

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ: ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ



Διαχείριση Αποβλήτων κατά τη Λειτουργία Αεροδρομίου: Σύγχρονες Προσεγγίσεις και
Ενδεικτικές Μελέτες Περίπτωσης

ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ: ΔΙΑΔΕ

Τελική Διπλωματική Εργασία

Πρόδρομος Μήτκος

Αριθμός Μητρώου: 115534

Επιβλέπων Α: Σταυρούλα Δημητριάδου

Επιβλέπων Β: Ιωάννης Καλαβρουζιώτης

Σεπτέμβριος 2026

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	4
1.1 Το περιβάλλον των αερομεταφορών και περιβαλλοντικές επιπτώσεις.....	4
1.2 Σκοπός, στόχοι και δομή της εργασίας	6
2. Μεθοδολογία Έρευνας	7
2.1 Περιγραφή της μεθόδου συστηματικής ανασκόπησης (PRISMA)	8
2.2 Κριτήρια επιλογής και αποκλεισμού βιβλιογραφίας, πηγές δεδομένων.....	9
2.2.1 Πηγές πληροφοριών (Information Sources)	9
2.2.2 Στρατηγική αναζήτησης και Λέξεις-Κλειδιά (Search Strategy)	10
2.2.3 Κριτήρια Επιλεξιμότητας (Eligibility Criteria)	11
2.2.4 Διαδικασία Επιλογής Μελετών (Selection Process)	13
2.3 Μεθοδολογικά Εργαλεία και Τεχνολογικοί Άξονες της Έρευνας.....	16
3. Χαρακτηριστικά Αποβλήτων και Θεσμικό Πλαίσιο	16
3.1 Κατηγοριοποίηση Αποβλήτων	17
3.1.2 Απόβλητα Κατασκευών και Κατεδαφίσεων (C&D)	19
3.1.3 Βιομηχανικά και Επικίνδυνα Απόβλητα	19
3.1.4 Απόβλητα Αεροσκαφών (Cabin Waste)	20
3.2 Νομοθετικό Πλαίσιο: Οδηγίες ΕΕ και Κανονισμοί για τα Διεθνή Απόβλητα Τροφοδοσίας	23
3.2.1 Η Οδηγία Πλαίσιο και η Ιεράρχηση των Αποβλήτων	23
3.2.2 Το Ζήτημα των Διεθνών Αποβλήτων Τροφοδοσίας (ICW)	24
3.3 Λειτουργικά Εμπόδια και Προκλήσεις στη Διαχείριση Αποβλήτων.....	25
3.3.1 Περιορισμοί Χώρου και Χρόνου	25
3.3.2 Ζητήματα Ασφάλειας και Βιοασφάλειας	26
3.3.3 Ο Ανθρώπινος Παράγοντας και η Πολυπλοκότητα των Εμπλεκόμενων Μερών ..	27
3.3.4 Έλλειψη Κατάλληλων Υποδομών Επεξεργασίας (Lack of On-site Infrastructure) ..	28
Κεφάλαιο 4: Στρατηγικές Κυκλικής Οικονομίας και Τεχνολογίες Διαχείρισης	29
4.1 Ιεράρχηση Αποβλήτων και Κυκλική Οικονομία: Από το 3R στο Πλαίσιο 9R	29
4.1.1 Η Κλασική Ιεράρχηση (Waste Hierarchy)	30
4.1.2 Το Καινοτόμο Πλαίσιο "9R" για τα Αεροδρόμια	30

4.2 Καινοτόμες Τεχνολογίες: Ευφυή Συστήματα και Αυτοματισμός	31
4.2.1 Συστήματα Πολλαπλών Πρακτόρων (Multi-Agent Systems - MAS).....	32
4.2.2 Έξυπνοι Κάδοι με Μηχανική Μάθηση (Smart Bins & Deep Learning).....	32
4.3 Τεχνολογίες Ανάκτησης Ενέργειας και Παραγωγή Υδρογόνου	34
4.3.1 Βιοχημική Διεργασία: Αναερόβια Χώνευση.....	35
4.3.2 Τεχνολογική Ενοποίηση: Αναμόρφωση Ατμού και Καθαρισμός	35
4.3.3 Η Κρίσιμη Σημασία της Διαλογής στην Ενεργειακή Απόδοση	36
4.3.4 Περιβαλλοντική Αποτίμηση και Μείωση Ανθρακικού Αποτυπώματος	36
4.4 Μέτρηση της Απόδοσης: Ο Δείκτης Zero Waste Index (ZWI).....	37
4.4.1 Ορισμός και Μεθοδολογία του ZWI	37
4.4.2 Εφαρμογή και Οφέλη στα Αεροδρόμια.....	39
5. Μελέτη Περίπτωσης και Προτεινόμενο Μοντέλο Διαχείρισης	40
5.1 Διεθνής Αερολιμένας Αθηνών «Ελ. Βενιζέλος»: Υφιστάμενη Κατάσταση και Κριτική Αξιολόγηση	41
5.1.1 Παραγωγή και Ροές Αποβλήτων	41
5.1.2 Στρατηγική Διαχείρισης: Η Αρχή «Ο Ρυπαίνων Πληρώνει»	42
5.1.3 Κριτική Αξιολόγηση της Κυκλικής Επίδοσης μέσω του ZWI.....	43
5.2 Ολοκληρωμένη Πρόταση: Το Μοντέλο «Smart Circular Airport» για τον ΔΑΑ	45
5.2.1 Φάση 1: Κοινωνική Μηχανική και Στρατηγική Πρόληψης (R0–R3).....	45
5.2.2 Φάση 2: Έξυπνη Διαλογή με Μηχανική Μάθηση και Αισθητήρες (R8)	46
5.2.3 Φάση 3: Τεχνο-Οικονομικό Μοντέλο Παραγωγής Βιο-Υδρογόνου (R9) σε Συνέργεια με τα Φ/Β	47
5.2.4 Συγκεντρωτικά Οφέλη και Πρόβλεψη Μεταβολής του ZWI.....	48
6. Συμπεράσματα και Προτάσεις	50
6.1 Σύνοψη Ευρημάτων: Η Ανάγκη Μετάβασης στην Κυκλική Οικονομία.....	50
6.2 Η Καινοτομία της Προτεινόμενης Λύσης για τον ΔΑΑ.....	50
6.3 Περιορισμοί της Έρευνας	51
6.4 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα	51
Βιβλιογραφία	52

1. Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στη διερεύνηση σύγχρονων και βιώσιμων πρακτικών διαχείρισης αποβλήτων στο ιδιαίτερα απαιτητικό περιβάλλον των διεθνών αερολιμένων. Στο πλαίσιο αυτό, το πρώτο κεφάλαιο εισάγει τον αναγνώστη στο οικοσύστημα των αερομεταφορών, αναδεικνύοντας τις σύγχρονες περιβαλλοντικές προκλήσεις και την επιτακτική ανάγκη μετάβασης προς την Κυκλική Οικονομία. Παράλληλα, προσδιορίζεται το πλαίσιο της έρευνας, καθορίζονται οι αντικειμενικοί στόχοι και παρουσιάζονται συνοπτικά οι βασικοί άξονες καινοτομίας που θα αναλυθούν διεξοδικά στα επόμενα κεφάλαια, όπως η χρήση ευφών συστημάτων (Multi-Agent Systems) για τη βελτιστοποίηση της διαλογής και η ενεργειακή αξιοποίηση οργανικών αποβλήτων για την παραγωγή υδρογόνου.

1.1 Το περιβάλλον των αερομεταφορών και περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

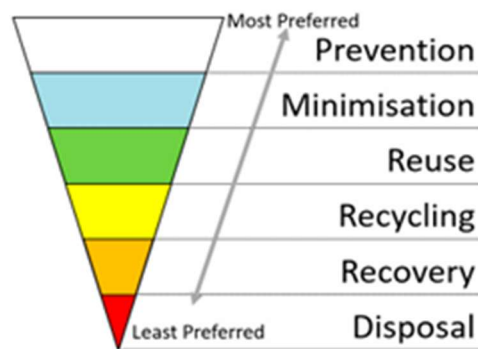
Η αεροπορική βιομηχανία αποτελεί έναν από τους ταχύτερα αναπτυσσόμενους τομείς παγκοσμίως, συμβάλλοντας σημαντικά στην παγκόσμια οικονομία καθώς και στην διασύνδεση των κοινωνιών (Sreenath et al., 2021). Η επιβατική κίνηση στην πολιτική αεροπορία πλησίασε τα 4,3 δισεκατομμύρια επιβάτες το 2023 , με τα συνολικά έσοδα να ξεπερνούν τα 896 δισεκατομμύρια δολάρια (People's Daily, 2024). Όπως γίνεται αντιληπτό τα αεροδρόμια πλέον δεν λειτουργούν μόνο ως κόμβοι μεταφορών, αλλά έχουν εξελιχθεί και παρομοιάζονται και ως «μικρές πόλεις» , καθώς φιλοξενούν ξενοδοχεία, εστιατόρια, διάφορα καταστήματα λιανικής πώλησης καθώς και ολόκληρα συγκροτήματα με γραφεία. Η παγκόσμια παραγωγή αποβλήτων για τα αεροδρόμια έχει πλέον ξεπεράσει τα 5,7 εκατομμύρια τόνους για το 2017 και οι προβλέψεις μιλάνε για αύξηση 100% έως το 2027. Αυτή η εξέλιξη των αεροδρομίων σε πολυσύνθετα επιχειρηματικά εμπορικά κέντρα έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή τεράστιων ποσοτήτων αποβλήτων, η διαχείριση των οποίων αποτελεί μια σύνθετη διαδικασία. Οι ροές αποβλήτων στα αεροδρόμια προέρχονται από πολλές πηγές, όπως οι τερματικοί σταθμοί, τα αεροσκάφη, οι εγκαταστάσεις συντήρησης και τα γραφεία διοίκησης (Federal Aviation Administration, 2013). Τα απόβλητα κατηγοριοποιούνται επιπλέον σε Αστικά Στερεά Απόβλητα (MSW) όπου αναφέρονται σε απόβλητα από τους χώρους αναμονής καθώς και τα γραφεία, σε απόβλητα από τις πτήσεις (deplaned waste), σε απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων (C&D) τα οποία είναι κυρίως από έργα επέκτασης του

αεροδρομίου, και τέλος σε επικίνδυνα απόβλητα από τη συντήρηση αεροδρομίων (Port Authority of NY & NJ (PANYNJ), 2024).

Ιδιαίτερη αναφορά πρέπει να γίνει για τα απόβλητα που παράγονται εντός των αεροσκαφών (cabin waste) τα οποία και κατέχουν πολύ υψηλό ποσοστό επί του συνολικού όγκου. Η παραγωγή αυτών των Αστάνα αποβλήτων αυξάνεται ανάλογα με την διάρκεια της πτήσης, καθώς μεγάλης διάρκειας πτήση παράγει πολύ μεγαλύτερες ποσότητες, εξαιτίας των γευμάτων που προσφέρονται (Blanca-Alcubilla et al., 2019). Ένα κρίσιμο ζήτημα για την διαχείριση των συγκεκριμένων αποβλήτων είναι η παρουσία οργανικών υπολειμμάτων τροφίμων (catering waste), τα οποία ειδικά στις διεθνείς πτήσεις, υπόκεινται σε πολύ αυστηρούς κανονισμούς (όπως ο Κανονισμός (ΕΚ) 1069/2009 στην Ευρώπη) για την αποφυγή μετάδοσης ασθενειών, οδηγώντας συχνά στην υποχρεωτική ταφή ή την αποτέφρωση τους αντί για την ανακύκλωση. Αυτό γίνεται διότι ο παραπάνω κανονισμός απαγορεύει την ανακύκλωση αποβλήτων που προέρχονται εκτός Ευρωπαϊκής Ένωσης (Gunerhan et al., 2025).

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την ελλιπή διαχείριση είναι σημαντικές, η παραδοσιακή υγειονομική ταφή συμβάλλει στην εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου (GHG), επιδεινώνοντας την κλιματική αλλαγή. Ένα παράδειγμα μελέτης είναι το Διεθνές Αεροδρόμιο της Αστάνα, τα αποτελέσματα της οποίας κατέδειξαν ότι τα σενάρια που βασίζονται αποκλειστικά στην ταφή έχουν το υψηλότερο αποτύπωμα άνθρακα σε σύγκριση με τα υπόλοιπα σενάρια τα οποία ενσωματώνουν την ανακύκλωση και την ανάκτηση ενέργειας (Sarbasov et al., 2020). Συνεπώς, η κατανάλωση πόρων και η διόγκωση του όγκου των αποβλήτων καθιστούν επιτακτική την ανάγκη για μια ριζική αλλαγή παραδείγματος.

Παρά τις αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, η διαχείριση αποβλήτων στα αεροδρόμια εξακολουθεί να βασίζεται σε μεγάλο βαθμό σε συμβατικές μεθόδους διάθεσης. Σύμφωνα με την ιεράρχηση στην διαχείριση των αποβλήτων (Waste Management Hierarchy), η οποία θέτει ως προτεραιότητα την πρόληψη και την επαναχρησιμοποίηση, η υγειονομική ταφή είναι η λιγότερη επιθυμητή επιλογή, παρ' όλα αυτά, είναι η πιο κοινή πρακτική για τα απόβλητα που δέχονται ανάκτηση (Baxter et al., 2018a).



Εικόνα 1.1. Ιεραρχία διαχείρισης αποβλήτων (Baxter et al., 2018a)

Τις περισσότερες φορές τα απόβλητα αποτεφρώνονται, είτε για λόγους ασφαλείας είτε για μείωση όγκου, διαδικασία που, αν δεν συνοδεύεται από ανάκτηση ενέργειας, δεν θεωρείται βιώσιμη.

Η μετάβαση από το γραμμικό μοντέλο οικονομίας σε μοντέλα Κυκλικής Οικονομίας (Circular Economy) αποτελεί τη μόνη βιώσιμη λύση. Μέσω του μετασχηματισμού των αεροδρομίων σε κυκλικά συστήματα, τα υλικά μπορούν να ανακτώνται και να επαναχρησιμοποιούνται, μειώνοντας την ανάγκη για παρθένα υλικά και ελαχιστοποιώντας τα τελικά απόβλητα (Tjahjono et al., 2023).

1.2 Σκοπός, στόχοι και δομή της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως κύριο στόχο τη συστηματική επισκόπηση της βιβλιογραφίας και τη διερεύνηση βιώσιμων μοντέλων διαχείρισης αποβλήτων σε διεθνή αεροδρόμια καθώς και την αξιολόγηση της εφαρμογής στρατηγικών μηδενικών αποβλήτων (Zero Waste). Σκοπός είναι να αναδειχθούν βιώσιμες λύσεις που μειώνουν πραγματικά το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των αερολιμένων, ενώ παράλληλα προσφέρουν οικονομικά οφέλη μέσω της ανάκτησης υλικών και ενέργειας. Σημαντικός είναι ο ρόλος των αναδυόμενων τεχνολογιών στην επίτευξη αυτού του στόχου. Τέλος, εξετάζεται ως μελέτη περίπτωσης η εφαρμογή αναδυόμενων μεθόδων διαχείρισης στον Διεθνή Αερολιμένα Αθηνών «Ελευθέριος Βενιζέλος». Η καινοτομία της συγκεκριμένης μελέτης έγκειται στη σύνθεση τριών βασικών αξόνων: (α) τη χρήση Συστημάτων Πολλαπλών Πρακτόρων (MAS) για τη

βελτιστοποίηση της διαλογής, (β) την ενεργειακή αξιοποίηση του οργανικού κλάσματος για παραγωγή υδρογόνου, και (γ) την αξιολόγηση της απόδοσης μέσω του δείκτη Zero Waste Index (ZWI). Όπως επισημαίνεται στη σύγχρονη βιβλιογραφία, ενώ οι τεχνολογίες αυτές εξετάζονται μεμονωμένα, η συνδυαστική και ολιστική εφαρμογή τους στο σύνθετο περιβάλλον των αερολιμένων συνιστά ένα σημαντικό βιβλιογραφικό κενό το οποίο δεν έχει εξεταστεί επαρκώς μέχρι σήμερα (Tjahjono et al., 2023).

Δομή της Εργασίας

Η μελέτη διαρθρώνεται ως εξής:

- Στο **Κεφάλαιο 2** αναπτύσσεται η μεθοδολογία της έρευνας, η οποία βασίζεται στη συστηματική ανασκόπηση της βιβλιογραφίας, σύμφωνα με το πρότυπο PRISMA, που περιλαμβάνει σαφή κριτήρια ένταξης και αποκλεισμού των πηγών.
- Το **Κεφάλαιο 3** μελετάμε τα τεχνικά χαρακτηριστικά των αποβλήτων που παράγονται από τα αεροδρόμια, καθώς και το ισχύον θεσμικό πλαίσιο, με μεγάλη βαρύτητα στους περιορισμούς που θέτουν οι κανονισμοί βιοασφάλειας.
- Το **Κεφάλαιο 4** εστιάζει στις στρατηγικές Κυκλικής οικονομίας και τις καινοτόμες τεχνολογίες, αναλύοντας λεπτομερώς τα Συστήματα Πολλαπλών Πρακτόρων και τις μεθόδους παραγωγής υδρογόνου.
- Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζεται η μελέτη περίπτωσης του Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών (ΔΑΑ) και η σύγκριση του με τα διεθνή αεροδρόμια όπως το Gatwick και της Κωνσταντινούπολης.
- Τέλος στο **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζονται συνοπτικά τα τελικά συμπεράσματα και διατυπώνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα και επιχειρησιακή εφαρμογή.

2. Μεθοδολογία Έρευνας

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο αναλύεται η μεθοδολογική προσέγγιση που χρησιμοποιήθηκε για να γίνει η σύνταξη της διπλωματικής εργασίας. Προκειμένου να προστατευτεί η αντικειμενικότητα και η επαναληψιμότητα της έρευνας, χρησιμοποιήθηκε το πρότυπο PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) (Page et al., 2021). Η συγκεκριμένη μέθοδος

επιτρέπει τη συστηματική επισκόπηση της βιβλιογραφίας για την υφιστάμενη κατάσταση και τις αναδυόμενες μεθόδους διαχείρισης αποβλήτων στα αεροδρόμια.

2.1 Περιγραφή της μεθόδου συστηματικής ανασκόπησης (PRISMA)

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και την διερεύνηση των σύγχρονων πρακτικών διαχείρισης αποβλήτων στα αεροδρόμια, έχει υιοθετηθεί η μεθοδολογία της συστηματικής βιβλιογραφικής επισκόπησης (Systematic Literature Review). Η διαδικασία ακολουθεί το πρότυπο **PRISMA** (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Το πρότυπο **PRISMA** αποτελεί ένα διεθνώς αναγνωρισμένο εργαλείο που καθοδηγεί τους ερευνητές στη σωστή αναφορά και οργάνωση των αποτελεσμάτων μιας επισκόπησης, ελαχιστοποιώντας τον κίνδυνο μεροληψίας κατά την επιλογή των πηγών. Επιπλέον, η εργασία ευθυγραμμίζεται με τη λίστα ελέγχου 27 σημείων της μεθόδου PRISMA 2020, η οποία καλύπτει όλα τα απαραίτητα πεδία από τον τίτλο έως τη συζήτηση των αποτελεσμάτων (Page et al., 2021).

Η επιλογή της συγκεκριμένης μεθοδολογίας κρίθηκε απαραίτητη καθώς προσφέρει ένα τυποποιημένο και αυστηρό πλαίσιο αναφοράς, το οποίο διασφαλίζει τη διαφάνεια, την επαληθευσσιμότητα και την πληρότητα στη διαδικασία συλλογής και αξιολόγησης των ερευνητικών δεδομένων. Μέσω της μεθόδου PRISMA, η διαδικασία αναζήτησης και επιλογής των άρθρων παύει να είναι μια απλή παράθεση πηγών και μετατρέπεται σε μια δομημένη επιστημονική διαδικασία που μπορεί να αναπαραχθεί από οποιανδήποτε ερευνητή (Page et al., 2021).

Η εργασία βασίστηκε στα τέσσερα θεμελιώδη στάδια:

1. **Αναγνώριση (Identification):** Στο αρχικό στάδιο, πραγματοποιείται εκτενής αναζήτηση στις ακαδημαϊκές βάσεις δεδομένων (Scopus, ScienceDirect, Google Scholar). Χρησιμοποιήθηκαν οι εξής συνδυασμοί: α) ("airport waste management" OR "aviation waste") AND ("circular economy" OR "zero waste"), β) ("multi-agent systems" OR "MAS") AND ("waste sorting") AND ("airport"), και γ) ("hydrogen production") AND ("organic waste" OR "cabin waste") AND ("airport"). Αυτό γίνεται για τον εντοπισμό του μέγιστου δυνατού αριθμού σχετικών δημοσιεύσεων που αφορούν τη διαχείριση αποβλήτων σε αεροδρόμια και τις καινοτόμες στρατηγικές Zero Waste.

