



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
Μ.Π.Σ: ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ (ΔΙΑ)

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

ΚΑΡΑΜΕΤΣΗ ΔΕΣΠΟΙΝΑ

Α.Μ.: 168067

e-mail: std168067@ac.eap.gr

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΚΑΡΑΓΙΑΝΝΗΣ ΒΑΪΟΣ
Β' ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΚΟΡΝΑΡΟΣ ΜΙΧΑΗΛ

ΜΑΙΟΣ 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία της φοιτήτριας Καραμέτση Δέσποινας («συγγραφέα/δημιουργού») 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.

Περίληψη

Η συνεχής αύξηση της παραγωγής αποβλήτων και η ανάγκη προστασίας του περιβάλλοντος καθιστούν απαραίτητη την ανάπτυξη σύγχρονων και βιώσιμων μεθόδων διαχείρισης απορριμμάτων. Η ενεργειακή αξιοποίηση αποβλήτων αποτελεί μία σημαντική εναλλακτική προσέγγιση, καθώς συνδυάζει τη διαχείριση αποβλήτων με την παραγωγή ενέργειας, συμβάλλοντας παράλληλα στη μείωση της υγειονομικής ταφής και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα εργασία εξετάζει τις βασικές τεχνολογίες ενεργειακής αξιοποίησης αποβλήτων, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους, καθώς και τη συμβολή τους στην κυκλική οικονομία και τη βιώσιμη ανάπτυξη.

Αρχικά παρουσιάζονται οι βασικές κατηγορίες αποβλήτων, οι μέθοδοι διαχείρισής τους και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με τις συμβατικές πρακτικές διάθεσης. Στη συνέχεια αναλύονται οι κυριότερες τεχνολογίες ενεργειακής αξιοποίησης, όπως η καύση, η πυρόλυση, η αεριοποίηση και η αναερόβια χώνευση, με έμφαση στις συνθήκες λειτουργίας, στα παραγόμενα προϊόντα και στην ενεργειακή τους απόδοση. Παράλληλα, εξετάζονται οι περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις των τεχνολογιών αυτών, καθώς και οι δυνατότητες εφαρμογής τους στο πλαίσιο της πράσινης μετάβασης.

Επιπλέον, παρουσιάζονται παραδείγματα εφαρμογών ενεργειακής αξιοποίησης αποβλήτων στην Ευρώπη και διεθνώς, ενώ γίνεται αναφορά και στην υφιστάμενη κατάσταση στην Ελλάδα. Από την ανάλυση προκύπτει ότι η ενεργειακή αξιοποίηση μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στη μείωση της ταφής αποβλήτων, στην παραγωγή ενέργειας από δευτερογενείς πόρους και στη βελτίωση της συνολικής βιωσιμότητας των συστημάτων διαχείρισης απορριμμάτων. Ωστόσο, η επιτυχής εφαρμογή τέτοιων τεχνολογιών απαιτεί ολοκληρωμένο σχεδιασμό, αυστηρό περιβαλλοντικό έλεγχο, κατάλληλες υποδομές και κοινωνική αποδοχή.

Συμπερασματικά, η ενεργειακή αξιοποίηση αποβλήτων αποτελεί σημαντικό εργαλείο της κυκλικής οικονομίας και της βιώσιμης ανάπτυξης, προσφέροντας δυνατότητες τόσο περιβαλλοντικής προστασίας όσο και ενεργειακής αξιοποίησης πόρων που μέχρι σήμερα θεωρούνταν άχρηστοι.

Λέξεις-κλειδιά

Ενεργειακή αξιοποίηση αποβλήτων, διαχείριση αποβλήτων, κυκλική οικονομία, καύση, πυρόλυση, αεριοποίηση, αναερόβια χώνευση, βιοαέριο, βιώσιμη ανάπτυξη, Waste-to-Energy.

Abstract

The continuous increase in waste generation and the growing need for environmental protection make the development of modern and sustainable waste management practices essential. Waste-to-Energy technologies constitute an important alternative approach, as they combine waste management with energy production while simultaneously reducing landfill disposal and environmental impacts. In this context, the present thesis examines the main waste-to-energy technologies, their advantages and disadvantages, as well as their contribution to the circular economy and sustainable development.

Initially, the study presents the main categories of waste, waste management methods, and the environmental impacts associated with conventional disposal practices. Subsequently, the principal waste-to-energy technologies are analyzed, including incineration, pyrolysis, gasification, and anaerobic digestion, with emphasis on their operating conditions, generated products, and energy efficiency. In addition, the environmental, economic, and social impacts of these technologies are examined, along with their potential contribution to the green transition and sustainable resource management.

Furthermore, examples of waste-to-energy applications in Europe and internationally are presented, while reference is also made to the current situation in Greece. The analysis demonstrates that waste-to-energy technologies can significantly contribute to reducing landfill disposal, producing energy from secondary resources, and improving the overall sustainability of waste management systems. However, the successful implementation of such technologies requires integrated planning, strict environmental control, appropriate infrastructure, and social acceptance.

In conclusion, waste-to-energy constitutes an important tool for the circular economy and sustainable development, offering opportunities for both environmental protection and energy recovery from materials that were previously considered useless waste.

Keywords

Waste-to-Energy, waste management, circular economy, incineration, pyrolysis, gasification, anaerobic digestion, biogas, sustainable development, energy recovery.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Εισαγωγή	1
Κεφάλαιο 1 Διαχείριση αποβλήτων	6
1.1 Κατηγοριοποίηση αποβλήτων	6
1.2 Σύσταση και ενεργειακά χαρακτηριστικά αποβλήτων	6
1.3 Διαχείριση αποβλήτων	8
1.4 Κυκλική οικονομία και ενεργειακή αξιοποίηση αποβλήτων	13
Κεφάλαιο 2: Τεχνολογίες ενεργειακής αξιοποίησης	15
2.1 Σημασία ενεργειακής αξιοποίησης	15
2.2 Τεχνολογίες ενεργειακής αξιοποίησης	16
2.2.1 Καύση αποβλήτων	16
2.2.2 Πυρόλυση	17
2.2.3 Αεριοποίηση	19
2.2.4 Σύγκριση θερμικών τεχνολογιών	21
2.2.5 Βιολογικές τεχνολογίες ενεργειακής αξιοποίησης	24
2.2.6 Αναερόβια χώνευση	25
2.2.7 Συγκριτική αξιολόγηση των τεχνολογιών ενεργειακής αξιοποίησης	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Περιβαλλοντικές και Οικονομικές Επιπτώσεις της Ενεργειακής Αξιοποίησης Αποβλήτων	30
3.1 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ενεργειακής αξιοποίησης	30
3.2 Οικονομικές επιπτώσεις και βιωσιμότητα	32
3.2.1 Απόσβεση και οικονομική βιωσιμότητα των μονάδων ενεργειακής αξιοποίησης αποβλήτων	34
3.3 Κοινωνικές επιπτώσεις και κοινωνική αποδοχή	37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Εφαρμογές Ενεργειακής Αξιοποίησης Αποβλήτων στην Ελλάδα και Διεθνώς	38
4.1 Διεθνείς εφαρμογές ενεργειακής αξιοποίησης αποβλήτων	38
4.2 Η κατάσταση στην Ελλάδα	40
4.3 Προοπτικές ανάπτυξης	44
Κεφάλαιο 5: Προτάσεις Βελτίωσης και Μελλοντικές Προοπτικές	46
5.1 Προτάσεις βελτίωσης στη διαχείριση αποβλήτων	46
5.2 Κοινωνική ευαισθητοποίηση και εκπαίδευση	47

5.3 Μελλοντικές προοπτικές	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 Συμπεράσματα.....	49
Βιβλιογραφία	52

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1 Τυπική σύσταση αστικών στερεών αποβλήτων.	7
Πίνακας 2 Σύγκριση τεχνολογιών ενεργειακής αξιοποίησης αποβλήτων	14
Πίνακας 3 Σύγκριση θερμικών τεχνολογιών	22
Πίνακας 4 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις ανά τεχνολογία.....	32
Πίνακας 5 Ποσότητες δημοτικών απόβλητων ανάλογα την μέθοδο διαχείρισης	42
Πίνακας 6 Τεχνολογία ενεργειακής αξιοποίησης ανά χώρα	44

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1 Διάγραμμα κυκλικής οικονομίας και επαναχρησιμοποίησης πόρων.	3
Εικόνα 2 Διάγραμμα διεργασίας πυρόλυσης βιομάζας και παραγωγής ενεργειακών προϊόντων.	19
Εικόνα 3 Κατανομή ετήσιου λειτουργικού κόστους μονάδας παραγωγής ενέργειας από απόβλητα.....	34
Εικόνα 4 Κατανομή μονάδων ενεργειακής αξιοποίησης αποβλήτων στην Ευρώπη το 2021	38

Εισαγωγή

Η διαχείριση των αποβλήτων αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά, κοινωνικά και οικονομικά ζητήματα που καλείται να αντιμετωπίσει ο σύγχρονος κόσμος. Η συνεχής αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού, η έντονη αστικοποίηση, η βιομηχανική ανάπτυξη και η υιοθέτηση ενός καταναλωτικού τρόπου ζωής έχουν οδηγήσει σε ραγδαία αύξηση της ποσότητας των απορριμμάτων που παράγονται καθημερινά. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται τόσο στις αναπτυγμένες όσο και στις αναπτυσσόμενες χώρες, δημιουργώντας σημαντικές πιέσεις στα συστήματα διαχείρισης αποβλήτων και στο φυσικό περιβάλλον. Η αυξανόμενη χρήση πλαστικών, συσκευασιών και προϊόντων μικρής διάρκειας ζωής έχει επιβαρύνει ακόμη περισσότερο το πρόβλημα, καθιστώντας αναγκαία την αναζήτηση πιο βιώσιμων και αποτελεσματικών πρακτικών διαχείρισης.

Η προσκόλληση στις παραδοσιακές μεθόδους διαχείρισης, όπως είναι η υγειονομική ταφή, συνοδεύεται από σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η διάθεση αποβλήτων σε χώρους ταφής οδηγεί στην παραγωγή στραγγισμάτων που μπορούν να ρυπάνουν το έδαφος και τα υπόγεια ύδατα, ενώ παράλληλα συμβάλλει σημαντικά στην εκπομπή μεθανίου, ενός ιδιαίτερα ισχυρού αερίου του θερμοκηπίου. Επιπλέον, η συνεχής ανάγκη δημιουργίας νέων χώρων υγειονομικής ταφής προκαλεί έντονες κοινωνικές και περιβαλλοντικές αντιδράσεις, ιδιαίτερα σε περιοχές με υψηλή πληθυσμιακή πυκνότητα. Για τους λόγους αυτούς, η Ευρωπαϊκή Ένωση και διεθνείς οργανισμοί προωθούν ολοένα και περισσότερο πολιτικές που στοχεύουν στον περιορισμό της ταφής και στην ενίσχυση της ανακύκλωσης, της επαναχρησιμοποίησης και της ανάκτησης ενέργειας.

Παράλληλα, η ενεργειακή κρίση και η ανάγκη αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής καθιστούν επιτακτική τη μετάβαση προς ένα βιώσιμο ενεργειακό σύστημα. Η συνεχώς αυξανόμενη ενεργειακή ζήτηση σε παγκόσμιο επίπεδο, σε συνδυασμό με την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα, έχει οδηγήσει σε αυξημένες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και σε σημαντική περιβαλλοντική επιβάρυνση. Στο πλαίσιο αυτό, η αξιοποίηση εναλλακτικών και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας θεωρείται

βασικός άξονας της σύγχρονης περιβαλλοντικής πολιτικής και της πράσινης μετάβασης.

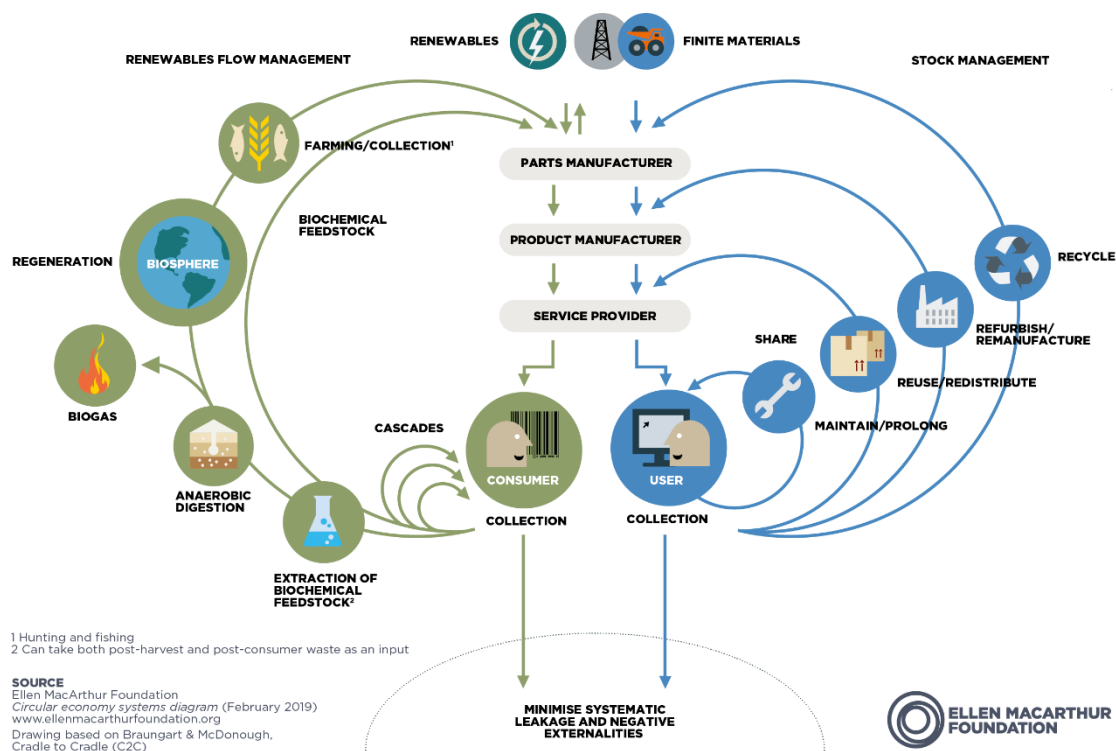
Η ενεργειακή αξιοποίηση αποβλήτων (Waste-to-Energy) εμφανίζεται ως μία ιδιαίτερα σημαντική και ολοκληρωμένη λύση, καθώς συνδυάζει τη διαχείριση απορριμμάτων με την παραγωγή ενέργειας. Μέσω της μετατροπής των αποβλήτων σε χρήσιμες μορφές ενέργειας, όπως ηλεκτρική και θερμική ενέργεια ή δευτερογενή καύσιμα, μειώνεται σημαντικά ο όγκος των απορριμμάτων που οδηγείται σε ταφή και αξιοποιείται το ενεργειακό περιεχόμενο υλικών τα οποία διαφορετικά θα κατέληγαν χωρίς καμία χρησιμότητα. Παράλληλα, μειώνεται η κατανάλωση συμβατικών καυσίμων και ενισχύεται η ενεργειακή ασφάλεια.

Οι τεχνολογίες ενεργειακής αξιοποίησης περιλαμβάνουν θερμικές και βιολογικές διεργασίες. Στις θερμικές τεχνολογίες συγκαταλέγονται η καύση, η πυρόλυση και η αεριοποίηση, ενώ στις βιολογικές μεθόδους κυρίαρχη θέση κατέχει η αναερόβια χώνευση. Κάθε τεχνολογία παρουσιάζει διαφορετικά χαρακτηριστικά ως προς την ενεργειακή απόδοση, το κόστος εγκατάστασης, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και την καταλληλότητάς της για διαφορετικά είδη αποβλήτων. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εξαρτάται από τη σύσταση των αποβλήτων, τις ενεργειακές ανάγκες, το θεσμικό πλαίσιο και τις διαθέσιμες υποδομές.

Η πρακτική αυτή συνδέεται άμεσα με την έννοια της κυκλικής οικονομίας, σύμφωνα με την οποία τα απόβλητα αντιμετωπίζονται ως δευτερογενείς πόροι και όχι ως άχρηστα υλικά. Η κυκλική οικονομία επιδιώκει τη διατήρηση της αξίας των προϊόντων και των υλικών για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, μέσω της επαναχρησιμοποίησης, της ανακύκλωσης και της ανάκτησης ενέργειας. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται καλύτερη αξιοποίηση των φυσικών πόρων, περιορισμός των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και ενίσχυση της βιώσιμης ανάπτυξης.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της ενεργειακής αξιοποίησης αποβλήτων ως σύγχρονης και βιώσιμης πρακτικής διαχείρισης. Ειδικότερα, εξετάζονται οι κυριότερες τεχνολογίες ενεργειακής αξιοποίησης, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους, οι περιβαλλοντικές και οικονομικές επιπτώσεις τους, καθώς και οι δυνατότητες εφαρμογής τους στην Ελλάδα και διεθνώς. Παράλληλα,

αναλύεται ο ρόλος της ενεργειακής αξιοποίησης στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας και της πράσινης μετάβασης προς ένα πιο βιώσιμο μοντέλο ανάπτυξης.



Εικόνα 1 Διάγραμμα κυκλικής οικονομίας και επαναχρησιμοποίησης πόρων.

Η εικόνα παρουσιάζει το μοντέλο της κυκλικής οικονομίας και τις βασικές ροές υλικών και πόρων σε ένα βιώσιμο παραγωγικό και καταναλωτικό σύστημα. Στο αριστερό τμήμα του διαγράμματος απεικονίζεται ο βιολογικός κύκλος, όπου τα οργανικά υλικά και τα βιοαπόβλητα επιστρέφουν στη βιόσφαιρα μέσω διαδικασιών όπως η αναερόβια χώνευση και η παραγωγή βιοαερίου, συμβάλλοντας στην αναγέννηση φυσικών πόρων. Στο δεξί τμήμα παρουσιάζεται ο τεχνικός κύκλος, στον οποίο τα προϊόντα και τα υλικά διατηρούνται στην οικονομία μέσω επαναχρησιμοποίησης, επισκευής, ανακατασκευής και ανακύκλωσης.

Το διάγραμμα αναδεικνύει τη μετάβαση από το γραμμικό μοντέλο «παράγω–καταναλώνω–απορρίπτω» σε ένα κυκλικό μοντέλο διαχείρισης πόρων, όπου τα απόβλητα αντιμετωπίζονται ως δευτερογενείς πρώτες ύλες και ενεργειακοί πόροι. Στο πλαίσιο αυτό, η ενεργειακή αξιοποίηση αποβλήτων και ιδιαίτερα η παραγωγή

βιοαερίου μέσω αναερόβιας χώνευσης αποτελούν σημαντικά εργαλεία για τη βιώσιμη ανάπτυξη και τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. (Ellen MacArthur Foundation 2019)

Η ενεργειακή αξιοποίηση αποβλήτων συνδέεται άμεσα με την έννοια της κυκλικής οικονομίας. Στο πλαίσιο αυτό, τα απόβλητα αντιμετωπίζονται ως δευτερογενείς πόροι και όχι ως άχρηστα υλικά προς διάθεση. Η κυκλική οικονομία επιδιώκει τη διατήρηση της αξίας των προϊόντων και των υλικών για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, μέσω της επαναχρησιμοποίησης, της ανακύκλωσης και της ανάκτησης ενέργειας. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μείωση της κατανάλωσης πρώτων υλών, περιορισμός των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και ενίσχυση της βιώσιμης ανάπτυξης (Geissdoerfer et al., 2017).

