



# ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

## ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ «Διαχείριση Αποβλήτων»

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Περιβαλλοντική Αξιολόγηση Μονάδων Επεξεργασίας  
Αστικών Στερεών Αποβλήτων μέσω της Ανάλυσης του Κύκλου  
Ζωής: Μελέτη Περίπτωσης στην Θράκη»

**ΠΑΝΤΑΖΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ**

Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Η/Υ ΕΜΠ

Επιβλέπων καθηγητής

**ΜΠΑΡΤΖΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ**

Αθήνα

Μάιος 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Περιβαλλοντική Αξιολόγηση Μονάδων Επεξεργασίας  
Αστικών Στερεών Αποβλήτων μέσω της Ανάλυσης του Κύκλου  
Ζωής: Μελέτη Περίπτωσης στην Θράκη»

**ΠΑΝΤΑΖΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ**

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

‘Α Επιβλέπων Καθηγητής:

Μπάρτζας Γεώργιος

Σχολή Μηχ. Μεταλλείων-  
Μεταλλουργών Ε.Μ.Π

‘Β Επιβλέπων Καθηγητής:

Κομνίτσας Κωνσταντίνος

Καθ. Σχολής Μηχ. Ορυκτών Πόρων  
Πολυτεχνείο Κρήτης

Αθήνα

Μάιος 2026

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Πρώτα και πάνω από όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω τη σύζυγο μου Αγγελική και τις δύο υπέροχες κόρες μας, Παναγιώτα και Άννα, για τη στήριξη και το κουράγιο που μου έδωσαν όλα αυτά τα χρόνια.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή, Κο Μπάρτζα Γεώργιο, η καθοδήγηση του οποίου ήταν πολύτιμη στην ολοκλήρωση της συγκεκριμένης εργασίας.

Ακόμη, είμαι ευγνώμων στις εταιρείες ΔΙΑΑΜΑΘ, ΜΕΣΟΓΕΙΟΣ και REAL SPA, για τα δεδομένα που μου εμπιστεύθηκαν, καθώς και σε όλους τους συναδέλφους και φίλους, οι πολύτιμες συμβουλές των οποίων ήταν μεγάλη βοήθεια σε όλη αυτή την προσπάθεια μου.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους καθηγητές των τεσσάρων ενοτήτων του μεταπτυχιακού αυτού προγράμματος για τις γνώσεις που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διαχείριση των Αστικών Στερεών Αποβλήτων (ΑΣΑ) αποτελεί σε διεθνές επίπεδο ένα από τα ιδιαίτερα σημαντικά προβλήματα, το οποίο έχει άμεση συσχέτιση με την αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού, την αστικοποίηση των σύγχρονων κοινωνιών και τη γενικότερη βελτίωση του βιοτικού επιπέδου. Καθώς η σύσταση των ΑΣΑ ποικίλει ανάλογα με το επίπεδο οικονομικής ανάπτυξης και διαβίωσης, αντίστοιχα ποικίλει και αντίστοιχα προσαρμόζεται η μεθοδολογία διαχείρισης/αντιμετώπισης που επιλέγεται σε επίπεδο κεντρικής διακυβέρνησης της κάθε χώρας χωριστά.

Εστιάζοντας στο ισχύον θεσμικό πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης, σύμφωνα με το οποίο καθορίζεται και η πολιτική διαχείρισης των ΑΣΑ στην Ελλάδα, ο κεντρικός άξονας που καθορίζει την απορριμματική πολιτική στηρίζεται, σε σημαντικό βαθμό, στη βιώσιμη ανάπτυξη και στη διατήρηση της αειφορίας. Στα πλαίσια αυτής της φιλοσοφίας, εργαλεία όπως η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) αποτελούν μια εκ των πλέον αναγνωρισμένων, επιστημονικά και ορθά τεκμηριωμένων, σύμφωνα με αναγνωρισμένα πρότυπα, μεθόδων αξιολόγησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκύπτουν στη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος ή μιας υπηρεσίας.

Στο γενικότερο αυτό πλαίσιο, η παρούσα Μεταπτυχιακή εργασία παραθέτει πληροφορίες σχετικά με τα ΑΣΑ, αναφέροντας παράλληλα το ισχύον νομοθετικό πλαίσιο που διέπει τη διαχείριση αυτών στην Ευρωπαϊκή Ένωση και στην Ελλάδα. Επιπλέον, παρουσιάζονται τα βασικά στάδια λειτουργίας μίας Μονάδας Επεξεργασίας Απορριμμάτων (ΜΕΑ), καθώς και οι κύριες αρχές της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) και της ορθής εφαρμογής της.

Στο κύριο μέρος της εργασίας παρουσιάζεται η αναλυτική εφαρμογή της ΑΚΖ βάσει των ISO 14040/44 προτύπων μέσω μελέτης περίπτωσης στη Μονάδα Επεξεργασίας Απορριμμάτων Αλεξανδρούπολης, στην περιοχή της Θράκης. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας εξετάζονται τρία διαφορετικά σενάρια με στόχο τη βελτιστοποίηση της περιβαλλοντικής και ενεργειακής απόδοσης της μονάδας, καθώς και τη βιώσιμη διαχείριση των ΑΣΑ της περιοχής μελέτης. Η κατάρτιση των επιμέρους αναλυτικών καταλόγων δεδομένων (LCI) βασίστηκε σε πρωτογενείς και δευτερογενείς πηγές δεδομένων ανά εξεταζόμενο σενάριο. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η Εκτίμηση Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής (LCIA) σε όρια συστήματος τύπου gate-to-grave, μέσω εφαρμογής του λογισμικού ανοικτού κώδικα OpenLCA. Για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων επιλέχθηκαν οκτώ κατηγορίες επιπτώσεων ενδιάμεσου σημείου (midpoint impact categories), καθώς και η κατηγορία της αθροιστικής ζήτησης ενέργειας ως δείκτης ενεργειακών ροών. Η λειτουργική μονάδα που επιλέχθηκε για την παρούσα μελέτη αντιστοιχεί στην ετήσια ποσότητα εισερχόμενων ΑΣΑ που

διαχειρίζεται η ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης, η οποία ανέρχεται σε 89.699 t για το έτος αναφοράς (2024).

Στο πλαίσιο αυτό, τα βασικά σενάρια που εξετάζονται στην παρούσα εργασία είναι τα ακόλουθα: α) Το Σενάριο Α «δυσμενές σενάριο» αφορά την απευθείας διάθεση των ΑΣΑ στον Χώρο Υγειονομικής Ταφής (ΧΥΤ) Αλεξανδρούπολης χωρίς προγενέστερη επεξεργασία, β) Το Σενάριο Β στο οποίο εξετάζεται η υφιστάμενη λειτουργία της ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης, όπου τα εισερχόμενα ΑΣΑ υποβάλλονται αρχικά σε μηχανική επεξεργασία για την ανάκτηση ανακυκλώσιμων υλικών, ενώ στη συνέχεια, πραγματοποιείται βιολογική επεξεργασία του οργανικού κλάσματος για την παραγωγή βιοαερίου, το οποίο αξιοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, και τέλος γ) Το Σενάριο Γ που αφορά την αναβάθμιση του υφιστάμενου συστήματος μέσω παραγωγής δευτερογενούς καυσίμου από τα παραγόμενα κλάσματα, με χρήση συστήματος ξήρανσης. Παράλληλα, προβλέπεται μείωση των υπολειμμάτων προς τελική διάθεση, με στόχο τη συμμόρφωση με τους στόχους του Εθνικού Σχεδίου Διαχείρισης Αποβλήτων (ΕΣΔΑ). Επιπλέον, το σενάριο αυτό περιλαμβάνει την εγκατάσταση φωτοβολταϊκού συστήματος με στόχο τον περιορισμό της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο μέσω αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή της ΑΚΖ στα υπό μελέτη σενάρια διαχείρισης των ΑΣΑ, το Σενάριο Γ, το οποίο περιλαμβάνει προσθήκη σταδίου ξήρανσης/παραγωγής δευτερογενούς στερεού καυσίμου (SRF) και εγκατάσταση φωτοβολταϊκού συστήματος, παρουσιάζει τη βέλτιστη περιβαλλοντική επίδοση. Συγκεκριμένα, επιτυγχάνει σημαντική μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, με τα ποσοστά μείωσης να κυμαίνονται από 57% για τον δείκτη Δυναμικό Εξάντλησης Αβιοτικών Πόρων (Abiotic Depletion Potential-ADP) έως και 89% για τον δείκτη Δυναμικό Υπερθέρμανσης του Πλανήτη (100 έτη) (Global Warming Potential (100 years)-GWP100), σε σύγκριση με το δυσμενέστερο εξεταζόμενο σενάριο Α. Η υφιστάμενη λειτουργία της ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης (Σενάριο Β) εμφανίζει επίσης σημαντικά χαμηλότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε σχέση με το σενάριο απευθείας ταφής των ΑΣΑ χωρίς προηγούμενη επεξεργασία, με τις μειώσεις των περιβαλλοντικών δεικτών να κυμαίνονται από 22% για τον δείκτη ADP έως και 64% για τον δείκτη GWP100.

Η παρούσα εργασία αναδεικνύει ότι η ΑΚΖ αποτελεί ένα αποτελεσματικό εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων για τη διαχείριση των ΑΣΑ, επιτρέποντας την περιβαλλοντική αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων και τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας των Μονάδων Επεξεργασίας Απορριμμάτων σε πιο βιώσιμα συστήματα που αποφέρουν βελτιωμένη περιβαλλοντική και ενεργειακή απόδοση και πιο αποτελεσματική αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων.

## ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

*Ανάλυση Κύκλου Ζωής, Μονάδες Επεξεργασίας Απορριμμάτων, Αστικά Στερεά Απόβλητα (ΑΣΑ), Εκπομπές Αερίων του Θερμοκηπίου, Περιβαλλοντικό Αποτύπωμα, Ανάλυση Σεναρίων*

## **“Environmental Evaluation of Municipal Solid Waste Treatment Facilities Using Life Cycle Assessment: A Case Study in Thrace”**

### **ABSTRACT**

At an international level, the management of Municipal Solid Waste (MSW) represents a major contemporary challenge, intrinsically linked to global population growth, urban expansion, and improved living standards. Given that the composition of MSW fluctuates according to socioeconomic development, the corresponding management methodologies are tailored and implemented via central governance frameworks on a country-by-country basis.

With special focus on the prevailing institutional framework of the European Union, which also dictates MSW management policy in Greece, the core pillar of waste policy is substantially predicated on sustainable development and the preservation of sustainability. Within this conceptual framework, tools such as Life Cycle Assessment (LCA) constitute one of the most widely recognized, scientifically validated, and standardized methodologies for the evaluation of environmental impacts throughout the life cycle of a product or service.

Within this broader context, the present MSc Thesis outlines comprehensive information regarding MSW, while concurrently delineating the prevailing legislative framework that governs its management in both the European Union and Greece. Furthermore, the fundamental operational stages of a Waste Treatment Plant (WTP) are presented, alongside the core principles and proper implementation of LCA.

The main body of the MSc Thesis presents the detailed application of LCA in accordance with the ISO 14040/44 standards, through a case study conducted at the Alexandroupolis WTP in the region of Thrace (NE Greece). Within the scope of this research, three distinct scenarios are evaluated with the objective of improving the environmental and energy performance of the plant, as well as achieving sustainable management of MSW within the study area. The compilation of the respective Life Cycle Inventory (LCI) datasets was predicated on primary and secondary data sources tailored to each examined scenario. Subsequently, the Life Cycle Impact Assessment (LCIA) was performed within gate-to-grave system boundaries, utilizing the openLCA open-source software. To evaluate environmental impacts, eight midpoint impact categories were selected, together with the cumulative energy demand category as an energy flow indicator. The functional unit defined for this study corresponds to the annual quantity of incoming MSW managed by the Alexandroupolis WTP, which amounts to 89,699 tonnes for the reference year (2024).

Within this context, the core scenarios investigated in this MSc Thesis are the following: (a) Scenario A, designated as the "worst-case scenario," entails the direct disposal of MSW into the Alexandroupolis Sanitary Landfill without any prior treatment; (b) Scenario B assesses the current operation of the Alexandroupolis WTP, wherein incoming MSW undergoes initial mechanical processing to recover recyclable materials, followed by the biological treatment of the organic fraction to generate biogas, which is subsequently utilized for electrical and thermal energy production; and finally, (c) Scenario C examines the upgrade the existing configuration through secondary fuel production from the generated fractions via a drying system. Concurrently, a reduction in residual waste reduction prior to final disposal is considered according to the targets established by the National Waste Management Plan (NWMP). Furthermore, this scenario involves the installation of a photovoltaic (PV) system with the objective of minimizing the electricity consumption from the grid through renewable energy use. According to the results obtained from the application of LCA to the MSW management scenarios under study, Scenario C - which incorporates the addition of a drying/solid recovered fuel (SRF) production stage and the installation of a photovoltaic system - exhibits optimal environmental performance. Specifically, it achieves a substantial mitigation of environmental impacts, with reduction rates ranging from 57% for the Abiotic Depletion Potential (ADP) impact category to as high as 89% for the Global Warming Potential (100 years) (GWP100), relative to the worst-case Scenario A. The current operation of Alexandroupolis WTP (Scenario B) also demonstrates significantly lower environmental impacts compared to the direct landfilling configuration without prior treatment, with reductions in environmental indicators ranging from 22% for the ADP index to 64% for the GWP impact category.

The present MSc Thesis highlights that LCA constitutes an effective decision-support tool for MSW management and allows the environmental evaluation of several alternative scenarios as well as the optimization of the WTP operations within toward more sustainable configurations. Consequently, these systems achieve improved environmental and energy performance, together with more efficient use of available resources.

## KEY WORDS

*Life Cycle Assessment, Mechanical Biological Treatment Units, Municipal Solid Waste (MSW), Greenhouse Gas Emissions, Environmental Footprint, Scenario Analysis*

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	5
	ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ .....	7
	ABSTRACT.....	8
	KEY WORDS.....	9
	ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	10
	ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ.....	13
	ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....	14
	ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	16
1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	17
2	ΑΣΤΙΚΑ ΣΤΕΡΕΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ (ΑΣΑ).....	19
2.1	Γενικά .....	19
2.1.1	Δεδομένα Παραγωγής ΑΣΑ.....	20
2.1.2	Δεδομένα Σύστασης των ΑΣΑ .....	24
2.1.3	Μέθοδοι διαχείρισης και επεξεργασίας ΑΣΑ .....	28
2.2	Νομοθετικό Πλαίσιο και στόχοι διαχείρισης ΑΣΑ .....	31
2.2.1	Οδηγίες Ευρωπαϊκής Ένωσης.....	31
2.2.2	Ελληνική νομοθεσία .....	33
3	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΑΔΑΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ (ΜΕΑ).....	36
3.1	Γενικά στοιχεία.....	36
3.2	Δομή και παραλλαγές εφαρμογής ΜΕΑ.....	37
3.2.1	Μηχανική Επεξεργασία .....	40
3.2.2	Βιολογική Επεξεργασία .....	42
3.2.3	Εξερχόμενες ροές από ΜΕΑ.....	43
3.3	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα εφαρμογών ΜΕΑ - Σύγκριση με άλλες μεθόδους διαχείρισης ΑΣΑ.....	44
4	ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ (ΑΚΖ).....	46
4.1	Εισαγωγή στην ΑΚΖ .....	46
4.1.1	Γενικά στοιχεία .....	46
4.1.2	Ορισμός και βασικά χαρακτηριστικά μεθόδου.....	47

4.1.3	Ιστορική Αναδρομή .....	48
4.2	Στάδια ανάπτυξης και εφαρμογής ΑΚΖ .....	50
4.2.1	Καθορισμός Στόχου και Πεδίου Εφαρμογής.....	51
4.2.2	Απογραφή Δεδομένων Κύκλου Ζωής (LCI) .....	54
4.2.3	Αξιολόγηση Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής (LCIA) .....	55
4.2.4	Ερμηνεία Αποτελεσμάτων .....	58
4.3	Εφαρμογές και οφέλη χρήσης της ΑΚΖ.....	59
4.4	Προκλήσεις και Περιορισμοί εφαρμογής της ΑΚΖ .....	60
5	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΚΖ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΚΑΙ ΜΟΝΑΔΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΣΑ.....	62
5.1	Εφαρμογή ΑΚΖ στο γενικότερο πλαίσιο της Διαχείρισης ΑΣΑ.....	62
5.2	Εφαρμογή ΑΚΖ σε Μονάδες Επεξεργασίας Απορριμμάτων .....	67
5.3	Ερευνητικά κενά και μελλοντικές προκλήσεις εφαρμογής της ΑΚΖ σε συστήματα διαχείρισης αποβλήτων.....	73
6	ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΑΚΖ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΑ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗΣ..	75
6.1	Γενικά Στοιχεία.....	75
6.1.1	Αναλυτική τεχνική περιγραφή επιμέρους Μονάδων .....	77
6.2	Παρουσίαση Λογισμικού ΑΚΖ .....	82
6.3	Καθορισμός Ορίων Συστήματος και λειτουργικής μονάδας.....	83
6.4	Διαχείριση Δεδομένων και Παραδοχές Μελέτης .....	84
6.5	Σενάρια Λειτουργίας ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης.....	85
6.5.1	Σενάριο Α: Απευθείας απόρριψη ΑΣΑ χωρίς επεξεργασία.....	85
6.5.2	Σενάριο Β: Επεξεργασία σε ΜΕΑ (Μηχανική Επεξεργασία, Αναερόβια Χώνευση).....	87
6.5.3	Σενάριο Γ: Επεξεργασία σε ΜΕΑ με προσθήκη σταδίου Ξήρανσης και συνεισφορά Ηλεκτρικής Ενέργειας από Φωτοβολταϊκά .....	90
6.6	Εκτίμηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (LCIA) .....	94
6.7	Περιορισμοί-Υποθέσεις-Παραδοχές.....	95
7	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΚΖ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ.....	97
7.1	Αποτελέσματα – Σύγκριση εναλλακτικών σεναρίων .....	97
7.2	Ανάλυση Συνεισφοράς (Contribution Analysis) .....	100

7.2.1	Σενάριο Α.....	100
7.2.2	Σενάριο Β.....	101
7.2.3	Σενάριο Γ.....	103
7.3	Σύγκριση αποτελεσμάτων με βιβλιογραφία.....	105
8	ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	107
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	113
	Ξένη βιβλιογραφία.....	113
	Ελληνική βιβλιογραφία.....	117
	Νομοθεσία / Πρότυπα.....	117
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	119

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ

C2C	Cradle-to-Cradle	Παραγωγή-έως-Παραγωγή	
C2Ga	Cradle-to-Gate	Παραγωγή-έως-Πύλη	
C2Gr	Cradle-to-Grave	Παραγωγή-έως-Τελική Διάθεση	
EU	European Union	Ευρωπαϊκή Ένωση	ΕΕ
EWC	European Waste Catalogue	Ευρωπαϊκός Κατάλογος Αποβλήτων	ΕΚΑ
Ga2Ga	Gate-to-Gate	Πύλη -έως-Πύλη	
IRLCD	International Reference Life Cycle Data System		
ISO	International Organization for Standardization	Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης	
LCA	Life Cycle Assessment	Ανάλυση Κύκλου Ζωής	ΑΚΖ
LCI	Life Cycle Inventory	Κατάλογος Δεδομένων Κύκλου Ζωής	
LCIA	Life Cycle Impact Assessment	Εκτίμηση Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής	
MRF	Material Recovery Facility	Μονάδα Ανάκτησης Ανακύκλωσης	ΜΑΑ
MSW	Municipal Solid Waste	Αστικά Στερεά Απόβλητα	ΑΣΑ
MBP	Mechanical Biological Pretreatment	Μηχανική και Βιολογική Προεπεξεργασία	ΜΒΠ
MBS	Mechanical Biological Stabilization	Μηχανική και Βιολογική Σταθεροποίηση	ΜΒΣ
MBT	Mechanical Biological Treatment	Μονάδα Επεξεργασίας Απορριμμάτων	ΜΕΑ
IWMS	Integrated Waste Management System	Ολοκληρωμένο Σύστημα Διαχείρισης Αποβλήτων	ΟΣΔΑ
REPA	Resource and Environmental Profil Analysis	Ανάλυση Περιβαλλοντικού Προφίλ και διαχείρισης Πόρων	
SETAC	Society of Environmental Toxicology And Chemistry	Εταιρεία Περιβαλλοντικής Τοξικολογίας και Χημείας	
UNEP	United Nations Environment Program	Πρόγραμμα των Ηνωμένων Εθνών για το Περιβάλλον	
		Εθνικό Σχέδιο Διαχείρισης Αποβλήτων	ΕΣΔΑ
	Sanitary Landfill	Χώρος Υγειονομικής Ταφής	ΧΥΤ

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1 Απεικόνιση παραγόμενων αποβλήτων από οικονομικές δραστηριότητες και νοικοκυριά στην ΕΕ για το έτος 2022 [Επεξεργασία/Μορφοποίηση από: (Eurostat, 2024)].....	19
Σχήμα 2.2 Απεικόνιση παραγόμενων ΑΣΑ παγκοσμίως για το έτος 2020 [Επεξεργασία/Μορφοποίηση από: (UNEP, 2024)] .....	21
Σχήμα 2.3 Απεικόνιση παραγόμενων ΑΣΑ σε Ευρωπαϊκά και προς ένταξη κράτη για τα έτη 2013 και 2023 [Επεξεργασία/Μορφοποίηση από: (Eurostat, 2025)] .....	22
Σχήμα 2.4 Σύσταση ΑΣΑ σύμφωνα με εισόδημα πολιτών για το έτος 2020 [Επεξεργασία/Μορφοποίηση από: (Nanda & Berruti, 2021)].....	26
Σχήμα 2.5 Σύσταση ΑΣΑ παγκοσμίως για το έτος 2020 [Επεξεργασία/Μορφοποίηση από: (UNEP, 2024)].....	26
Σχήμα 2.6 Ιεραρχία διαχείρισης ΑΣΑ [Επεξεργασία/Μορφοποίηση από: (Awino & Aritz, 2024)].....	29
Σχήμα 2.7 Μέθοδοι επεξεργασίας ΑΣΑ στην ΕΕ για τα έτη 2013-2023 [Επεξεργασία/Μορφοποίηση από: (Eurostat, 2025)] .....	30
Σχήμα 2.8 Μέθοδοι επεξεργασίας ΑΣΑ στην Ελλάδα για τα έτη 2013-2023 [Επεξεργασία/Μορφοποίηση από: (Eurostat, 2025)] .....	30
Σχήμα 2.9 Προτεραιότητα διαχείρισης και επεξεργασίας ΑΣΑ [Επεξεργασία/Μορφοποίηση από: (Οδηγία 2008/98/ΕΚ, 2008)] .....	32
Σχήμα 3.1 Ισοζύγιο Μάζας Μονάδας τύπου ΜΒΠ [Επεξεργασία/Μορφοποίηση από: (Bilitewski et al., 2011)] .....	38
Σχήμα 3.2 Ισοζύγιο Μάζας Μονάδας τύπου ΜΒΣ [Επεξεργασία/Μορφοποίηση από: (Bilitewski et al., 2011)] .....	39
Σχήμα 3.3 Εναλλακτικοί τύποι ΜΕΑ για τη διαχείριση ΑΣΑ [Επεξεργασία/Μορφοποίηση από: (Edo-Alcón et al., 2024)] .....	40
Σχήμα 4.1 Απεικόνιση σταδίων Κύκλου Ζωής ενός προϊόντος [Επεξεργασία/Μορφοποίηση από: (Rebitzer et al., 2004)] .....	46
Σχήμα 4.2 Γραφική αναπαράσταση της μεθοδολογικής φιλοσοφίας της μοντελοποίησης της ΑΚΖ [Επεξεργασία/Μορφοποίηση από: (Taniolo et al., 2021)]	47
Σχήμα 4.3 Στάδια Ανάλυσης και Εφαρμογές μιας ΑΚΖ, σύμφωνα με το ISO 14040 (1997) [Επεξεργασία/Μορφοποίηση από: (Rebitzer et al., 2004)].....	51
Σχήμα 4.4 Απεικόνιση Μονάδας Διεργασίας [Επεξεργασία/Μορφοποίηση από: (Heijungs & Guinee, 2012)] .....	54

Σχήμα 4.5 Απεικόνιση περιβαλλοντικών επιπτώσεων στα πλαίσια της ΑΚΖ [Επεξεργασία/Μορφοποίηση από: (Finnveden et al., 2009)] .....	57
Σχήμα 5.1 Όρια συστήματος εφαρμογής ΑΚΖ στη Διαχείριση Αποβλήτων [Επεξεργασία/Μορφοποίηση από: (Bjorklund et al., 2011)].....	64
Σχήμα 6.1 Διάγραμμα Ροής Μάζας ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης.....	80
Σχήμα 6.2 Αναλυτικό Διάγραμμα Ροής και Εξοπλισμού ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης ...	81
Σχήμα 6.3 Διάγραμμα Ροής Μάζας Σεναρίου Α (Απευθείας Ταφή) για το έτος 2024	86
Σχήμα 6.4 Ανάπτυξη Μοντέλου ΑΚΖ Σεναρίου Α (Απευθείας Ταφή) για το έτος 2024 στο λογισμικό OpenLCA .....	87
Σχήμα 6.5 Διάγραμμα Ροής Μάζας Σεναρίου Β (Επεξεργασία σε ΜΕΑ) για το έτος 2024.....	89
Σχήμα 6.6 Ανάπτυξη Μοντέλου ΑΚΖ Σεναρίου Β (Επεξεργασία σε ΜΕΑ) για το έτος 2024 στο λογισμικό OpenLCA.....	90
Σχήμα 6.7 Διάγραμμα Ροής Μάζας Σεναρίου Γ (Επεξεργασία σε ΜΕΑ με προσθήκη σταδίου Ξήρανσης και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά) για το έτος 2024.....	93
Σχήμα 6.8 Ανάπτυξη Μοντέλου ΑΚΖ Σεναρίου Γ (Επεξεργασία σε ΜΕΑ με προσθήκη σταδίου Ξήρανσης και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά) για το έτος 2024 στο λογισμικό OpenLCA.....	94
Σχήμα 7.1 Ποσοστιαία μεταβολή περιβαλλοντικού αποτυπώματος Σεναρίων Β και Γ συγκρινόμενα με σενάριο Α (σενάριο αναφοράς) .....	98
Σχήμα 7.2 Ανάλυση ποσοστών συνεισφοράς επιμέρους διεργασιών για το Σεναρίου Α στις υπό μελέτη κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων και στην αθροιστική ζήτηση ενέργειας .....	101
Σχήμα 7.3 Ανάλυση ποσοστών συνεισφοράς επιμέρους διεργασιών για το Σεναρίου Β στις υπό μελέτη κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων και στην αθροιστική ζήτηση ενέργειας. ....	102
Σχήμα 7.4 Ανάλυση ποσοστών συνεισφοράς επιμέρους διεργασιών για το Σεναρίου Γ στις υπό μελέτη κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων και στην αθροιστική ζήτηση ενέργειας .....	104

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1 Σύσταση ΑΣΑ στην Ελλάδα για το έτος 2019 [Πηγή: ΕΣΔΑ (Πράξη 39 της 31.8, 2020)].....	27
Πίνακας 5.1 Κριτήρια αξιολόγησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων κατά την εφαρμογή ΑΚΖ σε συστήματα διαχείρισης ΑΣΑ [Πηγή: (Iqbal et al., 2020)].....	65
Πίνακας 6.1 Κατηγορίες επιλεγθέντων περιβαλλοντικών επιπτώσεων και αθροιστικής ζήτησης ενέργειας κατά ILCD και JRC.....	95
Πίνακας 7.1 Αποτελέσματα περιβαλλοντικών επιπτώσεων και αθροιστικής ζήτησης ενέργειας για τα υπό μελέτη τρία σενάρια διαχείρισης των ΑΣΑ.....	97
Πίνακας Π.1 Στοιχεία παραγόμενων ΑΣΑ στην Ευρώπη [Πηγή: (Eurostat, 2025)].	119
Πίνακας Π.2 Ποσότητες ΑΣΑ (kg/άτομο) ανά μέθοδο διαχείρισης στην ΕΕ [Πηγή: (Eurostat, 2025)] .....	121
Πίνακας Π.3 Ποσότητες ΑΣΑ (kg/άτομο) ανά μέθοδο διαχείρισης στην Ελλάδα [Πηγή: (Eurostat, 2025)] .....	122

## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένα από τα σημαντικά προβλήματα που καλούνται να αντιμετωπίσουν οι σύγχρονες κοινωνίες είναι οι μεγάλες και συνεχώς αυξανόμενες ποσότητες των παραγόμενων αποβλήτων. Οι ποσότητες αυτές προκύπτουν από ένα μεγάλο φάσμα ανθρωπίνων δραστηριοτήτων στα πλαίσια της αύξησης του παγκόσμιου πληθυσμού και της γενικότερης οικονομικής ανάπτυξης. Σε αρκετές, αναπτυσσόμενες κυρίως, χώρες, μεγάλες ποσότητες αποβλήτων δεν υπόκεινται σε κατάλληλη επεξεργασία, με αποτέλεσμα αυτές να απορρίπτονται σε ακατάλληλες τοποθεσίες και να επιβαρύνουν σημαντικά το περιβάλλον. Η ελεγχόμενη απόθεση αποτελεί μια σημαντική βελτίωση σχετικά με τον έλεγχο και τον περιορισμό των αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων, ωστόσο, σε ανεπτυγμένες κοινωνίες η διαχείριση των αποβλήτων απαιτεί ανώτερα, ολοκληρωμένα συστήματα διαχείρισης που υποστηρίζουν την έννοια της βιώσιμης ανάπτυξης (UNEP, 2024). Σε αυτή την κατεύθυνση, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει εκδώσει προς εφαρμογή και τήρηση από τα κράτη μέλη της μια σειρά οδηγιών που εισάγουν όρους και στόχους σχετικά με τη βέλτιστη διαχείριση των αποβλήτων, σε ένα κυκλικό μοντέλο οικονομίας, με απώτερο στόχο ένα βιώσιμο μέλλον (Eurostat, 2024). Στο πλαίσιο αυτής της διαχείρισης, οι Μονάδες Επεξεργασίας Απορριμμάτων συμβάλουν ουσιαστικά στη βέλτιστη αξιοποίηση των Αστικών Στερεών Αποβλήτων, τα οποία προέρχονται κυρίως από νοικοκυριά, καθώς παρέχουν τη δυνατότητα για ανακύκλωση και αξιοποίηση των αποβλήτων στα διάφορα στάδια της λειτουργίας τους (Bourtsalas & Themelis, 2022). Οι κυριότερες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στα πλαίσια μιας τέτοιας μονάδας περιλαμβάνουν τη μηχανική και βιολογική επεξεργασία των εισερχόμενων αποβλήτων με στόχο το διαχωρισμό των ανακυκλώσιμων υλικών από τις εισερχόμενες ροές και την αξιοποίηση του οργανικού κλάσματος αντίστοιχα. Επιπλέον, οι συγκεκριμένες μονάδες παρέχουν τη δυνατότητα παραγωγής δευτερογενών καυσίμων (SRF/RDF), τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν περαιτέρω προς ενεργειακή αξιοποίηση σε κατάλληλες μονάδες (Byström, 2010).

Η βέλτιστη επιλογή ενός συστήματος διαχείρισης στερεών αποβλήτων προϋποθέτει την οικονομική, κοινωνική και περιβαλλοντική αξιολόγηση του. Σε αυτό το πλαίσιο, η Ανάλυση Κύκλου Ζωής αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο που παρέχει τη δυνατότητα για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στα όρια μελέτης ενός υφιστάμενου ή μελλοντικού συστήματος (Feo & Malvano, 2009). Η συγκεκριμένη

μέθοδος βασίζεται πάνω σε αυστηρά, βάσει προτύπων, καθορισμένα στάδια εκπόνησης, εξάγοντας χρήσιμα συμπεράσματα για τις ενδεχόμενες περιβαλλοντικές επιπτώσεις που επιφέρει το προς μελέτη σύστημα. Για την εξαγωγή των τελικών συμπερασμάτων αξιοποιούνται κατάλληλα δεδομένα, τα οποία μοντελοποιούνται με συγκεκριμένη μεθοδολογία. Με τον τρόπο αυτό εξάγεται ως τελικό αποτέλεσμα μια σειρά από δείκτες/κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων, οι οποίοι αφορούν φαινόμενα όπως οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου και οι επιπτώσεις στη χρήση της γης (Taniolo et al., 2021).

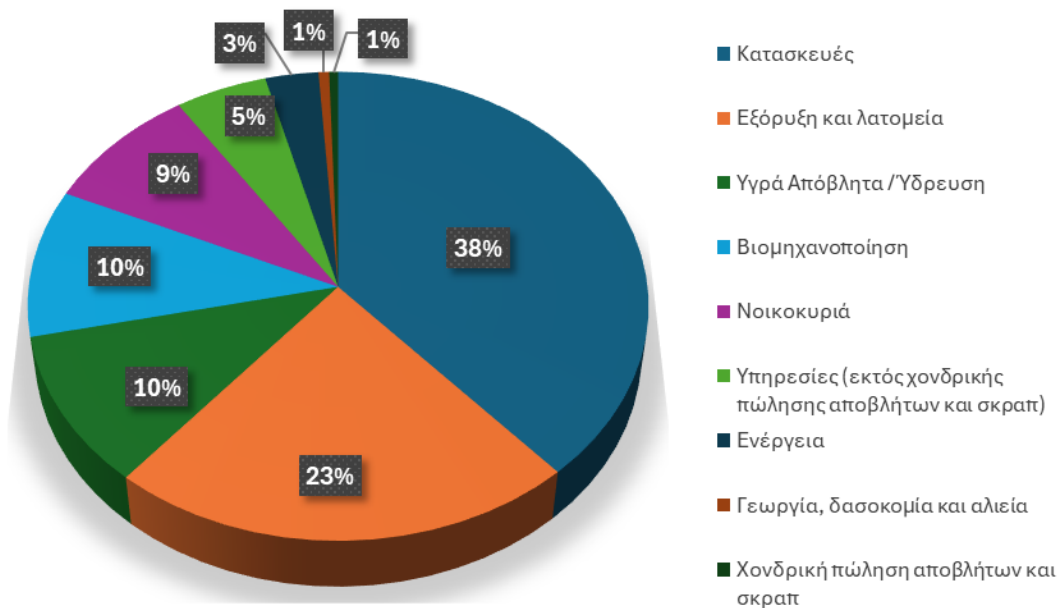
Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής έχει ευρύ πεδίο εφαρμογής τόσο σε μονάδες επεξεργασίας, όσο και στο γενικότερο σύστημα διαχείρισης απορριμμάτων, καθώς παρέχει τη δυνατότητα σύγκρισης και επιλογής μεταξύ εναλλακτικών μεθόδων διαχείρισης. Επίσης, η αξιοποίηση της συγκεκριμένης μεθόδου υιοθετεί τις βασικές αρχές της κυκλικής οικονομίας, καθώς εντοπίζει και αναδεικνύει τα πλεονεκτήματα των εξελιγμένων μεθόδων επεξεργασίας σε σχέση με παλαιότερες μεθόδους, όπως η απευθείας ταφή (Gadaleta et al., 2022). Για το λόγο αυτό η συγκεκριμένη μέθοδος παρέχει πολύτιμες πληροφορίες στα πλαίσια μια γενικότερης στρατηγικής βιώσιμης ανάπτυξης.

## 2 ΑΣΤΙΚΑ ΣΤΕΡΕΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ (ΑΣΑ)

### 2.1 Γενικά

Στις ημέρες μας, σε διεθνή κλίμακα, η παραγωγή πάσης φύσεως αποβλήτων έχει αυξητικές τάσεις (Ceraso & Cesaro, 2024). Τα απόβλητα, ανάλογα με την κατάσταση τους, μπορούν να έχουν στερεή, υγρή ή αέρια μορφή, με τα στερεά απόβλητα να ορίζονται ως ένα υλικό ή ουσία την οποία ο ιδιοκτήτης του/της απορρίπτει σε παρόντα χρόνο ή προτίθεται/υποχρεούται να απορρίψει μελλοντικά (Κομίλης, 2023).

Ανάλογα με την πηγή προέλευσης τους, τα στερεά απόβλητα κατατάσσονται σε αντίστοιχες κατηγορίες (πχ κατασκευών και κατεδαφίσεων, εξορύξεων, βιομηχανικά, αστικά, γεωργικά, κλπ.), όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.1**. Σε ευρωπαϊκό επίπεδο τα απόβλητα χαρακτηρίζονται με συγκεκριμένο, μονοσήμαντο κωδικό σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Κατάλογο Αποβλήτων (ΕΚΑ), όπως αυτός έχει καθοριστεί από την απόφαση 2000/532/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και τις σχετικές αναθεωρήσεις αυτής (2001/118/ΕΚ και Παρ. 3 2008/98/ΕΚ).



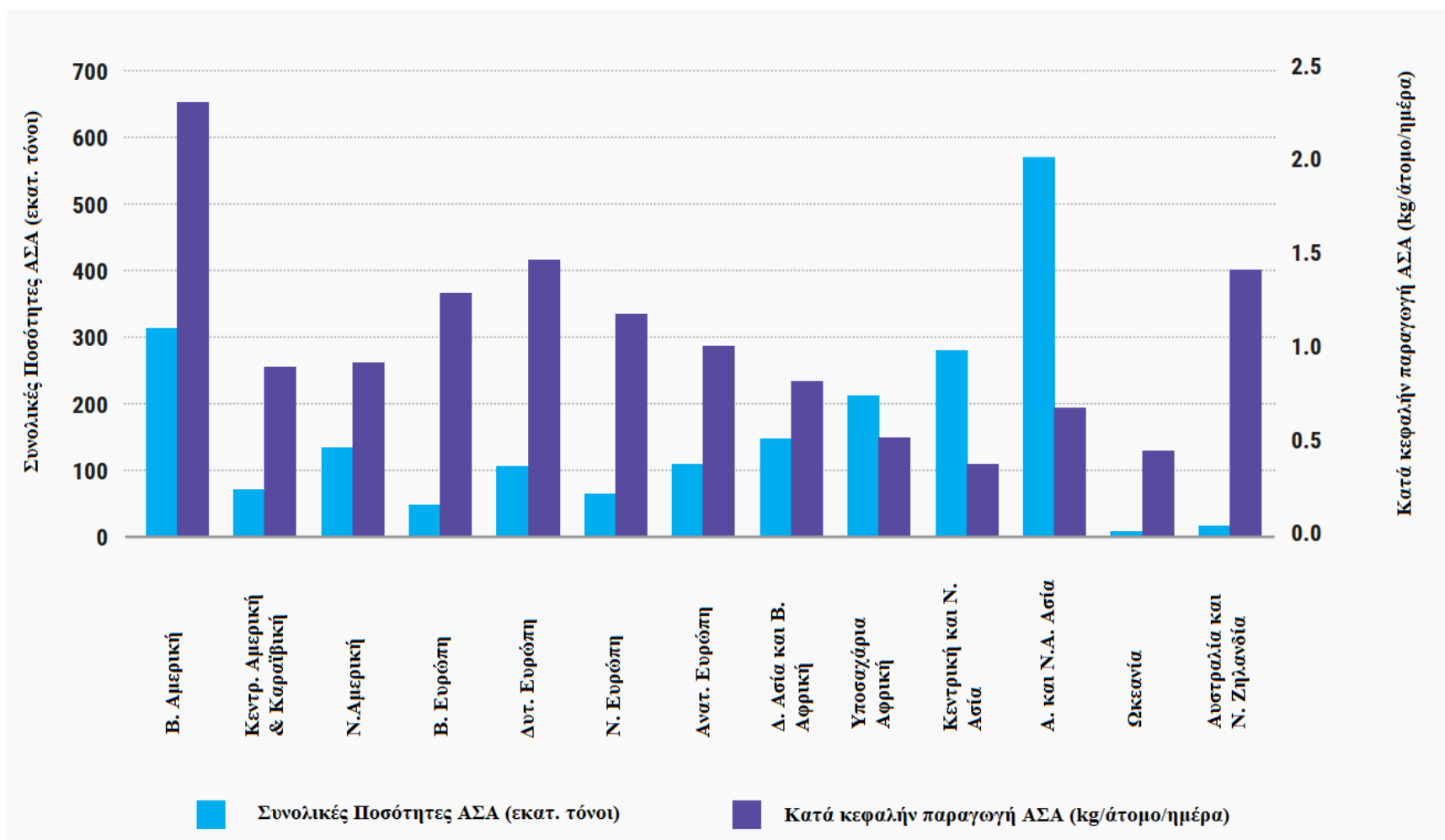
**Σχήμα 2.1** Απεικόνιση παραγόμενων αποβλήτων από οικονομικές δραστηριότητες και νοικοκυριά στην ΕΕ για το έτος 2022 [Επεξεργασία/Μορφοποίηση από: (Eurostat, 2024)]

Όπως φαίνεται από το **Σχήμα 2.1**, τα μεγαλύτερα ποσοστά των αποβλήτων στην ΕΕ παράγονται από τον κατασκευαστικό τομέα και τον τομέα των εξορύξεων. Σύμφωνα με τα στοιχεία της Eurostat, εξαιρώντας τα κύρια ορυκτά απόβλητα, το 2022 παρήχθησαν στην ΕΕ περίπου 795 τόνοι αποβλήτων (1.8 τόνοι ανά κάτοικο). Η ποσότητα αυτή αντιστοιχεί σε ποσοστό 36% των συνολικά παραγόμενων αποβλήτων, με ένα ποσοστό της τάξης του 9% να προέρχονται από νοικοκυριά των πολιτών και να χαρακτηρίζεται ως Αστικά Στερεά Απόβλητα (ΑΣΑ) (Eurostat, 2024).

Ένας αρκετά κατατοπιστικός και σαφής ορισμός για την κατηγορία αυτή παρατίθεται στον ευρωπαϊκή οδηγία 2018/851/ΕΚ (Οδηγία (ΕΕ) 2018/851, 2018), σύμφωνα με την οποία τα ΑΣΑ αφορούν ανάμεικτα απόβλητα, καθώς και απόβλητα που συλλέγονται χωριστά από νοικοκυριά, όπως χαρτί/χαρτόνι, γυαλί, μέταλλα, πλαστικά, βιολογικά απόβλητα, ξύλο, κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα, απορρίμματα από συσκευασίες, απόβλητα που προέρχονται από ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό, απόβλητα ηλεκτρικών στηλών και συσσωρευτών, καθώς και ογκώδη απόβλητα, όπως έπιπλα και στρώματα. Η κατηγορία των ΑΣΑ περιλαμβάνει επίσης και τυχόν άλλα ανάμεικτα ή χωριστά συλλεγόμενα απόβλητα με φύση παρόμοια των παραπάνω αναφερόμενων οικιακών αποβλήτων. Στην οδηγία καθίσταται σαφές ότι στην εν λόγω κατηγορία δεν ανήκουν απόβλητα όπως παραγωγής (προερχόμενα από παραγωγικές/βιομηχανικές δραστηριότητες), γεωργίας, δασοκομίας, αλιείας, σηπτικών δεξαμενών, αποχέτευσης & επεξεργασίας αποβλήτων (πχ ιλύος καθαρισμού λυμάτων), οχήματα στο τέλος της ζωής τους, καθώς και τα αδρανή υλικά.

### 2.1.1 Δεδομένα Παραγωγής ΑΣΑ

Σύμφωνα με έκθεση της Παγκόσμιας Τράπεζας, το 2016 παρήχθησαν παγκοσμίως περίπου 2.1 δισεκατομμύρια τόνοι ΑΣΑ. Ο αριθμός αυτός αναμένεται να αυξηθεί μέχρι το 2050 στους 3.4 δισεκατομμύρια τόνους (Kaza et al., 2018). Ενδεικτική απεικόνιση των παραγόμενων ποσοτήτων ΑΣΑ παγκοσμίως για το 2020 φαίνεται στο **Σχήμα 2.2**. Σύμφωνα με αυτό, είναι σαφές ότι οι μεγαλύτερες ποσότητες ΑΣΑ παράγονται στις χώρες της Ανατολικής και Νοτιοανατολικής Ασίας, της Βόρειας Αμερικής και της Κεντρικής και Νότιας Ασίας. Η Βόρεια Αμερική κατέχει επίσης τα πρωτεία στην κατά κεφαλήν παραγωγή ΑΣΑ παγκοσμίως, με τις χώρες της Ευρώπης, της Αυστραλίας και της Νέας Ζηλανδίας να ακολουθούν (UNEP, 2024).



