



Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας

Πρόγραμμα Σπουδών

Διαχείριση Αποβλήτων

Διπλωματική Εργασία

«Ενεργειακή Αξιοποίηση Αστικών Στερεών Αποβλήτων»

Μυρωνάκης Ιωάννης

Επιβλέπων Καθηγητής: Κομνίτσας Κωνσταντίνος

Πάτρα, Ιούνιος 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Ιωάννη Μυρωνάκη 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.



«Ενεργειακή Αξιοποίηση Αστικών Στερεών Αποβλήτων»

Ιωάννης Μυρωνάκης

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:
Κομνίτσας Κωνσταντίνος
Πολ. Κρήτης

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:
Καραγιάννης Βάϊος
Παν. Δυτ. Μακεδονίας

Πάτρα, Ιούνιος 2026

Ευχαριστώ τον καθηγητή κ. Κομνίτσα Κωνσταντίνο για την υποστήριξη
και τη καθοδήγησή του.

Την αφιερώνω στον Χάρη και στους γονείς μου.

Συντομογραφίες

AKZ	Ανάλυση Κύκλου Ζωής
ΑΣΑ	Αστικά Στερεά Απόβλητα
ΑΧ	Αναερόβια Χώνευση
ΕΑΑ	Ενεργειακή Αξιοποίηση Αποβλήτων
ΕΣΔΑ	Εθνικό Σχεδιασμό Διαχείρισης Αποβλήτων
ΣΒΑ	Στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης
TN	Τεχνητή Νοημοσύνη
AC	Αναερόβια Χώνευση
AHP	Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία
CAPEX	Κεφαλαιουχική Δαπάνη
CLO	Αποτέλεσμα Τύπου Κομπόστ
GAS	Αεριοποίηση
GHG	Αέρια Θερμοκηπίου (ΑΘ)
GWP	Δυναμικό Υπερθέρμανσης του Πλανήτη
H-B	Διεργασία Haber-Bosch
HHV	Ανώτερη θερμογόνο δύναμη
HTC	Τεχνολογία Υδροθερμικής Ενανθράκωσης
INC	Αποτέφρωση
IPCC	Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή
LFGR	Ανάκτηση Αερίων από χώρους Υγειονομικής Ταφής
LHV	Κατώτερη θερμογόνο δύναμη
MCDA	Εργαλείο Πολυκριτήριας Ανάλυσης Αποφάσεων
MFC	Μικροβιακές Κυψέλες Καυσίμου
MSW	Αστικά Στερεά Απόβλητα
OFMSW	Οργανικό κλάσμα των Αστικών Στερεών Αποβλήτων
PYR	Πυρόλυση
RDF	Καύσιμο που προέρχεται από Απορρίμματα
SGD	Στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης
SRF	Στερεό Ανακτώμενο Καύσιμο
VOC	Πτητική Οργανική Ένωση
WTE	Waste-to-Energy, Ενεργειακή αξιοποίηση αποβλήτων

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα Πινάκων	7
Περιεχόμενα Σχημάτων / Εικόνων	9
Περίληψη	11
Λέξεις – Κλειδιά	11
Abstract	12
Keywords	12
1. Εισαγωγή	13
2. Μεθοδολογία	17
3. Αστικά Στερεά Απόβλητα	18
3.1. Διαχείριση των Αστικών Στερεών Αποβλήτων	20
3.2. Μετατροπή των ΑΣΑ σε Ενέργεια	22
3.3. Τεχνολογίες Ενεργειακής Μετατροπής ΑΣΑ	25
4. Σύγχρονες Τεχνολογίες	28
4.1. Παγκόσμια κατάσταση της παραγωγής ενέργειας από απόβλητα	33
4.2. Παγκόσμια περιβαλλοντικά οφέλη της παραγωγής ενέργειας από απόβλητα	36
5. Δεδομένα – Αποτελέσματα	38
5.1. Ανάκτηση ενέργειας από χώρους υγειονομικής ταφής	38
5.2. Μελέτη περίπτωσης αναπτυσσόμενης χώρας	39
5.3. Συγκριτική μελέτη πολλαπλών κριτηρίων	40
5.4. Βιβλιομετρική ανασκόπηση για τις τεχνολογίες (WtE)	46
5.5. Τεχνοοικονομική και περιβαλλοντική αξιολόγηση τεχνολογιών (WtE) στα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα	53
5.6. Ανασκόπηση των προσεγγίσεων μετατροπής αποβλήτων σε ενέργεια	56
5.7. Ολιστική Αξιολόγηση βασισμένη σε πολλαπλά κριτήρια	58
5.8. Η βιοξήρανση ως τεχνολογία μετατροπής αποβλήτων σε ενέργεια	59
5.9. Αξιολόγηση WtE μέσω τεσσάρων μοντέλων	61
5.10. Τρέχουσα κατάσταση των τεχνολογιών μετατροπής αποβλήτων σε ενέργεια	62
5.11. Τεχνικές αξιοποίησης αποβλήτων βιομάζας για παραγωγή ενέργειας	65
5.12. Αξιολόγηση τεχνολογιών WtE	68
5.13. Ανάκτηση Ενέργειας από ΑΣΑ στην Ελλάδα	70
6. Συζήτηση	75
7. Προοπτικές Διαχείρισης ΑΣΑ	86
Συμπεράσματα	89
Βιβλιογραφικές Σελίδες	91