2. **Διαλογή (Screening):** Αφού έχει γίνει η συγκέντρωση των αποτελεσμάτων, ακολουθεί ο έλεγχος των τίτλων και των περιλήψεων. Σε αυτή τη φάση εφαρμόζονται τα πρώτα αυστηρά κριτήρια αποκλεισμού, τα οποία περιλαμβάνουν: α) την αφαίρεση των διπλότυπων εγγραφών, β) τον αποκλεισμό άρθρων που αναφέρονται σε αστικά απόβλητα γενικά χωρίς καμία άμεση εφαρμογή σε αερολιμένες, και γ) τον αποκλεισμό μελετών που δεν είναι δημοσιευμένες στην αγγλική ή ελληνική γλώσσα.
3. **Επιλεξιμότητα (Eligibility):** Οι μελέτες που προκρίθηκαν από τη διαλογή υποβάλλονται σε λεπτομερή αξιολόγηση του πλήρους κειμένου τους. Εδώ εξετάζεται αν πληρούνται τα αυστηρά κριτήρια ένταξης που έχουν τεθεί. Ως βασικά κριτήρια ορίστηκαν η χρονολογία δημοσίευσης (επιλέχθηκαν άρθρα της τελευταίας 10ετίας, 2015-2025, για τη διασφάλιση της επικαιρότητας), η άμεση συνάφεια του περιεχομένου με τις τεχνολογίες αιχμής που εξετάζει η εργασία (π.χ. έξυπνοι κάδοι MAS, βιο-υδρογόνο) και η επιστημονική εγκυρότητα (δημοσίευση σε έγκριτα peer-reviewed περιοδικά).
4. **Ένταξη (Included):** Στο τελικό στάδιο, ορίζεται ο ακριβής αριθμός των πηγών που θα αποτελέσουν τη βάση για τη σύνθεση του θεωρητικού και ερευνητικού μέρους της διπλωματικής εργασίας. Οι πηγές αυτές κωδικοποιούνται και τα δεδομένα τους αναλύονται στα επόμενα κεφάλαια (Page et al., 2021).

2.2 Κριτήρια επιλογής και αποκλεισμού βιβλιογραφίας, πηγές δεδομένων

Η αποτελεσματικότητα και η επιστημονική εγκυρότητα μιας συστηματικής ανασκόπησης εξαρτώνται άμεσα από τον καθορισμό σαφών και προκαθορισμένων κριτηρίων καταλληλότητας. Στην συγκεκριμένη μελέτη, η σχεδιασμός για την αναζήτηση σχεδιάστηκε με γνώμονα την σύνθετη φύση της διαχείρισης αποβλήτων στα αεροδρόμια, συνδυάζοντας την περιβαλλοντική επιστήμη με τις αναδυόμενες τεχνολογίες.

2.2.1 Πηγές πληροφοριών (Information Sources)

Η αναζήτηση της βιβλιογραφίας εστιάστηκε πρωτίστως σε δύο κύριες ακαδημαϊκές βάσεις δεδομένων (Scopus και ScienceDirect), οι οποίες εξασφαλίζουν την άντληση επιστημονικών άρθρων που έχουν υποβληθεί σε αυστηρή κριτική αξιολόγηση (peer-review) και θεωρούνται αξιόπιστα και έγκυρα από τον ακαδημαϊκό χώρο. Συμπληρωματικά, χρησιμοποιήθηκε η μηχανή αναζήτησης Google Scholar για τον εντοπισμό εξειδικευμένων τεχνικών εκθέσεων, επίσημων αναφορών οργανισμών, νομοθετικών κειμένων και λοιπής «γκρίζας βιβλιογραφίας» (grey literature) που ήταν απαραίτητα για την ολοκλήρωση της μελέτης.

ScienceDirect (Elsevier): Αποτέλεσε την κύρια πηγή για την εύρεση εξειδικευμένων άρθρων από περιοδικά υψηλού κύρους. Από αυτή την βάση αντλήθηκαν κρίσιμα άρθρα που αφορούν την παραγωγή υδρογόνου από οργανικά απόβλητα καμπίνας (Gunerhan et al., 2025) , τη χρήση Συστημάτων Πολλαπλών Πρακτόρων (MAS) για τη διαλογή αποβλήτων (Bian et al., 2025) , καθώς και μελέτες για τον χαρακτηρισμό των αποβλήτων εντός των αεροσκαφών (Blanca-Alcubilla et al., 2019) και τη βιωσιμότητα στα αεροδρόμια της Νοτιοανατολικής Ασίας (Sreenath et al., 2021).

Scopus: Χρησιμοποιήθηκε λόγω της εκτεταμένης κάλυψης σε θέματα τεχνολογίας και περιβαλλοντικής διαχείρισης, τη διασταύρωση της βιβλιογραφίας και τον εντοπισμό μελετών που εστιάζουν σε μοντέλα μετασχηματισμού των αεροδρομίων (Tjahjono et al., 2023), καθώς και για την ανάλυση της βιωσιμότητας σε ευρωπαϊκούς αερολιμένες, όπως αυτός της Κοπεγχάγης (Baxter et al., 2018a). Επίσης, η βάση Scopus αποτέλεσε το εργαλείο για την ανάκτηση της επίσημης μεθοδολογίας PRISMA 2020 (Page et al., 2021).

Google Scholar: Η βιβλιογραφική ανασκόπηση εμπλουτίστηκε με τη χρήση του Google Scholar, το οποίο αξιοποιήθηκε συγκεκριμένα για τον εντοπισμό και την πρόσβαση σε τεχνικές εκθέσεις και έγγραφα διεθνών οργανισμών, τύπους πηγών που συχνά λείπουν από τις τυπικές βάσεις ακαδημαϊκών περιοδικών. Ενδεικτικά, μέσω αυτής της πηγής ανακτήθηκαν έγγραφα της Federal Aviation Administration (2013) , καθώς και τα πρότυπα διαχείρισης αποβλήτων του Port Authority of NY & NJ (2024).

Εκτός από τις ακαδημαϊκές βάσεις, η έρευνα επεκτάθηκε στην «γκρίζα βιβλιογραφία» (grey literature) για την ανάλυση του θεσμικού πλαισίου και των διεθνών τάσεων. Εξετάστηκαν επίσημες αναφορές και εγχειρίδια πολιτικής από οργανισμούς όπως ο **Airports Council International (ACI, 2018)** και η **International Air Transport Association (IATA)**, προκειμένου να διασφαλιστεί ότι η μελέτη λαμβάνει υπόψη όχι μόνο τη θεωρητική έρευνα αλλά και την επιχειρησιακή πραγματικότητα των αερολιμένων.

2.2.2 Στρατηγική αναζήτησης και Λέξεις-Κλειδιά (Search Strategy)

Η στρατηγική αναζήτησης που ακολουθήθηκε για τον εντοπισμό της απαραίτητης βιβλιογραφίας επικεντρώθηκε σε λέξεις-κλειδιά καθώς και τη χρήση λογικών τελεστών (Boolean Operators). Οι όροι που επιλέχθηκαν είχαν σκοπό την πλήρη κάλυψη των ερευνητικών ερωτημάτων, εστιάζοντας στη διατομή της διαχείρισης αποβλήτων, της κυκλικής οικονομίας και των τεχνολογικών αιχμής στο περιβάλλον των αερολιμένων.

Δομή της αναζήτησης

Η αναζήτηση οργανώθηκε σε τρεις θεματικούς πυλώνες (Pillars), οι οποίοι συνδυάστηκαν μεταξύ τους για να εξασφαλιστεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων και η συνάφεια με τις ειδικές απαιτήσεις της διατριβής:

Άξονας Α (Πλαίσιο): Περιλαμβάνει όρους που καθορίζουν το πεδίο έρευνας συγκεκριμένα στον αεροπορικό κλάδο (π.χ. "Airport", "Aviation", "Air transport") (ACI, 2018).

Άξονας Β (Αντικείμενο): Εστιάζει στις στρατηγικές διαχείρισης και τους δείκτες απόδοσης (π.χ. "Waste management", "Circular economy", "Zero Waste Index", "Organic waste", "Cabin waste")(Gunerhan et al., 2025);

Άξονας Γ (καινοτομία): Περιλαμβάνει τις εξειδικευμένες τεχνολογίες που έχει η εργασία (π.χ. "Multi-agent systems", "Hydrogen production", "Anaerobic digestion", "Zero Waste Index") (Gunerhan et al., 2025, Bian et al., 2025).

Λογικοί Τελεστές και Σύνταξη: Χρησιμοποιήθηκε ο τελεστής **"OR"** ώστε να συνδεθούν οι απαραίτητοι όροι μεταξύ τους (π.χ. Airport OR Aviation) και ο τελεστής **"AND"** για τη διασύνδεση των διαφορετικών αξόνων (π.χ. Waste AND Hydrogen). Στις βάσεις δεδομένων Scopus και ScienceDirect, εφαρμόστηκε η αναζήτηση στα πεδία «Title, Abstract, Keywords» (Τίτλος, Περίληψη, Λέξεις-κλειδιά), όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Λέξεις-κλειδιά και Λογικοί Τελεστές

Θεματική Ενότητα	Λέξεις-Κλειδιά (Keywords)	Λογικοί Τελεστές
Αεροδρομικό Περιβάλλον	<i>Airport, Aviation, Air Transport</i>	OR
Διαχείριση & Στρατηγική	<i>Waste Management, Zero Waste, Circular Economy, Cabin Waste</i>	OR
Τεχνολογική Καινοτομία	<i>Multi-Agent Systems (MAS), Hydrogen, Anaerobic Digestion, ZWI</i>	OR

2.2.3 Κριτήρια Επιλεξιμότητας (Eligibility Criteria)

Τα κριτήρια ένταξης και αποκλεισμού καθορίστηκαν σύμφωνα με το πλαίσιο PRISMA 2020 (Page et al., 2021), με στόχο τη διασφάλιση της συνάφειας και της ποιότητας των δεδομένων. Δεδομένης

της ταχύτατης εξέλιξης των τεχνολογιών στη διαχείριση αποβλήτων, δόθηκε προτεραιότητα σε πρόσφατες έρευνες που εξετάζουν καινοτόμες λύσεις.

Ποιο αναλυτικά, το χρονικό πλαίσιο της έρευνας ορίστηκε στην τελευταία δεκαετία. Ωστόσο, συμπεριλήφθηκαν παλαιότερες μελέτες (π.χ. Li et al., 2003; Pitt & Smith, 2003) που έθεσαν τις βάσεις για τη διαχείριση αποβλήτων στα αεροδρόμια. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην πολύ πρόσφατη βιβλιογραφία (2023-2025), η οποία κρίθηκε απαραίτητη για την κάλυψη αναδυόμενων τεχνολογιών, όπως η παραγωγή υδρογόνου από απόβλητα καμπίνας (Gunerhan et al., 2025) και η εφαρμογή Συστημάτων Πολλαπλών Πρακτόρων (MAS) στη διαλογή (Bian et al., 2025). Επιπλέον, συμπεριλήφθηκε η Ελληνική γλώσσα στα κριτήρια ένταξης, προκειμένου να καταστεί δυνατή η ανάλυση τοπικών δεδομένων από τον Διεθνή Αερολιμένα Αθηνών (Athens International Airport, 2024) και σχετικών εθνικών μελετών (Μάρης, 2018). Για τη διαλογή της βιβλιογραφίας, εφαρμόστηκαν τα εξής κριτήρια (Πίνακας 2.2):

- Τύπος Δημοσίευσης: Επιλέχθηκαν άρθρα σε επιστημονικά περιοδικά με κριτές, πρακτικά συνεδρίων καθώς και επίσημες τεχνικές εκθέσεις διεθνών οργανισμών (ICAO, ACI, IATA). Αποκλείστηκαν άρθρα γνώμης, blogs και πηγές χωρίς επιστημονική τεκμηρίωση ή πρόσβαση σε πλήρες κείμενο.
- Θεματολογία: Η έρευνα εστιάστηκε αποκλειστικά στη διαχείριση αποβλήτων αεροδρομίων, τις στρατηγικές Zero Waste, τα συστήματα MAS και την παραγωγή υδρογόνου. Μελέτες για γενικά αστικά απόβλητα χωρίς εφαρμογή στις αεροπορικές υποδομές αποκλείστηκαν.
- Χρονικό Πλαίσιο: Ορίστηκε η περίοδος 2014–2025 για τη διασφάλιση της επικαιρότητας. Αποκλείστηκαν μελέτες παλαιότερες, με εξαίρεση θεμελιώδη κείμενα νομοθεσίας (π.χ. Οδηγία 2008/98/EK).
- Γλώσσα: Η αναζήτηση περιορίστηκε στην Αγγλική και την Ελληνική γλώσσα, ώστε να συμπεριληφθούν τόσο η διεθνής βιβλιογραφία όσο και εγχώρια δεδομένα (π.χ. εκθέσεις ΔΑΑ).
- Ποιότητα Δεδομένων: Κρίθηκαν επιλέξιμες οι έρευνες που παρέχουν ποσοτικά δεδομένα (π.χ. δείκτης ZWI, ποσοστά ανακύκλωσης) ή τεχνικές προδιαγραφές, ενώ αποκλείστηκαν οι μελέτες που περιορίζονταν σε γενική θεωρητική συζήτηση

Πίνακας 2.2: Κριτήρια Ένταξης και Αποκλεισμού Βιβλιογραφίας

Κατηγορία	Κριτήρια Ένταξης (Inclusion)	Κριτήρια Αποκλεισμού (Exclusion)
Τύπος Δημοσίευσης	Άρθρα σε επιστημονικά περιοδικά με κριτές , πρακτικά συνεδρίων, επίσημες τεχνικές εκθέσεις οργανισμών (ICAO, ACI, IATA) και Εκθέσεις Βιωσιμότητας αερολιμένων.	Άρθρα γνώμης, συντακτικά σημειώματα (editorials), ιστολόγια (blogs) και πηγές χωρίς πρόσβαση σε πλήρες κείμενο.
Θεματολογία	Μελέτες εστιασμένες στη διαχείριση αποβλήτων αεροδρομίων, στρατηγικές Zero Waste, συστήματα MAS και ενεργειακή αξιοποίηση (υδρογόνο/βιοαέριο).	Γενικές μελέτες αστικών αποβλήτων χωρίς ειδική αναφορά στις ιδιαιτερότητες και τους περιορισμούς ασφαλείας των αεροπορικών υποδομών.
Χρονικό Πλαίσιο	Δημοσιεύσεις της περιόδου 2015–2025 , με έμφαση στην τελευταία τριετία για τις τεχνολογίες αιχμής.	Παλαιότερες μελέτες, εκτός αν αποτελούν βασικές αρχές της διαχείρισης αποβλήτων αερολιμένων, θεμελιώδεις αναφορές νομοθεσίας ή μεθοδολογίας
Γλώσσα	Αγγλική και Ελληνική γλώσσα.	Μελέτες σε άλλες γλώσσες χωρίς διαθέσιμη επίσημη μετάφραση.
Ποιότητα Δεδομένων	Έρευνες που παρέχουν ποσοτικά δεδομένα (π.χ. δείκτης ZWI, ποσοστά ανακύκλωσης) ή τεχνικές προδιαγραφές.	Μελέτες που περιορίζονται σε γενική θεωρητική συζήτηση χωρίς εμπειρικά δεδομένα.

2.2.4 Διαδικασία Επιλογής Μελετών (Selection Process)

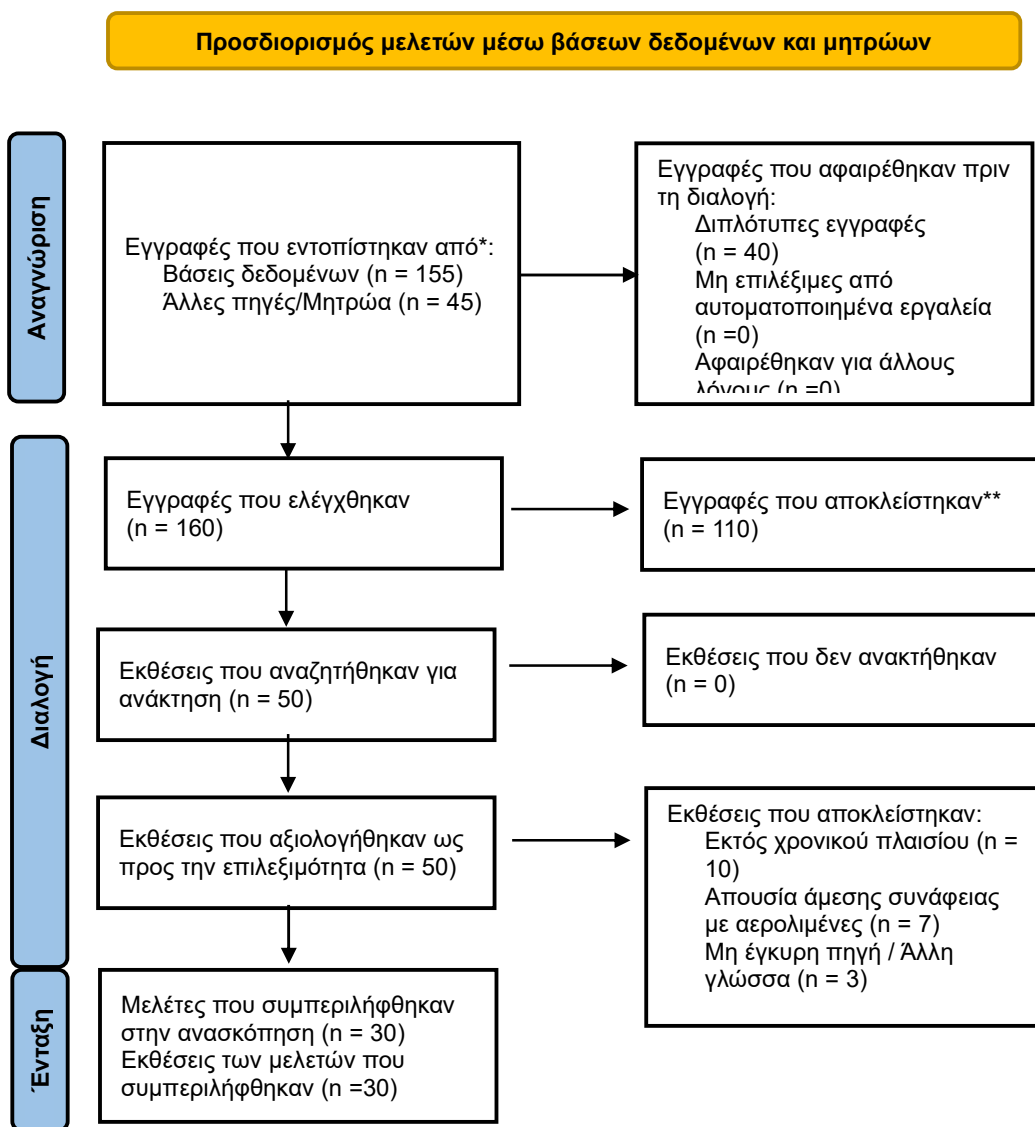
Η οριστική επιλογή των μελετών που πραγματοποιήθηκε μέσα από μια αυστηρή διαδικασία διαλογής τεσσάρων σημείων. Στόχος ήταν η διασφάλιση και η εγκυρότητα στην επιλογή του δείγματος. Η διαδικασία περιλάμβανε τα εξής στάδια:

1. Αναγνώριση και πρωτογενής έλεγχος: Σε πρώτο στάδιο πραγματοποιήθηκε η συγκέντρωση των απαραίτητων εγγράφων από τις βάσεις δεδομένων (Scopus, ScienceDirect, Google Scholar). Στο στάδιο αυτό επιλέχθηκε μεγάλος αριθμός μελετών, από τις οποίες μετά από περεταίρω έλεγχο αφαιρέθηκαν άμεσα οι διπλότυπες εγγραφές. Επίσης, απορρίφθηκαν οι μελέτες που περιείχαν τις λέξεις-κλειδιά αλλά είχαν σαν στόχο την εστίαση σε θέματα άσχετα με τη διαχείριση αποβλήτων.
2. Διαλογή βάσει Τίτλου και Περίληψης (Screening): Σε αυτό το στάδιο, πραγματοποιήθηκε εξέταση των τίτλων και των περιλήψεων. Δόθηκε προτεραιότητα σε μελέτες που παρουσίαζαν καινοτόμες λύσεις για συγκεκριμένα ρεύματα αποβλήτων. Για παράδειγμα, έρευνες που αναλύουν τη διαλογή μέσω Συστημάτων Πολλαπλών Πρακτόρων (Bian et al., 2025), και την εφαρμογή αυτοματοποιημένων κάδων διαλογής (Manea et al., 2024), ενώ απορρίφθηκαν γενικές μελέτες χωρίς ποσοτικά στοιχεία.
3. Αξιολόγηση Πλήρους Κειμένου (Eligibility): Στο τελικό στάδιο, τα άρθρα που προκρίθηκαν υποβλήθηκαν σε λεπτομερή ανάγνωση του πλήρους κειμένου τους. Η αξιολόγηση έγινε με βάση τα προκαθορισμένα κριτήρια ένταξης και αποκλεισμού που αναλύθηκαν στην ενότητα 2.2.3. Συγκεκριμένα, εντάχθηκαν:
 - Μελέτες που παρέχουν δεδομένα για την ενεργειακή αξιοποίηση οργανικών αποβλήτων καμπίνας προς παραγωγή υδρογόνου (Gunerhan et al., 2025).
 - Έρευνες που εφαρμόζουν τον δείκτη «Zero Waste Index» σε πραγματικά περιβάλλοντα αεροδρομίων (Özbay & Gokceviz, 2022; Zaman, 2014).
 - Μελέτες περίπτωσης (Case Studies) με αναλυτικά δεδομένα ροών αποβλήτων από διεθνείς αερολιμένες, όπως του Gatwick (Baxter & Srisaeng, 2022), της Κοπεγχάγης (Baxter et al., 2018) και του Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών (Athens International Airport, 2024).