Σχήμα 2.2 Απεικόνιση παραγόμενων ΑΣΑ παγκοσμίως για το έτος 2020 [Επεξεργασία/Μορφοποίηση από: (UNEP, 2024)]



Σε Ευρωπαϊκό επίπεδο, στο **Σχήμα 2.3** παρουσιάζονται για τα έτη 2013 και 2023 αναλυτικότερα οι διαφορές στις κατά κεφαλήν παραγόμενες ποσότητες ΑΣΑ για τα 27 κράτη μέλη της ΕΕ, καθώς και για 9 επιπλέον, υπό ένταξη κράτη (Eurostat, 2025). Σύμφωνα με το σχήμα αυτό, φαίνεται ότι για τη δεκαετία 2013-2023 συνολικά η κατά κεφαλήν παραγωγή των ΑΣΑ για τα κράτη μέλη της ΕΕ αυξήθηκε σε ποσοστό της τάξης του 6,2%. Επιπλέον, διακρίνονται οι χώρες με τη μεγαλύτερη (π.χ. Δανία, Αυστρία) και τη μικρότερη (Ρουμανία) κατά κεφαλήν παραγωγή στο επίπεδο της ΕΕ.

Αναλυτικός πίνακας για την παραγωγή ΑΣΑ ανά κάτοικο, καθώς και για τις συνολικές παραγόμενες ποσότητες ΑΣΑ στην Ευρώπη για τα έτη 1995, 2003, 2013 και 2023 παρατίθεται στο Παράρτημα (**Πίνακας Π.1**). Από την ανάλυση του **Πίνακα Π.1** προκύπτει ότι χώρες όπως η Γερμανία, η Γαλλία, η Ιταλία η Ισπανία, σε επίπεδο ΕΕ ευθύνονται για τις μεγαλύτερες παραγόμενες ποσότητες ΑΣΑ. Όπως φαίνεται, ωστόσο, από τα σχετικά δεδομένα, από τις χώρες αυτές, σε επίπεδο αποβλήτων ανά πολίτη, μόνο η Γερμανία (613 kg/πολίτη) και η Γαλλία (527 kg/πολίτη) κυμαίνεται πάνω από το σχετικό μέσο όρο της ΕΕ (511 kg/πολίτη).

Για την Ελλάδα, όπως σημειώνεται στο Εθνικό Σχέδιο Διαχείρισης Αποβλήτων (ΕΣΔΑ) (Πράξη 39 της 31.8, 2020), το ποσοστό των παραγόμενων ΑΣΑ αντιστοιχεί περίπου στο 17,9% (δεδομένα για το 2018) των συνολικών ρευμάτων αποβλήτων. Από τα δεδομένα του **Πίνακα Π.1** φαίνεται ότι το 2023 παρήχθησαν στη χώρα 5.440.000t ΑΣΑ, ποσότητα που αντιστοιχεί περίπου στο 2,37% των παραγόμενων ΑΣΑ στην ΕΕ. Όσον αφορά τις ποσότητες ΑΣΑ ανά πολίτη, οι τιμές κυμαίνονται ελαφρώς πάνω από το μέσο όρο της ΕΕ, με 523 kg παραγόμενων ΑΣΑ / πολίτη. Τέλος, σύμφωνα με τον ίδιο πίνακα, η αύξηση στην παραγωγή ΑΣΑ για την Ελλάδα από το 1995 έως το 2023 είναι της τάξης του 70% συνολικά και 72,6% ανά κάτοικο, ενώ η αντίστοιχη αύξηση σε επίπεδο ΕΕ είναι της τάξης του 15,7% συνολικά και 9,4% ανά κάτοικο.

Για όλα τα παραπάνω, σε παγκόσμιο πλέον επίπεδο κρίνεται επιβεβλημένη η εφαρμογή κατάλληλων συστημάτων επεξεργασίας ΑΣΑ, τα οποία στοχεύουν στη μείωση των επιπτώσεων που επιφέρουν αυτά στο περιβάλλον, καθώς και στην αύξηση της ανάκτησης χρήσιμων υλικών και στη μέγιστη δυνατή ενεργειακή αξιοποίηση τους (Zhang et al., 2021).

### 2.1.2 Δεδομένα Σύστασης των ΑΣΑ

Η παραγωγή και σύσταση των αποβλήτων δύναται να επηρεαστεί από μια σειρά παραγόντων. Για παράδειγμα ο πληθυσμός και η σχετική πυκνότητα, αλλά και το βιοτικό και οικονομικό επίπεδο μιας χώρας είναι καθοριστικοί παράγοντες για τις παραγόμενες ποσότητες ΑΣΑ αυτής. Επιπλέον, ο αριθμός των ατόμων από τα οποία απαρτίζεται ένα νοικοκυριό διαφοροποιεί τις σχετικές παραγόμενες ποσότητες, ενώ και οι καταναλωτικές και πολιτιστικές συνήθειες των πολιτών μιας περιοχής, οι οποίες σχετίζονται και με τη γεωγραφική θέση αυτής, ενδέχεται να διαφοροποιήσουν τους αριθμούς των σχετικών παραγόμενων αποβλήτων. Σημαντικός παράγοντας, επίσης, θεωρείται και η γενικότερη πολιτική μιας χώρας ή περιοχής σε σχέση με τη διαχείριση των αποβλήτων, καθώς στα σχετικά νομοθετικά πλαίσια καθορίζονται σημαντικοί παράγοντες, όπως η συχνότητα και η μεθοδολογία συλλογής (πχ μέγεθος κάδων) των απορριμμάτων, ενώ παράλληλα παρέχονται και κίνητρα που σχετίζονται με την αποδοτικότερη διαχείριση των ΑΣΑ (πχ ανακύκλωση, κομποστοποίηση, κλπ.) από τους πολίτες. Τέλος, εποχικοί παράγοντες, όπως ο τουρισμός, αλλά και ακαθόριστοι παράγοντες, όπως πολεμικές συρράξεις, επηρεάζουν την παραγωγή των ΑΣΑ σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό αντίστοιχα (Κομίλης, 2023).

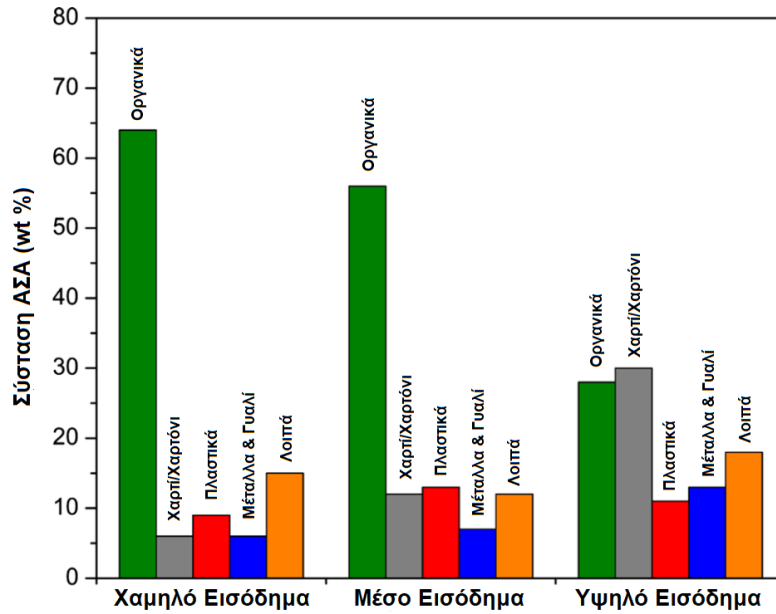
Ένα τέτοιο χαρακτηριστικό παράδειγμα μελέτησαν οι (Yousefi et al., 2021), οι οποίοι ανέφεραν τις επιπτώσεις που είχε στην παραγωγή των ΑΣΑ η πανδημία του κορονοϊού, εξάγοντας συμπεράσματα όπως η αύξηση των αποβλήτων από νοικοκυριά λόγω του εγκλεισμού, η αύξηση των πλαστικών αποβλήτων και η, αναμενόμενα, σημαντική αύξηση των ιατρικών αποβλήτων.

Για να είναι δυνατή η αξιολόγηση και σωστή διαχείριση των ΑΣΑ, μια εκ των σημαντικότερων πληροφοριών που απαιτούνται αφορά στη σύνθεση αυτών. Τα κυριότερα συστατικά από τα οποία απαρτίζονται τα ΑΣΑ είναι τα ακόλουθα (Tchobanoglous & Kreith, 2018):

- Ζυμώσιμα/οργανικά (βιοαποδομήσιμα) απόβλητα (πχ υπολείμματα τροφών, απόβλητα κήπων, κλπ.)
- Χαρτί και Χαρτόνι (πχ εφημερίδες, υλικά συσκευασίας, χαρτιά γραφείου, εμπορικές εκτυπώσεις, χαρτιά υγείας, κυματοειδές (corrugated) χαρτόνι, κλπ.)
- Γυαλί (πχ γυάλινα δοχεία, μπουκάλια ποτών/μπύρας κλπ.)
- Μέταλλα
  - Σιδηρούχα Μέταλλα (χάλυβας, σίδηρος, σε υλικά όπως κονσέρβες)

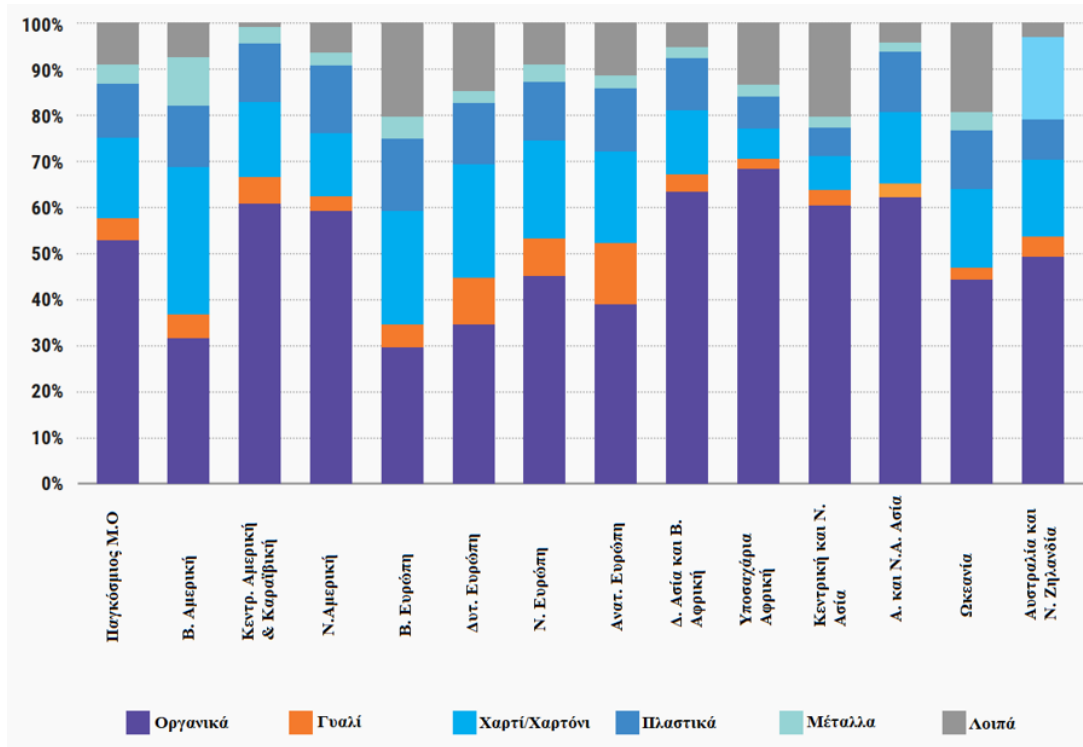
- Αλουμίνιο (πχ σε κουτιά αναψυκτικών)
- Λοιπά, μη σιδηρούχα Μέταλλα (μόλυβδος (κύρια πηγή: μπαταρίες), ψευδάργυρος, χαλκός)
- Πλαστικά (Κύριες κατηγορίες: Polyethylene terephthalate (PETE/PET), High-density polyethylene (HDPE), Low-density polyethylene (LDPE), Polypropylene (PP), Polystyrene (PS), λοιπά. Συναντώνται σε μπουκάλια, πλαστικά πιάτα, σακούλες, ρουχισμός, υποδήματα, κλπ.)
- Λάστιχα και Δέρμα (πχ λάστιχα αυτοκινήτων, έπιπλα, μοκέτες, είδη ένδυσης & υπόδησης)
- Υφάσματα (Ρούχα, σεντόνια, κλπ.)
- Ξύλο (πχ έπιπλα, κουτιά μεταφοράς, κλπ.)
- Ανόργανα απόβλητα (πχ χώμα, πέτρες, τσιμέντο)
- Λοιπά υλικά (πχ πάνες μίας χρήσης)

Το εισόδημα των πολιτών αποτελεί έναν εκ των σημαντικότερων παραγόντων που καθορίζει τη σχετική σύσταση, καθώς τα χαρακτηριστικά των ΑΣΑ που παράγει ένα νοικοκυριό είναι συνυφασμένα σε σημαντικό βαθμό από την οικονομική δυνατότητα που έχουν οι πολίτες για αγορά και κατανάλωση αγαθών συγκεκριμένων χαρακτηριστικών. Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.4**, σε χώρες/περιοχές όπου παρατηρούνται υψηλά εισοδήματα, τα παραγόμενα ΑΣΑ χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερες ποσοστιαίες ποσότητες σε χαρτί, μέταλλα και γυαλί, ενώ στις χώρες/περιοχές με χαμηλό προς μέσο εισόδημα τα οργανικά απόβλητα έχουν υψηλότερο ποσοστό. Ως χαμηλού εισοδήματος ορίστηκαν οι χώρες των οποίων το κατά κεφαλήν ακαθάριστο εθνικό εισόδημα είναι μικρότερο ή ίσο των 1.025 δολαρίων για το οικονομικό έτος 2020. Αντίστοιχα, υψηλό εισόδημα θεωρήθηκε, για το ίδιο οικονομικό έτος, κατά κεφαλήν ακαθάριστο εθνικό εισόδημα μεγαλύτερο ή ίσο των 12.376 δολαρίων. Η ενδιάμεση οικονομική βαθμίδα χαρακτηρίζεται ως μέσο εισόδημα. Από το σχήμα προκύπτει ότι τα ποσοστά πλαστικού είναι αντίστοιχα τόσο για τα υψηλά όσο και για τα μέσα εισοδήματα, γεγονός που οφείλεται κυρίως στον κορεσμό της χρήσης πλαστικών συσκευασιών, καθώς και της επιλογής παραπλήσιων συστημάτων της εφοδιαστικής αλυσίδας μεταξύ των δύο αυτών βαθμίδων (Nanda & Berruti, 2021).



**Σχήμα 2.4** Σύσταση ΑΣΑ σύμφωνα με εισόδημα πολιτών για το έτος 2020  
[Επεξεργασία/Μορφοποίηση από: (Nanda & Berruti, 2021)]

Σύμφωνα με την έκθεση των Ηνωμένων Εθνών (UNEP, 2024), στο **Σχήμα 2.5** απεικονίζεται γραφικά η μέση σύσταση των ΑΣΑ παγκοσμίως για το έτος 2020.



**Σχήμα 2.5** Σύσταση ΑΣΑ παγκοσμίως για το έτος 2020  
[Επεξεργασία/Μορφοποίηση από: (UNEP, 2024)]

Στην Ελλάδα, μια χαρακτηριστική, μέση σύσταση των ΑΣΑ καθορίζεται στο Εθνικό Σχέδιο Διαχείρισης Αποβλήτων (ΕΣΔΑ) (Πράξη 39 της 31.8, 2020), σύμφωνα με τα δεδομένα που παρατίθενται στον **Πίνακα 2.1**:

**Πίνακας 2.1 Σύσταση ΑΣΑ στην Ελλάδα για το έτος 2019** [Πηγή: ΕΣΔΑ (Πράξη 39 της 31.8, 2020)]

Κατηγορία	Σύσταση ΑΣΑ (% κ.β.)	Ποσότητες (t)
Οργανικά	46,0	2.397.803
<i>Απόβλητα κουζίνας</i>	<i>40,0</i>	<i>2.086.089</i>
<i>Απόβλητα κήπων/πράσινα</i>	<i>4,6</i>	<i>239.780</i>
<i>Βρώσιμα λίπη και έλαια</i>	<i>1,4</i>	<i>71.934</i>
Χαρτί/Χαρτόνι	21,1	1.100.618
Πλαστικό	14,1	736.014
Μέταλλα Fe	1,8	95.962
Μέταλλα Al	1,0	51.067
Γυαλί	4,2	217.572
Υφάσματα	2,2	116.242
Ξύλο	3,2	166.205
ΑΗΗΕ	2,2	112.543
Μικρές Ποσότητες Επικινδ. Αποβλήτων	0,1	5.627
Ογκώδη	2,2	112.543
Λοιπά	1,8	95.277
<b>Σύνολο</b>	<b>100</b>	<b>5.207.472</b>

\* Στις ανωτέρω ποσότητες δεν περιλαμβάνονται Βιομηχανικά και Εμπορικά Απόβλητα Συσκευασίας (ΒΕΑΣ)

Η σύσταση των ΑΣΑ στον ελλαδικό χώρο, σε σχέση με το **Σχήμα 2.4**, κυμαίνεται μεταξύ χωρών μέσου και υψηλού εισοδήματος. Από τα δεδομένα του **Πίνακα 2.1** προκύπτει ότι το ποσοστό των οργανικών αποβλήτων κυμαίνεται σε υψηλές τιμές (συνολικό ποσοστό 46%), αποτελώντας περίπου το μισό της συνολικής σύστασης. Επίσης, η Ελλάδα χαρακτηρίζεται από χαμηλά επίπεδα καθαρότητας στα ανακυκλώσιμα είδη, με αποτέλεσμα σημαντικό ποσοστό υλικών που θα μπορούσαν να διαχωριστούν στην πηγή και να ανακυκλωθούν πρωτογενώς, να καταλήγει στον κάδο των ΑΣΑ. Οι δύο αυτές παρατηρήσεις είναι σημαντικές για τη γενικότερη, επιλογή του συστήματος διαχείρισης των ΑΣΑ στην Ελλάδα (Πράξη 39 της 31.8, 2020).

### 2.1.3 Μέθοδοι διαχείρισης και επεξεργασίας ΑΣΑ

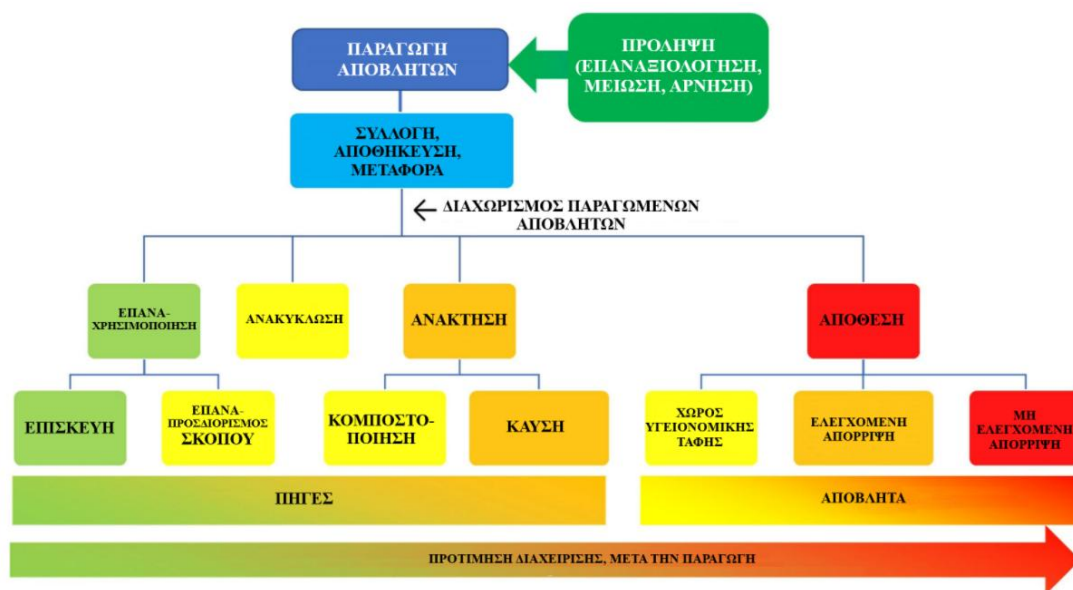
Από τη στιγμή που ένα υλικό χαρακτηριστεί ως απόβλητο, για τη σωστή διαχείριση του απαιτούνται μια σειρά από ενέργειες, οι οποίες έχουν ως στόχο τη βέλτιστη δυνατή αξιοποίηση του πριν την τελική διάθεση. Τα σημαντικότερα λειτουργικά στοιχεία από τα οποία αποτελείται ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης ΑΣΑ, σύμφωνα με τους (Tchobanoglous & Kreith, 2018), είναι τα ακόλουθα:

- Παραγωγή των αποβλήτων: Η παραγωγή των αποβλήτων ξεκινά τη στιγμή που ένα προϊόν χάνει την αξία του. Ο ακριβής καθορισμός της συγκεκριμένης στιγμής εξαρτάται από τη φύση του κάθε απόβλητου
- Διαχείριση αποβλήτων (διαχωρισμός, αποθήκευση & επεξεργασία στην πηγή): Αφορά το σύνολο των ενεργειών που πραγματοποιούνται μέχρι την απόθεση των αποβλήτων σε κάποιο κάδο απορριμμάτων. Ο πολίτης έχει τη δυνατότητα να διαχωρίσει και να επεξεργαστεί κατάλληλα τα απόβλητα του, καθώς και να τα αποθηκεύσει για κάποιο διάστημα (σημαντικό τόσο για αισθητικούς λόγους, όσο και για λόγους δημόσιας υγείας), πριν την τελική διάθεση
- Συλλογή: Τα απόβλητα συγκεντρώνονται με χρήση κατάλληλων μέσων σε συγκεκριμένους χώρους συλλογής. Μετά τη συλλογή ακολουθεί μεταφορά σε περαιτέρω στάδια επεξεργασίας ή τελικής διάθεσης
- Μεταφορά και Μεταφόρτωση: Τα απόβλητα μεταφέρονται με μικρότερα, συνήθως, οχήματα για μικρές αποστάσεις προς μεγαλύτερους εξοπλισμούς μεταφόρτωσης, σε κατάλληλες τοποθεσίες (σταθμοί μεταφόρτωσης). Στη συνέχεια, πραγματοποιείται μεταφορά μεγάλων αποστάσεων προς μονάδες περαιτέρω επεξεργασίας πριν την τελική διάθεση
- Διαχωρισμός, Επεξεργασία και Μετατροπή: Τα απόβλητα, πριν την τελική τους διάθεση, επεξεργάζονται σε κατάλληλες μονάδες για τη μέγιστη δυνατή αξιοποίηση τους. Οι μονάδες αυτές μπορεί να περιλαμβάνουν μηχανική επεξεργασία (ανάκτηση ανακυκλώσιμων υλικών), βιολογική επεξεργασία (κομποστοποίηση, αναερόβια χώνευση) για την αξιοποίηση του οργανικού κλάσματος και θερμική επεξεργασία (συνηθέστερη μέθοδος η καύση, με άλλες αναπτυσσόμενες μεθόδους να αφορούν την πυρόλυση και την αεριοποίηση)
- Τελική Διάθεση: Η διάθεση γίνεται σε χώρους υγειονομικής ταφής με τη μέθοδο της εδαφικής διάθεσης (landfilling) ή εδαφικού διασκορπισμού (landspreading). Η τελική διάθεση δε γίνεται ανεξέλεγκτα, αλλά με σαφώς

καθορισμένη μεθοδολογία ώστε να περιορίζονται στο ελάχιστο τυχόν αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Στα πλαίσια της βέλτιστης δυνατής αξιοποίησης των αποβλήτων, κατά τη διάρκεια της εφαρμογής των ανωτέρω σταδίων ακολουθείται συχνά, ιδίως σε σύγχρονα συστήματα, μια συγκεκριμένη ιεραρχία στη διαχείριση των ΑΣΑ. Στο νομοθετικό πλαίσιο της ΕΕ για τη διαχείριση των αποβλήτων, η επιθυμητή, σειρά προτεραιότητας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη περιλαμβάνει, με την ακόλουθη ιεραρχία, την Πρόληψη, την Επαναχρησιμοποίηση, την Ανακύκλωση, την Ανάκτηση Ενέργειας και τέλος, τη Διάθεση προς ΧΥΤ (Branchini, 2015). Η εφαρμογή της συγκεκριμένης σειράς στοχεύει στη μεγιστοποίηση του οικονομικού οφέλους που δύναται να προκύψει από τα απόβλητα σε συνδυασμό με την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, εφαρμόζοντας κάθε φορά αξιοποίηση η οποία συνάδει με τα χαρακτηριστικά των προς αξιοποίηση αποβλήτων.

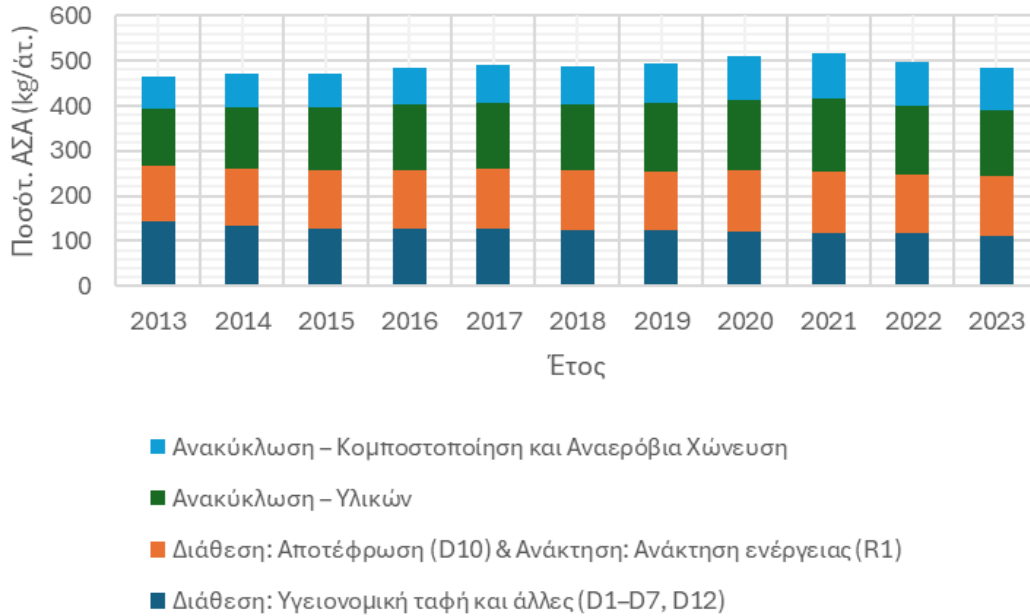
Μια συνοπτική γραφική απεικόνιση της ιεράρχησης των επιθυμητών ενεργειών στη διαχείριση των ΑΣΑ, παρατίθεται στο **Σχήμα 2.6**:



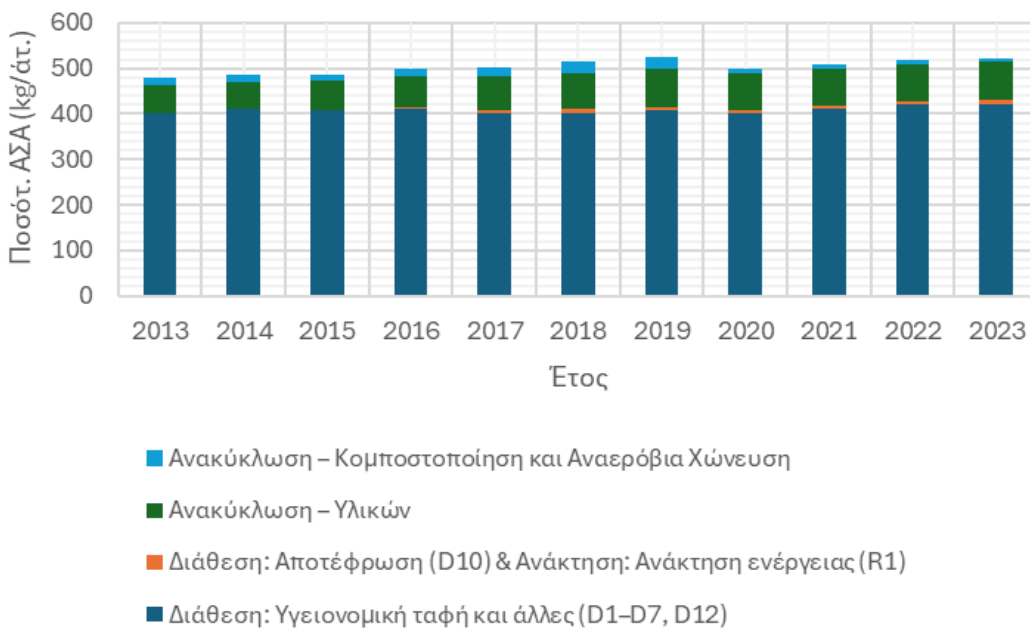
**Σχήμα 2.6** Ιεραρχία διαχείρισης ΑΣΑ [Επεξεργασία/Μορφοποίηση από: (Awino & Aritz, 2024)]

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, σύμφωνα με το **Σχήμα 2.7**, το οποίο απεικονίζει τις ετήσιες ποσότητες ΑΣΑ (kg/άτομο) ανά μέθοδο επεξεργασίας για τη δεκαετία 2013-2023, φαίνεται ότι οι τέσσερις κύριες εφαρμοζόμενες μέθοδοι (ταφή, ανακύκλωση, καύση,

βιολογική επεξεργασία) διαχειρίζονται παραπλήσιες κατά κεφαλήν ποσότητες, με την καύση/ενεργειακή αξιοποίηση να προηγείται ελαφρώς. Τα σχετικά αναλυτικά δεδομένα των μετρήσεων παρατίθενται στο Παράρτημα (Πίνακας Π.2).



**Σχήμα 2.7 Μέθοδοι επεξεργασίας ΑΣΑ στην ΕΕ για τα έτη 2013-2023**  
[Επεξεργασία/Μορφοποίηση από: (Eurostat, 2025)]



**Σχήμα 2.8 Μέθοδοι επεξεργασίας ΑΣΑ στην Ελλάδα για τα έτη 2013-2023**  
[Επεξεργασία/Μορφοποίηση από: (Eurostat, 2025)]

Στην Ελλάδα, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 2.8** (αναλυτικά δεδομένα στον **Πίνακα Π.3** του Παραρτήματος), τα ΑΣΑ οδηγούνται κυρίως προς υγειονομική ταφή σε ποσοστό άνω του 80% (για το 2023), ενώ η ανακύκλωση κυμαίνεται σε ποσοστά που προσεγγίζουν το 16% επί των παραγόμενων ΑΣΑ, με μικρές ποσότητες να αξιοποιούνται μέσω της ανακύκλωσης. Οι ποσότητες ΑΣΑ που αξιοποιούνται μέσω βιολογικής επεξεργασίας και καύσης είναι ακόμα πιο χαμηλές, γεγονός που αναμένεται να αλλάξει τα επόμενα χρόνια σύμφωνα με τους στόχους που έχουν τεθεί από το νέο ΕΣΔΑ (Πράξη 39 της 31.8, 2020).

## 2.2 Νομοθετικό Πλαίσιο και στόχοι διαχείρισης ΑΣΑ

Σε παγκόσμια διάσταση, οι χώρες που ανήκουν στα Ηνωμένα Έθνη έχουν θεσπίσει νόμους και οδηγίες σχετικά τη διαχείριση των παραγόμενων αποβλήτων. Ωστόσο η εφαρμογή αυτών και οι διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις (UNEP, 2024). Συνήθως, στις χώρες που εφαρμόζουν σχετική νομοθεσία, για τη διαχείριση των παραγόμενων αποβλήτων καθορίζονται συγκεκριμένοι στόχοι που σχετίζονται με την απόδοση των συστημάτων διαχείρισης και των επιμέρους σταδίων από τα οποία αυτά αποτελούνται. Σε αρκετές χώρες παγκοσμίως η νομοθεσία που σχετίζεται με τη διαχείριση των αποβλήτων, καθώς και τα συστήματα επεξεργασίας που αφορούν αυτή, επιδέχονται σημαντικής βελτίωσης. Τα θετικά αποτελέσματα από την εφαρμογή αυστηρότερων νόμων και αρτιότερων τεχνικών διαχείρισης σε εξελιγμένες χώρες μπορεί να αποτελέσει παράδειγμα για τη βελτίωση αντίστοιχων χωρών με χαμηλότερα επίπεδα ανάπτυξης (Ivanova & Lisina, 2023).

Καθώς η επισκόπηση του νομοθετικού πλαισίου σε παγκόσμια κλίμακα ξεφεύγει από τα όρια της παρούσας εργασίας, στη συνέχεια θα αναφερθούν συνοπτικά οι κυριότερες οδηγίες που ισχύουν σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης, σύμφωνα με τις οποίες έχει καθοριστεί και η σχετική νομοθεσία που αφορά τη διαχείριση των αποβλήτων στην Ελλάδα.

### 2.2.1 Οδηγίες Ευρωπαϊκής Ένωσης

Σύμφωνα με τα όσα αναφέρονται στον επίσημο ιστότοπο της Ευρωπαϊκής Ένωσης (*EU Waste Management Law*, 2024), οι βασικότερες οδηγίες που ορίζουν τις αρχές για τη διαχείριση των αποβλήτων στα κράτη μέλη αυτής είναι η Οδηγία 2008/98/ΕΚ, καθώς και η Οδηγία 2018/851, η οποία αποτελεί τροποποίηση της πρώτης.

Τα κυριότερα σημεία που θέτει η Οδηγία 2008/98/ΕΚ αφορούν, πρωτίστως, στην επιθυμητή προτεραιότητα σχετικά με τα στάδια διαχείρισης και επεξεργασίας των αποβλήτων (Σχήμα 2.9). Επίσης, στην οδηγία αναφέρεται η αρχή σύμφωνα με την οποία ο υπεύθυνος για την αρχική παραγωγή των αποβλήτων οφείλει να επωμιστεί το κόστος διαχείρισης αυτών (γνωστή και ως “ο ρυπαίνων πληρώνει”). Επιπλέον, καθίσταται σαφής η ευθύνη που έχει ο παραγωγός των αποβλήτων τόσο οικονομικά, όσο και οργανωτικά σχετικά με τα απόβλητα σε όλα τα στάδια διαχείρισης και επεξεργασίας του, ενώ τέλος, καθορίζεται σαφώς η διάκριση μεταξύ των αποβλήτων και των υποπροϊόντων που μπορεί να προκύψουν από αυτά. Η οδηγία αναφέρει, ακόμα, συγκεκριμένες υποχρεώσεις που αφορούν τα κράτη-μέλη της ΕΕ, όπως για παράδειγμα την υποχρέωση αυτών να καταρτίσουν συγκεκριμένα σχέδια διαχείρισης (όπως το ΕΣΔΑ στην Ελλάδα), καθώς και προγράμματα πρόληψης για την αποφυγή παραγωγής των αποβλήτων. Τέλος, στα πλαίσια της οδηγίας τίθενται συγκεκριμένοι στόχοι (π.χ. αύξηση του ποσοστού ανακύκλωσης στο 50% μέχρι το 2015 και ανακύκλωση/επαναχρησιμοποίηση αποβλήτων από κατασκευές και κατεδαφίσεις στο 70% μέχρι το 2020), οι οποίοι είναι δεσμευτικοί, ενώ και για την τήρηση τους υπάρχει και σχετικός έλεγχος.



**Σχήμα 2.9 Προτεραιότητα διαχείρισης και επεξεργασίας ΑΣΑ**  
[Επεξεργασία/Μορφοποίηση από: (Οδηγία 2008/98/ΕΚ, 2008)]

Η Οδηγία 2018/851 περιλαμβάνει τροποποιήσεις και προσθήκες στην Οδηγία 2008/98/ΕΚ, που ως κύριο στόχο έχουν τη βελτίωση στη συνολική αποδοτικότητα της διαχείρισης των αποβλήτων. Παράλληλα η εφαρμογή της ενισχύει την αρτιότερη

υποστήριξη της γενικότερης φιλοσοφίας της κυκλικής οικονομίας, ενισχύοντας με αυτό τον τρόπο σε μακροπρόθεσμο πλάνο την ανταγωνιστικότητα της ΕΕ. Ενδεικτικά, η οδηγία περιλαμβάνει τη λήψη μέτρων που στοχεύουν στη βελτίωση των πρώτων σταδίων της πυραμίδας διαχείρισης του **Σχήματος 2.9** (πχ ανθεκτικότερα ή εύκολα επισκευάσιμα προϊόντα, αξιοποίηση πρώτων υλών υψηλής αξίας πριν την απόρριψη των προϊόντων ως απόβλητα, παροχή πληροφοριών για την ενίσχυση της επισκευής έναντι της απόρριψης τεχνολογικών προϊόντων), περιορισμό της απόρριψης τροφικών αποβλήτων, απαιτήσεις που σχετίζονται με την ευθύνη του παραγωγού και, τέλος, προώθηση του μοντέλου της κυκλικής οικονομίας και της βιώσιμης ανάπτυξης με μέτρα όπως η βελτίωση στη χρήση πόρων και πρώτων υλών. Οι στόχοι που τίθενται από την ισχύ της οδηγίας περιλαμβάνουν ανακύκλωση για τα ΑΣΑ της τάξης του 55% κ.β. μέχρι το 2025, 60% κ.β. μέχρι το 2030 και 65% κ.β. μέχρι το 2035.

Αξίζει να σημειωθεί, ότι παράλληλα με την οδηγία 2018/851, την ίδια χρονολογία εκδόθηκαν και άλλες τρεις οδηγίες, οι οποίες συνδυαστικά προωθούν την κυκλική οικονομία στην ΕΕ. Οι οδηγίες αυτές είναι η 2018/849/ΕΕ, η οποία εστιάζει σε στόχους και οδηγίες σχετικά ειδικές κατηγορίες αποβλήτων (οχήματα στο τέλος ζωής, μπαταρίες/συσσωρευτές και ηλεκτρικό/ηλεκτρονικό εξοπλισμό), η 2018/850/ΕΕ, η οποία παρέχει οδηγίες σχετικά με την τελική διάθεση των αποβλήτων και την ταφή αυτών και, τέλος, η 2018/852/ΕΕ, η οποία αφορά σε οδηγίες που σχετίζονται με απόβλητα συσκευασιών. Συνολικά οι οδηγίες αυτές καθορίζουν στόχους, όπως η ανακύκλωση συσκευασιών σε ποσοστό 70% μέχρι το 2030, η μείωση της ταφής ΑΣΑ στο 10% μέχρι το 2035 και η απαγόρευση ταφής ανακυκλώσιμων υλικών μετά το 2030, έχοντας ως στόχο και τη συνολική μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων που επιβαρύνουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου.

### 2.2.2 Ελληνική νομοθεσία

Ο πρώτος νόμος που αφορούσε της διαχείριση αποβλήτων και γενικότερα θέματα του περιβάλλοντος στην Ελλάδα ήταν ο Ν.1650/86, ο οποίος έθεσε το σύνολο των απαιτούμενων ορισμών, εισάγοντας έννοιες όπως “απόβλητο”, “διαχείριση” και “εθνικός και περιφερειακός σχεδιασμός”. Η εναρμόνιση με τις επιταγές της Οδηγίας 2008/98/ΕΚ στην Ελλάδα επετεύχθη με το Ν.4042/12. Όπως αναφέρθηκε και στις παραπάνω παραγράφους, με τη θέσπιση του συγκεκριμένου νόμου καθορίστηκε η ιεραρχία στη διαχείριση των αποβλήτων, αρχές όπως η ευθύνη του παραγωγού και “ο

ρυπαίνων πληρώνει”, ενώ διευκρινίστηκαν και σημαντικές έννοιες όπως το “υποπροϊόν” και ο “αποχαρακτηρισμός των αποβλήτων”.

Καθώς στη χώρα μας πλέον οι βασικές κατευθυντήριες γραμμές σχετικά με τη διαχείριση αποβλήτων καθορίζονται από το ΕΣΔΑ 2020-2030 (Πράξη 39 της 31.8.2020) (προηγούμενη έκδοση ΕΣΔΑ 2015-2020 (Ε.Σ.Δ.Α., 2015)), ακολούθως παρατίθενται συνοπτικά τα βασικά νομοθετήματα που σχετίζονται με αυτό σύμφωνα με τον ιστότοπο του ΕΛΙΝΥΑΕ (<https://www.elinyae.gr/etiketes/ethniko-shedio-diaheirisis-stereon-apobliton-esda>):

- **Π.Υ.Σ. 5 της 18.4.2023 /2023 (ΦΕΚ 94/Α` 18.4.2023)** – Αφορά έγκριση τροποποιήσεων του ΕΣΔΑ
- **Ν. 4819/2021 (ΦΕΚ 129/Α` 23.7.2021)** – Περιλαμβάνει ολοκληρωμένο πλαίσιο για τη διαχείριση των αποβλήτων, καθώς και ενσωμάτωση των Οδηγιών 2018/851 και 2018/852 του ΕΚ για την τροποποίηση της Οδηγίας 2008/98/ΕΚ
- **Π.Υ.Σ. 39 της 31.8.2020/2020 (ΦΕΚ 185/Α` 29.9.2020)** – Αφορά έγκριση του ΕΣΔΑ
- **Υ.Α. Οικ. 51373/4684/2015 (ΦΕΚ 2706/Β` 15.12.2015)** – Αφορά κύρωση του ΕΣΔΑ και του Εθνικού Στρατηγικού Σχεδίου Πρόληψης Δημιουργίας Αποβλήτων
- **Π.Υ.Σ. 49/2015 (ΦΕΚ 174/Α` 15.12.2015)** – Αφορά τροποποίηση και έγκριση του ΕΣΔΑ και του Εθνικού Στρατηγικού Σχεδίου Πρόληψης Δημιουργίας Αποβλήτων
- **Ν. 4342/2015 (ΦΕΚ 143/Α` 9.11.2015)** – Αφορά κυρίως ενσωμάτωση της Οδηγίας 2012/27/ΕΕ, όπως τροποποιήθηκε από την Οδηγία 2013/12/ΕΕ που σχετίζονται με θέματα ενεργειακής απόδοσης
- **Ν. 4042/2012 (ΦΕΚ 24/Α` 13.2.2012)** – Αφορά κυρίως εναρμόνιση με την οδηγία 2008/99/ΕΚ, καθορίζοντας συγκεκριμένο πλαίσιο για την παραγωγή και διαχείριση των αποβλήτων
- **Αρ. Πρωτ. οικ. 103731/1278/2004 (ΦΕΚ /-- 13.5.2004)** – Αφορά εφαρμογή της νομοθεσίας για τη διαχείριση στερεών αποβλήτων
- **Υ.Α. Η.Π. 50910/2727/2003 (ΦΕΚ 1909/Β` 22.12.2003)** - Αφορά εθνικό και περιφερειακό σχεδιασμό διαχείρισης των αποβλήτων καθορίζοντας συγκεκριμένα μέτρα και όρους για τη διαχείριση τους

Οι βασικότεροι εκ των στόχων που καθορίζονται από το ΕΣΔΑ, όπως αναλύεται στην παρουσίαση του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ, 2020), είναι η μείωση της ταφής των απορριμμάτων από ποσοστό 78,4% το 2019 σε 10% μέχρι το 2030, με παράλληλη παύση πάσας διάθεσης απορριμμάτων προς Χώρους Ανεξέλεγκτης Διάθεσης Αποβλήτων (ΧΑΔΑ). Διευκρινίζεται ότι σε σχέση με τις Ευρωπαϊκές οδηγίες ο συγκεκριμένος στόχος έχει χρονική πρόωρη επίτευξη κατά πέντε έτη (2030 αντί για το 2035). Επίσης τίθεται ως επιδίωξη η αύξηση του ποσοστού ανακύκλωσης από 20,1% το 2019, στο 55% το 2025 και στο 60% το 2030.

Καθώς οι συγκεκριμένοι στόχοι είναι εξαιρετικά απαιτητικοί και δεδομένης της υφιστάμενης κατάστασης στην Ελλάδα, είναι ακόμα πιο επιτακτική η ανάγκη για εντατικοποίηση της εθνικής προσπάθειας με στόχο τη σχετική ευθυγράμμιση. Ένας εκ των βασικότερων αξόνων ανάπτυξης και εφαρμογής του σχεδίου περιλαμβάνει την κατασκευή είκοσι έξι νέων Μονάδων Επεξεργασίας Απορριμμάτων, οι οποίες δίνουν τη δυνατότητα για συνδυασμό των τεχνολογιών της μηχανικής διαλογής (ανάκτηση ανακυκλώσιμων υλικών) και της βιολογικής επεξεργασίας, δίνοντας παράλληλα τη δυνατότητα για παραγωγή δευτερογενούς καυσίμου RDF/SRF προς περαιτέρω ενεργειακή αξιοποίηση σε μονάδες καύσης. Αναλυτική λίστα τόσο των λειτουργικών (6 συνολικά), όσο και των μελλοντικών ΜΕΑ (10 σε σύμβαση και 26 μελλοντικές) της χώρα μας για το 2020 παρατίθενται στο Παράρτημα ΙΙΙ του ΕΣΔΑ (Πράξη 39 της 31.8, 2020).

