν. Στα ρεαλιστικά σενάρια 20 – 60% ποσότητας προς ανακύκλωση, οι δυνατές αφαιρέσεις σε εκπομπές αερίων κυμαίνονται από περίπου 1.400 έως 4.100 μετρικούς τόνους διοξειδίου του άνθρακα. Οι ετήσιες εξοικονομήσεις, επίσης, φαίνεται να μην είναι σύμφωνες με αυτές που προσφέρει ο συνδυασμός απορριμμάτων του Διαγράμματος 3, αφού το χαρτί από μόνο του προσέφερε μεγαλύτερες μειώσεις εκπομπών το 2023.



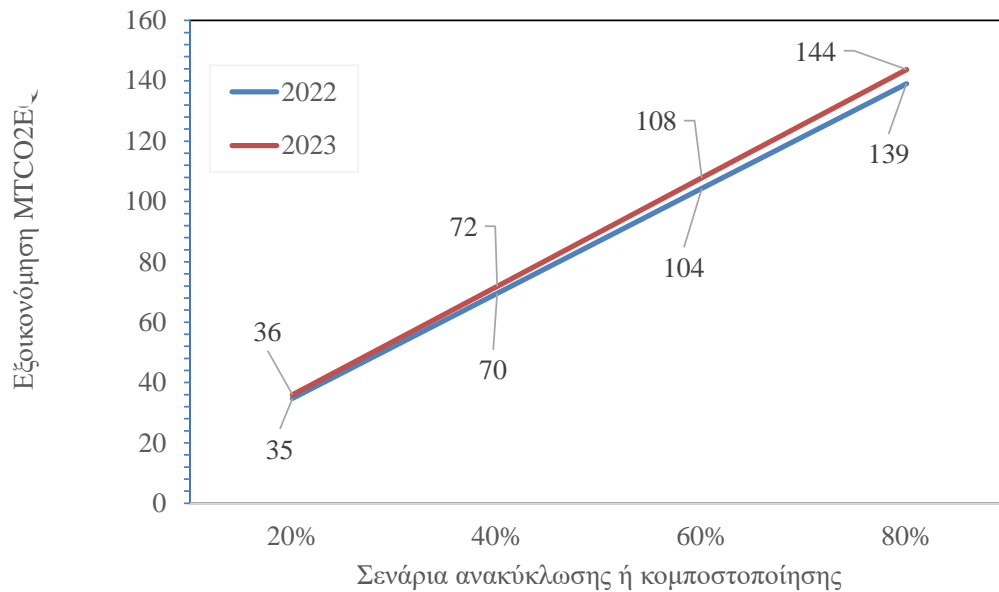
**Διάγραμμα 8.** Μεταβολές εκπομπών MTCE για ανακύκλωση πλαστικών

Όμοια με το χαρτί, οι ετήσιες εξοικονομήσεις που θα μπορούσαν να προσφέρουν τα πλαστικά είναι μεγαλύτερες το έτος 2023, με τις σχετικές τιμές των ρεαλιστικών σεναρίων να είναι περίπου 400 έως 1.100 μετρικοί τόνοι διοξειδίου του άνθρακα. Αν και η ανακύκλωση των πλαστικών προκαλεί μέρος των μεγαλύτερων αφαιρέσεων σε εκπομπές, αυτές είναι σχεδόν 3 φορές μικρότερες από αυτές που προέρχονται από την επεξεργασία του χαρτιού.



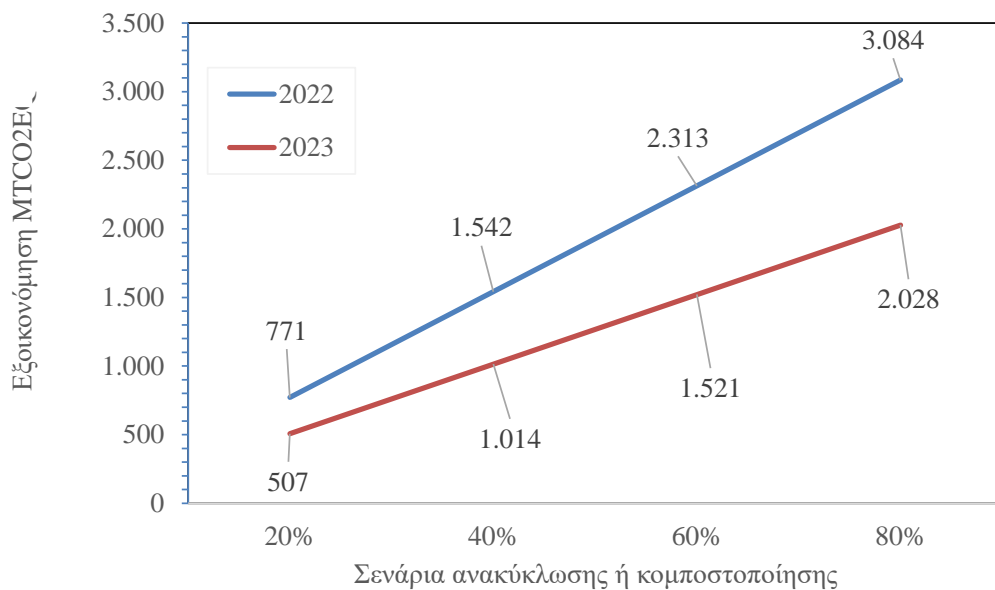
**Διάγραμμα 9.** Μεταβολές εκπομπών MTCO<sub>2</sub>E για ανακύκλωση ελαστικών

Η ανακύκλωση των ελαστικών, αναφορικά με τις ποσότητες απορριμμάτων που παράγει το αεροδρόμιο, ακολουθεί από τη μία πλευρά τις ετήσιες εξοικονομήσεις του Διαγράμματος 3, με αυτές να είναι μεγαλύτερες το 2022. Από την άλλη πλευρά, οι μεταβολές εκπομπών που αναλογούν στα ελαστικά είναι μηδαμινές, μη ξεπερνώντας τους 3 μετρικούς τόνους διοξειδίου του άνθρακα ετησίως. Αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί, εν μέρει, από το γεγονός ότι τα παραγόμενα στερεά απόβλητα ελαστικών είναι με διαφορά τα λιγότερα από την αρχική λίστα δεδομένων (βλ. Πίνακα 2) .



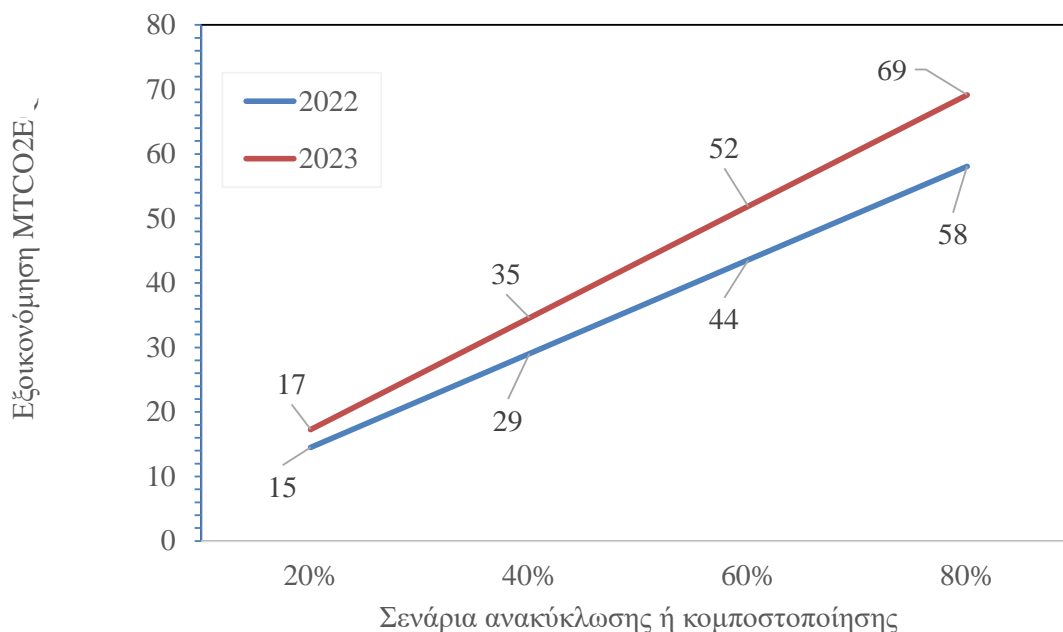
**Διάγραμμα 10.** Μεταβολές εκπομπών MTCO<sub>2</sub>E για ανακύκλωση αλουμινίου

Το Διάγραμμα 10 αφορά το αλουμίνιο, το οποίο ανήκει στην ομάδα υλικών που η ανακύκλωση τους οδηγεί στα μικρότερα ποσά αφαίρεσης εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Ειδικότερα, με βάση τα ποσά αποβλήτων αλουμινίου που παράχθηκαν κατά τη διάρκεια των δύο μελετώμενων ετών, ο αποφασίζοντας θα πρέπει να εκτιμά δυνατή μείωση εκπομπών από περίπου 35 έως 105 μετρικούς τόνους διοξειδίου το άνθρακα ετησίως, ανάλογα με την ποσότητα που επιλέγεται να ανακυκλωθεί.



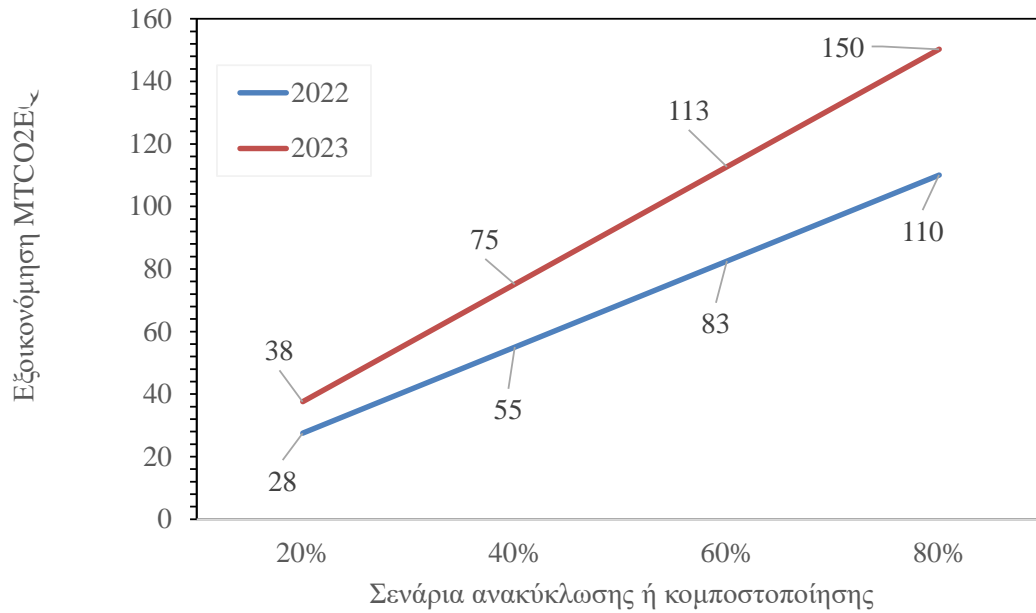
**Διάγραμμα 11.** Μεταβολές εκπομπών MTCO<sub>2</sub>E για ανακύκλωση μεικτών μετάλλων

Αναφορικά με τα μεικτά μέταλλα, παρατηρείται η μεγαλύτερη διαφορά στις πιθανές μεταβολές εκπομπών, ανάμεσα στα δύο έτη. Αυτό συμβαίνει λόγω της μειωμένης παραγωγής σχετικών αποβλήτων για το έτος 2023, η οποία διέφερε κατά 34,25% σε σχέση με το 2022. Μία ενδιάμεση τιμή ετήσιας μείωσης εκπομπών για το σενάριο ελάχιστης εξοικονόμησης (20% ανακύκλωση) είναι περίπου 650 μετρικοί τόνοι διοξειδίου του άνθρακα, ενώ, όσον αφορά τη μέγιστη ρεαλιστική εξοικονόμηση που θα μπορούσε να επιτευχθεί, η ενδιάμεση ετήσια τιμή είναι σχεδόν 1900 μετρικοί τόνοι διοξειδίου του άνθρακα.



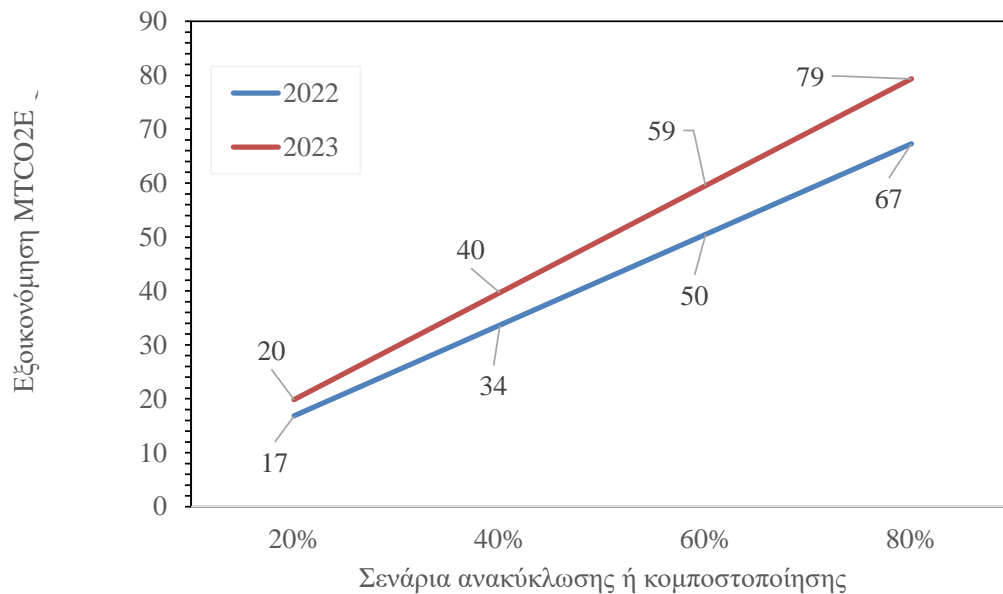
**Διάγραμμα 12.** Μεταβολές εκπομπών MTCO<sub>2</sub>E για ανακύκλωση γυαλιού

Το γυαλί είναι άλλο ένα είδος στερεού αποβλήτου που έχει σχετικά μικρή επίδραση στην αφαίρεση εκπομπών για τα δεδομένα της εργασίας. Μία εύστοχη παρατήρηση, ωστόσο, είναι ότι, παρόλο που το αεροδρόμιο παράγει απορρίμματα γυαλιού σε ποσότητα παραπάνω από τη διπλάσια συγκριτικά με αυτή του αλουμινίου, τα μεγέθη στις τιμές πιθανής εξοικονόμησης είναι όμοια. Αναλυτικότερα, η ελάχιστη δυνατή εξοικονόμηση που προσφέρουν τα ρεαλιστικά σενάρια ανακύκλωσης υπολογίζεται κοντά στους 16 μετρικούς τόνους διοξειδίου του άνθρακα, ενώ η μέγιστη στους 48.



**Διάγραμμα 13.** Μεταβολές εκπομπών  $\text{MTCE}$  για κομποστοποίηση βιολογικών αποβλήτων

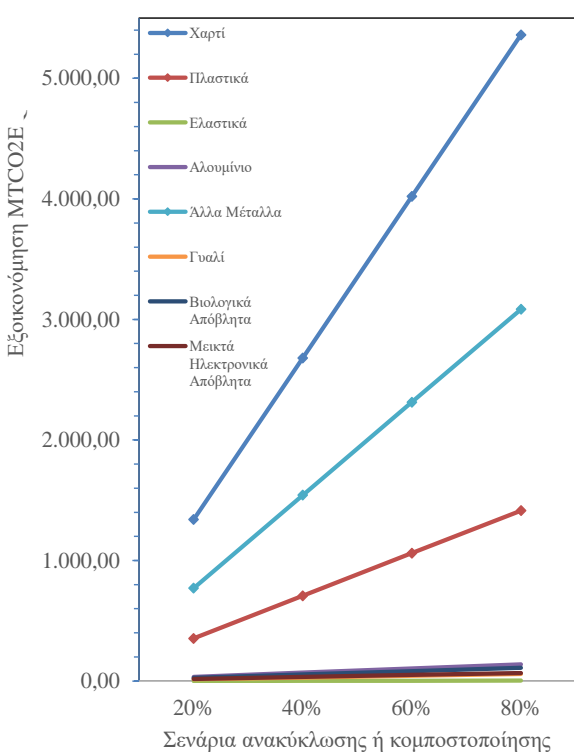
Η περίπτωση των βιολογικών αποβλήτων φαίνεται να είναι ίδια με αυτή του γυαλιού, καθώς παράγονται πολλαπλάσια ποσά σε σχέση με τα απορρίμματα αλουμινίου, αλλά τα μεγέθη πιθανής εξοικονόμησης παραμένουν όμοια μεταξύ των δύο ειδών στερεών αποβλήτων. Οι αφαιρέσεις στις ετήσιες εκπομπές αερίων που θα μπορούσαν να προσφέρουν τα βιολογικά απόβλητα είναι επίσης μεγαλύτερες το έτος 2023, με τις τιμές των σεναρίων 20% - 60% ανακυκλώσιμων όγκων να είναι περίπου 30 έως 90 μετρικοί τόνοι διοξειδίου του άνθρακα.