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα των τεχνολογιών WtE, εξακολουθούν να υπάρχουν προκλήσεις και περιορισμοί. Το υψηλό αρχικό κόστος εγκατάστασης, η ανάγκη εξειδικευμένης τεχνογνωσίας και οι ανησυχίες σχετικά με τις ατμοσφαιρικές εκπομπές αποτελούν βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν την εφαρμογή τους. Επιπλέον, σε αρκετές περιπτώσεις παρατηρούνται κοινωνικές αντιδράσεις λόγω φόβων για πιθανές επιπτώσεις στη δημόσια υγεία και στο περιβάλλον. Για τον λόγο αυτό, η ανάπτυξη τέτοιων εγκαταστάσεων απαιτεί αυστηρά περιβαλλοντικά πρότυπα, προηγμένα συστήματα ελέγχου εκπομπών και αποτελεσματικό θεσμικό πλαίσιο.

Στην Ελλάδα, η διαχείριση αποβλήτων εξακολουθεί να βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην υγειονομική ταφή, παρά τις ευρωπαϊκές κατευθύνσεις για περιορισμό της πρακτικής αυτής. Η ενεργειακή αξιοποίηση αποβλήτων βρίσκεται ακόμη σε περιορισμένο στάδιο ανάπτυξης, ωστόσο τα τελευταία χρόνια έχουν ξεκινήσει συζητήσεις και σχεδιασμοί για την υλοποίηση νέων μονάδων ενεργειακής ανάκτησης. Η ανάγκη συμμόρφωσης με τους ευρωπαϊκούς στόχους, σε συνδυασμό με την ενεργειακή κρίση και την ανάγκη αξιοποίησης δευτερογενών πόρων, αναμένεται να ενισχύσει τον ρόλο των τεχνολογιών WtE στη χώρα.

Η παρούσα εργασία δεν περιορίζεται στην περιγραφική παρουσίαση των τεχνολογιών ενεργειακής αξιοποίησης αποβλήτων, αλλά επιχειρεί τη συγκριτική

εξετάσή τους ως προς τα βασικά τεχνικά, περιβαλλοντικά και οικονομικά χαρακτηριστικά τους. Εξετάζεται η εφαρμογή και οι προοπτικές αξιοποίησης των τεχνολογιών αυτών στην Ελλάδα, με έμφαση στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της ελληνικής διαχείρισης αστικών αποβλήτων. Μέσω της σύγκρισης των διαθέσιμων τεχνολογικών επιλογών και της αξιοποίησης ποσοτικών δεδομένων, επιδιώκεται η διαμόρφωση μιας συνολικής εικόνας σχετικά με τις προϋποθέσεις υπό τις οποίες η ενεργειακή αξιοποίηση μπορεί να αποτελέσει μέρος ενός ολοκληρωμένου συστήματος διαχείρισης αποβλήτων.

Κεφάλαιο 1 Διαχείριση αποβλήτων

1.1 Κατηγοριοποίηση αποβλήτων

Ως απόβλητο χαρακτηρίζεται κάθε ουσία ή αντικείμενο το οποίο απορρίπτεται ή πρόκειται να απορριφθεί. Στον σύγχρονο κόσμο τα απόβλητα είναι αποτέλεσμα της βιομηχανικής παραγωγής αλλά και της καθημερινής κατανάλωσης. Όπως είναι λογικό η αύξηση του πληθυσμού, η αστικοποίηση και η υιοθέτηση καταναλωτικών προτύπων έχουν οδηγήσει σε σημαντική αύξησή τους και σε συνδυασμό με την ανάπτυξη της τεχνολογίας, έχει αναπτυχθεί και η πολυπλοκότητά τους σε παγκόσμιο επίπεδο. (Kaza et al., 2018)

Τα απόβλητα κατηγοριοποιούνται με βάση την προέλευσή τους σε αστικά, βιομηχανικά, αγροτικά και επικίνδυνα. Ο διαχωρισμός αυτός είναι πολύ σημαντικός, καθώς σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του αποβλήτου θα επιλεγεί και ο κατάλληλος τρόπος διαχείρισής τους, δηλαδή θα εξεταστούν η σύσταση και τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των αποβλήτων προκειμένου να επιλεγεί η κατάλληλη τεχνολογία. Τα αστικά απόβλητα αποτελούνται από οικιακά και απορρίμματα εμπορικών δραστηριοτήτων. Αντίστοιχα τα βιομηχανικά και τα γεωργικά προκύπτουν από διαδικασίες παραγωγής. Τα επικίνδυνα απόβλητα, λόγω της χημικής τους σύστασης απαιτούν ιδιαίτερη διαχείριση. Η γνώση της σύστασης είναι απαραίτητη για τον σχεδιασμό συστημάτων διαχείρισης και για την αξιολόγηση ως προς την ενεργειακή απόδοση των αποβλήτων. (Saif et al., 2023)

1.2 Σύσταση και ενεργειακά χαρακτηριστικά αποβλήτων

Η σύσταση των αποβλήτων αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου διαχείρισης και ενεργειακής αξιοποίησης. Τα αστικά στερεά απόβλητα συνήθως αποτελούνται από οργανικά- βιοαποδομήσιμα υπολείμματα, χαρτί, πλαστικά, γυαλί, μέταλλα και αδρανή υλικά. Κάθε κατηγορία παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά κατά την επεξεργασία της. Για παράδειγμα, τα οργανικά-βιοαποδομήσιμα απόβλητα είναι περισσότερο κατάλληλα για βιολογικές διεργασίες, όπως η αναερόβια χώνευση, ενώ τα πλαστικά και το χαρτί διαθέτουν υψηλότερη

θερμογόνο δύναμη και μπορούν να αξιοποιηθούν αποδοτικά σε θερμικές τεχνολογίες, όπως η καύση, η πυρόλυση και η αεριοποίηση.

Ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας είναι η υγρασία των αποβλήτων, καθώς επηρεάζει άμεσα την ενεργειακή απόδοση. Απόβλητα με υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία απαιτούν μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας για την απομάκρυνση του νερού πριν από τη θερμική επεξεργασία, γεγονός που μειώνει τη συνολική αποδοτικότητα της διεργασίας. Αντίθετα, υλικά με χαμηλή υγρασία και υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα παρουσιάζουν μεγαλύτερη θερμογόνο δύναμη και είναι καταλληλότερα για ενεργειακή αξιοποίηση. Επομένως, η προεπεξεργασία των αποβλήτων, όπως η διαλογή, η ξήρανση και ο τεμαχισμός, είναι απαραίτητη για τη βελτίωση της απόδοσης των τεχνολογιών Waste-to-Energy.

Η σωστή γνώση της σύστασης των αποβλήτων επιτρέπει επίσης την εκτίμηση του ενεργειακού δυναμικού τους. Τα πλαστικά, τα χαρτιά και τα υφάσματα μπορούν να λειτουργήσουν ως καύσιμα υψηλής ενεργειακής αξίας, ενώ τα οργανικά-βιοαποδομήσιμα απόβλητα μπορούν να μετατραπούν σε βιοαέριο. Έτσι, η ενεργειακή αξιοποίηση δεν αποτελεί μία ενιαία τεχνολογία που εφαρμόζεται με τον ίδιο τρόπο σε όλα τα απόβλητα, αλλά ένα σύνολο επιλογών που πρέπει να προσαρμόζονται στα χαρακτηριστικά κάθε ρεύματος αποβλήτων. Η διεθνής βιβλιογραφία τονίζει ότι η ταξινόμηση και η γνώση των χαρακτηριστικών των αποβλήτων αποτελούν βασική προϋπόθεση για την αποτελεσματική εφαρμογή ολοκληρωμένων συστημάτων διαχείρισης (Hariyani et al., 2025). Ακολουθεί πίνακας (Kaza et al. 2018), στον οποίο αναγράφονται τα ποσοστά της σύστασης των στερεών τοπικών αποβλήτων.

Πίνακας 1 Τυπική σύσταση αστικών στερεών αποβλήτων.

Υλικό	Ποσοστό (%)
Οργανικά- Βιοαποδομήσιμα υλικά	40–50
Χαρτί	15–25
Πλαστικά	10–15
Γυαλί	3–5
Μέταλλα	2–4

1.3 Διαχείριση αποβλήτων

Σύμφωνα με τη σύγχρονη περιβαλλοντική πολιτική τίθεται σαν προτεραιότητα η πρόληψη της παραγωγής απορριμμάτων και στη συνέχεια ακολουθούν η επαναχρησιμοποίηση, η ανακύκλωση, η ανάκτηση ενέργειας και σαν τελική λύση η διάθεσή τους μέσω υγειονομικής ταφής. Με αυτή την προσέγγιση εστιάζουμε στην μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και στην βέλτιστη αξιοποίηση των ήδη υπαρκτών πόρων. (Papargyropoulou et al., 2014)

Με τον όρο πρόληψη αποσκοπούμε στην ελάττωση της ποσότητας των αποβλήτων πριν ακόμα αυτά δημιουργηθούν. Κάτι τέτοιο μπορεί να επιτευχθεί αλλάζοντας τον σχεδιασμό των προϊόντων αλλά και την επιρροή του μάρκετινγκ. Με την επαναχρησιμοποίηση μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε προϊόντα χωρίς οικονομικά ασύμφορη, χρονικά και οικονομικά, σημαντική επεξεργασία. Μετά την ανακύκλωση τους κάποια προϊόντα θα μπορέσουν να δημιουργηθούν νέες πρώτες ύλες. Σε περίπτωση που η ανακύκλωση δεν μπορεί να αξιοποιηθεί, η ανάκτηση ενέργειας των υπολειμμάτων των αποβλήτων μπορεί να θεωρηθεί σαν μια εναλλακτική λύση.

Η ιεράρχηση της διαχείρισης αποβλήτων αποτελεί βασική αρχή της σύγχρονης περιβαλλοντικής πολιτικής. Σύμφωνα με αυτήν, η πρόληψη της παραγωγής αποβλήτων θεωρείται η σημαντικότερη επιλογή, καθώς μειώνει το πρόβλημα στην πηγή του. Ακολουθούν η επαναχρησιμοποίηση και η ανακύκλωση, οι οποίες επιτρέπουν την παράταση του κύκλου ζωής των προϊόντων και την ανάκτηση πρώτων υλών. Η ενεργειακή αξιοποίηση τοποθετείται μετά την ανακύκλωση και πριν από την τελική διάθεση, καθώς αφορά κυρίως τα υπολείμματα που δεν μπορούν να ανακυκλωθούν περαιτέρω.

Η θέση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, διότι δείχνει ότι η ενεργειακή αξιοποίηση δεν πρέπει να λειτουργεί ανταγωνιστικά προς την ανακύκλωση. Αντίθετα, πρέπει να εφαρμόζεται συμπληρωματικά, αξιοποιώντας το μη ανακυκλώσιμο κλάσμα των αποβλήτων. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται η ποσότητα που οδηγείται σε χώρους υγειονομικής ταφής, ενώ παράλληλα παράγεται ηλεκτρική ή θερμική ενέργεια. Η προσέγγιση αυτή είναι σύμφωνη με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας, καθώς δίνει αξία σε υλικά που διαφορετικά θα απορρίπτονταν.

Επιπλέον, η ανάκτηση ενέργειας μπορεί να συμβάλει στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με την ταφή των αποβλήτων. Η αποσύνθεση οργανικών υλικών σε χώρους ταφής οδηγεί στην παραγωγή μεθανίου, το οποίο αποτελεί ισχυρό αέριο του θερμοκηπίου. Η μετατροπή μέρους αυτών των αποβλήτων σε ενέργεια περιορίζει την ανάγκη ταφής και μπορεί να συμβάλει στην επίτευξη περιβαλλοντικών και ενεργειακών στόχων. Ωστόσο, η εφαρμογή τέτοιων τεχνολογιών πρέπει να συνοδεύεται από αυστηρό περιβαλλοντικό έλεγχο, ώστε να περιορίζονται οι εκπομπές και να διασφαλίζεται η προστασία της δημόσιας υγείας.

Οι σύγχρονες μέθοδοι επεξεργασίας αποβλήτων διακρίνονται σε μηχανικές, βιολογικές και θερμικές διεργασίες. Στις μηχανικές μεθόδους συγκαταλέγονται οι διαδικασίες διαλογής, τεμαχισμού και συμπίεσης, με την βοήθεια των οποίων γίνεται η ανάκτηση των ανακυκλώσιμων υλικών καθώς και η μείωση του όγκου των απορριμμάτων, γεγονός που διευκολύνει το επόμενο βήμα. Οι μηχανικές μέθοδοι αποτελούν συνήθως το πρώτο στάδιο ενός ολοκληρωμένου συστήματος διαχείρισης αποβλήτων. Μέσω της διαλογής και του τεμαχισμού επιτυγχάνεται ο διαχωρισμός των χρήσιμων υλικών από το υπόλοιπο ρεύμα αποβλήτων, γεγονός που διευκολύνει την ανακύκλωση και τη μετέπειτα ενεργειακή αξιοποίηση. Οι εγκαταστάσεις μηχανικής επεξεργασίας μπορούν να ανακτήσουν μέταλλα, πλαστικά, χαρτί και γυαλί, μειώνοντας έτσι την ποσότητα των αποβλήτων που οδηγούνται σε ταφή. Παράλληλα, η μηχανική επεξεργασία μπορεί να οδηγήσει στην παραγωγή δευτερογενών καυσίμων, όπως RDF και SRF. Τα καύσιμα αυτά προέρχονται από το ξηρό και υψηλής θερμογόνου δύναμης κλάσμα των αποβλήτων και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μονάδες ενεργειακής αξιοποίησης ή σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις, όπως οι τσιμεντοβιομηχανίες. Με τον τρόπο αυτό, η μηχανική επεξεργασία δεν περιορίζεται μόνο στην ανακύκλωση, αλλά λειτουργεί και ως στάδιο προετοιμασίας για την παραγωγή ενέργειας.

Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα των μηχανικών μεθόδων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα της διαλογής στην πηγή. Όταν τα απόβλητα είναι έντονα αναμεμειγμένα ή περιέχουν υψηλά ποσοστά υγρασίας και οργανικών-βιοαποδομήσιμων υπολειμμάτων, η ανάκτηση καθαρών υλικών γίνεται δυσκολότερη. Για τον λόγο αυτό, η επιτυχία των μηχανικών μεθόδων προϋποθέτει

οργανωμένα συστήματα συλλογής, ενημέρωση των πολιτών και κατάλληλες τεχνολογικές υποδομές. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, οι μηχανικές μέθοδοι είναι ιδιαίτερα σημαντικές για τη μείωση του όγκου των αποβλήτων και τη μεγιστοποίηση της ανάκτησης υλικών (Hariyani et al., 2025).

Σε αυτό το στάδιο πολλά από τα υλικά κατευθύνονται προς τις μονάδες ανακύκλωσης. Για τα οργανικά - βιοαποδομήσιμα απόβλητα επιλέγονται οι βιολογικές μέθοδοι, στις οποίες περιλαμβάνονται η κομποστοποίηση και η αναερόβια χώνευση. Το παράγωγο της κομποστοποίησης είναι ένα σταθεροποιημένο οργανικό υλικό το οποίο είναι κατάλληλο για χρήση ως εδαφοβελτιωτικό στις γεωργικές εργασίες. Η κομποστοποίηση αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες βιολογικές μεθόδους διαχείρισης οργανικών αποβλήτων. Βασίζεται στην αερόβια αποδόμηση της οργανικής ύλης από μικροοργανισμούς, με τελικό προϊόν το κομπόστ. Το προϊόν αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη γεωργία και στην αποκατάσταση εδαφών, καθώς βελτιώνει τη δομή του εδάφους, αυξάνει την οργανική ουσία και ενισχύει τη συγκράτηση νερού. Με τον τρόπο αυτό, η κομποστοποίηση συμβάλλει στην ανακύκλωση θρεπτικών στοιχείων και στη μείωση της ανάγκης χρήσης χημικών λιπασμάτων.

Ένα βασικό πλεονέκτημα της κομποστοποίησης είναι ότι μειώνει την ποσότητα των οργανικών αποβλήτων που οδηγούνται σε χώρους υγειονομικής ταφής. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς τα οργανικά απόβλητα σε αναερόβιες συνθήκες ταφής παράγουν μεθάνιο. Αντίθετα, μέσω της ελεγχόμενης αερόβιας επεξεργασίας περιορίζεται η ανεξέλεγκτη παραγωγή αερίων και επιτυγχάνεται η μετατροπή των αποβλήτων σε χρήσιμο προϊόν.

Παρά τα πλεονεκτήματά της, η κομποστοποίηση παρουσιάζει και ορισμένους περιορισμούς. Απαιτεί σωστή διαλογή στην πηγή, καθώς η παρουσία πλαστικών, μετάλλων ή άλλων μη βιοαποδομήσιμων υλικών μπορεί να υποβαθμίσει την ποιότητα του τελικού προϊόντος. Επιπλέον, αν δεν ελέγχονται σωστά οι συνθήκες υγρασίας, αερισμού και θερμοκρασίας, μπορεί να εμφανιστούν προβλήματα οσμών ή ανεπαρκής σταθεροποίηση του υλικού. Επομένως, η κομποστοποίηση είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική όταν εφαρμόζεται σε καθαρά οργανικά ρεύματα αποβλήτων και εντάσσεται σε οργανωμένο σύστημα χωριστής συλλογής.

Από την αναερόβια χώνευση παράγεται το βιοαέριο, το οποίο χρησιμοποιείται για την παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας. Η διεργασία πραγματοποιείται απουσία οξυγόνου και βασίζεται στη δράση μικροοργανισμών, οι οποίοι αποδομούν την οργανική ύλη και παράγουν βιοαέριο. Το βιοαέριο αποτελείται κυρίως από μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα, ενώ μπορεί να περιέχει μικρές ποσότητες υδρόθειου, αμμωνίας και υδρατμών. Το μεθάνιο είναι το ενεργειακά αξιοποιήσιμο συστατικό του βιοαερίου και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θερμότητας ή να αναβαθμιστεί σε βιομεθάνιο.

Η διεργασία της αναερόβιας χώνευσης πραγματοποιείται σε τέσσερα βασικά στάδια: υδρόλυση, οξεογένεση, οξικογένεση και μεθανογένεση. Κατά την υδρόλυση, τα σύνθετα οργανικά μόρια, όπως υδατάνθρακες, πρωτεΐνες και λιπίδια, διασπώνται σε απλούστερες ενώσεις. Στη συνέχεια, κατά την οξεογένεση και την οξικογένεση, οι ενώσεις αυτές μετατρέπονται σε πτητικά λιπαρά οξέα, υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα. Τέλος, στο στάδιο της μεθανογένεσης, ειδικοί μικροοργανισμοί παράγουν μεθάνιο, το οποίο αποτελεί το κύριο ενεργειακό προϊόν της διεργασίας.