Σημειώνεται ότι η παραγωγή δευτερογενούς καυσίμου και η αξιοποίησή του σε μονάδες ενεργειακής αξιοποίησης αποτελούν κομβικό πυλώνα στην κατεύθυνση της επίτευξης του εθνικού στόχου για τη μείωση του υπολείμματος προς ΧΥΤ. Στο πλαίσιο αυτό, απαιτείται η αναβάθμιση των υφιστάμενων ΜΕΑ, καθώς και των ΜΕΑ που πρόκειται να αναβαθμιστούν στο προσεχές διάστημα σε Μονάδες Ανάκτησης Ανακύκλωσης (ΜΑΑ), οι οποίες μεταξύ άλλων θα έχουν την δυνατότητα να επεξεργάζονται χωριστά συλλεχθέντα ρεύματα απορριμμάτων και να παράγουν δευτερογενή καύσιμα (Πράξη 39 της 31.8, 2020).

### **3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΑΔΑΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ (ΜΕΑ)**

#### **3.1 Γενικά στοιχεία**

Με τον όρο Μονάδα Επεξεργασίας Απορριμμάτων (Mechanical Biological Treatment) (ΜΕΑ ή ΜΒΤ) περιγράφεται ένα σύστημα ευρέως υλοποιήσιμο, ιδίως στην ΕΕ, το οποίο αφορά στην επεξεργασία των ΑΣΑ. Βασικοί στόχοι του συγκεκριμένου συστήματος είναι ο διαχωρισμός των ανακυκλώσιμων υλικών από το εισερχόμενο ρεύμα αποβλήτων, καθώς και η μείωση του συνολικού οργανικού φορτίου αυτού μέσω εφαρμογής κατάλληλης μηχανικής και βιολογικής επεξεργασίας. Οι μονάδες αυτές, οι οποίες στις ΗΠΑ καλούνται “Ρυπαρές μονάδες ανάκτησης υλικών”, παρέχουν τη δυνατότητα για παραγωγή βιοαερίου, καθώς και για παραγωγή δευτερογενούς καυσίμου SRF/RDF, σε κατάλληλες παραλλαγές της δομής τους. Και στις δύο αυτές εναλλακτικές καθίσταται δυνατή η περαιτέρω ενεργειακή αξιοποίηση των ΑΣΑ σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους μηχανικής και βιολογικής επεξεργασίας (Edo-Alcón et al., 2024).

Η βασικότερη αιτία υιοθέτησης της τεχνολογίας των ΜΕΑ στις χώρες της ΕΕ ήταν η οδηγία 1993/31/ΕΕ, σύμφωνα με την οποία τέθηκαν περιορισμοί στην ταφή των βιοδιασπώμενων αποβλήτων (Połomka & Jędrzcak, 2019). Για το λόγο αυτό, στην εικοσαετία 1990-2010, στην Ευρώπη κατασκευάστηκαν περίπου 180 μονάδες αυτού του τύπου (Montejo et al., 2013), ενώ ο αριθμός των ΜΕΑ μεταξύ του 2005 και του 2011 αυξήθηκε στην ΕΕ σε ποσοστό 60% (Schingnitz, 2018).

Ενδεικτικά, η Γερμανία, στα τέλη του 2011, είχε 46 λειτουργικές ΜΕΑ, ενώ μεγάλες χώρες όπως η Μεγάλη Βρετανία, η Ιταλία, η Αυστρία και η Ισπανία είχαν 25, 133, 16 και 30 λειτουργικές μονάδες αντίστοιχα. Σύμφωνα με τους αριθμούς των μονάδων αυτών, η σχετική δυναμικότητα της Γερμανίας επαρκούσε για διαχείριση αποβλήτων 6.000.000 t/έτος, ενώ οι αντίστοιχες δυναμικότητες της Ιταλίας και της Ισπανίας ήταν 14.000.000 t/έτος και 4.500.000 t/έτος (Nelles et al., 2012). Χαρακτηριστικά, στην Ισπανία μέχρι το 2016 λειτουργούσαν 137 μονάδες διαχείρισης απορριμμάτων (95 ΜΕΑ και 42 μονάδες επεξεργασίας βιοαποβλήτων), συνολικής δυναμικότητας 13.000.000 t/έτος. Οι μονάδες αυτές κάλυπταν σε απόλυτο βαθμό τις σχετικές ανάγκες της χώρας (Edo-Alcón et al., 2024).

Στην Ελλάδα, ο σχεδιασμός που αφορά τη διαχείριση των παραγόμενων αποβλήτων έχει ως κύριο στόχο την ανάπτυξη ενός μεγάλου δικτύου ΜΕΑ, εγκατεστημένων σε καίριες θέσεις της ελληνικής επικράτειας (Πράξη 39 της 31.8, 2020). Ενδεικτικά, στις ημέρες μας οι λειτουργικές ΜΕΑ της χώρας μας έχουν θεωρητική δυναμικότητα επεξεργασίας ΑΣΑ που ξεπερνά τους 640.000 t/έτος. Συλλέγοντας δεδομένα από τον ιστότοπο <http://wasteatlas.diktiofodsa.gr/>, οι δυναμικότητες σχεδιασμού για την επεξεργασία ΑΣΑ των κυριότερων εξ αυτών είναι οι ακόλουθες:

- ΕΜΑΚ Φυλής: 186.385,23 t/έτος
- ΜΕΑ Δυτικής Μακεδονίας-Κοζάνη: 120.000 t/έτος
- ΕΜΑΚ Χανίων: 91.563 t/έτος
- ΜΕΑ Ηπείρου: 80.000 t/έτος
- ΜΕΑ Αμαρίου: 51.400 t/έτος
- ΜΕΑ Σερρών: 46.400 t/έτος
- ΜΕΑ Ηλείας: 46.425 t/έτος
- ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης: 44.826 t/έτος
- ΜΕΑ Λακωνίας: 38.106 t/έτος
- ΜΕΑ Θήβας: 35.000 t/έτος

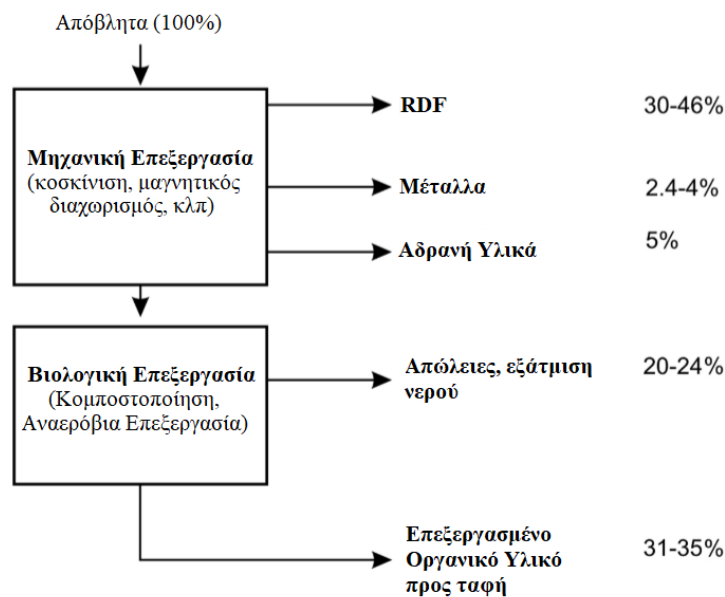
Η τεχνολογία των ΜΕΑ έχει προκριθεί για την αξιοποίηση των ΑΣΑ στην Ελλάδα λόγω των χαρακτηριστικών που αυτά παρουσιάζουν (υψηλά ποσοστά οργανικών και χαμηλή καθαρότητα λόγω μη διαλογής στην πηγή). Παράλληλα, με την επιλογή της τεχνολογίας των ΜΕΑ εξασφαλίζεται και η μελλοντική δυνατότητα για παραγωγή δευτερογενών καυσίμων RDF/SRF, που σε επόμενο στάδιο θα μπορέσουν να αξιοποιηθούν σε κατάλληλες μονάδες καύσης (μελλοντικό πλάνο για κατασκευή 6 νέων μονάδων ενεργειακής αξιοποίησης σύμφωνα με τη σχετική Στρατηγική Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΣΜΠΕ, 2025)).

### 3.2 Δομή και παραλλαγές εφαρμογής ΜΕΑ

Η σύσταση των εισερχόμενων αποβλήτων καθώς και τα επιθυμητά τελικά παράγωγα της επεξεργασίας καθορίζουν σε σημαντικό βαθμό τις ακριβείς διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε μια ΜΕΑ (Bourtsalas & Themelis, 2022). Οι δύο κύριες εναλλακτικές για τη δομή λειτουργίας μιας ΜΕΑ είναι η Μηχανική και Βιολογική Προεπεξεργασία (ΜΒΠ) (Mechanical Biological Pretreatment-MBP) και η Μηχανική και Βιολογική Σταθεροποίηση (Mechanical Biological Stabilization-MBS) (Bilitewski

et al., 2011; Montejo et al., 2013; Schingnitz, 2018). Η κύρια διαφοροποίηση μεταξύ των δύο αυτών εναλλακτικών έγκειται στη σειρά εκτέλεσης της μηχανικής και βιολογικής επεξεργασίας (Schingnitz, 2018). Ενδεικτικά ισοζύγια μάζας για κάθε μία από τις δύο αυτές εφαρμογές παρουσιάζονται στα **Σχήματα 3.1** και **3.2** αντίστοιχα.

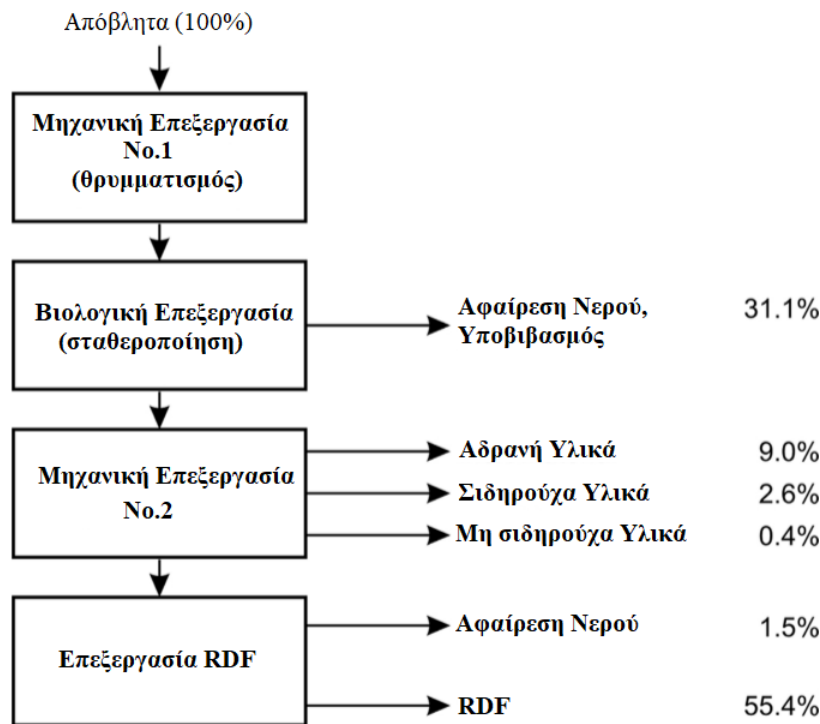
Η μέθοδος ΜΒΠ εκκινεί με μηχανική επεξεργασία, ενώ στη συνέχεια ακολουθεί η βιολογική επεξεργασία, πριν την τελική ταφή του επεξεργασμένου, εξερχόμενου υλικού (Bilitewski et al., 2011). Στην περίπτωση αυτή, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 3.1**, πρέπει να σημειωθεί ότι οι εξερχόμενες ποσότητες αποτελούν σημαντικό ποσοστό των αντίστοιχων εισερχόμενων ροών.



**Σχήμα 3.1** Ισοζύγιο Μάζας Μονάδας τύπου ΜΒΠ [Επεξεργασία/Μορφοποίηση από: (Bilitewski et al., 2011)]

Στο στάδιο της μηχανικής επεξεργασίας της συγκεκριμένης εναλλακτικής η επίτευξη της ανάκτησης των σχετικών κλασμάτων (πχ χαρτί, γυαλί, πλαστικά, μέταλλα) γίνεται με χρήση τεχνολογιών διαχωρισμού (πχ μαγνήτες) και διαλογής (πχ κόσκινα), ενώ και η χρήση του λεπτόκοκκου κλάσματος επιτυγχάνεται επίσης με χρήση κοσκίνων (Schingnitz, 2018). Στο δεύτερο στάδιο, η επεξεργασία του οργανικού κλάσματος μπορεί να επιτευχθεί είτε μέσω κομποστοποίησης ή μέσω αναερόβιας επεξεργασίας. Στη δεύτερη περίπτωση παρέχεται επιπρόσθετα η δυνατότητα για παραγωγή βιοαερίου και, συνεπώς, περαιτέρω αξιοποίησης αυτού, μέσω θερμικής και ηλεκτρικής παραγωγής, με καύση σε κατάλληλες μονάδες συμπαραγωγής (CHP).

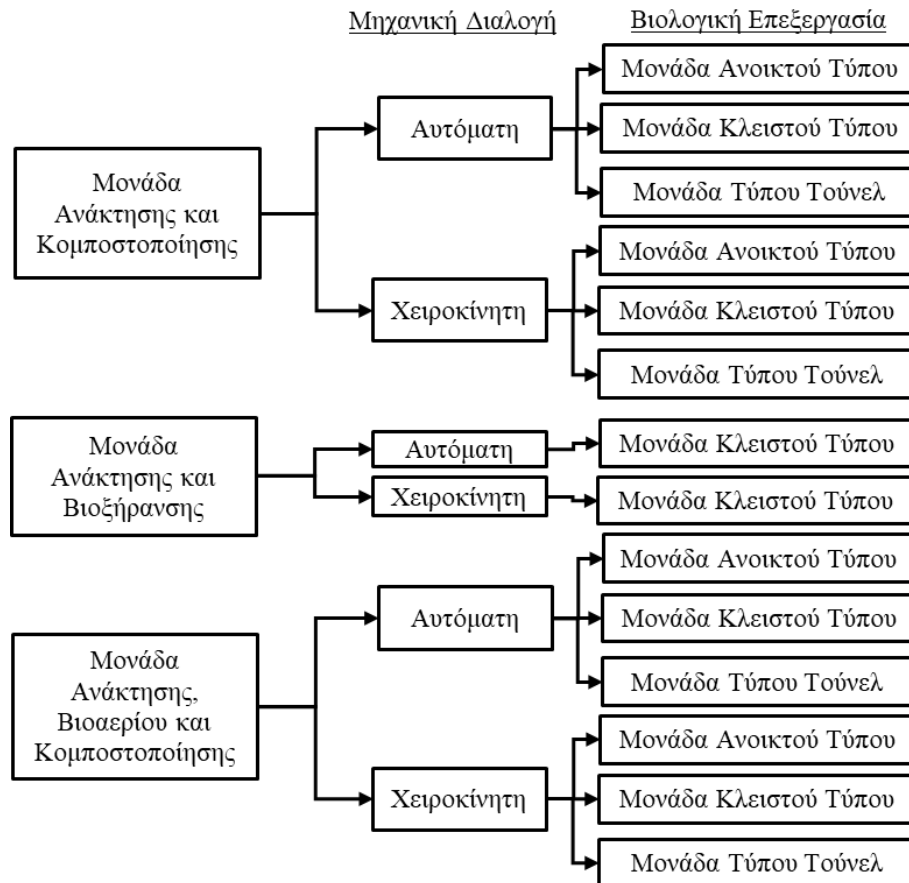
Στην εναλλακτική περίπτωση που η βιολογική επεξεργασία προηγείται της κύριας μηχανικής επεξεργασίας, η βασική επιδίωξη είναι η βιοσταθεροποίηση των εισερχόμενων ροών, πριν την εφαρμογή μηχανικής διαλογής για διαχωρισμό κλασμάτων (πχ σιδηρούχα και μη σιδηρούχα υλικά) (Montejo et al., 2013). Η εναλλακτική αυτή (ΜΒΣ) είναι γνωστή και ως “βιοζήρανση” και χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που είναι επιθυμητό η ποιότητα του εξερχόμενου δευτερογενούς καυσίμου να είναι υψηλή (Bilitewski et al., 2011).



**Σχήμα 3.2** Ισοζύγιο Μάζας Μονάδας τύπου ΜΒΣ [Επεξεργασία/Μορφοποίηση από: (Bilitewski et al., 2011)]

Τυχόν άλλες εφαρμογές που αφορούν ΜΕΑ συνήθως αποτελούν παραλλαγή των δύο προαναφερθέντων περιπτώσεων (Montejo et al., 2013),.

Ένα ενδεικτικό παράδειγμα μιας διαφορετικής, πιο σύγχρονης προσέγγισης σχετικά με τις παραλλαγές μιας ΜΕΑ παρουσιάζουν οι (Edo-Alcón et al., 2024). Στο κείμενο αυτό παρουσιάζονται εναλλακτικοί τύποι ΜΕΑ ανάλογα με το αν η μηχανική επεξεργασία χαρακτηρίζεται από πλήρως αυτοματοποιημένες ή όχι διεργασίες, καθώς και την τεχνολογία εκτέλεσης των βιολογικών διεργασιών. Σχηματικά, οι εναλλακτικές παραλλαγές που προκύπτουν από τη θεώρηση αυτή φαίνονται στο **Σχήμα 3.3**:



**Σχήμα 3.3** Εναλλακτικοί τύποι ΜΕΑ για τη διαχείριση ΑΣΑ  
[Επεξεργασία/Μορφοποίηση από: (Edo-Alcón et al., 2024)]

### 3.2.1 Μηχανική Επεξεργασία

Η σύσταση των εισερχομένων αποβλήτων, καθώς και τα φυσικά χαρακτηριστικά καθενός εκ των συστατικών τους (μέγεθος υλικών, σχήμα, πυκνότητα, δυνατότητα συμπίεσης, αντοχή) αποτελούν τους παράγοντες που καθορίζουν το σχεδιασμό της μηχανικής επεξεργασίας (Bilitewski, 2011). Οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε αυτό το είδος επεξεργασίας αποσκοπούν αρχικά στη μείωση του μεγέθους του απορριμματικού όγκου, στη συνέχεια στο διαχωρισμό των επιμέρους συστατικών/υλικών από αυτόν και, τέλος, στη συμπίεση της εξερχόμενης ροής, με στόχο την ευκολότερη διαχείριση του συγκεκριμένου ρεύματος.

Οι κυριότεροι στόχοι του εξοπλισμού που αφορά στη μείωση του μεγέθους των εισερχόμενων αποβλήτων σχετίζονται με ενέργειες όπως διάνοιξη (πχ σακούλες σκουπιδιών), κοπή και τεμαχισμός. Οι ενέργειες αυτές έχουν ως τελικό στόχο τη μείωση του μεγέθους και την απελευθέρωση τυχόν υλικών που βρίσκονται δεσμευμένα μεταξύ τους. Οι δύο σημαντικότερες ομάδες εξοπλισμού που χρησιμοποιούνται για

αυτό το σκοπό είναι συστήματα κρούσης σε υψηλές ταχύτητες (πχ σφυρόμυλοι, μύλοι με περύγια, θραυστήρες γυαλιού) και συστήματα υψηλής ροπής (πχ τεμαχιστές, συστήματα άλεσης με λεπίδες). Για την επιλογή του εξοπλισμού αυτού του σταδίου, πέραν των χαρακτηριστικών των αποβλήτων, εξίσου σημαντικός παράγοντας είναι και η επιθυμητή μεταγενέστερη διαχείριση του εξερχόμενου ρεύματος, προκειμένου ο εξοπλισμός που θα επιλεγεί να μην έχει καταστροφικά αποτελέσματα σε τυχόν αναγκαία συστατικά (Tchobanoglous & Kreith, 2018),.

Όσον αφορά τη διεργασία του διαχωρισμού, οι δύο βασικές κατηγορίες σύμφωνα με τις οποίες κατατάσσεται ο συγκεκριμένος εξοπλισμός, καθώς και οι σχετικές εργασίες, είναι ο θετικός και ο αρνητικός διαχωρισμός (Κομίλης, 2023). Στην πρώτη περίπτωση, σε ένα συγκεκριμένο ρεύμα αποβλήτων στόχος είναι η ανάκτηση ενός συγκεκριμένου υλικού (πχ χαρτί, γυαλί, μέταλλο, κλπ.). Στη δεύτερη περίπτωση σε ένα ρεύμα που περιέχει υλικά μιας συγκεκριμένης κατηγορίας (πχ πλαστικά), αφαιρούνται τυχόν προσμίξεις που μειώνουν την καθαρότητα του. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά σύμφωνα με τα οποία επιτυγχάνεται ο διαχωρισμός είναι το μέγεθος (πχ χρήση εξοπλισμού όπως περιστρεφόμενα κόσκινα/σχάρες και σχαρών τύπου δίσκου), οι ιδιότητες της επιφάνειας (οπτικός διαχωριστής), το βάρος (αεροδιαχωριστής), ο συνδυασμός επιφάνειας/βάρους (βαλλιστικός διαχωριστής) και, τέλος, τυχόν άλλες ιδιότητες των υλικών, όπως η μαγνήτιση (μαγνητικοί διαχωριστές, επαγωγικοί διαχωριστές, κλπ.). Σε περίπτωση που είναι επιθυμητή και περαιτέρω επεξεργασία, πέραν των προαναφερθέντων, αυτοματοποιημένων συστημάτων, υπάρχει και η δυνατότητα για χειρωνακτική διαλογή, η οποία συνήθως είναι στοχευμένη και εύκολα προσαρμοζόμενη στις εκάστοτε ανάγκες. Ο διαχωρισμός τείνει να μην είναι ποτέ ιδανικός, καθώς σε περιπτώσεις μεγάλων ποσοτήτων ανάκτησης ενός υλικού συνήθως δεν επιτυγχάνεται υψηλή καθαρότητα, με τα αντίστοιχα ποσοστά των μη επιθυμητών προσμίξεων να είναι και αυτά υψηλά (Bilitewski, 2011).

Η τελευταία βασική διεργασία της μηχανικής επεξεργασίας αφορά τη συμπίεση των ΑΣΑ, η οποία αποσκοπεί στη μείωση του όγκου τους και παράλληλη αύξηση της πυκνότητάς τους (Κομίλης, 2023). Με τον τρόπο αυτό διευκολύνεται η μεταφορά, η αποθήκευση και η ταφή των ΑΣΑ, καθώς μειώνονται οι απαιτήσεις σε χώρο (μέσα μεταφοράς, χώροι αποθήκευσης), ενώ ταυτόχρονα μεγιστοποιούνται και τα έσοδα από τη μεταφορά των ανακυκλώσιμων υλικών (Bilitewski, 2011). Οι δύο κύριοι τρόποι επίτευξης της συμπίεσης είναι η αύξηση της συγκέντρωσης των σωματιδίων με

εφαρμογή εξωτερικών δυνάμεων, καθώς και η ενίσχυση της συγκέντρωσης με εφαρμογή ουσιών κατάλληλων συγκολλητικών χαρακτηριστικών, με ακόλουθη εφαρμογή ενός σταδίου ξήρανσης του συνολικού υλικού. Ορισμένες από τις γνωστότερες διατάξεις συμπίεσης των ΑΣΑ είναι οι δεματοποιητές, οι παλετοποιητές και οι συμπιεστές (Κομίλης, 2023).

### 3.2.2 Βιολογική Επεξεργασία

Οι τρεις εναλλακτικές μέθοδοι εφαρμογής της βιολογικής επεξεργασίας σε μια ΜΕΑ είναι η κομποστοποίηση, η βιοξήρανση και η αναερόβια επεξεργασία (Byström, 2010; Edo-Alcón et al., 2024; Κομίλης, 2023).

Ο όρος “κομποστοποίηση” χρησιμοποιείται για την περιγραφή ενός μικροβιακού, μετασχηματισμού υπό αερόβιες συνθήκες (παρουσία οξυγόνου), όπου λαμβάνει χώρα σταθεροποίηση ετερογενών οργανικών υλικών, σε στερεά κατάσταση, (Stentiford & Bertoldi, 2011). Η συγκεκριμένη αντίδραση είναι εξώθερμη, ενώ ως τελικό προϊόν λαμβάνεται είτε χαμηλής ποιότητας κομπόστ (Τύπου A/CLO) (περίπτωση κομποστοποίησης ΑΣΑ) ή υψηλής ποιότητας κομπόστ, (περίπτωση κομποστοποίησης διαχωρισμένου εισερχόμενου ρεύματος βιοαποβλήτων). Οι βασικοί τρόποι εφαρμογής της κομποστοποίησης σε ΑΣΑ είναι οι ακόλουθοι (Edo-Alcón et al., 2024):

- Αεριζόμενα, στατικά σειράδια
- Ανοιχτές εγκαταστάσεις/Αναδευόμενα συστήματα
- Κλειστοί αντιδραστήρες (πχ βιοκελιά, τύπου τούνελ, περιστρεφόμενος οριζόντιος/κάθετος αντιδραστήρα)

Η βιοξήρανση, αφορά μια διεργασία παραπλήσια της κομποστοποίησης, η οποία ωστόσο έχει ως στόχο την παραγωγή δευτερογενών καυσίμων (RDF/SRF). Για την επίτευξη των παραπάνω απαιτείται η μείωση της υγρασίας των ΑΣΑ, με παράλληλη, ωστόσο, διατήρηση της οργανικής ύλης και της θερμογόνου δύναμης του παραγόμενου προϊόντος (Κομίλης, 2023). Η εφαρμογή της βιοξήρανσης λαμβάνει χώρα σε αντιδραστήρες κλειστού τύπου (Edo-Alcón et al., 2024).

Τέλος, η αναερόβια χώνευση ορίζεται ως μια βιολογική διαδικασία στην οποία λαμβάνει χώρα μια μετατροπή χωρίς παρουσία κάποιου παραλήπτη ηλεκτρονίων (Angelidaki & Batstone, 2011). Στις περιπτώσεις που εξετάζουμε ο βασικός δέκτης ηλεκτρονίων είναι το οξυγόνο, ενώ σε άλλες περιπτώσεις ανοξικών διεργασιών παραλήπτης θα μπορούσε να είναι το νιτρικό ή το θειικό (απονιτροποίηση ή αναγωγή

θεικών, αντίστοιχα). Τα βασικότερα στάδια της συγκεκριμένης διεργασίας, σύμφωνα με τους συγγραφείς, είναι η υδρόλυση, η οξεογένεση, η οξικογένεση και, τέλος, η μεθανογένεση. Τα στάδια αυτά έχουν μεγάλη σημασία, καθώς με την επιτυχή ολοκλήρωση τους παράγεται μεθάνιο, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για περαιτέρω αξιοποίηση σε κατάλληλες μονάδες. Η εφαρμογή της αναερόβιας χώνευσης λαμβάνει χώρα αυστηρά σε αντιδραστήρες κλειστού τύπου, καθώς για τη συλλογή του βιοαερίου είναι απαραίτητη η ύπαρξη κατάλληλης υποδομής (Edo-Alcón et al., 2024).

### 3.2.3 Εξερχόμενες ροές από ΜΕΑ

Τα κυριότερα παράγωγα από την επεξεργασία των ΑΣΑ σε μια ΜΕΑ είναι τα ακόλουθα (Byström, 2010):

- **Ανακυκλώσιμα υλικά:** Αφορούν υλικά όπως χαρτί/χαρτόνι, πλαστικά, γυαλί και μέταλλα (σιδηρούχα, μη σιδηρούχα). Η διαλογή τους επιτυγχάνεται στο στάδιο της μηχανικής διαλογής
- **Σταθεροποιημένα βιοαπόβλητα:** Προέρχονται από την βιολογική επεξεργασία του οργανικού κλάσματος. Συνήθεις χρόνοι που απαιτούνται είναι 4-8 εβδομάδες βιολογικής επεξεργασίας και 8-12 εβδομάδες ωρίμανσης
- **Κομπόστ χαμηλής ποιότητας (CLO):** Προκύπτει κατόπιν κατάλληλης βιολογικής επεξεργασίας για τη ρύθμιση του λόγου C/N και τη μείωση των οργανικών οξέων. Απαιτείται κατάλληλη επεξεργασία μετά το πέρας της ωρίμανσης (προσθήκη σταδίου επεξεργασίας σε ραφιναρία). Η ύπαρξη ουσιών όπως βαρέα μέταλλα δεν επιτρέπει τη χρήση του συγκεκριμένου παράγωγου σε εφαρμογές οικιακής χρήσης, αντιθέτως επιτρέπεται η χρήση σε πιο “βαριές” εφαρμογές, όπως η διάστρωση XYT ή λατομείων
- **Κομπόστ υψηλής ποιότητας:** Προκύπτει κατόπιν κατάλληλης βιολογικής επεξεργασίας σε ρεύμα που προέρχεται από προδιαλεγμένα οργανικά απόβλητα
- **Δευτερογενές καύσιμο RDF/SRF:** Ο ακριβής τύπος του δευτερογενούς καυσίμου (RDF ή SRF) καθορίζεται από την ποσοστιαία σύσταση του εισερχόμενου ρεύματος και τις ακριβείς διεργασίες παραγωγής αυτού. Το RDF συνήθως προέρχεται από υλικά όπως χαρτί, πλαστικό και ξύλο με θερμιδική αξία που κυμαίνεται μεταξύ 12 και 16 MJ/kg. Το SRF (θερμιδική αξία 14-18 MJ/kg) απαιτεί περαιτέρω επεξεργασία (βιοζήρανση), ενώ τα πρωτογενή

συστατικά προϋποθέτουν την αφαίρεση προσμίξεων χαμηλής θερμιδικής αξίας, καθώς και αδρανών υλικών

- **Βιοαέριο:** Παράγεται στην περίπτωση που η βιολογική επεξεργασία περιλαμβάνει αναερόβια χώνευση

### 3.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα εφαρμογών ΜΕΑ - Σύγκριση με άλλες μεθόδους διαχείρισης ΑΣΑ

Για τη διαχείριση των ΑΣΑ οι δύο κύριες μέθοδοι επεξεργασίας είναι ο συνδυασμός μηχανικής και βιολογικής επεξεργασίας, καθώς και η καύση. Και οι δύο τεχνικές στοχεύουν κυρίως στη μείωση του όγκου των προς τελική διάθεση αποβλήτων, σε συνδυασμό με την ταυτόχρονη, βέλτιστη δυνατή, αξιοποίηση τους (ενεργειακή αξιοποίηση, ανακύκλωση χρήσιμων υλικών, κλπ.) (Schingnitz, 2018). Η καύση των αποβλήτων αν και είναι μια γνωστή και ευρέως διαδεδομένη τεχνική, έχει ιδιαίτερα υψηλό κόστος, ενώ χρησιμοποιείται όταν υπάρχει κατάλληλη υποδομή (δίκτυο αξιοποίησης παραγόμενης θέρμανσης) και η σύσταση των ΑΣΑ εξασφαλίζει υψηλή θερμιδική αξία (Byström, 2010).

Η εφαρμογή των ΜΕΑ για τη διαχείριση των αποβλήτων εξασφαλίζει ορισμένα σημαντικά πλεονεκτήματα. Η συγκεκριμένη τεχνολογία απαιτεί σημαντικά μικρότερο κόστος σε σχέση με τη μέθοδο της καύσης, ενώ ικανοποιεί θεσμοθετημένες οδηγίες που σχετίζονται με την τήρηση σωστής ιεραρχίας στην επεξεργασία των αποβλήτων (ανακύκλωση – αξιοποίηση - μείωση οργανικού υπολείμματος πριν την τελική ταφή). Επίσης, με κατάλληλες τροποποιήσεις στις σχετικές διεργασίες παρέχεται η δυνατότητα παραγωγής δευτερογενών καυσίμων προς περαιτέρω αξιοποίηση σε σχετικές μονάδες καύσης (πχ τσιμεντοβιομηχανία). Ακόμη, η χρήση της μεθόδου εξασφαλίζει μια μικρή ευελιξία σε τυχόν αλλαγές του εισερχόμενου ρεύματος, ενώ επιτυγχάνει και μερική απολύμανση αυτού. Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί το γεγονός της ευκολότερης, συνήθως, αποδοχής από την κοινή γνώμη σε σχέση με εργοστάσια μαζικής καύσης απορριμμάτων, στα οποία συνήθως οι πολίτες εγείρουν σοβαρές αντιθέσεις (Byström, 2010).

Ωστόσο, η μέθοδος συνοδεύεται και από ορισμένα μειονεκτήματα, με τα σημαντικότερα εξ αυτών να εντοπίζονται στην περιορισμένη μείωση του συνολικού όγκου των εξερχόμενων αποβλήτων που οδηγούνται προς τελική διάθεση, τις μεγάλες απαιτήσεις χώρου για τον εγκατεστημένο εξοπλισμό, τις σημαντικές περιβαλλοντικές

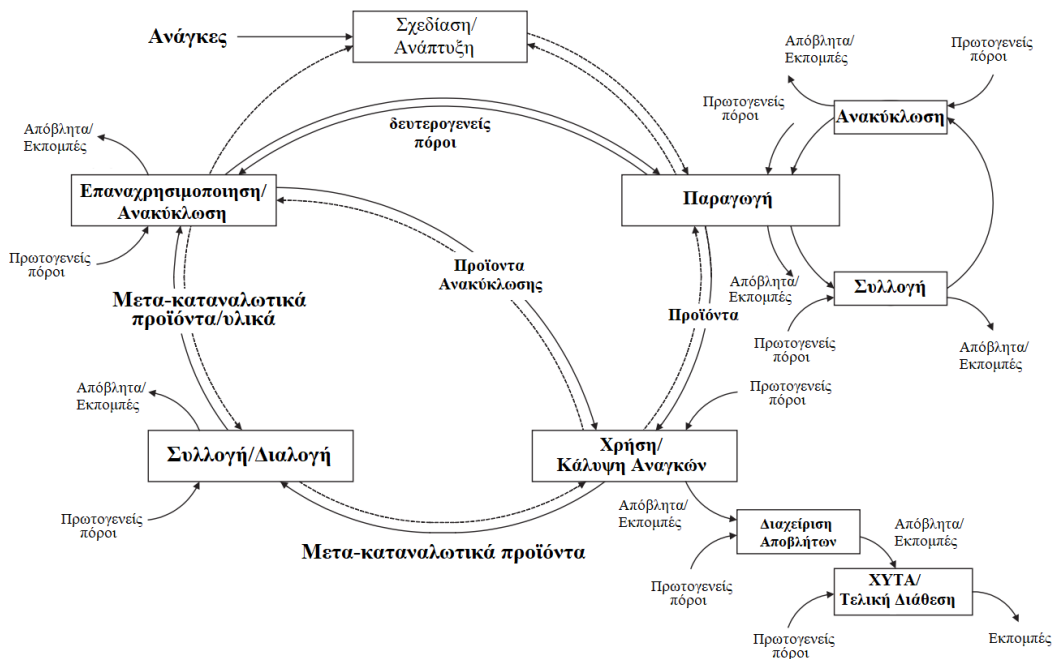
οχλήσεις λόγω εκλυόμενων εκπομπών και οσμών και τους περιορισμούς που συναντώνται στην προσπάθεια διάθεσης των παραγόμενων προϊόντων (Byström, 2010). Ειδικά το κομμάτι της διαχείρισης των εξερχόμενων ροών απαιτεί σοβαρή προσοχή, καθώς η λανθασμένη αξιοποίηση του οδηγεί σε απώλεια της αξίας τους και οικονομική επιβάρυνση της συνολικής επένδυσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αφορά η διαχείριση του δευτερογενούς καυσίμου, για το οποίο θα πρέπει να έχει γίνει σωστή πρόβλεψη της διαχείρισης του (πχ σύναψη συμβάσεων με την τσιμεντοβιομηχανία για καύση αυτού). Σε διαφορετική περίπτωση, η μη δυνατότητα διάθεσης ή η σύναψη μιας επιζήμιας συμφωνίας για διάθεση του προϊόντος θα οδηγήσει, προφανώς, σε σημαντική επιβάρυνση του λειτουργικού κόστους (Bourtsalas & Themelis, 2022).

## 4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ (ΑΚΖ)

### 4.1 Εισαγωγή στην ΑΚΖ

#### 4.1.1 Γενικά στοιχεία

Η τυπική “ζωή” ενός προϊόντος χαρακτηρίζεται από διάφορα στάδια, τα οποία συνοπτικά απεικονίζονται στο **Σχήμα 4.1**:



**Σχήμα 4.1** Απεικόνιση σταδίων Κύκλου Ζωής ενός προϊόντος

[Επεξεργασία/Μορφοποίηση από: (Rebitzer et al., 2004)]

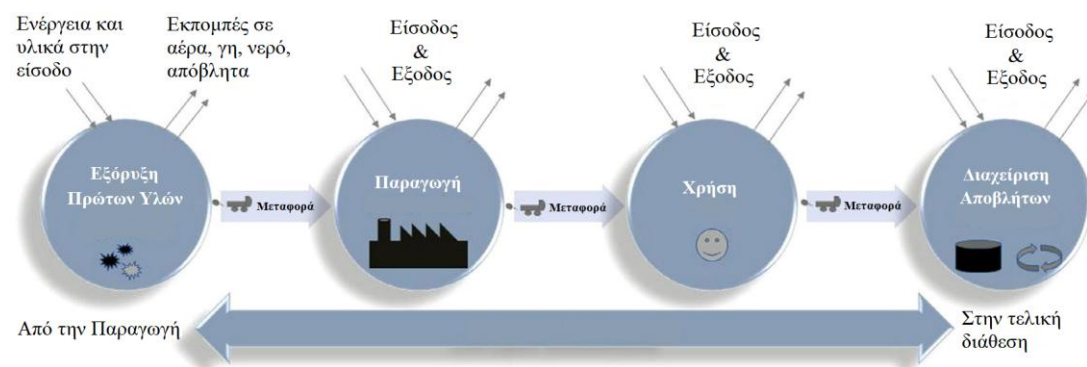
Σύμφωνα με το **Σχήμα 4.1** τα κύρια στάδια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος περιλαμβάνουν, αρχικά, τη σχεδίαση και κατασκευή αυτού με χρήση κατάλληλων πρώτων υλών, ενώ στη συνέχεια αυτό διατίθεται στη σχετική αγορά. Το συγκεκριμένο στάδιο είναι το κυριότερο στη «ζωή» του προϊόντος, καθώς με το πέρας του αυτό θεωρείται ότι έχει απωλέσει την κύρια αξία του, με αποτέλεσμα τα στάδια που ακολουθούν (δραστηριότητες όπως διαλογή, επαναχρησιμοποίηση και τελική απόρριψη) να εντάσσονται στη γενικότερη φιλοσοφία της διαχείρισης αποβλήτων. Από τα παραπάνω, είναι σαφές ότι στα πλαίσια εφαρμογής μια γενικότερης πολιτικής “Βιώσιμης Ανάπτυξης” η εκτίμηση του αποτυπώματος που επιφέρει το εκάστοτε προϊόν στο περιβάλλον καθ’ όλη τη διάρκεια ζωής του, απαιτεί την ανάπτυξη επιστημονικά τεκμηριωμένων πρακτικών που θα αποδίδουν κατάλληλα,

εμπεριστατωμένα αποτελέσματα (Rebitzer et al., 2004). Προς αυτή την κατεύθυνση, τις τελευταίες δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί μια πλειάδα εργαλείων και δεικτών, μεταξύ των οποίων περιλαμβάνεται και η μέθοδος της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment) (Finnveden et al., 2009).

#### 4.1.2 Ορισμός και βασικά χαρακτηριστικά μεθόδου

Τα πρότυπα ISO 14040 και 14044 ορίζουν την ΑΚΖ ως μια μέθοδο συλλογής και αξιολόγησης δεδομένων εισόδου και εξόδου ενός συστήματος παραγωγής και διαχείρισης ενός προϊόντος, καθώς και των ενδεχόμενων περιβαλλοντικών επιπτώσεων που μπορεί να έχει αυτό στο περιβάλλον, όπου το “προϊόν” αναφέρεται τόσο σε υλικά, όσο και υπηρεσίες. Ένας επίσης γνωστός ορισμός προέρχεται από την Εταιρεία Περιβαλλοντικής Τοξικολογίας και Χημείας (SETAC), η οποία αναφέρει ότι η ΑΚΖ είναι μια μεθοδολογία αξιολόγησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με ένα προϊόν, διεργασία ή δραστηριότητα. Η μεθοδολογία αυτή προσμετρά την απαιτούμενη ενέργεια και τα υλικά που χρησιμοποιούνται, καθώς και τα απόβλητα που απορρίπτονται τελικά στο περιβάλλον, αξιολογώντας το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα, ενώ ταυτόχρονα εντοπίζει και εκτιμά τις όποιες δυνατές συνθήκες επιτρέπουν μείωση αυτών (SETAC, 1994).

Σύμφωνα με το **Σχήμα 4.2**, η ΑΚΖ διευρύνει την οπτική της στο σύνολο του κύκλου ζωής ενός προϊόντος, λαμβάνοντας υπόψη διεργασίες όπως η αξιοποίηση πρώτων υλών, η κατασκευή, η μεταφορά και η διανομή, η χρήση και η επαναχρησιμοποίηση, η συντήρηση, η ανακύκλωση και η τελική διάθεση.



**Σχήμα 4.2** Γραφική αναπαράσταση της μεθοδολογικής φιλοσοφίας της μοντελοποίησης της ΑΚΖ [Επεξεργασία/Μορφοποίηση από: (Taniolo et al., 2021)]

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που αξιολογούνται με την ΑΚΖ περιλαμβάνουν στοιχεία όπως οι κλιματικές αλλαγές, η αυξομείωση του τροποσφαιρικού και στρατοσφαιρικού όζοντος, οι αλλαγές σε χαρακτηριστικά οξύτητας, η ευτροφικότητα περιβαλλοντικών αποδεκτών όπως εδάφη, λίμνες και θάλασσες, η μείωση των υδάτινων πόρων, η δημιουργία θορύβου, κ.α. (Rebitzer et al., 2004).

#### 4.1.3 Ιστορική Αναδρομή

Η γέννηση της ιδέας της ΑΚΖ εντοπίζεται στις δεκαετίες του 1960 και του 1970, κατά τη διάρκεια των οποίων η εμφάνιση προβλημάτων που σχετίζονταν με την αποδοτικότητα στην αξιοποίηση των πρώτων υλών και ενέργειας, τη διαχείριση των αποβλήτων και την περιβαλλοντική ρύπανση, οδήγησε στην πρώιμη εμφάνιση κειμένων που θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν μερικώς ως ΑΚΖ οι (Guinée et al., 2011). Η βιομηχανική ανάπτυξη που συντελέστηκε στη δεκαετία αυτή οδήγησε σε παράλληλη αύξηση των απαιτήσεων για αξιολόγηση του κύκλου ζωής διαφόρων προϊόντων, με αποτέλεσμα τη γέννηση της ιδέας της ΑΚΖ (Heijungs & Guinee, 2012). Κατά την εικοσαετία 1970-1990, η οποία ονομάστηκε “Δεκαετίες της Σύλληψης”, οι μελέτες που διεξήχθησαν χαρακτηρίζονταν από μεγάλες αποκλίσεις σχετικά με την ακολουθούμενη μεθοδολογία, αλλά και τα τελικά συμπεράσματα (Guinée et al., 2011; Heijungs & Guinee, 2012).

Για αυτό το λόγο, η δεκαετία που ακολούθησε (1990-2000: “Δεκαετία της Τυποποίησης”) χαρακτηρίστηκε από μια πιο συντονισμένη προσπάθεια ανάπτυξης επιστημονικών προτύπων που θα όριζαν τις απαιτήσεις και τα αποτελέσματα μελετών ΑΚΖ, με σύνταξη σαφών οδηγιών και κειμένων προς αυτό το στόχο (Finnveden et al., 2009). Κατά την περίοδο αυτή παρατηρήθηκε η δημοσίευση επιστημονικών άρθρων με θέμα την ΑΚΖ, ενώ η SETAC συνέβαλε συστηματικά στην καθοδήγηση και το συντονισμό σε θέματα που σχετίζονταν με τη βελτιστοποίηση του πλαισίου σύνταξης και της ανάπτυξης μελετών ΑΚΖ. Παράλληλα, ο Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης (International Standardization Organization-ISO) από το 1994 προέβη στη σύνταξη μιας σειράς προτύπων (σειρά ISO 1404x) που σχετίζονται με την ΑΚΖ, με κύριο στόχο την τυποποίηση των εφαρμοζόμενων μεθόδων και διαδικασιών (Guinée et al., 2011).