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1:	Μέση ποσοστιαία παγκόσμια σύσταση των ΑΣΑ ανά επίπεδο εισοδήματος	15
Πίνακας 2:	Ταξινόμηση και σύσταση αστικών στερεών αποβλήτων	19
Πίνακας 3:	Βιοχημική μετατροπή ΑΣΑ σε βιοκαύσιμα	19
Πίνακας 4:	Παράγοντες που επηρεάζουν τη διαχείριση των αποβλήτων	23
Πίνακας 5:	Τεχνολογίες προεπεξεργασίας και τα χαρακτηριστικά τους	27
Πίνακας 6:	Σύγκριση επένδυσης κεφαλαίου μεταξύ συμβατικών τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας και τεχνολογιών WTE	28
Πίνακας 7:	Σύγκριση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από ΑΣΑ και άλλα ορυκτά καύσιμα	29
Πίνακας 8:	Σύγκριση του κόστους λειτουργίας και συντήρησης για τεχνολογίες WTE	29
Πίνακας 9:	Σύγκριση του κόστους λειτουργίας και συντήρησης για συμβατικές τεχνολογίες WTE μεταξύ διαφορετικών χωρών	30
Πίνακας 10:	Σύγκριση διαφόρων τεχνολογιών μετατροπής ενέργειας από απόβλητα	34
Πίνακας 11:	Ανάλυση κόστους τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας από απόβλητα για μια αναπτυγμένη χώρα (Ηνωμένο Βασίλειο)	35
Πίνακας 12:	Ανάλυση κόστους τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας από απόβλητα για μία αναπτυσσόμενη χώρα (Ινδία)	35
Πίνακας 13:	Εκπομπές από εγκαταστάσεις ανάκτησης ενέργειας από απόβλητα στις ΗΠΑ	37
Πίνακας 14:	Ενεργειακό δυναμικό εκπομπών σε μεθάνιο από χώρους υγειονομικής ταφής στην Μαλαισία	38
Πίνακας 15:	Σύσταση τύπων αποβλήτων για διαφορετικές τεχνολογίες μετατροπής των αποβλήτων σε ενέργεια	42
Πίνακας 16α:	Τεχνολογικά κριτήρια	42
Πίνακας 16β:	Τεχνολογικά κριτήρια	43
Πίνακας 17:	Κοινωνικοπολιτισμικά κριτήρια	44
Πίνακας 18:	Περιβαλλοντικά κριτήρια	44
Πίνακας 19:	Οικονομικά κριτήρια	45
Πίνακας 20:	Συνολικές συνοπτικές προτεραιότητες για τις εναλλακτικές λύσεις	46
Πίνακας 21:	Δημοσιευμένες εργασίες για την επεξεργασία των ΑΣΑ από τεχνολογίες WtE	47
Πίνακας 22:	Σχέση των τεχνολογιών WtE με SGDs	47
Πίνακας 23:	Εισροές και εκροές για την Tianjin της Κίνας και το Sarpsborg της Νορβηγίας το 2010 με βάση 1 τόνου ΑΣΑ ως λειτουργική μονάδα	49
Πίνακας 24:	Δυνατότητα υποκατάστασης ενέργειας στο ισοζύγιο ηλεκτρικής ενέργειας και ενέργειας της Κίνας μέσω της αποτέφρωσης και της αεριοποίησης ΑΣΑ	53
Πίνακας 25:	Σύνοψη οικονομικών και περιβαλλοντικών δεικτών για τις προτεινόμενες τεχνολογίες	56
Πίνακας 26:	Σύγκριση Διαφορετικών Τεχνολογιών	57
Πίνακας 27:	Αρχικό μοντέλο δεδομένων από τη διεθνή βιβλιογραφία και από τις κοινωνικές έρευνες και τις έρευνες ειδικών για τα 2 σενάρια	59
Πίνακας 28:	Συνοπτική επισκόπηση τεχνολογιών WtE	63