Οι μελέτες που δεν πληρούσαν τα παραπάνω κριτήρια αποκλείστηκαν, διαμορφώνοντας τον τελικό αριθμό των πηγών που αναλύονται στα επόμενα κεφάλαια.

4. Τελική Ένταξη: Οι μελέτες που πληρούσαν όλα τα κριτήρια επιλεξιμότητας συμπεριλήφθηκαν στην τελική σύνθεση της ανασκόπησης.

Η συνολική πορεία της επιλογής και τα αριθμητικά δεδομένα της αναζήτησης αποτυπώνονται γραφικά στο Διάγραμμα Ροής PRISMA (Flow Diagram) που ακολουθεί (Σχήμα 2.1).



Εικόνα 2.1: Διάγραμμα ροής της συστηματικής ανασκόπησης κατά το πρότυπο PRISMA 2020 (τροπ/νο από Page et al., 2021).

2.3 Μεθοδολογικά Εργαλεία και Τεχνολογικοί Άξονες της Έρευνας

Πέρα από τη συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση, η παρούσα εργασία βασίζεται στην αξιολόγηση και σύνθεση τριών βασικών μεθοδολογικών και τεχνολογικών αξόνων:

1. Αξιοποίηση Δεικτών Απόδοσης (Zero Waste Index): Η παρούσα εργασία θα ασχοληθεί με την δυνατότητα χρήσης του δείκτη "Zero Waste Index" για τη μέτρηση της απόδοσης των συστημάτων διαχείρισης αποβλήτων. Σε αντίθεση με τα απλά ποσοστά ανακύκλωσης, ο δείκτης αυτός λαμβάνει υπόψη την αντικατάσταση παρθένων υλικών και την εξοικονόμηση ενέργειας και φυσικών πόρων, προσφέροντας έτσι μια πιο ολοκληρωμένη άποψη για το περιβαλλοντικό αποτύπωμα, όπως αυτό έχει εφαρμοστεί σε μελέτες περίπτωσης.
2. Τεχνολογίες Αιχμής και Συλλογική Νοημοσύνη (Multi-Agent Systems - MAS): Θα εξεταστεί η χρήση προηγμένων τεχνολογιών, όπως τα Συστήματα Πολλαπλών Πρακτόρων (Multi-Agent Systems - MAS). Η χρήση τους μπορεί να μεγιστοποιήσει και να οργανώσει τη διαλογή αποβλήτων από διαφορετικούς "πράκτορες" (επιβάτες, προσωπικό καθαριότητας, φορείς διαχείρισης), ενισχύοντας με αυτό τον τρόπο τα περιβαλλοντικά οφέλη της ταξινόμησης στην πηγή (Bian et al., 2025).
3. Ενεργειακή Αξιοποίηση Οργανικών Αποβλήτων (Waste-to-Hydrogen): Μια από τις πιο σημαντικές προκλήσεις είναι η εξέταση της δυνατότητας μετατροπής των οργανικών αποβλήτων καμπίνας σε καθαρή ενέργεια. Συγκεκριμένα, θα αναλυθεί η προοπτική παραγωγής βιοαερίου μέσω αναερόβιας χώνευσης και η περαιτέρω μετατροπή του σε υδρογόνο, καθώς είναι μια πρακτική που συμμορφώνεται με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας και μπορεί να ξεπεράσει τους νομικούς περιορισμούς που διέπουν τα απόβλητα κατηγορίας 1 (δηλαδή τα Διεθνή Απόβλητα Τροφοδοσίας - International Catering Waste, τα οποία περιέχουν ζωικά υποπροϊόντα και υπόκεινται σε αυστηρούς υγειονομικούς κανονισμούς) (Gunerhan et al., 2025).

3. Χαρακτηριστικά Αποβλήτων και Θεσμικό Πλαίσιο

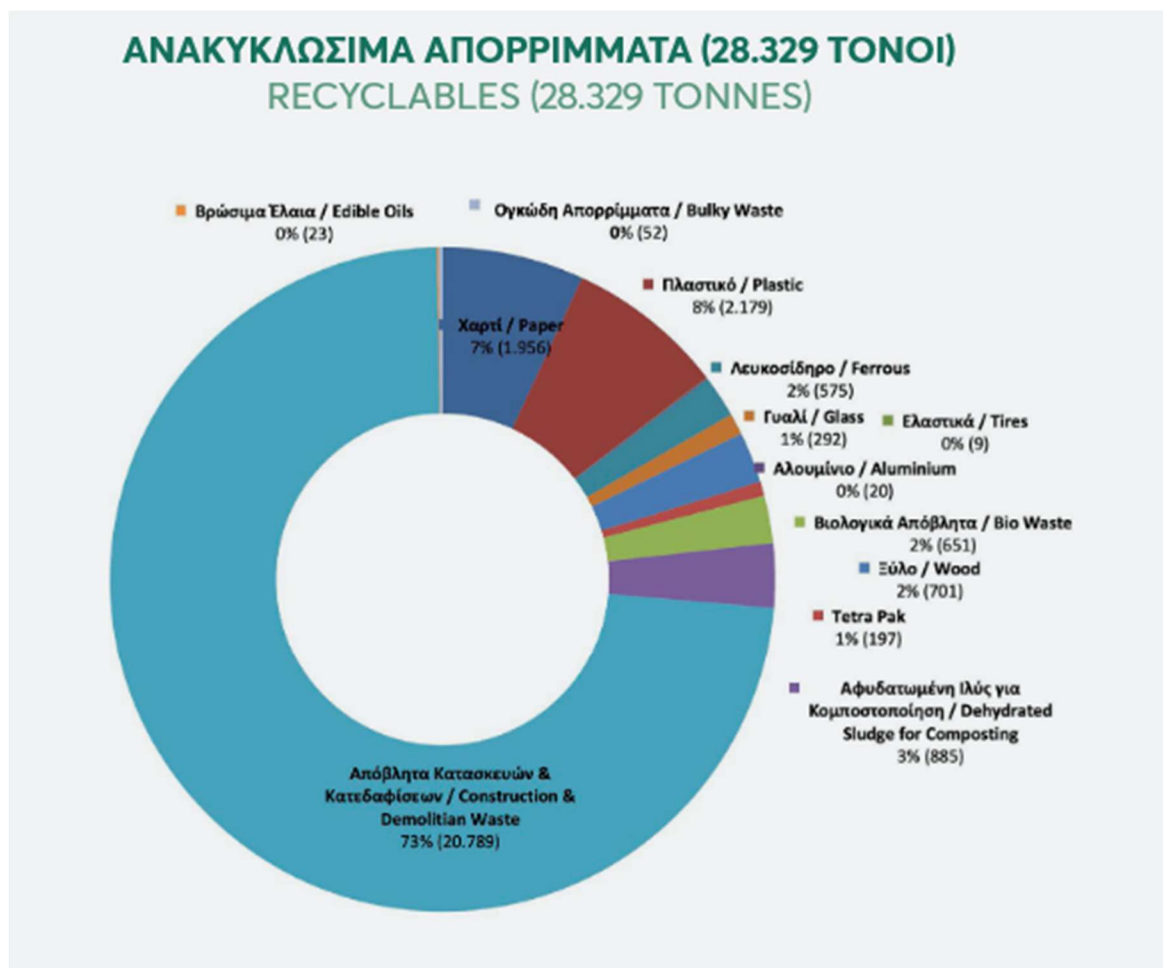
Η διαχείριση των αποβλήτων σε έναν σύγχρονο αερολιμένα αποτελεί μια σύνθετη πρόκληση, η οποία ξεπερνά τη συμβατική διαχείριση των αστικών απορριμμάτων. Οι αερολιμένες λειτουργούν ως σύνθετα οικοσυστήματα ή «μικρές πόλεις», όπου συνυπάρχουν διαφορετικές δραστηριότητες: από τη μαζική εξυπηρέτηση επιβατών και την παροχή υπηρεσιών εστίασης, έως τη βαριά

βιομηχανική συντήρηση αεροσκαφών, τη διαχείριση εμπορευμάτων (cargo) και την εκτέλεση μεγάλων κατασκευαστικών έργων (International Civil Aviation Organization [ICAO], 2018). Αυτή η διαφορετικότητα όπως είναι φυσικό οδηγεί στην παραγωγή μεγάλου όγκου αποβλήτων με εξαιρετικά ποικίλη σύσταση, η οποία απαιτεί εξειδικευμένες στρατηγικές διαλογής και επεξεργασίας.

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύονται διεξοδικά οι ροές και τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των παραγόμενων αποβλήτων, καθώς και το αυστηρό κανονιστικό πλαίσιο που διέπει τη διαχείρισή τους σε εθνικό και διεθνές επίπεδο. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στους υγειονομικούς περιορισμούς που αφορούν τα απόβλητα των αεροσκαφών, οι οποίοι αποτελούν και το σημαντικότερο εμπόδιο για την εφαρμογή κυκλικών μοντέλων.

3.1 Κατηγοριοποίηση Αποβλήτων

Η ακριβής ταξινόμηση και ο χαρακτηρισμός των αποβλήτων αποτελούν τη βάση για τον σχεδιασμό οποιουδήποτε αποδοτικού συστήματος διαχείρισης. Σύμφωνα με την Οδηγία για τα Απόβλητα 2008/98/EK, ως «απόβλητο» καθορίζεται κάθε ουσία ή αντικείμενο το οποίο ο κάτοχός του απορρίπτει ή προτίθεται ή υποχρεούται να απορρίψει (European Parliament and Council, 2008). Στο περιβάλλον ενός αεροδρομίου τα απόβλητα διακρίνονται συνήθως με βάση την πηγή προέλευσής τους (χερσαία ζώνη - landside και αεροπορική ζώνη - airside), την επικινδυνότητά τους και τη δυνατότητα αξιοποίησής τους. Η ποσοστιαία κατανομή των κυριότερων ρευμάτων ανακυκλώσιμων απορριμμάτων, όπως καταγράφηκε στον Διεθνή Αερολιμένα Αθηνών για το έτος 2023, αποτυπώνεται στο Σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1: Ποσοστιαία κατανομή ανακυκλώσιμων απορριμμάτων στον Διεθνή Αερολιμένα Αθηνών για το έτος 2023. > Πηγή: (Athens International Airport, 2024).

Οι κύριες κατηγορίες αποβλήτων που εντοπίζονται στους διεθνείς αερολιμένες αναλύονται ως εξής:

3.1.1 Αστικά Στερεά Απόβλητα (Municipal Solid Waste - MSW)

Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται απόβλητα που μοιάζουν με τα οικιακά και παράγονται κυρίως στους τερματικούς σταθμούς (terminals), τα εμπορικά καταστήματα, τα εστιατόρια και τα γραφεία διοίκησης. Αποτελούνται από ένα μείγμα οργανικών υπολειμμάτων και υλικών συσκευασίας.

- Σύσταση: Σύμφωνα με την βιβλιογραφία σε ευρωπαϊκά αεροδρόμια, τα κύρια συστατικά είναι το χαρτί και το χαρτόνι (εφημερίδες, περιοδικά, συσκευασίες), τα πλαστικά (κυρίως φιάλες PET και φιλμ συσκευασίας), το γυαλί και τα μέταλλα (Manea et al., 2024).

- **Ποσοτικά Στοιχεία:** Στον Διεθνή Αερολιμένα Αθηνών (ΔΑΑ), τα απόβλητα αστικού τύπου ανήλθαν στους 6.762 τόνους για το έτος 2023, αποτελώντας το 19% του συνολικού όγκου αποβλήτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι χάρη στην εφαρμογή της αρχής «Ο Ρυπαίνων Πληρώνει» και των οικονομικών κινήτρων προς τα Τρίτα Μέρη, το ποσοστό ανακύκλωσης για τα ρεύματα αυτά (χαρτί, πλαστικό, μέταλλο, γυαλί) έφτασε το εντυπωσιακό 81% (Athens International Airport, 2024).

3.1.2 Απόβλητα Κατασκευών και Κατεδαφίσεων (C&D)

Ένα κύριο περιβαλλοντικό ζήτημα για τους σύγχρονους αερολιμένες προκύπτει από τον συνεχόμενο κύκλο ανανέωσης των υποδομών τους. Η συχνή εκτέλεση έργων επέκτασης, ανακαίνισης και συντήρησης τόσο των διαδρόμων προσγείωσης όσο και των κτιριακών υποδομών δημιουργεί τεράστιες ποσότητες στερεών αποβλήτων, κυρίως από υλικά εκσκαφής, κατασκευής και κατεδάφισης.

- **Χαρακτηριστικά:** Περιλαμβάνουν σκυρόδεμα, άσφαλτο, ξύλο, μέταλλα, χώμα και πέτρες.
- **Επίδραση στο Σύνολο:** Αν και η παραγωγή τους δεν είναι σταθερή καθημερινά, σε ετήσια βάση συχνά κυριαρχούν ποσοτικά. Χαρακτηριστικά, στον ΔΑΑ το 2023, τα απόβλητα αυτά έφτασαν τους 20.789 τόνους, αντιπροσωπεύοντας το 73% των συνολικών στερεών αποβλήτων (Athens International Airport, 2024). Η διαχείρισή τους γίνεται συνήθως μέσω εξειδικευμένων εργολάβων με στόχο την επαναχρησιμοποίησή τους σε έργα οδοποιίας ή επιχωματώσεις.

3.1.3 Βιομηχανικά και Επικίνδυνα Απόβλητα

Πρόκειται για απόβλητα που δημιουργούνται από τις τεχνικές εργασίες υποστήριξης, όπως η συντήρηση αεροσκαφών (Maintenance, Repair, and Overhaul - MRO), όταν γίνεται ο καθαρισμός της πίστας, η συντήρηση οχημάτων εδάφους και οι διαδικασίες αποπάγωσης. Λόγω της τοξικότητάς τους, απαιτούν ειδική διαχείριση και αυστηρή ιχνηλασιμότητα. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Μάρης, 2018; Athens International Airport, 2024), οι κυριότερες υποκατηγορίες είναι:

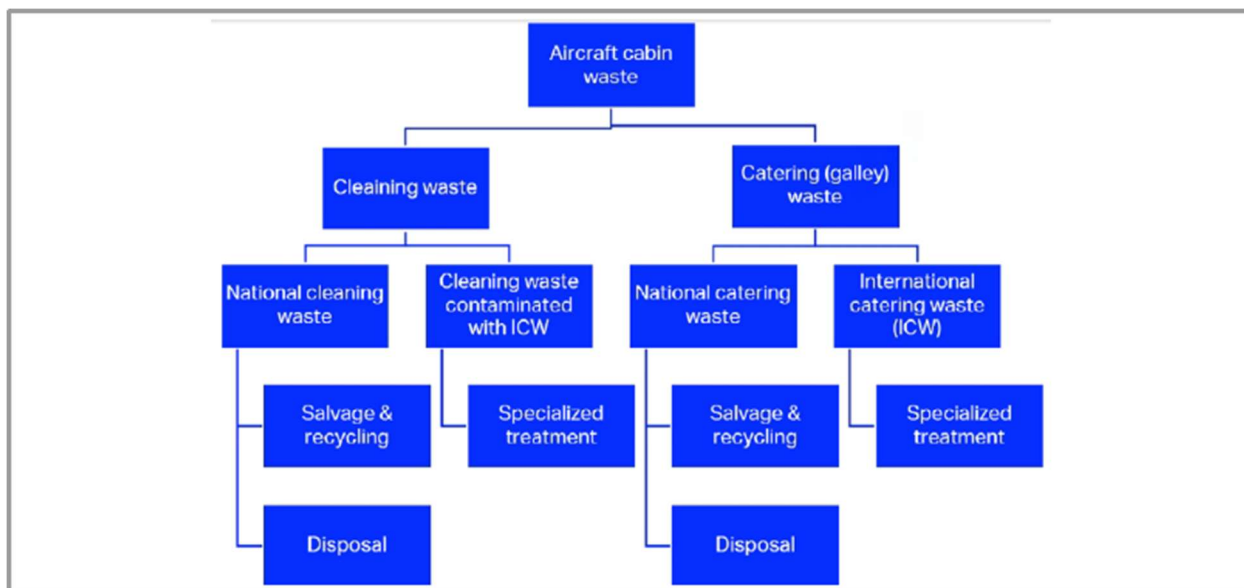
- **Απόβλητα Έλαια και Λιπαντικά:** Προέρχονται από την αλλαγή λαδιών σε κινητήρες αεροσκαφών και οχήματα πίστας.
- **Χημικά και Διαλύτες:** Ουσίες που χρησιμοποιούνται για τον καθαρισμό εξαρτημάτων, την απολίπανση και την αφαίρεση βαφών (αποχρωστικά). Συχνά περιέχουν πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs) που είναι επιβλαβείς για την ατμόσφαιρα.

- Ηλεκτρικές Στήλες και Συσσωρευτές: Μπαταρίες μολύβδου-οξέος από οχήματα και ειδικές μπαταρίες αεροσκαφών (π.χ. Νικελίου-Καδμίου).
- Υγρά Αποπάγωσης (De-icing fluids): Μίγματα γλυκολών (προπουλενογλυκόλη ή αιθυλενογλυκόλη) που χρησιμοποιούνται κατά τη χειμερινή περίοδο για την αφαίρεση πάγου από τα φτερά. Τα απόβλητα αυτά έχουν υψηλό οργανικό φορτίο (COD) και αν διαφύγουν στο έδαφος μπορούν να ρυπάνουν τον υδροφόρο ορίζοντα.

3.1.4 Απόβλητα Αεροσκαφών (Cabin Waste)

Τα απόβλητα καμπίνας αποτελούν μια ιδιαίτερη και εξαιρετικά σύνθετη κατηγορία, εξαιτίας αφενός του μεγάλου όγκου τους όσο και των αυστηρών υγειονομικών πρωτοκόλλων που ορίζουν τη διαχείρισή τους. Σύμφωνα με τη Διεθνή Ένωση Αερομεταφορών (IATA) και τη σχετική βιβλιογραφία, τα απόβλητα αυτά διακρίνονται σε δύο κύριες ροές (Blanca-Alcubilla et al., 2019; IATA, 2019):

1. Απόβλητα Καθαρισμού (Cleaning Waste): Τα συγκεκριμένα απόβλητα προέρχονται από την παροχή υπηρεσιών στους επιβάτες και περιλαμβάνουν υλικά που συλλέγονται από τις τσέπες των καθισμάτων και τους διαδρόμους του αεροσκάφους (π.χ. εφημερίδες, περιοδικά, ακουστικά και μπουκάλια ποτών, χαρτομάντιλα, πλαστικά ποτήρια).
2. Απόβλητα Τροφοδοσίας (Catering/Galley Waste): Αφορούν υπολείμματα τροφίμων και ποτών, καθώς και τα σχετικά υλικά συσκευασίας (δίσκοι, μεμβράνες, μαχαιροπίρουνα) που προκύπτουν από την κατανάλωση γευμάτων εν πτήξει και επιστρέφονται στα καροτσάκια της κουζίνας, επίσης αυτή η ροή μπορεί να περιέχει μεγάλες ποσότητες υγρών από αχρησιμοποίητα ποτά και πάγο. Η δομή και η διαδρομή των εν λόγω αποβλήτων, από τη συλλογή τους εντός του αεροσκάφους έως την τελική τους διάθεση, αποτυπώνεται στο **Σχήμα 3.2**, αναδεικνύοντας τον κρίσιμο διαχωρισμό βάσει της προέλευσης της πτήσης



Σχήμα 3.2: Ροές αποβλήτων καμπίνας αεροσκάφους.