Μετά τη δεκαετία 1990-2000, όπου η χρήση της ΑΚΖ καθορίστηκε σημαντικά σε αυστηρότερα επιστημονικά, τυποποιημένα πλαίσια, ακολούθησαν οι δεκαετίες 2000-2010 (“Δεκαετία της ανάπτυξης”) και 2010-2020 (“Δεκαετία της Ανάλυσης της

Βιωσιμότητας του Κύκλου Ζωής) (Guinée et al., 2011). Στη μεν πρώτη σημειώθηκε σημαντική αύξηση στη χρήση της AKZ από θεσμικούς φορείς σε διεθνές επίπεδο, ενώ στη δεύτερη εμφανίστηκαν προσπάθειες για επέκταση της μεθοδολογίας της AKZ με την εισαγωγή ενός νέου πλαισίου που αφορά τη Βιωσιμότητα αυτής (Life Cycle Sustainability Analysis), η οποία είχε ως στόχο να εισάγει στην AKZ το σύνολο των βασικών παραμέτρων της βιωσιμότητας (κοινωνική ευημερία, προστασία περιβάλλοντος, οικονομική ευμάρεια), αποκλίνοντας ωστόσο στις απαιτήσεις των σχετικών προτύπων ISO (εφαρμογή σε αυστηρά περιβαλλοντικά πλαίσια).

Τα ισχύοντα πρότυπα που σχετίζονται με την AKZ είναι τα ακόλουθα:

- **ISO 14040/AMD 1 (2020)** - Περιβαλλοντική διαχείριση - Αξιολόγηση κύκλου ζωής - Αρχές και πλαίσιο εργασίας - Τροποποίηση 1
- **ISO 14044:2006/AMD 2 (2020)** - Περιβαλλοντική διαχείριση - Αξιολόγηση του κύκλου ζωής - Απαιτήσεις και κατευθυντήριες οδηγίες - Τροποποίηση 2
- **ISO 14025 (2006)** - Οικολογικά σήματα και δηλώσεις - Περιβαλλοντικές δηλώσεις τύπου III - Αρχές και διαδικασίες
- **ISO/TS 14027 (2017)** - Περιβαλλοντικές σημάνσεις και δηλώσεις - Ανάπτυξη κανόνων ανά κατηγορία προϊόντων
- **ISO/TR 14047 (2012)** - Περιβαλλοντική διαχείριση — Αξιολόγηση του κύκλου ζωής — Παραδειγματικές εφαρμογές της εφαρμογής του ISO 14044 σε περιπτώσεις αξιολόγησης επιπτώσεων
- **ISO/TS 14048 (2002)** - Περιβαλλοντική διαχείριση — Αξιολόγηση του κύκλου ζωής — Μορφοποίηση τεκμηρίωσης δεδομένων
- **ISO/TR 14049 (2012)** - Περιβαλλοντική διαχείριση — Αξιολόγηση του κύκλου ζωής — Παράδειγμα εφαρμογών της εφαρμογής του ISO 14044 στον καθορισμό στόχου και πεδίου εφαρμογής και στην ανάλυση απογραφής
- **ISO/TS 14071 (2014)** - Περιβαλλοντική διαχείριση — Αξιολόγηση του κύκλου ζωής — Διαδικασίες κρίσιμης ανασκόπησης και αρμοδιότητες αξιολογητών: Πρόσθετες απαιτήσεις και κατευθυντήριες οδηγίες για το ISO 14044
- **ISO/TS 14072 (2014)** - Περιβαλλοντική διαχείριση — Αξιολόγηση του κύκλου ζωής — Απαιτήσεις και κατευθυντήριες οδηγίες για την οργανωτική αξιολόγηση κύκλου ζωής

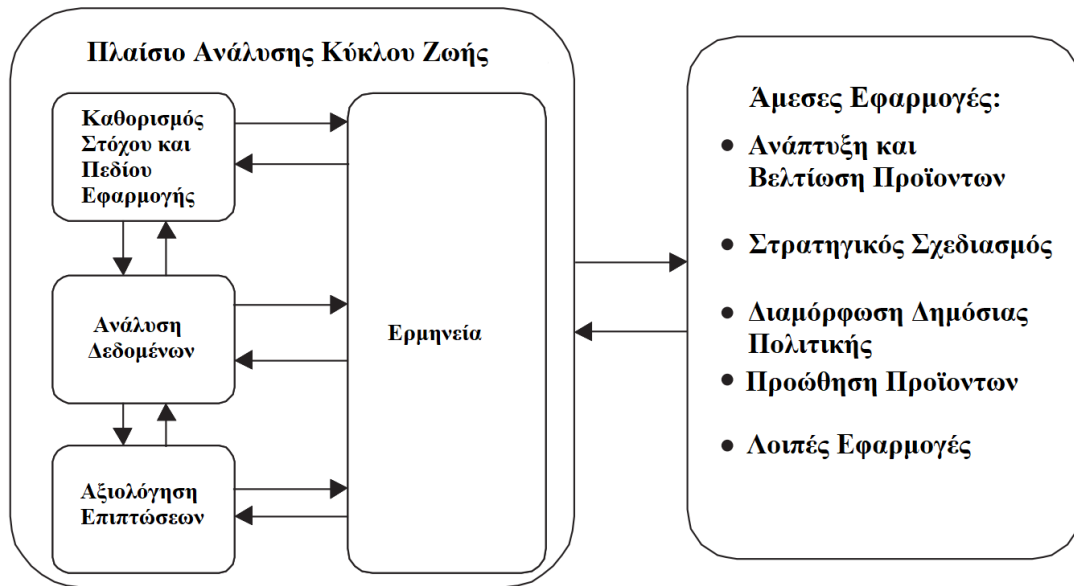
- **ISO/WD TS 14074 (2022)** - Περιβαλλοντική διαχείριση — Αξιολόγηση του κύκλου ζωής — Αρχές, απαιτήσεις και κατευθυντήριες οδηγίες για την πραγματοποίηση κανονικοποίησης, στάθμισης και ερμηνείας

#### 4.2 Στάδια ανάπτυξης και εφαρμογής ΑΚΖ

Ο “Κώδικα Εφαρμογής” της SETAC αποτέλεσε μια πρωτόλεια προσπάθεια καθορισμού της δομής μιας ΑΚΖ. Στο κείμενο αυτό καθορίστηκαν τα τέσσερα βασικά στάδια από τα οποία θα έπρεπε να απαρτίζεται η εφαρμογή μια ΑΚΖ. Τα στάδια αυτά ήταν ο καθορισμός του σκοπού της εφαρμογής και το εύρος των ορίων αυτής, η απογραφή των βασικών δεδομένων, η αξιολόγηση των επιπτώσεων και, τέλος, η αξιολόγηση των δυνατών βελτιώσεων που μπορούν να καθοριστούν κατά τη διάρκεια του κύκλου (SETAC, 1994).

Το 1997 εκδόθηκε το ISO 14040, σύμφωνα με το οποίο καθορίστηκαν σαφέστερα τα ισχύοντα στάδια της ΑΚΖ. Συγκεκριμένα, το στάδιο της αξιολόγησης των βελτιώσεων δε λογίζεται ως διακριτό στάδιο, ενώ πλέον ως τελικό στάδιο ολοκλήρωσης της ανάλυσης εισήχθη η ερμηνεία και τα συμπεράσματα για τα συνολικά αποτελέσματα της ανάλυσης.

Συνεπώς, τα βασικά στάδια στην εφαρμογή μιας ΑΚΖ θεωρούνται ο καθορισμός του στόχου και του εύρους αυτής, η απογραφή των δεδομένων, γνωστή και ως LCI (Life Cycle Inventory), η αξιολόγηση των επιπτώσεων, γνωστή και ως LCIA (Life Cycle Impact Assessment) και, τέλος, η ερμηνεία του συνόλου των αποτελεσμάτων. Τα παραπάνω αποτυπώνονται στο **Σχήμα 4.3**:



**Σχήμα 4.3** Στάδια Ανάλυσης και Εφαρμογές μιας ΑΚΖ, σύμφωνα με το ISO 14040 (1997) [Επεξεργασία/Μορφοποίηση από: (Rebitzer et al., 2004)]

Η εφαρμογή μιας ΑΚΖ, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 4.3**, είναι μια επαναλαμβανόμενη διαδικασία. Συνεπώς, κατά τη διάρκεια εφαρμογής αυτής είναι αναμενόμενο ότι θα απαιτηθούν επαναξιολογήσεις και επανέλεγχοι μεταξύ των διαφόρων σταδίων, με στόχο πάντα τη βελτιστοποίηση του τελικού αποτελέσματος (Guinée et al., 2011).

#### 4.2.1 Καθορισμός Στόχου και Πεδίου Εφαρμογής

Κατά το πρώτο στάδιο μιας ΑΚΖ δε λαμβάνει χώρα συλλογή οποιουδήποτε δεδομένου, ενώ, αντίστοιχα, δεν εξάγονται συμπεράσματα, ούτε λαμβάνουν χώρα υπολογισμοί. Η βασική χρησιμότητα αυτού του σταδίου είναι να καθοριστεί ο στόχος που τελικά θα πρέπει να επιτευχθεί με την ολοκλήρωση της μελέτης, ενώ παράλληλα θα πρέπει να οριοθετηθεί αυστηρά και το πλαίσιο εντός του οποίου θα διεξαχθεί η μελέτη από την οποία θα προκύψουν τα τελικά συμπεράσματα (Heijungs & Guinée, 2012).

Ο καθορισμός του στόχου της ΑΚΖ, προϋποθέτει τον καθορισμό συγκεκριμένων, βασικών πληροφοριών (Finnveden et al., 2009). Τα στοιχεία που θα πρέπει να έχουν καθοριστεί με το πέρας αυτού του σταδίου, όσον αφορά στο στόχο της ΑΚΖ, είναι:

- Ο λόγος για τον οποίο συντάσσεται η ανάλυση
- Το κοινό στο οποίο αυτή απευθύνεται
- Η εφαρμογή που θα έχουν τα αποτελέσματα αυτής

Η οριοθέτηση του στόχου μιας ΑΚΖ καθορίζει αν η χρήση των δεδομένων θα κοινοποιηθεί στους ενδιαφερόμενους, καθώς και αν τα δεδομένα που προκύπτουν θα δημοσιευτούν στο ευρύ κοινό ή αν θα χρησιμοποιηθούν ιδιωτικά σε μελέτες για συγκριτικούς σκοπούς (Taniolo et al., 2021).

Σύμφωνα με το πρότυπο ISO 14044, το σύνολο των δεδομένων που θα πρέπει να καθοριστούν στα πλαίσια του πεδίου εφαρμογής της ΑΚΖ είναι τα ακόλουθα:

- Το σύστημα ή συστήματα για το προϊόν που πρόκειται να μελετηθεί, όπου καθορίζονται οι συσχετίσεις (ροές, διαδικασίες) που απαιτούνται σε όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής.
- Η λειτουργία του εν λόγω συστήματος, όπου γίνεται σαφής ο σκοπός που εξυπηρετεί το εν λόγω προϊόν ή υπηρεσία.
- Τα όρια του συστήματος, τα οποία καθορίζουν το εύρος του υπό μελέτη συστήματος (πχ Cradle-to-Grave).
- Ο καθορισμός της λειτουργικής μονάδας (functional unit), η οποία εκφράζει τη λειτουργία του προϊόντος, παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα για εξίσωση και σύγκριση τυχόν ανισοτήτων.
- Η επιλογή των διαδικασιών σύμφωνα με τις οποίες πραγματοποιείται η κατανομή τυχόν περιβαλλοντικών επιπτώσεων μεταξύ των προϊόντων.
- Οι κατηγορίες επιπτώσεων που θα μελετηθούν και η μεθοδολογία/ες σύμφωνα με την/τις οποία/ες θα προκύψει η εκτίμηση και η ερμηνεία των όποιων επιπτώσεων.
- Τα δεδομένα που απαιτούνται για να είναι δυνατή η μοντελοποίηση της ΑΚΖ, καθώς και τυχόν επιπλέον απαιτήσεις ή περιορισμοί σχετικά με την ποιότητα αυτών (χρονική, γεωγραφική και τεχνολογική κάλυψη, πηγές δεδομένων, ακρίβεια και επάρκεια δεδομένων, συνοχή και αναπαραγωγιμότητα μεθόδων, αβεβαιότητα πληροφορίας).
- Οι υποθέσεις και οι παραδοχές που θα γίνουν σε περίπτωση που τα διαθέσιμα δεδομένα δεν είναι επαρκή.
- Τυχόν περιορισμοί που θα πρέπει να γίνουν αποδεκτοί με στόχο την ολοκλήρωση της ανάλυσης.

Οι βασικές κατηγορίες στις οποίες διακρίνονται τα όρια μελέτης ενός συστήματος είναι τρεις (Finnveden et al., 2009).

Η πρώτη από αυτές αφορά στην οριοθέτηση μεταξύ του συστήματος και του περιβάλλοντος. Στην περίπτωση που το υπό μελέτη σύστημα εξετάζει τον κύκλο ζωής από την αρχή παραγωγής του υλικού μέχρι και το τέλος ζωής του, η επιλογή των ορίων αναφέρεται ως Cradle (Παραγωγή) - to (έως) - Grave (Τελική Διάθεση). Υπάρχει, ωστόσο, και η δυνατότητα η μελέτη να περιοριστεί στα όρια ενός υποσυστήματος (πχ μια Μονάδας Επεξεργασίας Απορριμμάτων). Σε αυτή την περίπτωση τα όρια της μελέτης χαρακτηρίζονται ως Gate (πύλη)-to-Gate και η ΑΚΖ καλείται μερική. Αντίστοιχη είναι και η φιλοσοφία μοντελοποίησης λοιπών δυνατών περιπτώσεων (πχ Cradle-to-Gate, Cradle-to-Cradle).

Η δεύτερη δυνατή οριοθέτηση σχετίζεται μεταξύ σημαντικών και ασήμαντων διεργασιών. Η συγκεκριμένη επιλογή είναι αρκετά δύσκολη, καθώς δεν μπορεί να καθοριστεί εκ των προτέρων η σημασία μιας διεργασίας, ενώ, πολλές φορές, όταν για αυτή καθοριστούν τα σχετικά δεδομένα δεν υπάρχει κάποιος ουσιαστικός λόγος αυτά να παραληφθούν από τη συνολική μοντελοποίηση.

Τέλος, η τρίτη δυνατή κατηγορία επιλογής των ορίων μιας ΑΚΖ σχετίζεται με το συσχετισμό του υπό μελέτη συστήματος και άλλων σχετικών τεχνολογικών συστημάτων. Η περίπτωση αυτή είναι πιο σύνθετη και αφορά περιπτώσεις όπου η ΑΚΖ περιλαμβάνει πολύ-παραμετρικές διεργασίες που έχουν επίδραση σε περισσότερα του ενός συστήματα.

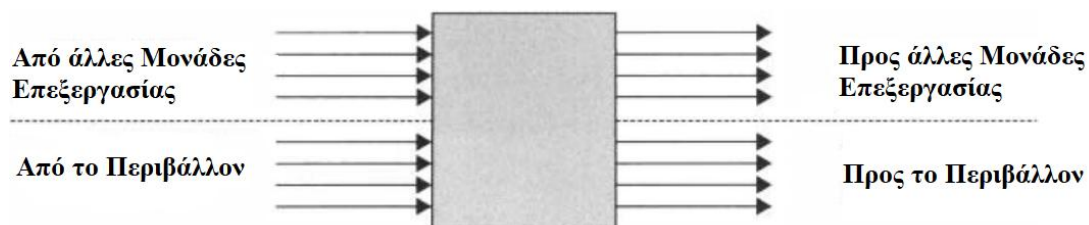
Η φιλοσοφία προσέγγισης μιας ΑΚΖ οδηγεί σε δύο διαφορετικές μεθοδολογίες ανάπτυξης, την Αναφορική ΑΚΖ (Attributional LCA) και την ΑΚΖ Συνεπειών (Consequential LCA). Η Αναφορική ΑΚΖ χαρακτηρίζεται από την προσπάθεια περιγραφής της φυσικής περιβαλλοντικής ροής από και προς τον κύκλο ζωής και τα σχετικά υποσυστήματα, θεωρώντας την αναπαράσταση του συστήματος ως στατική, διευρύνοντας τα σχετικά όρια ώστε να περιλαμβάνει, εκτός από τις άμεσες, και τυχόν έμμεσες επιπτώσεις. Η ΑΚΖ Συνεπειών διερευνά, κυρίως, πως οι σχετικές περιβαλλοντικές ροές δύνανται να επηρεαστούν από διαφορετικές επιλογές, θεωρώντας ότι οι επιλογές αυτές επιφέρουν δυναμικές αλλαγές στο σύστημα. Παράλληλα, η μελέτη επικεντρώνεται σε ροές του κύκλου ζωής οι οποίες είναι άμεσες. Η κύρια διαφορά των δύο εναλλακτικών αυτών προσεγγίσεων εντοπίζεται στη χρήση των δεδομένων, καθώς η Αναφορική ΑΚΖ κάνει, συνήθως, χρήση μέσων τιμών για τα δεδομένα εισόδου, ενώ στην ΑΚΖ Συνεπειών χρησιμοποιούνται κυρίως οριακά δεδομένα (Finnveden et al., 2009). Η συνήθης εφαρμογή ΑΚΖ αφορά κυρίως

Αναφορικές ΑΚΖ, με τη χρήση της ΑΚΖ Συνεπειών να εντοπίζεται σε πεπερασμένο αριθμό κειμένων, με χαρακτηριστικό παράδειγμα την έμμεση αλλαγή στη χρήση γης στα πλαίσια της Ευρωπαϊκής Οδηγίας 2018/2001, γνωστή και ως Renewable Energy Directive II (Sala et al., 2021).

#### 4.2.2 Απογραφή Δεδομένων Κύκλου Ζωής (LCI)

Μετά το πέρας του πρώτου σταδίου της ΑΚΖ ακολουθεί το στάδιο της απογραφής των απαιτούμενων δεδομένων ενός κύκλου ζωής (LCI). Σύμφωνα με τα το ISO 14040 διευκρινίζεται ότι το συγκεκριμένο στάδιο μιας ΑΚΖ περιλαμβάνει τη συγκέντρωση και ποσοτικοποίηση των απαιτούμενων δεδομένων εισόδου και εξόδου ενός προϊόντος στον υπό μελέτη Κύκλο Ζωής. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανωτέρω απογραφή σχετίζονται άμεσα με την επιλεγθείσα λειτουργική μονάδα.

Η LCI καθορίζεται από την επιλογή της Μονάδας Διεργασίας (Unit Process), η οποία, σύμφωνα με το ISO 14040, αποτελεί τη μικρότερη δυνατή μονάδα που μπορεί να εξεταστεί, για την οποία είναι δυνατή η ποσοτικοποίηση δεδομένων σχετικών με εισροές και εκροές του συστήματος. Η απεικόνιση μιας Μονάδας Διεργασίας παρατίθεται στο **Σχήμα 4.4**:



**Σχήμα 4.4** Απεικόνιση Μονάδας Διεργασίας [Επεξεργασία/Μορφοποίηση από: (Heijungs & Guinee, 2012)]

Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.4**, η Μονάδα Διεργασίας είναι ουσιαστικά ένα κλειστό σύστημα (black box), το οποίο δέχεται μια σειρά δεδομένων/στοιχείων εισόδου (πχ υλικά, υπηρεσίες, απόβλητα προς επεξεργασία, φυσικοί πόροι (πχ ορυκτά, χρήση γης, κλπ.), αποδίδοντας αντίστοιχα στοιχεία εξόδου, τα οποία δύναται να έχουν εναλλακτικές μορφές, όπως προϊόντα, απόβλητα προς περαιτέρω επεξεργασία και περιβαλλοντικά υπολείμματα (Heijungs & Guinee, 2012). Κατά την εφαρμογή του σταδίου της LCI, οι διεργασίες που σχετίζονται με τον κύκλο ζωής του προϊόντος, καθώς και οι λοιπές ενεργειακές ροές που σχετίζονται με αυτόν μοντελοποιούνται,

όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ως μια Μονάδα Διεργασίας, συσχετίζοντας παράλληλα τις όποιες επιδράσεις μπορεί να προκύψουν από και προς το περιβάλλον (Rebitzer et al., 2004). Τα βασικά δεδομένα που θα πρέπει να συλλεχθούν για τη διεξαγωγή μια ΑΚΖ είναι η κατανάλωση των απαιτούμενων υλικών (κύριων και δευτερευόντων), η κατανάλωση πόρων, όπως ενέργεια και νερό, οι χερσαίες, υδάτινες και αέριες εκπομπές προς το περιβάλλον και, τέλος, η παραγωγή ρύπων (Taniolo et al., 2021).

Ο τελικός στόχος της LCI είναι ο υπολογισμός των ποσοτήτων που απαιτούνται από διαφορετικές πηγές για το υπό μελέτη σύστημα στα όρια που αυτό διερευνάται, με παράλληλο καθορισμό των αποβλήτων και των εκπομπών που προκύπτουν προς το περιβάλλον, ανά λειτουργική μονάδα (Rebitzer et al., 2004).

#### 4.2.3 Αξιολόγηση Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής (LCIA)

Το τρίτο στάδιο στην εφαρμογή μιας ΑΚΖ, σύμφωνα με το ISO 14040 αφορά στην Αξιολόγηση Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής (LCIA), η οποία ορίζεται ως η φάση μιας ΑΚΖ που έχει ως επιδίωξη την καλύτερη κατανόηση του συστήματος που μελετάται, για τον κύκλο ζωής του προϊόντος, καθώς και την εκτίμηση και αξιολόγηση του μεγέθους και της σημασίας των επιπτώσεων που μπορεί να επιφέρει αυτό στο περιβάλλον.

Κύριος σκοπός του εν λόγω σταδίου είναι η παροχή χρήσιμων, πρόσθετων πληροφοριών για την καλύτερη διαχείριση των δεδομένων του προηγούμενου σταδίου (LCI), τα οποία είτε μπορεί να περιέχουν πολύ μεγάλο, δύσκολα διαχειρίσιμο όγκο πληροφορίας ή να απαιτούν εξειδικευμένες γνώσεις για την κατανόηση τους (Heijungs & Guinee, 2012).

Για την επίτευξη του συγκεκριμένου στόχου, τα δεδομένα που συλλέγονται στο στάδιο LCI μετατρέπονται σε κοινές μονάδες, ώστε να είναι δυνατή η συγκέντρωση αυτών σε αντίστοιχες κατηγορίες αξιολόγησης των συνεπειών προς το περιβάλλον. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατή η ερμηνεία των ενδεχόμενων περιβαλλοντικών επιπτώσεων εντός μια “Περιοχής Προστασίας” (“Area of Protection”) της LCIA (Finnveden et al., 2009).

Τα βασικά βήματα που ακολουθούνται κατά τη διάρκεια μια LCIA, είναι επιγραμματικά τα ακόλουθα (Pennington et al., 2004):

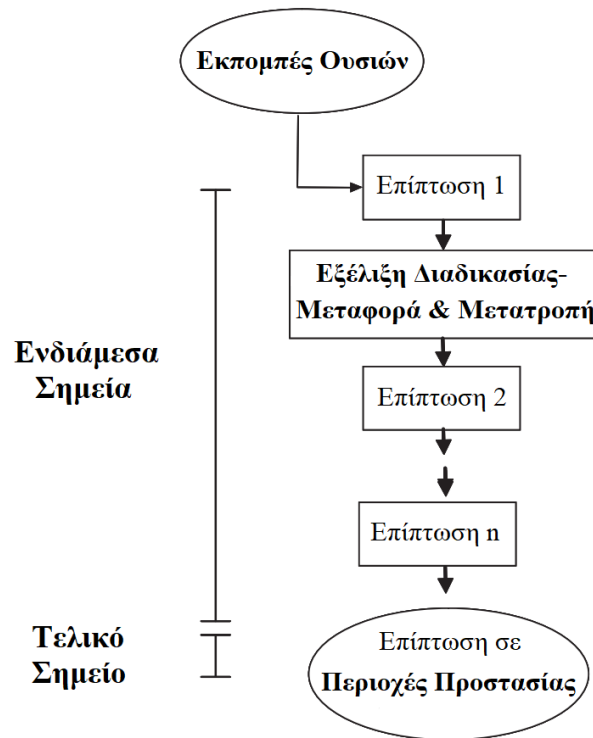
- i) Καθορισμός στοιχείων όπως κατηγορία επιπτώσεων (impact categories), δεικτών ανάλυσης (category indicators), μοντέλων χαρακτηρισμού (characterization models)

- ii) Κατηγοριοποίηση (Classification), κατά την οποία τα δεδομένα κατατάσσονται κατάλληλα σε αντίστοιχες κατηγορίες, σύμφωνα με τις επιπτώσεις που επιφέρουν
- iii) Χαρακτηρισμός (Characterization), όπου λαμβάνει χώρα ο υπολογισμός των δεικτών ανάλυσης χρησιμοποιώντας τελεστές χαρακτηρισμού (characterization factors)
- iv) Ομαλοποίηση (Normalization), κατά την οποία οι δείκτες ανάλυσης σχετίζονται με μια μονάδα αναφοράς
- v) Ομαδοποίηση (Grouping) αποτελεσμάτων
- vi) Αξιολόγηση (Weighing) αποτελεσμάτων (δεν επιτρέπεται στην περίπτωση που τα δεδομένα χρησιμοποιούνται σε συγκριτικές εκθέσεις που είναι προσβάσιμες στο κοινό)
- vii) Ανάλυση ποιότητας δεδομένων (Data quality analysis)

Για τη σωστή δόμηση μια LCIA τα βήματα (i) – (iii) και (vii) είναι υποχρεωτικά, ενώ τα βήματα (iv) – (vi) είναι προαιρετικά. Το ISO 14044 παραθέτει τα ανωτέρω βασικά βήματα για τη διεκπεραίωση μιας LCIA, χωρίς, ωστόσο, να υπεισέρχεται σε καθορισμό αναλυτικών μεθοδολογιών πραγματοποίησης για καθένα από αυτά. Για το λόγο αυτό ο χρήστης θα πρέπει να ανατρέξει σε σχετική βιβλιογραφία, η οποία έχει συνταχθεί για να καλύψει το σχετικό κενό (Finnveden et al., 2009).

Οι βασικότερες σχολές που έχουν αναπτυχθεί για την εφαρμογή μιας LCIA είναι δύο (Finnveden et al., 2009; Heijungs & Guinee, 2012). Η πρώτη ονομάζεται “προσέγγιση ενδιάμεσου σημείου” (midpoint approach), όπου ο δείκτης ανάλυσης επιλέγεται μεταξύ των εκπομπών και του τελικού σημείου των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η δεύτερη ονομάζεται “προσέγγιση τελικού σημείου” (endpoint approach) και λαμβάνει ως αρχική θεώρηση το ότι σκοπός της ΑΚΖ είναι ο εντοπισμός των όποιων συνεισφορών συντελούνται στους υπό μελέτη τομείς για τους οποίους εκτιμώνται οι σχετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Για το λόγο αυτό η μοντελοποίηση του χαρακτηρισμού θα πρέπει να περιλαμβάνει το σύνολο του περιβαλλοντικού μηχανισμού, καθώς οι υπό μελέτη τομείς εντοπίζονται στο τέλος (τελικό σημείο) αυτών (Finnveden et al., 2009; Heijungs & Guinee, 2012).

Μια σχηματική απεικόνιση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στα πλαίσια μια ΑΚΖ, με αναφορά στα ενδιάμεσα και τελικά όρια προσέγγισης, φαίνεται στο **Σχήμα 4.5**.



**Σχήμα 4.5** Απεικόνιση περιβαλλοντικών επιπτώσεων στα πλαίσια της ΑΚΖ [Επεξεργασία/Μορφοποίηση από: (Finnveden et al., 2009)]

Οι βασικότεροι περιβαλλοντικοί τομείς για τους οποίους εκτιμώνται οι σχετικές επιπτώσεις είναι οι ακόλουθες τρεις: Η ανθρώπινη υγεία, το φυσικό περιβάλλον και το ανθρωπογενές περιβάλλον (Pennington et al., 2004). Οι συγκεκριμένοι τομείς μπορούν να αναλυθούν σε περαιτέρω υποκατηγορίες ως ακολούθως (Heijungs & Guinee, 2012):

- Κλιματική αλλαγή (climate change)
- Μείωση στρατοσφαιρικού όζοντος (ozone layer depletion)
- Οξύτητα (acidification)
- Ευτροφισμός (eutrophication)
- Τοξικότητα στον άνθρωπο (human toxicity) (καρκινογόνες ουσίες, μη-καρκινογόνες ουσίες, επιπτώσεις στο αναπνευστικό, κλπ.)
- Οικοτοξικότητα (eco-toxicity) (υδατική, χερσαία και θαλάσσια τοξικότητα, κλπ.)
- Μείωση ενεργειακών πόρων (energy carriers depletion)
- Μείωση διαθέσιμων πόρων (material resources depletion)
- Επιπτώσεις από χρήση γη (land use impacts)
- Επιπτώσεις από χρήση νερού (water use impacts)

#### 4.2.4 Ερμηνεία Αποτελεσμάτων

Η τέταρτη και τελευταία φάση μιας ΑΚΖ, περιλαμβάνει την εξαγωγή συμπερασμάτων και προτεινόμενων δράσεων, σύμφωνα με τα αποτελέσματα των προηγούμενων δύο σταδίων, λαμβάνοντας ως αναφορά το σκοπό της μελέτης (Taniolo et al., 2021). Σε αυτή τη φάση εντοπίζονται σημαντικά ζητήματα που χρήζουν αναφοράς, αξιολογούνται τα παραγόμενα αποτελέσματα με εφαρμογή μιας σειράς ελέγχων (πχ έλεγχος πληρότητας, ευαισθησίας και συνέπειας), ελέγχεται η καταλληλότητα στοιχείων που έχουν καθοριστεί/επιλεγθεί στα προηγούμενα στάδια (πχ όρια συστήματος, λειτουργική μονάδα), καθορίζονται οι όποιοι περιορισμοί προκύπτουν από την αξιολόγηση της ποιότητας των δεδομένων και την ανάλυση ευαισθησίας, ενώ, τέλος, εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα και προτείνονται ενέργειες βελτιστοποίησης (Heijungs & Guinee, 2012).

Η ερμηνεία μιας ΑΚΖ μπορεί να πραγματοποιηθεί καθ' όλη τη διάρκεια εφαρμογής των σταδίων LCI και LCIA, αλλά και με την ολοκλήρωση αυτών (Rebitzer et al., 2004). Τόσο στο σχετικό ISO όσο και σε αντίστοιχα κείμενα οδηγούς, πέραν του ορισμού και ορισμένων βασικών κατευθύνσεων, δεν υπάρχει σαφής παράθεση λεπτομερειών σχετικά με τις ακριβείς ενέργειες και τα βήματα που θα πρέπει να εφαρμοστούν για την εξαγωγή του συνόλου των απαιτούμενων ερμηνειών.

Για το λόγο αυτό, για τη σωστή διεξαγωγή του εν λόγω σταδίου αναφέρονται δύο εναλλακτικές οδοί, η “διαδικαστική προσέγγιση” και η “αριθμητική προσέγγιση”. Η πρώτη από αυτές περιλαμβάνει το σύνολο των αναλύσεων που διαχειρίζονται δεδομένα και αποτελέσματα που σχετίζονται με άλλες πηγές πληροφοριών (πχ αναφορές παρόμοιων προϊόντων, κρίσεις από γνώστες του αντικειμένου, κλπ.). Η δεύτερη προσέγγιση διαχειρίζεται τα δεδομένα ως αλγορίθμους οι οποίοι παράγουν αριθμητικά δεδομένα σχετιζόμενα με δείκτες αξιοπιστίας, βασικά ζητήματα, ενδείξεις ευρωστίας του συστήματος, κλπ. Η πρώτη προσέγγιση αξιοποιεί ιστορικά δεδομένα με στόχο τη βέλτιστη απόφαση στα πλαίσια του τρέχοντος συστήματος, ενώ η δεύτερη προσέγγιση αξιοποιεί αριθμητικά τα δεδομένα που προκύπτουν, εφαρμόζοντας στατιστικές τεχνικές και λοιπές τεχνικές λήψης αποφάσεων. Για τη βέλτιστη τελική εξαγωγή συμπερασμάτων για όλη τη διάρκεια της υπό μελέτης ΑΚΖ, ενδέχεται να απαιτηθούν επαναληπτικές αναλύσεις προκειμένου να περιοριστούν οι όποιες αβεβαιότητες και να βελτιστοποιηθούν τα χρησιμοποιούμενα δεδομένα (Heijungs & Guinee, 2012).

### 4.3 Εφαρμογές και οφέλη χρήσης της ΑΚΖ

Η ΑΚΖ μπορεί να έχει θετική συνεισφορά στα πλαίσια μιας πολιτικής βιώσιμης ανάπτυξης και προστασίας του περιβάλλοντος, καθώς αποτελεί ένα εργαλείο αξιολόγησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, με παράλληλη καταγραφή των πραγματικών αναγκών και την παράθεση συμπερασμάτων και προτεινόμενων βελτιωτικών δράσεων (Sala et al., 2021).

Ορισμένες από τις βασικότερες εφαρμογές που μπορεί να έχει η ΑΚΖ φαίνονται στο **Σχήμα 4.3**. Οι βασικές αυτές εφαρμογές, με γνώμονα το περιβαλλοντικό αποτύπωμα, αφορούν κυρίως στην ανάπτυξη και την προώθηση ενός προϊόντος (βελτίωση στην παραγωγική διαδικασία, στρατηγικό πλάνο, ενημέρωση κοινού, προώθηση). Η ΑΚΖ εφαρμόζεται συνήθως στα αρχικά στάδια ανάπτυξης ενός προϊόντος με γνώμονα την επίτευξη της βελτιστοποίησης μετέπειτα σταδίων που σχετίζονται με λήψη αποφάσεων, αναβάθμιση των παραγωγικών διαδικασιών και προώθηση αυτού (Taniolo et al., 2021).

Στο βιομηχανικό τομέα, η ΑΚΖ εξυπηρετεί πέντε βασικούς σκοπούς:

- Διάθεση στοιχείων για υποστήριξη αποφάσεων στην ανάπτυξη του προϊόντος και των διαφόρων διαδικασιών που σχετίζονται με αυτό
- Προώθηση προϊόντος
- Καθορισμός δεικτών περιβαλλοντικής αξιολόγησης των επιπτώσεων του προϊόντος
- Καθορισμός και τελική επιλογή προμηθευτή
- Στρατηγικός Σχεδιασμός

Τέλος, η ΑΚΖ μπορεί να εφαρμοστεί από μια πληθώρα ενδιαφερόμενων μερών σε διαφορετικά επίπεδα δυνατότητας λήψης αποφάσεων και διακυβέρνησης. Αρχικά, η ΑΚΖ μπορεί να εφαρμοστεί σε επίπεδο μικρού μεγέθους βιομηχανικών εταιρειών με κύριο στόχο τη βελτίωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός παραγόμενου προϊόντος. Υπάρχει επίσης και η δυνατότητα εφαρμογής και σε μεγαλύτερου μεγέθους, πολυεθνικές εταιρείες, όπου οι κυριότερες προκλήσεις στην εφαρμογή της ΑΚΖ σχετίζονται με το βασικό στόχο για τον οποίο αυτή θα εφαρμόζεται, η μοντελοποίηση που θα ακολουθηθεί και οι επιλογές που θα πρέπει να γίνουν σχετικά με τις απαιτούμενες απλοποιήσεις, καθώς και η αξιολόγηση των τελεστών που σχετίζονται με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, οι οποίοι ασφαλώς και επηρεάζονται ανάλογα με τη θέση/χώρα όπου λαμβάνει χώρα η διεξαγωγή της ανάλυσης. Το ανώτερο

επίπεδο στο οποίο υπάρχει η δυνατότητα να εφαρμοστεί η ΑΚΖ, αφορά στη λήψη αποφάσεων σε επίπεδο διακυβέρνησης χωρών ή εθνών, όπου η διεξαγωγή μιας σχετικής ανάλυσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αξιολογήσεις σε επίπεδα γενικότερης βιώσιμης ανάπτυξης, οδηγώντας στη λήψη αποφάσεων και τον καθορισμό νομοθετημάτων και οδηγιών με γενικότερο στόχο την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και τη διατήρηση της αειφορίας (Rebitzer et al., 2004).

#### 4.4 Προκλήσεις και Περιορισμοί εφαρμογής της ΑΚΖ

Η ΑΚΖ είναι μια διεθνώς αναγνωρισμένη μέθοδος με σημαντική συνεισφορά στην διατήρηση της αειφορίας και τον περιορισμό τυχόν αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Ωστόσο, η επιτυχία της εφαρμογής της περιορίζεται συχνά από ορισμένες προκλήσεις και περιορισμούς που συναντώνται κατά την ανάπτυξη και χρήση της (Taniolo et al., 2021).

Οι πιο σημαντικές προκλήσεις που σχετίζονται με την ΑΚΖ αφορούν κυρίως στην πολυπλοκότητα που ενδέχεται να παρουσιάσουν μεγάλου μεγέθους συστήματα, καθώς και η διαθεσιμότητα και η ποιότητα των απαιτούμενων δεδομένων. Η πολυπλοκότητα μπορεί να σχετίζεται με θέματα όπως η σωστή μοντελοποίηση των διαθέσιμων δεδομένων (τύπος δεδομένων, διαδικασίες αντιστοίχισης, κατανόηση ονοματολογίας ροών και περιβαλλοντικών συσχετίσεων), η σωστή επιλογή μεθοδολογίας (Αναφορική ή Συνεπειών), αλλά και η σωστή ερμηνεία των αποτελεσμάτων που προκύπτουν, τα οποία πολλές φορές απαιτούν εξειδικευμένες γνώσεις για τη σωστή κατανόηση και ερμηνεία τους. Όσον αφορά τη διαθεσιμότητα των δεδομένων, η σωστή απογραφή αποτελεί μια από τις πλέον απαιτητικές και χρονοβόρες διαδικασίες, καθώς σε περίπτωση ανεπαρκών πρωτογενών δεδομένων (η συλλογή των οποίων απαιτεί από μόνη της σημαντικό χρόνο) απαιτείται η ενδεδειγμένη έρευνα για εύρεση των βέλτιστων απαραίτητων στοιχείων σε μια σειρά διαθέσιμων βιβλιοθηκών (δημόσιες, από σχετικά βιομηχανικά αρχεία, από λογισμικά μοντελοποίησης ΑΚΖ, κλπ.) (Finnveden et al., 2009).

Εκτός από τις προκλήσεις που προκύπτουν κατά την εφαρμογή της ΑΚΖ, η εφαρμογή της ΑΚΖ περιορίζεται αρκετές φορές από συγκεκριμένους παράγοντες. Κατά τη διάρκεια εφαρμογής μια ΑΚΖ τα δεδομένα που αξιοποιούνται είναι ως επί το πλείστον μέσες τιμές, με αποτέλεσμα να μην λαμβάνονται υπόψη και να αξιολογούνται τυχόν ακραίες τιμές. Επίσης, η μέθοδος εστιάζει στην αξιολογική σύγκριση μεταξύ

εναλλακτικών περιπτώσεων/συστημάτων, χωρίς ωστόσο να είναι δυνατή η αξιολόγηση της βιωσιμότητας του υπό μελέτη προϊόντος. Ο σημαντικότερος, ωστόσο, περιορισμός της ΑΚΖ αφορά στην αβεβαιότητα που την χαρακτηρίζει. Η παντελής εξάλειψη της αβεβαιότητας δεν είναι σχεδόν ποτέ δυνατή σε πιο σύνθετα συστήματα, με αποτέλεσμα η βασική ερώτηση που χρήζει απάντησης για να είναι αποδεκτή η μοντελοποίηση της ΑΚΖ, είναι ποιο είναι το ποσοστό της αβεβαιότητας που κρίνεται ως αποδεκτό (Taniolo et al., 2021).

Σε κάθε περίπτωση, παρά τις όποιες δυσκολίες και περιορισμούς αναφέρθηκαν παραπάνω, η ΑΚΖ θεωρείται ένα από τα σημαντικότερα εργαλεία αξιολόγησης / εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Για τον λόγο αυτό, η συνεχής εξέλιξη και βελτίωσή της υποστηρίζεται μέσω της ανάπτυξης νέων μεθοδολογικών προσεγγίσεων, της ενσωμάτωσης πρόσθετων χαρακτηριστικών και της δημοσίευσης νέων ερευνητικών εργασιών που στοχεύουν στην περαιτέρω βελτίωση της ακρίβειας, της αξιοπιστίας και της εφαρμοσιμότητας της μεθόδου σε ολοένα και πιο σύνθετα συστήματα

## 5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΚΖ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΚΑΙ ΜΟΝΑΔΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΣΑ

### 5.1 Εφαρμογή ΑΚΖ στο γενικότερο πλαίσιο της Διαχείρισης ΑΣΑ

Οι κατευθυντήριες οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης σχετικά με το περιβάλλον οδήγησαν, από το 2005 και μετά, σε σημαντική αύξηση των εφαρμογών της ΑΚΖ στον τομέα της διαχείρισης των στερεών αποβλήτων. Αρχικά οι μελέτες ΑΚΖ που σχετίζονταν με διαχείριση ΑΣΑ προέρχονταν κυρίως από ανεπτυγμένες χώρες, γεγονός που άλλαξε με το πέρασμα των χρόνων, καθώς ακόμα και οι λιγότερο ανεπτυγμένες χώρες εφάρμοσαν παρόμοιες μελέτες με στόχο τον καθορισμό των βέλτιστων τεχνικών διαχείρισης των αποβλήτων τους. Χαρακτηριστικά, το 2020 η Κίνα κατείχε την πρώτη θέση σε σχετικές μελέτες ΑΚΖ παγκοσμίως, ενώ χώρες όπως το Ιράν και η Βραζιλία είχαν, αντίστοιχα, σημαντικό αριθμό αντίστοιχων μελετών (Zhang et al., 2021). Καθώς τα 4 βασικά στάδια ανάπτυξης της ΑΚΖ και οι γενικές πληροφορίες που σχετίζονται με αυτά αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, στην παρούσα ενότητα θα αναλυθούν ορισμένα χαρακτηριστικά στοιχεία που σχετίζονται με την εφαρμογή της ΑΚΖ σε συστήματα διαχείρισης ΑΣΑ.

Ο βασικοί στόχοι (goals) που τίθενται κατά την εφαρμογή της ΑΚΖ σε συστήματα επεξεργασίας ΑΣΑ είναι η εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων συγκεκριμένων διεργασιών/τεχνολογιών ή συνδυασμού αυτών, η σύγκριση εναλλακτικών τεχνολογιών διαχείρισης και ο καθορισμός δυνατών αναβαθμίσεων που μπορεί να εφαρμοστούν σε συγκεκριμένες διεργασίες, με στόχο την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων στο περιβάλλον. Ποσοστιαία, ο συνηθέστερος τύπος δημοσιευμένων επιστημονικών άρθρων σχετίζεται με τη σύγκριση εναλλακτικών τεχνολογιών, με την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων συγκεκριμένων διεργασιών να ακολουθεί (Zhang et al., 2021).