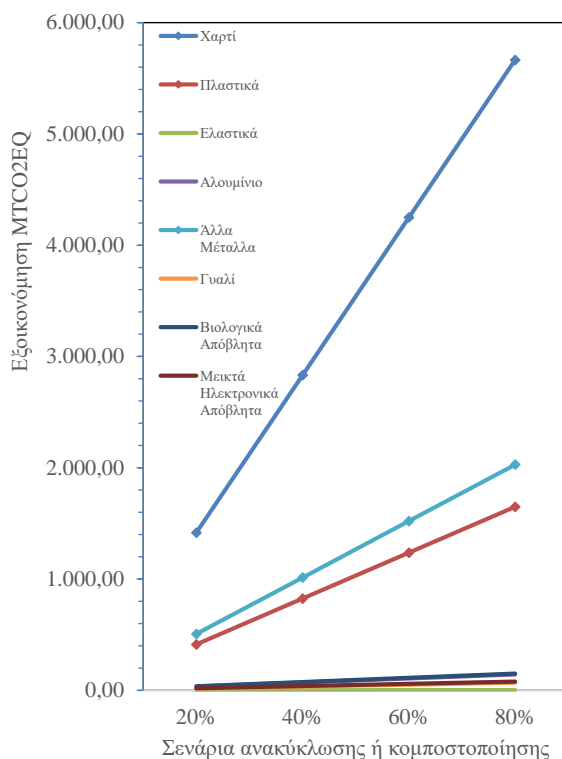
**Διάγραμμα 14.** Μεταβολές εκπομπών  $\text{MTCE}$  για ανακύκλωση μεικτών ηλεκτρονικών αποβλήτων

Η ανακύκλωση μεικτών ηλεκτρονικών αποβλήτων οδηγεί σε παρεμφερή αποτελέσματα με αυτά των βιολογικών αποβλήτων. Εν συντομία, , ανάλογα με το σενάριο ανακύκλωσης, η πιθανή ετήσια μείωση εκπομπών για αυτό το είδος απορρίμματος υπολογίστηκε από περίπου 38 έως 55 μετρικούς τόνους διοξειδίου το άνθρακα.

Σύμφωνα με τα Διαγράμματα 7 - 14, οι μεγαλύτερες μεταβολές σε εκπομπές  $MTCO_2E$  φαίνεται να προκαλούνται από την ανακύκλωση του χαρτιού, ενώ οι μικρότερες μεταβολές από την ανακύκλωση ελαστικών. Η αντίστοιχη αναλογία σε εξοικονόμηση ενέργειας για το σενάριο 60% δίνει περίπου 450.000 γαλόνια βενζίνης αναφορικά με το χαρτί και 260 γαλόνια βενζίνης για τα ελαστικά ετησίως (βλ. Παράρτημα 1). Προκειμένου να κατανοηθεί καλύτερα η κλίμακα μείωσης εκπομπών για κάθε υλικό, καθώς και για να αποκτηθεί μια σαφής συνολική εικόνα, δημιουργήθηκαν επίσης και οι ακόλουθες γραφικές παραστάσεις. Οι παραστάσεις αυτές παρουσιάζουν συγκεντρωτικά δεδομένα για όλα τα υλικά που εξετάστηκαν στα Διαγράμματα 7 – 14.

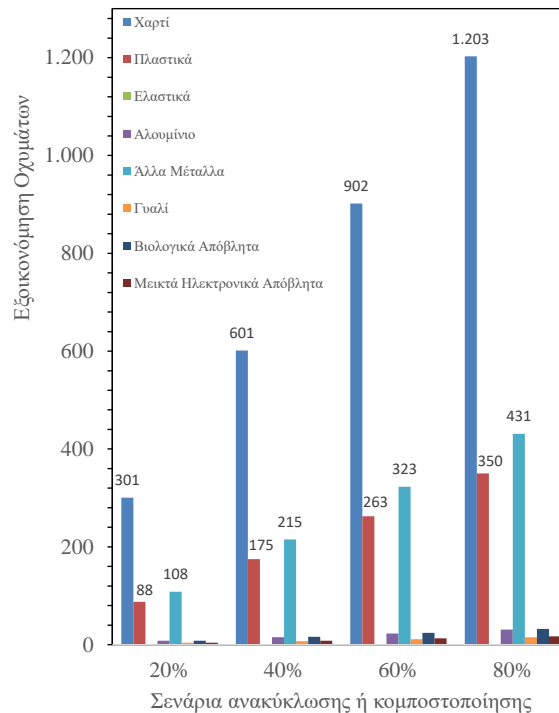
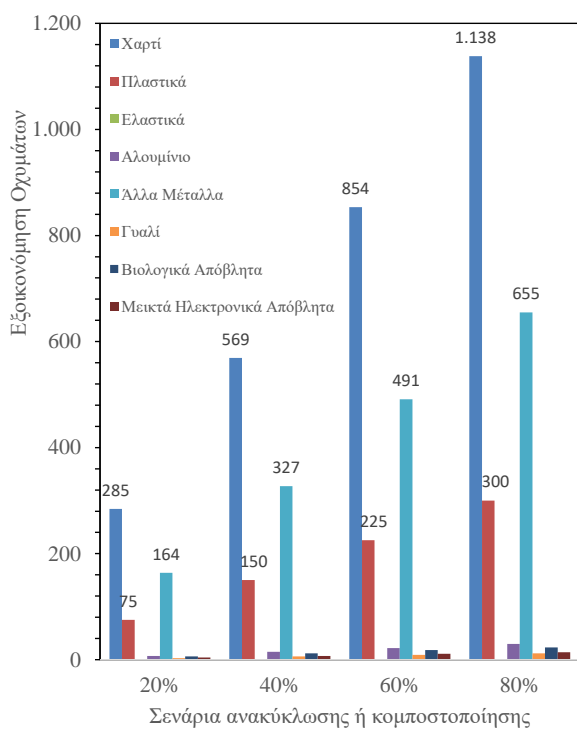


(α)

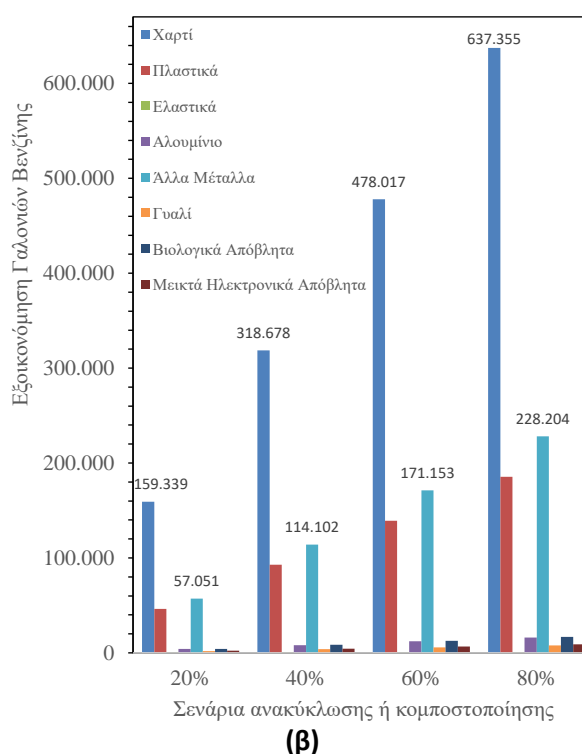
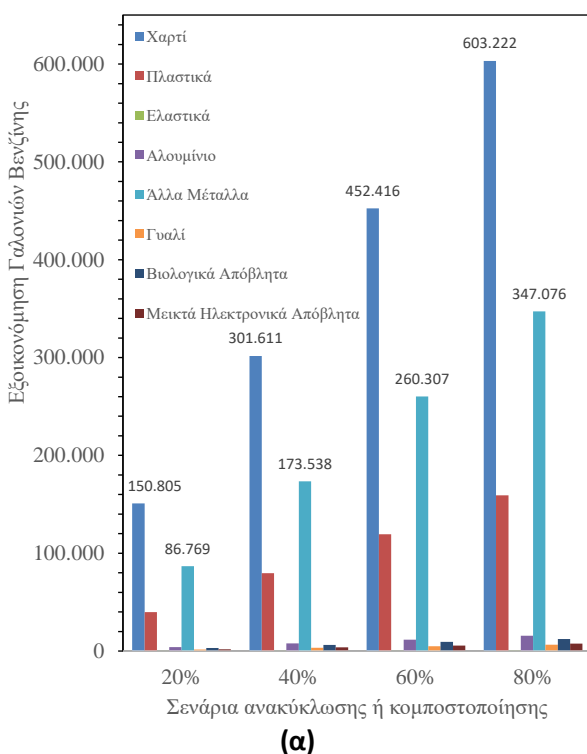


(β)

**Διάγραμμα 15.** Σύγκριση μεταβολών εκπομπών σε  $MTCO_2E$ : α. 2022, β. 2023

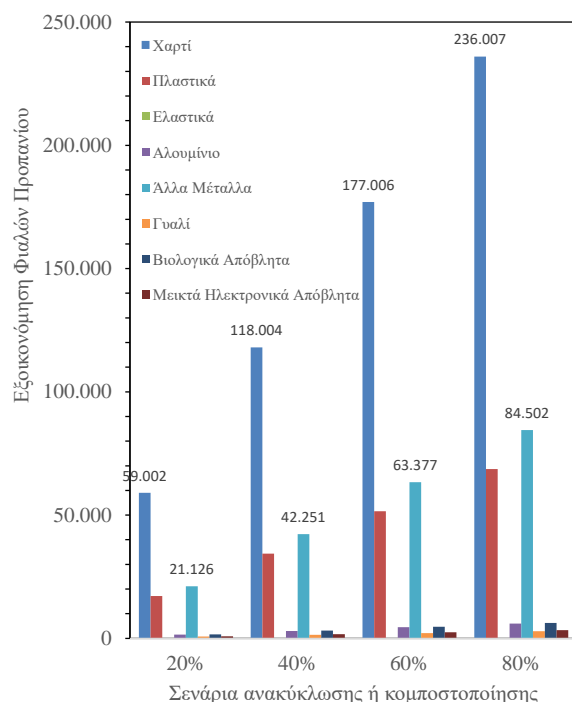
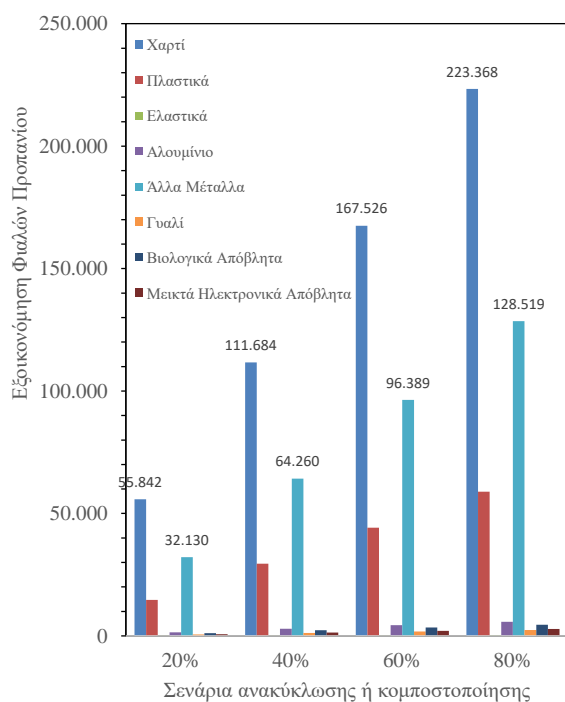


**(α)** **(β)**  
**Διάγραμμα 16.: Σύγκριση μεταβολών σε επιβατικά οχήματα: α. 2022, β. 2023**



**(α)** **(β)**  
**Διάγραμμα 17. Σύγκριση μεταβολών σε γαλόνια βενζίνης: α. 2022, β. 2023**





(α) (β)  
Διάγραμμα 18. Σύγκριση μεταβολών σε φιάλες προπάνιου: α. 2022, β. 2023

Παραπάνω αναδεικνύονται σαφέστερα τα είδη απορριμμάτων με τη θετικότερη επίδραση στα μέτρα που μελετώνται. Τα είδη αυτά είναι το χαρτί, τα πλαστικά και τα μεικτά μέταλλα («Άλλα Μέταλλα»), με το χαρτί να υπερτερεί σε σημαντικό βαθμό. Εστιάζοντας, επομένως, στα συγκεκριμένα υλικά, παρουσιάζονται στους Πίνακες 3 – 8 οι ποσοστιαίες μεταβολές των τιμών κάθε σεναρίου σε σχέση με το προηγούμενο του, με σκοπό να μελετηθεί το σημαντικότερο μέρος από τη συνολική εξοικονόμηση που υπολογίστηκε.

Πίνακας 3. Ποσοστιαίες μεταβολές χαρτιού, 2022

Χαρτί	20% → 40%	40% → 60%	60% → 80%	80% → 100%
MTCO <sub>2</sub> E	100,00%	50,00%	33,33%	25,00%
Επιβατικά Οχήματα	100,00%	50,00%	33,33%	25,00%
Γαλόνια Βενζίνης	100,00%	50,00%	33,33%	25,00%
Φιάλες Προπάνιου	100,00%	50,00%	33,33%	25,00%

Πίνακας 4. Ποσοστιαίες μεταβολές πλαστικών, 2022

Πλαστικά	20% → 40%	40% → 60%	60% → 80%	80% → 100%
MTCO <sub>2</sub> E	100,00%	50,00%	33,33%	25,00%
Επιβατικά Οχήματα	100,00%	50,00%	33,33%	25,00%

Γαλόνια Βενζίνης	100,00%	50,00%	33,33%	25,00%
Φιάλες Προπάνιου	100,00%	50,00%	33,33%	25,00%

**Πίνακας 5.** Ποσοστιαίες μεταβολές για άλλα μέταλλα, 2022

<b>Άλλα μέταλλα</b>	<b>20% → 40%</b>	<b>40% → 60%</b>	<b>60% → 80%</b>	<b>80% → 100%</b>
MTCO <sub>2</sub> E	100,00%	50,00%	33,33%	25,00%
Επιβατικά Οχήματα	100,00%	50,00%	33,33%	25,00%
Γαλόνια Βενζίνης	100,00%	50,00%	33,33%	25,00%
Φιάλες Προπάνιου	100,00%	50,00%	33,33%	25,00%

**Πίνακας 6.** Ποσοστιαίες μεταβολές χαρτιού, 2023

<b>Χαρτί</b>	<b>20% → 40%</b>	<b>40% → 60%</b>	<b>60% → 80%</b>	<b>80% → 100%</b>
MTCO <sub>2</sub> E	99,95%	50,00%	33,33%	25,00%
Επιβατικά Οχήματα	100,00%	50,00%	33,33%	25,00%
Γαλόνια Βενζίνης	100,00%	50,00%	33,33%	25,00%
Φιάλες Προπάνιου	100,00%	50,00%	33,33%	25,00%