Πίνακας 29:	Ανάλυση κόστους-οφέλους τεχνολογιών WtE	64
Πίνακας 30:	Οικονομική βιωσιμότητα και ανάλυση κόστους	67
Πίνακας 31:	Προκλήσεις και περιορισμοί των τεχνικών αξιοποίησης	68
Πίνακας 32:	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της αεριοποίησης βιομάζας	80
Πίνακας 33:	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της ήπιας πυρόλυσης βιομάζας	82
Πίνακας 34:	Συντελεστής εκπομπών κύκλου ζωής για τις εκπομπές δικτύου γεννητριών ενέργειας στην Κένυα	85
Πίνακας 35:	Κρίσιμοι παράγοντες που επηρεάζουν τις στρατηγικές διαχείρισης των ΑΣΑ	87

Περιεχόμενα Σχημάτων / Εικόνων

Σχήμα 1:	Επιπτώσεις του πολέμου της Ουκρανίας στις συνολικές παγκόσμιες εκπομπές	13
Σχήμα 2:	Συνολικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου το 2022 στις ΗΠΑ	14
Σχήμα 3:	Ταξινόμηση οργανικών στερεών αποβλήτων σε οικιακά και μη	18
Σχήμα 4:	Διαθέσιμες οδοί μετατροπής για την παραγωγή προϊόντων προστιθέμενης αξίας από τα ΑΣΑ	20
Σχήμα 5:	Χρονοδιάγραμμα προόδου στις τεχνικές διαχείρισης αποβλήτων	20
Σχήμα 6:	Περιορισμοί στη διαχείριση των ΑΣΑ	22
Σχήμα 7:	Σύνδεση των ΑΣΑ μέσω της ΑΠ.Ε. με την ενέργεια	23
Σχήμα 8:	Τεχνολογίες μετατροπής των ΑΣΑ σε ενέργεια	25
Σχήμα 9:	Αξιολόγηση των στερεών αστικών αποβλήτων ως πρώτη ύλη για τις τεχνολογίες μετατροπής τους σε ενέργεια	26
Σχήμα 10:	Διαθέσιμες μέθοδοι / τεχνολογίες μετατροπής αποβλήτων σε ενέργεια και τα προϊόντα τους	30
Σχήμα 11α:	Τα κριτήρια αξιολόγησης της βιωσιμότητας των τεχνολογιών επεξεργασίας των αποβλήτων	31
Σχήμα 11β:	Ανάλυση SWOT τεχνολογιών WtE	32
Σχήμα 12:	Σύγκριση τεχνολογιών WtE	39
Σχήμα 13:	Μοντέλο κατάταξης τεχνολογιών μετατροπής των αποβλήτων σε ενέργεια	41
Σχήμα 14:	Περιγραφή των εγκαταστάσεων α) Μονάδα αεριοποίησης-Sarpsborg, Νορβηγία και β) αποτεφρωτήρας-Λέβητας με σχάρα-Tianjin, Κίνα	48
Σχήμα 15:	Σύγκριση της επίδρασης της αποτέφρωσης και της αεριοποίησης για την επεξεργασία ΑΣΑ με τη μέθοδο τελικών σημείων	50
Σχήμα 16:	Αξιολόγηση Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής με ενδιάμεσους δείκτες (Midpoint LCIA) της αποτέφρωσης και της αεριοποίησης για την επεξεργασία ΑΣΑ	51
Σχήμα 17:	Μέσα κλάσματα ροών αποβλήτων στις προτεινόμενες τεχνολογίες	54
Σχήμα 18:	Δυναμική παραγωγή ενέργειας των προτεινόμενων τεχνολογιών	55
Σχήμα 19:	Αποτύπωμα άνθρακα των προτεινόμενων τεχνολογιών	55
Σχήμα 20:	Ιεραρχία τεχνολογιών διαχείρισης ΑΣΑ	60
Σχήμα 21:	Σύγκριση της προτεινόμενης μεθόδου με υπάρχοντα μοντέλα	61
Σχήμα 22:	Μέθοδοι επεξεργασίας αποβλήτων για την αξιοποίηση βιομάζας	65
Σχήμα 23α:	Πολυκριτηριακή αξιολόγηση τεχνολογιών ΕΑΑ	69
Σχήμα 23β:	Πολυκριτηριακή αξιολόγηση τεχνολογιών ΕΑΑ	70
Σχήμα 22:	Μετατροπή της βιομάζας σε προϊόντα υψηλότερης προστιθέμενης αξίας	65
Σχήμα 23:	Πολυκριτηριακή αξιολόγηση τεχνολογιών ΕΑΑ	70
Σχήμα 24:	Διαχείριση απορριμμάτων στην Ελλάδα, 2018 – 2022	70
Σχήμα 25:	Επεξεργασία αποβλήτων στις χώρες της Ευρώπης ανά τύπο ανάκτησης και διάθεσης, 2022	71
Σχήμα 26:	Χωροθέτησης μονάδων ενεργειακής αξιοποίησης RDF στην	