Μετά το σαφή καθορισμό του στόχου της εφαρμογής της ΑΚΖ σε ένα τέτοιο σύστημα, για να καθοριστεί σωστά το πεδίο εφαρμογής (scope) θα πρέπει, απαραίτητως, να διευκρινιστούν τα ακόλουθα (Hauschild & Barlaz, 2011):

- Ποιο το ακριβές αντικείμενο της μελέτης και ποια η λειτουργική μονάδα που θα επιλεγεί; (Study Object – Functional Unit)
- Ποια τα ακριβή όρια του υπό μελέτη συστήματος; Υπάρχει αλληλεπίδραση πέραν των συγκεκριμένων ορίων με άλλα συστήματα; (System Boundaries)

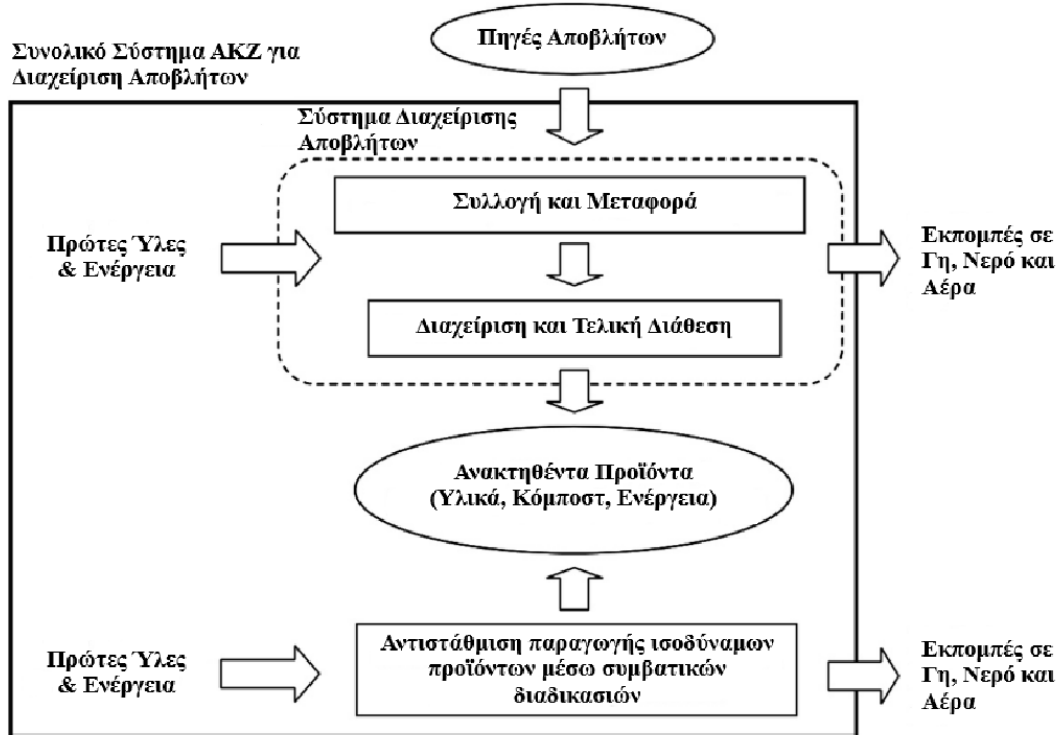
- Ποια κριτήρια αξιολόγησης θα εφαρμοστούν για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων; (Assessment Criteria)
- Ποια ή ακριβής χρονική κλίμακα της μελέτης; (Time Scale)
- Ποιες τεχνολογίες θα εφαρμοστούν και πως σχετίζονται με τις διάφορες διεργασίες; (Technologies - Processes)
- Πως γίνεται η κατανομή διεργασιών που σχετίζονται με περισσότερα του ενός συστήματα; (Processes Allocation)

Η επιλογή της λειτουργικής μονάδας είναι πρωτεύουσας σημασίας για τη σωστή διεξαγωγή της ΑΚΖ. Σε συστήματα επεξεργασίας ΑΣΑ, οι τέσσερις κυριότερες εναλλακτικές για την επιλογή της λειτουργικής μονάδας αφορούν σε (Iqbal et al., 2020):

- Συγκεκριμένη μονάδα (unit based) (πχ 1 t ΑΣΑ)
- Παραγόμενη ποσότητα (generation based) (πχ ποσότητα ΑΣΑ από μια κοινότητα, παραγόμενη σε συγκεκριμένη χρονική περίοδο)
- Εισερχόμενη ποσότητα αποβλήτων (input based) (πχ εισερχόμενη ποσότητα ΑΣΑ σε μια ΜΕΑ)
- Εξερχόμενη ποσότητα ενός συγκεκριμένου προϊόντος (output based) (πχ παραχθείσα ενέργεια)

Ο πλέον χρησιμοποιούμενος τύπος λειτουργικής μονάδας κατά την εφαρμογή της ΑΚΖ σε συστήματα ΑΣΑ είναι η «συγκεκριμένη μονάδα», η οποία βασίζεται σε δεδομένη ποσότητα αποβλήτων (πχ 1 t ΑΣΑ). Σημαντικός είναι και ο αριθμός των επιστημονικών άρθρων στα οποία η λειτουργική μονάδα βασίζεται σε «παραγόμενη ποσότητα» αποβλήτων (Nurzhan et al., 2025; Zhang et al., 2021).

Τα όρια ενός συστήματος διαχείρισης αποβλήτων, σύμφωνα με τους (Bjorklund et al., 2011), απεικονίζονται στο **Σχήμα 5.1**. Όπως φαίνεται από το στο συγκεκριμένο σχήμα, τα όρια δύνανται να περιλαμβάνουν το σύνολο των σταδίων ενός ολοκληρωμένου συστήματος διαχείρισης ΑΣΑ, ενώ σε περίπτωση που κάποιο από τα στάδια αυτά παραληφθεί θα πρέπει να υπάρχει σαφής επεξήγηση για τους λόγους της συγκεκριμένης επιλογής (Iqbal et al., 2020). Κατά τον καθορισμό των ορίων ενός συστήματος ΑΣΑ ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στα όρια που αφορούν την ανακύκλωση, δεδομένου ότι υπάρχει μια θεωρητικά αέναη (open-loop) δυνατότητα αξιοποίησης των εν λόγω υλικών, καθώς και στην αξιοποίηση των παραγόμενων προϊόντων (πχ SRF προς καύση) (Bjorklund et al., 2011).



**Σχήμα 5.1** Όρια συστήματος εφαρμογής ΑΚΖ στη Διαχείριση Αποβλήτων [Επεξεργασία/Μορφοποίηση από: (Bjorklund et al., 2011)]

Ο καθορισμός των ορίων μελέτης ενός συστήματος διαχείρισης ΑΣΑ διαφοροποιείται συνήθως με τη συμπερίληψη ή όχι των ακόλουθων: (i) Σύστημα Συλλογής και Μεταφοράς, (ii) Διαχείριση παραγόμενων προϊόντων (πχ ανακυκλώσιμα υλικά, ενέργεια) και υπολειμμάτων (Iqbal et al., 2020).

Ο σαφής καθορισμός συγκεκριμένων κριτηρίων αξιολόγησης εξασφαλίζει ορθότερη συλλογή δεδομένων στα περαιτέρω στάδια της ΑΚΖ (Hauschild & Barlaz, 2011).

Ορισμένα από τα σημαντικότερα κριτήρια αξιολόγησης που εφαρμόζονται σε συστήματα διαχείρισης ΑΣΑ, σύμφωνα με τους (Iqbal et al., 2020), παρατίθενται στον

**Πίνακα 5.1:**

**Πίνακας 5.1 Κριτήρια αξιολόγησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων κατά την εφαρμογή ΑΚΖ σε συστήματα διαχείρισης ΑΣΑ [Πηγή: (Iqbal et al., 2020)]**

Κατηγορίες Επιπτώσεων	Συντομογραφία	Πεδίο Εφαρμογής	Μονάδα Αναφοράς
<i>Κατηγορίες που δε σχετίζονται με τοξικότητα</i>			
Υπερθέρμανσης του πλανήτη (Global Warming)	GWP	Παγκόσμια	Kg CO <sub>2</sub> -eq
Φωτοχημικός Σχημ. Όζοντος (οξειδωση) (Photo-chemical Ozone formation (oxidation))	POFP	Τοπική	Kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq
Μείωση Στρατοσφ. Στρώματος Όζοντος (Stratospheric Ozone Depletion)	SODP	Παγκόσμια	Kg CFC-11-eq
Οξύτητα (Acidification)	AP	Τοπική	Kg SO <sub>2</sub> -eq
Ευτροφισμός (Eutrophication)	EP	Τοπική	Kg PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> -eq
Εξάντληση Αβιοτικών Πόρων (Ορ. Καύσιμα) (Abiotic-resource Depletion (Fossil))	NEP	Τοπική	MJ-primary-eq
Εξάντληση Αβιοτικών Πόρων (Στοιχεία) (Abiotic-resource Depletion (elements))	ADP	Παγκόσμια	Kg-Sb-eq
<i>Κατηγορίες που σχετίζονται με τοξικότητα</i>			
Οικοτοξικότητα στο Έδαφος (Eco-toxicity in Soil)	ETs	Τοπική	m <sup>3</sup> -soil ή kg 1,4-DB-eq
Οικοτοξικότητα στο Νερό (χρόνια) (Eco-toxicity in Water Chronic)	ETwc	Τοπική	m <sup>3</sup> -water ή kg 1,4-DB-eq
Ανθρώπινη τοξικότητα μέσω Εδάφους (Human-Toxicity via Soil)	HTs	Τοπική	m <sup>3</sup> -soil ή kg 1,4-DB-eq
Ανθρώπινη τοξικότητα μέσω Νερού (Human-Toxicity via Water)	HTw	Τοπική	m <sup>3</sup> -water ή kg 1,4-DB-eq
Ανθρώπινη τοξικότητα μέσω Αέρα (Human-Toxicity via Air)	HTa	Τοπική	m <sup>3</sup> -air ή kg 1,4-DB-eq

Όσων αφορά τις κατηγορίες επιπτώσεων που αξιολογούνται στα σχετικά άρθρα, η πλέον χρησιμοποιούμενη είναι αυτή που σχετίζεται με την αλλαγή του παγκόσμιου κλίματος (GWP). Λοιπές γνωστές κατηγορίες που ελέγχονται είναι η Οξύτητα (AP), ο

Ευτροφισμός (EP) και οι πιθανές τοξικές επιπτώσεις στον άνθρωπο (HTP) (Iqbal et al., 2020; Zhang et al., 2021).

Η σωστή επιλογή του χρονικού εύρους διεξαγωγής μια ΑΚΖ είναι σημαντική, καθώς, ιδίως στην περίπτωση των ΑΣΑ, αρκετές επιπτώσεις ενός συστήματος στο περιβάλλον ενδέχεται να παρουσιαστούν αρκετά χρόνια μετά την αρχική εφαρμογή αυτού (Hauschild & Barlaz, 2011). Χαρακτηριστικό παράδειγμα, σύμφωνα με τους (Bjorklund et al., 2011), αποτελούν οι ΧΥΤ, οι επιπτώσεις των οποίων στο περιβάλλον (πχ παραγόμενο βιοαέριο, παραγόμενα στραγγίδια) συνεχίζουν να υφίστανται για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα μετά το πέρας της τελικής ταφής των αποβλήτων.

Ο καθορισμός των χρησιμοποιούμενων τεχνολογιών, στην περίπτωση που η μελέτη δεν αφορά ένα πραγματικό σύστημα, περιλαμβάνει εν πολλοίς τον προσδιορισμό της βέλτιστης δυνατής τεχνολογίας που, προφανώς, σχετίζεται και με ελαχιστοποίηση των συνεπακόλουθων περιβαλλοντικών επιπτώσεων της. Στην περίπτωση που το σύστημα είναι πραγματικό ή αυστηρά ορισμένο, το συγκεκριμένο βήμα αφορά κυρίως στον καθορισμό των τεχνολογιών που βρίσκονται μεν εκτός των ορίων του υπό μελέτη συστήματος, επηρεάζουν δε τη λειτουργία και τα χαρακτηριστικά αυτού (πχ διεργασίες επεξεργασίας παραγόμενων ανακυκλώσιμων υλικών) (Hauschild & Barlaz, 2011). Σύμφωνα με δημοσιευμένα άρθρα, για τη βελτιστοποίηση της επεξεργασίας των ΑΣΑ στα πλαίσια της ΑΚΖ, ως βέλτιστη επιλογή ενδείκνυται η εφαρμογή Ολοκληρωμένων Συστημάτων Διαχείρισης Αποβλήτων (ΟΣΔΑ), τα οποία συνδυάζουν δύο ή περισσότερες τεχνολογίες (πχ συνδυασμός καύσης-ταφής, μηχανικής επεξεργασίας-βιολογικής επεξεργασίας-ταφής, κλπ.) (Iqbal et al., 2020; Zhang et al., 2021). Ωστόσο, η συγκεκριμένη δυνατότητα φαίνεται να είναι εφαρμόσιμη κυρίως σε χώρες υψηλού εισοδήματος, καθώς στις αναπτυσσόμενες χώρες μεγάλος αριθμός μελετών αφορούν εφαρμογές μόνο μίας τεχνολογίας. Σε αυτές η ταφή αποτελεί τη συνηθέστερη επιλογή, ενώ σε χώρες χαμηλού εισοδήματος, όπως η Ινδία και το Πακιστάν διερευνάται ως βασική επιλογή ακόμα και η ανεξέλεγκτη απόρριψη, οι οποία, ως γνωστόν, έχει εξαιρετικά επιβαρυντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Iqbal et al., 2020; Zhang et al., 2021).

Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας αφορά στη μοντελοποίηση των επιπτώσεων του βιοτικού διοξειδίου του άνθρακα ( $CO_2\text{-bio}$ ), το οποίο παράγεται από διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά την διαχείριση των ΑΣΑ (πχ καύση πλαστικού, βιολογική επεξεργασία οργανικών αποβλήτων). Σε αρκετές περιπτώσεις οι σχετικές

περιβαλλοντικές επιπτώσεις λαμβάνονται ως μηδενικές. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αφορά στη δυνατότητα των ΧΥΤ να λειτουργήσουν ως «δεξαμενές άνθρακα» (carbon sinks). Όταν η ΑΚΖ εφαρμόζεται για πεπερασμένο χρονικό διάστημα, η θεώρηση μηδενικών επιπτώσεων του CO<sub>2-bio</sub> οδηγεί σε υποεκτίμηση των πλεονεκτημάτων που εξασφαλίζει η ταφή. Για το λόγο αυτό κατά τη διάρκεια των πρώτων σταδίων ανάπτυξης της ΑΚΖ θα πρέπει να γίνουν οι κατάλληλες θεωρήσεις για να αποφευχθούν τυχόν αντίστοιχες παραλήψεις (Bjorklund et al., 2011).

Τέλος, καθώς σε ένα σύστημα επεξεργασίας αποβλήτων οι εξερχόμενες ροές δεν περιορίζονται μόνο σε απόβλητα προς τελική διάθεση, αλλά δύναται να αποδώσουν τόσο χρήσιμα υλικά, όσο και ενέργεια, ένα σημαντικό θέμα που σχετίζεται με τη σωστή μοντελοποίηση στα πλαίσια της ΑΚΖ αφορά στη βέλτιστη κατανομή και αντιστοίχιση των ανωτέρω παραγόμενων ρευμάτων με τις διεργασίες ή τα υλικά από τα οποία αυτά προέρχονται (Hauschild & Barlaz, 2011). Για παράδειγμα, στην περίπτωση μια διεργασίας καύσης υλικών διαφορετικής προέλευσης και σύστασης, οι εξερχόμενες τελικές ροές είναι τόσο οι εκπομπές/καυσαέρια, τα οποία έχουν αρνητικό πρόσημο λόγω της επιβάρυνσης που επιφέρουν στο περιβάλλον, όσο και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία έχει θετικό πρόσημο καθώς μπορεί να αξιοποιηθεί (Bjorklund et al., 2011). Η δυσκολία στη μοντελοποίηση του συγκεκριμένου παραδείγματος αφορά στη σωστή αντιστοίχιση των συνολικά παραγόμενων ποσοτήτων εκπομπών και ηλεκτρικής ενέργειας στα επιμέρους υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ως εισερχόμενο ρεύμα στη διεργασία της καύσης.

Τα περαιτέρω βήματα (LCI, LCIA, ερμηνεία αποτελεσμάτων) για την εφαρμογή της ΑΚΖ σε συστήματα ΑΣΑ εξελίσσονται βάσει των όσων καθορίζουν τα σχετικά πρότυπα, σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια.

## 5.2 Εφαρμογή ΑΚΖ σε Μονάδες Επεξεργασίας Απορριμμάτων

Η ΑΚΖ έχει εφαρμοστεί σε μεγάλο αριθμό επιστημονικών μελετών που σχετίζονται με διαχείριση αποβλήτων τα οποία περιλαμβάνουν και επεξεργασία σε ΜΕΑ. Ένας σημαντικός αριθμός άρθρων αφορά σύγκριση εναλλακτικών μεθόδων διαχείρισης αποβλήτων, με τα όρια του συστήματος να καλύπτουν το σύνολο των σχετικών σταδίων (συλλογή, μεταφορά, επεξεργασία, τελική διάθεση, κλπ.).

Ενδεικτικά, οι (Koci & Trecakova, 2011) εφάρμοσαν την ΑΚΖ για τη σύγκριση επτά εναλλακτικών μεθόδων διαχείρισης αποβλήτων (Αποτέφρωση με/χωρίς ανάκτηση

σκωρίας, ταφή με καύση παραγόμενου βιοαερίου, ταφή με ανάκτηση και αξιοποίηση βιοαερίου, ΜΕΑ με αερόβια διεργασία, βιοζήρανση και αποτέφρωση παραγόμενου καυσίμου RDF, βιοζήρανση και αποτέφρωση καυσίμου RDF προερχόμενου από μία πηγή), επιλέγοντας ως λειτουργική μονάδα 1 t ΑΣΑ. Ως συμπέρασμα παρατηρήθηκε ότι η πλέον επιβαρυντική μέθοδος για το περιβάλλον είναι η ταφή χωρίς ενεργειακή αξιοποίηση του παραγόμενου βιοαερίου, ενώ οι πιο φιλικές επεξεργασίες είναι αυτές που περιλαμβάνουν βιοζήρανση και αποτέφρωση του RDF.

Αντίστοιχες συγκρίσεις πραγματοποίησαν οι (Fiorentino et al., 2015) (ταφή με ενεργειακή ανάκτηση, ΜΕΑ σε συνδυασμό με καύση, συνδυασμός διαδικασίας ΜΕΑ/βιώσιμων συστημάτων προηγμένης ανάκτησης υλικών (MARSS) και ταφής, συνδυασμός ΜΕΑ/ MARSS και καύσης), ο (Grzesik, 2018) (αποτέφρωση, ΜΕΑ με ταφή παραγόμενου RDF, ΜΕΑ με ενεργειακή αξιοποίηση RDF για την πόλη της Κρακοβίας στην Πολωνία) και οι (Fei et al., 2018) (ταφή με αξιοποίηση βιοαερίου για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και φυσικού αερίου αντίστοιχα, καύση, ΜΕΑ με αναερόβια χώνευση με αξιοποίηση βιοαερίου για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και φυσικού αερίου αντίστοιχα με δεδομένα για την Κίνα) εξάγοντας ανάλογα συμπεράσματα.

Εκτός από σύγκριση εναλλακτικών μεθόδων διαχείρισης αποβλήτων, αρκετά άρθρα εφαρμόζουν την ΑΚΖ προκειμένου να αξιολογήσουν της περιβαλλοντικές επιπτώσεις ενός συγκεκριμένου ολοκληρωμένου συστήματος διαχείρισης αποβλήτων, το οποίο περιλαμβάνει ως στάδιο και την επεξεργασία σε ΜΕΑ. Ενδεικτικά, οι (Grzesik & Malinowski, 2017) μελέτησαν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε μια πραγματική ΜΕΑ (ιδιοκτησίας της εταιρείας MIKI Recykling Ltd, στην Επαρχία Μαλόπολσκα της Πολωνίας), με δεδομένα λειτουργίας για το έτος 2015. Αντίστοιχα, οι (Kossakowska & Grzesik, 2019) εκτίμησαν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις μιας ΜΕΑ στην περιοχή Ρίμπνικ της Πολωνίας, κατηγοριοποιώντας παράλληλα αυτές ανά στάδιο επεξεργασίας των ΑΣΑ (πχ μεταφορά, επεξεργασία σε ΜΕΑ, ταφή, κλπ.). Και στις δύο ανωτέρω περιπτώσεις για τη μοντελοποίηση της ΑΚΖ έγινε χρήση του μοντέλου EASETECH.

Μια εναλλακτική φιλοσοφία εφαρμογής της ΑΚΖ σε συστήματα διαχείρισης που εμπειρεύουν επεξεργασία σε ΜΕΑ παρουσίασαν οι (Chazirakis et al., 2023), οι οποίοι εστίασαν περισσότερο στα αρχικά στάδια της διαλογής των ΑΣΑ, στην περιοχή του Νομού Χανίων, στην Κρήτη. Συγκεκριμένα, διερευνήθηκαν τρία σενάρια, (α) συλλογή ΑΣΑ σε πράσινο κάδο και μεταφορά σε ΜΕΑ για περαιτέρω επεξεργασία, (β)

προσθήκη καφέ κάδου για διακριτή συλλογή βιοαποβλήτων και μεταφορά σε ΜΕΑ για περαιτέρω επεξεργασία ως διακριτό ρεύμα και, τέλος, (γ) προσθήκη, επιπλέον του καφέ κάδου, και διακριτής συλλογής ανακυκλώσιμων υλικών πριν το στάδιο της μεταφοράς προς περαιτέρω επεξεργασία στη ΜΕΑ. Τα όρια της ΑΚΖ που εφαρμόστηκαν περιλάμβαναν τη συλλογή και μεταφορά προς επεξεργασία σε ΜΕΑ, καθώς και την τελική ταφή σε ΧΥΤ. Η μηχανική διαλογή της συγκεκριμένης ΜΕΑ έχει τη δυνατότητα διαχείρισης τόσο ΑΣΑ, όσο και διαχωρισμένων ανακυκλώσιμων υλικών σε διακριτές βάρδιες, ενώ η βιολογική επεξεργασία περιλαμβάνει κομποστοποίηση σε κατάλληλες δεξαμενές. Η εφαρμογή αφορούσε ΑΚΖ συνεπειών και ως λειτουργική μονάδα ορίστηκε ο 1t ΑΣΑ, ενώ για τη διενέργεια της ΑΚΖ επιλέχθηκε προσέγγιση μηδενικής επιβάρυνσης. Ως συμπέρασμα της μελέτης επιβεβαιώθηκε το περιβαλλοντικό πλεονέκτημα που εξασφαλίζεται με το τρίτο σενάριο (διαχωρισμός ανακυκλώσιμων και ξεχωριστή συλλογή βιοαποβλήτων σε καφέ κάδο).

Εκτός από τις παραπάνω εναλλακτικές, όπου τα όρια της ΑΚΖ εκτείνονται στο σύνολο των σταδίων ενός ολοκληρωμένου συστήματος διαχείρισης αποβλήτων, υπάρχει και η δυνατότητα τα όρια αυτά να εστιάσουν κυρίως στο σύστημα επεξεργασίας, παραλείποντας τα πρότερα συστήματα διαλογής και μεταφοράς. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται, σε σημαντικό βαθμό, η ελαχιστοποίηση του βαθμού πολυπλοκότητας σε σχέση με ένα ολοκληρωμένο σύστημα, ενώ, παράλληλα, επιτυγχάνεται η επικέντρωση στη λειτουργία της μονάδας, εξασφαλίζοντας έτσι τη δυνατότητα για καλύτερες συγκρίσεις μεταξύ εναλλακτικών μεθόδων διαχείρισης. Ακόμη, περιορίζοντας τη μελέτη στο όρια μια λειτουργικής μονάδας εξασφαλίζεται η δυνατότητα λήψης και αξιοποίησης πραγματικών δεδομένων, τα οποία κατά κανόνα αποδίδουν, αντίστοιχα, καλύτερα και πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Τέλος, η περιορισμένη πολυπλοκότητα διασφαλίζει, προφανώς, περιορισμό στο απαιτούμενο κόστος και ελαχιστοποίηση στο χρόνο διεκπεραίωσης μιας μελέτης αυτού του είδους. Διερευνώντας για εφαρμογές ΑΚΖ όπου τα όρια περιορίζονται αυστηρά στα όρια μιας ΜΕΑ (gate-to-gate) ή τα όρια αυτά επεκτείνονται ελαφρώς για συμπερίληψη και των διαδικασιών που ακολουθούν της εξόδου από τη ΜΕΑ (gate-to-grave), παρατηρείται ότι τα σχετικά κείμενα την τελευταία δεκαετία είναι αρκετά περιορισμένα (Grzesik & Malinowski, 2017; Kossakowska & Grzesik, 2019).

Οι (Abeliotis et al., 2012) εφάρμοσαν την ΑΚΖ στα όρια της ΜΕΑ Άνω Λιοσίων (προσέγγιση gate-to-gate), στο Νομό Αττικής της Ελλάδας. Στο άρθρο τους εκτίμησαν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της συγκεκριμένης μονάδας, ενώ παράλληλα συνέκριναν τη λειτουργία αυτής με την εφαρμογή απευθείας ταφής, καθώς και εναλλακτικά σενάρια διαχείρισης των τελικών προϊόντων (πχ ανακυκλώσιμα υλικά, δευτερογενές καύσιμο/RDF) και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις αυτών. Στα πλαίσια της μελέτης, η οποία εκτελέστηκε με το λογισμικό SimaPro 5.1, συγκρίθηκαν πέντε εναλλακτικά σενάρια (απευθείας ταφή ΑΣΑ χωρίς επεξεργασία, επεξεργασία ΑΣΑ σε ΜΕΑ, λειτουργία ΜΕΑ και 100% αξιοποίηση παραγόμενου RDF, λειτουργία ΜΕΑ και αξιοποίηση σε ποσοστό 55% του παραγόμενου RDF στην τσιμεντοβιομηχανία, και, τέλος, πλήρης αξιοποίηση ανακυκλώσιμων υλικών σιδήρου και αλουμινίου, κομπόστ και RDF). Η λειτουργική μονάδα που επιλέχθηκε ήταν η συνολική εισερχόμενη ποσότητα ΑΣΑ για το έτος 2008 (251.859 t/έτος), ενώ ο χρονικός ορίζοντας για τον οποίο λήφθηκαν υπόψη οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των διαφόρων εκπομπών προς το περιβάλλον ήταν τα 100 χρόνια. Κατά τη μοντελοποίηση της ΑΚΖ, τα δεδομένα που θεωρήθηκαν ως εισερχόμενα στα όρια της ΜΕΑ περιλάμβαναν τα ΑΣΑ, την παροχή νερού, την καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια, τις χημικές ουσίες και, τέλος, τα καύσιμα για τις μετακινήσεις οχημάτων εντός της μονάδας. Αντίστοιχα, ως εξερχόμενα στοιχεία θεωρήθηκαν οι πάσης φύσεως εκπομπές, τα παραγόμενα προϊόντα (ανακυκλώσιμα είδη, κομπόστ, RDF) και το σχετικό υπόλειμμα. Για να αποφευχθεί η κατανομή των προϊόντων του συγκεκριμένου συστήματος, στα πλαίσια της μελέτης εφαρμόστηκε η αρχή της “επέκτασης του συστήματος” (system expansion), ακολουθώντας την πορεία των παραγόμενων προϊόντων μέχρι το σημείο όπου είναι δυνατή η χρησιμοποίησή τους. Με την ολοκλήρωση της μελέτης εξήχθησαν χρήσιμα συμπεράσματα για την λειτουργία μιας ΜΕΑ, επιβεβαιώνοντας τόσο το πλεονέκτημα αυτής σε σχέση με την απευθείας ταφή, όσο και τα οφέλη της αξιοποίησης των διαφόρων προϊόντων.

Οι (Montejo et al., 2013), επικεντρώθηκαν στη μελέτη τους στη σύγκριση της λειτουργίας 8 διαφορετικών ΜΕΑ (κατηγορίας MBP) στην περιοχή της Καστίγια και Λεόν, στην Ισπανία. Οι βασικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των συγκεκριμένων Μονάδων αφορούσαν κυρίως το στάδιο της βιολογικής επεξεργασίας (αναερόβια χώνευση, κομποστοποίηση και ωρίμανση). Κύριος στόχος της μελέτης, η οποία εκτελέστηκε με το λογισμικό EASEWASTE, ήταν η εκτίμηση των περιβαλλοντικών

επιπτώσεων καθεμίας εκ των οκτώ μονάδων, τόσο για τα πραγματικά στοιχεία λειτουργίας (ανόμοιες εισερχόμενες ποσότητες ΑΣΑ) για ίδια χρονική περίοδο, όσο και θεωρώντας ίσες ποσότητες εισερχομένων ΑΣΑ, προκειμένου να εκτιμηθεί η απόδοση καθενός από αυτά στην ποσοστιαία σύσταση των ΑΣΑ. Τελικός στόχος ήταν οι προτάσεις βελτιστοποίησης της λειτουργίας των μονάδων με γνώμονα τον περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η περίοδος συλλογής λειτουργικών δεδομένων ήταν τα δύο χρόνια, ενώ, αντίστοιχα με την προηγούμενη περίπτωση, ως χρονικός ορίζοντας των περιβαλλοντικών επιπτώσεων θεωρήθηκαν τα 100 χρόνια, διευκρινίζοντας ότι για την περίοδο αυτή τα υπό μελέτη συστήματα πιστώθηκαν με εξοικονόμηση για τη δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα. Ως λειτουργική μονάδα επιλέχθηκε ο 1t υγρών ΑΣΑ (wet residual municipal solid waste), ενώ οι εκπομπές που σχετίζονταν με την παραγωγή των αποβλήτων θεωρήθηκαν μηδενικές (προσέγγιση “μηδενικής επιβάρυνσης”). Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις διακρίθηκαν σε τρεις βασικές κατηγορίες (μη-τοξικές, τοξικές, επιπτώσεις σε υπόγεια ύδατα) και εξήχθησαν χρήσιμα συμπεράσματα για κάθε μια από αυτές. Συγκεκριμένα, η σωστή αξιοποίηση των ανακυκλώσιμων προϊόντων, καθώς και του παραγόμενου βιοαερίου (σε περίπτωση αναερόβιας επεξεργασίας) είχε σημαντική θετική επίπτωση τόσο στους μη-τοξικούς, όσο και στους τοξικούς δείκτες, ενώ η σύσταση των ΑΣΑ, η οποία γενικά καθορίζει τα παραγόμενα ανακυκλώσιμα προϊόντα, επιβεβαιώθηκε ότι επηρεάζει τους σχετικούς δείκτες. Ως γενικό συμπέρασμα παρατηρήθηκαν τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν οι ΜΕΑ, ειδικά στην περίπτωση που επιτυγχάνεται διαλογή ανακυκλώσιμων σε υψηλά ποσοστά και η βιολογική επεξεργασία περιλαμβάνει αναερόβια χώνευση, η οποία παρέχει τη δυνατότητα αξιοποίηση του βιοαερίου.

Στο άρθρο τους οι (Beylot et al., 2015) εφάρμοσαν αναφορική ΑΚΖ στα όρια μιας ΜΕΑ στη Γαλλία (Μονάδα “Α”, ενδεικτική των ΜΕΑ της χώρας, με συνδυασμό αναερόβιας χώνευσης και κομποστοποίησης). Επιπλέον, εξέτασαν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν από τη λειτουργία αυτής, ενώ παράλληλα εξετάστηκε και η ευαισθησία που είχαν αυτές σε τυχόν αλλαγές των ρευμάτων εισόδου και εξόδου της. Ως λειτουργική μονάδα της συγκεκριμένης μελέτης επιλέχθηκαν οι εισερχόμενες ποσότητες αποβλήτων για το έτος 2010 (46.929 t ΑΣΑ και 12.158 t προδιαλεγμένων βιοαποβλήτων). Για την κατανομή εφαρμόστηκε και σε αυτή τη μελέτη η αρχή της “επέκτασης του συστήματος”, θεωρώντας ότι η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια διατέθηκε στο γαλλικό δίκτυο διανομής, η θερμική ενέργεια διατέθηκε, αντίστοιχα, στο

σχετικό δίκτυο θέρμανσης, ενώ, τέλος, οι παραγόμενες, προς ανακύκλωση, ποσότητες σιδηρούχων υλικών αξιοποιήθηκαν για την παραγωγή χάλυβα. Τα θέματα βέλτιστης κατανομής που προέκυψαν κατά τη μοντελοποίηση της AKZ επιλύθηκαν με τη θεώρηση ότι ο παραγόμενος δευτερογενής χάλυβας είχε τη δυνατότητα να αντικαταστήσει τον πρωτογενή σε υψικαμίλους. Ως τελικό αποτέλεσμα εξήχθησαν συμπεράσματα τόσο για τις άμεσες περιβαλλοντικές επιπτώσεις που έχει η λειτουργία της ΜΕΑ στο περιβάλλον (επιρροή στους σχετικούς δείκτες που αναφέρθηκαν στον **Πίνακα 5.1**), όσο και για τις αντίστοιχες επιπτώσεις που προκαλούνται όταν η ΜΕΑ αποτελεί στάδιο ενός ολοκληρωμένου συστήματος διαχείρισης αποβλήτων (πχ ακολουθείται από καύση του παραγόμενου δευτερογενούς καυσίμου σε μονάδες κατάλληλων υποδομών).

Οι (Grosso et al., 2016) στη μελέτη τους επεκτείνουν τα όρια της AKZ, πέραν της λειτουργίας μιας ΜΕΑ, με στόχο να αξιολογήσουν σε καλύτερο βαθμό τόσο τη δυνατότητα αξιοποίησης του παραγόμενου δευτερογενούς καυσίμου (SRF) στην τσιμεντοβιομηχανία, όσο και την αξιοποίηση του παραγόμενου βιοαερίου που προκύπτει από την υγειονομική ταφή των υπολειμμάτων για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, κάνοντας χρήση του λογισμικού SimaPro8. Το υπό μελέτη σύστημα αφορούσε σε επεξεργασία ΑΣΑ στην επαρχία του Κούνεο (Βορειοδυτική Ιταλία), όπου λαμβάνει χώρα διαλογή στην πηγή, ενώ η δομή της ΜΕΑ (πλησίον δήμου Βιλαφαλέττο) προσανατολίστηκε κυρίως στην παραγωγή SRF, με το υπόλειμμα να οδηγείται προς ταφή σε γειτονικό ΧΥΤ, ο οποίος έχει κατάλληλη υποδομή για την ενεργειακή αξιοποίηση του παραγόμενου βιοαερίου. Στα πλαίσια της μελέτης, τα όρια περιέλαβαν το σύνολο των διεργασιών εντός της ΜΕΑ, τη μεταφορά των παραγόμενων υλικών (SRF, ανακυκλώσιμα μέταλλα, υπόλειμμα) και την αξιοποίηση στις αντίστοιχες μονάδες (κλίβανος τσιμεντοβιομηχανίας, εργοστάσια επεξεργασίας μετάλλων) ή στο χώρο τελικής ταφής. Ως λειτουργική μονάδα επιλέχθηκε ο 1t επεξεργασμένων ΑΣΑ, ενώ ακολουθήθηκε και εδώ η προσέγγιση “μηδενικής επιβάρυνσης”. Για την αντιμετώπιση θεμάτων που σχετίζονταν με την κατανομή των διαφόρων επιπτώσεων διευρύνθηκαν τα όρια του συστήματος. Η επιλογή αυτή έδωσε τη δυνατότητα να συμπεριληφθούν πρωτογενείς παραγωγές που ήταν δυνατό να αποφευχθούν λόγω ανάκτησης υλικών και ενέργειας από τα απόβλητα. Για τα δευτερογενή υλικά επιλέχθηκε η θεώρηση ότι υποκαθιστούν τη μέση τρέχουσα πρωτογενή παραγωγή, ενώ για την ανακτηθείσα ενέργεια θεωρήθηκε ότι υπάρχει η

δυνατότητα να υποκαταστήσει τη μέση παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην τοπική περιοχή. Ως δεδομένα θεωρήθηκαν κυρίως στοιχεία λειτουργίας της συγκεκριμένης μονάδας για το έτος 2013. Αναλύοντας και αξιολογώντας τους διάφορους περιβαλλοντικούς δείκτες, εξάχθηκε το συμπέρασμα ότι η το συγκεκριμένο σύστημα διαχείρισης εξασφαλίζει σε μεγάλο βαθμό ενεργειακή αυτονομία με τις όποιες αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις να αντισταθμίζονται από τα σχετικά οφέλη.

Τέλος, οι (Gadaleta et al., 2022) συνέκριναν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη λειτουργία επτά μονάδων εγκατεστημένων σε διάφορες περιοχές ανά τον κόσμο: (i) MEA Haase στην περιοχή Neumünster της Γερμανίας, (ii) MEA Entsorga στην περιοχή Westbury του Ηνωμένου Βασιλείου, (iii) MEA ArrowBio, στο Τελ Αβίβ του Ισραήλ, (iv) Μονάδα Global Renewables στο Σύνδνεϋ της Αυστραλίας, (v) Μονάδα Ecodeco στην περιοχή Vigevano της Ιταλίας, (vi) MEA Herhof στην περιοχή Rennerod της Γερμανίας και (vii) MEA Linde στη Δρέσδη της Γερμανίας. Τα όρια της μελέτης για κάθε μια από τις ανωτέρω μονάδες περιλάμβαναν τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα με την είσοδο των ΑΣΑ προς επεξεργασία σε αυτές και τις διεργασίες που αφορούν τα ρεύματα εξόδου. Η λειτουργική μονάδα που επιλέχθηκε ήταν ο 1<sup>ος</sup> εισερχομένων, προς επεξεργασία, ΑΣΑ, ενώ, παράλληλα, επιλέχθηκε και η προσέγγιση “μηδενικής επιβάρυνσης”. Ενδιαφέρον, εκτός από τα διάφορα συγκριτικά συμπεράσματα, παρουσιάζει η παρατήρηση ότι η βέλτιστη περιβαλλοντική συμπεριφορά της λειτουργίας των MEA παρατηρήθηκε με την επίτευξη ενός συνδυασμού ανάκτησης ανακυκλώσιμων υλικών, παραγωγής δευτερογενούς καυσίμου και περιορισμού των παραγόμενων ποσοτήτων υπολείμματος που διατίθενται προς τελική ταφή.

### 5.3 Ερευνητικά κενά και μελλοντικές προκλήσεις εφαρμογής της ΑΚΖ σε συστήματα διαχείρισης αποβλήτων

Παρά τον σημαντικό αριθμό μελετών που έχουν εφαρμόσει την ΑΚΖ σε συστήματα διαχείρισης αποβλήτων, εξακολουθούν να υφίστανται σημαντικές προκλήσεις και ερευνητικά κενά, τα οποία απαιτούν περαιτέρω διερεύνηση και κάλυψη από μελλοντικές εργασίες. Αρχικά, τα συστήματα διαχείρισης ΑΣΑ που εφαρμόζονται σε μια συγκεκριμένη περιοχή είναι πιθανό να τροποποιηθούν για αρκετούς και σημαντικούς λόγους. Ενδεικτικά, στην ΕΕ οι οδηγίες που έχουν δοθεί ελαχιστοποιούν την ταφή, προκρίνοντας λύσεις σύμφωνες με την κυκλική οικονομία. Επομένως, είναι καθοριστικής σημασίας η καλή κατανόηση της υφιστάμενης κατάστασης όπου

εφαρμόζεται η AKZ, ούτως ώστε τα αποτελέσματα που θα προκύψουν να είναι εφαρμόσιμα και να εξασφαλίζουν βελτιστοποίηση των υφισταμένων συνθηκών (Nurzhan et al., 2025; Zhang et al., 2021).

Επιπλέον, σε περίπτωση τροποποίησης ή αναβάθμισης ενός συστήματος διαχείρισης, απαιτείται αντίστοιχη αναθεώρηση της εφαρμογής της AKZ, ώστε αυτή να αντανακλά τις νέες συνθήκες λειτουργίας. Η διαδικασία αυτή προϋποθέτει συνεχή παρακολούθηση και αξιολόγηση της υφιστάμενης κατάστασης, καθώς διαφορετικά τα αποτελέσματα ενδέχεται να μην αποτυπώνουν με επάρκεια τις πραγματικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις λόγω των τεχνολογικών ή λειτουργικών εξελίξεων. Εναλλακτικά, τα αρχικά μοντέλα AKZ θα μπορούσαν να ενσωματώνουν πιθανές μελλοντικές μεταβολές μέσω κατάλληλων συντελεστών ή παραδοχών· ωστόσο, η προσέγγιση αυτή είναι δύσκολο να εφαρμοστεί στην πράξη λόγω της αβεβαιότητας που συνοδεύει τις μελλοντικές εξελίξεις (Zhang et al., 2021).

Για την πληρέστερη κατανόηση ενός ολοκληρωμένου συστήματος διαχείρισης ΑΣΑ, η εφαρμογή της AKZ θα πρέπει ιδανικά να περιλαμβάνει το σύνολο των υποσυστημάτων και διεργασιών από τα οποία αυτό αποτελείται. Ωστόσο, στην πράξη, η προσέγγιση αυτή είναι συχνά δύσκολη λόγω διαφόρων περιορισμών, όπως η έλλειψη διαθέσιμων δεδομένων, με αποτέλεσμα την εμφάνιση αβεβαιοτήτων και περιορισμών στην αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Σε περιπτώσεις τμηματοποίησης/διαμερισμού του συστήματος και επιμέρους εφαρμογής της AKZ στα υποσυστήματα αυτού (π.χ. συλλογή, μεταφορά, επεξεργασία και τελική διάθεση), απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στον καθορισμό των ορίων του συστήματος και στη σωστή μοντελοποίηση των σημείων αλληλεπίδρασης με τα υπόλοιπα υποσυστήματα (Nurzhan et al., 2025).

Τέλος, λόγω του μεθοδολογικού πλαισίου της AKZ, τα αποτελέσματά της επικεντρώνονται κυρίως στην αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός συστήματος. Ωστόσο, για την πληρέστερη και βέλτιστη αξιολόγησή του, είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη και οι οικονομικές καθώς και οι κοινωνικές διαστάσεις που σχετίζονται με αυτό. Για τον λόγο αυτό, σε αρκετές περιπτώσεις η συνδυαστική αξιοποίηση της AKZ με μεθόδους αξιολόγησης οικονομικών και κοινωνικών επιπτώσεων μπορεί να οδηγήσει σε πιο ολοκληρωμένα και αξιόπιστα αποτελέσματα (Nurzhan et al., 2025; Zhang et al., 2021).

## 6 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΑΚΖ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΑ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗΣ

Το στοιχείο καινοτομίας της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας αφορά την εφαρμογή της ΑΚΖ στη ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης, αξιοποιώντας πρόσφατα πρωτογενή δεδομένα λειτουργίας για το έτος 2024. Παράλληλα, εξετάζονται εναλλακτικά σενάρια λειτουργίας και αναβάθμισης της μονάδας, τα οποία περιλαμβάνουν την παραγωγή δευτερογενούς στερεού καυσίμου (SRF) και την ενσωμάτωση φωτοβολταϊκού συστήματος. Μέσω της προσέγγισης αυτής επιδιώκεται η εξαγωγή τεκμηριωμένων συμπερασμάτων σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν εντός των ορίων του εξεταζόμενου συστήματος και η σύγκρισή τους με εναλλακτικές προσεγγίσεις διαχείρισης ΑΣΑ. Η ανάλυση θα εστιάσει:

- Στη συγκριτική αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων για κάθε εξεταζόμενο σενάριο
- Στον εντοπισμό κρίσιμων διεργασιών (hot spots) που συνεισφέρουν σημαντικά στις επιλεγμένες κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων και στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα του συστήματος
- Στην παρουσίαση προτάσεων βελτίωσης για τις διεργασίες αυτές, με στόχο τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και την ενίσχυση της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας Περιγραφή ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης

### 6.1 Γενικά Στοιχεία

Σύμφωνα με στοιχεία που προκύπτουν από τους υπεύθυνους λειτουργίας καθώς και από την απόφαση (ΥΠΕΝ/ΔΙΠΑ/109417/7677, 2024), η ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης βρίσκεται στη θέση «Χ.Α.Δ.Α. Αλεξανδρούπολης» του Δήμου Αλεξανδρούπολης, στο Νομό Έβρου, εντός της Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης. Διοικητικά, το έργο υπάγεται στην Περιφέρεια Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης, ενώ η ευθύνη λειτουργίας του έχει ανατεθεί στην Αναπτυξιακή Ανώνυμη Εταιρεία Διαχείρισης Απορριμμάτων Ανατολικής Μακεδονίας-Θράκης (ΔΙ.Α.Α.ΜΑ.Θ. Α.Α.Ε.).

Η μονάδα έχει σχεδιαστεί με μέση ετήσια δυναμικότητα 43.173 τόνων σύμμεικτων αστικών στερεών αποβλήτων (ΑΣΑ) και 6.639 τόνων προδιαλεγμένων οργανικών αποβλήτων. Ωστόσο, λόγω μη ολοκλήρωσης ορισμένων υποστηρικτικών εγκαταστάσεων και περιορισμένης εφαρμογής συστημάτων διαλογής στην πηγή, η

πραγματική ποσότητα αποβλήτων που οδηγείται προς επεξεργασία στη Μονάδα ανέρχεται σε περίπου 96.600 τόνους ετησίως.

Οι βασικοί στόχοι της λειτουργίας της ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης περιλαμβάνουν:

- Μείωση του όγκου απορριμμάτων που οδηγούνται προς υγειονομική ταφή
- Ανάκτηση υλικών για επαναχρησιμοποίηση ή ανακύκλωση
- Περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τη διαχείριση αποβλήτων
- Αξιοποίηση του παραγόμενου βιοαερίου για παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας
- Συμμόρφωση με την ισχύουσα Ελληνική και Ευρωπαϊκή νομοθεσία που αφορά στη διαχείριση των απορριμμάτων

Η εγκατάσταση περιλαμβάνει τις ακόλουθες μονάδες:

- Μονάδα Υποδοχής και Μηχανικής Διαλογής
- Μονάδα Υποδοχής - Τεμαχισμού Πράσινων Αποβλήτων
- Μονάδα Αναερόβιας Χώνευσης Οργανικού Κλάσματος
- Μονάδα Ωρίμανσης Οργανικού - Παραγωγής Compost
- Μονάδα ραφινάρισματος Compost
- Μονάδα Επεξεργασίας Στραγγισμάτων
- Μονάδα Συμπαραγωγής Ηλεκτρικής και Θερμικής Ενέργειας

Τα αξιοποιήσιμα προϊόντα της ΜΕΑ περιλαμβάνουν:

- Εδαφοβελτιωτικό (Compost) κατάλληλο για γεωργική χρήση
- Ανακτώμενα υλικά, όπως μέταλλα (σιδηρούχα, αλουμίνιο), χαρτί/χαρτόνι και πλαστικό
- Υλικό τύπου CLO (Compost-Like Output)
- Ηλεκτρική και θερμική ενέργεια

Τέλος, το υπόλειμμα που προκύπτει από την επεξεργασία των σύμμεικτων ΑΣΑ οδηγείται σε Χώρο Υγειονομικής Ταφής (ΧΥΤ), καταλαμβάνοντας πλέον σημαντικά μικρότερο όγκο σε σχέση με την αρχική ποσότητα.