Ποσοτικά Δεδομένα και Παράγοντες Διαφοροποίησης: Η παραγωγή των αποβλήτων καμπίνας παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις, αλλά επηρεάζεται άμεσα από τη διάρκεια της πτήσης, την πολιτική της κάθε αεροπορικής εταιρείας και την κατηγορία θέσης (Business vs Economy). Η διεθνής βιβλιογραφία εκτιμά ότι ένας επιβάτης παράγει κατά μέσο όρο από **0,55 έως 1,31 κιλά** αποβλήτων ανά πτήση (Tofalli et al., 2018).

Εξειδικευμένη έρευνα που διεξήχθη σε πτήσεις με προορισμό τον Διεθνή Αερολιμένα Λάρνακας ανέδειξε σημαντικές διαφοροποιήσεις βάσει της προέλευσης και της διάρκειας της πτήσης (Tofalli et al., 2018):

- **Πτήσεις Μικρής Διάρκειας:** Σε πτήσεις από Αθήνα προς Λάρνακα (διάρκεια 1:30h), η παραγωγή αποβλήτων ανά επιβάτη κυμάνθηκε σε χαμηλά επίπεδα, μεταξύ **57,27g** (πρωινές πτήσεις) και **65,54g** (μεσημβρινές πτήσεις).
- **Πτήσεις Μεσαίας Διάρκειας:** Σε πτήσεις από Θεσσαλονίκη, ο μέσος όρος ανήλθε στα **88,83g** ανά επιβάτη. Αντίθετα, σε πτήσεις από τη Φρανκφούρτη (διάρκεια 4:10h), η ποσότητα αυξήθηκε εντυπωσιακά στα **153,46g** ανά επιβάτη, γεγονός που αποδίδεται στα πλήρη γεύματα που σερβίρονται σε μεγαλύτερες διαδρομές.

Συμπληρωματικά, η έρευνα των Blanca-Alcubilla et al. (2019), η οποία ανέλυσε δεδομένα από 145 πτήσεις στο πλαίσιο του έργου LIFE Zero Cabin Waste, αναδεικνύει ότι ένα σημαντικό ποσοστό, περίπου 20% με 25%, των αποβλήτων αποτελείται από ανέπαφα τρόφιμα και ποτά που απορρίπτονται χωρίς να καταναλωθούν.

Σύσταση Αποβλήτων: Η σύσταση των αποβλήτων καμπίνας περιλαμβάνει υψηλά ποσοστά χαρτιού και πλαστικών, αλλά και σημαντικές ποσότητες οργανικών υπολειμμάτων. Παλαιότερες μελέτες έχουν δείξει ότι το χαρτί μπορεί να φτάσει έως και το 71% του συνολικού βάρους σε ορισμένες περιπτώσεις, κυρίως λόγω των εφημερίδων και των περιοδικών (Li et al., 2003). Όσον αφορά τα οργανικά απόβλητα (food waste), η έρευνα στο αεροδρόμιο της Λάρνακας κατέγραψε ότι στις πτήσεις από το Άμπου Ντάμπι και τη Φρανκφούρτη παρατηρήθηκαν οι μεγαλύτερες ποσότητες, φτάνοντας τα 13,32g και 9g ανά επιβάτη αντίστοιχα (Tofalli et al., 2018).

Παρά το υψηλό δυναμικό ανακύκλωσης, η διαχείριση προσκρούει σε αυστηρούς νομοθετικούς περιορισμούς, με κυριότερο τον Κανονισμό (ΕΚ) 1069/2009. Τα απόβλητα από πτήσεις εκτός Ευρωπαϊκής Ένωσης ταξινομούνται ως Υλικά Κατηγορίας 1 (Category 1) λόγω κινδύνου μετάδοσης ζωνόσων, γεγονός που επιβάλλει την άμεση αποτέφρωση ή την υγειονομική ταφή τους, εμποδίζοντας την εφαρμογή αρχών κυκλικής οικονομίας.

Η ανάγκη υπέρβασης αυτών των εμποδίων μέσω καινοτόμων τεχνολογιών, όπως η αναερόβια χώνευση για παραγωγή υδρογόνου, καθίσταται επιβεβλημένη για την επίτευξη των στόχων Zero Waste.

Για την πληρέστερη κατανόηση της σύνθεσης των αποβλήτων που παράγονται εν πτήξει, παρατίθενται τα δεδομένα από την έρευνα που πραγματοποίησαν οι Blanca-Alcubilla et al. (2019), η οποία βασίστηκε σε δειγματοληψίες από 145 πτήσεις στο πλαίσιο του προγράμματος LIFE Zero Cabin Waste. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.1, τα οργανικά απόβλητα και το χαρτί αποτελούν τα κυρίαρχα ρεύματα.

Πίνακας 3.1: Μέση σύσταση αποβλήτων καμπίνας (% κ.β.) βάσει δειγματοληψιών σε πτήσεις διαφόρων αποστάσεων.

Κατηγορία Υλικού	Ποσοστό (% κατά βάρος)	Περιγραφή / Παρατηρήσεις
------------------	------------------------------	--------------------------

Οργανικά (Τρόφιμα)	33%	Περιλαμβάνει υπολείμματα φαγητού (leftovers) και υγρά.
Χαρτί & Χαρτόνι	23%	Εφημερίδες, περιοδικά, χαρτομάντιλα, χάρτινες συσκευασίες.
Πλαστικά	12%	Ποτήρια, μαχαιροπίρουνα, μεμβράνες συσκευασίας.
Ανέπαφα Τρόφιμα	12%	Σφραγισμένες συσκευασίες τροφίμων/ποτών που δεν ανοίχτηκαν (Unmanipulated).
Γυαλί	6%	Κυρίως από μπουκάλια ποτών (κρασί, αναψυκτικά).
Μέταλλα	4%	Κουτάκια αλουμινίου, αλουμινόχαρτα.
Σύνθετα Υλικά	3%	Συσκευασίες Tetra Pak (π.χ. χυμοί).
Λοιπά	7%	Υφάσματα, επικίνδυνα υλικά, λοιπά σύμμεικτα.
Σύνολο	100%	

Πηγή: Προσαρμογή από Blanca-Alcubilla et al. (2019).

3.2 Νομοθετικό Πλαίσιο: Οδηγίες ΕΕ και Κανονισμοί για τα Διεθνή Απόβλητα Τροφοδοσίας

Η διαχείριση των αποβλήτων στους διεθνείς αερολιμένες δεν αποτελεί μόνο μια τεχνική διαδικασία, αλλά και έχει να κάνει με το αυστηρό νομικό πλαίσιο, κυρίως το Ευρωπαϊκό και τις οδηγίες για τους εθνικούς κανονισμού. Το πλαίσιο αυτό διαμορφώνεται από τη μίξη της περιβαλλοντικής νομοθεσίας της Ευρωπαϊκής Ένωσης, η οποία ωθεί την κυκλική οικονομία, και των διεθνών υγειονομικών κανονισμών, οι οποίοι θέτουν αυστηρούς περιορισμούς για λόγους βιοασφάλειας. Η αμοιβαία επίδραση αυτών των δύο διαφορετικών νομικών απαιτήσεων ρυθμίζει τις επιχειρησιακές δυνατότητες των αεροδρομίων

3.2.1 Η Οδηγία Πλαίσιο και η Ιεράρχηση των Αποβλήτων

Βασική αρχή της ευρωπαϊκής στρατηγικής για την κυκλική οικονομία είναι η Οδηγία 2008/98/ΕΚ (Waste Framework Directive), η οποία θέτει τις νομικές βάσεις για τη διαχείριση των αποβλήτων στα κράτη-μέλη. Στο Άρθρο 4 της Οδηγίας υπάρχει καθαρά μια νομικά δεσμευτική «ιεράρχηση των αποβλήτων» (waste hierarchy), την οποία οφείλουν να ακολουθούν όλοι οι οργανισμοί — συμπεριλαμβανομένων των αεροδρομίων (European Parliament and Council, 2008).

Η ταξινόμηση αυτή έχει πέντε βαθμίδες προτεραιότητας, από την πλέον έως την ελάχιστη επιθυμητή:

1. **Πρόληψη:** Μέτρα που λαμβάνονται πριν μια ουσία καταστεί απόβλητο, όπως η μείωση πλαστικών μιας χρήσης ή ο σχεδιασμός προϊόντων μεγαλύτερης διάρκειας ζωής.
2. **Προετοιμασία για επαναχρησιμοποίηση:** Έλεγχος, καθαρισμός και επισκευή προϊόντων ώστε να χρησιμοποιηθούν ξανά χωρίς περαιτέρω επεξεργασία.
3. **Ανακύκλωση:** Επαναχρησιμοποίηση υλικών για την παραγωγή νέων προϊόντων (π.χ. χαρτί, γυαλί, μέταλλα).
4. **Άλλου είδους ανάκτηση:** Κυρίως η ανάκτηση ενέργειας μέσω αποτέφρωσης (Waste-to-Energy), υπό την προϋπόθεση θετικού ενεργειακού ισοζυγίου.
5. **Διάθεση:** Υγειονομική ταφή ή αποτέφρωση χωρίς ανάκτηση ενέργειας. Αποτελεί την έσχατη λύση και επιτρέπεται μόνον όταν έχουν εξαντληθεί όλες οι προηγούμενες επιλογές (European Parliament and Council, 2008).

Για τους αερολιμένες, η συμμόρφωση με την Οδηγία μεταφράζεται σε υποχρεωτική απομάκρυνση των αποβλήτων από την ταφή και στροφή προς την ανακύκλωση ή την ενεργειακή αξιοποίηση (Baxter & Srisaeng, 2022). Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο Διεθνής Αερολιμένας Αθηνών, όπου η εφαρμογή της ιεραρχίας οδήγησε σε ανάκτηση 81% των Αστικών Στερεών Αποβλήτων (MSW) για το 2023, συμβάλλοντας στη βελτίωση του δείκτη Zero Waste Index.

3.2.2 Το Ζήτημα των Διεθνών Αποβλήτων Τροφοδοσίας (ICW)

Παρά τις εντολές για αύξηση της ανακύκλωσης, τα αεροδρόμια αντιμετωπίζουν ένα σημαντικό νομικό εμπόδιο που έχει να κάνει με τα απόβλητα από διεθνείς πτήσεις (εκτός ΕΕ). Τα απόβλητα αυτά, γνωστά ως **Διεθνή Απόβλητα Τροφοδοσίας (International Catering Waste - ICW)**, υπαγονται σε αυστηρούς υγειονομικούς περιορισμούς.

Σύμφωνα με τον κανονισμό, τα απόβλητα τροφοδοσίας από πτήσεις που είναι από χώρες εκτός ΕΕ) ταξινομούνται αυτομάτως ως «**Υλικά Κατηγορίας 1**» (**Category 1 material**) (Gunerhan et al., 2025; European Union, 2009).

Ως αποτέλεσμα αυτής της νομοθεσίας ισχύει:

- **Απαγόρευση Ανακύκλωσης:** Απαγορεύεται αυστηρά η ανακύκλωση ή η κομποστοποίηση οποιουδήποτε αποβλήτου έχει έρθει σε επαφή με ζωικά υποπροϊόντα διεθνών πτήσεων καθώς θεωρούνται υψηλού κινδύνου για τη μετάδοση ασθενειών, όπως ο αφθώδης πυρετός.

- **Υποχρεωτική Καταστροφή:** Τα απόβλητα της Κατηγορίας 1 πρέπει να συλλέγονται σε δοχεία αεροστεγή, να σημαίνονται ως επικίνδυνα και να οδηγούνται υποχρεωτικά προς **αποτέφρωση** ή υγειονομική ταφή σε ειδικούς χώρους (International Air Transport Association [IATA], 2019).
- **Πρόβλημα Επιμόλυνσης:** Εάν ανακυκλώσιμα υλικά (π.χ. εφημερίδες, πλαστικά μπουκάλια, κουτάκια αλουμινίου) αναμειχθούν μέσα στην καμπίνα ή στο καρότσι τροφοδοσίας με απόβλητα Κατηγορίας 1, τότε ολόκληρο το φορτίο «μολύνεται» και πρέπει να καταστραφεί ως επικίνδυνο (IATA, 2019). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τεράστιες ποσότητες χρήσιμων υλικών στην καταστροφή, αυξάνοντας έτσι το περιβαλλοντικό αποτύπωμα και το κόστος διαχείρισης για τα αεροδρόμια.

Αντίθετα, τα απόβλητα από πτήσεις εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης θεωρούνται χαμηλότερου κινδύνου (Κατηγορία 3) και μπορούν να διαχειριστούν ως κοινά αστικά απόβλητα, επιτρέποντας την περαιτέρω διαλογή και ανακύκλωσή τους (Blanca-Alcubilla et al., 2019).

3.3 Λειτουργικά Εμπόδια και Προκλήσεις στη Διαχείριση Αποβλήτων

Η διαλογή στην πηγή εντός του αεροδρομίου αντιμετωπίζει σοβαρά προβλήματα, εξαιτίας των περιορισμών σε χώρους και χρόνους καθώς και για υγειονομικούς περιορισμούς.

3.3.1 Περιορισμοί Χώρου και Χρόνου

Η έλλειψη διαθέσιμου χώρου εντός των αεροσκαφών αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους αποτρεπτικούς παράγοντες για την αποτελεσματική διαλογή των αποβλήτων στην πηγή. Όπως επισημαίνουν οι Tofalli et al. (2018), η χώρος της καμπίνας και των μαγειρείων δεν έχει σχεδιαστεί για να φιλοξενεί πολλαπλούς κάδους διαλογής διαφορετικών ρευμάτων, περιορίζοντας τη δυνατότητα διαχωρισμού των υλικών κατά τη διάρκεια της πτήσης. Το πρόβλημα αυτό μεγαλώνει από τον πολύ πιεστικό χρόνο προετοιμασίας του αεροσκάφους για την επόμενη πτήση. Η πίεση αυτή είναι εντονότερη στις αεροπορικές εταιρείες χαμηλού κόστους, όπου τα πληρώματα καμπίνας συχνά δεν διαθέτουν τα απαραίτητα χρονικά περιθώρια για την πραγματοποίηση λεπτομερούς διαλογής των απορριμμάτων, δίνοντας προτεραιότητα στις διαδικασίες ασφάλειας και ταχείας αποβίβασης.

Επιπλέον, η έλλειψη σημαντικών υποδομών στο έδαφος μεγαλώνει περαιτέρω τη διαχείριση. Η μελέτη της Ferrulli (2016) υπογραμμίζει ότι ο περιβαλλοντικός σχεδιασμός συχνά απουσίαζε κατά την κατασκευή παλαιότερων αεροδρομίων, με αποτέλεσμα σήμερα να μην υπάρχουν οι απαραίτητοι χώροι αποθήκευσης και διαλογής εντός των τερματικών σταθμών. Αυτή η στενότητα

του χώρου εμποδίζει την εγκατάσταση σύγχρονων συστημάτων συμπίεσης ή μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων κοντά στα σημεία παραγωγής τους, αυξάνοντας το λειτουργικό κόστος και τη δυσκολία ανάκτησης υλικών (Ferrulli, 2016).

Η ύπαρξη αυτών των λειτουργικών εμποδίων καθιστά σαφές ότι η χειροκίνητη διαλογή δεν επαρκεί για την επίτευξη υψηλών στόχων ανακύκλωσης. Ως εκ τούτου, η εισαγωγή αυτοματοποιημένων τεχνολογιών, όπως τα Multi-Agent Systems (MAS), κρίνεται αναγκαία για τη αύξηση της διαλογής στο έδαφος, παρακάμπτοντας τους περιορισμούς χρόνου και χώρου που υφίστανται εντός του αεροσκάφους (Blanca-Alcubilla et al., 2019).

3.3.2 Ζητήματα Ασφάλειας και Βιοασφάλειας

Η διασφάλιση της βιοασφάλειας αποτελεί την μεγαλύτερη προτεραιότητα στη διαχείριση των αποβλήτων τροφοδοσίας, ειδικά όσον αφορά τις διεθνείς πτήσεις εκτός Ευρωπαϊκής Ένωσης. Τα απόβλητα αυτά, γνωστά ως Διεθνή Απόβλητα Τροφοδοσίας (International Catering Waste - ICW), θεωρούνται υψηλού κινδύνου για τη μετάδοση εξωτικών ζωνοδόσων, όπως ο αφθώδης πυρετός και η χοιρινή πανώλη. Για τον λόγο αυτό, ο Κανονισμός (ΕΚ) 1069/2009 επιβάλλει την ταξινόμησή τους ως Υλικά Κατηγορίας 1, απαιτώντας την άμεση αποτέφρωση ή την υγειονομική ταφή σε ελεγχόμενους χώρους μεγάλου βάθους, γεγονός που καθιστά απαγορευτική οποιαδήποτε παραδοσιακή μορφή διαλογής και ανακύκλωσης (Blanca-Alcubilla et al., 2019).

Επιπλέον, οι αυστηροί κανονισμοί ασφαλείας πτήσεων περιορίζουν τη δυνατότητα διαχείρισης των αποβλήτων εντός του αεροσκάφους. Η παρουσία αιχμηρών αντικειμένων (π.χ. μαχαιροπίρουνα, σπασμένα γυαλιά) ή εύφλεκτων υλικών απαιτεί ειδικό χειρισμό, ενώ η ανάγκη για γρήγορη εκκένωση της καμπίνας οδηγεί συχνά στη χρήση μεγάλων σάκων σύμμεικτων απορριμμάτων. Αυτή η πρακτική αυξάνει τον κίνδυνο βιολογικής επιμόλυνσης για το προσωπικό εδάφους και καθιστά τη χειροκίνητη διαλογή μετά την πτήση μια διαδικασία υψηλού υγειονομικού ρίσκου (IATA, 2019).

Παράλληλα, η διαχείριση των υγρών αποβλήτων και των υπολειμμάτων πάγου εντός της καμπίνας αναπαράγει πρόσθετα προβλήματα ασφάλειας και καθαριότητας. Η διαρροή υγρών μπορεί να κάνει τα δευτερογενή υλικά, όπως το χαρτί και το χαρτόνι, ακατάλληλα προς ανακύκλωση λόγω μόλυνσης, ενώ ταυτόχρονα δημιουργεί ολισθηρές επιφάνειες που θέτουν σε κίνδυνο την ασφάλεια του πληρώματος και των συνεργείων καθαρισμού (Tofalli et al., 2018).

Τα παραπάνω ζητήματα βιοασφάλειας και ασφάλειας αναδεικνύουν την ανάγκη για συστήματα που μειώνουν την ανθρώπινη επαφή με τα απόβλητα. Η υιοθέτηση των Multi-Agent Systems

(MAS) προσφέρει μια καινοτόμο λύση, καθώς επιτρέπει την αυτοματοποιημένη διαλογή και επεξεργασία των αποβλήτων σε ελεγχόμενο περιβάλλον στο έδαφος (Bian et al., 2025). Με τον τρόπο αυτό, διασφαλίζεται η εφαρμογή των υγειονομικών πρωτοκόλλων, ενώ παράλληλα γίνεται πιο εύκολη η ανάκτηση του οργανικού κλάσματος για την παραγωγή υδρογόνου, συμβάλλοντας καθοριστικά στη στρατηγική Zero Waste (Gunerhan et al., 2025).

3.3.3 Ο Ανθρώπινος Παράγοντας και η Πολυπλοκότητα των Εμπλεκόμενων Μερών

Εκτός από τους τεχνικούς και χωροταξικούς περιορισμούς, η ικανότητα της διαχείρισης αποβλήτων στα αεροδρόμια βασίζεται σε μεγάλο βαθμό από τον ανθρώπινο παράγοντα και την συνεργασία όλων των εμπλεκόμενων μερών. Το αεροδρόμιο λειτουργεί ως ένα ανοικτό σύστημα όπου η συμπεριφορά των επιβατών, του προσωπικού και των εταιρειών αλληλεπιδρούν δυναμικά, επηρεάζοντας την ποιότητα των ρευμάτων ανακύκλωσης.

A. Συμπεριφορά Επιβατών και Ακρίβεια Ταξινόμησης: Η συμμετοχή των επιβατών στη διαλογή στην πηγή, αποτελεί πολύ σημαντικό παράγοντα, ο οποίος όμως συχνά χαρακτηρίζεται από χαμηλή απόδοση. Σύμφωνα με την πρόσφατη μελέτη των Manea et al. (2024) στο αεροδρόμιο Malpensa του Μιλάνου, η μέση «ακρίβεια ταξινόμησης» των επιβατών στους συμβατικούς κάδους τεσσάρων ρευμάτων μετρήθηκε μόλις στο 61,8%. Αυτό σημαίνει ότι σχεδόν το 40% των απορριμμάτων καταλήγει σε λάθος κάδο.