	Ελλάδα	73
Σχήμα 27:	Ενεργειακή αξιοποίηση των ΑΣΑ στην Ελλάδα	74
Σχήμα 28:	Παγκόσμια έκθεση αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από βιομάζα 2025	75
Σχήμα 29:	Πρωτογενής κατανάλωση ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση	75
Σχήμα 30:	Μετατροπή της βιομάζας σε προϊόντα υψηλότερης προστιθέμενης αξίας και παγκόσμιες συνεισφορές των προϊόντων καύσης βιομάζας στις εκπομπές	76
Σχήμα 31:	Ανάλυση SWOT τεχνολογιών WtE	77
Σχήμα 32:	Ανάλυση SWOT για την αεριοποίηση με σκοπό την μετατροπή των αποβλήτων σε ενέργεια	80
Σχήμα 33:	Ανάλυση SWOT για την πυρόλυση μετατροπής οργανικών αποβλήτων σε προϊόντα υψηλής αξίας	81
Σχήμα 34:	Συστηματικό γενικό μοντέλο ροής της αναερόβιας χώνευσης με τις σημαντικότερες πηγές και οι εφαρμογές της	83
Σχήμα 35:	Διαφορετικά σενάρια ολοκληρωμένων διεργασιών για την αξιοποίηση του χωνεμένου υπολείμματος	84
Σχήμα 36:	Η ενσωμάτωση τοπικών WtE σε αγροτικές περιοχές	86

Περίληψη

Η αύξηση του πληθυσμού και η αστικοποίηση έχουν οδηγήσει σε σημαντική αύξηση του όγκου των παραγόμενων αστικών στερεών αποβλήτων (ΑΣΑ). Η παραδοσιακή ταφή δημιουργεί σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα, όπως εκπομπές μεθανίου και ρύπανση εδαφών. Η ανάκτηση ενέργειας μέσω τεχνολογιών μετατροπής απορριμμάτων σε ενέργεια (Waste-to-Energy, WtE) προσφέρει μια βιώσιμη λύση, μειώνοντας την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα και προωθώντας την κυκλική οικονομία. Η διαχείριση των ΑΣΑ περιλαμβάνει τη συλλογή, μεταφορά, επεξεργασία και τελική διάθεση. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ), δίνεται έμφαση στην ιεραρχία των αποβλήτων: πρόληψη, επαναχρησιμοποίηση, ανακύκλωση, ανάκτηση ενέργειας και ταφή. Η ενεργειακή αξιοποίηση αποτελεί το προτελευταίο βήμα πριν από την ταφή, διασφαλίζοντας ότι μόνο το μη αξιοποιήσιμο υπόλειμμα οδηγείται σε χώρους υγειονομικής ταφής. Η εργασία αυτή εξετάζει τις τεχνολογίες ανάκτησης ενέργειας από τα ΑΣΑ, γνωστές ως WtE. Η ανάκτηση της ενέργειας από απόβλητα συμβάλλει στη μείωση της ταφής και στην παραγωγή καθαρής ενέργειας. Οι κύριες προκλήσεις αφορούν το υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης, την ανάγκη για αποτελεσματικό διαχωρισμό αποβλήτων στην πηγή και την κοινωνική αποδοχή. Συνεπώς, αναλύονται οι κύριες θερμικές και βιολογικές τεχνολογίες, τα περιβαλλοντικά, οικονομικά και κοινωνικά οφέλη και οι προοπτικές εφαρμογής τους στην Ελλάδα.