### 6.1.1 Αναλυτική τεχνική περιγραφή επιμέρους Μονάδων

#### 6.1.1.1 Μονάδα Υποδοχής και Μηχανικής Διαλογής

Το σύνολο των αστικών απορριμμάτων που εισέρχονται στη Μονάδα υποβάλλεται αρχικά σε διαχωρισμό, με στόχο την αποτελεσματική ανάκτηση υλικών και τη μείωση του όγκου των αποβλήτων που οδηγούνται προς τελική διάθεση. Η Μονάδα Μηχανικής Διαλογής έχει ως κύρια αποστολή την επίτευξη υψηλής καθαρότητας στα ανακτώμενα υλικά, περιορίζοντας παράλληλα το υπόλειμμα που καταλήγει σε Χώρο Υγειονομικής Ταφής.

Ο διαχωρισμός των εισερχόμενων ΑΣΑ πραγματοποιείται σε δύο βασικά κλάσματα:

- Οργανικό κλάσμα, το οποίο οδηγείται σε αναερόβια επεξεργασία για παραγωγή βιοαερίου και παραγωγή Compost
- Ανακυκλώσιμα εμπορεύσιμα υλικά, όπως χαρτί/χαρτόνι, πλαστικά, σιδηρούχα μέταλλα και αλουμίνιο

Η Μονάδα Μηχανικής Επεξεργασίας περιλαμβάνει τις εξής επιμέρους λειτουργικές μονάδες:

- Υποδοχής σύμμεικτων απορριμμάτων
- Υποδοχής προδιαλεγμένων οργανικών
- Υποδοχής και τεμαχισμού πράσινων αποβλήτων
- Μηχανικού διαχωρισμού

Η διαδικασία μηχανικού διαχωρισμού βασίζεται στην αξιοποίηση φυσικών ιδιοτήτων των υλικών, όπως το μέγεθος, το ειδικό βάρος και η μορφολογία. Οι τεχνικές που εφαρμόζονται περιλαμβάνουν:

- Τεμαχισμό για μείωση μεγέθους
- Κοσκίνισμα για διαχωρισμό κατά μέγεθος
- Αεροδιαχωρισμό με βάση την πυκνότητα
- Μαγνητικό και επαγωγικό διαχωρισμό για ανάκτηση σιδηρούχων και μη μετάλλων
- Οπτικό διαχωρισμό για την ανάκτηση ανακυκλώσιμων (χαρτί, πλαστικό)
- Βαλλιστικό διαχωρισμό για διάκριση υλικών με διαφορετική κινητική συμπεριφορά
- Καμπίνες Χειροδιαλογής και Ποιοτικού Ελέγχου

#### 6.1.1.2 Μονάδα Αναερόβιας Χώνευσης

Η αναερόβια επεξεργασία αποβλήτων έχει ως κύριο στόχο την εκτεταμένη αποδόμηση του οργανικού κλάσματος, ώστε να παραχθεί ένα σταθεροποιημένο και ασφαλές υλικό, κατάλληλο για τελική διάθεση. Κατά τη διαδικασία, εκτός από το βιοαέριο, προκύπτουν και στραγγίσματα που απαιτούν περαιτέρω επεξεργασία. Το παραγόμενο βιοαέριο χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, συμβάλλοντας στην ενεργειακή αξιοποίηση των αποβλήτων.

Η τεχνολογία που εφαρμόζεται στη Μονάδα είναι η ξηρή αναερόβια χώνευση διαλείποντος έργου, η οποία πραγματοποιείται σε κλειστούς αντιδραστήρες. Η βιολογική επεξεργασία αφορά τόσο το οργανικό κλάσμα των σύμμεικτων αστικών αποβλήτων όσο και τα προδιαλεγμένα οργανικά, τα οποία επεξεργάζονται σε ξεχωριστούς αντιδραστήρες ώστε να διασφαλίζεται η παραγωγή κομπόστ υψηλής ποιότητας από το οργανικό κλάσμα που προέρχεται από διαλογή στην πηγή.

Η μονάδα διαθέτει 12 αντιδραστήρες, κατανομημένους σε δύο γραμμές επεξεργασίας ως εξής:

- 8 αντιδραστήρες για το οργανικό κλάσμα των σύμμεικτων αστικών αποβλήτων.
- 4 αντιδραστήρες για τα προδιαλεγμένα οργανικά υλικά.

#### 6.1.1.3 Μονάδα Κομποστοποίησης - Ωρίμανσης

Η διαδικασία ωρίμανσης του οργανικού υλικού (compost) πραγματοποιείται με φυσικό αερισμό σε σειράδια, ώστε να εξασφαλιστεί η πλήρης σταθεροποίηση του υλικού. Για την προστασία από τον άνεμο εφαρμόζεται κάλυψη με ειδικές μεμβράνες. Ο χρόνος παραμονής του υλικού στη μονάδα ωρίμανσης είναι τουλάχιστον 35 ημερολογιακές ημέρες.

#### 6.1.1.4 Μονάδα Ραφιναρίας Compost

Το compost που προκύπτει από την επεξεργασία του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ, μετά την ολοκλήρωση της φάσης ωρίμανσης, μεταφέρεται στη γραμμή εξευγενισμού. Στο στάδιο αυτό πραγματοποιείται η διαδικασία ραφινάρισματος, η οποία έχει ως στόχο την απομάκρυνση ξένων προσμίξεων, όπως γυαλί, σκληρά πλαστικά, μικρά χαλίκια και λεπτά φύλλα πλαστικού (film), καθώς και την απομάκρυνση τυχόν μη πλήρως κομποστοποιημένων οργανικών στερεών.

#### 6.1.1.5 Μονάδα Επεξεργασίας Στραγγισμάτων

Η Μονάδα Επεξεργασίας Στραγγισμάτων (ΜΕΣ) της ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης αποτελείται από τις παρακάτω βαθμίδες:

- Φρεάτιο εισόδου
- Δεξαμενή εξισορρόπησης – Αντλιοστάσιο αρχικής ανύψωσης
- Μονάδα λεπτοκοσκίνησης
- Βιολογική βαθμίδα
- Βιοαντιδραστήρας (δεξαμενή απονιτροποίησης και δεξαμενή αερισμού)
- Σύστημα διαχωρισμού ανάμικτου υγρού με μεμβράνες υπερδιήθησης (M.B.R.)
- Μονάδα Αντίστροφης Ώσμωσης όπου γίνεται η τριτοβάθμια επεξεργασία των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων
- Μονάδα χλωρίωσης επεξεργασμένων – αποθήκευσης καθαρών – αντλιοστάσια διάθεσης
- Δεξαμενή πάχυνσης – αποθήκευσης ιλύος

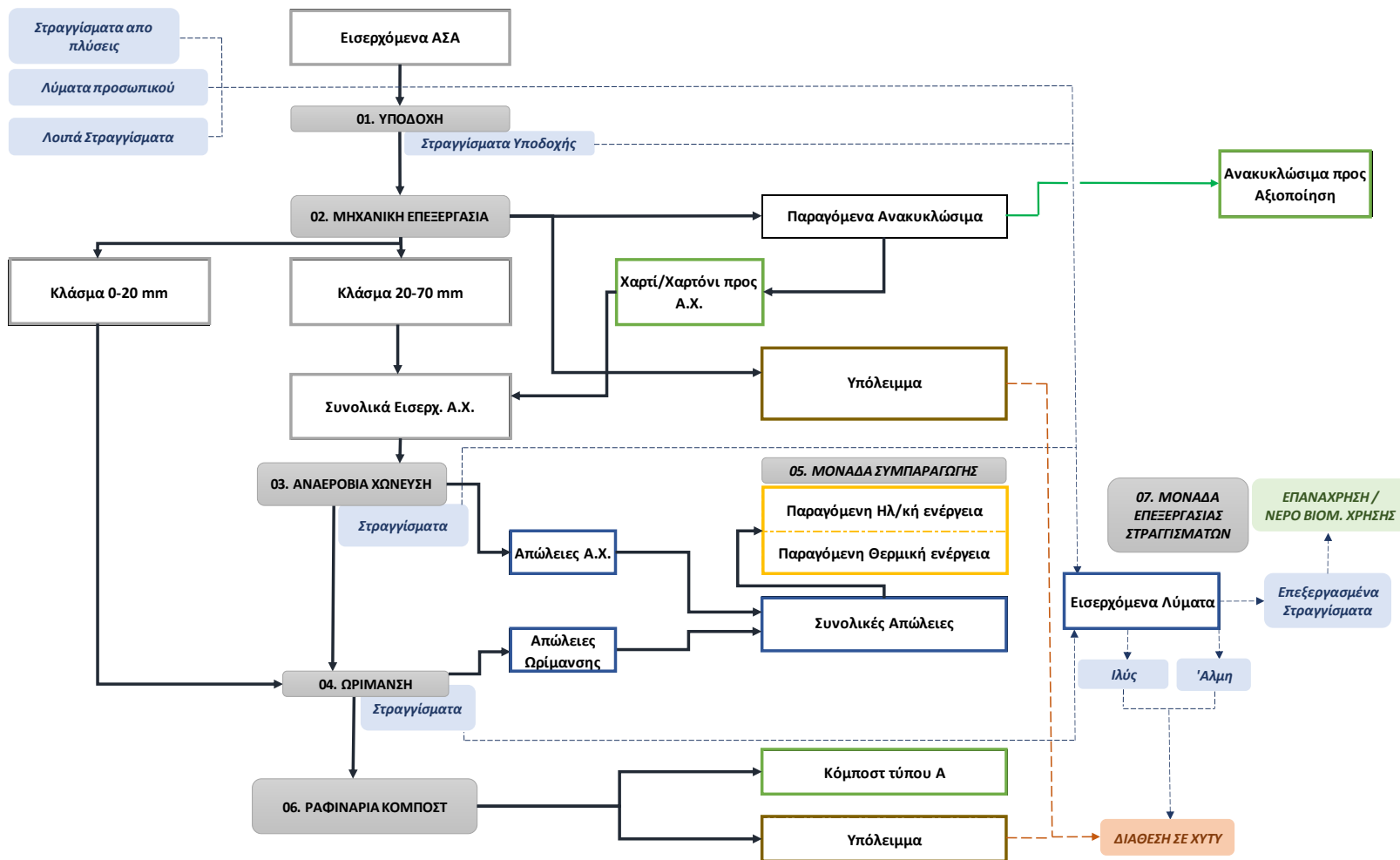
#### 6.1.1.6 Συστήματα Περιβαλλοντικής Προστασίας

Για την κατακράτηση αιωρούμενων σωματιδίων και τον περιορισμό των οσμών, στη ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης έχουν εγκατασταθεί κατάλληλα συστήματα αποκονίωσης και απόσμησης, αντίστοιχα. Συγκεκριμένα το Τμήμα Υποδοχής - Μηχανικής Διαλογής φέρει Σύστημα Αποκονίωσης, ενώ Σύστημα Απόσμησης φέρουν το Τμήμα Υποδοχής - Μηχανικής Διαλογής, καθώς και το τμήμα της Βιολογικής Επεξεργασίας.

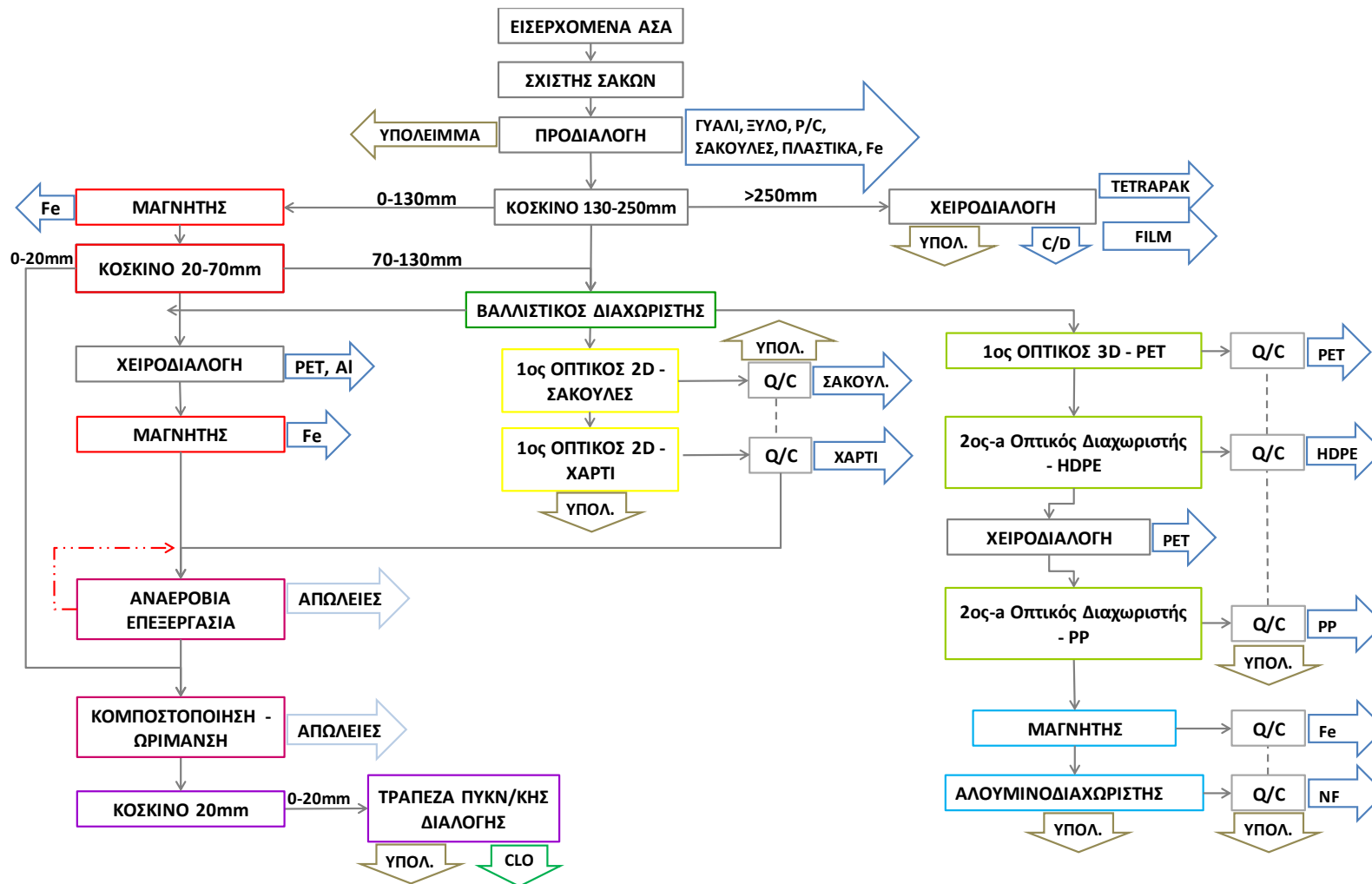
#### 6.1.1.7 Μονάδα Παραγωγής Ενέργειας

Ο Σταθμός Παραγωγής Ενέργειας αποτελείται από Μονάδα Συμπαγωγής Ηλεκτρικής και Θερμικής Ενέργειας κατάλληλη για την καύση του παραγόμενου Βιοαερίου από τη Μονάδα Αναερόβιας Χώνευσης.

Στη συνέχεια, παρατίθενται το διάγραμμα ροής μάζας και ενέργειας της συνολικής Μονάδας (**Σχήμα 6.1**), καθώς και αναλυτικότερο διάγραμμα ροής του εξοπλισμού (**Σχήμα 6.2**).



Σχήμα 6.1 Διάγραμμα Ροής Μάζας ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης



Σχήμα 6.2 Αναλυτικό Διάγραμμα Ροής και Εξοπλισμού ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης

## 6.2 Παρουσίαση Λογισμικού AKZ

Η εφαρμογή της AKZ σε ένα σύστημα διευκολύνεται σημαντικά από τη χρήση εξειδικευμένων λογισμικών, καθώς αυτά εξασφαλίζουν τη βέλτιστη μοντελοποίηση του συστήματος σύμφωνα με τα ισχύοντα πρότυπα και την εξαγωγή ποιοτικών αποτελεσμάτων (Iqbal et al., 2020). Τα λογισμικά που αφορούν στην εφαρμογή της AKZ είναι αρκετά και η επιλογή τους σχετίζεται σε σημαντικό βαθμό από τα επιθυμητά αποτελέσματα και τα χαρακτηριστικά του μελετώμενου συστήματος (Iqbal et al., 2020). Σύμφωνα με τους (Nurzhan et al., 2025), τα γνωστότερα λογισμικά είναι τα ακόλουθα: LCA For Experts (ex. GaBi), SimaPro, EASEWASTE, EASETECH, WISARD. Οι (Iqbal et al., 2020) αναφέρουν επιπρόσθετα εξειδικευμένα λογισμικά που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές διαχείρισης αποβλήτων, όπως τα IWMm WRATE, SIWMS και OpenLCA.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας για την εφαρμογή AKZ στη ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης θα γίνει χρήση του λογισμικού OpenLCA. Σύμφωνα με τον επίσημο ιστότοπο (<https://www.openlca.org/>), το OpenLCA αποτελεί ένα από τα πλέον διαδεδομένα λογισμικά για τη διεξαγωγή μελετών AKZ, το οποίο εξασφαλίζει ταχύτητα, και ευελιξία στη χρήση του. Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα του λογισμικού OpenLCA είναι ο ανοικτός του κώδικας, ο οποίος επιτρέπει την ελεύθερη χρήση και διάθεση, καθώς και τη δυνατότητα τροποποίησης και βελτιστοποίησης σύμφωνα με τις ανάγκες του χρήστη. Με τον τρόπο αυτό το λογισμικό παρέχει τη δυνατότητα κατάλληλης προσαρμογής σε διαφορετικές ερευνητικές ή βιομηχανικές εφαρμογές. Το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα εφαρμογής της AKZ σε ένα σύστημα σύμφωνα με τις απαιτήσεις και τα βήματα που καθορίζονται από τα πρότυπα ISO 14040 και 14044. Με τον τρόπο αυτό η συνολική εφαρμογή και τα αποτελέσματα που προκύπτουν τηρούν σε απόλυτο βαθμό τις απαιτούμενες επιστημονικές πρακτικές.

Το λειτουργικό περιβάλλον του προγράμματος είναι ιδιαίτερα εύχρηστο, παρέχοντας άμεση πρόσβαση ακόμα και σε μη έμπειρους χρήστες. Επιγραμματικά, τα κυριότερα βήματα για τη μοντελοποίηση ενός συστήματος είναι τα ακόλουθα:

- Ορισμός βασικών δεδομένων, όπου καθορίζονται τα όρια, η λειτουργική μονάδα, καθώς και οι εισερχόμενες και εξερχόμενες ροές του υπό μελέτη συστήματος
- Καθορισμός και συσχέτιση διεργασιών προώθησης και μετατροπής προϊόντων

- Σύνδεση διαθέσιμων βάσεων δεδομένων (Databases) (πχ Ecoinvent, Agrifootprint, USLCI)
- Εφαρμογή κατάλληλων μεθόδων εκτίμησης επιπτώσεων (π.χ. ReCiPe, CML, ILCD, TRACI ή EF 3.0)
- Τελική εξαγωγή και παρουσίαση συνολικών αποτελεσμάτων (δυνατότητα γραφικών παραστάσεων, συγκριτικών σεναρίων, αναφορών, κλπ.)

Τα βασικά χαρακτηριστικά του λογισμικού περιλαμβάνουν τη δυνατότητα εφαρμογής εργαλείων, όπως:

- Ανάπτυξη κώδικα (SQL and Python (Jython) Coding, PC server - REST/gRPC (Python, JS/TS, C#))
- Ανάλυση δεδομένων (πχ ανάλυση Monte Carlo, διάγραμμα Sankey, κλπ.)
- Εισαγωγή πληθώρας στοιχείων από γνωστές βάσεις δεδομένων (μέσω της πλατφόρμας nexus.openlca.org), με παράλληλη εξαγωγή αποτελεσμάτων σύμφωνα με τις απαιτήσεις των σχετικών προτύπων
- Ανάλυση ευαισθησίας σεναρίων και εκτίμησης των επιπτώσεων που δύναται να επιφέρει η μεταβολή συγκεκριμένων παραμέτρων στο συνολικά αποτελέσματα
- Ομαδική (συν)εργασία μέσω διασύνδεσης με τον LCA Collaboration Server, επιτρέποντας την παράλληλη χρήση σε πολυπληθείς ομάδες και οργανισμούς

Επιπλέον, το OpenLCA υποστηρίζει και άλλες μεθοδολογίες πέραν της AKZ, όπως η Κοινωνική Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Social LCA) και η Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής (Life Cycle Costing), προσφέροντας δυνατότητες πολυκριτηριακής αξιολόγησης. Τέλος, η υποστήριξη διεθνών μορφότυπων ανταλλαγής δεδομένων, όπως ILCD και JSON-LD, ενισχύει τη διαλειτουργικότητα με άλλα εργαλεία και πλατφόρμες.

### 6.3 Καθορισμός Ορίων Συστήματος και λειτουργικής μονάδας

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, η επιλογή των ορίων του συστήματος είναι σύμφωνη με την προσέγγιση “gate-to-grave”. Όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 6.1**, τα όρια του υπό μελέτη συστήματος έχουν ως θύρα εισόδου την εισαγωγή των ΑΣΑ στη ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης, προς περαιτέρω επεξεργασία εντός της Μονάδας. Διευκρινίζεται ότι τα όποια στοιχεία αφορούν τη μεταφορά των ΑΣΑ μέχρι τη θύρα εισόδου παραλείπονται στα πλαίσια της παρούσας μελέτης. Ως θύρα εξόδου θεωρείται

η ταφή του εξερχόμενου, από τη Μονάδα, υπολείμματος στο ΧΥΤ Αλεξανδρούπολης. Η επιλογή των συγκεκριμένων ορίων επιτρέπει τη αξιοποίηση κατά το δυνατό περισσότερων «πρωτογενών», πραγματικών δεδομένων, ενώ παράλληλα μειώνει το βαθμό πολυπλοκότητας του σχετικού μοντέλου της ΑΚΖ και επιταχύνει την εξαγωγή χρήσιμων αποτελεσμάτων.

Ως λειτουργική μονάδα (ΛΜ) για τη μοντελοποίηση του συνόλου των δεδομένων στα πλαίσια της ΑΚΖ ορίστηκε η ετήσια επεξεργασία 89.699 t ΑΣΑ (έτος αναφοράς 2024). Ο κύριος λόγος επιλογής της συγκεκριμένης μονάδας είναι η δυνατότητα συγκριτικής αξιολόγησης τριών εναλλακτικών σεναρίων επεξεργασίας ΑΣΑ (απευθείας ταφή σε ΧΥΤ, Επεξεργασία σε ΜΕΑ, Επεξεργασία σε ΜΕΑ με προσθήκη σταδίου ξήρανσης και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Φωτοβολταϊκά) καθώς και η πληρέστερη μοντελοποίηση των ροών μάζας και ενέργειας εντός των ορίων του συστήματος.

#### 6.4 Διαχείριση Δεδομένων και Παραδοχές Μελέτης

Για την πραγματοποίηση της ΑΚΖ απαιτούνται δεδομένα σύμφωνα με τα οποία θα προκύψει ο σχετικός κατάλογος (LCI). Τα δεδομένα αυτά, μπορούν να είναι «πρωτογενή», δηλαδή πραγματικά στοιχεία λειτουργίας της Μονάδας τα οποία έχουν μετρηθεί σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας, «δευτερογενή», εφόσον προέρχονται από αναγνωρισμένες βάσεις δεδομένων και τεχνικές εκθέσεις (technical reports) και, τέλος, «υποθέσεις/εκτιμήσεις» στις οποίες κατέληξε ο μελετητής.

Τα πρωτογενή δεδομένα της παρούσας εργασίας έχουν προέρθει από λειτουργικά στοιχεία της ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης για τη συνολική λειτουργία του έτους 2024. Οι μετρήσεις προέκυψαν από σχετικά όργανα που είναι εγκατεστημένα στο χώρο της Μονάδας, καθώς και μετρήσεις που λαμβάνουν χώρα καθ' όλη τη διάρκεια του έτους από το προσωπικό λειτουργίας. Τα δεδομένα αυτά αφορούν κυρίως στο ισοζύγιο μάζας και ενέργειας, καθώς και στους απαιτούμενους πόρους για τη σωστή λειτουργία της Μονάδας (πχ κατανάλωση νερού, ηλεκτρικής ενέργειας, χημικών ουσιών, κλπ.).

Όσον αφορά τα δευτερογενή δεδομένα, καθώς και τις σχετικές παραδοχές, σημαντικό βοήθημα θα αποτελέσουν και οι μελέτες που έχουν προηγηθεί σε αντίστοιχες εφαρμογές, οι σημαντικότερες εκ των οποίων αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

## 6.5 Σενάρια Λειτουργίας ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας θα μελετηθούν τρία διαφορετικά σενάρια διαχείρισης των ΑΣΑ της υπό μελέτη περιοχής. Η επιλογή των σεναρίων βασίζεται στη μεθοδολογία που παρουσιάζεται ως ακολούθως:

Στο πρώτο σενάριο (Σενάριο Α) αξιολογείται, μέσω εφαρμογής της ΑΚΖ, μία περίπτωση μη βέλτιστης διαχείρισης των ΑΣΑ, η οποία αφορά την απευθείας διάθεσή τους σε ΧΥΤ χωρίς προηγούμενη επεξεργασία (δυσμενές σενάριο/worst case scenario). Παρά το γεγονός ότι η προσέγγιση αυτή δεν συνάδει με τις σύγχρονες κατευθύνσεις ολοκληρωμένης διαχείρισης αποβλήτων, εξακολουθεί να αποτελεί την κυρίαρχη πρακτική διαχείρισης στην Ελλάδα, όπως προκύπτει από τα υψηλά ποσοστά ταφής που παρουσιάζονται στον **Πίνακα Π.3**.

Το δεύτερο σενάριο (Σενάριο β) αποτελεί μία χαρακτηριστική (τυπική) περίπτωση διαχείρισης των παραγόμενων ΑΣΑ σε ΜΕΑ, αντιπροσωπεύοντας εγκαταστάσεις που έχουν ήδη αναπτυχθεί ή βρίσκονται υπό ανάπτυξη στον Ελλαδικό χώρο, με στόχο τη βελτιστοποίηση της ολοκληρωμένης επεξεργασίας των ΑΣΑ.

Το τρίτο σενάριο (Σενάριο Γ) επιλέχθηκε βάσει των κατευθύνσεων του νέου νομοθετικού πλαισίου, με στόχο τη διερεύνηση, από την οπτική της ΑΚΖ, της επίδρασης που έχει η αναβάθμιση της επεξεργασίας των ΑΣΑ μέσω μετατροπής της υφιστάμενης ΜΕΑ σε Μονάδα Ανάκτησης Ανακύκλωσης (ΜΑΑ). Η προσέγγιση αυτή εξετάζεται ως προς τη συμβολή της στην επίτευξη των στόχων που καθορίζονται στο πλαίσιο εφαρμογής της Οδηγίας 2018/851.

Συμπερασματικά, μέσα από την σύγκριση των ανωτέρω σεναρίων είναι δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων, από τη σκοπιά της ΑΚΖ, των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε όλη την πορεία εξέλιξης της διαχείρισης αποβλήτων στην Ελλάδα, από την μη επιθυμητή υφιστάμενη κατάσταση έως και την επίτευξη των εθνικών στόχων.

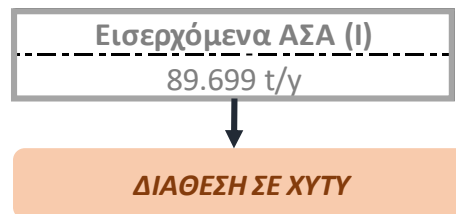
### 6.5.1 Σενάριο Α: Απευθείας απόρριψη ΑΣΑ χωρίς επεξεργασία

Σε παγκόσμιο επίπεδο, οι τεχνολογικά προηγμένες χώρες εφαρμόζουν κατάλληλα συστήματα διαχείρισης για τη βέλτιστη αξιοποίηση των ΑΣΑ. Ωστόσο, σε αρκετές χώρες, κυρίως κατώτερου οικονομικού επιπέδου, σημαντικές ποσότητες οδηγούνται προς ταφή χωρίς κατάλληλο έλεγχο και επεξεργασία (UNEP, 2024). Σε επίπεδο ΕΕ, οι οδηγίες 2008/98/ΕΚ και 2018/851 καθορίζουν τις απαιτούμενες διεργασίες που πρέπει να λαμβάνουν χώρα κατά την επεξεργασία των ΑΣΑ. Συνεπώς, ένα σύστημα

διαχείρισης όπου τα ΑΣΑ οδηγούνται απευθείας για ταφή οδηγεί σε πλήρη απουσία των δυνατών σταδίων επεξεργασίας (πρόληψη, επαναχρησιμοποίηση, ανακύκλωση, ανάκτηση) που μπορούν να εφαρμοστούν, ενώ παράλληλα προκαλεί σημαντική περιβαλλοντική επιβάρυνση λόγω των παραγόμενων στραγγισμάτων και του πλεονάζοντος βιοαερίου.

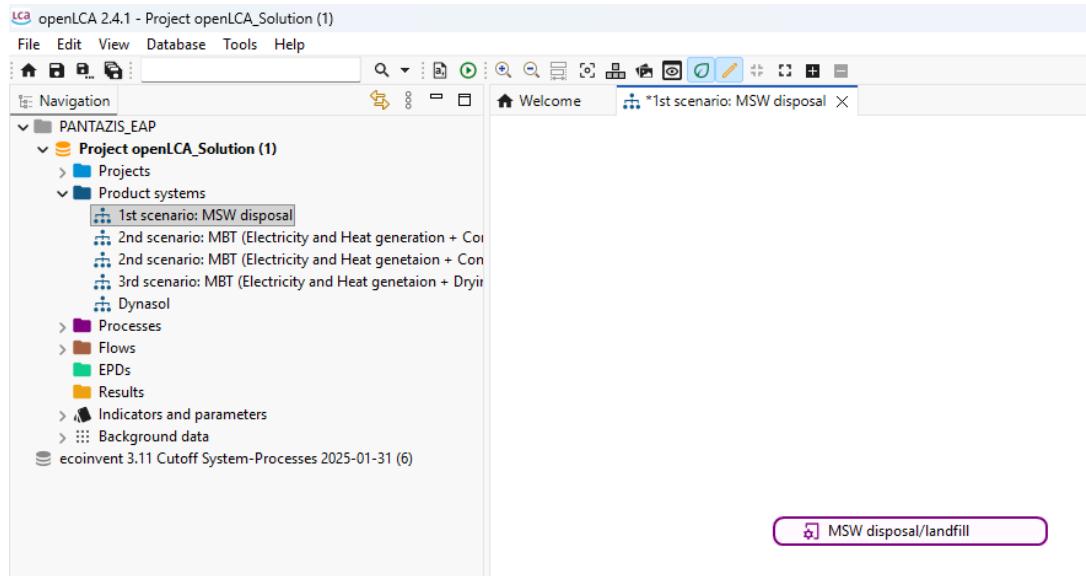
Στην Ελλάδα, αν και σύμφωνα με το ΕΣΔΑ έχουν καθοριστεί συγκεκριμένες ενέργειες για την βελτίωση της διαχείρισης των ΑΣΑ, σημαντικό ποσοστό αυτών οδηγείται προς ταφή χωρίς κατάλληλη επεξεργασία. Το πρώτο σενάριο, συνεπώς, που θα εξεταστεί στα πλαίσια της παρούσας εργασίας αποτυπώνει τη συνθήκη μη κατάλληλης επεξεργασίας των ΑΣΑ και της οδήγησης αυτών για απευθείας ταφή στο ΧΥΤ. Στην περίπτωση της ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης, η Μονάδα βρίσκεται στην ίδια τοποθεσία με το ΧΥΤ (και οι δύο εγκαταστάσεις αποτελούν την Ολοκληρωμένη Εγκατάσταση Διαχείρισης Αποβλήτων (ΟΕΔΑ) της περιοχής). Συνεπώς θεωρείται ότι η ποσότητα ΑΣΑ που οδηγείται προς ταφή στο ΧΥΤ ισούται με την εισερχόμενη ποσότητα ΑΣΑ στην υφιστάμενη ΜΕΑ.

Το διάγραμμα ροής μάζας του συγκεκριμένου σεναρίου για δεδομένα του 2024 φαίνεται στο **Σχήμα 6.3**.



**Σχήμα 6.3** Διάγραμμα Ροής Μάζας Σεναρίου Α (Απευθείας Ταφή) για το έτος 2024

Σύμφωνα με τα δεδομένα του διαγράμματος που απεικονίζεται στο **Σχήμα 6.3**, στο **Σχήμα 6.4** απεικονίζεται η ανάπτυξη του σχετικού μοντέλου της ΑΚΖ στο λογισμικό OpenLCA.



**Σχήμα 6.4 Ανάπτυξη Μοντέλου ΑΚΖ Σεναρίου Α (Απευθείας Ταφή) για το έτος 2024 στο λογισμικό OpenLCA**

#### 6.5.2 Σενάριο Β: Επεξεργασία σε ΜΕΑ (Μηχανική Επεξεργασία, Αναερόβια Χώνευση)

Το δεύτερο σενάριο που θα εξεταστεί αφορά στην υφιστάμενη διαχείριση των ΑΣΑ στη ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης. Στη συγκεκριμένη Μονάδα τα εισερχόμενα ΑΣΑ οδηγούνται σε κατάλληλη Μονάδα Υποδοχής ενώ στη συνέχεια, σύμφωνα με το **Σχήμα 6.2**, περνούν από κατάλληλες γραμμές μηχανικής επεξεργασίας (σχίστης σάκων, καμπίνα χειροδιαλογής, κόσκινα διαχωρισμού κλασμάτων (‘Α στάδιο (<130 mm, >130 mm και <250 mm, >250), ‘Β Στάδιο (<20mm, >20 mm και <70 mm, >70mm)), διαχωριστές (μαγνητικός, επαγωγικός, βαλλιστικός, οπτικός), καμπίνα ποιοτικού ελέγχου). Κύριος στόχος της μηχανικής επεξεργασίας είναι ο κατάλληλος διαχωρισμός ανακυκλώσιμων υλικών προς περαιτέρω επαναχρησιμοποίηση.

Ακολούθως, το οργανικό/βιοαποδομήσιμο κλάσμα οδηγείται προς βιολογική επεξεργασία με την τεχνολογία της αναερόβιας χώνευσης σε κλειστούς αντιδραστήρες διαλείποντος έργου, μέσω της οποίας παράγεται βιοαέριο προς περαιτέρω αξιοποίηση για παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας σε κατάλληλη Μονάδα Συμπαγωγής.

Με την ολοκλήρωση της βιολογικής επεξεργασίας το χωνεμένο υλικό οδηγείται προς πλατεία Κομποστοποίησης/Ωρίμανσης, όπου εναποτίθεται για κατάλληλο διάστημα σε αναδεδόμενους σωρούς, οι οποίοι καλύπτονται με κατάλληλη μεμβράνη. Με το πέρας

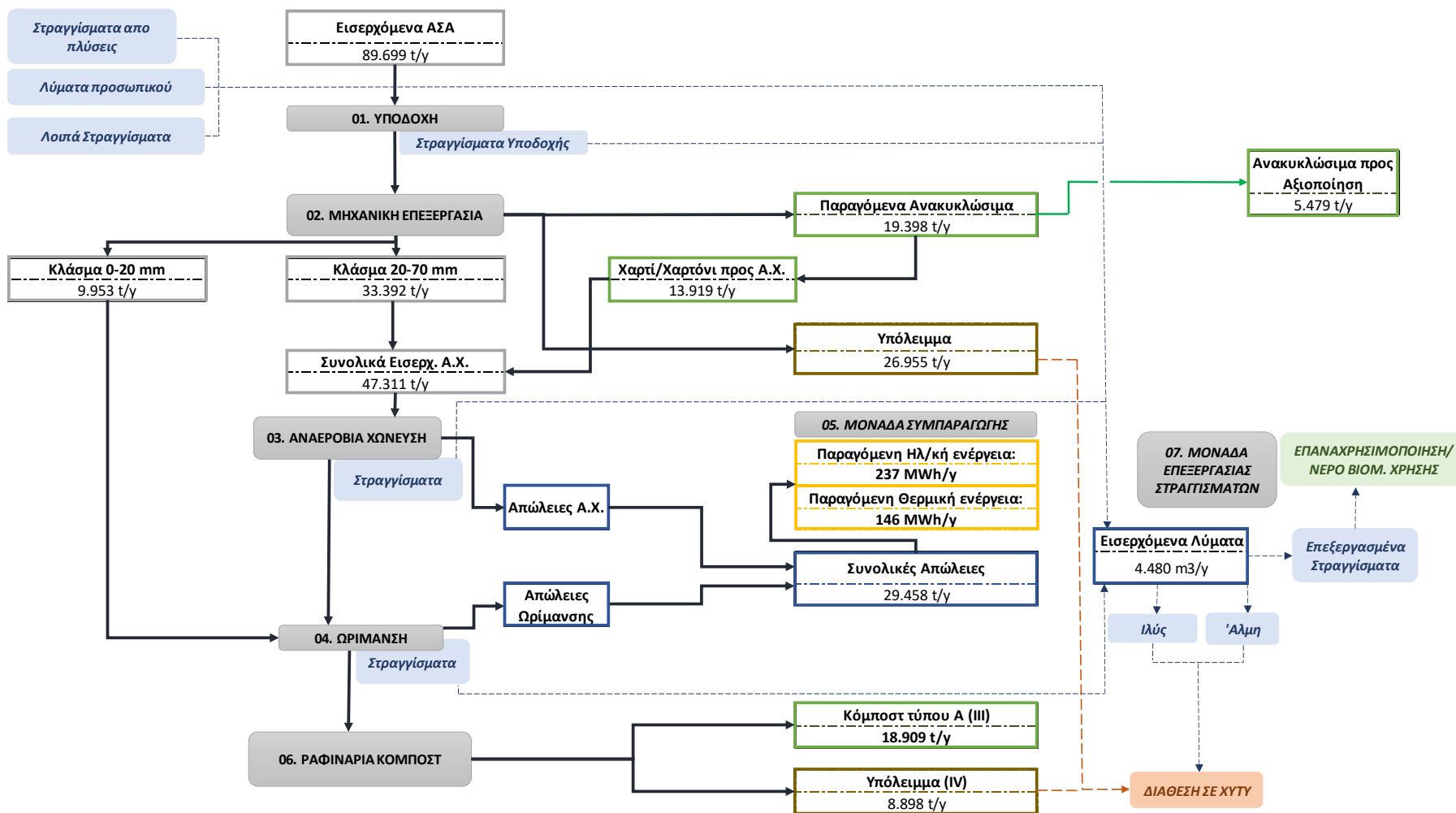
και αυτού του σταδίου ακολουθεί το στάδιο της επεξεργασίας σε μονάδα Ραφιναρίας με στόχο την παραγωγή κόμποστ τύπου Α.

Τα υπολείμματα από τα διάφορα στάδια επεξεργασίας οδηγούνται προς ταφή στο ΧΥΤ Αλεξανδρούπολης. Επιπλέον, τα παραγόμενα στραγγίσματα στα αντίστοιχα στάδια οδηγούνται για κατάλληλη επεξεργασία σε σχετική Μονάδα Επεξεργασίας Στραγγισμάτων, από την οποία προκύπτει ποσότητα νερού που μπορεί να αξιοποιηθεί ξανά για τις λειτουργικές ανάγκες της ΜΕΑ.

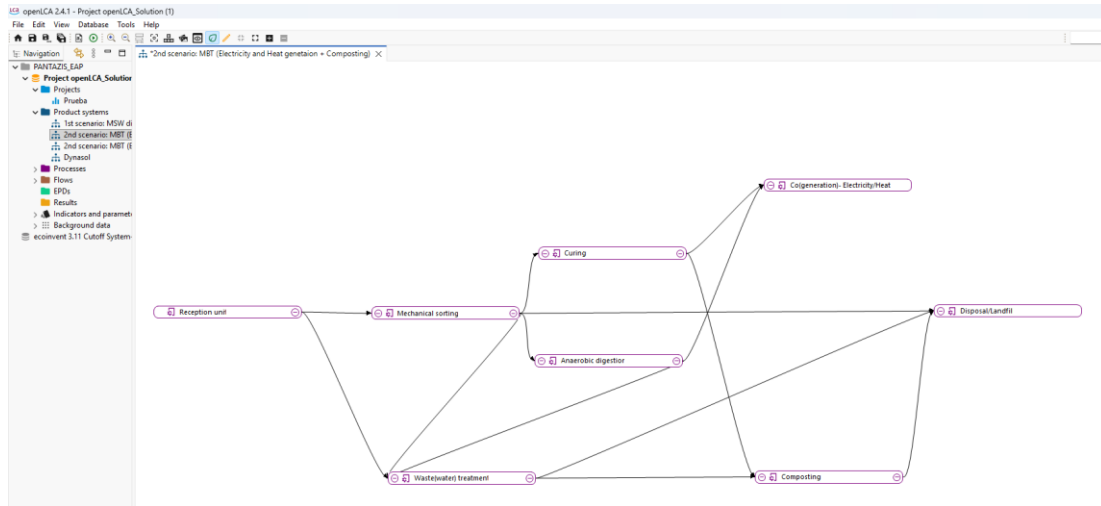
Το διάγραμμα ροής μάζας του συγκεκριμένου σεναρίου φαίνεται στο **Σχήμα 6.5**, ενώ ορισμένα επιπλέον στοιχεία για το έτος 2024 που αξιοποιούνται στα πλαίσια της ΑΚΖ είναι τα ακόλουθα:

- Ετήσια Καταναλισκόμενη Ενέργεια: 1.760 MWh
- Συνολική Παραγόμενη Ποσότητα Βιοαερίου: 332.537 m<sup>3</sup>
- Ετήσια Κατανάλωση Πετρελαίου στα οχήματα της Μονάδας: 184.630 L

Σύμφωνα με τα δεδομένα του διαγράμματος (**Σχήμα 6.5**), αναπτύχθηκε το αντίστοιχο μοντέλο ΑΚΖ στο λογισμικό OpenLCA, το οποίο παρουσιάζεται στο **Σχήμα 6.6**.



Σχήμα 6.5 Διάγραμμα Ροής Μάζας Σεναρίου Β (Επεξεργασία σε ΜΕΑ) για το έτος 2024



**Σχήμα 6.6 Ανάπτυξη Μοντέλου AKZ Σεναρίου Β (Επεξεργασία σε ΜΕΑ) για το έτος 2024 στο λογισμικό OpenLCA**

### 6.5.3 Σενάριο Γ: Επεξεργασία σε ΜΕΑ με προσθήκη σταδίου Ξήρανσης και συνεισφορά Ηλεκτρικής Ενέργειας από Φωτοβολταϊκά

Το τρίτο σενάριο που θα μελετηθεί αποτελεί μια πρόταση αναβάθμισης της υφιστάμενης Μονάδας με κύριο γνώμονα την εφαρμογή του νέου πλαισίου διαχείρισης αποβλήτων για την επίτευξη των στόχων που έχουν τεθεί από την ΕΕ. Η μοντελοποίηση του συγκεκριμένου σεναρίου βασίζεται στην τρέχουσα λειτουργία της ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης με δύο σημαντικές τροποποιήσεις/αναβαθμίσεις στην κατεύθυνση της ενίσχυσης της ενεργειακής της αυτονομίας και της μείωσης του ανθρακικού αποτυπώματος.

Ειδικότερα, η πρώτη τροποποίηση αφορά στην προσθήκη κατάλληλου φωτοβολταϊκού συστήματος, το οποίο θα έχει τη δυνατότητα να διοχετεύει μέρος της συνολικά απαιτούμενης, για τη λειτουργία της Μονάδας, ηλεκτρικής ενέργειας. Η κύρια σκέψη για τη συγκεκριμένη αναβάθμιση στηρίζεται κυρίως στον περιορισμό της εξάρτησης της ΜΕΑ από το συμβατικό δίκτυο της ηλεκτρικής ενέργειας. Η χρήση φωτοβολταϊκών αποτελεί μια ώριμη τεχνολογία με αξιόλογα αποτελέσματα και σαφές επενδυτικό και λειτουργικό κόστος, ενώ επίσης παρέχει τη δυνατότητα για αξιοποίηση των διαθέσιμων αναξιοποίητων χώρων/επιφανειών της ΜΕΑ (πχ οροφές κτιρίων).