**Πίνακας 7.** Ποσοστιαίες μεταβολές πλαστικών, 2023

<b>Πλαστικά</b>	<b>20% → 40%</b>	<b>40% → 60%</b>	<b>60% → 80%</b>	<b>80% → 100%</b>
MTCO <sub>2</sub> E	100,00%	50,00%	33,33%	25,00%
Επιβατικά Οχήματα	100,00%	50,00%	33,33%	25,00%
Γαλόνια Βενζίνης	100,00%	50,00%	33,33%	25,00%
Φιάλες Προπάνιου	100,00%	50,00%	33,33%	25,00%

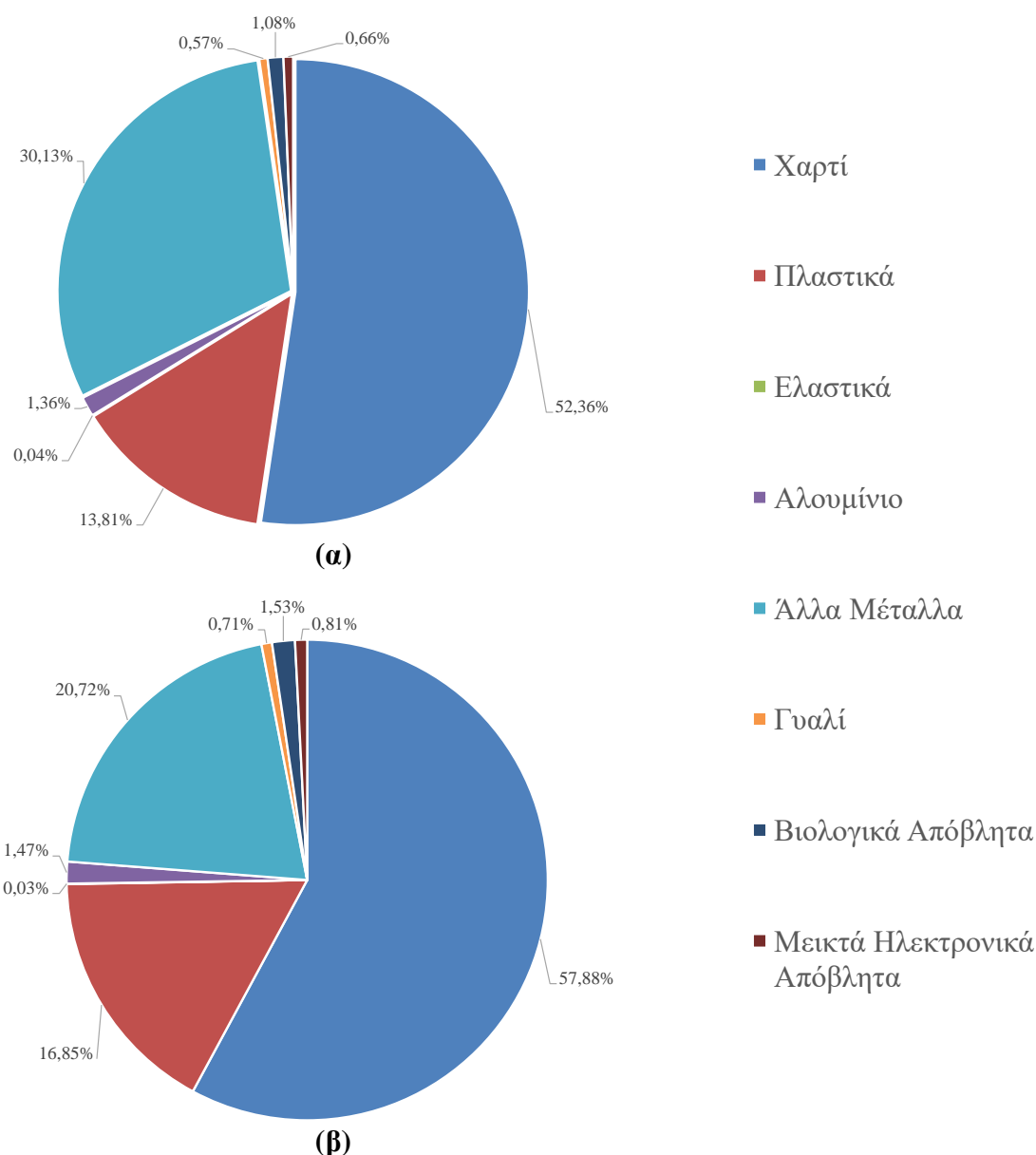
**Πίνακας 8.** Ποσοστιαίες μεταβολές για άλλα μέταλλα, 2023

<b>Άλλα μέταλλα</b>	<b>20% → 40%</b>	<b>40% → 60%</b>	<b>60% → 80%</b>	<b>80% → 100%</b>
MTCO <sub>2</sub> E	100,00%	50,00%	33,33%	25,00%
Επιβατικά Οχήματα	99,07%	50,20%	33,46%	24,83%
Γαλόνια Βενζίνης	100,00%	50,00%	33,33%	25,00%
Φιάλες Προπάνιου	100,00%	50,00%	33,33%	25,00%

Οι πίνακες ποσοστιαίων μεταβολών δείχνουν πως και για τα δύο έτη, κάθε βήμα αύξησης του ποσοστού ανακύκλωσης/κομποστοποίησης είναι μικρότερο από το προηγούμενο, αναφορικά με την πρόσθετη εξοικονόμηση που επιφέρει. Ο ρυθμός της διαδικασίας, δηλαδή, έχει φθίνουσα τάση, γεγονός που αποτελεί σημαντική πληροφορία για κάθε πιθανό αποφασίζοντα που επιθυμεί να μελετήσει καταστάσεις με παρόμοιο θέμα. Παρατηρείται, επίσης, πως ο τρόπος, με τον οποίο μεταβάλλονται οι τιμές εξοικονόμησης από σενάριο σε σενάριο είναι πρακτικά γραμμικός και προκαλεί, ως επί το πλείστον, τις ίδιες μεταβολές για όλα τα είδη απορριμμάτων (οι διαφορές που παρουσιάζονται σε κάποια κελιά των πινάκων είναι πρακτικά ελάχιστες και μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες). Επεκτείνοντας τις σκέψεις πάνω σε αυτή τη παρατήρηση, μπορεί να γίνει

αντιληπτός ο λόγος που τα υπερισχύοντα υλικά είναι το χαρτί, τα πλαστικά και τα μεικτά μέταλλα, αφού σε αυτά τα είδη στερεών αποβλήτων αντιστοιχούσαν οι μεγαλύτερες, με διαφορά, ποσότητες απορριμμάτων που παράχθηκαν κατά τη διάρκεια των δύο ετών (βλ. Πίνακα 2).

Στην περίπτωση του εν λόγω αεροδρομίου, λοιπόν, η διαφορά μεταξύ των όγκων των απορριμμάτων κάθε κατηγορίας αποτελεί μια σημαντική μεταβλητή, ως προς τις περιβαλλοντικές και ενεργειακές ωφέλειες, τις οποίες προσφέρει η εναλλακτική διαχείριση των αστικών στερεών αποβλήτων. Το συμπέρασμα αυτό μπορεί να επαληθευτεί και από τις ακόλουθες γραφικές παραστάσεις, οι οποίες δείχνουν την σχετική συμβολή κάθε υλικού στη συνολική μείωση εκπομπών που θα μπορούσε να επιτευχθεί βάσει των υπολογισμών του WARM.



**Διάγραμμα 19.** Ποσοστά συμβολής υλικών στην εξοικονόμηση εκπομπών: α. 2022, β. 2023

Προς αποφυγή σύγχυσης, αναφέρεται ότι οι τιμές που φέρει το Διάγραμμα 19 είναι κοινές για όλα τα σενάρια που μελετώνται σε αυτή την εργασία, καθώς η διαφορά μεταξύ σεναρίων είναι ποσοστιαία και η αντίστοιχη συνολική σύσταση των απορριμμάτων παραμένει ίδια. Ένα σχετικό παράδειγμα από την καθημερινότητα θα ήταν η σύγκριση μπουκαλιών διαφορετικού μεγέθους για το ίδιο αναψυκτικό. Το μεγαλύτερο μπουκάλι έχει σαφώς περισσότερη ποσότητα αναψυκτικού, αλλά αυτή η ποσότητα είναι το ίδιο γλυκιά με αυτή που περιέχει το μικρότερο μπουκάλι. Στις δύο αυτές περιπτώσεις, ο βαθμός γλυκύτητας είναι ο ίδιος, γιατί οι γλυκαντικοί παράγοντες και στα δύο μπουκάλια έχουν την ίδια αναλογία με τα υπόλοιπα υλικά, δηλαδή η σύσταση του αναψυκτικού παραμένει ίδια, ανεξάρτητα της ποσότητας.

Συνεχίζοντας, το Διάγραμμα 19 δείχνει ότι οι ποσότητες των υλικών δεν αναλογούν αυστηρά με την εξοικονόμηση που προσφέρεται από κάθε κατηγορία. Απεναντίας, η φύση του κάθε υλικού φαίνεται να παίζει καθοριστικό ρόλο στις πιθανές μειώσεις εκπομπών που μπορεί να προσφέρει η ανακύκλωση/κομποστοποίηση από κάθε μία από τις διαθέσιμες κατηγορίες. Αυτό μπορεί εύκολα να διαπιστωθεί ανατρέχοντας στον Πίνακα 2.1, στον οποίο φαίνεται ότι οι ποσότητες που αντιστοιχούν στις κατηγορίες «Χαρτί» και «Πλαστικά» είναι παρόμοιες, αλλά η συμβολή τους στα Διαγράμματα 3.9 – 3.10 είναι δυσανάλογη, με το μερίδιο του χαρτιού να είναι παραπάνω από το διπλάσιο σε σχέση με αυτό των πλαστικών. Βάσει αυτού, προκύπτει εύλογα το ερώτημα για το τι ισχύει σε περίπτωση που η σύσταση των παραγόμενων αποβλήτων ήταν διαφορετική. Η απάντηση σε αυτό το ερώτημα μπορεί να δοθεί εξετάζοντας την εξοικονόμηση που προσφέρει κάθε είδος απόβλητου, όχι βάσει ποσότητας, όπως μελετήθηκε έως τώρα, αλλά ανά τόνο υλικού.

### 3.2. Σύνοψη Εξοικονόμησης Εκπομπών ανά Υλικό

Σχετικά στοιχεία με την εξοικονόμηση που επιτυγχάνεται ανά τόνο ανακύκλωσης/κομποστοποίησης εκάστου υλικού μπορούν να βρεθούν στην καρτέλα Analysis Results (MTCO<sub>2</sub>E), την οποία περιέχει το λογιστικό φύλλο Excel του WARM. Στην καρτέλα αυτή, η Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Πολιτειών παρέχει τις τιμές, τις οποίες έχει υπολογίσει για το προαναφερθέν ζήτημα, όσον αφορά τους μετρικούς τόνους του διοξειδίου του άνθρακα (MTCO<sub>2</sub>E). Στον Πίνακα 9 παρατίθενται οι τιμές υπό συζήτηση.

**Πίνακας 9.** Μείωση εκπομπών ανά τόνο υλικού σε MTCO<sub>2</sub>E

Εξοικονόμηση MTCO <sub>2</sub> E ανά τόνο υλικού	
Χαρτί	3,55
Πλαστικά	0,93
Ελαστικά	0,38
Αλουμίνιο	9,13
Άλλα Μέταλλα	4,39
Γυαλί	0,28
Βιολογικά Απόβλητα (κομποστοποίηση)	0,13
Μεικτά Ηλεκτρονικά Απόβλητα	0,90

Διαιρώντας τα αποτελέσματα για το πέμπτο σενάριο (100% ποσοτήτων προς ανακύκλωση/κομποστοποίηση) με τα αρχικά δεδομένα των αποβλήτων που παράχθηκαν, υπολογίζονται, επίσης, και οι υπόλοιποι συντελεστές εξοικονόμησης για τα ισοδύναμα μείωσης εκπομπών.

**Πίνακας 10.** Μείωση εκπομπών ανά τόνο υλικού σε επιβατικά οχήματα

Εξοικονόμηση επιβατικών οχημάτων ανά τόνο υλικού	
Χαρτί	0,77
Πλαστικά	0,20
Ελαστικά	0,08
Αλουμίνιο	1,94
Άλλα Μέταλλα	0,94
Γυαλί	0,06
Βιολογικά Απόβλητα (κομποστοποίηση)	0,03
Μεικτά Ηλεκτρονικά Απόβλητα	0,20

**Πίνακας 11.** Μείωση εκπομπών ανά τόνο υλικού σε γαλόνια βενζίνης

<b>Εξοικονόμηση γαλονιών βενζίνης ανά τόνο υλικού</b>	
<b>Χαρτί</b>	407,36
<b>Πλαστικά</b>	106,42
<b>Ελαστικά</b>	44,58
<b>Αλουμίνιο</b>	1.029,33
<b>Άλλα Μέταλλα</b>	496,39
<b>Γυαλί</b>	33,35
<b>Βιολογικά Απόβλητα (κομποστοποίηση)</b>	14,92
<b>Μεικτά Ηλεκτρονικά Απόβλητα</b>	103,99

**Πίνακας 12.:** Μείωση εκπομπών ανά τόνο υλικού σε φιάλες προπάνιου

<b>Εξοικονόμηση φιαλών προπάνιου ανά τόνο υλικού</b>	
<b>Χαρτί</b>	150,84
<b>Πλαστικά</b>	39,41
<b>Ελαστικά</b>	16,50
<b>Αλουμίνιο</b>	381,15
<b>Άλλα Μέταλλα</b>	183,81
<b>Γυαλί</b>	12,35
<b>Βιολογικά Απόβλητα (κομποστοποίηση)</b>	5,52
<b>Μεικτά Ηλεκτρονικά Απόβλητα</b>	38,50

Σύμφωνα με τους Πίνακες 9 - 12, η δυσανάλογη σχέση που παρατηρήθηκε προηγουμένως, αναφορικά με την επί μέρους συμβολή του χαρτιού και των πλαστικών στη συνολική μείωση των εκπομπών φαίνεται ότι ισχύει λόγω του ότι η ανακύκλωση ενός τόνου χαρτιού προσφέρει περίπου τέσσερεις φορές περισσότερη εξοικονόμηση σε σύγκριση με την ανακύκλωση ενός τόνου πλαστικών. Επιπροσθέτως, υπογραμμίζεται ότι η υψηλότερη αναλογική μείωση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου πραγματοποιείται από την ανακύκλωση του αλουμινίου, ενώ η χαμηλότερη αντιστοιχεί στην κομποστοποίηση των βιολογικών αποβλήτων. Το αλουμίνιο, όμως, παρόλο που εν τέλει είναι το πιο αποδοτικό υλικό, δεν παράγεται αρκετά από το αεροδρόμιο, ως στερεό απόβλητο, ώστε η ανακύκλωση του να οδηγήσει σε ιδιαίτερα υψηλές μεταβολές στις εκπομπές αερίων. Τα στοιχεία αυτά, λοιπόν, αν και είναι χρήσιμα για τα άτομα που λαμβάνουν αποφάσεις με προτίμηση την εξοικονόμηση που προσφέρει κάθε υλικό από μόνο του, δεν βρίσκουν ιδιαίτερη εφαρμογή από μόνα τους. Για αυτόν το λόγο, δημιουργήθηκε ο παρακάτω συνοδευτικός πίνακας, ο οποίος κατατάσσει όλα τα είδη απορριμμάτων με βάση την αναλογία του συντελεστή εξοικονόμησης και τον μέσο όρο παραγόμενης ποσότητας.