Οι θερμικές τεχνολογίες παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την ενεργειακή αξιοποίηση αποβλήτων, καθώς επιτρέπουν τη μετατροπή του ενεργειακού περιεχομένου τους σε θερμότητα, ηλεκτρική ενέργεια ή καύσιμα. Σε αντίθεση με τις βιολογικές τεχνολογίες, οι οποίες εφαρμόζονται κυρίως σε οργανικά και υγρά απόβλητα, οι θερμικές μέθοδοι μπορούν να εφαρμοστούν σε ξηρά και υψηλής θερμογόνου δύναμης υλικά, όπως πλαστικά, χαρτί, υφάσματα και RDF.

Η καύση είναι η πιο ώριμη τεχνολογία, καθώς εφαρμόζεται εδώ και δεκαετίες σε πολλές χώρες. Η πυρόλυση και η αεριοποίηση θεωρούνται πιο προηγμένες τεχνολογίες, καθώς παράγουν ενδιάμεσα ενεργειακά προϊόντα, όπως πυρολυτικό έλαιο και συνθετικό αέριο. Παρόλα αυτά, απαιτούν υψηλότερο επίπεδο τεχνολογικού ελέγχου και συχνά μεγαλύτερο κόστος επένδυσης. Η επιλογή μεταξύ των θερμικών τεχνολογιών εξαρτάται από τη σύσταση των αποβλήτων, το επιθυμητό τελικό προϊόν, τις περιβαλλοντικές απαιτήσεις και την οικονομική βιωσιμότητα της μονάδας.

Συνολικά, οι θερμικές τεχνολογίες μπορούν να συμβάλουν ουσιαστικά στη μείωση της ταφής και στην παραγωγή ενέργειας από απορρίμματα. Παρόλα αυτά, δεν πρέπει να αντιμετωπίζονται ως υποκατάστατο της πρόληψης και της ανακύκλωσης, αλλά ως

συμπληρωματική λύση για το υπόλειμμα που δεν μπορεί να αξιοποιηθεί με άλλους τρόπους.

Η αναερόβια χώνευση παρουσιάζει σημαντικά περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα, καθώς μειώνει την ποσότητα των οργανικών αποβλήτων που οδηγούνται σε ταφή και περιορίζει τις ανεξέλεγκτες εκπομπές μεθανίου. Παράλληλα, το υπόλειμμα της διεργασίας, γνωστό ως χωνεμένο υπόλειμμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως οργανικό λίπασμα, εφόσον πληροί τις απαραίτητες ποιοτικές προδιαγραφές. Με αυτόν τον τρόπο, η τεχνολογία αυτή συνδυάζει την παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας με την ανακύκλωση θρεπτικών συστατικών.

Ωστόσο, η αναερόβια χώνευση απαιτεί προσεκτικό έλεγχο των συνθηκών λειτουργίας. Παράμετροι όπως η θερμοκρασία, το pH, ο χρόνος παραμονής και η αναλογία άνθρακα προς άζωτο επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση της διεργασίας. Υψηλές συγκεντρώσεις αμμωνίας ή η παρουσία τοξικών ουσιών μπορούν να αναστείλουν τη δράση των μικροοργανισμών και να μειώσουν την παραγωγή βιοαερίου. Για τον λόγο αυτό, η σωστή επιλογή και προεπεξεργασία του υποστρώματος είναι ιδιαίτερα σημαντική. Η διεθνής βιβλιογραφία αναγνωρίζει την αναερόβια χώνευση ως ώριμη τεχνολογία για τη διαχείριση οργανικών αποβλήτων και την παραγωγή βιοενέργειας (Appels et al., 2008; Mao et al., 2020).

Οι βιολογικές διεργασίες μπορούν να συμβάλουν στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Παράλληλα, οι θερμικές διεργασίες, όπως η καύση, η πυρόλυση και η αεριοποίηση, επιτρέπουν την ενεργειακή αξιοποίηση του κατάλληλου κλάσματος των αποβλήτων. Η καύση είναι ευρέως γνωστή για την επεξεργασία αστικών αποβλήτων, με την βοήθεια της οποίας μειώνεται ο όγκος των αποβλήτων και παράλληλα μπορεί να παραχθεί ενέργεια. Τόσο η πυρόλυση όσο και η αεριοποίηση είναι διεργασίες αποδόμησης των οργανικών υλικών που υπάρχουν στα απορρίμματα, οι οποίες διεξάγονται σε συνθήκες απουσίας ή ελάχιστης παρουσίας οξυγόνου. Η πυρόλυση συντελεί στην κυκλική οικονομία, ειδικά για τα ρεύματα αποβλήτων υψηλής θερμογόνου δύναμης όπως είναι τα πλαστικά. Με την αεριοποίηση παράγεται ένα σύνθετο αέριο, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. (Hariyani et al., 2025)

1.4 Κυκλική οικονομία και ενεργειακή αξιοποίηση αποβλήτων

Με την βοήθεια της κυκλικής οικονομίας, στόχος της οποίας είναι η διατήρηση της αξίας προϊόντων και πόρων για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, μπορούμε να πετύχουμε την επαναχρησιμοποίηση, την ανακατασκευή και την ανακύκλωση. Εφαρμόζοντάς την στον τομέα της διαχείρισης αποβλήτων θα μπορέσουμε να επιτύχουμε την μείωση της εξόρυξης πρώτων υλών και έτσι θα εξοικονομούμε περισσότερη ενέργεια και θα εκπέμπονται λιγότερα αέρια του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα. Η κυκλική οικονομία, στο πλαίσιο της αξιοποίησης αποβλήτων, μπορεί να χαρακτηριστεί σαν μέθοδος ανάκτησης αξίας από μη ανακυκλώσιμα υλικά, συμβάλλοντας έτσι σημαντικά στην μείωση της ταφής και στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. (Geissdoerfer et al., 2017)

Με την ενεργειακή αξιοποίηση αποβλήτων μετατρέπονται ακόμα και τα μη ανακυκλώσιμα υλικά σε χρήσιμες μορφές ενέργειας, ενώ σε αντίθετη περίπτωση θα απορρίπτονταν χωρίς κάποιο όφελος. Τροφοδοτώντας αυτά τα υλικά στις μονάδες ενεργειακής αξιοποίησης μπορούν να παραχθούν ηλεκτρική ενέργεια, θερμότητα ή ακόμα και καύσιμα, συμβάλλοντας στην πολύ δύσκολη αλλά επιθυμητή ανεξαρτητοποίηση από τα ορυκτά καύσιμα. (World Energy Council, 2016)

Με την ενεργειακή αξιοποίηση των αποβλήτων μειώνεται ο όγκος των απορριμμάτων τα οποία θα κατέληγαν σε χώρους υγειονομικής ταφής και έτσι μειώνονται οι ανεπιθύμητες εκπομπές μεθανίου λόγω της αποσύνθεσης των οργανικών υλικών. Δεν θα πρέπει να ξεχνάμε, ότι για μια τέτοιου είδους εφαρμογή θα πρέπει να τηρούνται πολύ αυστηρά μέτρα και περιβαλλοντικά πρότυπα, να εφαρμόζονται προηγμένα συστήματα ελέγχου εκπομπών για να μπορέσουν τα συστήματα αυτά να λειτουργούν με τον βέλτιστο τρόπο χωρίς να επιβαρύνουν την ποιότητα του αέρα και τη δημόσια υγεία. (Astrup et al., 2015)

Η διαχείριση αποβλήτων αποτελεί σύνθετο ζήτημα που απαιτεί συνδυασμό τεχνολογικών, περιβαλλοντικών, οικονομικών και κοινωνικών παραμέτρων. Η κατηγοριοποίηση των αποβλήτων και η γνώση της σύστασής τους είναι βασικές προϋποθέσεις για την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου επεξεργασίας. Τα οργανικά απόβλητα είναι περισσότερο κατάλληλα για βιολογικές τεχνολογίες, όπως η

κομποστοποίηση και η αναερόβια χώνευση, ενώ τα ξηρά και υψηλής θερμογόνου δύναμης απόβλητα μπορούν να αξιοποιηθούν μέσω θερμικών διεργασιών.

Η σύγχρονη προσέγγιση δεν βασίζεται σε μία μόνο μέθοδο, αλλά σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα που συνδυάζει πρόληψη, επαναχρησιμοποίηση, ανακύκλωση, ανάκτηση ενέργειας και τελική διάθεση. Στο πλαίσιο αυτό, η ενεργειακή αξιοποίηση αποβλήτων έχει σημαντικό ρόλο, καθώς επιτρέπει την παραγωγή ενέργειας από υλικά που δεν μπορούν να ανακυκλωθούν. Παράλληλα, συμβάλλει στη μείωση της ταφής και στην καλύτερη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων.

Η κυκλική οικονομία προσφέρει το θεωρητικό πλαίσιο μέσα στο οποίο η διαχείριση αποβλήτων μετατρέπεται από πρόβλημα σε ευκαιρία. Αντί τα απόβλητα να θεωρούνται άχρηστα υλικά, αντιμετωπίζονται ως δευτερογενείς πόροι που μπορούν να επανενταχθούν στην παραγωγική διαδικασία ή να αξιοποιηθούν ενεργειακά. Επομένως, η ενεργειακή αξιοποίηση αποβλήτων αποτελεί σημαντικό εργαλείο για τη μετάβαση σε ένα πιο βιώσιμο μοντέλο ανάπτυξης.

Ο Πίνακας 2 παρουσιάζει συγκριτικά τα βασικά χαρακτηριστικά των κυριότερων τεχνολογιών ενεργειακής αξιοποίησης αποβλήτων, αναδεικνύοντας τις συνθήκες λειτουργίας, τα παραγόμενα προϊόντα, καθώς και τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κάθε μεθόδου.

Πίνακας 2 Σύγκριση τεχνολογιών ενεργειακής αξιοποίησης αποβλήτων

Τεχνολογία	Προϊόν	Θερμοκρασία	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Καύση	Θερμότητα	>850°C	ώριμη τεχνολογία	εκπομπές
Πυρόλυση	Πυρολυτικό έλαιο / συνθετικό αέριο	300–800°C	υψηλή απόδοση	υψηλό κόστος
Αεριοποίηση	Συνθετικό αέριο	800–1200°C	καθαρότερο αέριο	πολυπλοκότητα
Αναερόβια χώνευση	Βιοαέριο	35–55°C	ΑΠΕ	Μόνο βιοαποδομήσιμα υλικά

Κεφάλαιο 2: Τεχνολογίες ενεργειακής αξιοποίησης

2.1 Σημασία ενεργειακής αξιοποίησης

Με την μετατροπή των μη ανακυκλώσιμων απορριμμάτων σε χρήσιμες μορφές ενέργειας, επιτυγχάνεται η βιώσιμη διαχείριση μέσω της ενεργειακής αξιοποίησης των αποβλήτων. Με την πρακτική αυτή συμβάλουμε στην μείωση του όγκου των αποβλήτων που θα κατέληγαν σε υγειονομική ταφή και στην παραγωγή ενέργειας από δευτερογενείς πόρους, καθώς αξιοποιείται το ενεργειακό περιεχόμενο των αποβλήτων. Τα απόβλητα, μετά την διαδικασία της ανακύκλωσης και πριν την τελική τους διάθεση, χρησιμοποιούνται σαν “καύσιμο” για την παραγωγή χρήσιμων προϊόντων. Επιπλέον οφέλη από αυτή τη πρακτική είναι η σταδιακή μείωση της εξάρτησης από ορυκτά καύσιμα, εξοικονομώντας έτσι φυσικούς πόρους, και η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. (Dong et al., 2020)

Ο συνδυασμός της αύξησης των αστικών αποβλήτων με την αυξανόμενη ανάγκη για απαλλαγή από την καύση άνθρακα, κάνει εντονότερη την ανάγκη για στροφή σε τεχνολογίες αξιοποίησης αποβλήτων σαν εναλλακτικές πηγές παραγωγής ενέργειας, θερμότητας ή ακόμα και καυσίμων. Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό αυτών των τεχνολογιών είναι το πολύ μικρό ανθρακικό τους αποτύπωμα. (Chen et al., 2021)

Η αυξανόμενη ανάγκη για περιορισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και η προσπάθεια απεξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα έχουν ενισχύσει σημαντικά το ενδιαφέρον για τις τεχνολογίες ενεργειακής αξιοποίησης αποβλήτων. Η ενεργειακή κρίση των τελευταίων ετών, σε συνδυασμό με τη στρατηγική της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την πράσινη μετάβαση, έχει αναδείξει τη σημασία των εναλλακτικών πηγών ενέργειας και της αξιοποίησης δευτερογενών πόρων. Στο πλαίσιο αυτό, τα απόβλητα δεν αντιμετωπίζονται αποκλειστικά ως περιβαλλοντικό πρόβλημα, αλλά και ως πιθανή πηγή παραγωγής ενέργειας.

Οι τεχνολογίες Waste-to-Energy μπορούν να συμβάλουν τόσο στη μείωση της εξάρτησης από τους χώρους υγειονομικής ταφής όσο και στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θερμότητας ή καυσίμων. Παράλληλα, συμβάλλουν στη μείωση των εκπομπών μεθανίου που σχετίζονται με την ταφή οργανικών αποβλήτων και στη

βελτίωση της συνολικής αποδοτικότητας των συστημάτων διαχείρισης. Σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες, η ενεργειακή αξιοποίηση αποβλήτων μπορεί να αποτελέσει σημαντικό εργαλείο για την επίτευξη των στόχων απανθρακοποίησης και κυκλικής οικονομίας (Dong et al., 2020).

2.2 Τεχνολογίες ενεργειακής αξιοποίησης

Οι θερμικές διεργασίες είναι οι πιο διαδεδομένες για την ενεργειακή αξιοποίηση αποβλήτων, βασική τους αρχή είναι η μετατροπή της χημικής ενέργειας που διαθέτουν τα απορρίμματα σε θερμική με την βοήθεια υψηλών θερμοκρασιών. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι βασικότερες μέθοδοι αυτού του είδους είναι η καύση, η πυρόλυση και η αεριοποίηση. (Panerinto et al., 2021) Με τη χρήση αυτών των τεχνολογιών μειώνεται σημαντικά ο όγκος των αποβλήτων, ενώ, υπό κατάλληλες συνθήκες λειτουργίας, περιορίζεται η παρουσία επικίνδυνων οργανικών ενώσεων και παράγεται ενέργεια. Ανάλυση των τριών τεχνολογιών θερμικής ενεργειακής αξιοποίησης ακολουθεί στις επόμενες παραγράφους καθώς και μεταξύ τους σύγκριση.

2.2.1 Καύση αποβλήτων

Η μέθοδος της καύσης είναι μια από τις βασικότερες τεχνικές διαχείρισης στερεών αποβλήτων. Πρόκειται για διαδικασία οξείδωσης των οργανικών συστατικών των αποβλήτων με παρουσία περίσσειας οξυγόνου, σε θερμοκρασίες άνω των 850° C. Τα προϊόντα της διαδικασίας αυτής είναι η θερμότητα, το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), νερό (H₂O) και τέφρα. Παρατηρείται πολύ μεγάλη μείωση του όγκου των αποβλήτων και αξιοποιώντας την θερμότητα που παράγεται, μπορούμε να την μετασχηματίσουμε σε ηλεκτρική ή ακόμα και ατμό (κινητική ή θερμική ανάλογα την ζήτηση). Οι πιο σύγχρονες μονάδες καύσης μπορούν να μειώσουν τον όγκο των αποβλήτων που θα διατεθούν σε ταφή έως και 90%. Η χρήση της τεχνολογίας της καύσης σε συνδυασμό με τα προηγμένα συστήματα καθαρισμού των καυσαερίων, τα οποία ελαχιστοποιούν τις εκπομπές βλαβερών και τοξικών ουσιών όπως είναι η διοξίνες, τα βαρέα μέταλλα και αιωρούμενα σωματίδια, βοηθούν στην ανάδειξη του

προφίλ αυτής της μεθόδου ως μια διαδικασία φιλική προς το περιβάλλον. Πριν την επιλογή της καύσης σαν μέθοδο διαχείρισης αποβλήτων θα πρέπει να ληφθεί υπόψη το υψηλό αρχικό κόστος ολόκληρης της εγκατάστασης και η συνεχής παρακολούθηση και συντήρηση της. (Dong et al., 2020)

Η καύση αποτελεί την πλέον ώριμη και ευρέως εφαρμοζόμενη τεχνολογία ενεργειακής αξιοποίησης αποβλήτων. Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματά της είναι η μεγάλη μείωση του όγκου και της μάζας των απορριμμάτων, η οποία μπορεί να φτάσει έως και το 90%. Με τον τρόπο αυτό περιορίζεται σημαντικά η ανάγκη δημιουργίας νέων χώρων υγειονομικής ταφής. Παράλληλα, η καύση επιτρέπει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας μέσω συστημάτων συμπαραγωγής, συμβάλλοντας στην ενεργειακή αξιοποίηση των απορριμμάτων.

Επιπλέον, οι σύγχρονες μονάδες καύσης διαθέτουν προηγμένα συστήματα καθαρισμού καυσαερίων, τα οποία μειώνουν σημαντικά τις εκπομπές διοξινών, βαρέων μετάλλων και αιωρούμενων σωματιδίων. Ωστόσο, παρά τις τεχνολογικές εξελίξεις, η καύση εξακολουθεί να συνοδεύεται από κοινωνικές και περιβαλλοντικές ανησυχίες. Το υψηλό κόστος εγκατάστασης, η ανάγκη συνεχούς τροφοδοσίας αποβλήτων και οι φόβοι για ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελούν βασικούς περιορισμούς της τεχνολογίας. Για τον λόγο αυτό, η λειτουργία τέτοιων εγκαταστάσεων απαιτεί αυστηρό περιβαλλοντικό έλεγχο και συνεχή παρακολούθηση των εκπομπών (Panepinto et al., 2021).