Παράλληλα, η πρόταση αυτή συντάσσεται με τις απαιτήσεις του άρθρου 19 του Εθνικού Κλιματικού Νόμου (Ν.4936), σχετικά με τη μείωση των παραγόμενων

εκπομπών από τις διάφορες εγκαταστάσεις (μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος κατά 30% έως το 2030 σε σχέση με το πρώτο έτος λειτουργίας).

Στα πλαίσια της εργασίας η ισχύς του φωτοβολταϊκού συστήματος θα επιλεγεί στα 699,6 kW, σύμφωνα με τις διαθέσιμες επιφάνειες και τις δυνατότητες εγκατάστασης που παρουσιάζει η Μονάδα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη ισχύς, σύμφωνα με τα σχετικά στοιχεία ετήσιας κατανάλωσης για το έτος 2024, δύναται να καλύψει, στην παρούσα λειτουργία της ΜΕΑ, ένα ποσοστό 40-57% της συνολικά απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας ετησίως (εκτίμηση για δυνατότητα παραγωγής 605 MWh ετησίως).

Η δεύτερη προσθήκη αφορά στην αντικατάσταση των υφιστάμενων σταδίων Κομποστοποίηση/Ωρίμανσης και Ραφιναρίας Κόμποστ με κατάλληλο στάδιο Ξήρανσης, το οποίο παρέχει τη δυνατότητα παραγωγής καυσίμου SRF. Η τεχνολογία που επιλέγεται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας είναι αυτή του Attritor Mill, το οποίο έχει ως αρχή λειτουργίας την κρούση και την τριβή σε κατάλληλο θάλαμο, εντός του οποίου λαμβάνει χώρα θρυμματισμός των απορριμμάτων με χρήση κατάλληλων σφαιριδίων.

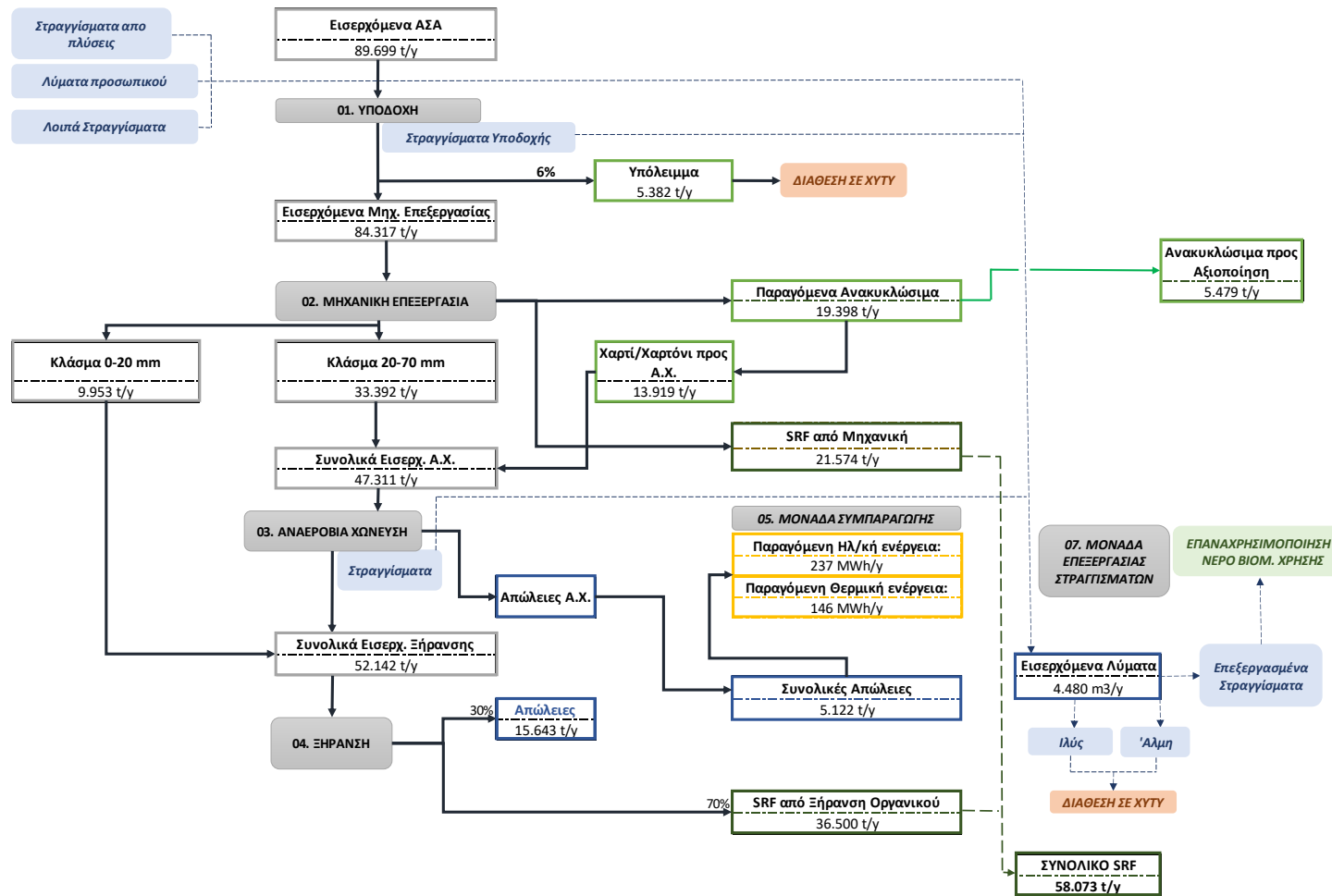
Σύμφωνα με τους κατασκευαστές, η σύγκρουση αυτή προκαλεί τιμές πίεσης που υπερβαίνουν τα 100 MPa. Στην περίπτωση που τα απόβλητα δεν έχουν υγρασία προκαλείται θρυμματισμός, ενώ στην περίπτωση που αυτά περιέχουν υγρασία αυτή αποβάλλεται με τη μορφή υδρατμών, οι οποίοι αναρροφώνται από το σύστημα απαγωγής, με αποτέλεσμα τη μείωση του όγκου και του βάρους (κρούση). Οι συνεχείς συγκρούσεις των μεταλλικών σφαιριδίων με τα απόβλητα προκαλούν αύξηση της θερμοκρασίας, η οποία ενδέχεται να ξεπεράσει τους 100°C (τριβή).

Η τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μεγάλο εύρος απορριμμάτων (πχ σύμμεκτα, υπόλειμμα), ενώ εξασφαλίζει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με λοιπές, συμβατικές μεθόδους ξήρανσης και βιοξήρανσης, όπως μείωση του όγκου των επεξεργασμένων απορριμμάτων, μικρούς χρόνους επεξεργασίας, περιορισμένες απαιτήσεις σε χώρο εγκατάστασης και ομοιογενές τελικό προϊόν.

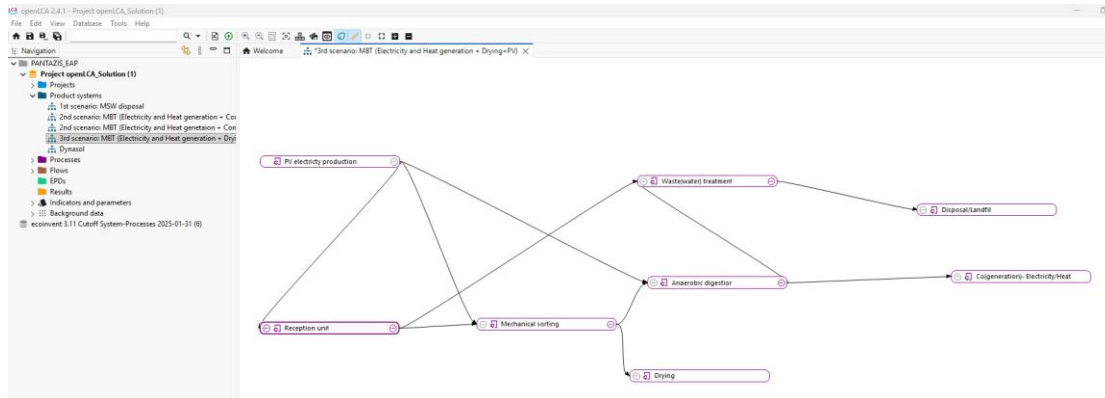
Η δυνατότητα παραγωγής δευτερογενούς καυσίμου μειώνει τα ποσοστά υπολείμματος που εξέρχεται προς ταφή από τις σχετικές ΜΕΑ, συμβάλλοντας ουσιαστικά με τον τρόπο αυτό την επίτευξη στόχων, όπως η μείωση της ταφής ΑΣΑ στο 10% μέχρι το 2035, όπως αυτή έχουν τεθεί από τη σχετική νομοθεσία και το ΕΣΔΑ (Πράξη 39 της 31.8, 2020). Το συγκεκριμένο καύσιμο είναι κατάλληλο για περαιτέρω αξιοποίηση σε

συστήματα με κατάλληλες υποδομές, όπως ή τσιμεντοβιομηχανία, ή σε μονάδες καύσης, οι οποίες πρόκειται να κατασκευαστούν στη χώρα μας σύμφωνα με το ΕΣΔΑ (Πράξη 39 της 31.8, 2020) και τη σχετική Στρατηγική Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΣΜΠΕ, 2025).

Με βάση τα δεδομένα του διαγράμματος ροής (**Σχήμα 6.7**) αναπτύχθηκε το αντίστοιχο μοντέλο ΑΚΖ στο λογισμικό OpenLCA, όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 6.8**.



Σχήμα 6.7 Διάγραμμα Ροής Μάζας Σεναρίου Γ (Επεξεργασία σε ΜΕΑ με προσθήκη σταδίου Ξήρανσης και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά) για το έτος 2024



**Σχήμα 6.8** Ανάπτυξη Μοντέλου AKZ Σεναρίου Γ (Επεξεργασία σε ΜΕΑ με προσθήκη σταδίου Ξήρανσης και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά) για το έτος 2024 στο λογισμικό OpenLCA

## 6.6 Εκτίμηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (LCIA)

Η επιλογή των κατηγοριών περιβαλλοντικών επιπτώσεων που μελετήθηκαν βασίστηκε στο Διεθνές Σύστημα Αναφοράς Δεδομένων Κύκλου Ζωής (ILCD – International Reference Life Cycle Data System) της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Joint Research Centre, 2010) και στις κατευθυντήριες οδηγίες του Joint Research Centre (JRC) για την εφαρμογή της AKZ (Joint Research Centre, 2012). Οι συγκεκριμένες κατηγορίες χρησιμοποιούνται ευρέως σε μελέτες AKZ αποβλήτων και επιτρέπουν σύγκριση με υπάρχουσα βιβλιογραφία για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων.

Επιπλέον ως δείκτης για τη ροή της ενέργειας επιλέχθηκε η αθροιστική ζήτηση ενέργειας (Cumulative Energy Demand) (Frischknecht et al., 2015), ένας από τους πλέον γνωστούς και διαδεδομένους δείκτες της AKZ, ο οποίος καταγράφει το σύνολο της πρωτογενούς ενέργειας (άμεσης και έμμεσης) που καταναλώνεται σε όλο τον κύκλο ζωής ενός προϊόντος ή μιας υπηρεσίας.

Αναλυτικότερα, οι κατηγορίες των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που εξετάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας AKZ παρατίθενται στον **Πίνακα 6.1**.

### Πίνακας 6.1 Κατηγορίες επιλεχθέντων περιβαλλοντικών επιπτώσεων και αθροιστικής ζήτησης ενέργειας κατά ILCD και JRC

Κατηγορίες Επιπτώσεων	Συνομογραφία	Μονάδα Αναφοράς
Δυναμικό Οξύτητας / Acidification potential	AP	[kg SO <sub>2</sub> -eq]
Δυναμικό Ευτροφισμού / Eutrophication potential	EP	[kg PO <sub>4</sub> -eq]
Δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη (100 έτη) / Global warming potential (100 years)	GWP100	[kg CO <sub>2</sub> -eq]
Δυναμικό καταστροφής του στρώματος όζοντος / Ozone layer depletion potential	ODP	[mg CFC-11-eq]
Δυναμικό δημιουργίας φωτοχημικού όζοντος / Photochemical ozone creation potential	POCP	[kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq]
Δυναμικό εξάντλησης των αβιοτικών πόρων – μη ορυκτοί πόροι / Abiotic depletion, elements	ADP	[kg Sb-eq.]
Κατανάλωση ύδατος / Freshwater consumption	FWC	[m <sup>3</sup> ]
Χρήση γης / Land use	LU	[m <sup>2</sup> a crop eq.]
Αθροιστική ζήτηση ενέργειας / Cumulative energy demand	CED	[MJ]

#### 6.7 Περιορισμοί-Υποθέσεις-Παραδοχές

Στην παρούσα εργασία, προκειμένου να είναι δυνατή η ολοκλήρωση της εφαρμογής της ΑΚΖ στα τρία υπό μελέτη σενάρια και έχοντας ως βασική επιδίωξη τα τελικά αποτελέσματα να χαρακτηρίζονται από συνέπεια, ακεραιότητα και συγκρισιμότητα ώστε να επιτυγχάνεται η εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων, ελήφθησαν υπόψη οι ακόλουθες παραδοχές:

- Λειτουργική μονάδα (Functional Unit): Ως λειτουργική μονάδα ορίστηκε η επεξεργασία 89.699 t ΑΣΑ ανά έτος (έτος αναφοράς 2024) και για τα 3 σενάρια

- Όρια συστήματος (System Boundaries):

Η ανάλυση περιλαμβάνει:

- Υποδοχή / εκφόρτωση / εσωτερική διακίνηση
- Μηχανική επεξεργασία
- Βιολογική επεξεργασία (αναερόβια χώνευση)
- Συμπαγωγή ενέργειας (CHP)
- Κομποστοποίηση / ή ξήρανση (ανά σενάριο)
- Επεξεργασία στραγγισμάτων
- Διάθεση υπολειμμάτων σε ΧΥΤ

- Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και καυσίμων

Δεν περιλαμβάνονται:

- Κατασκευή υποδομών και εξοπλισμού
- Μεταφορά ΑΣΑ από τον δήμο προς τη ΜΕΑ
- Τελική αξιοποίηση SRF (π.χ. καύση σε τσιμεντοβιομηχανία)
- Χρήση κόμποστ στο έδαφος
- Υποθέσεις για το 1<sup>ο</sup> Σενάριο (Ταφή):
  - Όλα τα ΑΣΑ οδηγούνται σε ΧΥΤ χωρίς επεξεργασία
  - Δεν υπάρχει ανάκτηση υλικών και ανάκτηση ενέργειας
  - Οι εκπομπές μεθανίου από το ΧΥΤ θεωρούνται σημαντικές και δεν λαμβάνεται ανάκτηση βιοαερίου
- Υποθέσεις για το 2<sup>ο</sup> Σενάριο (ΜΕΑ):
  - Το βιοαέριο αξιοποιείται πλήρως σε CHP
  - Η παραγόμενη ενέργεια: υποκαθιστά ηλεκτρική ενέργεια δικτύου,
  - Το κόμποστ δε λαμβάνει περιβαλλοντική πίστωση (συντηρητική προσέγγιση (conservative approach))
- Υποθέσεις για το 3<sup>ο</sup> Σενάριο (Αναβάθμιση-Ξήρανση/PV):
  - Φωτοβολταϊκό σύστημα: Ισχύς: 699,6 kW, Παραγωγή: 605 MWh/έτος, καλύπτει ~40–57% της κατανάλωσης
  - Ξήρανση/SRF: Αντικαθιστά κομποστοποίηση, μειώνει τα υπολείμματα προς ταφή, δεν αποδίδεται πίστωση από αξιοποίηση SRF (συντηρητική προσέγγιση)
- Η κατανάλωση ενέργειας κατανέμεται στα στάδια: Υποδοχή, Μηχανική επεξεργασία, Βιολογική επεξεργασία κ.λπ.
- Υποθέσεις για το CHP: Απόδοση μετατροπής βιοαερίου: ~2 kWh/m<sup>3</sup>. Η ενέργεια χρησιμοποιείται εντός της μονάδας και μειώνει ανάγκη από δίκτυο
- Υποθέσεις για PV (Σενάριο 3):
  - Η παραγόμενη ενέργεια υποκαθιστά πλήρως ενέργεια δικτύου
  - Δεν λαμβάνεται υπόψη: κατασκευή πάνελ και απόσβεση εξοπλισμού

## 7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΚΖ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

### 7.1 Αποτελέσματα – Σύγκριση εναλλακτικών σεναρίων

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή ΑΚΖ με χρήση του λογισμικού OpenLCA για τα τρία υπό μελέτη σενάρια διαχείρισης των ΑΣΑ παρατίθενται αναλυτικά στον **Πίνακα 7.1**. Τα συγκεκριμένα αποτελέσματα, τα οποία προέκυψαν από τη μελέτη κάθε σεναρίου εντός των ορίων του αντίστοιχου συστήματος και για το σύνολο των απαιτούμενων διεργασιών, παρουσιάζονται σε απόλυτες τιμές και εκφράζονται ανά λειτουργική μονάδα [Επεξεργασία 89.699 t ΑΣΑ ανά έτος (έτος αναφοράς 2024)].

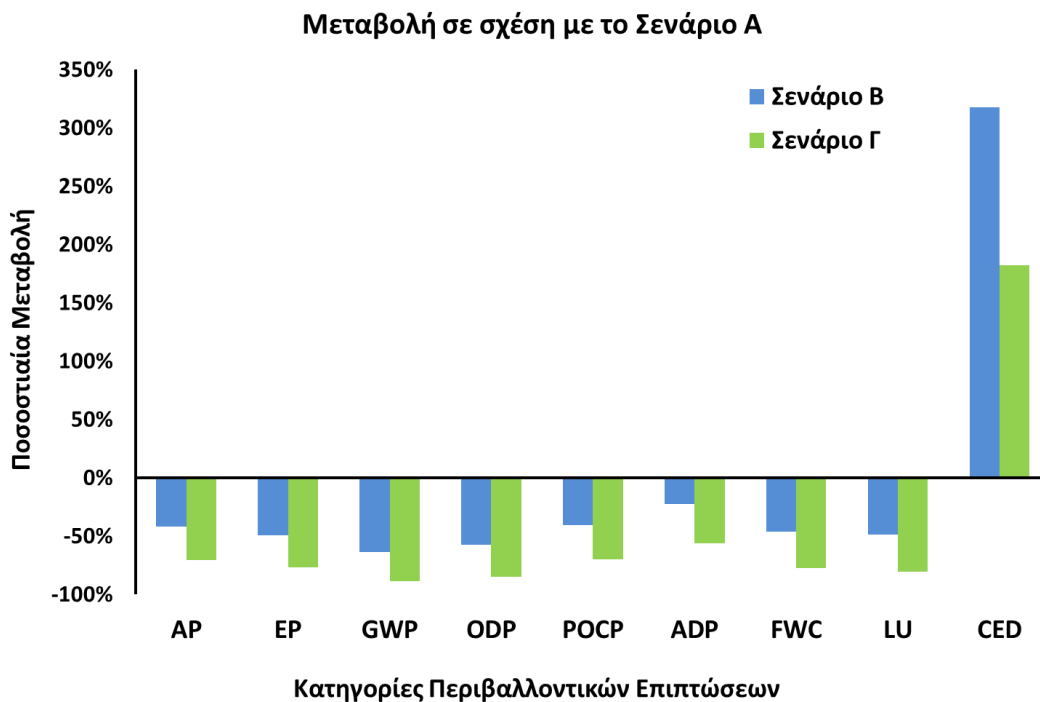
**Πίνακας 7.1 Αποτελέσματα περιβαλλοντικών επιπτώσεων και αθροιστικής ζήτησης ενέργειας για τα υπό μελέτη τρία σενάρια διαχείρισης των ΑΣΑ**

Κατηγορίες Επιπτώσεων	Σενάριο Α	Σενάριο Β	Σενάριο Γ
Δυναμικό Οξύτητας (AP) [kg SO <sub>2</sub> -eq]	5,83E+04	3,39E+04	1,73E+04
Δυναμικό Ευτροφισμού (EP) [kg PO <sub>4</sub> -eq]	1,97E+04	1,00E+04	4,61E+03
Δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη (100 έτη) (GWP <sub>100</sub> ) [kg CO <sub>2</sub> -eq]	1,07E+08	3,92E+07	1,20E+07
Δυναμικό καταστροφής του στρώματος όζοντος (ODP) [kg CFC-11-eq]	4,48E+05	1,92E+05	6,86E+04
Δυναμικό δημιουργίας φωτοχημικού όζοντος (POCP) [kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq]	7,18E+06	4,27E+06	2,14E+06
Δυναμικό εξάντλησης των αβιοτικών πόρων – μη ορυκτοί πόροι (ADP) [kg Sb-eq.]	7,18E+04	5,58E+04	3,12E+04
Κατανάλωση ύδατος (FWC) [m <sup>3</sup> ]	2,24E+04	1,20E+04	5,06E+03
Χρήση γης (LU) [m <sup>2</sup> a crop eq.]	1,97E+05	1,01E+05	3,87E+04
Αθροιστική ζήτηση ενέργειας (CED) [MJ]	4,48E+06	1,87E+07	1,27E+07

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του **Πίνακα 7.1**, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι οι δείκτες των περιβαλλοντικών επιπτώσεων μειώνονται στο σύνολο τους σε σχέση με το σενάριο Α τόσο για την εφαρμογή του Σεναρίου Β, όσο και του Σεναρίου Γ, γεγονός που επιβεβαιώνει ότι η απευθείας απόρριψη ΑΣΑ για ταφή χωρίς επεξεργασία, από περιβαλλοντικής άποψης είναι σαφώς το χειρότερο σενάριο. Συγκεκριμένα, για το σενάριο Β (Επεξεργασία ΑΣΑ σε ΜΕΑ) τα ποσοστά μείωσης κυμαίνονται από 22% (για το δείκτη ADP) μέχρι και 64% (για το δείκτη GWP100), ενώ για το σενάριο Γ (προσθήκη σταδίου Ξήρανσης και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από

φωτοβολταϊκά) τα ποσοστά μείωσης κυμαίνονται από 57% (για το δείκτη ADP) μέχρι και 89% (για το δείκτη GWP100).

Σχετικά με την αθροιστική ζήτηση ενέργειας, από τον **Πίνακα 7.1** προκύπτει ότι τα σενάρια Β και Γ έχουν αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις σε σχέση με το σενάριο Α. Αναλυτικότερα, οι ενεργειακές απαιτήσεις του σεναρίου Β αυξάνονται σε ποσοστό 317% σε σχέση με το σενάριο Α, ενώ για το σενάριο Γ η αντίστοιχη αύξηση κυμαίνεται σε ποσοστό 182%. Η αύξηση αυτή αποδίδεται κυρίως στις πρόσθετες διεργασίες που περιλαμβάνονται στο Σενάριο Β, όπως η μηχανική επεξεργασία, η ανάκτηση ανακυκλώσιμων υλικών, η αναερόβια χώνευση, η παραγωγή και αξιοποίηση βιοαερίου, καθώς και στα επιπρόσθετα βοηθητικά συστήματα και τις απαιτούμενες μεταφορές). Αντίστοιχα, στο Σενάριο Γ η αυξημένη ενεργειακή απαίτηση αποδίδεται επιπλέον στην ενσωμάτωση του σταδίου ξήρανσης για την παραγωγή δευτερογενούς στερεού καυσίμου (SRF), το οποίο αποτελεί ενεργοβόρα διεργασία. Ωστόσο, η συνεισφορά του φωτοβολταϊκού συστήματος και η ενεργειακή αξιοποίηση των παραγόμενων ρευμάτων συμβάλλουν στον περιορισμό της συνολικής ενεργειακής επιβάρυνσης, με αποτέλεσμα το Σενάριο Γ να εμφανίζει χαμηλότερη αθροιστική ζήτηση ενέργειας σε σχέση με το Σενάριο Β.



**Σχήμα 7.1 Ποσοστιαία μεταβολή περιβαλλοντικού αποτυπώματος Σεναρίων Β και Γ συγκρινόμενα με σενάριο Α (σενάριο αναφοράς)**

Η ποσοστιαία μεταβολή του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των Σεναρίων Β και Γ σε σύγκριση με το Σενάριο Α παρουσιάζεται στο **Σχήμα 7.1**.

Αναλύοντας περαιτέρω τα αποτελέσματα του **Πίνακα 7.1**, παρατηρείται ότι σε σχέση με το σενάριο Β, στο σύνολο τους οι δείκτες των περιβαλλοντικών επιπτώσεων για το σενάριο Γ προκύπτουν μειωμένοι, γεγονός που πιστοποιεί ότι η συγκεκριμένη διαχείριση βελτιώνει από περιβαλλοντικής άποψης τη λειτουργία της ΜΕΑ. Κατατάσσοντας τα αποτελέσματα αυξανόμενα σύμφωνα με τη σχετική ποσοστιαία διαφορά, παρατηρείται ότι το Δυναμικό εξάντλησης των αβιοτικών πόρων μειώνεται από  $5,58 \cdot 10^4$  kg Sb-eq. για το σενάριο Β σε  $3,12 \cdot 10^4$  kg Sb-eq. στο σενάριο Γ, ποσοστό που αντιστοιχεί σε μείωση της τάξης του 44%. Αντιστοίχως ακολουθούν το Δυναμικό Οξύτητας (μείωση από  $3,39 \cdot 10^4$  kg SO<sub>2</sub>-eq σε  $1,73 \cdot 10^4$  kg SO<sub>2</sub>-eq, ποσοστό μείωσης 49%), το Δυναμικό δημιουργίας φωτοχημικού όζοντος (μείωση από  $4,27 \cdot 10^6$  kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>-eq σε  $2,14 \cdot 10^6$  kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>-eq, ποσοστό μείωσης 50%), το Δυναμικό Ευτροφισμού (μείωση από  $1,00 \cdot 10^4$  kg PO<sub>4</sub>-eq σε  $0,461 \cdot 10^4$  kg PO<sub>4</sub>-eq, ποσοστό μείωσης 54%), η Κατανάλωση ύδατος (μείωση από  $1,20 \cdot 10^4$  m<sup>3</sup> σε  $0,506 \cdot 10^4$  m<sup>3</sup>, ποσοστό μείωσης 58%), η Χρήση γης (μείωση από  $10,1 \cdot 10^4$  m<sup>2</sup>·a crop eq. σε  $3,87 \cdot 10^4$  m<sup>2</sup>·a crop eq., ποσοστό μείωσης 62%) και το Δυναμικό καταστροφής του στρώματος όζοντος (μείωση από  $19,2 \cdot 10^4$  kg CFC-11-eq σε  $6,86 \cdot 10^4$  kg CFC-11-eq, ποσοστό μείωσης 64%). Τέλος, η μεγαλύτερη μείωση σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την εφαρμογή του σεναρίου Γ σε σχέση με το σενάριο Β παρατηρείται για το Δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη σε ορίζοντα 100 ετών, όπου για το σενάριο Β προκύπτει η τιμή  $3,92 \cdot 10^7$  kg CO<sub>2</sub>-eq., ενώ για το σενάριο Γ η τιμή αυτή μειώνεται σε  $1,20 \cdot 10^7$  kg CO<sub>2</sub>-eq., που αντιστοιχεί σε μείωση της τάξης του 69%.

Για την αθροιστική ζήτηση ενέργειας, όπως αναφέρθηκε, το σενάριο Α είναι το λιγότερο ενεργοβόρο, γεγονός που αιτιολογείται από την απουσία σημαντικού ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού σε σχέση με τα Σενάρια Β και Γ. Οι ενεργειακές απαιτήσεις του συγκεκριμένου σεναρίου ανέρχονται σε  $448 \cdot 10^4$  MJ/FU (όπου FU: ετήσια επεξεργασία 89.699 t ΑΣΑ (έτος αναφοράς 2024)). Οι αντίστοιχες απαιτήσεις για το σενάριο Β αυξάνονται σημαντικά στα  $1.870 \cdot 10^4$  MJ/FU, ενώ για το σενάριο Γ περιορίζονται στα  $1.270 \cdot 10^4$  MJ/FU, γεγονός που οφείλεται εν μέρει και στην συνεισφορά των φωτοβολταϊκών στην απαιτούμενη ενέργεια. Αν και, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της αθροιστικής ζήτησης ενέργειας, το Σενάριο Α εμφανίζει χαμηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις, οι αυξημένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις που

προκύπτουν σε σύγκριση με εναλλακτικές και πιο ολοκληρωμένες μεθόδους διαχείρισης, όπως αυτές που εξετάζονται στα Σενάρια Β και Γ, το καθιστούν συνολικά μη προτιμητέα επιλογή για σύγχρονα και ολοκληρωμένα συστήματα διαχείρισης ΑΣΑ.

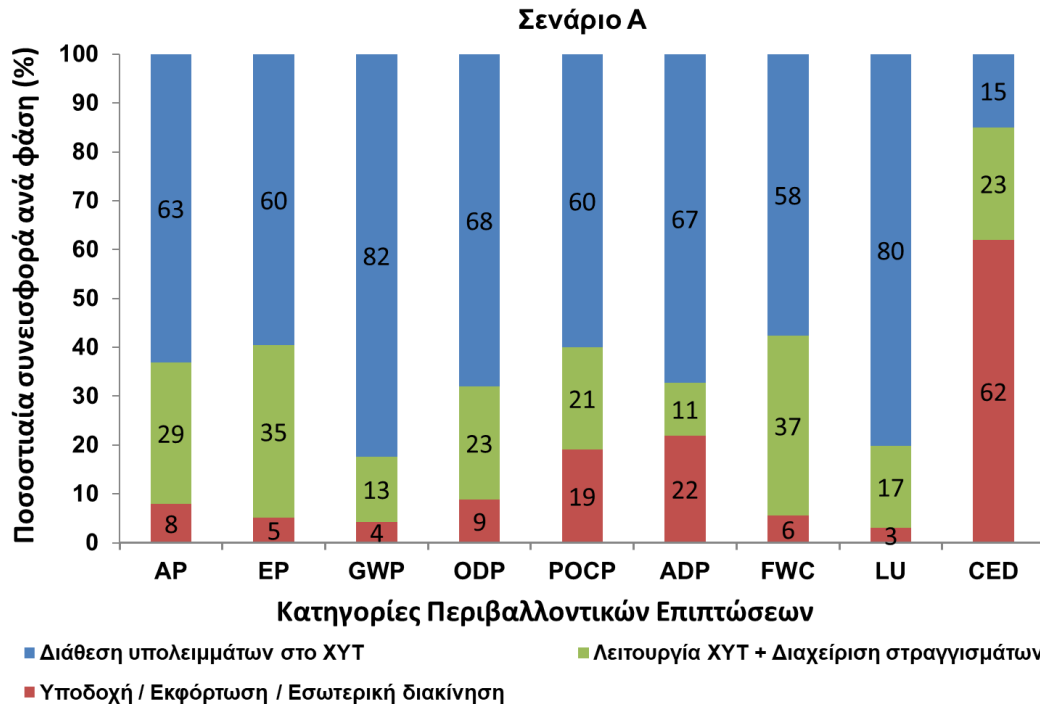
## 7.2 Ανάλυση Συνεισφοράς (Contribution Analysis)

Στην παρούσα ενότητα αναλύεται η συνεισφορά κάθε επιμέρους διεργασίας που λαμβάνει χώρα στο πλαίσιο των τριών υπό μελέτη σεναρίων διαχείρισης ΑΣΑ στους εξεταζόμενους δείκτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων, καθώς και στην αθροιστική ζήτηση ενέργειας.

### 7.2.1 Σενάριο Α

Το σενάριο Α αφορά απευθείας ταφή των ΑΣΑ χωρίς πρότερη επεξεργασία. Όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 7.2**, σε αυτή την περίπτωση οι περιβαλλοντικοί δείκτες επηρεάζονται κατά κύριο λόγο από τη διάθεση των ΑΣΑ/υπολειμμάτων στο χώρο του ΧΥΤ. Τα ποσοστά αυτά συνεισφοράς για τους διάφορους περιβαλλοντικούς δείκτες κυμαίνονται από 58% (Κατανάλωση ύδατος-FWC) έως 82% (Δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη (100 έτη)-GWP100).

Επιπλέον, οι συγκριμένοι δείκτες επηρεάζονται επίσης από τη λειτουργία του ΧΥΤ και τη διαχείριση των στραγγισμάτων που λαμβάνει χώρα σε αυτόν, καθώς και από τις όποιες διεργασίες λαμβάνουν χώρα για την υποδοχή, την εκφόρτωση και την εσωτερική μετακίνηση των ΑΣΑ μέχρι τη θέση τελικής ταφής στο ΧΥΤ. Σύμφωνα με το **Σχήμα 7.2**, τα σχετικά ποσοστά συνεισφοράς της υποδοχής/εκφόρτωσης/εσωτερικής διακίνησης είναι μικρότερα από τα αντίστοιχα ποσοστά λειτουργίας/διαχείρισης στραγγισμάτων για τους περισσότερους δείκτες, πλην του δυναμικού εξάντλησης των αβιοτικών πόρων–μη ορυκτοί πόροι (ADP) όπου το ποσοστό συνεισφοράς υποδοχής/εκφόρτωσης/εσωτερικής διακίνησης είναι σχεδόν διπλάσια.



**Σχήμα 7.2** Ανάλυση ποσοστών συνεισφοράς επιμέρους διεργασιών για το Σενάριο Α στις υπό μελέτη κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων και στην αθροιστική ζήτηση ενέργειας

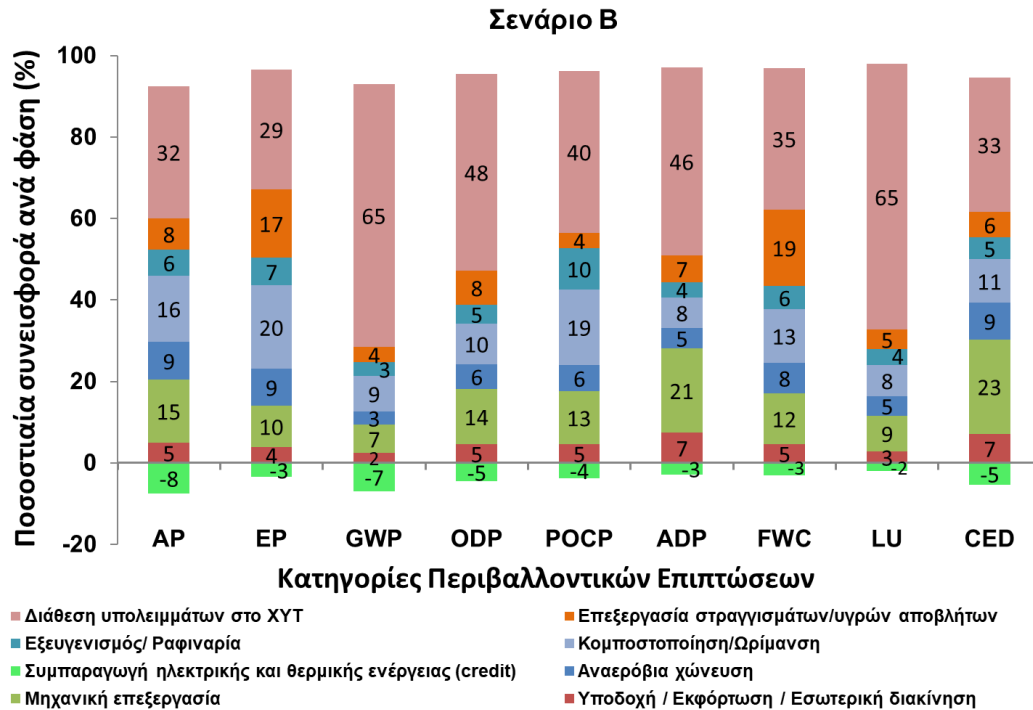
Η ποσοστιαία συνεισφορά των προαναφερθέντων διεργασιών αλλάζει για την αθροιστική ζήτηση ενέργειας, όπου οι ενέργειες που απαιτούνται στο τμήμα υποδοχής/εκφόρτωση/εσωτερικής διακίνησης καθορίζουν το σχετικό δείκτη σε μεγαλύτερο ποσοστό (62%), με τη λειτουργία του ΧΥΤ-Διαχείριση στραγγισμάτων (23%) και διάθεση υπολειμμάτων (15%) να ακολουθούν.

### 7.2.2 Σενάριο Β

Το συγκεκριμένο σενάριο αφορά την επεξεργασία των ΑΣΑ στη ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης. Οι βασικές διεργασίες για τις οποίες μελετήθηκε η συνεισφορά στη συνολική επεξεργασία είναι οι κύριες βαθμίδες από τις οποίες αποτελείται η συγκεκριμένη Μονάδα (Υποδοχή, Μηχανική διαλογή, Αναερόβια χώνευση, Ωρίμανση, Ραφιναρία, Μονάδα επεξεργασίας στραγγισμάτων, Μονάδα συμπαραγωγής), καθώς και η διάθεση των υπολειμμάτων στο ΧΥΤ.

Τα κανονικοποιημένα ποσοστά συνεισφοράς καθεμίας από τις παραπάνω διεργασίες στις εξεταζόμενους δείκτες των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και στη συνολική

ζήτηση ενέργειας παρουσιάζονται αναλυτικά στο **Σχήμα 7.3**. Οι αρνητικές τιμές των ποσοστιαίων μεταβολών των περιβαλλοντικών δεικτών αντιστοιχούν σε περιβαλλοντική πίστωση (environmental credit), η οποία προκύπτει από την αποφυγή περιβαλλοντικών επιπτώσεων λόγω στις συμπαραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας.



**Σχήμα 7.3** Ανάλυση ποσοστών συνεισφοράς επιμέρους διεργασιών για το Σενάριο Β στις υπό μελέτη κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων και στην αθροιστική ζήτηση ενέργειας.

Από το **Σχήμα 7.3** προκύπτει ότι για το σύνολο των περιβαλλοντικών δεικτών η διεργασία με τη μεγαλύτερη συνεισφορά είναι η διάθεση των υπολειμμάτων στο ΧΥΤ (ποσοστά συνεισφοράς από 29% μέχρι 65%). Συγκεκριμένα, για τους δείκτες Δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη (100 έτη) (GWP100) και Χρήση γης (LU) το συγκεκριμένο ποσοστό κυμαίνεται σε υψηλά ποσοστά (65%) υπερτερώντας σε σχέση με τη συνεισφορά των λοιπών διεργασιών, οι οποίες κυμαίνονται σε μονοψήφια ποσοστά. Για τις υπόλοιπες κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων δεν παρατηρείται συγκεκριμένο πρότυπο (μοτίβο) συνεισφοράς, καθώς τα ποσοστά διαφοροποιούνται ανάλογα με τον εξεταζόμενο δείκτη και κυμαίνονται από μονοψήφιας τιμές έως 21%.

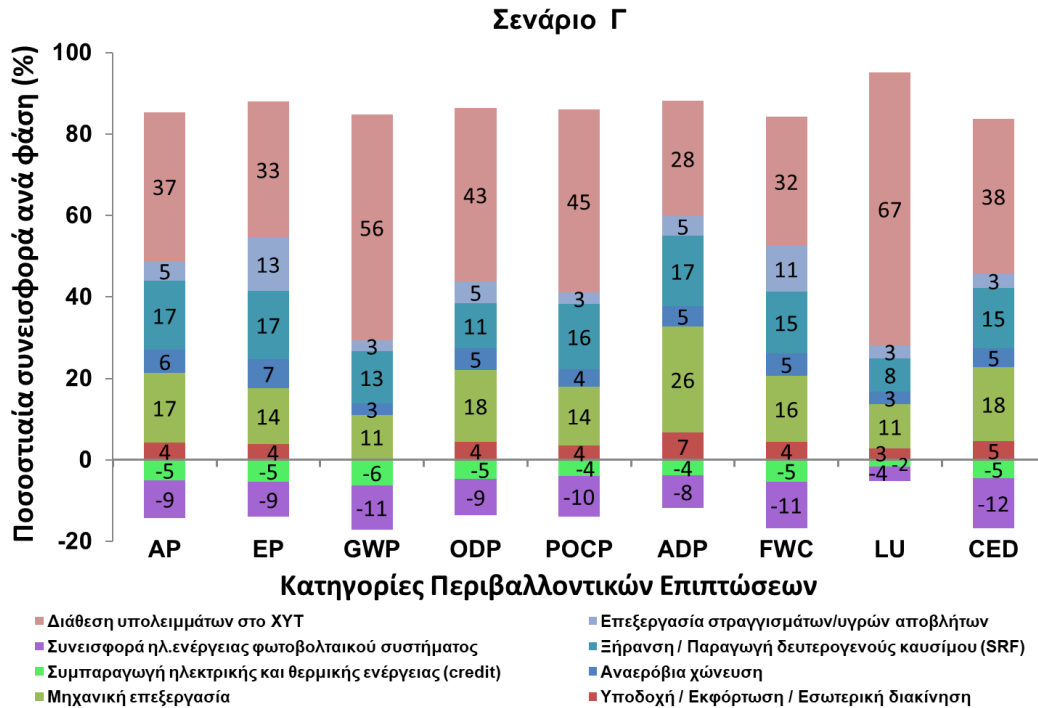
Θα πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι η συνεισφορά της μονάδας συμπαραγωγής στους περιβαλλοντικούς δείκτες αποτιμάται ως περιβαλλοντική πίστωση (credit), παρουσιάζοντας αρνητική συνεισφορά με τιμές που κυμαίνονται από 2% έως 8%. Σχετικά με τη ζήτηση ενέργειας, οι δύο κυριότερες ενεργοβόρες διεργασίες είναι η μηχανική διαλογή (ποσοστό 23%) και η διάθεση υπολειμμάτων στο ΧΥΤ (33%), με τις διεργασίες της κομποστοποίησης/ωρίμανσης (11%) και της αναερόβιας χώνευσης (9%) να ακολουθούν. Τέλος, χαμηλότερη προκύπτει η συνεισφορά για διεργασίες όπως η Υποδοχή (7%), η Επεξεργασία των στραγγισμάτων (6%) και τέλος η Ραφιναρία (5%).

Η συνεισφορά της Μονάδας συμπαραγωγής λογίζεται ως credit και στην περίπτωση της ζήτησης ενέργειας με το σχετικό ποσοστό να ισούται με 5%.

### 7.2.3 Σενάριο Γ

Η συγκεκριμένη εναλλακτική αποτελεί αναβάθμιση του σεναρίου Β, όπου στα στάδια επεξεργασίας της ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης προστίθεται βαθμίδα Ξήρανσης για την παραγωγή SRF, ενώ αφαιρούνται οι βαθμίδες της Κομποστοποίησης/Ωρίμανσης και της Ραφιναρίας. Επιπλέον προστίθεται και το Φωτοβολταϊκό σύστημα, το οποίο συνεισφέρει ενεργειακά στη συνολική λειτουργία. Συνεπώς, στο συγκεκριμένο σενάριο οι βασικές διεργασίες για τις οποίες μελετήθηκε η συνεισφορά στη συνολική επεξεργασία είναι οι βαθμίδες της αναβαθμισμένης Μονάδας (Υποδοχή, Μηχανική διαλογή, Αναερόβια χώνευση, Ξήρανση/Παραγωγή SRF, Μονάδα επεξεργασίας στραγγισμάτων, Μονάδα συμπαραγωγής, Φωτοβολταϊκά), καθώς και η διάθεση των υπολειμμάτων στο ΧΥΤ.

Τα κανονικοποιημένα ποσοστά συνεισφοράς καθεμιάς από τις παραπάνω διεργασίες στους δείκτες των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και στη συνολική ζήτηση ενέργειας φαίνονται αναλυτικά στο **Σχήμα 7.4**. Αντίστοιχα με το Σενάριο Β, οι αρνητικές τιμές των ποσοστιαίων μεταβολών των περιβαλλοντικών δεικτών αντιστοιχούν σε περιβαλλοντική πίστωση (environmental credit), η οποία προκύπτει από την αποφυγή περιβαλλοντικών επιπτώσεων λόγω της συμπαραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας (μονάδα συμπαραγωγής) και της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές (περίπτωση φωτοβολταϊκών).



**Σχήμα 7.4** Ανάλυση ποσοστών συνεισφοράς επιμέρους διεργασιών για το Σενάριο Γ στις υπό μελέτη κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων και στην αθροιστική ζήτηση ενέργειας

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη μελέτη του **Σχήματος 7.4** παρουσιάζουν αρκετές ομοιότητες με αυτά που προέκυψαν από το **Σχήμα 7.3** του Σεναρίου Β, καθώς και στην περίπτωση του Σεναρίου Γ για το σύνολο των περιβαλλοντικών δεικτών η διεργασία με τη μεγαλύτερη συνεισφορά είναι η διάθεση των υπολειμμάτων στο ΧΥΤ (ποσοστά συνεισφοράς από 28% μέχρι 67%). Οι δείκτες που επηρεάζονται σε μεγαλύτερο βαθμό από τη συνεισφορά της διάθεσης των υπολειμμάτων είναι το Δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη (100 έτη) (56%) και η Χρήση γης (67%).