Το φαινόμενο αυτό οφείλεται σε διάφορους παράγοντες:

1. Βιασύνη και Άγχος: Οι επιβάτες βρίσκονται υπό πίεση χρόνου, αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μειώνει την προσοχή τους στη σήμανση των κάδων.
2. Επιμόλυνση: Η ρίψη υπολειμμάτων τροφίμων ή υγρών (π.χ. μισοτελειωμένοι καφέδες) στους κάδους χαρτιού ή πλαστικού είναι συχνή, αχρηστεύοντας το περιεχόμενο ολόκληρου του κάδου και καθιστώντας την ανακύκλωση αδύνατη (Manea et al., 2024).
3. Πολιτισμικές Διαφορές: Όπως επισημαίνουν οι Tofalli et al. (2018), η κουλτούρα και η διαφορετικότητα των επιβατών επηρεάζουν όχι μόνο την ποσότητα αλλά και τη συμπεριφορά απόρριψης. Η έλλειψη ενιαίας σήμανσης και χρωματικού κώδικα διεθνώς προκαλεί σύγχυση στους ταξιδιώτες που έρχονται από διαφορετικές χώρες με διαφορετικά συστήματα ανακύκλωσης.

B. Ο Ρόλος των Κοινωνικών Προτύπων και τα Συστήματα Πολλαπλών Πρακτόρων: Η ανάλυση της συμπεριφοράς μέσω Συστημάτων Πολλαπλών Πρακτόρων (Multi-Agent Systems - MAS) έχει δείξει ότι οι «κοινωνικοί κανόνες» (social norms) και η «περιβαλλοντική ευαισθητοποίηση»

παίζουν καθοριστικό ρόλο. Σύμφωνα με τους Bian et al. (2025), η συμπεριφορά απόρριψης δεν είναι στατική αλλά επηρεάζεται από τις στρατηγικές διαχείρισης. Η έρευνα έδειξε ότι η εφαρμογή μεθόδων «Δημοσιότητας και Εκπαίδευσης» μπορεί να αυξήσει το ποσοστό των επιβατών που ταξινομούν σωστά και επιλέγουν πράσινα προϊόντα κατά 41% σε σχέση με το σενάριο αναφοράς. Αντίθετα, οι αυστηρές νομικές ρυθμίσεις χωρίς εκπαίδευση οδηγούν συχνά σε παθητική συμπεριφορά και χαμηλότερα αποτελέσματα (Bian et al., 2025).

Γ. Πολυπλοκότητα και Συντονισμός Εμπλεκόμενων Φορέων: Η διαχείριση των αποβλήτων γίνεται δυσκολότερη από τον μεγάλο αριθμό των εμπλεκόμενων φορέων που δραστηριοποιούνται στον ίδιο χώρο. Κάθε φορέας έχει συχνά διαφορετικές προτεραιότητες και διαδικασίες. Για παράδειγμα, τα πληρώματα καμπίνας, υπό την πίεση των αυστηρών χρόνων εξυπηρέτησης, δίνουν προτεραιότητα στην ταχύτητα καθαρισμού και την ασφάλεια έναντι της διαλογής των υλικών (Tofalli et al., 2018). Η έλλειψη εναρμονισμένων διαδικασιών μεταξύ των αεροπορικών εταιρειών και των φορέων επίγειας εξυπηρέτησης οδηγεί συχνά στη μίξη διαχωρισμένων ρευμάτων κατά τη μεταφορά τους στους κεντρικούς κάδους του αεροδρομίου, ακυρώνοντας την προσπάθεια που έγινε στην πηγή (IATA, 2019).

3.3.4 Έλλειψη Κατάλληλων Υποδομών Επεξεργασίας (Lack of On-site Infrastructure)

Η μετάβαση από τη γραμμική διαχείριση (συλλογή και ταφή) σε μοντέλα κυκλικής οικονομίας απαιτεί εξειδικευμένες υποδομές, οι οποίες συχνά απουσιάζουν από το περιβάλλον των αεροδρομίων.

- **Εξάρτηση από Εξωτερικούς Φορείς:** Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα αεροδρόμια δεν διαθέτουν δικές τους μονάδες επεξεργασίας και εξαρτώνται από εξωτερικούς εργολάβους και τις δημοτικές υποδομές (ΧΥΤΑ, Κέντρα Διαλογής). Αυτό οδηγεί σε αυξημένο λειτουργικό κόστος λόγω των τελών διάθεσης (tipping fees) και χάσιμο του ελέγχου επί της τελικής μοίρας των υλικών, ενώ ταυτόχρονα αυξάνει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα λόγω των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τα οχήματα μεταφοράς των αποβλήτων σε απομακρυσμένες εγκαταστάσεις (Sarbassov et al., 2020).
- **Ανάγκη για Νέες Τεχνολογίες:** Η καινοτόμος πρόταση για μετατροπή των οργανικών αποβλήτων σε ενέργεια ή υδρογόνο απαιτεί την εγκατάσταση προηγμένου εξοπλισμού εντός του αεροδρομίου, όπως αναμορφωτές ατμού και μονάδες διαχωρισμού υδρογόνου. Η έλλειψη τέτοιων υποδομών σήμερα καθιστά την εφαρμογή αυτών των λύσεων δύσκολη

χωρίς σημαντικές νέες επενδύσεις και ανασχεδιασμό των εγκαταστάσεων (Gunerhan et al., 2025).

- **Σχεδιαστικά Κενά:** Η περιβαλλοντική απόδοση ενός αεροδρομίου καθορίζεται συχνά από τον αρχικό του σχεδιασμό. Παλαιότερες εγκαταστάσεις (legacy infrastructure) δεν προέβλεψαν χώρους για σύγχρονα συστήματα διαχείρισης, όπως χώρους κομποστοποίησης ή μεγάλες μονάδες διαλογής, δημιουργώντας χωροταξικά προβλήματα στην προσπάθεια εκσυγχρονισμού τους και εφαρμογής «πράσινου» σχεδιασμού (Ferrulli, 2016).
- **Θετικές Εξαιρέσεις:** Αξίζει να σημειωθεί ότι ορισμένα αεροδρόμια, όπως ο Διεθνής Αερολιμένας Αθηνών, αποτελούν εξαίρεση καθώς διαθέτουν ιδιόκτητη Μονάδα Επεξεργασίας Βιομηχανικών Αποβλήτων (MEBA) και Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ), γεγονός που επιτρέπει την επιτόπια διαχείριση και επαναχρησιμοποίηση των εκροών για άρδευση, μειώνοντας την εξάρτηση από τρίτους (Athens International Airport, 2024).

Κεφάλαιο 4: Στρατηγικές Κυκλικής Οικονομίας και Τεχνολογίες Διαχείρισης

Σε αυτό το κεφάλαιο αναπτύσσεται το πλαίσιο της εξέλιξης από τα παραδοσιακά μοντέλα διαχείρισης αποβλήτων σε στρατηγικές κυκλικής οικονομίας εντός του αεροδρομικού περιβάλλοντος. Η εργασία εστιάζει στην εφαρμογή της ιεράρχησης των αποβλήτων και την ενσωμάτωση καινοτόμων τεχνολογιών αιχμής, με τελικό στόχο τη μεγιστοποίηση της ανάκτησης πόρων και την ελαχιστοποίηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των αερομεταφορών.

4.1 Ιεράρχηση Αποβλήτων και Κυκλική Οικονομία: Από το 3R στο Πλαίσιο 9R

Η παραδοσιακή προσέγγιση της «γραμμικής οικονομίας» (λήψη - κατασκευή - χρήση - απόρριψη), η οποία κυριάρχησε τις προηγούμενες δεκαετίες, έχει αποδειχθεί περιβαλλοντικά μη βιώσιμη, η οποία είχε σαν αποτέλεσμα την σε ταχεία εξάντληση των φυσικών πόρων και την ανεξέλεγκτη συσσώρευση αποβλήτων. Στον αεροπορικό κλάδο, η μετάβαση προς την Κυκλική Οικονομία δεν αποτελεί πλέον μια προαιρετική επιλογή, αλλά μια απαραίτητη αναγκαιότητα για τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος και τη συμμόρφωση με τους διεθνείς στόχους βιωσιμότητας (Gunerhan et al., 2025).

4.1.1 Η Κλασική Ιεράρχηση (Waste Hierarchy)

Σύμφωνα με το εγχειρίδιο πολιτικής του Διεθνούς Συμβουλίου Αεροδρομίων (ACI, 2018) και την Οδηγία-Πλαίσιο 2008/98/EK της Ευρωπαϊκής Ένωσης, η διαχείριση των αποβλήτων πρέπει να ακολουθεί μια αυστηρά καθορισμένη σειρά προτεραιοτήτων:

1. Αποφυγή / Πρόληψη: Η πιο σημαντική προτεραιότητα, όπου ζητούμενο είναι η μη δημιουργία αποβλήτου εξ αρχής.
2. Μείωση: Ελαχιστοποίηση της ποσότητας των υλικών που χρησιμοποιούνται.
3. Επαναχρησιμοποίηση: Χρήση προϊόντων ξανά για τον ίδιο σκοπό.
4. Ανακύκλωση: Επεξεργασία υλικών για παραγωγή νέων προϊόντων.
5. Ανάκτηση Ενέργειας: Μετατροπή μη ανακυκλώσιμων αποβλήτων σε ενέργεια (Waste-to-Energy).
6. Διάθεση: Η ταφή, η οποία αποτελεί την τελευταία λύση (ACI, 2018; European Parliament and Council, 2008).

4.1.2 Το Καινοτόμο Πλαίσιο "9R" για τα Αεροδρόμια

Στη συνέχεια, πέρα από την κλασική ιεράρχηση, η σύγχρονη βιβλιογραφία εισάγει το πλαίσιο "9R Framework", το οποίο προσφέρει πιο εξειδικευμένες στρατηγικές για το περιβάλλον των αεροδρομίων. Σύμφωνα με τους Tjahjono et al. (2023), το πλαίσιο αυτό διαβαθμίζει τις δράσεις ανάλογα με την πολυπλοκότητα και την αξία που διατηρούν:

- R0 - Refuse (Άρνηση): Το αεροδρόμιο αρνείται να προμηθευτεί προϊόντα που γίνονται άμεσα απόβλητα (π.χ. κατάργηση πλαστικών καλαμακίων στις καφετέριες).
- R1 - Rethink (Επαναπροσδιορισμός): Συχνή χρήση κοινών πόρων, όπως η κοινή χρήση εξοπλισμού εδάφους μεταξύ αεροπορικών εταιρειών.
- R2 - Reduce (Μείωση): Αύξηση της αποδοτικότητας στην κατασκευή ή χρήση προϊόντων (π.χ. ψηφιοποίηση εισιτηρίων για μείωση χαρτιού).
- R3 - Reuse (Επαναχρησιμοποίηση): Επαναχρησιμοποίηση από άλλο χρήστη (π.χ. δωρεά πλεονασματικού φαγητού από τα lounges σε φιλανθρωπικούς σκοπούς).
- R4 - Repair (Επισκευή): Συντήρηση εξοπλισμού και επίπλων του τερματικού σταθμού αντί της αντικατάστασης.
- R5 - Refurbish (Ανακαίνιση): Αναβάθμιση παλαιού εξοπλισμού.
- R6 - Remanufacture (Ανακατασκευή): Χρήση τμημάτων από παλιά προϊόντα σε νέα.

- R7 - Repurpose (Αλλαγή χρήσης): Χρήση υλικών για διαφορετικό σκοπό (π.χ. μετατροπή παλαιών στολών προσωπικού σε μονωτικό υλικό).
- R8 - Recycle (Ανακύκλωση): Επεξεργασία υλικών για την παραγωγή ίδιων (υψηλής ποιότητας) ή κατώτερων (χαμηλής ποιότητας) υλικών.
- R9 - Recover (Ανάκτηση): Ανάκτηση ενέργειας από την αποτέφρωση υλικών (Tjahjono et al., 2023).

Η εφαρμογή του πλαισίου 9R απαιτεί τον μετασχηματισμό της διαχείρισης αποβλήτων λιανικής στο αεροδρόμιο, μετατρέποντας τις ροές αποβλήτων σε πόρους. Η επιτυχία αυτών των στρατηγικών εξαρτάται από την ικανότητα του αεροδρομίου να διαχωρίζει με ακρίβεια τα υλικά, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την υιοθέτηση καινοτόμων τεχνολογιών, όπως τα Συστήματα Πολλαπλών Πρακτόρων (MAS), για την αυτοματοποίηση της διαλογής και την προετοιμασία του οργανικού κλάσματος για την παραγωγή βιο-υδρογόνου (Tjahjono et al., 2023).

Σχήμα 4.1: Το πλαίσιο των 9R για την εφαρμογή της κυκλικής οικονομίας.

	Smarter product use and manufacture	R0 Refuse	Make product redundant by abandoning its function or by offering the same function with a radically different product
		R1 Rethink	Make product use more intensive (e.g. by sharing product)
		R2 Reduce	Increase efficiency in product manufacture or use by consuming fewer natural resources and materials
	Extend lifespan of product and its parts	R3 Reuse	Reuse by another consumer of discarded product which is still in good condition and fulfils its original function
		R4 Repair	Repair and maintenance of defective product so it can be used with its original function
		R5 Refurbish	Restore an old product and bring it up to date
		R6 Remanufacture	Use parts of discarded product or its parts in a new product with the same function
		R7 Repurpose	Use discarded product or its parts in a new product with a different function
	Useful application of materials	R8 Recycle	Process materials to obtain the same (high grade) or lower (low grade) quality
		R9 Recover	Incineration of material with energy recovery

Πηγή: Προσαρμογή από Tjahjono et al. (2023).

4.2 Καινοτόμες Τεχνολογίες: Ευφυή Συστήματα και Αυτοματισμός

Η συνθετότητα των αεροδρομικών υποδομών, σε συνδυασμό με την συμπεριφορά των επιβατών, κάνει τις κλασσικές μεθόδους σήμανσης ανεπαρκείς για την επίτευξη υψηλών ποσοστών ανακύκλωσης. Η συχνή λανθασμένη διαλογή στην πηγή οδηγεί σε μεγάλη μόλυνση των κάδων,

υποβαθμίζοντας την ποιότητα των ανακτήσιμων υλικών. Έτσι εξυπακούεται, η ανάγκη για λύσεις που βασίζονται με τεχνολογικές καινοτομίες, καθώς έτσι θα προχωρήσει η μετάβαση σε ένα μοντέλο αυτόνομης και αποτελεσματικής διαχείρισης. Οι σύγχρονες προσεγγίσεις χωρίζονται σε συστήματα προσομοίωσης της ανθρώπινης συμπεριφοράς και σε φυσικά συστήματα αυτοματοποιημένης διαλογής (Gunerhan et al., 2025).

4.2.1 Συστήματα Πολλαπλών Πρακτόρων (Multi-Agent Systems - MAS)

Τα Συστήματα Πολλαπλών Πρακτόρων (MAS) αποτελούν μια μορφή Τεχνητής Νοημοσύνης που επιτρέπει τη μοντελοποίηση της αλληλεπίδρασης διαφορετικών «πρακτόρων» (επιβάτες, καθαριστές, διαχειριστές) εντός του αεροδρομίου. Σύμφωνα με τη μελέτη των Bian et al. (2025), η χρήση των μοντέλων MAS είναι πολύ σημαντική για την πρόβλεψη της ροής των αποβλήτων και τη βελτιστοποίηση των στρατηγικών διαλογής. Η έρευνα έδειξε ότι η συμπεριφορά των επιβατών δεν είναι στάσιμη αλλά επηρεάζεται από εξωτερικά ερεθίσματα. Η προσομοίωση έδειξε πως ο συνδυασμός σεναρίων «Δημοσιότητας και Εκπαίδευσης» (Propaganda and Education - PE) με νομικά κίνητρα (Laws and Regulations - LR) μπορεί να αυξήσει σημαντικά την αποτελεσματικότητα της διαλογής στην πηγή. Μέσω του MAS, καθίσταται δυνατός ο εντοπισμός των «επικίνδυνων σημείων» (hotspots) εντός του αεροδρομίου όπου παρατηρούνται τα μεγαλύτερα σφάλματα ταξινόμησης, επιτρέποντας στοχευμένες παρεμβάσεις (Bian et al., 2025).

4.2.2 Έξυπνοι Κάδοι με Μηχανική Μάθηση (Smart Bins & Deep Learning)

Για την άμεση αντιμετώπιση του ανθρώπινου λάθους, η τεχνολογία των «Έξυπνων Κάδων» (Smart Bins) προσφέρει λύσεις υψηλής ακρίβειας. Όπως περιγράφουν οι Manea et al. (2024) στη μελέτη τους για το αεροδρόμιο Malpensa, οι κάδοι αυτοί (τύπου WiSort) χρησιμοποιούν κάμερες και αλγόριθμους Deep Learning για να αναγνωρίζουν οπτικά το είδος του απορρίμματος που εισάγει ο επιβάτης. Το σύστημα κατευθύνει αυτόματα το απόβλητο στον σωστό σάκο, εξαλείφοντας το πρόβλημα της «ακρίβειας ταξινόμησης» (classification accuracy) των επιβατών, η οποία μετρήθηκε μόλις στο 61,8% στους συμβατικούς κάδους. Η αποτελεσματικότητα των MAS στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς βασίζεται στην εξέταση διαφορετικών παραμέτρων παρέμβασης. Όπως παρουσιάζεται αναλυτικά στον Πίνακα 4.1, τα σενάρια κυμαίνονται από την απλή βελτίωση των υποδομών (IF) έως τον συνδυασμό εκπαιδευτικών δράσεων (PE) και

νομοθετικών κινήτρων (LR), επιτρέποντας στο σύστημα να επιλέξει τη βέλτιστη στρατηγική για τη μεγιστοποίηση της ανακύκλωσης.

Πίνακας 4.1 Περιγραφή στρατηγικών σεναρίων για τη διαλογή αποβλήτων στο περιβάλλον του αεροδρομίου.

Strategic scenario setting.

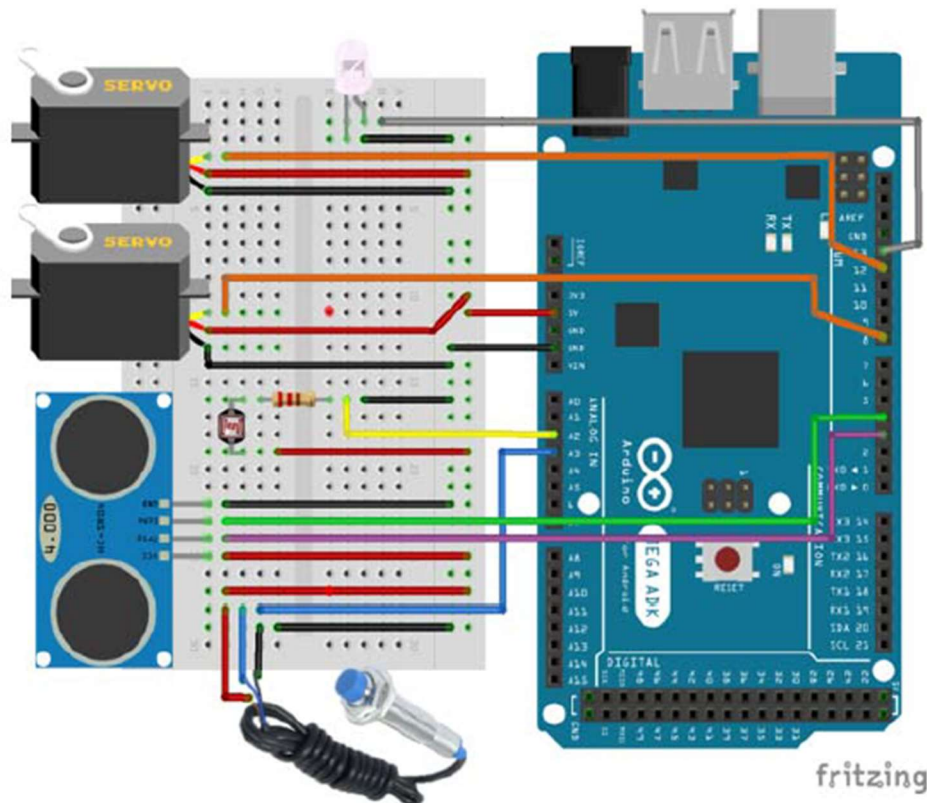
Scenarios	Scenario measures
BAU scenario	—
Internal facilities scenario (IF)	Increase internal facilities and change the color of trash cans or the shape of trash drop-offs on the airport.
Propaganda and education scenario (PE)	Innovate airport propaganda and education by broadcasting waste separation and recycling promotional videos in airports.
Environmental stimulus scenario (ES)	Enhance the environmental stimulus within airports and appropriate increase in the layout of natural spaces within airports.
Laws and regulations scenario (LR)	Enact the relevant regulations to establish appropriate incentives and penalties for waste classification and recycling.
Full-factor change scenario (FC)	Implement a combination of the above four scenarios.

Σημείωση: Προσαρμογή από *Bian et al. (2025)*.