2.2.2 Πυρόλυση

Η πυρόλυση είναι θερμοχημική διεργασία αποδόμησης των οργανικών υλικών που περιέχονται στα απόβλητα και εκτελείται σε συνθήκες απουσίας οξυγόνου. Η διεργασία αυτή λαμβάνει χώρα σε ένα εύρος θερμοκρασιών από 300° C μέχρι 800°C, κατά την οποία πραγματοποιείται θερμική αποδόμηση των οργανικών αποβλήτων. Τα βασικά προϊόντα της πυρόλυσης είναι το πυρολυτικό αέριο, το οποίο αποτελείται κυρίως από CO, H₂ και υδρογονάνθρακες, το υγρό, μείγμα οργανικών ενώσεων, και το στερεό υπόλειμμα, πλούσιο σε άνθρακα. Το αέριο και το υγρό κλάσμα έχουν υψηλή θερμογόνο δύναμη και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμα. Υπάρχουν

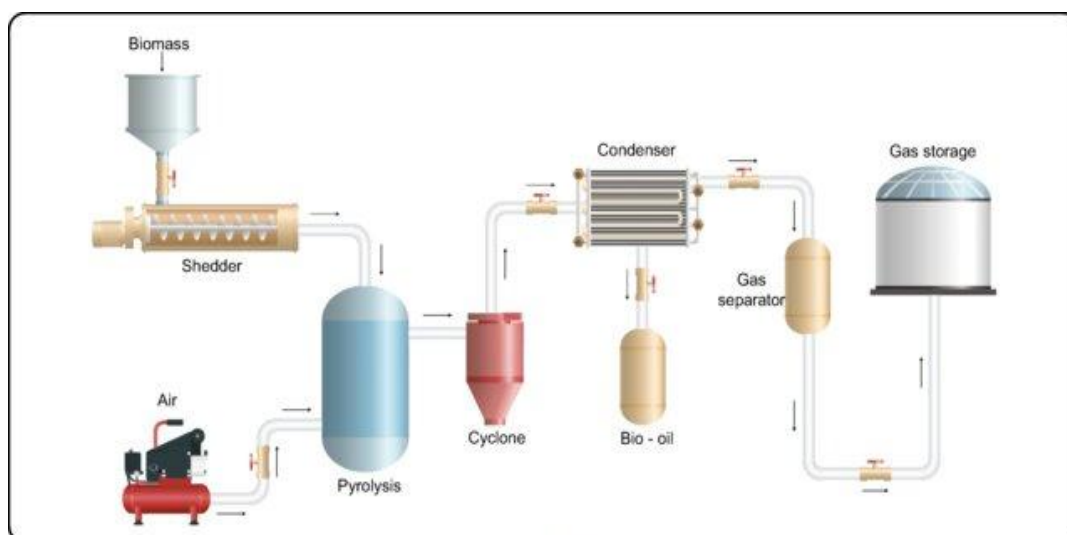
δύο είδη πυρόλυσης, η ταχεία και η υγρή πυρόλυση. Κατά την ταχεία πυρόλυση τα απόβλητα θερμαίνονται σε υψηλές θερμοκρασίες για σύντομο χρονικό διάστημα και με αυτή την διαδικασία παράγεται μεγαλύτερη ποσότητα υγρού καυσίμου. Το υγρό αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν καύσιμο ή να αναβαθμιστεί η ποιότητα του σε επόμενο στάδιο. Σε αντίθεση, κατά την αργή πυρόλυση παράγεται περισσότερη ποσότητα στερεού υπολείμματος, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο ή εδαφοβελτιωτικό. (Bridgwater, 2012)

Η πυρόλυση παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την επεξεργασία αποβλήτων υψηλής θερμογόνου δύναμης, όπως τα πλαστικά, τα ελαστικά και η βιομάζα. Μέσω της θερμικής αποδόμησης παράγονται αέρια και υγρά προϊόντα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμα ή να υποστούν περαιτέρω επεξεργασία για παραγωγή χημικών προϊόντων. Το πυρολυτικό έλαιο που παράγεται μπορεί, υπό προϋποθέσεις, να αξιοποιηθεί ως εναλλακτικό υγρό καύσιμο, ενώ το αέριο προϊόν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών της ίδιας της μονάδας.

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της πυρόλυσης είναι ότι πραγματοποιείται απουσία οξυγόνου, γεγονός που περιορίζει τον σχηματισμό διοξινών και άλλων τοξικών ενώσεων σε σχέση με την καύση. Παράλληλα, η τεχνολογία επιτρέπει μεγαλύτερη ευελιξία ως προς τα τελικά προϊόντα, καθώς η αναλογία αερίου, υγρού και στερεού μπορεί να μεταβληθεί ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας. Ωστόσο, η πυρόλυση απαιτεί υψηλό επίπεδο τεχνολογικού ελέγχου, προεπεξεργασία των αποβλήτων και σημαντικό επενδυτικό κόστος, γεγονός που περιορίζει την ευρεία εφαρμογή της σε σύγκριση με την καύση (Chen et al., 2021).

Τα στάδια τα οποία ακολουθούνται κατά την διαδικασία της πυρόλυσης είναι η αποξήρανση, απομάκρυνση υγρασίας, πρωτογενής πυρόλυση, διάσπαση ασταθών οργανικών ενώσεων και απελευθέρωση των πτητικών, δευτερογενής πυρόλυση, παραγωγή του πυρολυτικού αερίου και υγρού υπολείμματος, και τέλος με τις συνθήκες των υψηλότερων θερμοκρασιών, πετυχαίνουμε την διάσπαση των βαρέων πτητικών ενώσεων. Από την ενεργειακή σκοπιά, η πυρόλυση εξάγει το μεγαλύτερο ποσοστό χημική ενέργεια που μπορεί να περιέχεται στα απόβλητα. Η παραγόμενη ενέργεια μπορεί να ανατροφοδοτήσει την ίδια την διαδικασία, πετυχαίνοντας έτσι

ενεργειακό ισοζύγιο. Μπορεί να χαρακτηριστεί ως η πιο ελεγχόμενη διεργασία, καθώς με την απουσία οξυγόνου περιορίζεται ο σχηματισμός επικίνδυνων και τοξικών ουσιών. Χωρίς αυτό να σημαίνει ότι δεν απαιτούνται συστήματα καθαρισμού των απαερίων. Σαν τεχνολογία χρειάζεται αρκετά μεγάλη οικονομική επένδυση και απαιτεί και προεπεξεργασία των αποβλήτων. (Bridgwater, 2012)



Εικόνα 2 Διάγραμμα διεργασίας πυρόλυσης βιομάζας και παραγωγής ενεργειακών προϊόντων.

Η εικόνα παρουσιάζει σχηματικά τη διαδικασία της πυρόλυσης, κατά την οποία η βιομάζα οδηγείται σε αντιδραστήρα πυρόλυσης απουσία οξυγόνου και μετατρέπεται σε αέρια, υγρά και στερεά προϊόντα. Τα παραγόμενα αέρια και ατμοί οδηγούνται σε σύστημα συμπύκνωσης και διαχωρισμού, όπου παράγεται βιοέλαιο (bio-oil), ενώ το αέριο που δεν συμπυκνώνεται αποθηκεύεται και μπορεί να αξιοποιηθεί ενεργειακά. (Biomass Conversion and Biorefinery, Springer Nature 2023)

2.2.3 Αεριοποίηση

Με τον όρο αεριοποίηση αναφερόμαστε στην θερμοχημική διαδικασία οξείδωσης οργανικών υλικών σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, 800° C – 1200° C, σε συνδυασμό με ελάχιστη παρουσία οξυγόνου. Παράγωγο αυτής της διεργασίας είναι το συνθετικό αέριο, το οποίο αποτελείται από υδρογόνο H₂, μονοξείδιο του άνθρακα CO, μεθάνιο CH₄ και μικρά ποσοστά διοξειδίου του άνθρακα CO₂. Το συνθετικό αέριο αυτό μπορεί

να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θερμότητας ή καυσίμων. (Panepinto et al., 2021)

Τα στάδια που περιλαμβάνονται σε αυτή τη μέθοδο είναι τα εξής τέσσερα: η ξήρανση, η πυρόλυση, η οξείδωση και η αναγωγή. Η ξήρανση αποτελεί το πρώτο στάδιο της αεριοποίησης, κατά το οποίο απομακρύνεται η υγρασία, σε χαμηλές θερμοκρασίες έως 200° C. Μέρος των υδρατμών που παράγονται σε αυτό το στάδιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί αργότερα, συμβάλλοντας στην παραγωγή του υδρογόνου ευνοώντας έτσι το ενεργειακό ισοζύγιο της διεργασίας. Με την απομάκρυνση της υγρασίας, σειρά για το υλικό έχει η διαδικασία της πυρόλυσης. Το στάδιο αυτό διενεργείται σε θερμοκρασιακό περιβάλλον από 200° C έως 600° C, με περιορισμένη παρουσία οξυγόνου. Κατά την διαδικασία της πυρόλυσης απελευθερώνονται οι πτητικές ενώσεις και σχηματίζεται το στέρεο ανθρακικό υπόλειμμα. Σε αντίθεση με την μέθοδο της πυρόλυσης, στην αεριοποίηση κατά το στάδιο της πυρόλυσης τα προϊόντα που σχηματίζονται δεν αποτελούν τα τελικά παράγωγα, τα πτητικά αέρια οξειδώνονται μερικώς και το στερεό υπόλειμμα μετατρέπεται μέσω αντιδράσεων σε ατμό ή διοξείδιο του άνθρακα. Στην οξείδωση που ακολουθεί την πυρόλυση, μέρος του στερεού υπολείμματος, που αποτελείται κυρίως από άνθρακα, καίγεται για την παραγωγή θερμότητας. Τέλος, κατά την αναγωγή λαμβάνουν χώρα αντιδράσεις οι οποίες καθορίζουν την τελική σύσταση και την θερμογόνο δύναμη του παραγόμενου αερίου. Το παραγόμενο αέριο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή ως πρώτη ύλη για καύσιμα. Πρέπει να γίνεται διαρκής και αυστηρός έλεγχος της λειτουργίας της εγκατάστασης, όπως είναι η αναλογία αέρα/καυσίμου, η θερμοκρασία κατά τα διάφορα στάδια και ο χρόνος παραμονής. Υψηλό χαρακτηρίζεται το αρχικό κόστος της επένδυσης σε συνδυασμό με την πολύπλοκη τεχνολογία που χρησιμοποιείται σε σύγκριση με την καύση. Προσφέρεται ωστόσο ποιοτικά καλύτερο τελικό ενεργειακό προϊόν. (Astrup et al., 2015)

Η αεριοποίηση θεωρείται μία από τις πλέον υποσχόμενες τεχνολογίες ενεργειακής αξιοποίησης αποβλήτων, καθώς επιτρέπει την παραγωγή συνθετικού αερίου υψηλής ενεργειακής αξίας. Το παραγόμενο συνθετικό αέριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θερμότητας ή ακόμη και συνθετικών καυσίμων, γεγονός που προσδίδει σημαντική ευελιξία στην τεχνολογία. Επιπλέον, η

αεριοποίηση μπορεί, υπό συγκεκριμένες συνθήκες και κατάλληλες διαμορφώσεις της μονάδας, να επιτύχει υψηλή ενεργειακή απόδοση σε σύγκριση με την απευθείας καύση και επιτρέπει ευκολότερο καθαρισμό των αέριων προϊόντων πριν από την τελική χρήση τους.

Παρά τα πλεονεκτήματα αυτά, η αεριοποίηση χαρακτηρίζεται από υψηλή τεχνολογική πολυπλοκότητα και σημαντικό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας. Η παρουσία πίσσας και άλλων ανεπιθύμητων ενώσεων στο παραγόμενο αέριο μπορεί να δημιουργήσει τεχνικά προβλήματα και απαιτεί αποτελεσματικά συστήματα καθαρισμού. Επιπλέον, η απόδοση της διεργασίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη σύσταση και την υγρασία των αποβλήτων, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την κατάλληλη προεπεξεργασία του υλικού τροφοδοσίας (Arena, 2012).

2.2.4 Σύγκριση θερμικών τεχνολογιών

Η καύση, η πυρόλυση και η αεριοποίηση αποτελούν τις βασικές θερμικές τεχνολογίες ενεργειακής αξιοποίησης αποβλήτων, παρουσιάζοντας διαφορετικά χαρακτηριστικά ως προς τις συνθήκες λειτουργίας, τα παραγόμενα προϊόντα και την ενεργειακή απόδοση. Η καύση είναι η πιο ώριμη και ευρέως εφαρμοζόμενη τεχνολογία, καθώς επιτρέπει άμεση παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας με σχετικά σταθερή λειτουργία. Αντίθετα, η πυρόλυση και η αεριοποίηση θεωρούνται πιο προηγμένες τεχνολογίες, καθώς παράγουν ενδιάμεσα ενεργειακά προϊόντα, όπως πυρολυτικό έλαιο και συνθετικό αέριο.

Η πυρόλυση παρουσιάζει πλεονεκτήματα ως προς τις μειωμένες εκπομπές ρύπων και την παραγωγή υγρών καυσίμων, ενώ η αεριοποίηση προσφέρει υψηλότερη ενεργειακή απόδοση και μεγαλύτερη ευελιξία αξιοποίησης του παραγόμενου αερίου. Ωστόσο, οι δύο αυτές τεχνολογίες απαιτούν αυξημένο τεχνολογικό έλεγχο και υψηλότερο κόστος επένδυσης σε σχέση με την καύση. Συνεπώς, η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας εξαρτάται από τη σύσταση των αποβλήτων, το επιθυμητό ενεργειακό προϊόν, τις περιβαλλοντικές απαιτήσεις και τις οικονομικές δυνατότητες της εγκατάστασης.

Ο Πίνακας 3 παρουσιάζει συγκριτικά τα βασικά χαρακτηριστικά των κυριότερων θερμικών τεχνολογιών ενεργειακής αξιοποίησης αποβλήτων, αναδεικνύοντας τις διαφορές τους ως προς τις συνθήκες λειτουργίας, τα παραγόμενα προϊόντα, καθώς και τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους.

Πίνακας 3 Σύγκριση θερμικών τεχνολογιών

Τεχνολογία	Θερμοκρασία	Παρουσία O ₂	Κύρια προϊόντα	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Ενδεικτική ενεργειακή απόδοση
Καύση	>850°C	Πλήρης	Θερμότητα, τέφρα	ώριμη	εκπομπές	50–60%
Πυρόλυση	300–800°C	Απουσία	Πυρολυτικό έλαιο / συνθετικό αέριο	μειωμένοι ρύποι	υψηλό κόστος	~70%
Αεριοποίηση	800–1200°C	Περιορισμένη	Συνθετικό αέριο	υψηλή απόδοση	πολυπλοκότητα	70–80%

Οι τιμές σχετικά με την ενεργειακή απόδοση, είναι ενδεικτικές και δεν αντιστοιχούν κατ' ανάγκη στον ίδιο δείκτη ενεργειακής απόδοσης ή στο ίδιο όριο συστήματος. Επηρεάζονται από τη σύσταση του αποβλήτου, την υγρασία, την προεπεξεργασία, την κλίμακα και τον τρόπο ενεργειακής αξιοποίησης. (Malavika. et al., 2021)

Η ποιοτική σύγκριση των θερμικών τεχνολογιών μπορεί να συμπληρωθεί με ποσοτικούς δείκτες, ώστε να αναδειχθούν με μεγαλύτερη σαφήνεια οι διαφορές μεταξύ των επιμέρους επιλογών. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται ενδεικτικές τιμές απόδοσης μετατροπής της τάξης του 50–60% για την αποτέφρωση, περίπου 70% για την πυρόλυση, 70–80% για την αεριοποίηση και 50–70% για την αναερόβια χώνευση. Οι τιμές αυτές δεν είναι απολύτως συγκρίσιμες, καθώς προέρχονται από διαφορετικές μελέτες και ενδέχεται να αφορούν διαφορετικά όρια συστήματος και ορισμούς της ενεργειακής απόδοσης.

Επομένως, η υψηλότερη θεωρητική ενεργειακή απόδοση μιας τεχνολογίας δεν συνεπάγεται αυτομάτως και υψηλότερη συνολική περιβαλλοντική ή οικονομική αποδοτικότητα. Η καύση παρουσιάζει υψηλή τεχνολογική ωριμότητα και μπορεί να εφαρμοστεί σε μεγάλες ποσότητες και σχετικά ετερογενή αστικά απόβλητα, ενώ η πυρόλυση και η αεριοποίηση απαιτούν συνήθως περισσότερο ελεγχόμενα χαρακτηριστικά τροφοδοσίας και κατάλληλη προεπεξεργασία. Η αναερόβια

χώνευση, αντίθετα, είναι καταλληλότερη για χωριστά συλλεγόμενα βιοαποδομήσιμα οργανικά απόβλητα.

Η οικονομική αξιολόγηση αποτελεί επίσης κρίσιμο παράγοντα. Το κόστος εξαρτάται από την εγκατεστημένη δυναμικότητα, την τεχνολογία, την ποιότητα της τροφοδοσίας, τις απαιτήσεις περιβαλλοντικού ελέγχου και τις δυνατότητες αξιοποίησης της παραγόμενης ενέργειας. Ενδεικτικά, μελέτη που αφορά εγκαταστάσεις διαχείρισης αποβλήτων στην Ελλάδα υπολόγισε συνολικό μοναδιαίο κόστος περίπου 115 €/t για μονάδα αποτέφρωσης και 50–104 €/t για μονάδες αναερόβιας χώνευσης, σε τιμές του 2012. Οι τιμές αυτές δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως σημερινές τιμές αγοράς, αλλά αναδεικνύουν τη σημασία της οικονομικής παραμέτρου στην επιλογή τεχνολογίας.

Κατά συνέπεια, η επιλογή τεχνολογίας ενεργειακής αξιοποίησης δεν θα πρέπει να βασίζεται σε έναν μόνο δείκτη, αλλά σε συνδυασμένη αξιολόγηση τεχνικών, ενεργειακών, περιβαλλοντικών και οικονομικών παραμέτρων.

Η ποιοτική σύγκριση των θερμικών τεχνολογιών μπορεί να συμπληρωθεί με ποσοτικούς δείκτες, ώστε να αναδειχθούν με μεγαλύτερη σαφήνεια οι διαφορές μεταξύ των επιμέρους επιλογών. Ενδεικτικά, η βιβλιογραφία αναφέρει ενεργειακές αποδόσεις της τάξης του 50–60% για την καύση, περίπου 70% για την πυρόλυση και 70–80% για την αεριοποίηση, ενώ για την αναερόβια χώνευση αναφέρονται τιμές περίπου 50–70%. Οι τιμές αυτές πρέπει να αντιμετωπίζονται ως ενδεικτικές, καθώς δεν αφορούν απαραίτητα το ίδιο σύστημα αναφοράς και επηρεάζονται σημαντικά από τη σύσταση και την υγρασία του αποβλήτου, την προεπεξεργασία, την κλίμακα της μονάδας και τον τρόπο αξιοποίησης της παραγόμενης ενέργειας. (Farooq et al., 2021)

Επομένως, η υψηλότερη θεωρητική ενεργειακή απόδοση μιας τεχνολογίας δεν συνεπάγεται αυτομάτως και υψηλότερη συνολική περιβαλλοντική ή οικονομική αποδοτικότητα. Η καύση παρουσιάζει υψηλή τεχνολογική ωριμότητα και μπορεί να εφαρμοστεί σε μεγάλες ποσότητες και σχετικά ετερογενή αστικά απόβλητα, ενώ η πυρόλυση και η αεριοποίηση απαιτούν συνήθως περισσότερο ελεγχόμενα χαρακτηριστικά τροφοδοσίας και κατάλληλη προεπεξεργασία. Η αναερόβια

χώνευση, αντίθετα, είναι καταλληλότερη για χωριστά συλλεγόμενα βιοαποδομήσιμα οργανικά απόβλητα.

Η οικονομική αξιολόγηση αποτελεί επίσης κρίσιμο παράγοντα. Το κόστος εξαρτάται από την εγκατεστημένη δυναμικότητα, την τεχνολογία, την ποιότητα της τροφοδοσίας, τις απαιτήσεις περιβαλλοντικού ελέγχου και τις δυνατότητες αξιοποίησης της παραγόμενης ενέργειας. Ενδεικτικά, μελέτη που αφορά εγκαταστάσεις διαχείρισης αποβλήτων στην Ελλάδα υπολόγισε συνολικό μοναδιαίο κόστος περίπου 115 €/t για μονάδα αποτέφρωσης και 50–104 €/t για μονάδες αναερόβιας χώνευσης, σε τιμές του 2012. Οι τιμές αυτές δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως σημερινές τιμές αγοράς, αλλά αναδεικνύουν τη σημασία της οικονομικής παραμέτρου στην επιλογή τεχνολογίας. (Komilis & Liogkas, 2014)

Κατά συνέπεια, η επιλογή τεχνολογίας ενεργειακής αξιοποίησης δεν θα πρέπει να βασίζεται σε έναν μόνο δείκτη, αλλά σε συνδυασμένη αξιολόγηση τεχνικών, ενεργειακών, περιβαλλοντικών και οικονομικών παραμέτρων.