Επιπλέον, σχετικά με τη συνεισφορά της διεργασίας της Ξήρανσης/παραγωγής SRF παρατηρείται ότι πλην του δείκτη της Χρήση γης, για το σύνολο των υπόλοιπων περιβαλλοντικών δεικτών τα ποσοστά συνεισφοράς είναι διψήφια και κυμαίνονται από συνεισφορά της τάξης του 11% μέχρι 17%. Η έτερη διεργασία εντός των ορίων της ΜΕΑ, η οποία έχει σημαντική συνεισφορά στους περιβαλλοντικούς δείκτες, είναι η Μηχανική επεξεργασία, με τα αντίστοιχα ποσοστά συνεισφοράς να κυμαίνονται μεταξύ 11% και 26%. Οι λοιπές διεργασίες κυμαίνονται σε μονοψήφια ποσοστά συνεισφοράς, μικρότερα του 10%.

Όμοια με το σενάριο Β, η συνεισφορά της Μονάδας συμπαραγωγής στους περιβαλλοντικούς δείκτες λογίζεται ως credit, με τιμές που κυμαίνονται από 2% μέχρι και 6%. Αντίστοιχα και η συνεισφορά του Φωτοβολταϊκού συστήματος θεωρείται ως credit, με τις αντίστοιχες ποσοστιαίες τιμές να είναι μεγαλύτερες από αυτές της Μονάδας συμπαραγωγής για το σύνολο των περιβαλλοντικών δεικτών και να κυμαίνονται από 4% μέχρι 11%.

Σχετικά με τη ζήτηση ενέργειας, οι τρεις κυριότερες διεργασίες που απαιτούν μεγάλες ποσότητες ενέργειας είναι κατά σειρά η διάθεση υπολειμμάτων στο ΧΥΤ (38%), η Μηχανική επεξεργασία (18%) και η Ξήρανση (15%). Αρκετά χαμηλότερη είναι η συνεισφορά των υπόλοιπων διεργασιών (Υποδοχή (5%), Αναερόβια επεξεργασία (5%), Επεξεργασία στραγγισμάτων (3%)).

Η συνεισφορά της Μονάδας συμπαραγωγής λογίζεται ως credit με το σχετικό ποσοστό να ισούται με 5%, ενώ αντίστοιχα λογίζεται και η συνεισφορά του Φωτοβολταϊκού συστήματος, με το αντίστοιχο ποσοστό (12%) να είναι υπερδιπλάσιο από την αντίστοιχη συνεισφορά της Μονάδας συμπαραγωγής.

### 7.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων με βιβλιογραφία

Με την εξαγωγή των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την εφαρμογή της ΑΚΖ στα υπό μελέτη σενάρια της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε μια προσπάθεια σύγκρισης αντίστοιχων περιβαλλοντικών δεικτών για παρόμοιες μεθόδους/σενάρια διαχείρισης των ΑΣΑ, σύμφωνα με τα άρθρα της βιβλιογραφίας που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Η προσπάθεια αυτή επικεντρώθηκε στα άρθρα των (Abeliotis et al., 2012) και (Grosso et al., 2016), τα οποία διερευνούν παρόμοιες διεργασίες (πχ απευθείας ταφή, αξιοποίηση δευτερογενών καυσίμων) για τους αντίστοιχους δείκτες που παρουσιάζονται στους σχετικούς πίνακες. Ωστόσο, τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζουν σημαντικές διακυμάνσεις, γεγονός που δεν επέτρεψε την εξαγωγή ασφαλών και χρήσιμων συμπερασμάτων.

Οι κυριότεροι λόγοι που δυσχέραναν τη συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων σχετίζονται με τις διαφορετικές μεθοδολογικές προσεγγίσεις των επιμέρους μελετών, όπως διαφοροποιήσεις στη δυναμικότητα των μονάδων, στη λειτουργική μονάδα, στην ενσωμάτωση περιβαλλοντικών πιστώσεων από την αξιοποίηση SRF εντός των ορίων του συστήματος, καθώς και στην παράλειψη συγκεκριμένων διεργασιών κατά τη μοντελοποίηση (π.χ. μη συμπερίληψη της επεξεργασίας στραγγισμάτων στη μελέτη

των (Abeliotis et al., 2012)). Παρά τους περιορισμούς αυτούς, η ευρεία εφαρμογή της ΑΚΖ στον τομέα διαχείρισης ΑΣΑ και η ανάπτυξη μελλοντικών μελετών αναμένεται να βελτιώσουν τη διαθεσιμότητα συγκρίσιμων δεδομένων και να ενισχύσουν την εξαγωγή πιο αξιόπιστων και γενικεύσιμων συμπερασμάτων

## 8 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Ένα κρίσιμο πρόβλημα που απασχολεί το σύνολο των σύγχρονων κοινωνιών, τόσο σε ευρωπαϊκό, όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο, είναι η βέλτιστη διαχείριση των Αστικών Στερεών Αποβλήτων, οι ποσότητες των οποίων έχουν αυξητική τάση. Η επιλογή του βέλτιστου συστήματος διαχείρισης των ΑΣΑ καθορίζεται σε σημαντικό βαθμό από τη σύσταση αυτών, η οποία αντιστοίχως επηρεάζεται από μια σειρά κοινωνικών και οικονομικών παραγόντων, με το μέσο ετήσιο εισόδημα των πολιτών μιας χώρας να έχει βαρύνουσα σημασία.

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, η ΕΕ έχει καθορίσει μια σειρά οδηγιών για τα κράτη μέλη της, σύμφωνα με τις οποίες αυτά καλούνται να επιτύχουν αυστηρούς στόχους, που περιλαμβάνουν επίτευξη συγκεκριμένων ποσοστών ανακύκλωσης και περιορισμού της απευθείας ταφής των ΑΣΑ, βάσει της πυραμίδας διαχείρισης και επεξεργασίας που καθορίζεται από την Οδηγία 2008/98/ΕΚ. Οι συγκεκριμένες οδηγίες και, συνεπακόλουθα, οι απαιτητοί στόχοι αποτελούν τις κύριες κατευθυντήριες γραμμές σύμφωνα με τις οποίες καθορίζεται το νομοθετικό πλαίσιο και στην Ελλάδα, με το Εθνικό Σχέδιο Διαχείρισης να αποτελεί τον πυλώνα των αποφάσεων σχετικά με τις επιλεχθείσες μεθόδους διαχείρισης. Στο συγκεκριμένο σχέδιο, βασική προτεραιότητα αποτελεί η κατασκευή νέων Μονάδων Επεξεργασίας Απορριμμάτων με στόχο τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης των ΑΣΑ πριν την τελική τους ταφή σε ΧΥΤ, ενώ παράλληλα προβλέπεται η δυνατότητα μελλοντικής προσαρμογής στη λειτουργία αυτών με προσθήκη κατάλληλων σταδίων επεξεργασίας, έχοντας ως στόχο την παραγωγή δευτερογενούς καυσίμου για περαιτέρω αξιοποίηση σε κατάλληλες μονάδες.

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής αποτελεί μια εκ των πλέον γνωστών μεθόδων για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που δύναται να προκληθούν από τη γενικότερη διαχείριση ενός συστήματος απορριμμάτων στα πλαίσια μιας βιώσιμης ανάπτυξης των σύγχρονων κοινωνιών. Το εύρος εφαρμογής της ΑΚΖ είναι μεγάλο, αποδίδοντας επιστημονικά τεκμηριωμένα αποτελέσματα που επιτρέπουν τη σύγκριση εναλλακτικών μεθόδων διαχείρισης ενός προϊόντος. Τα βασικά στάδια της ΑΚΖ, σύμφωνα με τα σχετικά πρότυπα (σειρά ISO 14040/44), είναι ο καθορισμός του στόχου και του πεδίου εφαρμογής, όπου καθορίζονται σημαντικά στοιχεία όπως τα όρια του συστήματος και η λειτουργική μονάδα του υπό εξέταση συστήματος, η απογραφή των

απαιτούμενων δεδομένων (Life Cycle Inventory), η αξιολόγηση των σχετικών επιπτώσεων (Life Cycle Impact Assessment) και, τέλος, η ερμηνεία των αποτελεσμάτων που προκύπτουν. Από επίσημα στοιχεία προκύπτει ότι ο αριθμός των επιστημονικών άρθρων που αφορούν εφαρμογή AKZ σε συστήματα επεξεργασίας απορριμμάτων έχει αυξηθεί σημαντικά την τελευταία εικοσαετία, με την εφαρμογή πλέον να εντοπίζεται σε παγκόσμιο επίπεδο.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, εφαρμόστηκε η AKZ, με χρήση του λογισμικού OpenLCA, για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και των ενεργειακών απαιτήσεων που προκύπτουν από την εφαρμογή εναλλακτικών σεναρίων διαχείρισης ΑΣΑ, σύμφωνα με πραγματικά δεδομένα που αφορούσαν τη λειτουργία της ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης. Η εν λόγω Μονάδα έχει πραγματική δυνατότητα διαχείρισης 96.600 τόνων ετησίως, ενώ τα βασικότερα στάδια της αποτελούν η Υποδοχή των ΑΣΑ και η Μηχανική Επεξεργασία αυτών, η Αναερόβια Επεξεργασία του οργανικού κλάσματος, η Μονάδα Ωρίμανσης του οργανικού για παραγωγή compost, η Ραφιναρία compost, η Επεξεργασία των Στραγγισμάτων και, τέλος, η Μονάδα Συμπαγωγής Ηλεκτρικής και Θερμικής Ενέργειας, η οποία αξιοποιεί το παραγόμενο βιοαέριο της αναερόβιας χώνευσης. Το υπόλειμμα από τη συνολική επεξεργασία των εισερχομένων ΑΣΑ οδηγείται τελικά στο ΧΥΤ Αλεξανδρούπολης προς ταφή.

Για την εφαρμογή της AKZ στη συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης, αφού καθορίστηκε ο επιθυμητός στόχος (αξιολόγηση και σύγκριση των εναλλακτικών σεναρίων), επιλέχθηκαν τα όρια των υπό μελέτη συστημάτων (προσέγγιση gate-to-grave). Ως αρχικό σημείο θεωρήθηκε η εισαγωγή των ΑΣΑ στη Μονάδα, ενώ ως τελικό σημείο επιλέχθηκε η έξοδος των διαφόρων υλικών, καθώς και του σχετικού υπολείμματος από τη Μονάδα προς ταφή στο ΧΥΤ. Στη συνέχεια, για την ολοκλήρωση του συγκεκριμένου σταδίου της AKZ, καθορίστηκε η λειτουργική μονάδα για τη διαχείριση του συνόλου των χρησιμοποιούμενων δεδομένων (89.699 t ΑΣΑ/έτος, με έτος αναφοράς το 2024).

Τα σενάρια που μελετήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας ήταν τρία. Το πρώτο σενάριο (Σενάριο Α) αφορούσε απευθείας ταφή των ΑΣΑ στο ΧΥΤ Αλεξανδρούπολης. Το δεύτερο σενάριο (Σενάριο Β) αφορούσε τη λειτουργία της ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης σύμφωνα με την υφιστάμενη, πραγματική κατάσταση, όπου λαμβάνουν χώρα τα υπάρχοντα στάδια επεξεργασίας. Τέλος, το τρίτο σενάριο (Σενάριο Γ) αφορούσε αναβάθμιση της υφιστάμενης λειτουργίας της ΜΕΑ, όπου το στάδιο της Ωρίμανσης

και της Ραφιναρίας αντικαθίσταται με στάδιο Ξήρανσης (τεχνολογία Attritor Mill), το οποίο δίνει τη δυνατότητα παραγωγής δευτερογενούς καυσίμου SRF, ενώ παράλληλα προστίθεται και σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά για τη μείωση της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο του ΔΕΔΔΗΕ.

Για την ολοκλήρωση του δεύτερου σταδίου της AKZ πραγματοποιήθηκε η απογραφή των απαιτούμενων δεδομένων. Τα βασικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν, προέκυψαν από πραγματικά στοιχεία της λειτουργίας της ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης για το έτος 2024, όπως αυτά κατεγράφησαν από όργανα λειτουργίας, καθώς και μετρήσεις από το προσωπικό του σταθμού. Στην περίπτωση που για συγκεκριμένες μετρήσεις δεν υπήρχαν δεδομένα προερχόμενα από πραγματικές μετρήσεις, έγινε χρήση δεδομένων προερχόμενων από επίσημη βιβλιογραφία αντίστοιχων εφαρμογών. Σε περίπτωση που δεν ήταν δυνατή ούτε η εύρεση θεωρητικών τιμών πραγματοποιήθηκαν συγκεκριμένες παραδοχές, σύμφωνα με την εμπειρία του μελετητή.

Το επόμενο στάδιο της AKZ αφορούσε την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, όπου σύμφωνα με το Διεθνές Σύστημα Αναφοράς Δεδομένων Κύκλου Ζωής της Ευρωπαϊκής Ένωσης και τις κατευθυντήριες οδηγίες της Joint Research Centre (JRC) μελετήθηκαν οι ακόλουθοι δείκτες: Δυναμικό Οξύτητας (AP), Δυναμικό Ευτροφισμού (EP), Δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη (100 έτη) (GWP100), Δυναμικό καταστροφής του στρώματος όζοντος (ODP), Δυναμικό δημιουργίας φωτοχημικού όζοντος (POCP), Δυναμικό εξάντλησης των αβιοτικών πόρων – μη ορυκτοί πόροι (ADP), Κατανάλωση ύδατος (FWC) και Χρήση γης (LU). Επίσης, για την εκτίμηση των ενεργειακών απαιτήσεων καθενός εκ των τριών σεναρίων μελετήθηκε και ο δείκτης της Αθροιστική Ζήτησης Ενέργειας (CED). Για τη σωστή μοντελοποίηση των τριών σεναρίων ελήφθησαν υπόψη συγκεκριμένες παραδοχές που ως στόχο είχαν τα τελικά αποτελέσματα να χαρακτηρίζονται από συνέπεια, ακεραιότητα και συγκρισιμότητα.

Το τελευταίο, τέταρτο στάδιο εφαρμογής της AKZ στη αφορούσε την ερμηνεία των αποτελεσμάτων που προέκυψαν και περιλάμβαναν τιμές καθενός εκ των προαναφερθέντων δεικτών σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και την ενεργειακή ζήτηση, αλλά και σύγκριση των τριών εναλλακτικών σεναρίων.

Παρατηρώντας τα σχετικά αποτελέσματα προέκυψε το συμπέρασμα ότι από περιβαλλοντικής απόψεως το σενάριο Α είναι σαφέστατα το πλέον δυσμενές, καθώς το σύνολο των δεικτών των περιβαλλοντικών επιπτώσεων μειονεκτούσε σε σχέση με

τις αντίστοιχες τιμές των άλλων δύο σεναρίων. Από ενεργειακής απόψεως, ωστόσο, ο δείκτης της αθροιστικής ζήτησης ενέργειας για το σενάριο Α επιβεβαιώνεται ότι πλεονεκτεί έναντι των άλλων δύο σεναρίων, γεγονός αναμενόμενο αν αναλογιστεί κανείς την έλλειψη ενεργοβόρων διαδικασιών κατά την απευθείας ταφή.

Από τη σύγκριση των αντίστοιχων δεικτών για τα σενάρια Β και Γ παρατηρήθηκε ότι στο σύνολο τους το σενάριο Γ πλεονεκτεί από άποψης περιβαλλοντικών επιπτώσεων έναντι του Β, μειώνοντας το αποτύπωμα που έχει η εφαρμογή της διαχείρισης των ΑΣΑ στο περιβάλλον. Τα ποσοστά μείωσης των σχετικών δεικτών κυμαίνονται από 44% μέχρι και 69%, γεγονός που επιβεβαιώνει ότι η προσθήκη του σταδίου της ξήρανσης και η συνεισφορά των φωτοβολταϊκών συστημάτων αποτελούν ουσιαστική αναβάθμιση από περιβαλλοντική άποψη. Αντίστοιχη τάση μεταβολής παρατηρείται και για την αθροιστική ζήτηση ενέργειας, καθώς ο αντίστοιχος δείκτης δείχνει ότι οι ενεργειακές απαιτήσεις του Σεναρίου Γ είναι χαμηλότερες σε σχέση με το Σενάριο Β, γεγονός που υποδεικνύει τη βελτιωμένη ενεργειακή επίδοση του συγκεκριμένου σεναρίου. Επιπλέον, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε ανάλυση συνεισφοράς (Contribution Analysis) των επιμέρους διεργασιών που περιλαμβάνονται στα τρία υπό μελέτη σενάρια επεξεργασίας ΑΣΑ, με στόχο τον προσδιορισμό της ποσοστιαίας συμμετοχής τους στη διαμόρφωση των εξεταζόμενων περιβαλλοντικών δεικτών και της αθροιστικής ζήτησης ενέργειας.

Στο Σενάριο Α, η ανάλυση των ποσοστών συνεισφοράς έδειξε ότι, για τις εξεταζόμενες κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων, η διάθεση των ΑΣΑ/υπολειμμάτων στον ΧΥΤ αποτελεί τη διεργασία με τη μεγαλύτερη συνεισφορά, με τα ποσοστά να κυμαίνονται από 58% έως και 82%. Ειδικότερα, για τους δείκτες AP, EP, GWP100, ODP, POCP, ADP, FWC και LU οι αντίστοιχες τιμές είναι 63%, 60%, 82%, 68%, 60%, 67%, 58% και 80%, αντίστοιχα. Ακολουθούν η λειτουργία του ΧΥΤ και η διαχείριση στραγγισμάτων, με ποσοστά από 11% έως 37%, ενώ οι διεργασίες υποδοχής, εκφόρτωσης και εσωτερικής διακίνησης των ΑΣΑ παρουσιάζουν μικρότερη συνεισφορά, με τιμές από 3% έως 22%. Αντίθετα, όσον αφορά την αθροιστική ζήτηση ενέργειας, η σειρά αυτή διαφοροποιείται, καθώς οι διεργασίες υποδοχής, εκφόρτωσης και εσωτερικής διακίνησης επηρεάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό τον συγκεκριμένο δείκτη, με ποσοστό συνεισφοράς 62%, ενώ ακολουθούν η λειτουργία του ΧΥΤ και η διαχείριση στραγγισμάτων με ποσοστό 23%, καθώς και η διάθεση των υπολειμμάτων με ποσοστό 15%.

Στο Σενάριο Β, μία εκ των βασικών παρατηρήσεων ήταν πως για το σύνολο των περιβαλλοντικών δεικτών η διεργασία με τη μεγαλύτερη συνεισφορά είναι η διάθεση των υπολειμμάτων στον ΧΥΤ, με τα ποσοστά συνεισφοράς να κυμαίνονται από 29% έως και 65%. Ειδικότερα, για τους δείκτες GWP100 και LU το σχετικό ποσοστό ανέρχεται σε 65%, ενώ για τους δείκτες AP, EP, ODP, POCP, ADP και FWC οι αντίστοιχες τιμές είναι 32%, 29%, 48%, 40%, 46% και 35%, αντίστοιχα. Η συνεισφορά των λοιπών διεργασιών είναι μικρότερη, με τα ποσοστά να διαφοροποιούνται στους διάφορους δείκτες και τη μηχανική επεξεργασία να εμφανίζει τις υψηλότερες τιμές μεταξύ αυτών (7–21%). Η ποσοστιαία συνεισφορά της μονάδας συμπαραγωγής στη διαμόρφωση των εν λόγω δεικτών λογίστηκε ως περιβαλλοντική πίστωση (credit), με αρνητικές τιμές που κυμαίνονται από –2% έως –8%. Όσον αφορά την αθροιστική ζήτηση ενέργειας, παρατηρήθηκε ότι οι κυριότερες διεργασίες που απαιτούν μεγάλες ποσότητες ενέργειας για την εφαρμογή τους είναι η μηχανική επεξεργασία και η διάθεση υπολειμμάτων στον ΧΥΤ, με ποσοστά συνεισφοράς 23% και 33%, αντίστοιχα, ενώ οι λοιπές διεργασίες έπονται σε μικρότερα ποσοστά. Αντίστοιχα, και για τον συγκεκριμένο δείκτη η συνεισφορά της μονάδας συμπαραγωγής λογίστηκε ως credit, με ποσοστό ίσο με –5%.

Για το Σενάριο Γ, η ανάλυση των ποσοστών συνεισφοράς έδειξε ότι η διάθεση των υπολειμμάτων στον ΧΥΤ αποτελεί τη διεργασία με τη μεγαλύτερη συνεισφορά για το σύνολο των εξεταζόμενων περιβαλλοντικών δεικτών, με τα αντίστοιχα ποσοστά να κυμαίνονται από 28% (ADP) έως και 67% (LU). Οι υπόλοιπες διεργασίες παρουσίασαν παρόμοια κατανομή συνεισφοράς με εκείνη που παρατηρήθηκε στο Σενάριο Β. Όσον αφορά τη διεργασία της ξήρανσης, διαπιστώθηκε ότι, με εξαίρεση τον δείκτη Χρήση Γης (LU), όπου η συνεισφορά είναι μονοψήφια, για το σύνολο των υπόλοιπων περιβαλλοντικών δεικτών τα αντίστοιχα ποσοστά είναι διψήφια μεταξύ 11-17%.

Επιπλέον, η διεργασία της μηχανικής επεξεργασίας παρουσίασε συνεισφορά με διψήφια ποσοστά, ενώ οι υπόλοιπες διεργασίες εμφάνισαν κυρίως μονοψήφια ποσοστά συμμετοχής. Για τους περιβαλλοντικούς δείκτες, η συνεισφορά της μονάδας συμπαραγωγής και του φωτοβολταϊκού συστήματος αποτιμήθηκε ως περιβαλλοντική πίστωση (credit), με το φωτοβολταϊκό σύστημα να εμφανίζει μεγαλύτερο περιβαλλοντικό όφελος (κατά μέσο όρο περίπου –9,2% περιβαλλοντική πίστωση) σε σχέση με τη μονάδα συμπαραγωγής (κατά μέσο όρο περίπου –4,7% περιβαλλοντική πίστωση). Όσον αφορά την αθροιστική ζήτηση ενέργειας, προέκυψε ότι οι τρεις

διεργασίες με τις υψηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις είναι, κατά σειρά, η διάθεση υπολειμμάτων στον ΧΥΤ, η μηχανική επεξεργασία και η ξήρανση, με ποσοστά συνεισφοράς ίσα με 38%, 18% και 15%, αντίστοιχα, ενώ οι υπόλοιπες διεργασίες ακολουθούν με χαμηλότερα ποσοστά συμμετοχής. Συγκεκριμένα, η αναερόβια χώνευση και η επεξεργασία στραγγισμάτων εμφανίζουν συνεισφορά ίση με 5% και 3%, αντίστοιχα, ενώ οι διεργασίες υποδοχής, εκφόρτωσης και εσωτερικής διακίνησης συμμετέχουν με ποσοστό 5%. Παράλληλα, η μονάδα συμπαραγωγής και το φωτοβολταϊκό σύστημα λογίστηκαν ως ενεργειακές πιστώσεις (credits), με αρνητικές συνεισφορές -12% και -5%, αντίστοιχα.

Η εφαρμογή της ΑΚΖ σε μεγάλο αριθμό επιστημονικών εργασιών κατά τις τελευταίες δύο δεκαετίες προέκυψε από την ανάγκη εξαγωγής επιστημονικά τεκμηριωμένων συμπερασμάτων σχετικά με τη βέλτιστη επιλογή μεθόδων διαχείρισης και επεξεργασίας των συνεχώς αυξανόμενων ποσοτήτων ΑΣΑ σε παγκόσμιο επίπεδο. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, προκύπτει ότι η ΑΚΖ, αξιοποιώντας πραγματικά δεδομένα λειτουργίας, μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στην κατανόηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με τις επιμέρους διεργασίες επεξεργασίας ΑΣΑ, υποστηρίζοντας έτσι τη λήψη αποφάσεων και τη βέλτιστη επιλογή κατάλληλων στρατηγικών διαχείρισης. Ωστόσο, λόγω του μεγάλου αριθμού διαθέσιμων τεχνολογιών και εναλλακτικών διεργασιών, της διαφοροποίησης στον τρόπο εφαρμογής τους, καθώς και των περιορισμών που συχνά υπάρχουν στη διαθεσιμότητα πρωτογενών δεδομένων, εξακολουθεί να υπάρχει σημαντικό πεδίο για μελλοντικές εφαρμογές της ΑΚΖ, με στόχο την παραγωγή περισσότερων και πιο αξιόπιστων δεδομένων και την εξαγωγή πιο ολοκληρωμένων συμπερασμάτων για τα συστήματα επεξεργασίας ΑΣΑ.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### Ξένη βιβλιογραφία

- Abeliotis, K., Kalogeropoulos, A., & Lasaridi, K. (2012). Life Cycle Assessment of the MBT plant in Ano Liossia, Athens, Greece. *Waste Management*, 32(1), 213–219. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.09.002>
- Angelidaki, I., & Batstone, D. J. (2011). Anaerobic Digestion: Process. In T. Christensen H. (Ed.), *Solid Waste Technology & Management* (pp. 583–600). Blackwell Publishing Ltd.
- Awino, F. B., & Aritz, S. E. (2024). Solid waste management in the context of the waste hierarchy and circular economy frameworks: An international critical review. In *Integrated Environmental Assessment and Management* (Vol. 20, Number 1, pp. 9–35). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/ieam.4774>
- Beylot, A., Vaxelaire, S., Zdanevitch, I., Auvinet, N., & Villeneuve, J. (2015). Life Cycle Assessment of mechanical biological pre-treatment of Municipal Solid Waste: A case study. *Waste Management*, 39, 287–294. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.033>
- Bilitewski, B. (2011). Mechanical Treatment: Unit Processes. In T. Christensen H. (Ed.), *Solid Waste Technology & Management* (pp. 321–348). Blackwell Publishing Ltd.
- Bilitewski, B., Oros, C., & Christensen, T. H. (2011). Mechanical Biological Treatment. In T. Christensen H. (Ed.), *Solid Waste Technology & Management* (pp. 628–638). Blackwell Publishing Ltd.
- Bjorklund, A., Finnveden, G., & Roth, L. (2011). Application of LCA in Waste Management. In T. H. Christensen (Ed.), *Solid waste technology & management* (pp. 138–160). Blackwell Publishing Ltd.
- Bourtsalas, A. C., & Themelis, N. J. (2022). Materials and energy recovery at six European MBT plants. *Waste Management*, 141, 79–91. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.01.024>
- Branchini, L. (2015). Waste-to-Energy: Advanced Cycles and New Design Concepts for Efficient Power Plants. In *Waste-to-Energy: Advanced Cycles and New Design Concepts for Efficient Power Plants*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-13608-0>
- Byström, J. (2010). *Mechanical Biological Treatment Plants Staff Working Papers Mechanical Biological Treatment Plants*. <https://jaspers.eib.org/files/library/2010/mechanical-biological-treatment-plants.pdf>
- Ceraso, A., & Cesaro, A. (2024). Life Cycle Sustainability Assessment of municipal solid waste management systems: a review. *Journal of Environmental Management*, 368. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122143>

- Chazirakis, P., Giannis, A., & Gidarakos, E. (2023). Material flow and environmental performance of the source segregated biowaste composting system. *Waste Management*, *160*, 23–34. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.02.005>
- Edo-Alcón, N., Gallardo, A., Colomer-Mendoza, F. J., & Lobo, A. (2024). Efficiency of biological and mechanical-biological treatment plants for MSW: The case of Spain. *Heliyon*, *10*(4). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26353>
- EU waste management law. (2024, February 8). European Union. <https://eur-lex.europa.eu/EN/legal-content/summary/eu-waste-management-law.html>
- Eurostat. (2024, September). *Waste statistics. Statistics Explained*. [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics)
- Eurostat. (2025, January). *Municipal waste statistics. Statistics Explained*. [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal\\_waste\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal_waste_statistics)
- Fei, F., Wen, Z., Huang, S., & De Clercq, D. (2018). Mechanical biological treatment of municipal solid waste: Energy efficiency, environmental impact and economic feasibility analysis. *Journal of Cleaner Production*, *178*, 731–739. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.060>
- Feo, G. De, & Malvano, C. (2009). The use of LCA in selecting the best MSW management system. *Waste Management*, *29*(6), 1901–1915. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.12.021>
- Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., Koehler, A., Pennington, D., & Suh, S. (2009). Recent developments in Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Management*, *91*(1), 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.018>
- Fiorentino, G., Ripa, M., Protano, G., Hornsby, C., & Ulgiati, S. (2015). Life Cycle Assessment of Mixed Municipal Solid Waste: Multi-input versus multi-output perspective. *Waste Management*, *46*, 599–611. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.048>
- Frischknecht, R., Wyss, F., Büsser Knöpfel, S., Lützkendorf, T., & Balouktsi, M. (2015). Cumulative energy demand in LCA: the energy harvested approach. *International Journal of Life Cycle Assessment*, *20*(7), 957–969. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0897-4>
- Gadaleta, G., De Gisi, S., Todaro, F., & Notarnicola, M. (2022). Environmental Comparison of Different Mechanical–Biological Treatment Plants by Combining Life Cycle Assessment and Material Flow Analysis. *Clean Technologies*, *4*(2), 380–394. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol4020023>
- Grosso, M., Dellavedova, S., Rigamonti, L., & Scotti, S. (2016). Case study of an MBT plant producing SRF for cement kiln co-combustion, coupled with a bioreactor landfill for process residues. *Waste Management*, *47*, 267–275. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.10.017>

- Grzesik, K. (2018). The environmental impact of municipal waste management systems. *E3S Web of Conferences*, 45. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184500020>
- Grzesik, K., & Malinowski, M. (2017). Life Cycle Assessment of Mechanical-Biological Treatment of Mixed Municipal Waste. *Environmental Engineering Science*, 34(3), 207–220. <https://doi.org/10.1089/ees.2016.0284>
- Guinée, J. B., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., Ekvall, T., & Rydberg, T. (2011). Life cycle assessment: Past, present, and future. *Environmental Science and Technology*, 45(1), 90–96. <https://doi.org/10.1021/es101316v>
- Hauschild, M. Z., & Barlaz, M. A. (2011). LCA in Waste Management: Introduction to Principle and Method. In T. Christensen H. (Ed.), *Solid Waste Technology & Management* (pp. 113–136). Blackwell Publishing Ltd.
- Heijungs, R., & Guinee, J. B. (2012). An Overview of the Life Cycle Assessment Method-Past, Present, and Future. In M. A. Curran (Ed.), *Life Cycle Assessment Handbook: A Guide for Environmentally Sustainable Products* (pp. 15–41). Scrivener Publishing LLC. <https://doi.org/10.1002/9781118528372>
- Iqbal, A., Liu, X., & Chen, G. H. (2020). Municipal solid waste: Review of best practices in application of life cycle assessment and sustainable management techniques. *Science of the Total Environment*, 729. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138622>
- Ivanova, S., & Lisina, N. (2023). Municipal and Industrial Urban Waste: Legal Aspects of Safe Management. *Laws*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/laws12030048>
- Joint Research Centre. (2010). *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook: General guide for life cycle assessment - Detailed guidance* (1st ed.). Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2788/38479>
- Joint Research Centre. (2012). *Life cycle indicators for resources, products and waste*. Publications Office. <https://doi.org/10.2788/4262>
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>
- Koci, V., & Trecakova, T. (2011). Mixed municipal waste management in the Czech Republic from the point of view of the LCA method. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(2), 113–124. <https://doi.org/10.1007/s11367-011-0251-4>
- Kossakowska, K., & Grzesik, K. (2019). Life cycle assessment of the mixed municipal waste management system based on mechanical-biological treatment. *Journal of Ecological Engineering*, 20(8), 175–183. <https://doi.org/10.12911/22998993/111323>
- Montejo, C., Tonini, D., Márquez, M. del C., & Fruergaard Astrup, T. (2013). Mechanical-biological treatment: Performance and potentials. An LCA of 8 MBT

- plants including waste characterization. *Journal of Environmental Management*, 128, 661–673. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.05.063>
- Nanda, S., & Berruti, F. (2021). Municipal solid waste management and landfilling technologies: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(2), 1433–1456. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01100-y>
- Nelles, M., Morscheck, G., & Grünes, J. (2012). *MBT in Germany and Europe - Development, Status and Outlook*. [https://cuvillier.de/uploads/preview/public\\_file/292/9783954040308.pdf](https://cuvillier.de/uploads/preview/public_file/292/9783954040308.pdf)
- Nurzhan, A., Ruan, X., & Chen, D. (2025). A Review of Life Cycle Assessment Application in Municipal Waste Management: Recent Advances, Limitations, and Solutions. *Sustainability (Switzerland)*, 17(1). <https://doi.org/10.3390/su17010302>
- Pennington, D. W., Potting, J., Finnveden, G., Lindeijer, E., Jolliet, O., Rydberg, T., & Rebitzer, G. (2004). Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice. *Environment International*, 30(5), 721–739. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.12.009>
- Połomka, J., & Jędrzak, A. (2019). Efficiency of waste processing in the MBT system. *Waste Management*, 96, 9–14. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.06.041>
- Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., Schmidt, W. P., Suh, S., Weidema, B. P., & Pennington, D. W. (2004). Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment International*, 30(5), 701–720. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.11.005>
- Sala, S., Amadei, A. M., Beylot, A., & Ardente, F. (2021). The evolution of life cycle assessment in European policies over three decades. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(12), 2295–2314. <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01893-2>
- Schingnitz, D. (2018). Separation of municipal solid waste in treatment plants. In *Handbook of Environmental Chemistry* (Vol. 63, pp. 89–103). Springer Verlag. [https://doi.org/10.1007/698\\_2017\\_27](https://doi.org/10.1007/698_2017_27)
- SETAC. (1994). Guidelines for Life - Cycle Assessment: A ‘Code of Practice. *Environmental Science and Pollution Research*, (1), 55. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF02986927>
- Stentiford, E., & Bertoldi, M. de. (2011). Composting: Process. In T. Christensen H. (Ed.), *Solid Waste Technology & Management* (pp. 515–532). Blackwell Publishing Ltd.
- Taniolo, S., Borsoi, L., & Camana Daniela. (2021). Life cycle assessment: methods, limitations, and illustrations. In *Methods in Sustainability Science: Assessment, Prioritization, Improvement, Design and Optimization* (pp. 105–117). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2020-0-00430-5>

- UNEP. (2024). *Beyond an age of waste - Global Waste Management Outlook 2024*.  
<https://doi.org/10.59117/20.500.11822/44939>
- Yousefi, M., Oskoei, V., Jafari, A. J., Farzadkia, M., Hasham Firooz, M., Abdollahinejad, B., & Torkashvand, J. (2021). Municipal solid waste management during COVID-19 pandemic: effects and repercussions. *Environmental Science and Pollution Research*, (28), 32200–32209. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14214-9/Published>
- Zhang, J., Qin, Q., Li, G., & Tseng, C. H. (2021). Sustainable municipal waste management strategies through life cycle assessment method: A review. *Journal of Environmental Management*, 287. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112238>

### Ελληνική βιβλιογραφία

- Tchobanoglous, G., & Kreith, F. (2018). *Εγχειρίδιο διαχείρισης στερεών αποβλήτων* (Α. Κούγκουλος, Α. Καραγιαννίδης, & Π. Σαμαράς, Trans.; 2nd ed.). Εκδόσεις Τζιόλα. <https://www.tziola.gr/book/egchiridio-diachirisis-stereon-apovliton-2i-veltiomeni/>
- Κομίλης, Δ. (2023). *Διαχείριση και μηχανική Στερεών Αποβλήτων* (3rd ed.). Εκδόσεις Τζιόλα. <https://www.tziola.gr/book/diachirisi-k-mixaniki-stereon-apovliton-3e/>

### Νομοθεσία / Πρότυπα

- Ε.Σ.Δ.Α. (2015). *Εθνικό Σχέδιο Διαχείρισης Αποβλήτων* (pp. 1–115). Υπουργείο Παραγωγικής Ανασυγκρότησης, Περιβάλλοντος και Ενέργειας. [https://www.eoan.gr/wp-content/uploads/2020/12/%CE%95%CE%A3%CE%94%CE%91\\_2015-2020.pdf](https://www.eoan.gr/wp-content/uploads/2020/12/%CE%95%CE%A3%CE%94%CE%91_2015-2020.pdf)
- Οδηγία 2008/98/ΕΚ. (2008). για τα απόβλητα και την κατάργηση ορισμένων οδηγιών. Σε *Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης* (Τεύχος L312, σελ. 3–30).
- Οδηγία (ΕΕ) 2018/851. (2018). για την τροποποίηση της οδηγίας 2008/98/ΕΚ για τα απόβλητα. Σε *Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης* (Τεύχος L150, σελ. 109–140).
- Πράξη 39 της 31.8. (2020). Έγκριση του Εθνικού Σχεδίου Διαχείρισης Αποβλήτων (Ε.Σ.Δ.Α.). Σε *Εφημερίδα της Κυβερνήσεως* (Τεύχος 185, σελ. 9803–10538). Εθνικό Τυπογραφείο.
- ΣΜΠΕ. (2025). *Στρατηγική Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων για τη δημιουργία δικτύου Μονάδων Ενεργειακής Αξιοποίησης ΑΕΠΥ από ΑΣΑ*. [https://ypen.gov.gr/wp-content/uploads/2025/08/SMPE\\_Energeiaki\\_Axiopoiisi.pdf](https://ypen.gov.gr/wp-content/uploads/2025/08/SMPE_Energeiaki_Axiopoiisi.pdf)

ΥΠΕΝ. (2020). *Εθνικό Σχέδιο Διαχείρισης Αποβλήτων (ΕΣΔΑ)*.  
[https://ypen.gov.gr/wp-content/uploads/legacy/Files/ypourgeio/Grafeio%20Τυπου/20200806\\_Parousias\\_h\\_ESDA.pdf](https://ypen.gov.gr/wp-content/uploads/legacy/Files/ypourgeio/Grafeio%20Τυπου/20200806_Parousias_h_ESDA.pdf)

ΥΠΕΝ/ΔΙΠΑ/109417/7677. (2024). *Τροποποίηση της με α.π. οικ. 196552/1-3-2012 ΑΕΠΟ, όπως τροποποιήθηκε με την με α.π. 3801/13-11-2017 Απόφαση της Αποκεντρωμένης Διοίκησης Μακεδονίας Θράκης του έργου: «Μονάδα Επεξεργασίας Απορριμμάτων και Χώρος Υγειονομικής Ταφής Υπολειμμάτων στον Δήμο Αλεξανδρούπολης, Νομού Έβρου [ΟΕΔΑ Ανατολικού Τομέα της Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας Θράκης (ΠΑΜΘ)]»*.  
<https://diavgeia.gov.gr/decision/view/%CE%A8%CE%957%CE%9C4653%CE%A08-711>

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας Π.1 Στοιχεία παραγόμενων ΑΣΑ στην Ευρώπη [Πηγή: (Eurostat, 2025)]

Χρονολογία	1995		2003		2013		2023	
Χώρα	t*1000	kg / κάτοικο	t*1000	kg / κάτοικο	t*1000	kg / κάτοικο	t*1000	kg / κάτοικο
<b>Ε.Ε. 27 χώρες (από 2020)</b>	<b>197.988</b>	<b>467</b>	<b>217.022</b>	<b>502</b>	<b>211.501</b>	<b>479</b>	<b>229.223</b>	<b>511</b>
Βέλγιο	4.613	455	4.824	465	4.867	436	8.104	688
Βουλγαρία	5.838	694	4.690	603	3.135	438	3.156	490
Τσεχία	3.120	302	2.857	280	3.228	307	5.840	538
Δανία	2.725	521	3.618	671	4.564	813	4.513	759
Γερμανία	50.894	623	49.622	601	49.570	615	51.017	613
Εσθονία	533	371	567	414	386	293	512	373
Ιρλανδία	1.848	512	2.918	730	-	-	-	-
<b>Ελλάδα</b>	<b>3.200</b>	<b>303</b>	<b>4.710</b>	<b>431</b>	<b>5.284</b>	<b>482</b>	<b>5.440</b>	<b>523</b>
Ισπανία	20.076	505	27.270	646	21.184	455	22.500	465
Γαλλία	28.253	475	31.400	506	34.176	520	36.035	527
Κροατία	-	-	-	-	1.721	407	1.833	475
Ιταλία	25.780	454	30.035	523	29.573	490	28.840	489
Κύπρος	387	595	481	670	547	634	625	653
Λετονία	657	264	695	304	704	350	:	:
Λιθουανία	1.546	426	1.328	389	1.280	432	1.282	446
Λουξεμβούργο	240	587	306	678	335	616	478	718

Χρονολογία	1995		2003		2013		2023	
	Χώρα	t*1000	kg / κάτοικο	t*1000	kg / κάτοικο	t*1000	kg / κάτοικο	t*1000
Ουγγαρία	4.752	460	4.700	464	3.738	379	4.115	429
Μάλτα	146	387	231	580	257	604	333	603
Ολλανδία	8.337	539	9.504	586	8.840	526	8.364	468
Αυστρία	3.476	437	4.932	607	4.905	578	7.142	782
Πολωνία	10.985	285	9.925	260	11.295	297	13.448	367
Πορτογαλία	3.529	352	4.693	449	4.598	439	5.338	505
Ρουμανία	7.758	342	7.611	353	5.071	254	5.822	305
Σλοβενία	1.186	596	834	418	853	414	1.097	517
Σλοβακία	1.580	295	1.511	281	1.645	304	2.561	472
Φινλανδία	2.109	413	2.428	466	2.682	493	2.612	468
Σουηδία	3.405	386	4.159	464	4.371	455	4.134	392
Ισλανδία	114	426	140	484	167	516	224	580
Νορβηγία	2.722	624	1.836	402	2.518	496	3.997	724
Ελβετία	4.240	602	4.916	670	5.708	706	6.027	678
Βοσνία και Ερζεγοβίνη	-	-	-	-	1.192	311	1.186	346
Μαυροβούνιο	-	-	-	-	310	499	353	570
Β. Μακεδονία	-	-	-	-	793	384	878	480
Αλβανία	-	-	-	-	940	325	844	306
Σεβία	-	-	-	-	2.410	336	3.095	467
Τουρκία	27.234	441	31.081	465	30.920	406	32.457	380
Κόσοβο	-	-	-	-	-	-	490	277

**Πίνακας Π.2 Ποσότητες ΑΣΑ (kg/άτομο) ανά μέθοδο διαχείρισης στην ΕΕ [Πηγή:  
(Eurostat, 2025)]**

	Διάθεση: Υγειονομική ταφή και άλλες (D1– D7, D12)	Διάθεση: Αποτέφρωση (D10) & Ανάκτηση: Ανάκτηση ενέργειας (R1)	Ανακύκλωση – Υλικών	Ανακύκλωση – Κομποστοποίηση και Αναερόβια Χώνευση
1995	286	70	54	33
1996	276	71	62	38
1997	276	77	69	41
1998	266	78	75	42
1999	263	79	85	45
2000	262	84	87	53
2001	250	87	92	54
2002	241	90	100	57
2003	229	90	100	57
2004	214	95	100	59
2005	202	103	105	59
2006	202	111	109	61
2007	199	112	119	64
2008	190	116	120	69
2009	185	117	123	67
2010	178	120	125	66
2011	167	125	128	66
2012	153	122	130	69
2013	142	125	128	71
2014	134	128	134	74
2015	127	129	141	75
2016	128	130	145	81
2017	127	132	147	84
2018	125	131	148	85
2019	124	131	150	88
2020	120	138	155	96
2021	117	138	161	101
2022	116	132	153	97
2023	111	132	147	96

### Πίνακας Π.3 Ποσότητες ΑΣΑ (kg/άτομο) ανά μέθοδο διαχείρισης στην Ελλάδα

[Πηγή: (Eurostat, 2025)]

	Διάθεση: Υγειονομική ταφή και άλλες (D1– D7, D12)	Διάθεση: Αποτέφρωση (D10) & Ανάκτηση: Ανάκτηση ενέργειας (R1)	Ανακύκλωση – Υλικών	Ανακύκλωση – Κομποστοποίηση και Αναερόβια Χώνευση
1995	312	-	-	-
1996	324	-	-	-
1997	332	0	31	3
1998	347	0	31	3
1999	361	0	32	3
2000	375	0	33	3
2001	383	0	34	3
2002	388	0	34	3
2003	396	0	35	0
2004	392	0	44	0
2005	391	0	49	3
2006	390	0	50	7
2007	362	0	82	9
2008	377	0	72	9
2009	376	0	84	3
2010	441	0	78	13
2011	412	1	75	14
2012	408	3	68	16
2013	403	-	59	17
2014	410	-	60	15
2015	409	-	65	12
2016	410	3	69	17
2017	403	5	74	21
2018	403	8	77	26
2019	407	7	84	26
2020	400	8	82	8
2021	411	8	81	8
2022	420	8	82	7
2023	422	9	83	7

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.