4.2.3 Αυτοματοποιημένη Διαλογή Χαμηλού Κόστους (IoT & Sensors)

Πέρα από τις σύνθετες λύσεις τεχνητής νοημοσύνης, αναπτύσσονται και οικονομικά αποδοτικές λύσεις βασισμένες σε μικροελεγκτές (π.χ. Arduino) και αισθητήρες. Μια τέτοια προσέγγιση χρησιμοποιεί συνδυασμό αισθητήρων υπερήχων (ultrasonic) για ανίχνευση κίνησης, επαγωγικών αισθητήρων (inductive proximity sensors) για τον εντοπισμό μετάλλων και φωτοαντιστάσεων (LDR) για τη διάκριση διαφανών και μη διαφανών υλικών. Το σύστημα αυτό διαχωρίζει αυτόματα τα απορρίμματα σε τρεις κατηγορίες (πλαστικό, χαρτί, αλουμίνιο) χρησιμοποιώντας σερβοκινητήρες που περιστρέφουν τον μηχανισμό διαλογής στην κατάλληλη γωνία (π.χ. 95° για αλουμίνιο, 50° για χαρτί). Αυτή η λύση υπόσχεται μια χαμηλού κόστους εναλλακτική για σημεία του αεροδρομίου με συγκεκριμένες ροές αποβλήτων (π.χ. χώροι αναμονής), εξασφαλίζοντας τον διαχωρισμό χωρίς την ανάγκη ακριβών συστημάτων επεξεργασίας εικόνας (Hassan et al., 2018).

Σχήμα 4.2 Ηλεκτρολογικό σχέδιο και συνδεσμολογία (Circuit Connection) του αυτοματοποιημένου συστήματος διαλογής βασισμένου σε Arduino.



Σημείωση: Προσαρμογή από Hassan et al. (2018).

4.3 Τεχνολογίες Ανάκτησης Ενέργειας και Παραγωγή Υδρογόνου

Η ανάκτηση ενέργειας αποτελεί το τελικό στάδιο της κυκλικής διαχείρισης (R9 - Recover), στοχεύοντας στην αξιοποίηση των υπολειμματικών αποβλήτων που δεν μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν ή να ανακυκλωθούν ως υλικά. Η διαχείριση του οργανικού κλάσματος των αποβλήτων (υπολείμματα τροφίμων) αποτελεί τη μεγαλύτερη πρόκληση αλλά και ευκαιρία για τους αερολιμένες. Οι τεχνολογίες ανάκτησης ενέργειας (Waste-to-Energy) εξελίσσονται από την απλή καύση προς προηγμένες μεθόδους παραγωγής καθαρών καυσίμων, προσφέροντας λύση στο πρόβλημα των αποβλήτων Κατηγορίας 1 (ICW). (Gunerhan et al., 2025).

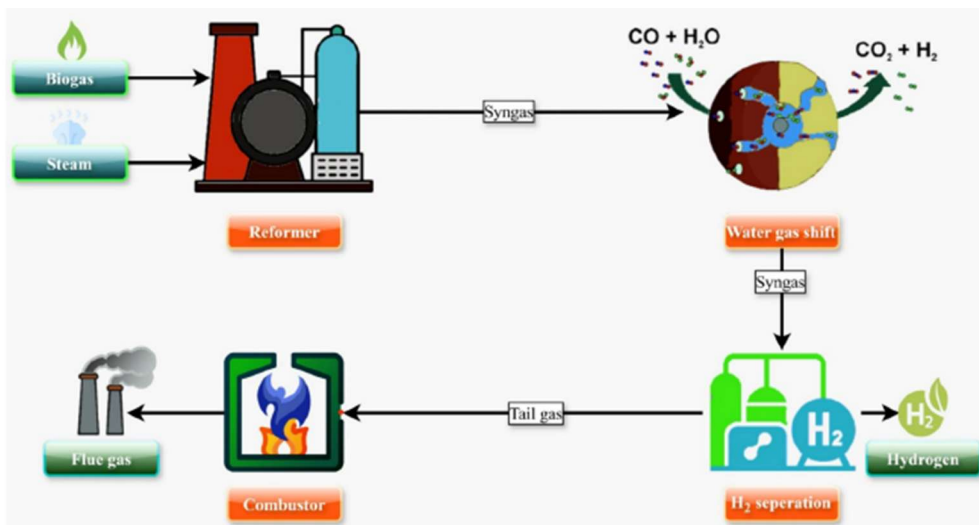
4.3.1 Βιοχημική Διεργασία: Αναερόβια Χώνευση

Η παραγωγή βιοαερίου από τα οργανικά απόβλητα καμπίνας γίνεται από την διεργασία της Αναερόβιας Χώνευσης . Πρόκειται για μια βιοχημική διαδικασία όπου πολύπλοκα οργανικά πολυμερή (υδατάνθρακες, πρωτεΐνες, λίπη) διασπώνται από μικροοργανισμούς απουσία οξυγόνου. Η διαδικασία περιλαμβάνει τέσσερα συγκεκριμένα στάδια: υδρόλυση, οξεογένεση, οξικογένεση και μεθανογένεση. Το τελικό προϊόν είναι το βιοαέριο, ένα μίγμα που αποτελείται κυρίως από μεθάνιο (CH_4 ~60%) και διοξείδιο του άνθρακα (CO_2 ~40%). Η απόδοση της διεργασίας εξαρτάται από τον αυστηρό έλεγχο παραμέτρων όπως το pH (6.8-7.2), η θερμοκρασία (μεσόφιλη ή θερμοφιλή) και η αναλογία άνθρακα προς άζωτο (C/N), η οποία στα απόβλητα catering θεωρείται ιδανική λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε σάκχαρα (Gunerhan et al., 2025).

4.3.2 Τεχνολογική Ενοποίηση: Αναμόρφωση Ατμού και Καθαρισμός

Για να πετύχουμε την μέγιστη αξία του παραγόμενου βιοαερίου, αυτό υποβάλλεται σε επιπλέον επεξεργασία για την παραγωγή υδρογόνου μέσω της Αναμόρφωσης Ατμού Βιοαερίου (Steam Biogas Reforming). Η διαδικασία περιλαμβάνει τρία βασικά στάδια: α) την αναμόρφωση (reforming), όπου το μεθάνιο του βιοαερίου αντιδρά με ατμό υψηλής θερμοκρασίας (700°C) παρουσία καταλύτη νικελίου παράγοντας υδρογόνο και μονοξείδιο του άνθρακα, β) την αντίδραση μετατόπισης (water-gas shift) για πρόσθετη παραγωγή υδρογόνου, και γ) τον τελικό καθαρισμό μέσω Προσρόφησης με Εναλλαγή Πίεσης (PSA). Η μέθοδος αυτή επιτυγχάνει καθαρότητα υδρογόνου άνω του 99,9%, καθιστώντας το κατάλληλο για χρήση σε οχήματα εδάφους (GSE) ή κυψέλες καυσίμου (Gunerhan et al., 2025).

Σχήμα 4.3 Διάγραμμα ροής της διεργασίας αναμόρφωσης βιοαερίου και παραγωγής καθαρού υδρογόνου



Σημείωση: Προσαρμογή από Gunerhan et al. (2025).

4.3.3 Η Κρίσιμη Σημασία της Διαλογής στην Ενεργειακή Απόδοση

Η απόδοση της παραγωγής υδρογόνου είναι άμεσα συνδεδεμένη με την καθαρότητα της οργανικής ύλης που τροφοδοτεί τον αντιδραστήρα. Η παρουσία ανόργανων προσμίξεων (όπως πλαστικά ή μέταλλα από δίσκους φαγητού) μειώνει εντυπωσιακά την απόδοση της χώνευσης και αυξάνει τις ανάγκες συντήρησης των εγκαταστάσεων. Εδώ παίζει σημαντικό ρόλο η συμβολή των καινοτόμων συστημάτων διαλογής, όπως τα Multi-Agent Systems (MAS) και οι Έξυπνοι Κάδοι, που διασφαλίζουν ότι μόνο το βιοαποδομήσιμο κλάσμα οδηγείται στη χώνευση, αυξάνοντας την παραγωγή βιοαερίου και ελαχιστοποιώντας το λειτουργικό κόστος (Bian et al., 2025; Gunerhan et al., 2025).

4.3.4 Περιβαλλοντική Αποτίμηση και Μείωση Ανθρακικού Αποτυπώματος

Η ενσωμάτωση μονάδων παραγωγής υδρογόνου εντός του αεροδρομίου φέρνει σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη. Με τη μετατροπή των οργανικών αποβλήτων σε υδρογόνο, αποφεύγεται η έκλυση μεθανίου στους ΧΥΤΑ, η οποία έχει 25 φορές μεγαλύτερο δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη από το CO₂. Επιπλέον, η χρήση του παραγόμενου υδρογόνου για την κίνηση των λεωφορείων πίστας και των οχημάτων τροφοδοσίας ακυρώνει τη χρήση ορυκτού ντίζελ. Η

διαδικασία αυτή απαιτεί περίπου 21.75 kWh ενέργειας για την παραγωγή 1 kg υδρογόνου, ποσό σημαντικά χαμηλότερο από την ηλεκτρόλυση νερού, καθιστώντας την περιβαλλοντικά και οικονομικά βιώσιμη λύση για την ενεργειακή μετάβαση των αεροδρομίων (Gunerhan et al., 2025).

Πίνακας 4.2: Επίδραση της ανακύκλωσης απαερίων (TGR) στην παραγωγή υδρογόνου και την κατανάλωση ενέργειας.

Impact of tail gas recycling (TGR) on hydrogen production.

Tail gas recycling rate (%)	H ₂ production rate (kg/h)	Total energy consumption (kWh)	kWh/kg of H ₂	Total H ₂ production (tonnes/year)
0	22.97	501.4	21.828	185.78
10	23.96	521.35	21.759	193.79
20	25.01	544.08	21.754	202.28
30	26.14	570.58	21.828	211.42
40	27.34	602.47	22.036	221.13
50	28.64	642.5	22.036	231.64

Σημείωση: Προσαρμογή από Gunerhan et al. (2025).

Παράλληλα, η οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης εξετάζεται μέσω της μεταβολής των κεφαλαιουχικών (CapEx) και λειτουργικών (OpEx) δαπανών. Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.2, ενώ η αύξηση του ρυθμού ανακύκλωσης συνεπάγεται μια συνετή άνοδο του κόστους, η συνολική απόδοση σε υδρογόνο βελτιστοποιείται, διασφαλίζοντας την ενεργειακή αυτονομία του αεροδρομίου και τη μείωση της εξάρτησης από εξωτερικούς προμηθευτές καυσίμων.

4.4 Μέτρηση της Απόδοσης: Ο Δείκτης Zero Waste Index (ZWI)

Η αλλαγή προς την Κυκλική Οικονομία απαιτεί νέα εργαλεία αξιολόγησης, καθώς οι παραδοσιακοί δείκτες, όπως το «ποσοστό ανακύκλωσης» ή το «ποσοστό εκτροπής από την ταφή», κρίνονται πλέον ανεπαρκείς. Οι δείκτες αυτοί επικεντρώνονται στη μείωση του όγκου των αποβλήτων, χωρίς να υπολογίζουν την ποιότητα των ανακτώμενων υλικών και το πραγματικό περιβαλλοντικό όφελος που προκύπτει από την αντικατάσταση φυσικών πόρων.

4.4.1 Ορισμός και Μεθοδολογία του ZWI

Ο Δείκτης Μηδενικών Αποβλήτων, όπως αναπτύχθηκε και θεμελιώθηκε, αποτελεί ένα καινοτόμο εργαλείο λήψης αποφάσεων που μετρά την απόδοση ενός συστήματος διαχείρισης βάσει της ικανότητάς του να υποκαθιστά τη χρήση παρθένων υλικών. Σε αντίθεση με τις συμβατικές μετρήσεις βάρους, ο δείκτης ZWI υπολογίζει την ποσότητα ενέργειας, νερού και εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου που εξοικονομούνται από την ανάκτηση κάθε υλικού. Μαθηματικά, ο

δείκτης εκφράζεται ως το άθροισμα της αξίας υποκατάστασης όλων των ανακτώμενων πόρων προς τη συνολική ποσότητα των παραγόμενων αποβλήτων, προσφέροντας μια ολιστική εικόνα της περιβαλλοντικής απόδοσης (Zaman, 2014). Μαθηματικά, ο δείκτης ZWI εκφράζεται μέσω της ακόλουθης εξίσωσης:

$$\frac{\sum_{i=1}^n (WMS_{ij} \times SF_{ij})}{\sum_{i=1}^n GWS}$$

Όπου:

- ZWI: Ο Δείκτης Μηδενικών Αποβλήτων.
- WMS_{ij} : Η ποσότητα της ροής αποβλήτων i (π.χ. χαρτί, πλαστικό) που διαχειρίζεται με το σύστημα j (π.χ. ανακύκλωση, κομποστοποίηση).
- SF_{ij} (Substitution Factor): Ο συντελεστής υποκατάστασης για κάθε ροή αποβλήτων i στο σύστημα j . Εκφράζει την ικανότητα του ανακτώμενου υλικού να υποκαταστήσει παρθένες πρώτες ύλες.
- GWS: Η συνολική ποσότητα των παραγόμενων αποβλήτων

Οι τιμές των Συντελεστών Υποκατάστασης () που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό, όπως προκύπτουν από τη διεθνή βιβλιογραφία, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3 που ακολουθεί:

Πίνακας 4.3 Συντελεστές Υποκατάστασης (*Substitution Factors - SF*) για κύρια ρεύματα αεροδρομικών αποβλήτων.

Ρεύμα Αποβλήτων	Σύστημα Διαχείρισης (j)	Συντελεστής (SF) (Εύρος)	Παρατηρήσεις / Αιτιολόγηση
Μέταλλα (Metal)	Ανακύκλωση	0.79 – 0.96	Το 0.96 αντιστοιχεί στο αλουμίνιο και το 0.79 στον σίδηρο/χάλυβα
Χαρτί (Paper)	Ανακύκλωση	0.84 – 1.00	Εξαρτάται από την ποιότητα της ίνας (π.χ. καθαρό χαρτί γραφείου vs συσκευασία)
Πλαστικό (Plastic)	Ανακύκλωση	0.90 – 0.97	Υψηλός συντελεστής λόγω υποκατάστασης πετρελαίου
Γυαλί (Glass)	Ανακύκλωση	0.90 – 1.00	Δυνατότητα επ' άπειρον ανακύκλωσης χωρίς απώλεια ιδιοτήτων
Οργανικά (Organic)	Κομποστοποίηση	0.60 – 0.65	Παραγωγή εδαφοβελτιωτικού. Σημείωση: Η προτεινόμενη μέθοδος παραγωγής H ₂ (Gunerhan et al.) αναμένεται να αυξήσει περαιτέρω αυτή την τιμή.
Σύμμεικτα (Mixed)	Ανάκτηση / Διαλογή	0.25 – 0.45	Χαμηλή ανάκτηση λόγω επιμόλυνσης και υποβάθμισης υλικών

Πηγή: Προσαρμογή από Zaman (2014) και Özbay & Gokceviz (2022). Τα δεδομένα για τη δυνατότητα ενεργειακής αξιοποίησης των οργανικών μέσω παραγωγής υδρογόνου βασίζονται στους Gunerhan et al. (2025).

4.4.2 Εφαρμογή και Οφέλη στα Αεροδρόμια

Η εφαρμογή του ZWI στο αεροδρόμιο επιτρέπει τη στρατηγική μετατόπιση του στόχου από την απλή «εκτροπή από την ταφή» στη «διατήρηση της αξίας των πόρων». Όπως κατέδειξε η μελέτη των Özbay & Gokceviz (2022) στην περίπτωση του αεροδρομίου της Κωνσταντινούπολης (IST), η μεγιστοποίηση της διαλογής υλικών υψηλής αξίας (όπως το αλουμίνιο και το καθαρό χαρτί)

μπορεί να αυξήσει τον δείκτη ZWI από αρνητικές τιμές —που υποδηλώνουν απώλεια πόρων και περιβαλλοντική επιβάρυνση— σε θετικές. Η μελέτη απέδειξε ότι η υιοθέτηση του ZWI ως βασικού δείκτη απόδοσης βοηθά τη διοίκηση του αεροδρομίου να αναγνωρίσει ποιες ροές αποβλήτων (π.χ. απόβλητα καμπίνας ή τερματικού σταθμού) προσφέρουν το μέγιστο περιβαλλοντικό και οικονομικό όφελος, αναδεικνύοντας τον αερολιμένα ως κόμβο ανάκτησης πόρων και όχι απλώς ως παραγωγό αποβλήτων (Özbay & Gokceviz, 2022).

5. Μελέτη Περίπτωσης και Προτεινόμενο Μοντέλο Διαχείρισης

Το παρόν κεφάλαιο εστιάζει στον Διεθνή Αερολιμένα Αθηνών (ΔΑΑ) «Ελευθέριος Βενιζέλος», ο οποίος αποτελεί το κύριο πεδίο εφαρμογής της μελέτης. Στόχος δεν είναι η απλή περιγραφή της υφιστάμενης κατάστασης, αλλά η κριτική της αξιολόγηση υπό το πρίσμα του δείκτη Zero Waste Index (ZWI) και, στη συνέχεια, η διατύπωση μιας ολοκληρωμένης και τεκμηριωμένης πρότασης μετάβασης, προσαρμοσμένης στις ιδιαιτερότητες του «Ελ. Βενιζέλος». Ως σημείο αναφοράς για τη διεθνή βέλτιστη πρακτική αξιοποιούνται τρεις χαρακτηριστικές περιπτώσεις αερολιμένων, οι οποίες εξετάζονται συνοπτικά ως πλαίσιο σύγκρισης και όχι ως αυτοτελείς μελέτες. Το αεροδρόμιο του Gatwick υπήρξε το πρώτο παγκοσμίως που εγκατέστησε μονάδα ενεργειακής αξιοποίησης (Waste-to-Energy) εντός των εγκαταστάσεών του για τη διαχείριση των αποβλήτων «Κατηγορίας 1», μετατρέποντας τα οργανικά σε βιομάζα για παραγωγή θερμότητας και επιτυγχάνοντας μηδενική ταφή από το 2016, με ταυτόχρονη μείωση των οδικών μεταφορών απορριμμάτων κατά 50% (Baxter & Srisaeng, 2022). Το αεροδρόμιο της Κοπεγχάγης στηρίζεται σε έναν Κεντρικό Σταθμό Εμπορευματοκιβωτίων (Central Container Station) με αυστηρό διαχωρισμό ροών, συνδεδεμένο με το δίκτυο τηλεθέρμανσης της πόλης, επιτυγχάνοντας την αποσύνδεση της αύξησης της επιβατικής κίνησης από την παραγωγή αποβλήτων (Baxter et al., 2018a). Τέλος, το νέο αεροδρόμιο της Κωνσταντινούπολης αποτελεί τη μοναδική περίπτωση με δημοσιευμένη, επικυρωμένη μέτρηση ZWI, η οποία κυμάνθηκε μεταξύ 0,35 (2019) και 0,26 (2020), με ποσοστά εκτροπής 52% και 44% αντίστοιχα (Özbay & Gokceviz, 2022). Η συγκριτική αυτή επισκόπηση οδηγεί σε ένα κρίσιμο συμπέρασμα που διατρέχει ολόκληρο το κεφάλαιο: η υψηλή εκτροπή από την ταφή δεν ταυτίζεται με την υψηλή κυκλικότητα. Όπως τεκμηριώνει ο Zaman (2014), τόσο η ταφή όσο και η αποτέφρωση —ακόμη και με ανάκτηση ενέργειας— αποδίδουν μηδενικό συντελεστή υποκατάστασης παρθένων υλικών, καθώς οι ανακτήσιμοι πόροι καταστρέφονται μόνιμα από τη μαζική καύση. Συνεπώς, μοντέλα όπως του Gatwick και της Κοπεγχάγης, αν και πετυχαίνουν μηδενική ταφή, δεν εξασφαλίζουν από μόνα τους υψηλό ZWI,

ενώ η περίπτωση της Κωνσταντινούπολης καταδεικνύει ότι ακόμη και σύγχρονοι αερολιμένες δυσκολεύονται να υπερβούν την τιμή 0,50. Το δίδαγμα αυτό αποτελεί τον μίτο για την αξιολόγηση του ΔΑΑ που ακολουθεί.

5.1 Διεθνής Αερολιμένας Αθηνών «Ελ. Βενιζέλος»: Υφιστάμενη Κατάσταση και Κριτική Αξιολόγηση

5.1.1 Παραγωγή και Ροές Αποβλήτων

Σύμφωνα με τα επίσημα στοιχεία για το έτος 2023 —έτος κατά το οποίο η επιβατική κίνηση ανέκαμψε πλήρως, ξεπερνώντας τα 28,2 εκατομμύρια επιβάτες— ο ΔΑΑ παρήγαγε συνολικά 35.444 τόνους αποβλήτων, τα οποία μεταφέρθηκαν εκτός αεροδρομίου σε αδειοδοτημένους αποδέκτες προς τελική διαχείριση (Athens International Airport, 2024). Η κατανομή τους ήταν: 35.091 τόνοι στερεών μη επικίνδυνων απορριμμάτων, 353 τόνοι επικίνδυνων αποβλήτων (χημικά, λιπαντικά, μπαταρίες) και 0,2 τόνοι ιατρικών/κλινικών αποβλήτων. Από τα στερεά μη επικίνδυνα, το 81% (28.329 τόνοι) χαρακτηρίζεται ως «ανακυκλώσιμα» και το 19% (6.762 τόνοι) ως αστικού τύπου.