2.2.5 Βιολογικές τεχνολογίες ενεργειακής αξιοποίησης

Σε αντίθεση με τις θερμικές τεχνολογίες, οι βιολογικές μέθοδοι βασίζονται στη δράση μικροοργανισμών και εφαρμόζονται κυρίως σε οργανικά και βιοαποδομήσιμα απόβλητα. Οι βιολογικές τεχνολογίες ενεργειακής αξιοποίησης αποτελούν σημαντικό τμήμα των σύγχρονων συστημάτων διαχείρισης αποβλήτων, ιδιαίτερα για τα οργανικά και βιοαποδομήσιμα υλικά. Σε αντίθεση με τις θερμικές τεχνολογίες, οι οποίες βασίζονται σε υψηλές θερμοκρασίες, οι βιολογικές διεργασίες αξιοποιούν τη δράση μικροοργανισμών για τη μετατροπή της οργανικής ύλης σε χρήσιμα ενεργειακά προϊόντα. Η σημαντικότερη βιολογική μέθοδος ενεργειακής αξιοποίησης είναι η αναερόβια χώνευση, μέσω της οποίας παράγεται βιοαέριο πλούσιο σε μεθάνιο.

Η εφαρμογή βιολογικών τεχνολογιών παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας, καθώς επιτρέπει την ταυτόχρονη διαχείριση οργανικών αποβλήτων και παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας. Τα οργανικά κλάσματα των

αστικών στερεών αποβλήτων, τα αγροτικά υπολείμματα, τα απόβλητα βιομηχανιών τροφίμων και η ιλύς βιολογικών καθαρισμών αποτελούν κατάλληλες πρώτες ύλες για τέτοιες διεργασίες. Με τον τρόπο αυτό, μειώνεται σημαντικά η ποσότητα αποβλήτων που οδηγείται σε ταφή και παράλληλα παράγεται ενέργεια με χαμηλότερο ανθρακικό αποτύπωμα σε σχέση με τα συμβατικά καύσιμα (Mao et al., 2020).

Οι βιολογικές μέθοδοι χαρακτηρίζονται από χαμηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας και μικρότερες εκπομπές αέριων ρύπων σε σύγκριση με τις θερμικές τεχνολογίες. Παράλληλα, συμβάλλουν στην ανακύκλωση θρεπτικών συστατικών μέσω της αξιοποίησης των υπολειμμάτων των διεργασιών ως οργανικών λιπασμάτων. Ωστόσο, οι τεχνολογίες αυτές μπορούν να εφαρμοστούν κυρίως σε οργανικά και βιοαποδομήσιμα απόβλητα και όχι σε ξηρά ή υψηλής θερμογόνου δύναμης υλικά, όπως πλαστικά και ελαστικά.

2.2.6 Αναερόβια χώνευση

Οι βιολογικές τεχνολογίες ενεργειακής αξιοποίησης αποτελούν σημαντικό τμήμα των σύγχρονων συστημάτων διαχείρισης αποβλήτων, ιδιαίτερα για τα οργανικά και βιοαποδομήσιμα υλικά. Σε αντίθεση με τις θερμικές τεχνολογίες, οι οποίες βασίζονται σε υψηλές θερμοκρασίες, οι βιολογικές διεργασίες αξιοποιούν τη δράση μικροοργανισμών για τη μετατροπή της οργανικής ύλης σε χρήσιμα ενεργειακά προϊόντα. Η σημαντικότερη βιολογική μέθοδος ενεργειακής αξιοποίησης είναι η αναερόβια χώνευση, μέσω της οποίας παράγεται βιοαέριο πλούσιο σε μεθάνιο.

Η εφαρμογή βιολογικών τεχνολογιών παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας, καθώς επιτρέπει την ταυτόχρονη διαχείριση οργανικών αποβλήτων και παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας. Τα οργανικά κλάσματα των αστικών στερεών αποβλήτων, τα αγροτικά υπολείμματα, τα απόβλητα βιομηχανιών τροφίμων και η ιλύς βιολογικών καθαρισμών αποτελούν κατάλληλες πρώτες ύλες για τέτοιες διεργασίες. Με τον τρόπο αυτό, μειώνεται σημαντικά η ποσότητα αποβλήτων που οδηγείται σε ταφή και παράλληλα παράγεται ενέργεια με χαμηλότερο ανθρακικό αποτύπωμα σε σχέση με τα συμβατικά καύσιμα (Mao et al., 2020).

Οι βιολογικές μέθοδοι χαρακτηρίζονται από χαμηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας και μικρότερες εκπομπές αέριων ρύπων σε σύγκριση με τις θερμικές τεχνολογίες. Παράλληλα, συμβάλλουν στην ανακύκλωση θρεπτικών συστατικών μέσω της αξιοποίησης των υπολειμμάτων των διεργασιών ως οργανικών λιπασμάτων. Ωστόσο, οι τεχνολογίες αυτές μπορούν να εφαρμοστούν κυρίως σε οργανικά και βιοαποδομήσιμα απόβλητα και όχι σε ξηρά ή υψηλής θερμογόνου δύναμης υλικά, όπως πλαστικά και ελαστικά.

Η αναερόβια χώνευση αποτελεί μια σύνθετη βιοχημική διεργασία η οποία πραγματοποιείται σε τέσσερα βασικά στάδια: υδρόλυση, οξεογένεση, οξικογένεση και μεθανογένεση. Κάθε στάδιο πραγματοποιείται από διαφορετικές ομάδες μικροοργανισμών και επηρεάζει τη συνολική απόδοση της διεργασίας.

Κατά το στάδιο της υδρόλυσης, τα σύνθετα οργανικά μόρια, όπως υδατάνθρακες, πρωτεΐνες και λιπίδια, διασπώνται σε απλούστερες ενώσεις, όπως σάκχαρα, αμινοξέα και λιπαρά οξέα. Στη συνέχεια, στο στάδιο της οξεογένεσης, τα προϊόντα αυτά μετατρέπονται σε πτητικά λιπαρά οξέα, αλκοόλες, διοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο.

Κατά την οξικογένεση, οι ενδιάμεσες ενώσεις μετατρέπονται κυρίως σε οξικό οξύ, υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα. Τέλος, στο στάδιο της μεθανογένεσης, ειδικοί μικροοργανισμοί — οι μεθανογόνοι αρχαίοι — παράγουν μεθάνιο από το οξικό οξύ και το υδρογόνο. Το στάδιο αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς καθορίζει την τελική παραγωγή βιοαερίου.

Η σταθερότητα της αναερόβιας χώνευσης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η θερμοκρασία, το pH, ο χρόνος παραμονής και η αναλογία άνθρακα προς άζωτο. Η διατήρηση σταθερών συνθηκών είναι απαραίτητη για τη σωστή λειτουργία των μικροοργανισμών και τη μέγιστη παραγωγή μεθανίου.

Η αναερόβια χώνευση παρουσιάζει σημαντικά περιβαλλοντικά και ενεργειακά πλεονεκτήματα. Ένα από τα σημαντικότερα είναι η παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας μέσω του βιοαερίου, το οποίο μπορεί να υποκαταστήσει συμβατικά καύσιμα. Παράλληλα, μειώνεται σημαντικά η ποσότητα οργανικών αποβλήτων που

οδηγείται σε χώρους υγειονομικής ταφής, περιορίζοντας τις εκπομπές μεθανίου και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ταφής.

Ένα επιπλέον πλεονέκτημα είναι η παραγωγή χωνεμένου υπολείμματος, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως οργανικό λίπασμα, συμβάλλοντας στην ανακύκλωση θρεπτικών συστατικών. Με τον τρόπο αυτό, η αναερόβια χώνευση ενισχύει τις αρχές της κυκλικής οικονομίας και της βιώσιμης διαχείρισης πόρων.

Ωστόσο, η τεχνολογία παρουσιάζει και ορισμένους περιορισμούς. Η απόδοση της διεργασίας επηρεάζεται σημαντικά από τη σύσταση του υποστρώματος και τις συνθήκες λειτουργίας. Η παρουσία τοξικών ενώσεων ή υψηλών συγκεντρώσεων αμμωνίας μπορεί να αναστείλει τη δράση των μικροοργανισμών και να μειώσει την παραγωγή βιοαερίου. Επιπλέον, απαιτείται κατάλληλη προεπεξεργασία και διαλογή των οργανικών αποβλήτων, ώστε να αποφεύγεται η παρουσία μη βιοαποδομήσιμων υλικών.

Παρά τους περιορισμούς αυτούς, η αναερόβια χώνευση θεωρείται μία από τις πιο ώριμες και βιώσιμες τεχνολογίες παραγωγής βιοενέργειας από απόβλητα και εφαρμόζεται ευρέως σε πολλές χώρες της Ευρώπης (Mao et al., 2020).

2.2.7 Συγκριτική αξιολόγηση των τεχνολογιών ενεργειακής αξιοποίησης

Η σύγκριση των τεχνολογιών ενεργειακής αξιοποίησης αποβλήτων απαιτεί την εξέταση περισσότερων από μία παραμέτρων, καθώς η απόδοση μιας τεχνολογίας εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τα χαρακτηριστικά του ρεύματος αποβλήτων, τις συνθήκες λειτουργίας και τον τρόπο αξιοποίησης των παραγόμενων προϊόντων. Επομένως η ενεργειακή απόδοση, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις, οι απαιτήσεις προεπεξεργασίας, το κόστος και η τεχνολογική ωριμότητα αποτελούν βασικά κριτήρια για τη συγκριτική αξιολόγηση.

Η καύση αποτελεί την πλέον ώριμη από τις εξεταζόμενες θερμικές τεχνολογίες και εφαρμόζεται ευρέως σε μονάδες επεξεργασίας σύμμεικτων αστικών στερεών αποβλήτων. Η ενεργειακή αξιοποίηση πραγματοποιείται κυρίως μέσω ανάκτησης θερμότητας για παραγωγή ατμού και στη συνέχεια ηλεκτρικής ή/και θερμικής

ενέργειας. Η επίδοση των μονάδων εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από την ενεργειακή απόδοση, τη σύσταση των αποβλήτων, τον έλεγχο των αέριων εκπομπών και τη διαχείριση των στερεών υπολειμμάτων.

Η πυρόλυση και η αεριοποίηση παρουσιάζουν διαφορετική προσέγγιση, καθώς πραγματοποιούν θερμοχημική μετατροπή σε περιορισμένη ή μηδενική παρουσία οξυγόνου. Η πυρόλυση παράγει ένα μείγμα στερεών, υγρών και αέριων προϊόντων, ενώ η αεριοποίηση αποσκοπεί κυρίως στην παραγωγή συνθετικού αερίου. Η ενεργειακή αξιοποίηση των προϊόντων αυτών μπορεί να πραγματοποιηθεί με διαφορετικούς τρόπους, ωστόσο οι τεχνολογίες αυτές απαιτούν μεγαλύτερο έλεγχο των χαρακτηριστικών της τροφοδοσίας και κατάλληλη προεπεξεργασία.

Η αναερόβια χώνευση διαφοροποιείται από τις θερμικές τεχνολογίες, καθώς αποτελεί βιολογική διεργασία και είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για οργανικά, βιοαποδομήσιμα απόβλητα. Το παραγόμενο βιοαέριο μπορεί να αξιοποιηθεί για παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας ή να αναβαθμιστεί σε βιομεθάνιο. Η επιλογή της αναερόβιας χώνευσης επομένως συνδέεται περισσότερο με τη διαθεσιμότητα και την ποιότητα του οργανικού κλάσματος παρά με τη θερμογόνο δύναμη που απαιτείται στις θερμικές διεργασίες.

Η βιβλιογραφία υποδεικνύει ότι δεν είναι δυνατό να προσδιοριστεί μία ενιαία τεχνολογία ως βέλτιστη για όλες τις περιπτώσεις. Συγκριτικές μελέτες επισημαίνουν ότι τα αποτελέσματα διαφοροποιούνται ανάλογα με την τεχνολογία, το είδος και τη σύσταση του αποβλήτου, την ενεργειακή αξιοποίηση των προϊόντων και τα όρια του συστήματος που εξετάζεται. Ειδικότερα, παράμετροι όπως η ενεργειακή απόδοση, οι εκπομπές CO₂ και NO_x, η διαχείριση των υπολειμμάτων και η δυνατότητα ανάκτησης υλικών επηρεάζουν σημαντικά το συνολικό περιβαλλοντικό αποτέλεσμα μιας μονάδας WtE (Dong et al., 2019).

Επομένως, η επιλογή τεχνολογίας θα πρέπει να πραγματοποιείται με βάση τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε περίπτωσης και όχι με αποκλειστικό κριτήριο την παραγωγή ενέργειας. Η σύνθεση των αποβλήτων, η υγρασία, η θερμογόνο δύναμη, η διαθέσιμη ποσότητα τροφοδοσίας, η δυνατότητα προεπεξεργασίας, οι απαιτήσεις περιβαλλοντικού ελέγχου και οι οικονομικές συνθήκες αποτελούν βασικούς

παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και εν τέλει καθορίζουν τη βιωσιμότητα μιας μονάδας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Περιβαλλοντικές και Οικονομικές Επιπτώσεις της Ενεργειακής Αξιοποίησης Αποβλήτων

3.1 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ενεργειακής αξιοποίησης

Η ενεργειακή αξιοποίηση αποβλήτων αποτελεί μία από τις σημαντικότερες εναλλακτικές λύσεις διαχείρισης απορριμμάτων στο πλαίσιο της βιώσιμης ανάπτυξης και της κυκλικής οικονομίας. Η εφαρμογή τεχνολογιών Waste-to-Energy συμβάλλει σημαντικά στη μείωση της ποσότητας αποβλήτων που οδηγούνται σε χώρους υγειονομικής ταφής, περιορίζοντας έτσι τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με την ταφή. Η μείωση της ταφής είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς οι χώροι υγειονομικής ταφής αποτελούν σημαντική πηγή εκπομπών μεθανίου, το οποίο είναι αέριο του θερμοκηπίου με πολύ μεγαλύτερη επίδραση στην κλιματική αλλαγή σε σχέση με το διοξείδιο του άνθρακα.

Μέσω της ενεργειακής αξιοποίησης, σημαντικό μέρος του ενεργειακού περιεχομένου των αποβλήτων μετατρέπεται σε ηλεκτρική και θερμική ενέργεια, μειώνοντας την ανάγκη χρήσης συμβατικών καυσίμων. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται περιορισμός των συνολικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και ενίσχυση της ενεργειακής μετάβασης προς συστήματα χαμηλότερου ανθρακικού αποτυπώματος. Επιπλέον, η ανάκτηση ενέργειας από απόβλητα συμβάλλει στην καλύτερη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων και στη μείωση της κατανάλωσης πρώτων υλών.

Παράλληλα, η ενεργειακή αξιοποίηση μπορεί να συμβάλει στη μείωση της ανεξέλεγκτης διάθεσης αποβλήτων και στην αποφυγή ρύπανσης εδάφους και υπόγειων υδάτων από στραγγίσματα. Σε πολλές περιπτώσεις, οι τεχνολογίες αυτές επιτρέπουν επίσης την ανάκτηση μετάλλων και άλλων υλικών από την τέφρα ή τα υπολείμματα της επεξεργασίας, ενισχύοντας περαιτέρω τις αρχές της κυκλικής οικονομίας.

Ωστόσο, παρά τα σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη, οι τεχνολογίες ενεργειακής αξιοποίησης συνοδεύονται και από ορισμένες αρνητικές επιπτώσεις. Οι θερμικές τεχνολογίες, όπως η καύση, η πυρόλυση και η αεριοποίηση, μπορεί να οδηγήσουν σε εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων, όπως οξείδια του αζώτου, διοξίνες, φουράνια,

βαρέα μέταλλα και αιωρούμενα σωματίδια. Οι ουσίες αυτές μπορούν να επηρεάσουν την ποιότητα του αέρα και να προκαλέσουν επιπτώσεις στη δημόσια υγεία, εάν δεν εφαρμόζονται αποτελεσματικά συστήματα καθαρισμού καυσαερίων.

Για τον λόγο αυτό, οι σύγχρονες μονάδες Waste-to-Energy διαθέτουν προηγμένα συστήματα αντιρρύπανσης, όπως φίλτρα σωματιδίων, πλυντρίδες καυσαερίων και συστήματα κατακράτησης διοξινών και βαρέων μετάλλων. Οι τεχνολογικές εξελίξεις των τελευταίων ετών έχουν συμβάλει σημαντικά στη μείωση των εκπομπών, καθιστώντας τις σύγχρονες εγκαταστάσεις περισσότερο φιλικές προς το περιβάλλον σε σχέση με το παρελθόν (Panepinto et al., 2021).

Σημαντικό περιβαλλοντικό ζήτημα αποτελεί επίσης η διαχείριση των υπολειμμάτων των θερμικών διεργασιών, όπως η τέφρα πυθμένα και η ιπτάμενη τέφρα. Τα υλικά αυτά μπορεί να περιέχουν βαρέα μέταλλα και άλλες επικίνδυνες ουσίες και απαιτούν κατάλληλη επεξεργασία και διάθεση. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μέρος της τέφρας μπορεί να αξιοποιηθεί σε κατασκευαστικά υλικά ή σε έργα πολιτικού μηχανικού, μειώνοντας περαιτέρω τις ποσότητες αποβλήτων που οδηγούνται σε τελική διάθεση.

Οι βιολογικές τεχνολογίες, όπως η αναερόβια χώνευση, παρουσιάζουν γενικά μικρότερες ατμοσφαιρικές εκπομπές σε σχέση με τις θερμικές μεθόδους. Ωστόσο, απαιτείται σωστός έλεγχος της διεργασίας ώστε να αποφεύγονται διαρροές μεθανίου ή προβλήματα οσμών. Παράλληλα, το χωνεμένο υπόλειμμα πρέπει να πληροί συγκεκριμένες προδιαγραφές προτού χρησιμοποιηθεί ως λίπασμα, ώστε να αποφεύγεται η μεταφορά ρυπαντών στο έδαφος.

Συνολικά, η περιβαλλοντική επίδοση των τεχνολογιών ενεργειακής αξιοποίησης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η σύσταση των αποβλήτων, το επίπεδο τεχνολογικού εξοπλισμού, η ενεργειακή απόδοση της εγκατάστασης και η εφαρμογή κατάλληλων μέτρων αντιρρύπανσης. Όταν οι τεχνολογίες αυτές εφαρμόζονται σωστά και σε συνδυασμό με ανακύκλωση και πρόληψη αποβλήτων, μπορούν να συμβάλουν ουσιαστικά στη βιώσιμη διαχείριση των απορριμμάτων. Ο Πίνακας που ακολουθεί παρουσιάζει συνοπτικά τα κυριότερα περιβαλλοντικά οφέλη και τις πιθανές επιπτώσεις των βασικών τεχνολογιών ενεργειακής αξιοποίησης αποβλήτων.