**Πίνακας 13.** Κατάταξη υλικών συναρτήσει φύσης και παραγόμενης ποσότητας

<b>Θέση</b>	<b>Υλικά</b>	<b>(Συντελεστής εξοικονόμησης MTCOE2)x(παραγόμενη ποσότητα)</b>
<b>1</b>	<b>Χαρτί</b>	6.757
<b>2</b>	<b>Άλλα Μέταλλα</b>	3.180
<b>3</b>	<b>Πλαστικά</b>	1.882
<b>4</b>	<b>Αλουμίνιο</b>	176
<b>5</b>	<b>Μεικτά Ηλεκτρονικά Απόβλητα</b>	89
<b>6</b>	<b>Γυαλί</b>	75
<b>7</b>	<b>Βιολογικά Απόβλητα</b>	73
<b>8</b>	<b>Ελαστικά</b>	4

Όπως ήταν αναμενόμενο, ο Πίνακας 13 επιβεβαιώνει τα αποτελέσματα που σχετίζονται με τα προηγούμενα διαγράμματα, δείχνοντας ότι τα υλικά, των οποίων η εναλλακτική διαχείριση έχει την θετικότερη επίδραση στις εξοικονομήσεις εκπομπών, είναι το χαρτί, τα μεικτά μέταλλα και τα πλαστικά. Εφόσον το παρόν συμπέρασμα έχει ήδη προκύψει παραπάνω, ο πίνακας αυτός δεν έχει ιδιαίτερη χρησιμότητα σε αυτό το σημείο της εργασίας, αλλά συμπεριλαμβάνεται καθώς παρέχει έναν εναλλακτικό τρόπο, με τον οποίο ο αναλυτής θα μπορούσε να οδηγηθεί σε ανάλογα αποτελέσματα, συμπεριλαμβάνοντάς και παρουσιάζοντας τους συντελεστές εξοικονόμησης που αντιστοιχούν σε κάθε ένα από τα υλικά που μελετήθηκαν.

## Κεφάλαιο 4

### Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία, η αξιοποίηση του υπολογιστικού μοντέλου WARM συνεισέφερε σε μια κατατοπιστική μελέτη ως προς τα πιθανά ενεργειακά και περιβαλλοντικά αποτελέσματα της εναλλακτικής διαχείρισης στερεών αποβλήτων, από τα οποία θα μπορούσαν να επωφελούνται εγκαταστάσεις, όμοιες με τον Αερολιμένα Αθηνών. Προκειμένου να προσεγγιστούν οι στόχοι της εργασίας, αναλύθηκαν 5 σενάρια, κατά τα οποία διαφορετικά ποσοστά απορριμμάτων ανακυκλώνονται ή κομποστοποιούνται, με τα υπόλοιπα να οδηγούνται σε υγειονομική ταφή. Η εν λόγω διαδικασία εφαρμόστηκε τόσο στον αρχικό συνδυασμό στερεών αποβλήτων, όσο και σε κάθε είδος απορρίμματος ξεχωριστά, παράγοντας τα αποτελέσματα που συζητήθηκαν στο Κεφάλαιο 3. Πιο συγκεκριμένα, διαπιστώθηκε ότι με κάθε βήμα αύξησης του ποσοστού ανακύκλωσης/κομποστοποίησης (αλλαγή σεναρίου), η επιπρόσθετη εξοικονόμηση εκπομπών γίνεται όλο και μικρότερη, με τον τρόπο που μεταβάλλονται οι τιμές να είναι γραμμικός. Επιπλέον, η αισθητά θετικότερη επίδραση στη μείωση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου επιτυγχάνεται από την ανακύκλωση του χαρτιού, ενώ τις μικρότερες μεταβολές σε εκπομπές προσφέρει η ανακύκλωση των ελαστικών. Κάποια ακόμη υλικά που παίζουν σημαντικό ρόλο στην επιθυμητή εξοικονόμηση είναι τα πλαστικά και τα μεικτά μέταλλα. Σε ενεργειακό πλαίσιο, αναφέρεται ενδεικτικά για το σενάριο 60% ανακύκλωσης/κομποστοποίησης ότι τα γαλόνια βενζίνης που θα μπορούσαν να εξοικονομηθούν ετησίως για το χαρτί είναι περίπου 450.000, για τα πλαστικά 120.000 και για τα μεικτά μέταλλα 200.000. Μελετώντας τη συμβολή κάθε υλικού στη συνολική εξοικονόμηση των εκπομπών, δημιουργήθηκε επίσης και το ενδιαφέρον για τη την εξοικονόμηση που μπορεί να προσφέρει κάθε υλικό ξεχωριστά, λόγω της φύσης του. Το αλουμίνιο φάνηκε να κυριαρχεί σε αυτό το είδος σύγκρισης, με σχετικό συντελεστή εξοικονόμησης 9,13, έναντι του δεύτερου μεγαλύτερου που ήταν 4,39 και αντιστοιχούσε στα μεικτά μέταλλα. Στη περίπτωση του αεροδρομίου, όμως, δεν παράγονται αρκετά απορρίμματα αλουμινίου ώστε η ανακύκλωση τους να δημιουργήσει σημαντικές μεταβολές στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Τα υλικά με την καλύτερη αναλογία συντελεστή εξοικονόμησης και παραγόμενης ποσότητας είναι, με φθίνουσα σειρά, το χαρτί, τα μεικτά μέταλλα και τα πλαστικά, τα οποία ήδη αναδείχθηκαν προηγουμένως για το μέγεθος των ωφελειών ανακύκλωσης τους.

Ακολουθώντας αυτά τα συμπεράσματα, ωστόσο, είναι σημαντικό να αναφερθεί πως το WARM είναι, όπως αναφέρθηκε επανειλημμένα, ένα μοντέλο, γεγονός που σημαίνει ότι οι υπολογισμοί του μπορούν μόνο να προσεγγίσουν την πραγματικότητα και δεν την αντικατοπτρίζουν πλήρως. Τα αποτελέσματα, δηλαδή, που προκύπτουν από το WARM δεν παύουν να είναι θεωρητικά, έχοντας αξιοποιήσει στο υπόβαθρο ποικίλα στοιχεία, τα οποία έχουν συλλεχθεί από τους οι δημιουργούς του σε διάρκεια δεκαετιών. Αν και τα αποτελέσματα αυτά μπορούν να σχηματίσουν μια αξιόπιστη εικόνα, όσον αφορά τις ποσοτικές εκτιμήσεις που αναλύθηκαν παραπάνω, η ακρίβεια της είναι δυνατό να τεθεί υπό αμφισβήτηση, δεδομένων των συνθηκών, υπό τις οποίες μελετάται κάθε παρόμοιο πρόβλημα.

Μια ενδιαφέρουσα πτυχή που δεν καλύπτει αυτή η εργασία είναι η χρηματική οικονομία του θέματος. Με λίγα λόγια, τα κόστη που αφορούν τη διαχείριση εκάστου υλικού, εξίσου από τη πλευρά της μελετώμενης εγκατάστασης και την πλευρά τρίτων εταιριών, έχουν μείνει



αδιερεύνητα. Έτσι, εισάγοντας τον παράγοντα του κόστους στη συγκεκριμένη συζήτηση, μπορούν να προκύψουν επιπρόσθετα συμπεράσματα, τα οποία ενδεχομένως να ενισχύουν ή να αντικρούουν τις αξιολογήσεις της παρούσας εργασίας. Προτείνεται, επομένως, ως θέμα για μελλοντική εργασία, η χρηματική ανάλυση της εναλλακτικής διαχείρισης αστικών στερεών αποβλήτων από εγκαταστάσεις παρόμοιου είδους και μεγέθους.

## Παράρτημα 1

Στο Παράρτημα 1 παρατίθενται οι πίνακες εξοικονόμησης εκπομπών που θα μπορούσε να προσφέρει κάθε υλικό ξεχωριστά για το έτος 2022.

Πίνακας Π1: Εξοικονομήσεις εκπομπών από κάθε υλικό σε MTCO<sub>2</sub>E, 2022

MTCO <sub>2</sub> E	20%	40%	60%	80%	100%
Χαρτί	1.340,21	2.680,42	4.020,62	5.360,83	6.701,04
Πλαστικά	353,53	707,06	1.060,60	1.414,13	1.767,66
Ελαστικά	0,95	1,90	2,86	3,81	4,76
Αλουμίνιο	34,76	69,52	104,28	139,04	173,81
Άλλα Μέταλλα	771,12	1.542,23	2.313,35	3.084,46	3.855,58
Γυαλί	14,52	29,04	43,56	58,08	72,60
Βιολογικά Απόβλητα	27,52	55,04	82,56	110,08	137,61
Μεικτά Ηλεκτρονικά Απόβλητα	16,82	33,64	50,46	67,28	84,09

Πίνακας Π2: Εξοικονομήσεις εκπομπών από κάθε υλικό σε επιβατικά οχήματα, 2022

Επιβατικά Οχήματα	20%	40%	60%	80%	100%
Χαρτί	285	569	854	1.138	1.423
Πλαστικά	75	150	225	300	375
Ελαστικά	0	0	1	1	1
Αλουμίνιο	7	15	22	30	37
Άλλα Μέταλλα	164	327	491	655	819
Γυαλί	3	6	9	12	15
Βιολογικά Απόβλητα	6	12	18	23	29
Μεικτά Ηλεκτρονικά Απόβλητα	4	7	11	14	18

Πίνακας Π3: Εξοικονομήσεις εκπομπών από κάθε υλικό σε γαλόνια βενζίνης, 2022

Γαλόνια Βενζίνης	20%	40%	60%	80%	100%
Χαρτί	150.805	301.611	452.416	603.222	754.027
Πλαστικά	39.781	79.562	119.342	159.123	198.904
Ελαστικά	107	214	321	428	535
Αλουμίνιο	3.911	7.823	11.734	15.646	19.557
Άλλα Μέταλλα	86.769	173.538	260.307	347.076	433.845
Γυαλί	1.634	3.268	4.902	6.536	8.170
Βιολογικά Απόβλητα	3.097	6.194	9.290	12.387	15.484
Μεικτά Ηλεκτρονικά Απόβλητα	1.893	3.785	5.678	7.570	9.463

**Πίνακας Π4:** Εξοικονομήσεις εκπομπών από κάθε υλικό σε φιάλες προπάνιου, 2022

<b>Φιάλες Προπάνιου</b>	<b>20%</b>	<b>40%</b>	<b>60%</b>	<b>80%</b>	<b>100%</b>
<b>Χαρτί</b>	55.842	111.684	167.526	223.368	279.210
<b>Πλαστικά</b>	14.730	29.461	44.191	58.922	73.652
<b>Ελαστικά</b>	40	79	119	159	198
<b>Αλουμίνιο</b>	1.448	2.897	4.345	5.794	7.242
<b>Άλλα Μέταλλα</b>	32.130	64.260	96.389	128.519	160.649
<b>Γυαλί</b>	605	12.100	1.815	2.420	3.025
<b>Βιολογικά Απόβλητα</b>	1.147	2.293	3.440	4.587	5.734
<b>Μεικτά Ηλεκτρονικά Απόβλητα</b>	701	1.402	2.102	2.803	3.504

### **Εξοικονομήσεις εκπομπών που θα μπορούσε να προσφέρει κάθε υλικό ξεχωριστά για το έτος 2023**

**Πίνακας Π5:** Εξοικονομήσεις εκπομπών από κάθε υλικό σε MTCO<sub>2</sub>E, 2023

<b>MTCO<sub>2</sub>E</b>	<b>20%</b>	<b>40%</b>	<b>60%</b>	<b>80%</b>	<b>100%</b>
<b>Χαρτί</b>	1.416	2.832	4.248	5.664	7.080
<b>Πλαστικά</b>	412	824	1.237	1.649	2.061
<b>Ελαστικά</b>	1	1	2	3	4
<b>Αλουμίνιο</b>	36	72	108	144	180
<b>Άλλα Μέταλλα</b>	507	1.014	1.521	2.028	2.535
<b>Γυαλί</b>	17	35	52	69	86
<b>Βιολογικά Απόβλητα</b>	38	75	113	150	188
<b>Μεικτά Ηλεκτρονικά Απόβλητα</b>	20	40	59	79	99

**Πίνακας Π6:** Εξοικονομήσεις εκπομπών από κάθε υλικό σε επιβατικά οχήματα, 2023

<b>Επιβατικά Οχήματα</b>	<b>20%</b>	<b>40%</b>	<b>60%</b>	<b>80%</b>	<b>100%</b>
<b>Χαρτί</b>	301	601	902	1.203	1.503
<b>Πλαστικά</b>	88	175	263	350	438
<b>Ελαστικά</b>	0	0	0	1	1
<b>Αλουμίνιο</b>	8	15	23	31	38
<b>Άλλα Μέταλλα</b>	108	215	323	431	538
<b>Γυαλί</b>	4	7	11	15	18
<b>Βιολογικά Απόβλητα</b>	8	16	24	32	40
<b>Μεικτά Ηλεκτρονικά Απόβλητα</b>	4	8	13	17	21

**Πίνακας Π7:** Εξοικονομήσεις εκπομπών από κάθε υλικό σε γαλόνια βενζίνης, 2023

<b>Γαλόνια Βενζίνης</b>	<b>20%</b>	<b>40%</b>	<b>60%</b>	<b>80%</b>	<b>100%</b>
<b>Χαρτί</b>	159.339	318.678	478.017	637.355	796.694
<b>Πλαστικά</b>	46.382	92.764	139.147	185.529	231.911
<b>Ελαστικά</b>	81	163	244	326	407
<b>Αλουμίνιο</b>	4.043	8.086	12.130	16.173	20.216
<b>Άλλα Μέταλλα</b>	57.051	114.102	171.153	228.204	285.255
<b>Γυαλί</b>	1.945	3.891	5.836	7.782	9.727
<b>Βιολογικά Απόβλητα</b>	4.227	8.454	12.681	16.908	21.134
<b>Μεικτά Ηλεκτρονικά Απόβλητα</b>	2.232	4.463	6.695	8.926	11.158

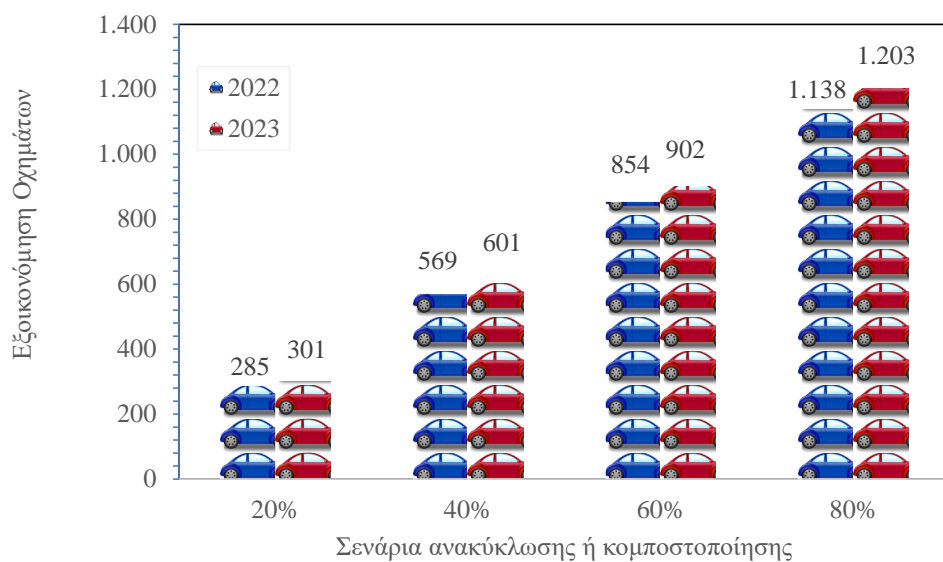
**Πίνακας Π8:** Εξοικονομήσεις εκπομπών από κάθε υλικό σε φιάλες προπάνιου, 2023

<b>Φιάλες Προπάνιου</b>	<b>20%</b>	<b>40%</b>	<b>60%</b>	<b>80%</b>	<b>100%</b>
<b>Χαρτί</b>	59.002	118.004	177.006	236.007	295.009
<b>Πλαστικά</b>	17.175	34.350	51.525	68.700	85.875
<b>Ελαστικά</b>	30	60	90	121	151
<b>Αλουμίνιο</b>	1.497	2.994	4.491	5.989	7.486
<b>Άλλα Μέταλλα</b>	21.126	42.251	63.377	84.502	105.628
<b>Γυαλί</b>	720	1.441	2.161	2.882	3.602
<b>Βιολογικά Απόβλητα</b>	1.565	3.130	4.696	6.261	7.826
<b>Μεικτά Ηλεκτρονικά Απόβλητα</b>	826	1.653	2.479	3.305	4.132

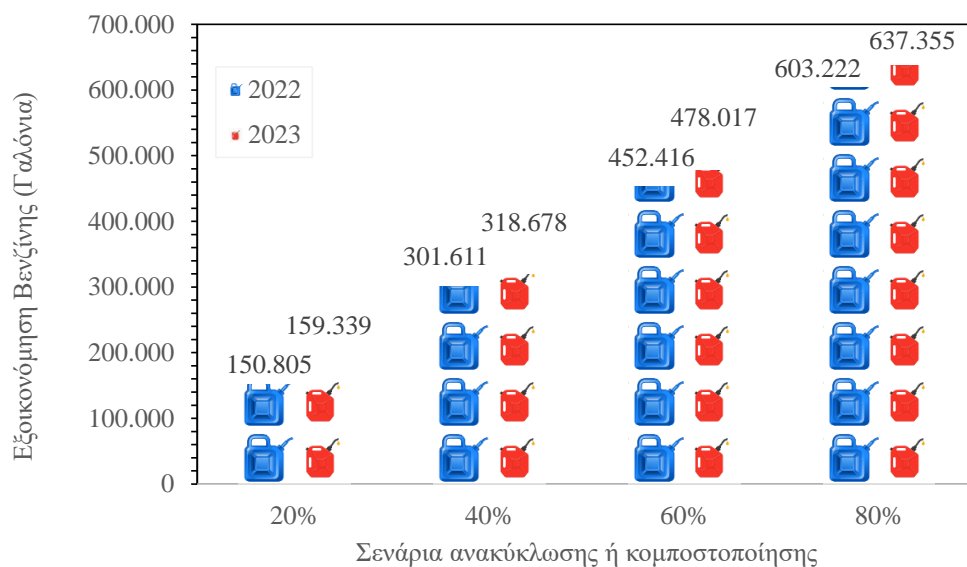
## Παράρτημα 2

Στο Παράρτημα 2 παρατίθενται τα διαγράμματα ισοδύναμων εξοικονόμησης για κάθε υλικό.