Λέξεις – Κλειδιά

Διαχείριση αστικών στερεών αποβλήτων, Τεχνολογίες μετατροπής αποβλήτων σε ενέργεια, Καύσιμο προερχόμενο από απόβλητα, Τεχνοοικονομική ανάλυση, Αξιολόγηση κύκλου ζωής

Abstract

Population growth and urbanization have led to a significant increase in the volume of municipal solid waste (MSW) generated. Traditional landfilling creates substantial environmental problems, including methane emissions and soil contamination. Energy recovery through Waste-to-Energy (WtE) technologies offers a sustainable solution by reducing dependence on fossil fuels and promoting the circular economy. Municipal solid waste management includes the collection, transportation, treatment, and final disposal of waste. In the European Union (EU), waste management is guided by the waste hierarchy: prevention, reuse, recycling, energy recovery, and disposal. Energy recovery represents the penultimate step before landfilling, ensuring that only the non-recoverable residual waste is ultimately disposed of in sanitary landfills. This study examines the technologies used for energy recovery from municipal solid waste, collectively known as Waste-to-Energy (WtE). Recovering energy from waste contributes to reducing landfill disposal while generating clean energy. The main challenges include the high initial investment costs, the need for effective source separation of waste, and public acceptance. Accordingly, this study analyzes the principal thermal and biological WtE technologies, their environmental, economic, and social benefits, and the prospects for their implementation in Greece.

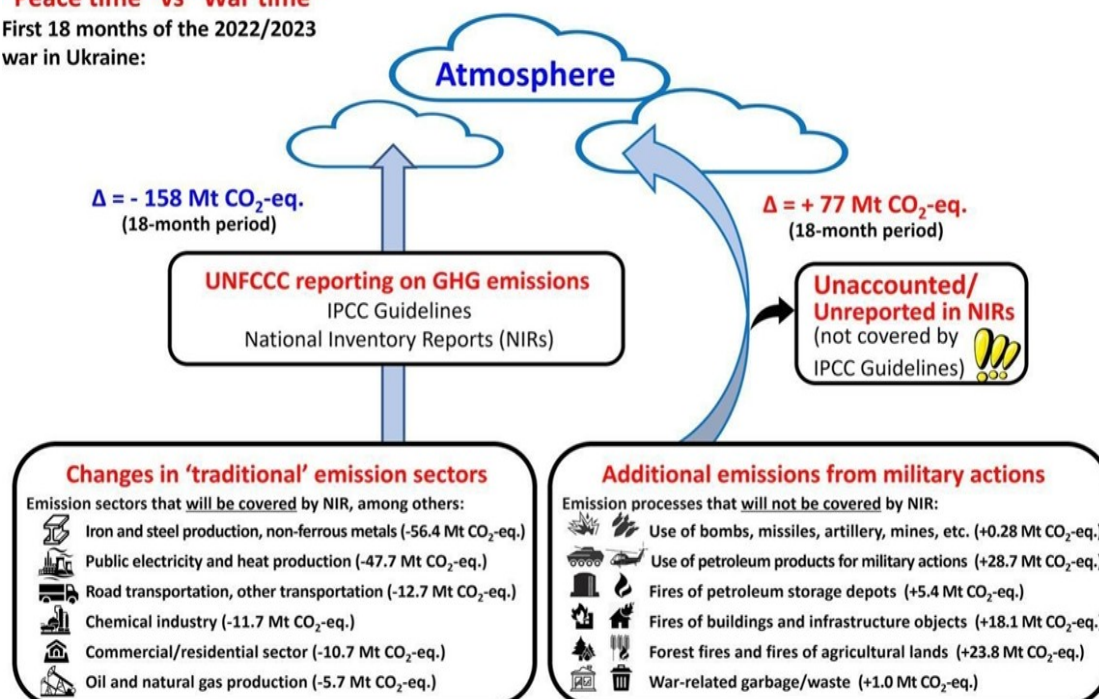
Keywords

Municipal Solid Waste Management, Waste-to-Energy Technologies, Refuse-Derived Fuel (RDF), Techno-economic Analysis, Life Cycle Assessment.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