Πίνακας 4 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις ανά τεχνολογία

Τεχνολογία	Κύριο περιβαλλοντικό όφελος	Πιθανές επιπτώσεις	Απαιτούμενα μέτρα ελέγχου
Καύση	Μείωση όγκου αποβλήτων και παραγωγή ενέργειας	Εκπομπές NOx, SOx, σωματιδίων, διοξινών	Φίλτρα καυσαερίων, συνεχής έλεγχος εκπομπών
Πυρόλυση	Παραγωγή καυσίμων και περιορισμός ταφής	Παραγωγή πισσών και ανάγκη καθαρισμού αερίων	Καθαρισμός συνθετικού αερίου, έλεγχος θερμοκρασίας
Αεριοποίηση	Παραγωγή συνθετικού αερίου υψηλής ενεργειακής αξίας	Τεχνολογική πολυπλοκότητα, πίσσεις	Σύστημα καθαρισμού αερίων
Αναερόβια χώνευση	Παραγωγή βιοαερίου και μείωση οργανικών αποβλήτων	Οσμές, πιθανές διαρροές μεθανίου	Κλειστά συστήματα, έλεγχος pH και θερμοκρασίας

3.2 Οικονομικές επιπτώσεις και βιωσιμότητα

Η ενεργειακή αξιοποίηση αποβλήτων δεν επηρεάζει μόνο το περιβάλλον αλλά και την οικονομία, καθώς συνδέεται με σημαντικές επενδύσεις, λειτουργικά κόστη και δυνατότητες παραγωγής ενέργειας. Οι μονάδες Waste-to-Energy απαιτούν υψηλό αρχικό κόστος εγκατάστασης, ιδιαίτερα στην περίπτωση προηγμένων θερμικών τεχνολογιών όπως η πυρόλυση και η αεριοποίηση. Το κόστος αυτό περιλαμβάνει τον τεχνολογικό εξοπλισμό, τα συστήματα καθαρισμού καυσαερίων, τις υποδομές αποθήκευσης και μεταφοράς αποβλήτων, καθώς και τις απαραίτητες περιβαλλοντικές αδειοδοτήσεις.

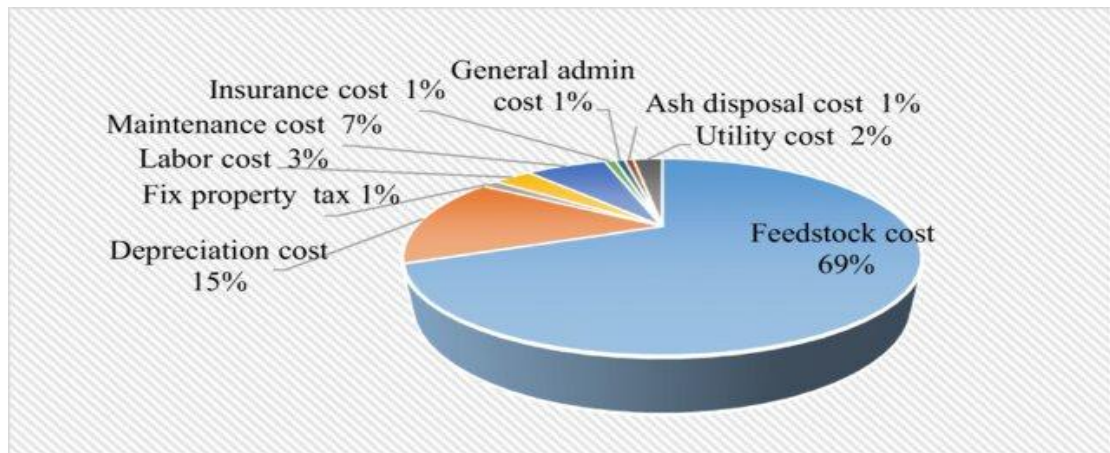
Παράλληλα, οι εγκαταστάσεις αυτές παρουσιάζουν σημαντικό λειτουργικό κόστος, το οποίο σχετίζεται με τη συντήρηση του εξοπλισμού, την κατανάλωση ενέργειας, τη διαχείριση υπολειμμάτων και την παρακολούθηση των εκπομπών. Ωστόσο, μέρος του κόστους αυτού μπορεί να αντισταθμιστεί μέσω της πώλησης ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, καθώς και μέσω πιθανών εσόδων από την ανάκτηση υλικών ή την πώληση δευτερογενών καυσίμων.

Η οικονομική βιωσιμότητα των τεχνολογιών WtE εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διαθεσιμότητα αποβλήτων και από την ενεργειακή αξιοποίηση των παραγόμενων προϊόντων. Σε περιοχές με υψηλή παραγωγή απορριμμάτων και περιορισμένη διαθεσιμότητα χώρων ταφής, οι τεχνολογίες αυτές μπορούν να αποτελέσουν οικονομικά αποδοτική λύση μακροπρόθεσμα. Επιπλέον, η αύξηση των τιμών ενέργειας και η ενίσχυση πολιτικών απανθρακοποίησης καθιστούν την παραγωγή ενέργειας από απόβλητα περισσότερο ανταγωνιστική.

Σημαντικό οικονομικό όφελος προκύπτει επίσης από τη μείωση του κόστους ταφής. Σε πολλές ευρωπαϊκές χώρες εφαρμόζονται υψηλά τέλη ταφής και φορολογικά αντικίνητρα για τη διάθεση αποβλήτων σε ΧΥΤΑ, γεγονός που καθιστά περισσότερο ελκυστικές τις τεχνολογίες ανάκτησης ενέργειας. Παράλληλα, η ανάπτυξη τέτοιων εγκαταστάσεων δημιουργεί νέες θέσεις εργασίας σε τομείς όπως η μηχανική, η λειτουργία μονάδων, η συντήρηση εξοπλισμού και η περιβαλλοντική παρακολούθηση.

Παρά τα οικονομικά οφέλη, η κοινωνική αποδοχή παραμένει σημαντικός παράγοντας για την υλοποίηση έργων ενεργειακής αξιοποίησης. Σε αρκετές περιπτώσεις, οι τοπικές κοινωνίες εκφράζουν ανησυχίες σχετικά με πιθανές περιβαλλοντικές και υγειονομικές επιπτώσεις, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε καθυστερήσεις ή ακυρώσεις έργων. Για τον λόγο αυτό, η διαφάνεια, η ενημέρωση των πολιτών και η αυστηρή τήρηση περιβαλλοντικών προδιαγραφών αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για την επιτυχή εφαρμογή τέτοιων τεχνολογιών.

Συνολικά, η οικονομική βιωσιμότητα της ενεργειακής αξιοποίησης αποβλήτων εξαρτάται από την ισορροπία μεταξύ επενδυτικού κόστους, λειτουργικών εξόδων, ενεργειακών εσόδων και περιβαλλοντικών οφελών. Όταν ενσωματώνεται σε ολοκληρωμένα συστήματα διαχείρισης αποβλήτων και συνδυάζεται με υψηλά ποσοστά ανακύκλωσης, η ενεργειακή αξιοποίηση μπορεί να αποτελέσει σημαντικό εργαλείο βιώσιμης ανάπτυξης και πράσινης οικονομίας.



Εικόνα 3 Κατανομή ετήσιου λειτουργικού κόστους μονάδας παραγωγής ενέργειας από απόβλητα.

Η εικόνα παρουσιάζει τη συμμετοχή των επιμέρους οικονομικών παραγόντων στο συνολικό λειτουργικό κόστος μιας μονάδας ενεργειακής αξιοποίησης αποβλήτων. Παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό αντιστοιχεί στο κόστος τροφοδοσίας (feedstock cost), ενώ σημαντικό ποσοστό καταλαμβάνει και το κόστος απόσβεσης του εξοπλισμού. Μικρότερα ποσοστά σχετίζονται με τη συντήρηση, το εργατικό κόστος, τις υπηρεσίες κοινής ωφέλειας και τη διαχείριση της τέφρας. (Miyata et al., 2021)

3.2.1 Απόσβεση και οικονομική βιωσιμότητα των μονάδων ενεργειακής αξιοποίησης αποβλήτων

Η οικονομική βιωσιμότητα μιας μονάδας ενεργειακής αξιοποίησης αποβλήτων, εξαρτάται από τον συνδυασμό του αρχικού επενδυτικού κόστους, του λειτουργικού κόστους, της ποσότητας και της ποιότητας των διαθέσιμων αποβλήτων και των εσόδων από την παραγόμενη ενέργεια. Λόγω του σύνθετου συνδυασμού από μεταβλητές ποσότητες, η περίοδος απόσβεσης δεν αποτελεί σταθερό χαρακτηριστικό μιας τεχνολογίας, εξαρτάται και μεταβάλλεται ανάλογα τις συνθήκες που επικρατούν σε κάθε εγκατάσταση.

Σημαντικό ρόλο παίζει η δυναμικότητα και το μέγεθος της μονάδας καθώς και η διαθεσιμότητα κατάλληλης ποσότητας αποβλήτων, ικανή να καλύψει την ονομαστική δυναμικότητα της μονάδας. Για παράδειγμα, η κατασκευή μια μεγάλης μονάδας σε περιοχή η οποία έχει περιορισμένη παραγωγή αποβλήτων οδηγεί σε υπό αξιοποίηση του υπάρχοντος εξοπλισμού, αυξάνοντας έτσι το λειτουργικό κόστος και αφήνει

ανεκμετάλλευτο μεγάλο μέρος του εξοπλισμού, το οποίο θα μπορούσε να αξιοποιηθεί σε άλλη εγκατάσταση. Όταν μια μονάδα λειτουργεί σημαντικά χαμηλότερα από την ονομαστική της δυναμικότητα, τα πάγια έξοδα κατανέμονται σε μικρότερη ποσότητα επεξεργαζόμενων αποβλήτων, με αποτέλεσμα την αύξηση του μοναδιαίου κόστους. Αντίστοιχο αποτέλεσμα θα έχει και η εγκατάσταση μιας υποδιαστασιολογημένης μονάδας συγκριτικά με την πραγματικά διαθέσιμη τροφοδοσία της περιοχής. Η σχέση μεταξύ δυναμικότητας και κόστους αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα οικονομιών κλίμακας, καθώς το μοναδιαίο κόστος μπορεί να μειώνεται όσο αυξάνεται η ποσότητα των αποβλήτων που επεξεργάζεται μια εγκατάσταση, μέχρι το σημείο όπου η συγκεκριμένη κλίμακα παραμένει τεχνικά και οικονομικά κατάλληλη (Komilis & Liogkas, 2014). Στόχος μας είναι η επαρκής και σταθερή τροφοδοσία, έτσι ώστε να έχουμε την βέλτιστη αξιοποίηση του εγκατεστημένου εξοπλισμού.

Η διαστασιολόγηση μιας μονάδας θα πρέπει να γίνεται μετά την μελέτη της πραγματικά διαθέσιμης ποσότητας αποβλήτων. Η πληθυσμιακή βάση είναι από τους βασικότερους παράγοντες για την εκτίμηση της εν δυνάμει τροφοδοσίας, καθώς η παραγωγή των αστικών αποβλήτων συνδέεται άμεσα με τον αριθμό των κατοίκων της εκάστοτε περιοχής. Άλλοι παράγοντες που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη για τον υπολογισμό των παραγόμενων αποβλήτων, είναι η εποχικότητα της παραγωγής, για παράδειγμα κατά την τουριστική καλοκαιρινή περίοδο σε πολλές περιοχές τα απόβλητα αυξάνονται ραγδαία, η σύνθεση των αποβλήτων καθώς και το ποσοστό το οποίο καταλήγει είτε στην ανακύκλωση είτε συλλέγεται χωριστά, καθώς το υπόλειμμα των διαδικασιών αυτών μπορεί να αξιοποιηθεί ενεργειακά. Επομένως, η ονομαστική δυναμικότητα μιας μονάδας δεν πρέπει να ισούται με το γενικό σύνολο των παραγόμενων αποβλήτων μιας περιοχής.

Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας είναι το τέλος εισόδου των αποβλήτων στη μονάδα (gate fee). Με την εισαγωγή του τέλους εισόδου δημιουργείται επιπλέον έσοδο για την εγκατάσταση και μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τον χρόνο αποπληρωμής της επένδυσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί μελέτη σκοπιμότητας για μονάδα ενεργειακής αξιοποίησης αστικών στερεών αποβλήτων στην Περιφέρεια Ανατολικής Μακεδονίας–Θράκης. Για μονάδα δυναμικότητας

400.000 t/έτος, η επένδυση εκτιμήθηκε σε περίπου 200 εκατ. €, ενώ η οικονομική βιωσιμότητα επηρεαζόταν σημαντικά από το ύψος του gate fee. Στη συγκεκριμένη μελέτη, για τιμές gate fee από 50 έως 110 €/t, ο εκτιμώμενος χρόνος αποπληρωμής μεταβαλλόταν από περίπου 11 έως 4 έτη, αντίστοιχα (Athanasίου et al., 2015). Συνεπώς η απόσβεση μιας μονάδας δεν μπορεί να εκτιμηθεί μόνο από την τεχνολογία και τη δυναμικότητά της, αλλά πρέπει να εξετάζεται σε συνδυασμό με το οικονομικό μοντέλο λειτουργίας της.

Η έννοια του νεκρού σημείου (break-even point) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της ελάχιστης απαιτούμενης ποσότητας αποβλήτων ή εσόδων ώστε τα συνολικά έσοδα μιας εγκατάστασης να ισούνται με το συνολικό κόστος λειτουργίας και επένδυσης, ανάλογα με το οικονομικό μοντέλο που εφαρμόζεται. Για συγκεκριμένη ποσότητα επεξεργασίας, το σημείο ισορροπίας προκύπτει από τη σχέση μεταξύ των πάγιων εξόδων, του μεταβλητού κόστους ανά τόνο και του καθαρού εσόδου ανά τόνο αποβλήτου. Με την προσέγγιση αυτή μπορεί να εξεταστεί πόση ποσότητα αποβλήτων απαιτείται ώστε μια μονάδα να καλύπτει τα κόστη της και να αποφεύγεται τόσο η υποδιαστασιολόγηση όσο και η υπερδιαστασιολόγηση.

Πρακτικά, η επιλογή της δυναμικότητας μιας μονάδας θα πρέπει να πραγματοποιείται μετά από αξιολόγηση της πληθυσμιακής βάσης, της ετήσιας παραγωγής αποβλήτων, της διαθέσιμης ποσότητας μετά την ανακύκλωση και άλλες μορφές ανάκτησης, της σύστασης και της θερμογόνου δύναμης του αποβλήτου, της δυνατότητας σταθερής τροφοδοσίας, του κόστους επένδυσης και λειτουργίας και των αναμενόμενων εσόδων. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να προσδιοριστεί μια τεχνικά και οικονομικά κατάλληλη δυναμικότητα, η οποία να εξασφαλίζει επαρκή αξιοποίηση της εγκατάστασης χωρίς να δημιουργεί υπερβολική εξάρτηση από εισαγόμενα απόβλητα ή, αντίθετα, σημαντική υποαξιοποίηση του εξοπλισμού. Συνεπώς, η περίοδος απόσβεσης μιας μονάδας ενεργειακής αξιοποίησης είναι αποτέλεσμα μιας συνολικής τεχνοοικονομικής αξιολόγησης δεν εξαρτάται μόνο από την επιλογή μιας συγκεκριμένης τεχνολογίας ενεργειακής αξιοποίησης.

3.3 Κοινωνικές επιπτώσεις και κοινωνική αποδοχή

Η εφαρμογή τεχνολογιών ενεργειακής αξιοποίησης αποβλήτων επηρεάζει σημαντικά και την κοινωνική διάσταση της διαχείρισης απορριμμάτων. Η δημιουργία νέων εγκαταστάσεων Waste-to-Energy συνδέεται με την ανάπτυξη υποδομών, τη δημιουργία θέσεων εργασίας και τη βελτίωση των συστημάτων διαχείρισης αποβλήτων. Παράλληλα, η παραγωγή ενέργειας από απορρίμματα μπορεί να συμβάλει στην ενεργειακή αυτάρκεια και στη σταθερότητα του ενεργειακού συστήματος.

Ωστόσο, οι τεχνολογίες αυτές συχνά προκαλούν αντιδράσεις από τις τοπικές κοινωνίες, κυρίως λόγω φόβων σχετικά με την ατμοσφαιρική ρύπανση, τις οσμές και τις πιθανές επιπτώσεις στη δημόσια υγεία. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως “Not In My Backyard” (NIMBY), κατά το οποίο οι πολίτες αναγνωρίζουν τη σημασία των εγκαταστάσεων διαχείρισης αποβλήτων, αλλά αντιδρούν όταν αυτές πρόκειται να εγκατασταθούν κοντά στις κατοικημένες περιοχές τους.

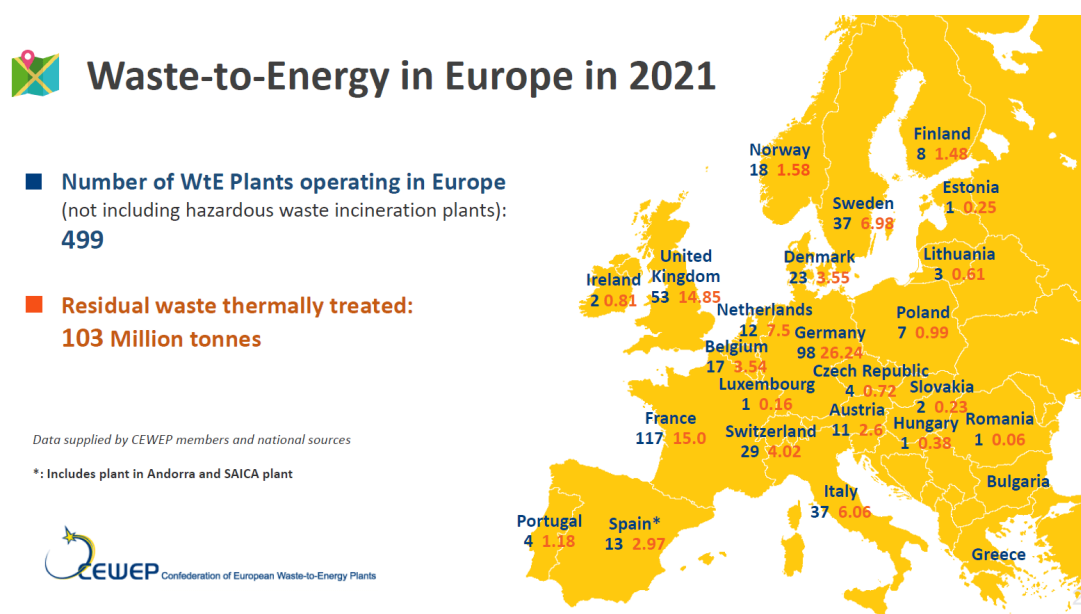
Η κοινωνική αποδοχή επηρεάζεται σημαντικά από τον βαθμό ενημέρωσης των πολιτών, την εμπιστοσύνη προς τους φορείς διαχείρισης και τη διαφάνεια των διαδικασιών. Οι σύγχρονες μονάδες ενεργειακής αξιοποίησης διαθέτουν προηγμένα συστήματα αντιρρύπανσης και λειτουργούν υπό αυστηρό περιβαλλοντικό έλεγχο, ωστόσο η έλλειψη ενημέρωσης μπορεί να οδηγήσει σε έντονες κοινωνικές αντιδράσεις.