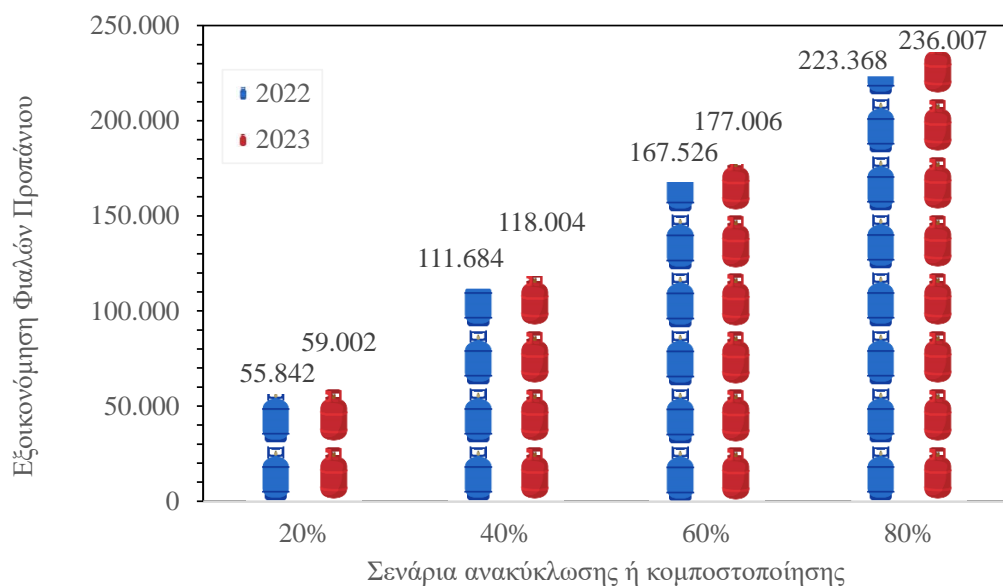
### Χαρτί



**Διάγραμμα Π1:** Μεταβολές εκπομπών σε επιβατικά οχήματα από ανακύκλωση χαρτιού

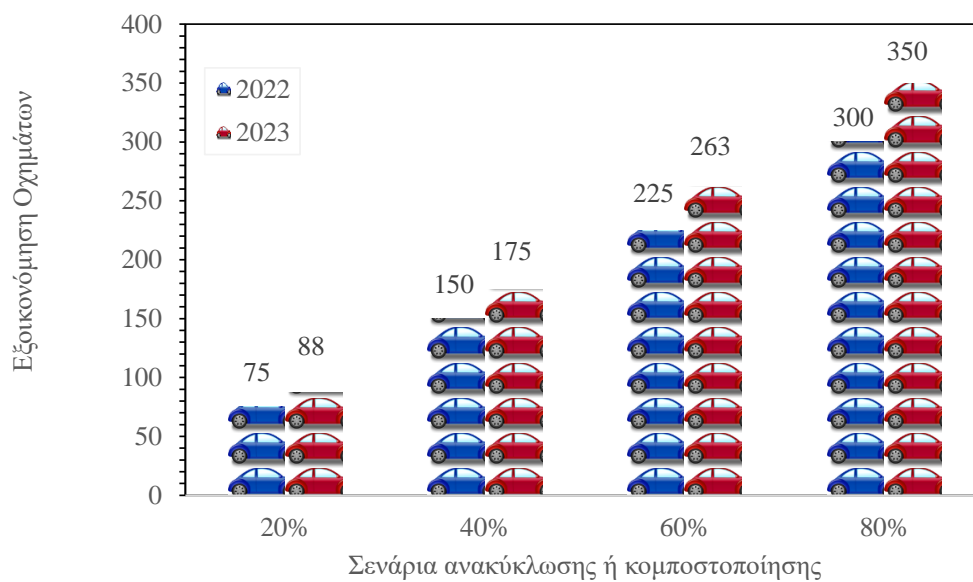


**Διάγραμμα Π2:** Μεταβολές εκπομπών σε γαλόνια βενζίνης από ανακύκλωση χαρτιού

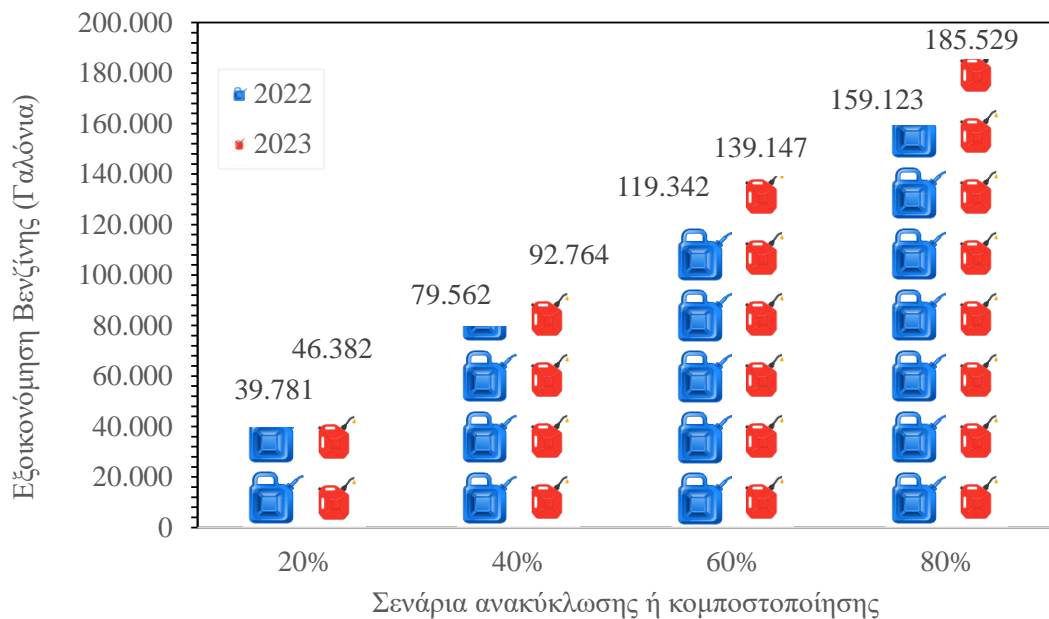


**Διάγραμμα Π3:** Μεταβολές εκπομπών σε φιάλες προπάνιου από ανακύκλωση χαρτιού

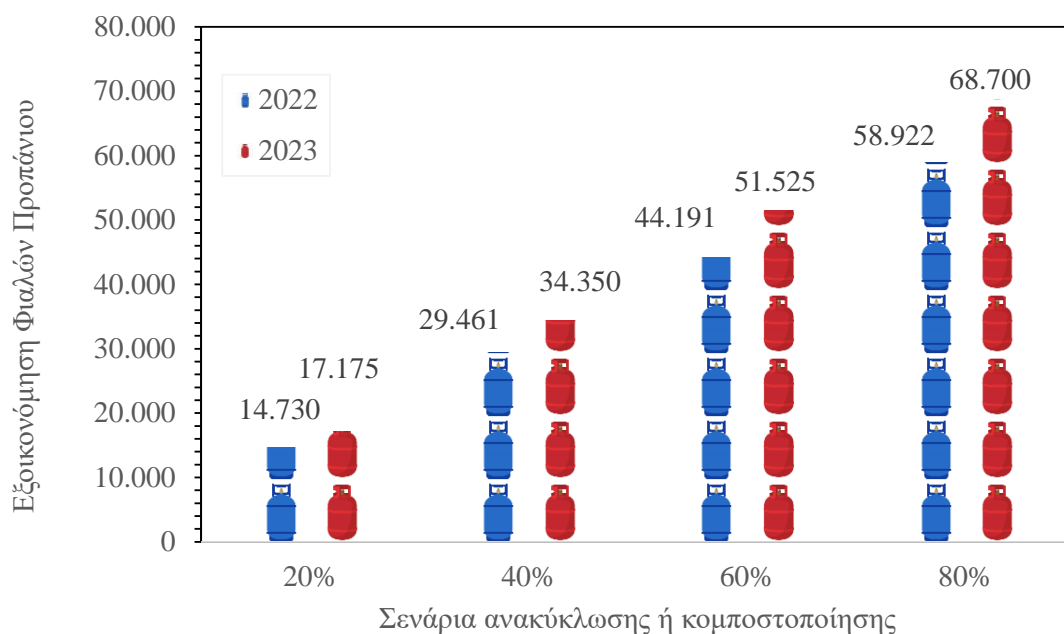
## Πλαστικά



**Διάγραμμα Π4:** Μεταβολές εκπομπών σε επιβατικά οχήματα από ανακύκλωση πλαστικών

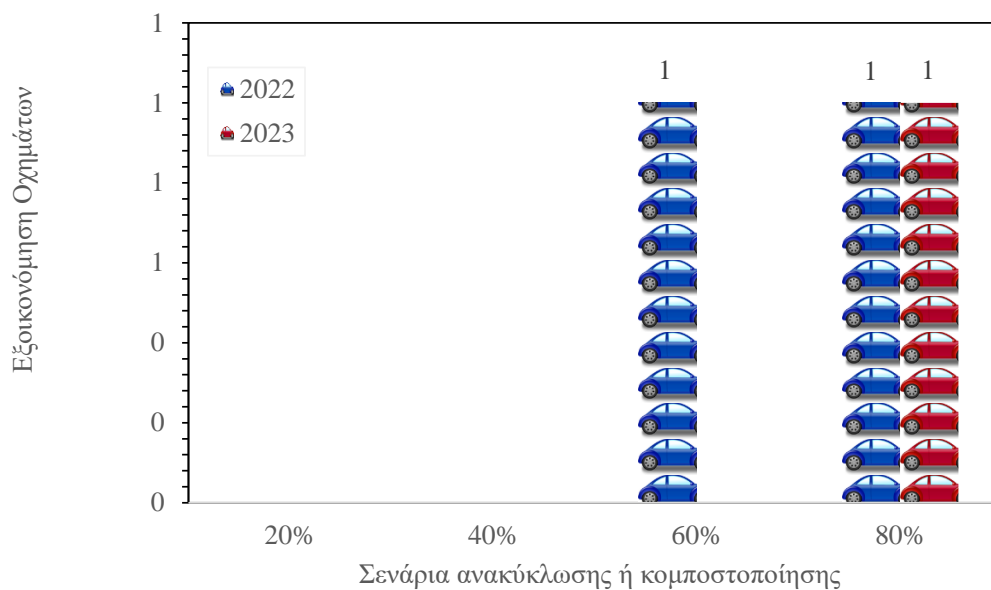


**Διάγραμμα Π5:** Μεταβολές εκπομπών σε γαλιόνια βενζίνης από ανακύκλωση πλαστικών

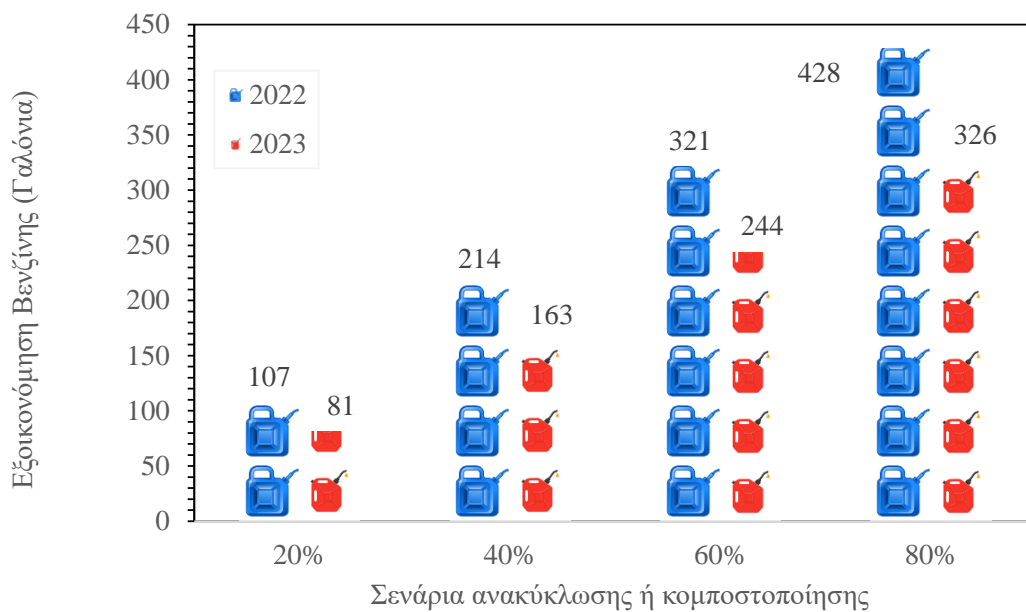


**Διάγραμμα Π6:** Μεταβολές εκπομπών σε φιάλες προπάνιου από ανακύκλωση πλαστικών

## Ελαστικά

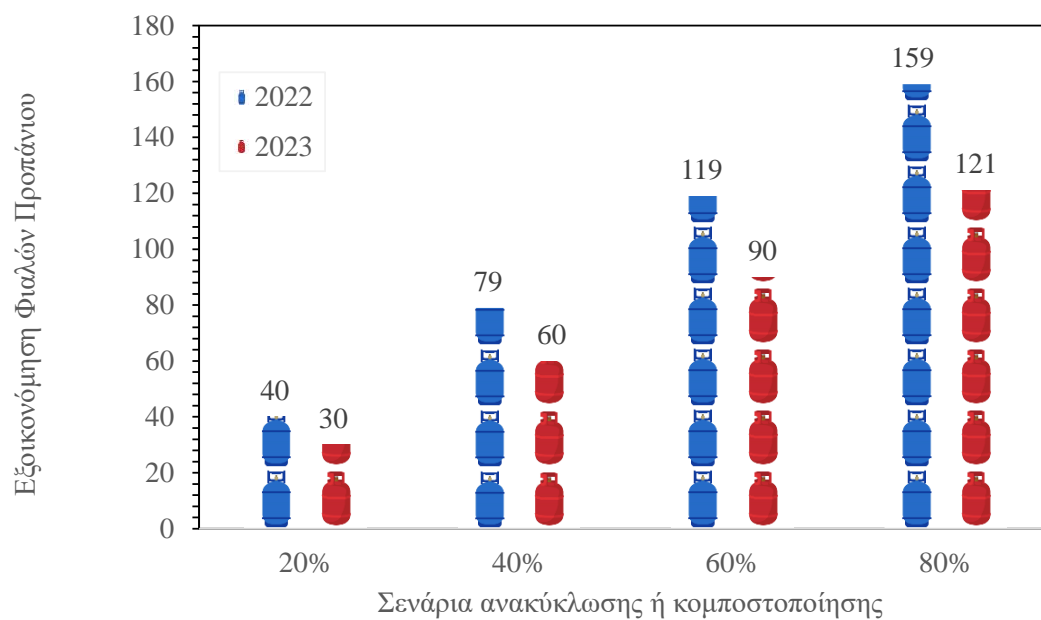


**Διάγραμμα Π7:** Μεταβολές εκπομπών σε επιβατικά οχήματα από ανακύκλωση ελαστικών



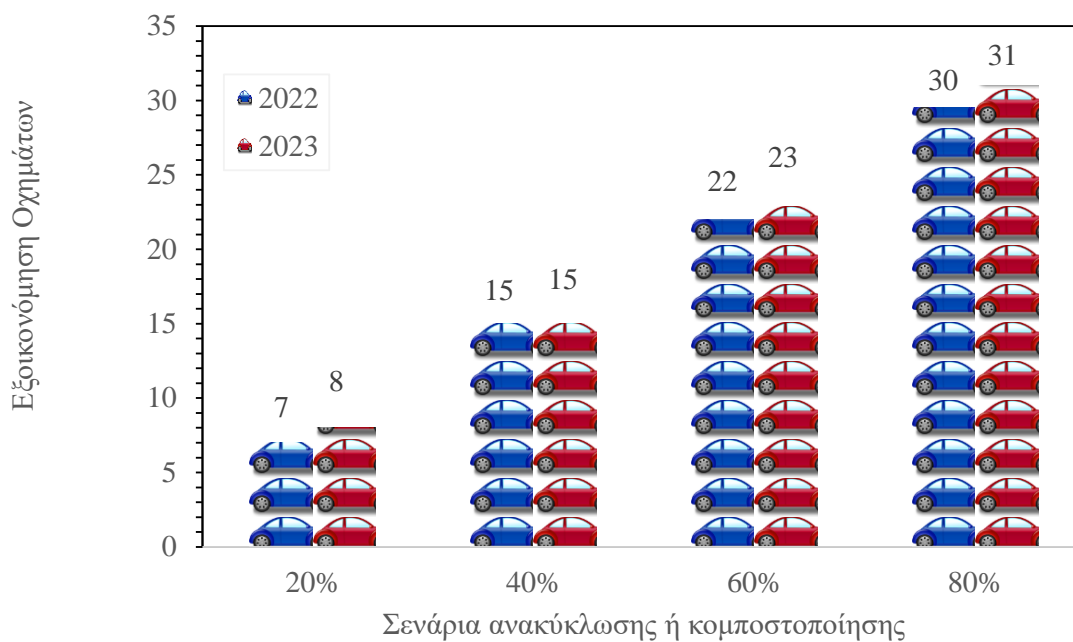
**Διάγραμμα Π8:** Μεταβολές εκπομπών σε γαλόνια βενζίνης από ανακύκλωση ελαστικών