Καθοριστικό στοιχείο για την ανάλυση που ακολουθεί είναι η εσωτερική σύνθεση των «ανακυκλώσιμων» (Πίνακας 5.1). Το συντριπτικό 73% (20.789 τόνοι) προέρχεται από Απόβλητα Κατασκευών και Κατεδαφίσεων (C&D), τα οποία διαχειρίζονται κυρίως ως αδρανή για επιχωματώσεις και έργα οδοποιίας. Αντίθετα, τα ρεύματα υψηλής αξίας υποκατάστασης καταλαμβάνουν πολύ μικρότερα ποσοστά: πλαστικό 8% (2.179 τόνοι), χαρτί 7% (1.956 τόνοι), σίδηρος 2% (575 τόνοι), αφυδατωμένη ιλύς για κομποστοποίηση 3% (885 τόνοι), βιολογικά απόβλητα 2% (651 τόνοι), ξύλο 2% (701 τόνοι), γυαλί 1% (292 τόνοι) και Tetra Pak 1% (197 τόνοι), ενώ αλουμίνιο, ελαστικά και βρώσιμα έλαια καταγράφουν επιμέρους ποσότητες (Athens International Airport, 2024).

Η ικανότητα του ΔΑΑ να υποστηρίξει καινοτόμες στρατηγικές στηρίζεται σε ένα ισχυρό υπόβαθρο συστημάτων διαχείρισης. Το 2023 ο αερολιμένας διατήρησε την πιστοποίηση κατά EN ISO 14001:2015 (Σύστημα Περιβαλλοντικής Διαχείρισης) και επαναπιστοποιήθηκε κατά EN ISO 50001:2018 (Σύστημα Ενεργειακής Διαχείρισης), ενώ αναβάθμισε την κατάταξή του στο Επίπεδο 4+ (Μετάβαση) του προγράμματος Airport Carbon Accreditation (Athens International Airport,

2024). Λειτουργεί ιδιόκτητη Μονάδα Επεξεργασίας Βιομηχανικών Αποβλήτων (ΜΕΒΑ), η οποία το 2023 επεξεργάστηκε 5.395 κ.μ. υγρών αποβλήτων από εργασίες συντήρησης αεροσκαφών, ενώ από τους 353 τόνους επικίνδυνων αποβλήτων το 38,5% οδηγήθηκε σε Συστήματα Εναλλακτικής Διαχείρισης (ενδεικτικά 19,6 τόνοι λιπαντικών ελαίων, 33,4 τόνοι συσσωρευτών και 75,7 τόνοι ηλεκτρονικών αποβλήτων).

Καθοριστική, ωστόσο, για την πρόταση που ακολουθεί είναι η ενεργειακή υποδομή. Το 2023 ο ΔΑΑ εγκαινίασε Φωτοβολταϊκό Πάρκο ισχύος 16MWp, έκτασης 210.000 τ.μ., το οποίο καλύπτει το 45% της ετήσιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ σχεδιάζεται δεύτερη φάση ισχύος 35,5MW με σύστημα αποθήκευσης 82MWh, με απώτερο στόχο να καταστεί ο ΔΑΑ ο πρώτος ευρωπαϊκός αερολιμένας που θα καλύπτει το 100% των αναγκών του από ιδιοπαραγωγή ΑΠΕ (Athens International Airport, 2024). Παράλληλα, οι άμεσες εκπομπές (Scope 1) ανήλθαν σε 5.465 τόνους CO₂e, εκ των οποίων 1.510 τόνοι αποδίδονται στον στόλο οχημάτων εδάφους (Ground Support Equipment) που κινείται με ορυκτά καύσιμα. Η συνύπαρξη ενός πλεονάσματος φθηνής καθαρής ενέργειας με έναν ρυπογόνο στόλο εδάφους αποτελεί ακριβώς το συγκριτικό πλεονέκτημα που θα αξιοποιηθεί στη Φάση 3.

5.1.2 Στρατηγική Διαχείρισης: Η Αρχή «Ο Ρυπαίνων Πληρώνει»

Ο ακρογωνιαίος λίθος της στρατηγικής του ΔΑΑ είναι η εφαρμογή της αρχής «Ο Ρυπαίνων Πληρώνει» (Polluter Pays Principle), εντός της φιλόδοξης πρωτοβουλίας «Route 2025» για την επίτευξη μηδενικού ισοζυγίου εκπομπών (Net Zero). Το σύστημα λειτουργεί μέσω οικονομικών κινήτρων προς τα Τρίτα Μέρη (αεροπορικές εταιρείες, φορείς επίγειας εξυπηρέτησης): οι επιχειρήσεις χρεώνονται για τα απορρίμματα που παράγουν αλλά λαμβάνουν επιστροφές για τις ποσότητες που διαχωρίζουν επιτυχώς στην πηγή. Το μέτρο αυτό, σε συνδυασμό με τη λειτουργία Κέντρου Ανακύκλωσης (το οποίο το 2023 συγκέντρωσε 7,7 τόνους ανακυκλώσιμων), οδήγησε το ποσοστό ανακύκλωσης από το μόλις 3% κατά την έναρξη λειτουργίας του αερολιμένα (2001) στο εντυπωσιακό 81% (2023) (Athens International Airport, 2024). Ωστόσο, όπως τεκμηριώνεται στη συνέχεια, αυτό το ποσοστό —αν εξεταστεί ποιοτικά και όχι ποσοτικά— αποκαλύπτει μια εικόνα πολύ λιγότερο κολακευτική για την πραγματική κυκλικότητα του αερολιμένα.

5.1.3 Κριτική Αξιολόγηση της Κυκλικής Επίδοσης μέσω του ZWI

Η αξιολόγηση της πραγματικής κυκλικής επίδοσης απαιτεί τη μετάβαση από το απλό ποσοστό ανακύκλωσης στον δείκτη Zero Waste Index (ZWI). Ο Zaman (2014) εισήγαγε τον δείκτη ακριβώς επειδή το ποσοστό εκτροπής (diversion rate) δεν αποτυπώνει την αποδοτικότητα υποκατάστασης παρθένων υλικών, ούτε την εξοικονόμηση ενέργειας, αερίων θερμοκηπίου και νερού που συνεπάγεται η ανάκτηση. Ο ZWI ορίζεται ως ο λόγος του αθροίσματος κάθε ρεύματος (WMS) επί τον αντίστοιχο Συντελεστή Υποκατάστασης (Substitution Factor, SF) προς τη συνολική παραγόμενη ποσότητα (GWS), και εκφράζεται ως **αδιάστατος αριθμός στο διάστημα 0–1 (και όχι ως ποσοστό)**:

$$ZWI = \sum (WMS_{ij} \times SF_{ij}) / GWS$$

Οι τιμές SF δεν είναι αυθαίρετες, αλλά προκύπτουν από αναλύσεις κύκλου ζωής. Κατά Zaman (2014) τα όρια ανά κατηγορία είναι: χαρτί 0,84–1,00, γυαλί 0,90–1,00, μέταλλο 0,79–0,96, πλαστικό 0,90–0,97, οργανικά (κομποστοποίηση) 0,60–0,65, σύμμεικτα 0,25–0,45 και ταφή ή αποτέφρωση 0,00. Παρόμοιους συντελεστές υιοθετεί και η μελέτη της Κωνσταντινούπολης (χαρτί 0,90, γυαλί 0,98, μέταλλο 0,85, πλαστικό 0,95, σύμμεικτα 0,30, κομπόστ 0,60, ταφή/αποτέφρωση 0,00), επιβεβαιώνοντας τη συνοχή της μεθοδολογίας (Özbay & Gokceviz, 2022).

Στο σημείο αυτό εντοπίζεται η κεντρική μεθοδολογική αδυναμία της αφήγησης περί «81% ανακύκλωσης». Ο πίνακας του Zaman (2014) **δεν περιλαμβάνει αυτοτελή κατηγορία για τα αδρανή C&D**: τα υλικά αυτά εμπίπτουν στην κατηγορία «σύμμεικτα», με SF μόλις 0,25–0,45. Μάλιστα, ο ίδιος ο Zaman (2014) προειδοποιεί ρητά ότι η ενσωμάτωση των C&D στα αστικά απόβλητα παράγει «παραπλανητικά» (misleading) υψηλά ποσοστά εκτροπής, ακριβώς το φαινόμενο που παρατηρείται στον ΔΑΑ. Εφόσον τα αδρανή αποτελούν το 73% των ανακυκλώσιμων, η απόδοση σε αυτά ενός υψηλού συντελεστή (της τάξης του 0,70) ανεβάζει τεχνητά τον δείκτη: το 72% της συνολικής υποκατάστασης θα προερχόταν από ένα και μόνο ρεύμα χαμηλής πραγματικής αξίας.

Επανυπολογίζοντας τον δείκτη με τους πραγματικούς συντελεστές —δηλαδή κατατάσσοντας τα αδρανή στα «σύμμεικτα» (SF 0,25–0,45) και διατηρώντας τους υψηλούς συντελεστές για τα ρεύματα υψηλής αξίας— προκύπτει αριθμητής της τάξης των 13.000–15.000 τόνων υποκατάστασης, και άρα:

$$ZWI_{AAA} \approx 13.000-15.000 / 35.444 \approx 0,36-0,42$$

αντί της τιμής 0,58 που προκύπτει με τον μη τεκμηριωμένο συντελεστή 0,70 (Πίνακας 5.1). Η διορθωμένη τιμή τοποθετεί τον ΔΑΑ **ουσιαστικά στο ίδιο επίπεδο με την Κωνσταντινούπολη (0,35)**, παρά το εντυπωσιακά υψηλότερο ποσοστό ανακύκλωσης. Με άλλα λόγια, οι δύο αερολιμένες έχουν συγκρίσιμη πραγματική κυκλικότητα, αν και ο ΔΑΑ εμφανίζει διπλάσιο σχεδόν ποσοστό εκτροπής — γεγονός που επιβεβαιώνει εμπειρικά την κριτική του Zaman.

Ρεύμα αποβλήτων	Ποσότητα (t)	SF (αρχικός υπολ.)	SF κατά Zaman (2014)
Αδρανή C&D	20.789	0,70	0,25–0,45 (σύμμεικτα)
Υψηλής αξίας (χαρτί, πλαστικό, μέταλλο, γυαλί)	≈ 5.022	0,95	0,79–1,00
Οργανικά / ιλύς (κομποστοποίηση)	≈ 1.536	0,60	0,60–0,65
Αστικά / υπόλειμμα (ταφή)	≈ 8.097	0,00	0,00–0,30
ZWI (συνολικά)	35.444	≈ 0,58	≈ 0,36–0,42

Πίνακας 5.1: Επανυπολογισμός του ZWI του ΔΑΑ (2023). Η απόδοση SF 0,70 στα αδρανή C&D — ρεύμα που στον Zaman (2014) εμπίπτει στα «σύμμεικτα» (SF 0,25–0,45)— υπερεκτιμά τον δείκτη. Σύνθεση δεδομένων από Athens International Airport (2024) και Zaman (2014).

Το εύρημα αυτό αποκαλύπτει το πραγματικό διαχειριστικό κενό του ΔΑΑ: η κυκλικότητά του στηρίζεται δυσανάλογα σε βαριά αλλά χαμηλής αξίας αδρανή υλικά, ενώ τα ρεύματα υψηλής αξίας υποκατάστασης (χαρτί, πλαστικό, μέταλλο) ανακτώνται σε περιορισμένες ποσότητες και το οργανικό κλάσμα —ιδίως τα απόβλητα τροφοδοσίας «Κατηγορίας 1»— οδηγείται σε καταστροφή χωρίς ανάκτηση. Κατά συνέπεια, η ουσιαστική βελτίωση δεν μπορεί να προέλθει από περαιτέρω αύξηση του όγκου των ανακυκλώσιμων μπάζων, αλλά από δύο άξονες: (α) τη μεγιστοποίηση της

ανάκτησης των ρευμάτων υψηλής αξίας και (β) την ενεργειακή αξιοποίηση του οργανικού κλάσματος. Οι δύο αυτοί άξονες συγκροτούν την πρόταση που ακολουθεί.

5.2 Ολοκληρωμένη Πρόταση: Το Μοντέλο «Smart Circular Airport» για τον ΔΑΑ

Με βάση την παραπάνω κριτική, προτείνεται η μετάβαση του ΔΑΑ σε ένα μοντέλο «Έξυπνου Κυκλικού Αεροδρομίου» (Smart Circular Airport), δομημένο πάνω στο διευρυμένο πλαίσιο 9R της κυκλικής οικονομίας (Tjahjono et al., 2023). Το πλαίσιο 9R, σε αντίθεση με την κλασική πενταβάθμια ιεραρχία, ιεραρχεί εννέα στρατηγικές από τις πλέον κυκλικές (R0 Refuse, R1 Rethink, R2 Reduce) έως τις λιγότερο κυκλικές (R8 Recycle, R9 Recover), προσθέτοντας μάλιστα μια διάσταση «επιπέδου πολυπλοκότητας» (κόστος, χρόνος, προσπάθεια) για κάθε παρέμβαση. Η αξία του πλαισίου έγκειται στο ότι αναγκάζει τον σχεδιαστή να ιεραρχήσει τις λύσεις: η πρόληψη (R0) προηγείται της ανακύκλωσης (R8), και η ανάκτηση ενέργειας (R9) είναι πάντα η έσχατη επιλογή. Η παρούσα πρόταση αναπτύσσεται σε τρεις διαδοχικές φάσεις, καθεμία από τις οποίες αντιστοιχεί σε διαφορετική βαθμίδα του πλαισίου και απαντά σε συγκεκριμένη αδυναμία που εντοπίστηκε στην Ενότητα 5.1.3.

5.2.1 Φάση 1: Κοινωνική Μηχανική και Στρατηγική Πρόληψης (R0–R3)

Πριν από κάθε τεχνολογική παρέμβαση απαιτείται η βελτιστοποίηση της συμπεριφοράς των χρηστών, καθώς αυτή αποτελεί την πρώτη και κρισιμότερη πηγή επιμόλυνσης. Η μελέτη των Manea et al. (2024) στο αεροδρόμιο Malpensa κατέγραψε ότι η ακρίβεια διαλογής των επιβατών στους συμβατικούς κάδους τεσσάρων ρευμάτων ήταν μόλις 61,8% — δηλαδή σχεδόν το 40% των υλικών κατέληγε σε λάθος κάδο, αχρηστεύοντας ολόκληρες ροές ανακυκλώσιμων. Οι αιτίες είναι πολλαπλές: η βιασύνη και το άγχος του ταξιδιού, η επιμόλυνση από υπολείμματα τροφίμων και υγρών, αλλά και οι πολιτισμικές διαφορές και η απουσία ενιαίας διεθνούς σήμανσης (Tofalli et al., 2018· Tjahjono et al., 2023).

Η αντιμετώπιση είναι πρωτίστως κοινωνική, όχι τεχνολογική. Η προσομοίωση Συστημάτων Πολλαπλών Πρακτόρων (MAS) των Bian et al. (2025) δείχνει ότι οι «κοινωνικοί κανόνες» (social norms) και η περιβαλλοντική ευαισθητοποίηση επηρεάζουν καθοριστικά τη συμπεριφορά

απόρριψης. Συγκεκριμένα, η στρατηγική «Δημοσιότητας και Εκπαίδευσης» (Publicity & Education) αυξάνει την ορθή διαλογή κατά 41% σε σχέση με το σενάριο αναφοράς, ενώ στο πληρέστερο σενάριο η πρόθεση ορθής διαλογής ξεπερνά το 98%, με μείωση των εκπομπών κατά 10,64 τόνους CO₂e και των φωτοχημικών ρύπων κατά 15,6%. Κρίσιμη όμως είναι και η προειδοποίηση των ίδιων συγγραφέων: οι παρεμβάσεις αυτές μειώνουν το κέρδος των φορέων συλλογής κατά περίπου 6,6%, γεγονός που καθιστά απαραίτητη τη θεσμική στήριξη με κίνητρα — μια διάσταση που ο ΔΑΑ ήδη καλύπτει μέσω της αρχής «Ο Ρυπαίνων Πληρώνει».

Στο πρακτικό επίπεδο, οι βαθμίδες R0–R3 του πλαισίου CAWM (Tjahjono et al., 2023) μεταφράζονται για τον ΔΑΑ σε συγκεκριμένες δράσεις:

- **R0 (Refuse):** απαγόρευση πλαστικών μιας χρήσης στα σημεία εστίασης και αντικατάστασή τους με βιοδιασπώμενα ή επαναχρησιμοποιούμενα σκεύη, με «πράσινες παραχωρήσεις» (green concessions) που επιβραβεύουν τους συνεργαζόμενους εκμεταλλευτές.
- **R1–R2 (Rethink–Reduce):** εγκατάσταση σταθμών απόρριψης υγρών για τον διαχωρισμό υγρού/ξηρού κλάσματος πριν τον έλεγχο ασφαλείας, καθώς και σταθμών επαναπλήρωσης νερού για μείωση των πλαστικών φιαλών.
- **R3 (Reuse):** σταθμοί δωρεάς αδιάθετων τροφίμων προς κοινωνικές δομές και χρήση επαναχρησιμοποιούμενων σκευών στα καταστήματα εστίασης.

Στόχος της φάσης αυτής είναι η ριζική μείωση της επιμόλυνσης στην πηγή, ώστε τα επόμενα τεχνολογικά στάδια να λειτουργήσουν με καθαρές ροές υψηλής αξίας.

5.2.2 Φάση 2: Έξυπνη Διαλογή με Μηχανική Μάθηση και Αισθητήρες (R8)

Για την εξάλειψη του εναπομείναντος ανθρώπινου σφάλματος προτείνεται η εγκατάσταση συστημάτων αυτοματοποιημένης διαλογής. Η πλέον τεκμηριωμένη τεχνολογία στο περιβάλλον αεροδρομίου είναι το σύστημα *WiSort* των Manea et al. (2024), το οποίο βασίζεται σε βαθιά μάθηση (deep learning) και οπτικούς αισθητήρες/κάμερες και επιτυγχάνει ακρίβεια ταξινόμησης περίπου 90%, έναντι του 61,8% της χειροκίνητης διαλογής. Η ανάλυση κύκλου ζωής (LCA) που συνοδεύει το σύστημα δείχνει εντυπωσιακή βελτίωση: το περιβαλλοντικό αποτύπωμα μεταβαίνει από +12,4 mPt/t στο σενάριο βάσης (χειροκίνητη διαλογή) σε −35,2 mPt/t με το *WiSort*, βελτίωση της τάξης του 33%, με ταυτόχρονη οικονομική ωφέλεια περίπου 24,3 €/t. Σημειώνεται ότι η

αποδοτικότητα προϋποθέτει ακρίβεια διαλογής τουλάχιστον 80%, κατώφλι που το σύστημα υπερκαλύπτει.

Συμπληρωματικά, σε σημεία χαμηλότερης ροής μπορούν να αξιοποιηθούν απλούστεροι «έξυπνοι κάδοι» βασισμένοι σε μικροελεγκτές (π.χ. Arduino) και συστοιχία φυσικών αισθητήρων — υπερήχων για την ανίχνευση όγκου, οπτικών/φωτοαντιστάσεων (LDR) για τη διάκριση διαφανών πλαστικών από αδιαφανές χαρτί, και επαγωγικών για τα μέταλλα (Hassan et al., 2018). Είναι ωστόσο μεθοδολογικά σημαντικό να μη συγχέονται οι δύο τεχνολογίες: το WiSort είναι σύστημα **οπτικής αναγνώρισης με μηχανική μάθηση** (κάμερες + αλγόριθμοι), ενώ η δεύτερη προσέγγιση βασίζεται σε **φυσικούς αισθητήρες χαμηλού επιπέδου**. Η πρώτη είναι η ώριμη, επικυρωμένη σε αεροδρόμιο λύση· η δεύτερη αποτελεί μια χαμηλότερου κόστους, συμπληρωματική επιλογή.

Η αναβάθμιση αυτή στοχεύει ευθέως στο διαχειριστικό κενό που εντοπίστηκε στην Ενότητα 5.1.3: αυξάνοντας την καθαρότητα και την ανακτώμενη ποσότητα των ρευμάτων υψηλής αξίας (χαρτί, πλαστικό, μέταλλο), μετατοπίζει μάζα από τα χαμηλού SF σύμμεικτα προς τα υψηλού SF υλικά. Πρόκειται για μια *ουσιαστική* —και όχι ονομαστική— βελτίωση του ZWI, καθώς ενεργεί επί του αριθμητή του δείκτη με υλικά πραγματικά υψηλής υποκατάστασης. Ταυτόχρονα, εξασφαλίζει την απαραίτητη καθαρότητα του οργανικού κλάσματος για το επόμενο, ενεργειακό στάδιο.