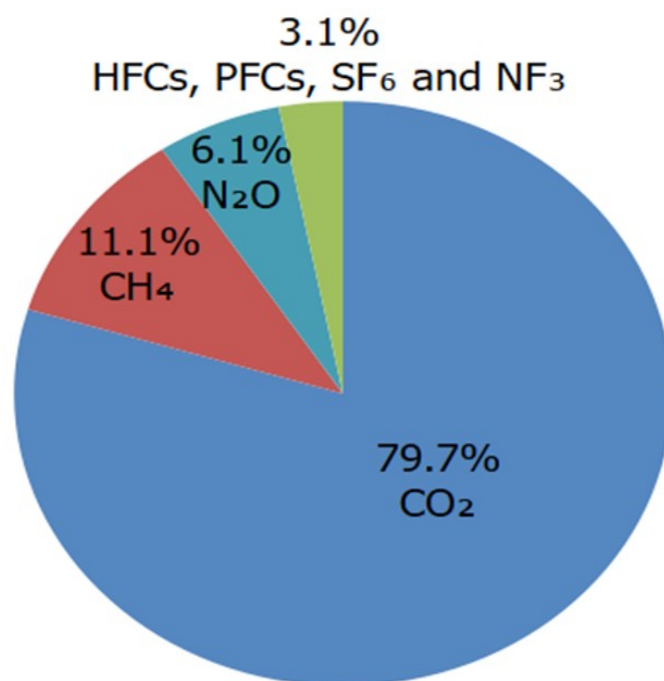
Ζούμε σε μια εποχή που παρατηρείται μεγάλη αύξηση στις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου (GHGs). Οι αυξήσεις αυτές των εκπομπών GHGs συνδυαστικά με την αύξηση των σωματιδίων που στο μεγαλύτερό τους μέρος παράγονται από τις ανθρώπινες δραστηριότητες, συμβάλλουν σημαντικά σε ένα σύγχρονο περιβαλλοντικό πρόβλημα, την κλιματική αλλαγή, για την οποία καλείται σύσσωμη η παγκόσμια κοινότητα να την αντιμετωπίσει αποτελεσματικά. Το 2015, 136 χώρες, οι οποίες είναι υπεύθυνες για το 80% περίπου των εκπομπών GHGs, υιοθέτησαν τη Συμφωνία του Παρισιού, με απώτερο στόχο έως το 2050 να επιτύχουν μηδενικές εκπομπές (NAS, 2022). Οι βιομηχανικές διεργασίες, η διαχείριση των αποβλήτων, οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι γεωργικές δραστηριότητες, ο κλάδος των μεταφορών και η αλλαγή χρήσης γης αποτελούν τους τομείς που ευθύνονται κυρίως για τις περισσότερες εκπομπές GHGs, με την χρήση των ορυκτών καυσίμων να φέρουν τη μέγιστη ευθύνη για τις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) (IPCC, 2013). Η αναφορά και η λογιστική των εκπομπών GHGs καθίστανται υποχρεωτικές από τη Συμφωνία του Παρισιού. Η διεθνής κοινότητα έχει αναπτύξει αρκετά εργαλεία και μεθόδους για την απογραφή των GHGs σε όλες τις κατηγορίες των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων (IPCC, 2006). Ένα παράδειγμα που θα καταδείξει τις αντικειμενικές δυσκολίες για την επίτευξη του στόχου των μηδενικών εκπομπών, που οφείλονται σε ανθρωπογενείς παράγοντες, αποτελεί ο πόλεμος στην Ουκρανία, μέσω του οποίου για χρονικό διάστημα 18 μηνών οι εκπομπές ανήλθαν σε 77 Mt CO₂-eq (Bun et al., 2024) (βλ. Σχήμα 1), ακυρώνοντας σχεδόν το ήμισυ της μείωσης που επιτεύχθηκε σε παγκόσμιο επίπεδο από άλλους παραδοσιακούς τομείς (158 MtCO₂-eq).

“Peace time” vs “War time”
First 18 months of the 2022/2023 war in Ukraine:



Σχήμα 1. Επιπτώσεις του πολέμου της Ουκρανίας στις συνολικές παγκόσμιες εκπομπές (Bun et al., 2024).