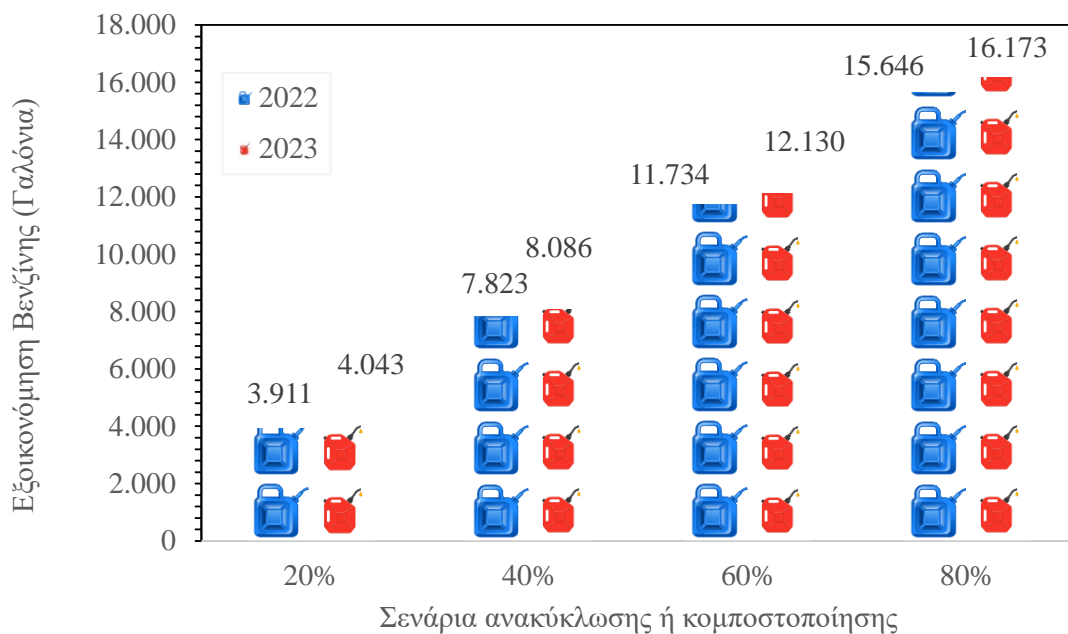


**Διάγραμμα Π9:** Μεταβολές εκπομπών σε φιάλες προπάνιου από ανακύκλωση ελαστικών

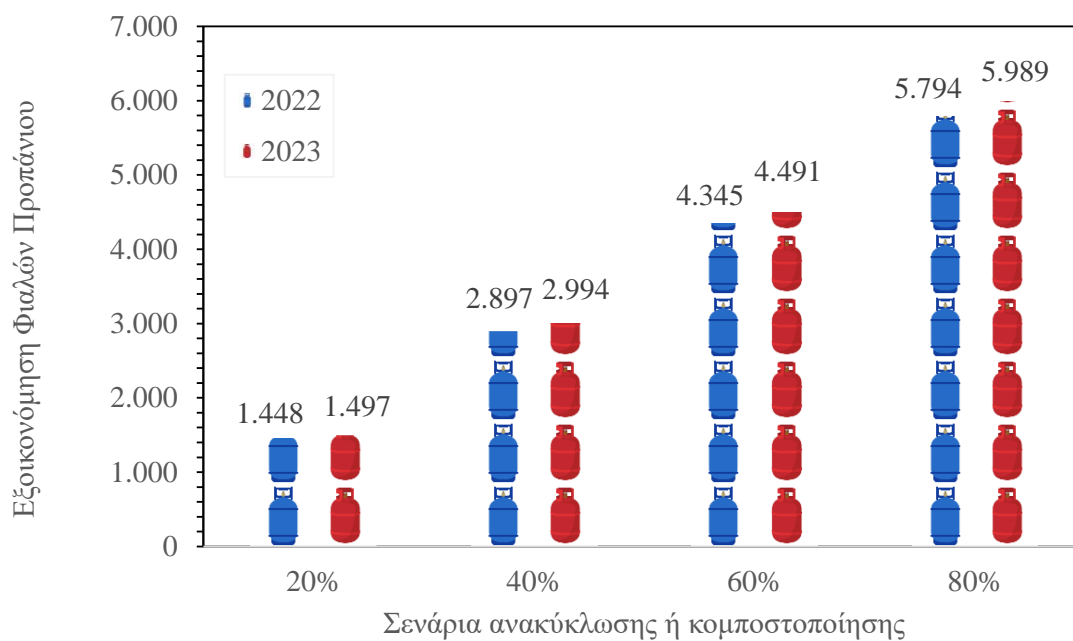
## Αλουμίνιο



**Διάγραμμα Π10:** Μεταβολές εκπομπών σε επιβατικά οχήματα από ανακύκλωση αλουμινίου

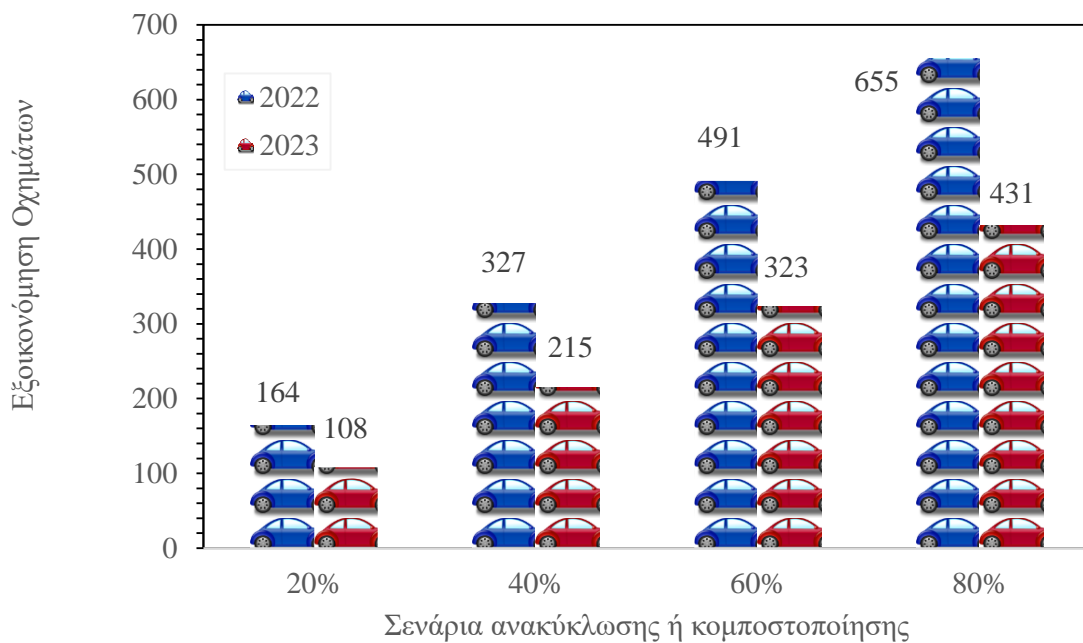


**Διάγραμμα Π11:** Μεταβολές εκπομπών σε γαλόνια βενζίνης από ανακύκλωση αλουμινίου

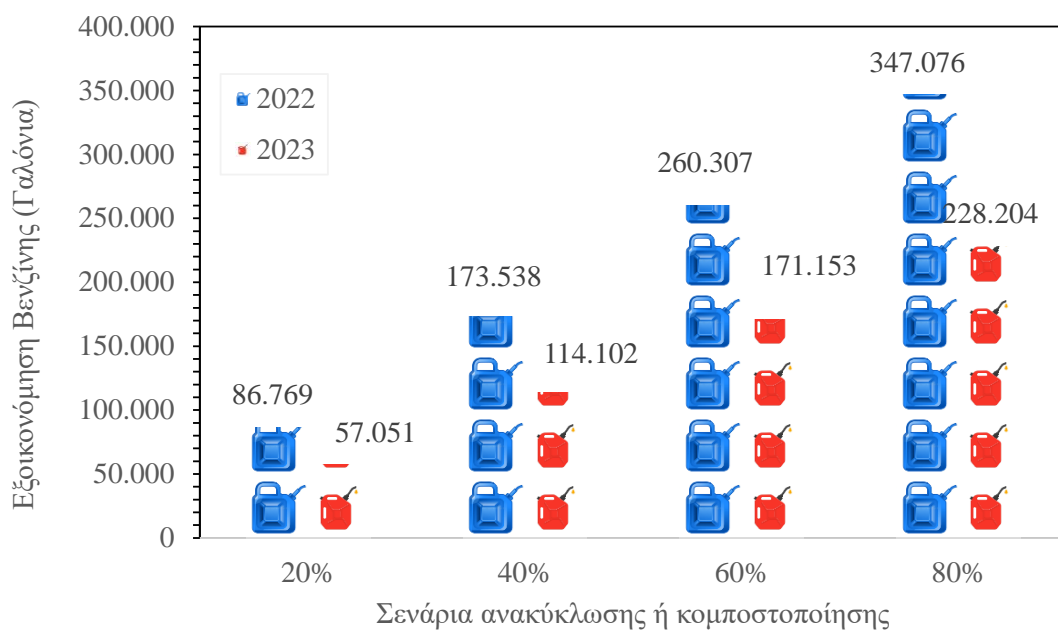


**Διάγραμμα Π12:** Μεταβολές εκπομπών σε φιάλες προπάνιου από ανακύκλωση αλουμινίου

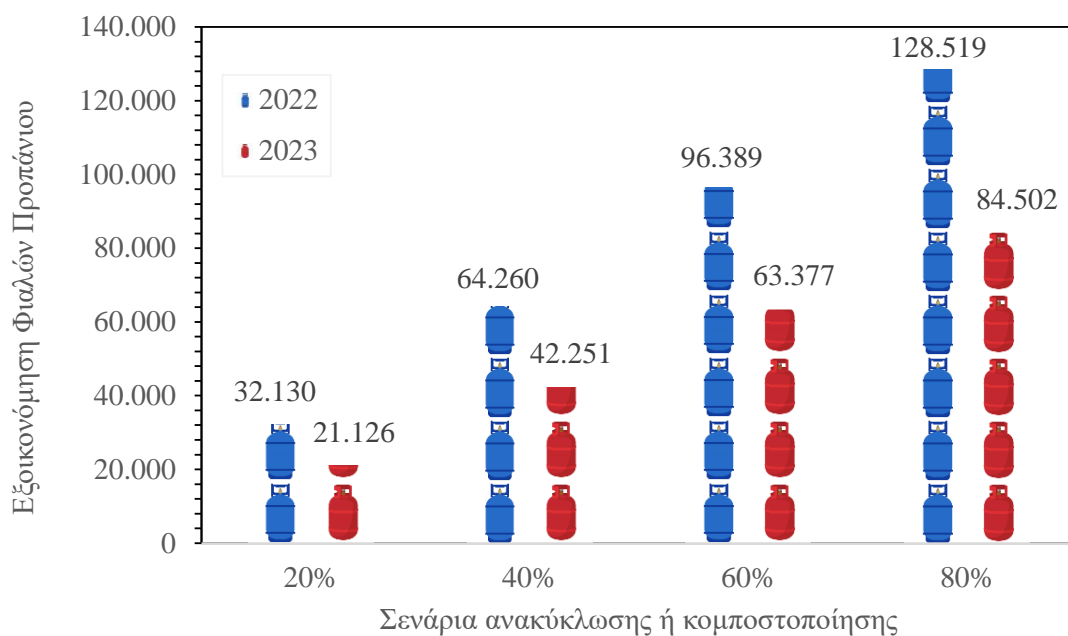
## Μεικτά Μέταλλα



**Διάγραμμα Π13:** Μεταβολές εκπομπών σε επιβατικά οχήματα από ανακύκλωση μεικτών μετάλλων

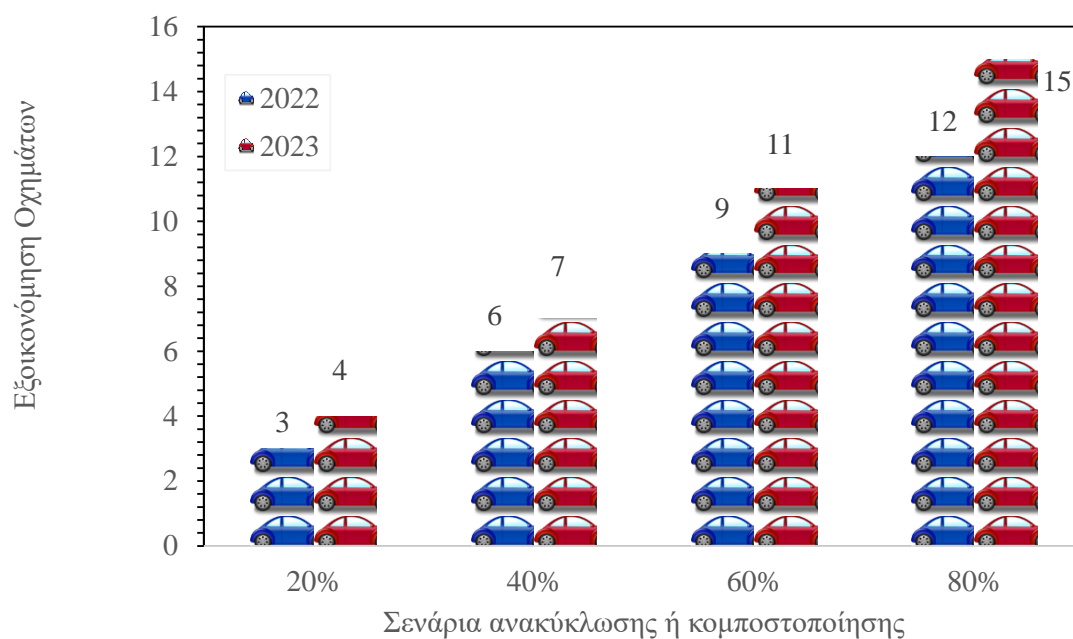


**Διάγραμμα Π14:** Μεταβολές εκπομπών σε γαλόνια βενζίνης από ανακύκλωση μεικτών μετάλλων

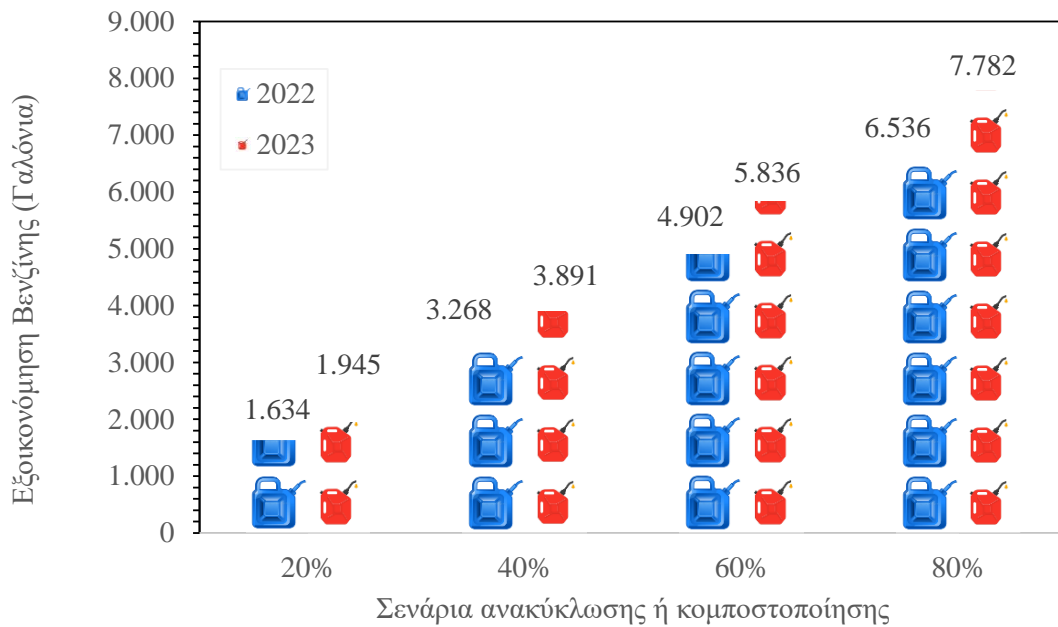


**Διάγραμμα Π15:** Μεταβολές εκπομπών σε φιάλες προπάνιου από ανακύκλωση μεικτών μετάλλων

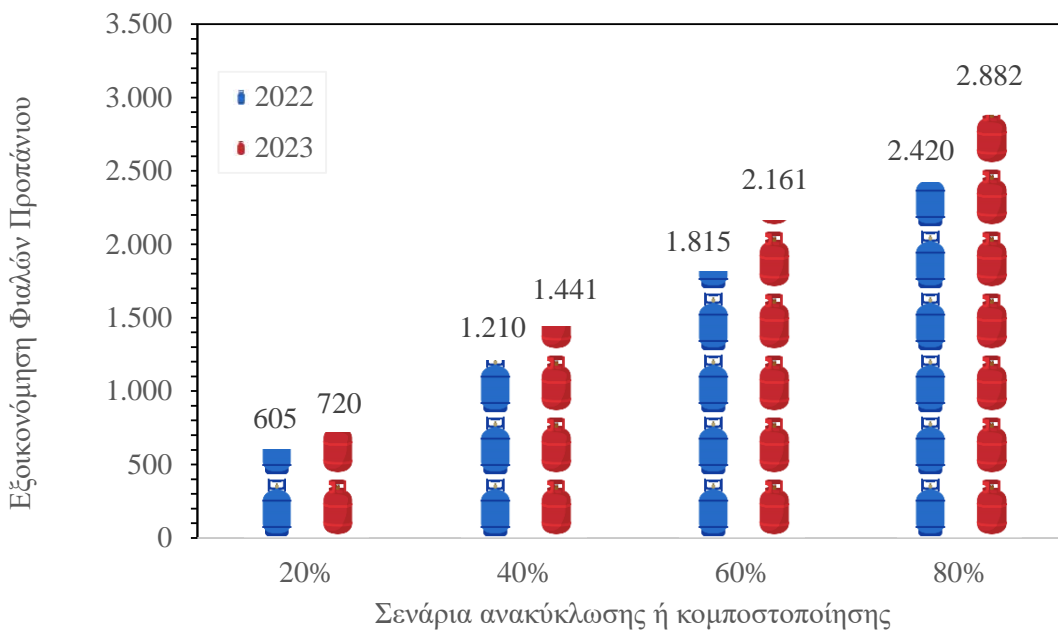
## Γυαλί



**Διάγραμμα Π16:** Μεταβολές εκπομπών σε επιβατικά οχήματα από ανακύκλωση γυαλιού

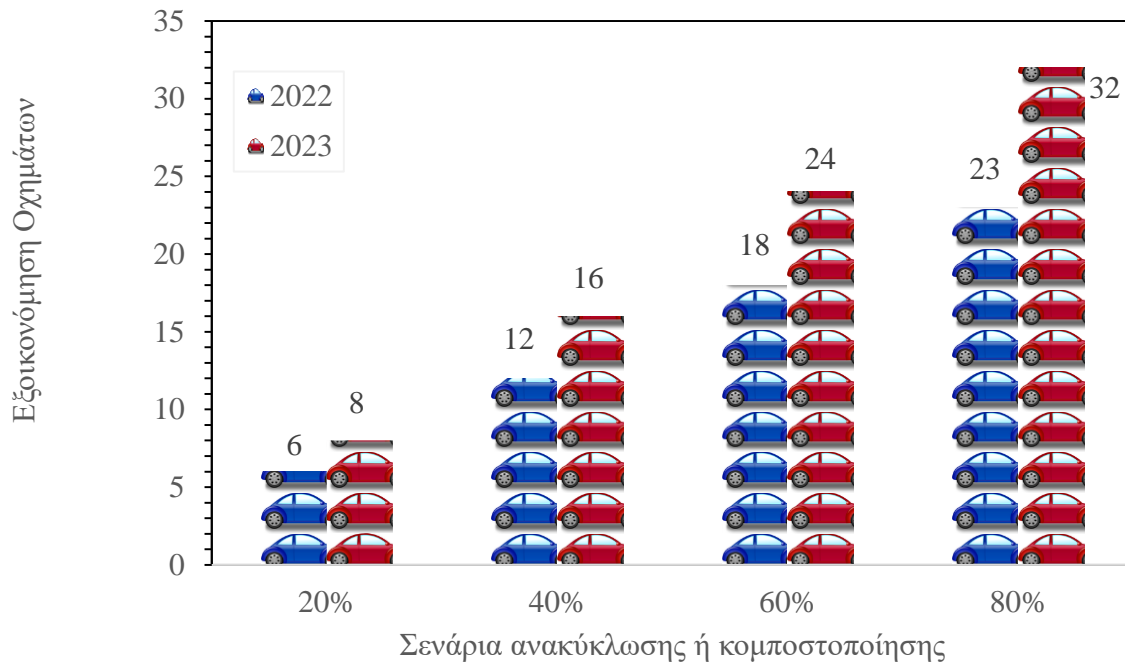


**Διάγραμμα Π17:** Μεταβολές εκπομπών σε γαλόνια βενζίνης από ανακύκλωση γυαλιού

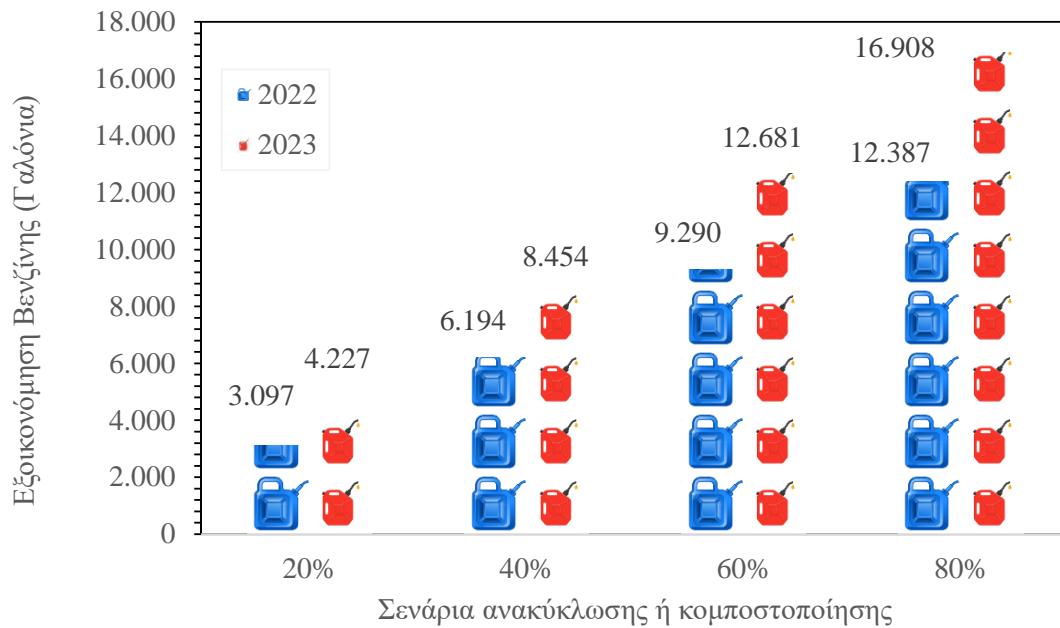


**Διάγραμμα Π18:** Μεταβολές εκπομπών σε φιάλες προπάνιου από ανακύκλωση γυαλιού

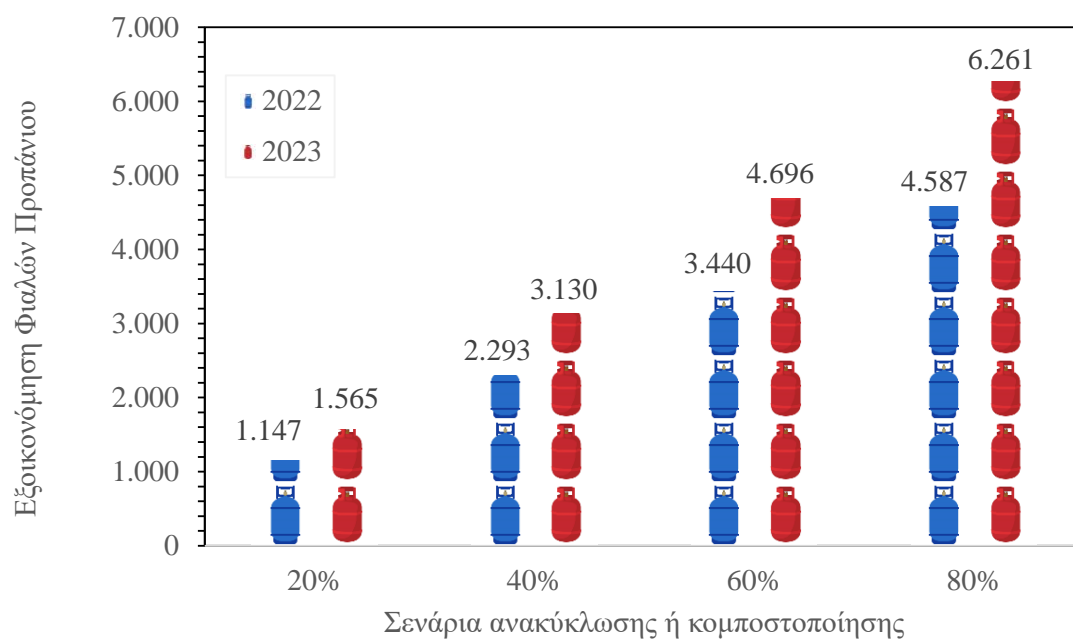
## Βιολογικά Απόβλητα



**Διάγραμμα Π19:** Μεταβολές εκπομπών σε επιβατικά οχήματα από κομποστοποίηση βιολογικών αποβλήτων

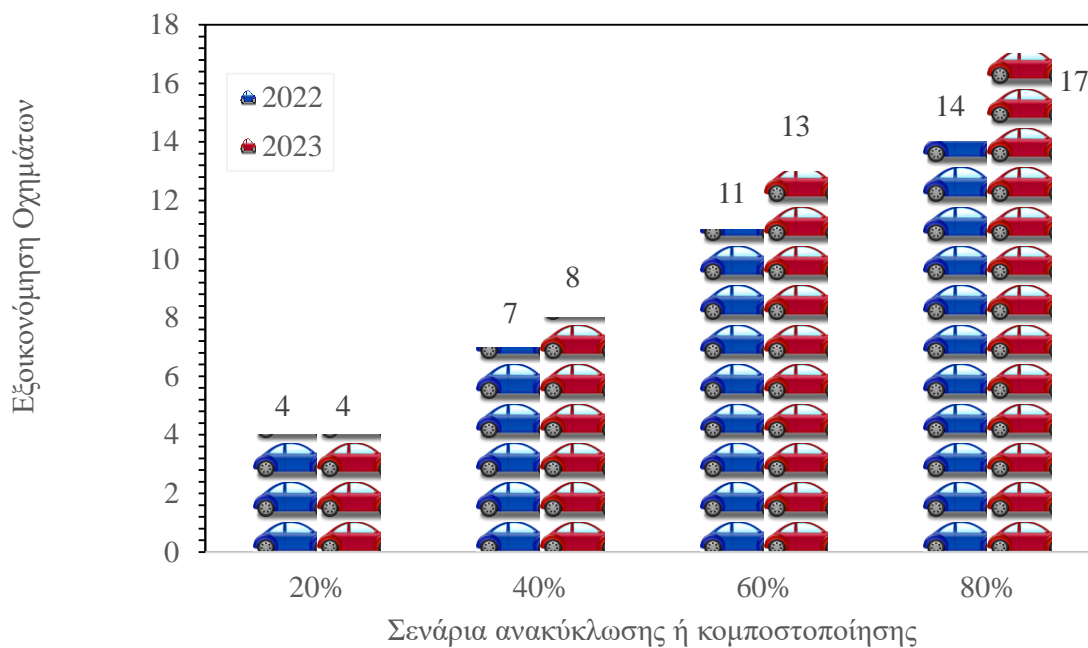


**Διάγραμμα Π20:** Μεταβολές εκπομπών σε γαλόνια βενζίνης από κομποστοποίηση βιολογικών αποβλήτων

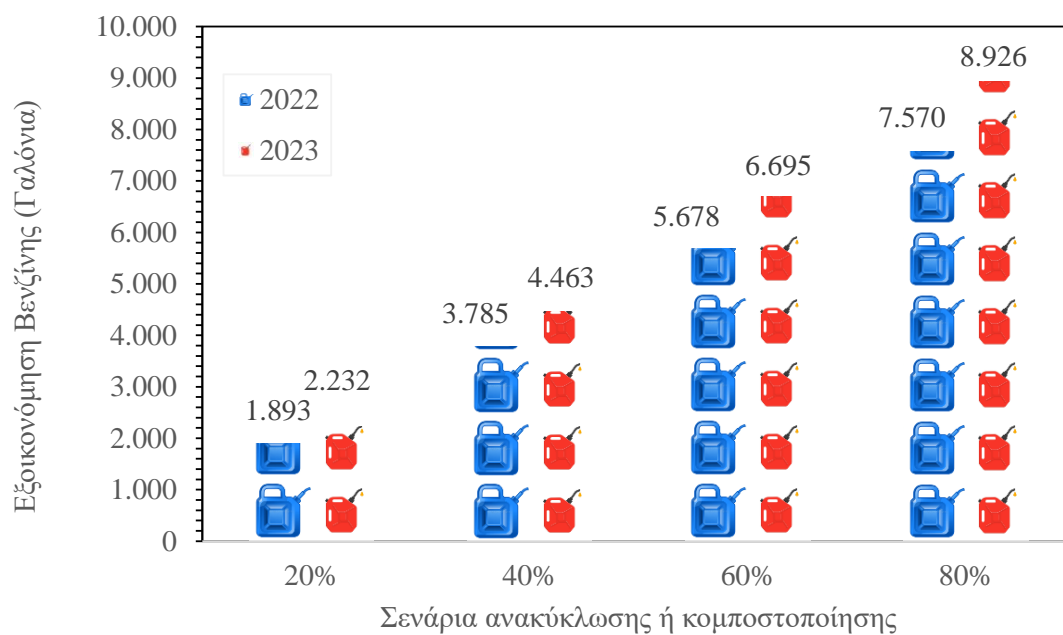


**Διάγραμμα Π21:** Μεταβολές εκπομπών σε φιάλες προπάνιου από κομποστοποίηση βιολογικών αποβλήτων

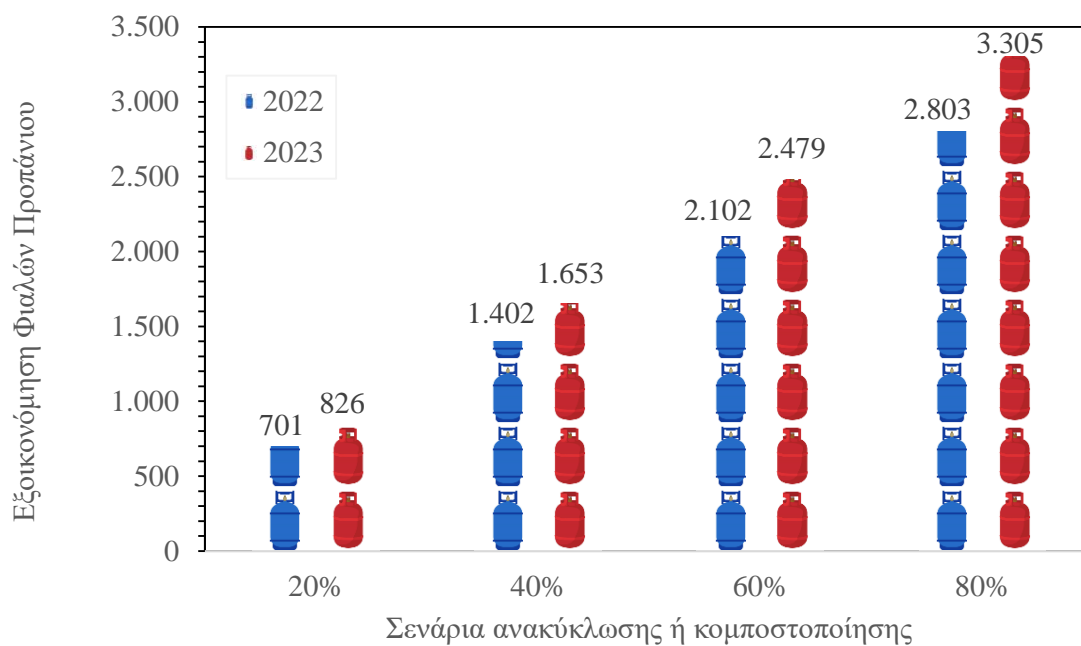
## Μεικτά Ηλεκτρονικά Απόβλητα



**Διάγραμμα Π22:** Μεταβολές εκπομπών σε επιβατικά οχήματα από ανακύκλωση μεικτών ηλεκτρικών αποβλήτων



**Διάγραμμα Π23:** Μεταβολές εκπομπών σε γαλιόνια βενζίνης από ανακύκλωση μεικτών ηλεκτρικών αποβλήτων



**Διάγραμμα Π24:** Μεταβολές εκπομπών σε φιάλες προπάνιου από ανακύκλωση μεικτών ηλεκτρικών αποβλήτων



Στο Παράρτημα 3 παρουσιάζεται εν συντόμως η επέκταση του WARM στο πρόγραμμα Microsoft Excel, με το οποίο υπολογίστηκαν όλα τα αριθμητικά αποτελέσματα. Παρακάτω αναφέρεται ο τρόπος χρήσης της επέκτασης, καθώς και όλες οι σχετικές ρυθμίσεις λειτουργίας.

Version 18

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

Waste Reduction Model (WARM) -- Inputs

Use this worksheet to describe the baseline and alternative waste management scenarios that you want to compare. The blue shaded areas indicate where you need to enter information.

Please enter data in short tons (1 short ton ~ 2,000 lbs.)

1. Describe the baseline generation and management for the waste materials listed below.

If the material is not generated or you do not want to analyze it, leave it blank or enter 0. Make sure that the total quantity generated equals the total quantity managed.

2. Describe the alternative management scenario for the waste materials generated in the baseline.

Any decrease or increase in generation should be entered in the Source Reduction column.

Any increase in generation should be entered in the Source Reduction column as a negative value.

Make sure that the total quantity generated equals the total quantity managed.

Material Type	Material	Tons Recycled	Tons Landfilled	Tons Combusted	Tons Composted	Tons Anaerobically Digested	Tons Generated	Tons Source Reduced	Tons Recycled	Tons Landfilled	Tons Combusted	Tons Composted	Tons Anaerobically Digested
Food Waste	Food Waste	NA					0.00		NA				
	Food Waste (non-meat)	NA					0.00		NA				
	Food Waste (meat only)	NA					0.00		NA				
	Beef	NA					0.00		NA				
	Poultry	NA					0.00		NA				
	Grains	NA					0.00		NA				
	Bread	NA					0.00		NA				
	Fruits and Vegetables	NA					0.00		NA				
	Dairy Products	NA					0.00		NA				
	Yard Trimmings	Yard Trimmings	NA					0.00	NA	NA			
	Grass	NA					0.00	NA	NA				
	Leaves	NA					0.00	NA	NA				
	Branches	NA					0.00	NA	NA				