Για τον λόγο αυτό, η επιτυχής εφαρμογή έργων ενεργειακής αξιοποίησης απαιτεί συμμετοχή της τοπικής κοινωνίας, σωστή ενημέρωση και διαρκή παρακολούθηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η ενίσχυση της κοινωνικής εμπιστοσύνης αποτελεί βασική προϋπόθεση για την ανάπτυξη βιώσιμων συστημάτων διαχείρισης αποβλήτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Εφαρμογές Ενεργειακής Αξιοποίησης Αποβλήτων στην Ελλάδα και Διεθνώς

4.1 Διεθνείς εφαρμογές ενεργειακής αξιοποίησης αποβλήτων

Η ενεργειακή αξιοποίηση αποβλήτων εφαρμόζεται εδώ και πολλές δεκαετίες σε αρκετές χώρες της Ευρώπης και της Ασίας, αποτελώντας βασικό τμήμα των ολοκληρωμένων συστημάτων διαχείρισης απορριμμάτων. Οι χώρες αυτές έχουν περιορίσει σημαντικά την υγειονομική ταφή και έχουν επενδύσει σε τεχνολογίες ανάκτησης ενέργειας, συνδυάζοντας την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας με υψηλά ποσοστά ανακύκλωσης.



Εικόνα 4 Κατανομή μονάδων ενεργειακής αξιοποίησης αποβλήτων στην Ευρώπη το 2021

Η εικόνα παρουσιάζει τον αριθμό των μονάδων Waste-to-Energy που λειτουργούν σε ευρωπαϊκές χώρες, καθώς και τις ποσότητες αποβλήτων που υποβάλλονται σε θερμική επεξεργασία. Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα, οι χώρες της Βόρειας και Κεντρικής Ευρώπης παρουσιάζουν ιδιαίτερα υψηλή ανάπτυξη τεχνολογιών ενεργειακής αξιοποίησης αποβλήτων. Η Γερμανία και η Γαλλία διαθέτουν τον μεγαλύτερο αριθμό εγκαταστάσεων, ενώ χώρες όπως η Σουηδία και η Δανία αξιοποιούν τις μονάδες Waste-to-Energy και για συστήματα τηλεθέρμανσης.

Αντίθετα, στις χώρες της Νότιας και Ανατολικής Ευρώπης η υγειονομική ταφή εξακολουθεί να αποτελεί κυρίαρχη πρακτική διαχείρισης αποβλήτων. Οι διαφοροποιήσεις αυτές σχετίζονται με το επίπεδο τεχνολογικής ανάπτυξης, την περιβαλλοντική πολιτική και τη διαθεσιμότητα υποδομών διαχείρισης απορριμμάτων. (CEWER, 2021)

Η Σουηδία αποτελεί ένα από τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα επιτυχημένης εφαρμογής ενεργειακής αξιοποίησης αποβλήτων. Η χώρα διαθέτει εκτεταμένο δίκτυο μονάδων καύσης απορριμμάτων, οι οποίες συνδέονται με συστήματα τηλεθέρμανσης και καλύπτουν σημαντικό μέρος των ενεργειακών αναγκών των πόλεων. Η αποτελεσματικότητα του συστήματος είναι τόσο υψηλή, ώστε η Σουηδία εισάγει απορρίμματα από άλλες ευρωπαϊκές χώρες για ενεργειακή αξιοποίηση. Η πολιτική αυτή έχει συμβάλει σημαντικά στη μείωση της ταφής αποβλήτων και στην παραγωγή ενέργειας χαμηλότερου ανθρακικού αποτυπώματος.

Ανάλογη στρατηγική ακολουθεί και η Δανία, όπου οι μονάδες Waste-to-Energy αποτελούν σημαντικό τμήμα του ενεργειακού συστήματος. Οι περισσότερες εγκαταστάσεις λειτουργούν με τεχνολογία συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας, εξασφαλίζοντας υψηλή ενεργειακή απόδοση. Παράλληλα, οι αυστηρές περιβαλλοντικές προδιαγραφές έχουν συμβάλει στον περιορισμό των ατμοσφαιρικών εκπομπών και στη βελτίωση της κοινωνικής αποδοχής των μονάδων.

Η Γερμανία διαθέτει επίσης ανεπτυγμένο σύστημα ενεργειακής αξιοποίησης αποβλήτων, το οποίο βασίζεται κυρίως στην καύση και στη μηχανική-βιολογική επεξεργασία. Η χώρα εφαρμόζει αυστηρή πολιτική περιορισμού της ταφής και έχει επενδύσει σημαντικά σε τεχνολογίες ανάκτησης ενέργειας και ανακύκλωσης. Παράλληλα, αναπτύσσονται συνεχώς νέες τεχνολογίες πυρόλυσης και αεριοποίησης για την επεξεργασία ειδικών ρευμάτων αποβλήτων.

Στην Ιαπωνία, η περιορισμένη διαθεσιμότητα χώρων ταφής και η υψηλή πληθυσμιακή πυκνότητα έχουν οδηγήσει στην εκτεταμένη ανάπτυξη μονάδων καύσης απορριμμάτων. Οι περισσότερες εγκαταστάσεις είναι εξοπλισμένες με προηγμένα συστήματα αντιρρύπανσης και υψηλής απόδοσης ενεργειακές τεχνολογίες. Η Ιαπωνία επενδύει επίσης σε τεχνολογίες αεριοποίησης και

πυρόλυσης, επιδιώκοντας τη μείωση των εκπομπών και τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας.

Συνολικά, οι διεθνείς εφαρμογές δείχνουν ότι η ενεργειακή αξιοποίηση αποβλήτων μπορεί να αποτελέσει αποτελεσματικό εργαλείο βιώσιμης διαχείρισης, όταν εφαρμόζεται σε συνδυασμό με ανακύκλωση, πρόληψη παραγωγής αποβλήτων και αυστηρό περιβαλλοντικό έλεγχο.

4.2 Η κατάσταση στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα, η διαχείριση αποβλήτων βασίζεται ακόμη σε μεγάλο βαθμό στην υγειονομική ταφή, παρά τις ευρωπαϊκές κατευθύνσεις για περιορισμό της πρακτικής αυτής. Για πολλά χρόνια, σημαντικό ποσοστό των αστικών στερεών αποβλήτων κατέληγε σε χώρους υγειονομικής ταφής, γεγονός που οδήγησε σε περιβαλλοντικά προβλήματα και κυρώσεις από την Ευρωπαϊκή Ένωση λόγω της λειτουργίας ανεξέλεγκτων χωματερών.

Η ποσοτική αποτύπωση της διαχείρισης των αστικών αποβλήτων αναδεικνύει τη σημαντική απόσταση που εξακολουθεί να υφίσταται μεταξύ της Ελλάδας και των υψηλότερων επιδόσεων της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Σύμφωνα με τα διαθέσιμα ευρωπαϊκά στοιχεία, το ποσοστό ανακύκλωσης των αστικών αποβλήτων στην Ελλάδα παραμένει χαμηλό σε σύγκριση με αρκετά κράτη μέλη. Το 2023 η Ελλάδα συγκαταλεγόταν μεταξύ των χωρών της Ευρωπαϊκής Ένωσης με ποσοστό ανακύκλωσης αστικών αποβλήτων μικρότερο του 20%, ενώ την ίδια χρονιά αρκετά κράτη μέλη παρουσίαζαν ποσοστά ανακύκλωσης άνω του 50% (European Environment Agency, 2025).

Η εικόνα αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για την ανάπτυξη τεχνολογιών ενεργειακής αξιοποίησης, καθώς η ενεργειακή ανάκτηση δεν μπορεί να εξεταστεί ανεξάρτητα από τη συνολική ιεράρχηση της διαχείρισης αποβλήτων. Η αύξηση της ανακύκλωσης και της χωριστής συλλογής οργανικών αποβλήτων αναμένεται να μεταβάλει τη σύσταση του υπολειπόμενου ρεύματος που θα είναι διαθέσιμο για ενεργειακή αξιοποίηση. Επομένως, ο σχεδιασμός μελλοντικών μονάδων ενεργειακής αξιοποίησης στην

Ελλάδα θα πρέπει να βασίζεται σε εκτιμήσεις της μελλοντικής και όχι μόνο της σημερινής σύστασης των αποβλήτων.

Η χαμηλή επίδοση της Ελλάδας στην ανακύκλωση, σε συνδυασμό με τη σημαντική εξάρτηση από την ταφή, καταδεικνύει ότι η ενεργειακή αξιοποίηση μπορεί να εξεταστεί ως μέρος μιας ευρύτερης στρατηγικής εκτροπής αποβλήτων από την τελική διάθεση. Ωστόσο, η ανάπτυξη μονάδων ενεργειακής αξιοποίησης θα πρέπει να συνοδεύεται από ενίσχυση της πρόληψης, της επαναχρησιμοποίησης, της ανακύκλωσης και της χωριστής συλλογής των βιοαποβλήτων, ώστε να διασφαλίζεται η συμβατότητα με την ιεράρχηση των αποβλήτων.

Για την πληρέστερη αποτύπωση της υφιστάμενης κατάστασης στην Ελλάδα, είναι χρήσιμη η εξέταση της διαχρονικής εξέλιξης των βασικών μεθόδων διαχείρισης των αστικών αποβλήτων. Ο Πίνακας 5 παρουσιάζει στοιχεία για την περίοδο 2014–2023 και περιλαμβάνει τη συνολική ποσότητα διαχειριζόμενων δημοτικών αποβλήτων, καθώς και τις ποσότητες που οδηγήθηκαν σε εναπόθεση, ανακύκλωση, κομποστοποίηση και ανάκτηση ενέργειας.

Τα στοιχεία παρουσιάζουν μια σχετικά σταθερή συνολική ποσότητα διαχειριζόμενων δημοτικών αποβλήτων κατά την εξεταζόμενη περίοδο. Ωστόσο, σημαντικότερο εύρημα αποτελεί η διαχρονική κυριαρχία της εναπόθεσης. Το 2014 η εναπόθεση αντιστοιχούσε περίπου στο 84% της συνολικής διαχείρισης, ενώ το 2019 μειώθηκε σε περίπου 78%. Παρά τη βελτίωση που παρατηρείται κατά την πρώτη περίοδο, τα επόμενα έτη η συμμετοχή της εναπόθεσης παραμένει σε ιδιαίτερα υψηλό επίπεδο και το 2023 διαμορφώνεται περίπου στο 81%.

Αντίθετα, η ανακύκλωση παρουσιάζει σταδιακή αύξηση κατά την περίοδο 2014–2019, από περίπου 12% σε 16% της συνολικής διαχείρισης. Μετά το 2019 παρατηρείται σχετική σταθεροποίηση, με την ανακύκλωση να αντιστοιχεί περίπου στο 16% το 2023. Η κομποστοποίηση αυξήθηκε κατά την περίοδο 2014–2019, αλλά μειώθηκε αισθητά από το 2020 και μετά.

Πίνακας 5 Ποσότητες δημοτικών αποβλήτων ανάλογα την μέθοδο διαχείρισης

Έτος	Σύνολο διαχείρισης (kt)	Ταφή (kt)	Ανακύκλωση (kt)	Κομποστοποίηση (kt)	Ανάκτηση ενέργειας (kt)
2014	5.315	4.470	652	168	—
2015	5.277	4.426	698	135	—
2016	5.367	4.415	743	182	27
2017	5.415	4.335	798	224	58
2018	5.523	4.330	829	281	83
2019	5.613	4.359	898	283	74
2020	5.335	4.284	878	85	88
2021	5.381	4.340	856	84	87
2022	5.420	4.386	854	75	87

Eurostat, *Municipal waste by waste management operations (env_wasmun)*, στοιχεία όπως παρουσιάζονται από την Ελληνική Στατιστική Αρχή.

Η Eurostat ορίζει στην αντίστοιχη βάση την «energy recovery» ως αποτέφρωση που πληροί τα κριτήρια ενεργειακής ανάκτησης, ενώ διακρίνει την ανακύκλωση, την κομποστοποίηση/χώνευση και την ταφή ως διαφορετικές κατηγορίες διαχείρισης.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την παρούσα εργασία παρουσιάζει η ανάκτηση ενέργειας. Από το 2016, για το οποίο υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία στη συγκεκριμένη χρονοσειρά, η ποσότητα των δημοτικών αποβλήτων που οδηγείται σε ανάκτηση ενέργειας αυξάνεται από 27 kt το 2016 σε 89 kt το 2023. Παρά την αύξηση σε απόλυτους όρους, η ανάκτηση ενέργειας εξακολουθεί να αντιπροσωπεύει πολύ μικρό ποσοστό της συνολικής διαχείρισης, περίπου 0,5% το 2016 και 1,6% το 2023.

Η εικόνα αυτή δείχνει ότι η ενεργειακή αξιοποίηση εξακολουθεί να αποτελεί περιορισμένο τμήμα του ελληνικού συστήματος διαχείρισης αστικών αποβλήτων, ενώ η ταφή παραμένει η κυρίαρχη μέθοδος. Επομένως, η ανάπτυξη υποδομών ενεργειακής αξιοποίησης μπορεί να συμβάλει στη μείωση της ποσότητας των αποβλήτων που οδηγούνται σε ταφή, υπό την προϋπόθεση ότι θα εντάσσεται σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα που δίνει προτεραιότητα στην πρόληψη, την

επαναχρησιμοποίηση, τη διαλογή στην πηγή και την ανακύκλωση. Η ενεργειακή αξιοποίηση θα πρέπει επομένως να εξετάζεται κυρίως για τα κατάλληλα μη ανακυκλώσιμα υπολείμματα και όχι ως υποκατάστατο των ανώτερων σταδίων της ιεράρχησης διαχείρισης αποβλήτων.

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται σταδιακή προσπάθεια εκσυγχρονισμού του συστήματος διαχείρισης αποβλήτων, με ανάπτυξη μονάδων μηχανικής επεξεργασίας, ανακύκλωσης και παραγωγής δευτερογενών καυσίμων RDF και SRF. Παράλληλα, έχει αυξηθεί το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη μονάδων ενεργειακής αξιοποίησης αποβλήτων, ιδιαίτερα στο πλαίσιο της ενεργειακής κρίσης και της ανάγκης συμμόρφωσης με τους στόχους της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Τα δευτερογενή καύσιμα RDF (Refuse Derived Fuel) και SRF (Solid Recovered Fuel) αποτελούν προϊόντα επεξεργασίας κατάλληλων ρευμάτων μη επικίνδυνων αποβλήτων, από τα οποία έχουν απομακρυνθεί, στον βαθμό που απαιτείται, μη καύσιμα και ανεπιθύμητα συστατικά. Το παραγόμενο καύσιμο αποτελείται κυρίως από το καύσιμο κλάσμα των αποβλήτων, όπως χαρτί, πλαστικά και άλλα υλικά με υψηλότερη θερμογόνο δύναμη. Η αξιοποίησή τους μπορεί να πραγματοποιηθεί σε κατάλληλες μονάδες ενεργειακής αξιοποίησης ή σε βιομηχανικές εφαρμογές, υπό τις αντίστοιχες τεχνικές και περιβαλλοντικές προϋποθέσεις.

Το SRF διαφοροποιείται από το γενικότερο RDF μέσω τυποποιημένων χαρακτηριστικών ποιότητας και ταξινόμησης, τα οποία σχετίζονται μεταξύ άλλων με τη θερμογόνο δύναμη, την περιεκτικότητα σε χλώριο και τον υδράργυρο. Η ποιότητα του παραγόμενου καυσίμου εξαρτάται από τη σύσταση των εισερχόμενων αποβλήτων και την αποτελεσματικότητα της μηχανικής επεξεργασίας. Για τον λόγο αυτό, η παραγωγή RDF/SRF συνδέεται άμεσα με την ανάγκη αποτελεσματικής προεπεξεργασίας και διαλογής των αποβλήτων.

Σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της εθνικής πολιτικής διαχείρισης αποβλήτων έχει ο Εθνικός Σχεδιασμός Διαχείρισης Αποβλήτων (ΕΣΔΑ), ο οποίος προβλέπει αύξηση της ανακύκλωσης, περιορισμό της ταφής και ενίσχυση της ανάκτησης ενέργειας από μη ανακυκλώσιμα απορρίμματα. Στο πλαίσιο αυτό εξετάζεται η δημιουργία νέων εγκαταστάσεων ενεργειακής αξιοποίησης σε διάφορες περιοχές της χώρας.

Παρόλα αυτά, η ανάπτυξη τεχνολογιών Waste-to-Energy στην Ελλάδα αντιμετωπίζει αρκετές προκλήσεις. Το υψηλό επενδυτικό κόστος, η έλλειψη εμπειρίας σε μεγάλες μονάδες ενεργειακής αξιοποίησης και οι κοινωνικές αντιδράσεις αποτελούν σημαντικούς περιορισμούς. Επιπλέον, η σχετικά χαμηλή ποιότητα διαλογής στην πηγή και τα περιορισμένα ποσοστά ανακύκλωσης δυσκολεύουν την εφαρμογή ολοκληρωμένων συστημάτων διαχείρισης.

Παρά τις δυσκολίες αυτές, η ενεργειακή αξιοποίηση αποβλήτων αναμένεται να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο τα επόμενα χρόνια στην Ελλάδα, ιδιαίτερα για τη διαχείριση του υπολείμματος που δεν μπορεί να ανακυκλωθεί. Η αξιοποίηση αποβλήτων για παραγωγή ενέργειας μπορεί να συμβάλει τόσο στη μείωση της ταφής όσο και στην ενίσχυση της ενεργειακής ασφάλειας της χώρας.

Πίνακας 6 Τεχνολογία ενεργειακής αξιοποίησης ανά χώρα

Χώρα	Κύρια τεχνολογία	Βασικά χαρακτηριστικά
Σουηδία	Καύση	Τηλεθέρμανση και υψηλή ανάκτηση ενέργειας
Δανία	Καύση CHP	Υψηλή ενεργειακή απόδοση
Γερμανία	Καύση & MBT	Περιορισμός ταφής
Ιαπωνία	Καύση & Αεριοποίηση	Προηγμένα αντιρρυπαντικά συστήματα
Ελλάδα	RDF/SRF & σχεδιαζόμενα WtE	Υψηλή εξάρτηση από ΧΥΤΑ

Στον παραπάνω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά οι κυριότερες εφαρμογές ενεργειακής αξιοποίησης αποβλήτων σε επιλεγμένες χώρες.

4.3 Προοπτικές ανάπτυξης

Οι διεθνείς εξελίξεις και οι ευρωπαϊκές πολιτικές δείχνουν ότι η ενεργειακή αξιοποίηση αποβλήτων θα συνεχίσει να αναπτύσσεται τα επόμενα χρόνια, ιδιαίτερα στο πλαίσιο της πράσινης μετάβασης και της κυκλικής οικονομίας. Η αύξηση της ζήτησης για εναλλακτικές πηγές ενέργειας, η ανάγκη περιορισμού των εκπομπών

αερίων του θερμοκηπίου και η μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα ενισχύουν τη σημασία των τεχνολογιών Waste-to-Energy.