5.2.3 Φάση 3: Τεχνο-Οικονομικό Μοντέλο Παραγωγής Βιο-Υδρογόνου (R9) σε Συνέργεια με τα Φ/Β

Η τρίτη φάση αντιμετωπίζει το νομικά «παγιδευμένο» οργανικό κλάσμα. Τα απόβλητα τροφοδοσίας «Κατηγορίας 1» (ICW) από διεθνείς πτήσεις υπόκεινται σε υποχρεωτική καταστροφή (αποτέφρωση ή ταφή) βάσει του Κανονισμού (ΕΚ) 1069/2009 και δεν επιτρέπεται να ανακυκλωθούν ή κομποστοποιηθούν συμβατικά (European Union, 2009· Blanca-Alcubilla et al., 2019). Η βιοχημική τους μετατροπή σε υδρογόνο, ωστόσο, παρακάμπτει νόμιμα αυτόν τον περιορισμό. Η διεργασία περιλαμβάνει αναερόβια χώνευση των οργανικών προς παραγωγή βιοαερίου, ακολουθούμενη από αναμόρφωση ατμού (steam reforming) και καθαρισμό με προσρόφηση εναλλασσόμενης πίεσης (PSA) έως καθαρότητα 99,99% (Gunerhan et al., 2025).

Τα τεχνο-οικονομικά μεγέθη, όπως προκύπτουν από την περίπτωση του αεροδρομίου της Antalya (Gunerhan et al., 2025), είναι ενδεικτικά της κλίμακας: 148 τόνοι οργανικών ημερησίως αποδίδουν περίπου 4.126 m³ βιοαερίου ανά ημέρα, και τελικά 186,78–231,64 τόνους υδρογόνου

ετησίως. Το βασικό τεχνικό εμπόδιο είναι η ενεργειακή ένταση της διεργασίας, περίπου 21,75 kWh ανά κιλό υδρογόνου — σαφώς χαμηλότερη πάντως από τις 45–50 kWh/kg της ηλεκτρόλυσης. Το ελάχιστο κόστος πώλησης (MHSP) υπολογίζεται γύρω στα 5,67 \$/kg. Εδώ ακριβώς υπερτερεί ο ΔΑΑ: η μονάδα μπορεί να τροφοδοτηθεί απευθείας από το Φωτοβολταϊκό Πάρκο των 16MWp, μηδενίζοντας πρακτικά το λειτουργικό κόστος ηλεκτρικής ενέργειας (OpEx) και παράγοντας 100% «πράσινο» υδρογόνο. Το υδρογόνο αυτό υποκαθιστά το ντίζελ του στόλου οχημάτων εδάφους (GSE), ο οποίος το 2023 εξέπεμψε 1.510 τόνους CO_{2e} (Scope 1), προσφέροντας άμεση και τεκμηριωμένη συμβολή στον στόχο Net Zero (Athens International Airport, 2024).

Δύο επισημάνσεις, ωστόσο, είναι αναγκαίες για την επιστημονική ακεραιότητα της πρότασης. Πρώτον, στο πλαίσιο 9R η ενεργειακή αξιοποίηση (αναερόβια χώνευση και Waste-to-Hydrogen) κατατάσσεται στη βαθμίδα **R9 (Recover)**, δηλαδή στην κατώτερη βαθμίδα κυκλικότητας (Tjahjono et al., 2023). Η αξία της δεν έγκειται στην υποκατάσταση παρθένων υλικών, αλλά στην υποκατάσταση ορυκτών καυσίμων κίνησης· πρόκειται για ενεργειακή και όχι για υλική υποκατάσταση. Δεύτερον, η καύση/αξιοποίηση βιογενούς άνθρακα δεν είναι πλήρως μηδενική: η διεργασία εκλύει περίπου 2.773 τόνους βιογενούς CO₂ ετησίως, ποσότητα που θα μηδενιζόταν μόνο με σύστημα δέσμευσης άνθρακα (CCS) (Gunerhan et al., 2025). Η ειλικρινής αυτή οριοθέτηση ενισχύει —αντί να αποδυναμώνει— την πρόταση, καθώς αποδίδει στην κάθε τεχνολογία τον πραγματικό της ρόλο: η Φάση 3 λύνει ένα νομικό αδιέξοδο και ένα πρόβλημα ενεργειακής αυτονομίας, αλλά δεν υποκαθιστά την υλική κυκλικότητα που επιτυγχάνεται στη Φάση 2.

5.2.4 Συγκεντρωτικά Οφέλη και Πρόβλεψη Μεταβολής του ZWI

Συνδυάζοντας τις τρεις φάσεις, η αναμενόμενη μεταβολή των βασικών δεικτών απόδοσης συνοψίζεται στον Πίνακα 5.2. Η βελτίωση του ZWI προέρχεται κατά κύριο λόγο από τη μετατόπιση μάζας προς τα ρεύματα υψηλού SF (Φάση 2) και δευτερευόντως από την ενεργειακή υποκατάσταση του οργανικού κλάσματος (Φάση 3). Με αφητηρία τον διορθωμένο δείκτη βάσης ($\approx 0,36\text{--}0,42$), η ρεαλιστική πρόβλεψη τοποθετεί τον ZWI του ΔΑΑ στην περιοχή του 0,50, υπερβαίνοντας το κατώφλι που, όπως δείχνει η περίπτωση της Κωνσταντινούπολης, ελάχιστοι αερολιμένες έχουν προσεγγίσει. Τονίζεται ότι οι προβλεπόμενες τιμές αποτελούν εκτιμήσεις βάσει

της μεθοδολογίας Zaman (2014) και των διαθέσιμων δεδομένων, και εξαρτώνται από τους συντελεστές υποκατάστασης που υιοθετούνται· η ορθή πρακτική επιβάλλει τη ρητή δήλωση των παραδοχών αυτών αντί της παρουσίασης ενός μεμονωμένου «εντυπωσιακού» αριθμού.

Δείκτης Απόδοσης	Υφιστάμενη (2023)	Μετά την πρόταση	Αιτιολόγηση
Ποσοστό ανακύκλωσης	81%	> 85%	Ανάκτηση υψηλής αξίας μέσω MAS (Bian et al., 2025)
ZWI (κατά Zaman)	≈ 0,36–0,42	≈ 0,50	Μετατόπιση προς υψηλό SF + ενεργειακή υποκατάσταση
Ακρίβεια διαλογής	61,8%	≈ 90%	WiSort, βαθιά μάθηση (Manea et al., 2024)
Στόλος GSE (Scope 1)	1.510 t CO ₂ e (ντίζελ)	Υποκατάσταση με H ₂	Πράσινο υδρογόνο από Φ/Β (Gunerhan et al., 2025)

Πίνακας 5.2: Πρόβλεψη μεταβολής δεικτών απόδοσης του ΔΑΑ μετά την εφαρμογή της πρότασης. Σύνθεση από Athens International Airport (2024), Zaman (2014), Bian et al. (2025), Manea et al. (2024) και Gunerhan et al. (2025).

Συνολικά, η πρόταση δεν επιχειρεί να «διογκώσει» αριθμητικά τον δείκτη, αλλά να αναβαθμίσει ποιοτικά τη διαχείριση του ΔΑΑ: από ένα μοντέλο που στηρίζεται σε βαριά, χαμηλής αξίας αδρανή, σε ένα μοντέλο που μεγιστοποιεί την ανάκτηση υλικών υψηλής αξίας και αξιοποιεί ενεργειακά το νομικά δεσμευμένο οργανικό κλάσμα. Έτσι, το «Ελ. Βενιζέλος» μετατρέπεται από αερολιμένα υψηλής ονομαστικής ανακύκλωσης σε αερολιμένα υψηλής πραγματικής κυκλικότητας

6. Συμπεράσματα και Προτάσεις

6.1 Σύνοψη Ευρημάτων: Η Ανάγκη Μετάβασης στην Κυκλική Οικονομία

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερεύνησε τη διαχείριση αποβλήτων στο σύνθετο περιβάλλον των διεθνών αερολιμένων, αναδεικνύοντας τους περιορισμούς των υφιστάμενων γραμμικών μοντέλων. Όπως προέκυψε από τη μελέτη περίπτωσης του Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών (ΔΑΑ), τα υψηλά ποσοστά ανακύκλωσης (81% για το 2023) συχνά δημιουργούν μια πλασματική εικόνα βιωσιμότητας, καθώς οφείλονται κυρίως σε βαριά, αδρανή υλικά (απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων - C&D) με χαμηλή αξία υποκατάστασης πόρων [Athens International Airport, 2024; Zaman, 2014].

Αντίθετα, η διαχείριση των κρίσιμων ροών υψηλής αξίας, όπως τα οργανικά υπολείμματα και τα απόβλητα των αεροσκαφών (cabin waste), προσκρούει σε αυστηρούς υγειονομικούς κανονισμούς, όπως ο Ευρωπαϊκός Κανονισμός (ΕΚ) 1069/2009 για τα υλικά Κατηγορίας 1, και σε λειτουργικά εμπόδια διαλογής [Blanca-Alcubilla et al., 2019; European Union, 2009]. Συνεπώς, συμπεραίνεται ότι η απλή τοποθέτηση συμβατικών κάδων ανακύκλωσης δεν επαρκεί πλέον για την επίτευξη των στόχων μηδενικών εκπομπών και μηδενικών αποβλήτων (Net Zero & Zero Waste).

6.2 Η Καινοτομία της Προτεινόμενης Λύσης για τον ΔΑΑ

Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, η εργασία ανέπτυξε ένα καινοτόμο μοντέλο «Ευφυούς Κυκλικού Αεροδρομίου» (Smart Circular Airport) προσαρμοσμένο στα δεδομένα του ΔΑΑ, το οποίο βασίζεται στη σύνθεση τριών αξόνων:

1. Ευφυής Διαλογή (Multi-Agent Systems & IoT): Η εξάλειψη του ανθρώπινου λάθους και της επιμόλυνσης των κάδων καθίσταται εφικτή μέσω αυτοματοποιημένων συστημάτων. Η χρήση έξυπνων κάδων με αισθητήρες υπερήχων, οπτικούς και επαγωγικούς, εξασφαλίζει καθαρότητα υλικών άνω του 95%, διασώζοντας κρίσιμους πόρους από τα σύμμεικτα απορρίμματα [Bian et al., 2025; Manea et al., 2024].
2. Ενεργειακή Αξιοποίηση (Waste-to-Hydrogen): Η βέλτιστη λύση για το οργανικό κλάσμα των αεροδρομίων δεν είναι η ταφή ή η απλή κομποστοποίηση, αλλά η ενεργειακή του μετατροπή. Η εφαρμογή της αναερόβιας χώνευσης και της αναμόρφωσης ατμού για παραγωγή βιο-υδρογόνου, υποστηριζόμενη ενεργειακά από το νέο ιδιόκτητο Φωτοβολταϊκό Πάρκο (16MWp) του ΔΑΑ, προσφέρει ένα απόλυτα «πράσινο» καύσιμο

για τα οχήματα εδάφους (GSE), μειώνοντας δραστικά τις άμεσες εκπομπές (Scope 1) [Athens International Airport, 2024; Gunerhan et al., 2025].

3. Ποσοτικοποίηση μέσω του ZWI: Η επιτυχία αυτής της στρατηγικής αποδείχθηκε μαθηματικά μέσω του δείκτη Zero Waste Index (ZWI), ο οποίος, με βάση τον διορθωμένο υπολογισμό, αναμένεται να αυξηθεί από $\approx 0,36-0,42$ σε $\approx 0,50$, αντικατοπτρίζοντας την ουσιαστική υποκατάσταση παρθένων υλικών (Φάση 2) και ορυκτών καυσίμων κίνησης (Φάση 3) [Zaman, 2014].

6.3 Περιορισμοί της Έρευνας

Η εφαρμογή του προτεινόμενου μοντέλου υπόκειται σε συγκεκριμένους περιορισμούς που πρέπει να ληφθούν ρεαλιστικά υπόψη:

- Τεχνοοικονομικοί Περιορισμοί: Η εγκατάσταση μονάδας αναμόρφωσης υδρογόνου (on-site) απαιτεί υψηλό αρχικό κεφάλαιο (CapEx). Παρότι η τροφοδοσία με ενέργεια από το Φωτοβολταϊκό Πάρκο του ΔΑΑ ελαχιστοποιεί το λειτουργικό κόστος (OpEx) ρεύματος, απαιτείται εκτεταμένη οικονομοτεχνική μελέτη (Feasibility Study) για τον ακριβή υπολογισμό της απόσβεσης [Gunerhan et al., 2025].
- Νομοθετικά Κενά: Το αυστηρό ευρωπαϊκό πλαίσιο (ΕΚ 1069/2009) παραμένει ένα σημαντικό εμπόδιο για τα Διεθνή Απόβλητα Τροφοδοσίας (ICW), καθώς δυσχεραίνει τη μεταφορά τους σε μονάδες βιολογικής επεξεργασίας χωρίς προηγούμενη, ενεργοβόρα και αυστηρή αποστείρωση [European Union, 2009].

6.4 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Βάσει των ευρημάτων και των περιορισμών της παρούσας μελέτης, προτείνονται οι ακόλουθες κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα:

1. Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA): Εκπόνηση πλήρους Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment) για τη μονάδα παραγωγής υδρογόνου εντός του ΔΑΑ, προκειμένου να υπολογιστεί με απόλυτη ακρίβεια η εξοικονόμηση στους τόνους CO₂e έναντι του ορυκτού ντίζελ.
2. Προσομοίωση Συμπεριφοράς (MAS): Περαιτέρω έρευνα στα Συστήματα Πολλαπλών Πρακτόρων (MAS) για τη μοντελοποίηση της αλληλεπίδρασης των επιβατών με τους «έξυπνους κάδους» υπό συνθήκες υψηλής επιβατικής κίνησης (peak hours), με στόχο τη βελτιστοποίηση της χωροθέτησής τους στους τερματικούς σταθμούς [Bian et al., 2025].

3. Επανεξέταση Νομοθεσίας ICW: Έρευνα σε επίπεδο πολιτικής (policy research) για την ασφαλή ενσωμάτωση των αποβλήτων Κατηγορίας 1 στην Κυκλική Οικονομία, εξετάζοντας προηγμένες τεχνολογίες αποστείρωσης (π.χ. θερμική αδρανοποίηση) πριν την αναερόβια χώνευση.

Συμπερασματικά, η μετάβαση των διεθνών αερολιμένων στην Κυκλική Οικονομία είναι μια εφικτή αλλά τεχνολογικά απαιτητική διαδικασία. Η καινοτομία δεν έγκειται πλέον στη διαχείριση του αποβλήτου ως «απορρίμματος», αλλά στην έξυπνη διαλογή του και την αξιοποίησή του ως ενεργειακού και υλικού πόρου, εναρμονίζοντας πλήρως τις αερομεταφορές με τις επιταγές της κλιματικής ουδετερότητας.

Βιβλιογραφία

Airports Council International. (2018). *ACI policy handbook*.

Athens International Airport. (2024). *Care for the environment: Issue 26*. Environmental Services Department. <https://www.aia.gr/en/corporate/environmental-management-system>

Baxter, G. (2022). Towards sustainable airport waste management through the adoption of a “green” airport strategy: The case of Incheon International Airport. *Clean Technologies and Recycling*, 2(4), 247–278. <https://doi.org/10.3934/ctr.2022013>

Baxter, G., & Srisaeng, P. (2022). Optimizing airport sustainable waste management from the use of waste-to-energy technology and circular economy principles: The case of London Gatwick Airport. *International Journal for Traffic and Transport Engineering*, 12(2), 176–195. [https://doi.org/10.7708/ijtte2022.12\(2\).03](https://doi.org/10.7708/ijtte2022.12(2).03)

- Baxter, G., Srisaeng, P., & Wild, G. (2018a). An assessment of airport sustainability, part 1—Waste management at Copenhagen Airport. *Resources*, 7(1), 21. <https://doi.org/10.3390/resources7010021>
- Bian, Z., Zhao, Z., Guo, X., Gu, Y., Yi, Y., Hong, Y., Tuo, M., Li, Y., & Wu, Y. (2025). Environmental benefits of airport waste classification and recycling strategies: An analysis of behavior in multi-agent systems. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 25, 200239. <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2024.200239>
- Blanca-Alcubilla, G., Roca, M., Bala, A., Sanz, N., De Castro, N., & Fullana-i-Palmer, P. (2019). Airplane cabin waste characterization: Knowing the waste for sustainable management and future recommendations. *Waste Management*, 96, 57–64. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.07.002>
- European Parliament and Council. (2008). Directive 2008/98/EC on waste and repealing certain Directives. *Official Journal of the European Union*, L 312, 3–30.
- European Union. (2009). Regulation (EC) No 1069/2009 of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 laying down health rules as regards animal by-products. *Official Journal of the European Union*, L 300, 1–33.
- Federal Aviation Administration. (2013). *Recycling, reuse and waste reduction at airports: A synthesis document*. U.S. Department of Transportation. <https://www.faa.gov/airports/resources/publications/reports/environmental/media/RecyclingSynthesis2013.pdf>
- Ferrulli, P. (2016). Green airport design evaluation (GrADE) – methods and tools improving infrastructure planning. *Transportation Research Procedia*, 14, 3781–3790. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.463>
- Gunerhan, A., Guven, T. B., Degirmenci, H., & Altuntas, O. (2025). Innovative utilization of organic cabin waste for hydrogen production: A case study at Antalya Airport. *Waste Management*, 206, 115085. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.115085>

Hassan, H., Saad, F., & Mohd Raklan, M. S. (2018). A low-cost automated sorting recycle bin powered by Arduino microcontroller. *2018 IEEE Conference on Systems, Process and Control (ICSPC)*, 182–186. <https://doi.org/10.1109/SPC.2018.8704146>

International Air Transport Association. (2019). *IATA cabin waste handbook*. WRAP. <https://www.iata.org/contentassets/821b593dd8cd4f4aa33b63ab9e35368b/iata-cabin-waste-handbook.pdf>

International Civil Aviation Organization. (2018a). *Airport planning manual part II — Land use and environmental management* (Doc 9184, 4th ed.).

International Civil Aviation Organization. (2018b). *Waste management at airports: Eco airport toolkit*. https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/Waste_Management_at_Airports_booklet.pdf

Li, X. D., Poon, C. S., Lee, S. C., Chung, S. S., & Luk, F. (2003). Waste reduction and recycling strategies for the in-flight services in the airline industry. *Resources, Conservation and Recycling*, 37(2), 87–99. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(02\)00074-5](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(02)00074-5)

Manea, A., Dolci, G., & Grosso, M. (2024). Life cycle assessment and cost analysis of an innovative automatic system for sorting municipal solid waste: A case study at Milan Malpensa airport. *Waste Management*, 183, 63–73. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.04.049>

Maris, P. (2018). *Η διαχείριση επικίνδυνων αποβλήτων στην Πολεμική Αεροπορία* [The management of hazardous waste in the Hellenic Air Force] [Master's thesis, Hellenic Open University]. apothesis.eap.gr

Özbay, İ., & Gokceviz, N. A. (2022). Towards zero-waste airports: A case study of Istanbul Airport. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 24, 134–142. <https://doi.org/10.1007/s10163-021-01308-2>

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., ... & Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372(n71). <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>

People's Daily. (2024, January 5). China's civil aviation sector sees steady recovery in 2023. *People's Daily Online*. <http://english.peopledaily.com.cn/>

Pitt, M., & Smith, A. (2003). An assessment of waste management efficiency at BAA airports. *Construction Management and Economics*, 21(4), 421–431. <https://doi.org/10.1080/0144619032000089599>

Sarbassov, Y., Venetis, C., Aiyymbetov, B., Abylkhani, B., Yagofarova, A., Tokmurzin, D., Anthony, E. J., & Inglezakis, V. J. (2020). Municipal solid waste management and greenhouse gas emissions at international airports: A case study of Astana International Airport. *Journal of Air Transport Management*, 85, 101789. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101789>

Sreenath, A. S., Sudhakar, K., & Yusof, A. F. (2021). Technical assessment of solar PV integrated electric airport buses: A case study of Cochin International Airport. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 3, 100096. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100096>

Tjahjono, B., Ünal, E., & Tran, T. H. (2023). The circular economy transformation of airports: An alternative model for retail waste management. *Sustainability*, 15(5), 3860. <https://doi.org/10.3390/su15043860>

Tofalli, N., Loizia, P., & Zorpas, A. A. (2018). Passengers waste production during flights. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 35764–35775. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0800-x>

Zaman, A. U. (2014). Measuring waste management performance using the ‘Zero Waste Index’: The case of Adelaide, Australia. *Journal of Cleaner Production*, 66, 407–419. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.032>