Mixed Plastic	HDPE				NA	NA	0.00					NA	NA
	LDPE	NA			NA	NA	0.00		NA			NA	NA
	PET	NA			NA	NA	0.00					NA	NA
	LLDPE	NA			NA	NA	0.00		NA			NA	NA
	PP	NA			NA	NA	0.00					NA	NA
	PS	NA			NA	NA	0.00		NA			NA	NA
	PVC	NA			NA	NA	0.00		NA			NA	NA
	Mixed Plastics				NA	NA	0.00		0.00	0.00			NA
Bioplastics	PLA	NA			NA	NA	0.00		NA			NA	NA
	Desktop CPUs				NA	NA	0.00					NA	NA
	Portable Electronic Devices				NA	NA	0.00					NA	NA
Electronics	Flat-Panel Displays				NA	NA	0.00					NA	NA
	CRT Displays				NA	NA	0.00	NA				NA	NA
	Electronic Peripherals				NA	NA	0.00					NA	NA
	Hard-Copy Devices				NA	NA	0.00					NA	NA
	Mixed Electronics				NA	NA	19.00			19.00	0.00		NA
	Aluminum Cans				NA	NA	0.00			0.00		NA	NA

Analysis Inputs

Summary Report (MTC02)

Analysis Results (MTC02)

Production + EOL (MTC02)

Summary Report (sepp02)

Analysis Results (sepp02)

Production + EOL (sepp02)

Summary Report (LSE -- + + +)

**Εικόνα Π1:** Το WARM στο περιβάλλον του Microsoft Excel

Η Εικόνα Π1 δείχνει την κύρια καρτέλα «Analysis Inputs» του WARM, στην οποία εισάγονται όλες οι μεταβλητές για τα σενάρια προς διερεύνηση και ρυθμίζονται ανάλογα με τους επιθυμητούς περιορισμούς. Στην αριστερή πλευρά (βήμα 1) ορίστηκε το αρχικό σενάριο, ενώ στην δεξιά πλευρά (βήμα 2), ορίστηκε το εναλλακτικό σενάριο που μελετιόταν κάθε φορά. Οι τιμές στους συνολικούς τόνους που παράγονται στα δύο σενάρια πρέπει να συμφωνούν για κάθε υλικό. Για παράδειγμα, αν στη στήλη «Tons Landfilled» του αρχικού σεναρίου υπήρχε η τιμή 1000 για τη κατηγορία «Mixed Plastics», τότε το σύνολο των τιμών στις στήλες «Tons Source Reduced», «Tons Recycled», «Tons Landfilled», «Tons Combusted» και «Tons Anaerobically Digested» του εναλλακτικού σεναρίου έπρεπε να ισούται με 1000 για την ίδια κατηγορία.

Please select state or select national average: National Average

Region Location: National Average

**Εικόνα Π2:** Δήλωση μεταβλητής για εκπομπές που σχετίζονται με τον ηλεκτρισμό

Στο επόμενο βήμα, έγινε η επιλογή «National Average».

**Εικόνα Π3:** Επιλογές μορφής υλικών για μείωση πηγής

Στην Εικόνα Π3 φαίνονται οι διαθέσιμες επιλογές για τη διαχείριση αποβλήτων με μείωση πηγής. Εφόσον η διπλωματική αυτή εργασία δεν μελέτησε την εν λόγω διαδικασία, δεν γίνεται περαιτέρω αναφορά για αυτές τις ρυθμίσεις.

**Εικόνα Π4:** Δήλωση μεταβλητής για σύστημα ελέγχου αερίων χώρου υγειονομικής ταφής (LFG)

Για το σύστημα ελέγχου αερίων των χώρων υγειονομικής ταφής (LFG) επιλέχθηκε το στοιχείο «National Average».

**Εικόνα Π5:** Δήλωση μεταβλητής για ανάκτηση αερίων

Σχετικά με την ανάκτηση αερίων, υπάρχει δυνατότητα αξιοποίησης τους (επιλογή «Recover for energy») και δυνατότητα καύσης τους (επιλογή «flare»). Εξετάζοντας τα δεδομένα για το πλαίσιο αυτής της εργασίας, και κατόπιν υπόθεσης, έγινε η επιλογή «Recover for energy».

	Landfill gas collection efficiency (%) assumptions
Typical	Years 0-1: 0%; Years 2-4: 50%; Years 5-14: 75%; Years 15 to 1 year before final cover: 82.5%; Final cover: 90%
Worst-case	Years 0-4: 0%; Years 5-9: 50%; Years 10-14: 75%; Years 15 to 1 year before final cover: 82.5%; Final cover: 90%
Aggressive	Year 0: 0%; Years 0.5-2: 50%; Years 3-14: 75%; Years 15 to 1 year before final cover: 82.5%; Final cover: 90%
California	Year 0: 0%; Year 1: 50%; Years 2-7: 80%; Years 8 to 1 year before final cover: 85%; Final cover: 90%

**Εικόνα Π6:** Επιλογές απόδοσης για τη συλλογή αερίων

Στη συνέχεια, δηλώνεται η απόδοση της διαδικασίας συλλογής αερίων. Αφού έγινε η υπόθεση ότι η απόδοση της διαδικασίας συνάδει με τον μέσο όρο, επιλέχθηκε το στοιχείο «Typical Operation - DEFAULT».

☒ National average - DEFAULT  
☐ Dry ( $k=0.02$ )  
☐ Moderate ( $k = 0.04$ )  
☐ Wet ( $k = 0.06$ )  
☐ Bioreactor ( $k = 0.12$ )

*Dry ( $k=0.02$ )  
Moderate ( $k=0.04$ )  
Wet ( $k=0.06$ )  
Bioreactor ( $k=0.12$ )  
National average*

*Moisture condition assumptions  
Less than 20 inches of precipitation per year  
Between 20 and 40 inches of precipitation per year  
Greater than 40 inches of precipitation per year  
Water is added until the moisture content reaches 40 percent moisture on a wet weight basis  