Οι τεχνολογικές εξελίξεις αναμένεται να βελτιώσουν περαιτέρω την ενεργειακή απόδοση και την περιβαλλοντική επίδοση των μονάδων ενεργειακής αξιοποίησης. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι τεχνολογίες πυρόλυσης και αεριοποίησης, καθώς και οι τεχνολογίες αναβάθμισης βιοαερίου σε βιομεθάνιο. Παράλληλα, η ανάπτυξη συστημάτων δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα μπορεί να συμβάλει στη μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος των μονάδων.

Στην Ελλάδα, η μελλοντική ανάπτυξη της ενεργειακής αξιοποίησης θα εξαρτηθεί από την εφαρμογή ολοκληρωμένων πολιτικών διαχείρισης αποβλήτων, την αύξηση της ανακύκλωσης και την ενίσχυση της κοινωνικής αποδοχής. Η αξιοποίηση της ευρωπαϊκής χρηματοδότησης και η ανάπτυξη κατάλληλων υποδομών μπορούν να συμβάλουν σημαντικά στην ενσωμάτωση των τεχνολογιών αυτών στο εθνικό ενεργειακό και περιβαλλοντικό σύστημα.

Κεφάλαιο 5: Προτάσεις Βελτίωσης και Μελλοντικές Προοπτικές

5.1 Προτάσεις βελτίωσης στη διαχείριση αποβλήτων

Η αποτελεσματική διαχείριση αποβλήτων και η ανάπτυξη τεχνολογιών ενεργειακής αξιοποίησης απαιτούν συνδυασμό τεχνολογικών, θεσμικών, οικονομικών και κοινωνικών παρεμβάσεων. Παρότι τα τελευταία χρόνια έχουν πραγματοποιηθεί σημαντικά βήματα προς τη βιώσιμη διαχείριση απορριμμάτων, εξακολουθούν να υπάρχουν σημαντικές αδυναμίες, ιδιαίτερα σε χώρες όπου η υγειονομική ταφή παραμένει κυρίαρχη πρακτική. Για τον λόγο αυτό, απαιτείται η υιοθέτηση ολοκληρωμένων στρατηγικών που θα στοχεύουν τόσο στη μείωση της παραγωγής αποβλήτων όσο και στη βελτίωση της ενεργειακής και περιβαλλοντικής απόδοσης των συστημάτων διαχείρισης.

Μία από τις σημαντικότερες προτεραιότητες είναι η ενίσχυση της πρόληψης παραγωγής αποβλήτων. Η μείωση των απορριμμάτων στην πηγή αποτελεί το πιο αποτελεσματικό μέτρο διαχείρισης, καθώς περιορίζει την ανάγκη επεξεργασίας και τελικής διάθεσης. Η προώθηση βιώσιμων προτύπων κατανάλωσης, η μείωση της χρήσης πλαστικών μίας χρήσης και η ενίσχυση της επαναχρησιμοποίησης προϊόντων μπορούν να συμβάλουν ουσιαστικά στη μείωση της συνολικής παραγωγής αποβλήτων.

Παράλληλα, ιδιαίτερα σημαντική είναι η βελτίωση των συστημάτων ανακύκλωσης και διαλογής στην πηγή. Η αποτελεσματική διαλογή των αποβλήτων επιτρέπει την ανάκτηση μεγαλύτερων ποσοτήτων ανακυκλώσιμων υλικών και βελτιώνει την ποιότητα του υπολείμματος που προορίζεται για ενεργειακή αξιοποίηση. Η ανάπτυξη ξεχωριστών ρευμάτων συλλογής οργανικών αποβλήτων είναι επίσης κρίσιμη, καθώς διευκολύνει την εφαρμογή βιολογικών τεχνολογιών, όπως η αναερόβια χώνευση και η κομποστοποίηση.

Σημαντική βελτίωση μπορεί να επιτευχθεί και μέσω της ανάπτυξης σύγχρονων μονάδων ενεργειακής αξιοποίησης με υψηλή ενεργειακή απόδοση και προηγμένα αντιρρυπαντικά συστήματα. Οι νέες τεχνολογίες καύσης, πυρόλυσης και αεριοποίησης παρουσιάζουν αυξημένη ενεργειακή αποδοτικότητα και χαμηλότερες

περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε σχέση με παλαιότερες εγκαταστάσεις. Η εφαρμογή συστημάτων συνεχούς παρακολούθησης εκπομπών και η αξιοποίηση τεχνολογιών δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα μπορούν να συμβάλουν περαιτέρω στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος.

Επιπλέον, ιδιαίτερη σημασία έχει η ανάπτυξη πολιτικών και οικονομικών κινήτρων που θα ενισχύσουν τη βιώσιμη διαχείριση αποβλήτων. Η επιβολή αυξημένων τελών ταφής, η ενίσχυση επενδύσεων σε πράσινες τεχνολογίες και η αξιοποίηση ευρωπαϊκών χρηματοδοτικών προγραμμάτων μπορούν να επιταχύνουν τη μετάβαση προς συστήματα κυκλικής οικονομίας. Παράλληλα, απαιτείται σταθερό και σαφές θεσμικό πλαίσιο που θα ενθαρρύνει την ανάπτυξη έργων ενεργειακής αξιοποίησης με σεβασμό στο περιβάλλον και στη δημόσια υγεία.

5.2 Κοινωνική ευαισθητοποίηση και εκπαίδευση

Η επιτυχία οποιουδήποτε συστήματος διαχείρισης αποβλήτων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη συμμετοχή και την ενημέρωση των πολιτών. Η περιβαλλοντική εκπαίδευση και η ευαισθητοποίηση της κοινωνίας αποτελούν βασικές προϋποθέσεις για την ενίσχυση της ανακύκλωσης, της πρόληψης παραγωγής αποβλήτων και της κοινωνικής αποδοχής τεχνολογιών ενεργειακής αξιοποίησης.

Η ανάπτυξη εκπαιδευτικών προγραμμάτων σε σχολεία, πανεπιστήμια και τοπικές κοινωνίες μπορεί να συμβάλει στην καλλιέργεια περιβαλλοντικής συνείδησης και στην υιοθέτηση πιο βιώσιμων πρακτικών κατανάλωσης. Παράλληλα, οι ενημερωτικές εκστρατείες σχετικά με τα οφέλη της ανακύκλωσης και της ενεργειακής αξιοποίησης μπορούν να μειώσουν τις κοινωνικές αντιδράσεις και να ενισχύσουν την εμπιστοσύνη των πολιτών απέναντι στις νέες τεχνολογίες.

Ιδιαίτερα σημαντική είναι επίσης η διαφάνεια στη λειτουργία των μονάδων ενεργειακής αξιοποίησης. Η δημόσια πρόσβαση σε στοιχεία σχετικά με τις εκπομπές, τις περιβαλλοντικές επιδόσεις και τα μέτρα προστασίας μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στη βελτίωση της κοινωνικής αποδοχής και στη μείωση του φαινομένου NIMBY (“Not In My Backyard”).

5.3 Μελλοντικές προοπτικές

Οι μελλοντικές εξελίξεις στον τομέα της ενεργειακής αξιοποίησης αποβλήτων αναμένεται να συνδεθούν στενά με την ανάπτυξη της κυκλικής οικονομίας, της πράσινης ενέργειας και των τεχνολογιών χαμηλού ανθρακικού αποτυπώματος. Η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των μονάδων, η αξιοποίηση τεχνητής νοημοσύνης και αυτοματισμών στη διαχείριση αποβλήτων, καθώς και η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών επεξεργασίας αναμένεται να συμβάλουν σημαντικά στη βιωσιμότητα του τομέα.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ανάπτυξη τεχνολογιών παραγωγής πράσινων καυσίμων από απόβλητα, όπως το βιομεθάνιο και το υδρογόνο. Παράλληλα, η εφαρμογή τεχνολογιών δέσμευσης και αξιοποίησης διοξειδίου του άνθρακα μπορεί να μειώσει περαιτέρω τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και να ενισχύσει τον ρόλο των μονάδων Waste-to-Energy στην ενεργειακή μετάβαση.

Στην Ελλάδα, η μελλοντική πρόοδος θα εξαρτηθεί από την ανάπτυξη κατάλληλων υποδομών, την αύξηση της ανακύκλωσης και την εφαρμογή ολοκληρωμένων πολιτικών διαχείρισης αποβλήτων. Η αξιοποίηση ευρωπαϊκών πόρων και η συνεργασία δημόσιου και ιδιωτικού τομέα μπορούν να συμβάλουν σημαντικά στην ανάπτυξη σύγχρονων μονάδων ενεργειακής αξιοποίησης και στη μείωση της εξάρτησης από την υγειονομική ταφή.

Συνολικά, η μετάβαση προς ένα βιώσιμο σύστημα διαχείρισης αποβλήτων απαιτεί μακροπρόθεσμο σχεδιασμό, τεχνολογική καινοτομία και ενεργή συμμετοχή της κοινωνίας. Η ενεργειακή αξιοποίηση αποβλήτων μπορεί να αποτελέσει σημαντικό εργαλείο για την επίτευξη των στόχων βιώσιμης ανάπτυξης και κυκλικής οικονομίας, υπό την προϋπόθεση ότι θα εφαρμόζεται με περιβαλλοντικά και κοινωνικά υπεύθυνο τρόπο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία εξέτασε τις βασικές τεχνολογίες ενεργειακής αξιοποίησης αποβλήτων, με έμφαση στα τεχνικά χαρακτηριστικά, την ενεργειακή αξιοποίηση, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τις οικονομικές παραμέτρους τους, καθώς και στη δυνατότητα εφαρμογής τους στο πλαίσιο ενός ολοκληρωμένου συστήματος διαχείρισης αποβλήτων. Από τη συγκριτική εξέταση προκύπτει ότι οι τεχνολογίες δεν αποτελούν ισοδύναμες εναλλακτικές, αλλά παρουσιάζουν διαφορετικές απαιτήσεις και δυνατότητες ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του διαθέσιμου ρεύματος αποβλήτων.

Η καύση αποτελεί την πλέον ώριμη και ευρέως εφαρμοζόμενη θερμική τεχνολογία και μπορεί να αξιοποιήσει μεγάλες ποσότητες διαφόρων αστικών αποβλήτων, με ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας. Η πυρόλυση και η αεριοποίηση παρουσιάζουν διαφορετική προσέγγιση, καθώς οδηγούν στην παραγωγή ενεργειακών ενδιάμεσων προϊόντων, όπως πυρολυτικό έλαιο και συνθετικό αέριο, αλλά απαιτούν περισσότερο ελεγχόμενες συνθήκες λειτουργίας και κατάλληλα χαρακτηριστικά τροφοδοσίας. Η αναερόβια χώνευση παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για χωριστά συλλεγόμενα βιοαποδομήσιμα οργανικά απόβλητα, καθώς επιτρέπει την παραγωγή βιοαερίου και ταυτόχρονα γίνεται και διαχείριση της οργανικής ύλης.

Η σύγκριση των τεχνολογιών έδειξε επίσης ότι η ενεργειακή απόδοση δεν αποτελεί από μόνη της επαρκές κριτήριο για την επιλογή μιας τεχνολογίας. Η πραγματική απόδοση επηρεάζεται από τη σύσταση, την υγρασία και το ενεργειακό περιεχόμενο των αποβλήτων, την ανάγκη προεπεξεργασίας, την κλίμακα της μονάδας και τον τρόπο αξιοποίησης της παραγόμενης ενέργειας. Παράλληλα, το κόστος επένδυσης και λειτουργίας, οι απαιτήσεις περιβαλλοντικού ελέγχου και η δυνατότητα αξιοποίησης θερμότητας ή άλλων παραγόμενων προϊόντων επηρεάζουν ουσιαστικά την οικονομική βιωσιμότητα μιας εγκατάστασης. Η οικονομική βιωσιμότητα εξαρτάται από την αντιστοίχιση της δυναμικότητας της εγκατάστασης με τη διαθέσιμη και κατάλληλη τροφοδοσία, καθώς και από το συνολικό οικονομικό μοντέλο λειτουργίας. Επομένως, μια τεχνολογία με υψηλότερη θεωρητική

ενεργειακή απόδοση δεν είναι απαραίτητα και η οικονομικά ή περιβαλλοντικά κατάλληλη επιλογή.

Ιδιαίτερη σημασία έχει η ποσοτική εξέταση της ελληνικής πραγματικότητας. Η ανάλυση των στοιχείων της περιόδου 2014–2023 δείχνει ότι η υγειονομική ταφή παραμένει διαχρονικά η κυρίαρχη μέθοδος διαχείρισης των δημοτικών αποβλήτων. Παρά τη σταδιακή βελτίωση της ανακύκλωσης κατά την πρώτη περίοδο των εξεταζόμενων ετών, το ποσοστό της παραμένει περιορισμένο, ενώ η ανάκτηση ενέργειας εξακολουθεί να αντιπροσωπεύει μικρό μέρος της συνολικής διαχείρισης. Ειδικότερα, η ποσότητα των αποβλήτων που οδηγήθηκε σε ανάκτηση ενέργειας αυξήθηκε από 27 kt το 2016 σε 89 kt το 2023, όμως το αντίστοιχο ποσοστό επί της συνολικής διαχείρισης παραμένει περίπου στο 1,6% το 2023 ενώ η ταφή παραμένει σε ποσοστό περίπου ίσο με 81%.

Από τα ποσοστά αυτά, αναδεικνύεται μια σημαντική διαφορά μεταξύ της ελληνικής και της ευρωπαϊκής πραγματικότητας ως προς τον ρόλο της ενεργειακής αξιοποίησης. Η περιορισμένη συμμετοχή της στην Ελλάδα δεν σημαίνει ότι η ενεργειακή αξιοποίηση αποτελεί αυτοτελώς τη λύση στο πρόβλημα της ταφής. Αντίθετα, δείχνει ότι υπάρχει ανάγκη ανάπτυξης ενός περισσότερο ολοκληρωμένου συστήματος διαχείρισης, στο οποίο η πρόληψη, η χωριστή συλλογή, η επαναχρησιμοποίηση, η ανακύκλωση και η επεξεργασία των βιοαποδομήσιμων αποβλήτων θα προηγούνται της ενεργειακής αξιοποίησης του κατάλληλου υπολείμματος.

Με βάση τη συνολική συγκριτική αξιολόγηση, προκύπτει ότι η καταλληλότερη προσέγγιση για την Ελλάδα δεν είναι η αποκλειστική επιλογή μίας τεχνολογίας, αλλά ο συνδυασμός διαφορετικών μεθόδων ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των επιμέρους ρευμάτων αποβλήτων. Τα μη ανακυκλώσιμα, κατάλληλα για θερμική επεξεργασία απόβλητα μπορούν να κατευθύνονται σε μονάδες ενεργειακής αξιοποίησης, ενώ τα χωριστά συλλεγόμενα βιοαποδομήσιμα απόβλητα μπορούν να αξιοποιούνται μέσω βιολογικών διεργασιών, όπως η αναερόβια χώνευση. Με τον τρόπο αυτό η ενεργειακή αξιοποίηση λειτουργεί συμπληρωματικά και όχι ανταγωνιστικά προς την ανακύκλωση.

Τέλος, η οικονομική βιωσιμότητα των μονάδων ενεργειακής αξιοποίησης στην Ελλάδα θα πρέπει να εξετάζεται σε συνδυασμό με την εξασφάλιση επαρκούς και σταθερής τροφοδοσίας, το ενεργειακό περιεχόμενο των αποβλήτων, το κόστος επένδυσης και λειτουργίας, τις απαιτήσεις περιβαλλοντικής προστασίας και τις δυνατότητες αξιοποίησης της παραγόμενης ενέργειας. Συνεπώς, η ενεργειακή αξιοποίηση μπορεί να αποτελέσει σημαντικό εργαλείο για τη μείωση της ταφής και την ανάκτηση ενέργειας από απόβλητα, υπό την προϋπόθεση ότι εντάσσεται σε ένα τεχνικά τεκμηριωμένο, οικονομικά βιώσιμο και περιβαλλοντικά ελεγχόμενο σύστημα ολοκληρωμένης διαχείρισης αποβλήτων.

Βιβλιογραφία

- Appels, L., Baeyens, J., Degreè, J., & Dewil, R. (2008). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(6), 755–781.
- Arena, U. (2012). Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. *Waste Management*, 32(4), 625–639.
- Astrup, T. F., Tonini, D., Turconi, R., & Boldrin, A. (2015). Life cycle assessment of thermal Waste-to-Energy technologies: Review and recommendations. *Waste Management*, 37, 104–115.
- Athanasίου, C. J., Tsalkidis, D. A., Kalogirou, E., & Voudrias, E. A. (2015). Feasibility analysis of municipal solid waste mass burning in the Region of East Macedonia–Thrace in Greece. *Waste Management & Research*.
- Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3), 1827–1835.
- CEWEP (Confederation of European Waste-to-Energy Plants). (2021). *Waste-to-Energy in Europe in 2021: Statistics and distribution of WtE plants across Europe*. Brussels, Belgium.
- Chen, D., Yin, L., Wang, H., & He, P. (2021). Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 140, 110694.
- Dong, J., Chi, Y., Tang, Y., Ni, M., Nzihou, A., & Weiss-Hortala, E. (2020). Energy-environment-economy assessment of waste-to-energy technologies. *Waste Management*, 102, 681–689.
- Ellen MacArthur Foundation. (2019). *Circular economy systems diagram*. Ellen MacArthur Foundation.
- Farooq, A., Haputta, P., Silalertruksa, T., & Gheewala, S. H. (2021). A Framework for the Selection of Suitable Waste to Energy Technologies for a Sustainable Municipal Solid Waste Management System. *Frontiers in Sustainability*, 2, 681690.
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768.
- Hariyani, D., Hariyani, P., Mishra, S., & Sharma, M. K. (2025). A literature review on waste management treatment and control techniques. *Sustainable Futures*, 9, 100728.
- 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*. Washington, DC: World Bank.

Komilis, D., & Liogkas, V. (2014). Full cost accounting on existing and future municipal solid waste management facilities in Greece. *Global NEST Journal*, 16(4), 787–796.

Malavika, B., Chopra, S. S., & Anilkumar, P. (2021). A framework for the selection of suitable waste to energy technologies for a sustainable municipal solid waste management system. *Frontiers in Sustainability*

Mao, C., Feng, Y., Wang, X., & Ren, G. (2020). Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 540–555.

Miyata, R., Fujimoto, S., & Koda, K. (2021). Feasible conditions for Japanese woody biomass utilization. *Biomass Conversion and Biorefinery*. Springer Nature.

Ouda, M. et al. (2021). A Framework for the Selection of Suitable Waste to Energy Technologies for a Sustainable Municipal Solid Waste Management System. *Frontiers in Sustainability*, 2, 681690.

Panepinto, D., Tedesco, V., Brizio, E., & Genon, G. (2021). Environmental performance of waste-to-energy technologies. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125797.

Papargyropoulou, E., Lozano, R., Steinberger, J. K., Wright, N., & Ujang, Z. bin. (2014). The food waste hierarchy as a framework for the management of food surplus and food waste. *Journal of Cleaner Production*, 76, 106–115.

Saif, S., Razia, E. T., Khan, M., Hatshan, M. R., & Adil, S. F. (2023). *A Comprehensive Introduction to Solid Waste Issues*.

World Energy Council. (2016). *World Energy Resources 2016*. London: World Energy Council.