Weighted average based on the share of waste received at each landfill type*

**Εικόνα Π7:** Επιλογές για την κατάσταση υγρασίας του χώρου υγειονομικής ταφής

Όμοια με το προηγούμενο βήμα, επιλέγεται βάσει υπόθεσης το στοιχείο «National Average - DEFAULT», αναφορικά με την κατάσταση υγρασίας του χώρου υγειονομικής ταφής.

☐ Wet Digestion  
☒ Dry Digestion

**Εικόνα Π8:** Επιλογές για το είδος της αναερόβιας χώνευσης

Οι Εικόνες Π8 – Π9 αφορούν ρυθμίσεις για την αναερόβια χώνευση, η οποία επίσης αποτελεί μία διαδικασία που δεν μελετήθηκε στην παρούσα εργασία. Οι ρυθμίσεις για αυτή τη διαδικασία έμειναν अपαράλλακτες, βάσει των προκαθορισμένων επιλογών.

☒ Cured - DEFAULT  
☐ Not cured

**Εικόνα Π9:** Επιλογές σχετικά με το προϊόν της αναερόβιας χώνευσης

☒ Use Default Distances  
☐ Provide Information

**Εικόνα Π10:** Δήλωση μεταβλητής σχετικά με τις αποστάσεις μετακίνησης των απορριμμάτων

Η δήλωση αποστάσεων αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 2.

**Total Change in GHG Emissions (MTCO<sub>2</sub>E):** **(17,56)**

<b>This is equivalent to...</b>	
Removing annual emissions from	<b>4</b> Passenger Vehicles
Conserving	<b>1.976</b> Gallons of Gasoline
Conserving	<b>732</b> Cylinders of Propane Used for Home Barbeques
<b>0,00000%</b> Annual CO <sub>2</sub> emissions from the U.S. transportation sector	
<b>0,00000%</b> Annual CO <sub>2</sub> emissions from the U.S. electricity sector	

**Εικόνα Π11:** Αποτελέσματα υπολογισμών και ισοδύναμα εξοικονόμησης

Στην Εικόνα Π11 φαίνεται ο πίνακας αποτελεσμάτων του WARM, ο οποίος βρίσκεται στην καρτέλα «Summary Report». Από αυτόν τον πίνακα καταγράφηκαν όλα τα αριθμητικά της εργασίας, σχετικά με την ελάττωση των ετήσιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στα ισοδύναμα εξοικονόμησης που συζητήθηκαν

## Βιβλιογραφία

Αναφέρονται με αλφαβητική σειρά:

Beetle Car Image. Διαθέσιμο στο:

<https://www.wpclipart.com/transportation/car/beetle/index.html>, πρόσβαση 01/05/2024.

Eurostat. Municipal Waste Statistics. Διαθέσιμο στο: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal\\_waste\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal_waste_statistics), πρόσβαση 01/05/2024.

Fuel Cannister Image. Διαθέσιμο στο: <https://www.vecteezy.com/free-vector/fuel-can>, πρόσβαση 01/05/2024.

Propane Tank Image. Διαθέσιμο στο: <https://www.istockphoto.com/illustrations/propane-tank>, πρόσβαση 01/05/2024.

United Nations (Department of Economic and Social Affairs). World Urbanization Prospects 2018 Highlights. Διαθέσιμο στο: <https://population.un.org/wup/publications/Files/WUP2018-Highlights.pdf>, πρόσβαση 01/05/2024.

United States Environmental Protection Agency. WARM Waste Reduction Model (v.16 Dec 2023). Διαθέσιμο στο: <https://www.epa.gov/warm/versions-waste-reduction-model#v16>

U.S. Environmental Protection Agency Office of Resource Conservation and Recovery. Background Chapters Διαθέσιμο στο: [https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-12/warm-background\\_v16\\_dec.pdf](https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-12/warm-background_v16_dec.pdf), πρόσβαση 01/05/2024.

U.S. Environmental Protection Agency Office of Resource Conservation and Recovery. Management Practices Chapters. Διαθέσιμο στο: [https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-01/warm\\_management\\_practices\\_v16\\_dec.pdf](https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-01/warm_management_practices_v16_dec.pdf), πρόσβαση 01/05/2024.

Δρ. Χαράλαμπος Κάβουρας (2024) Συνολική Ποσότητα Ανακυκλώσιμων Αποβλήτων στο Αεροδρόμιο 2023. Προσωπική επικοινωνία, 23 Απριλίου 2024

Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο. Κυκλική οικονομία, χρησιμοποίησε το ξανά!. Διαθέσιμο στο: <https://www.europarl.europa.eu/topics/el/article/20151201STO05603/kukliki-oikonomia7chrisimopoiise-to-xana>, πρόσβαση 01/05/2024.

Υπηρεσία Περιβάλλοντος του Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών Α.Ε. Φροντίδα για το Περιβάλλον (Τεύχος 25, 2023). Διαθέσιμο στο: <https://media.aia.gr/ebooks/care-for-the-environment/issue25/mobile/index.html#p=1>, πρόσβαση 01/05/2024.