Η καύση των ορυκτών καυσίμων στον τομέα των μεταφορών είναι η κύρια πηγή του CO₂ και έπεται το σύνολο των ενεργειακών τομέων, είτε χρησιμοποιούν πετρέλαιο, είτε άνθρακα, και φέρουν την κύρια ευθύνη για τις εκπομπές των GHGs. Το 2006, οι κατευθυντήριες γραμμές της Διακυβερνητικής Επιτροπής που σχετίζονται με την Κλιματική Αλλαγή (IPCC) για τις απογραφές των GHGs περιλαμβάνουν πλέον εκτός από το CO₂ τόσο το CH₄ όσο και το N₂O, τα οποία προέρχονται από τη καύση καυσίμων αλλά και από άλλες ανεξέλεγκτες πηγές. Στις ΗΠΑ, οι οποίες αναφέρονται ως παράδειγμα (Σχήμα 2), οι συνολικές εκπομπές για το 2022 σε αέρια του θερμοκηπίου ανέρχονταν στους 6.343 εκατομμύρια μετρικούς τόνους ισοδύναμου CO₂ (χωρίς να περιλαμβάνονται οι εκπομπές από τη γεωργία).



Σχήμα 2. Συνολικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου το 2022 στις ΗΠΑ (EPA, 2023).

Επομένως, η περιβαλλοντική κατάρρευση είναι αποκλειστικά ένα πρόβλημα ανθρώπινης συμπεριφοράς, η οποία δεν έχει αλλάξει παρά τις κλιματικές καταστροφές. Μία ακόμη σημαντική αιτία της οικολογικής καταστροφής, η οποία φέρει την ευθύνη της ανθρώπινης συμπεριφοράς, αποτελεί η εθιστική υπερκατανάλωση, με τα πολιτικά και τα νομικά μέτρα να καθίστανται ανεπαρκή, καθώς δε στηρίζονται σε διαχρονικές αξίες.

Συνεπώς, σημαντική πηγή εισόδου του διοξειδίου του άνθρακα, του μεθανίου και του υποξειδίου του αζώτου στον ατμοσφαιρικό αέρα αποτελούν τα αστικά στερεά απόβλητα (ΑΣΑ) (EPA, 2023). Σύμφωνα με τους Ganesan & Vedagiri (2024) τα ΑΣΑ αποτελούν την τέταρτη πηγή σε κατάταξη στις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να επηρεάζουν σημαντικά τόσο την υγεία των ανθρώπων όσο και το περιβάλλον. Η πιο σημαντική αιτία του προβλήματος αποτελεί η άγνοια των αρνητικών επιπτώσεων που προκαλούν η ανεξέλεγκτη καύση και η παράνομη διάθεσή τους. Σε επίπεδο ΕΕ, η υγειονομική ταφή κυριαρχεί στις εκπομπές των GHGs με την αναερόβια χώνευση να ακολουθεί και έπονται η κομποστοποίηση, η καύση και η μεταφορά των αποβλήτων. Ο ρυθμός αύξησης του

πληθυσμού στον πλανήτη εκτός από την αύξηση στην παραγωγή ΑΣΑ, αυξάνει και τη ζήτηση σε ενέργεια. Το 84% της παγκόσμιας παραγωγής ενέργειας προέρχεται από ορυκτά καύσιμα. Επίσης, η παγκόσμια παραγωγή ΑΣΑ εκτιμάται ότι θα αυξηθεί δραστικά από τους 2,01 σε 3,40 δισεκατομμύρια τόνους ετησίως έως το 2050, σύμφωνα με την πρόβλεψη της Παγκόσμιας Τράπεζας (Kaza et al., 2018). Το 33% των ΑΣΑ δε διαχειρίζονται με περιβαλλοντικό ασφαλές τρόπο. Τα χαρακτηριστικά και η ποσότητα των ΑΣΑ καθορίζονται αποκλειστικά από την πηγή που προέρχονται, αλλά και από το επίπεδο εισοδήματος της κάθε χώρας (Πίνακας1). Η σύσταση των ΑΣΑ σε παγκόσμιο επίπεδο αποτελείται από τρόφιμα και απόβλητα κήπου (φύλλα, γρασίδι) 44%, χαρτί και χαρτόνι 17%, πλαστικά 12%, γυαλί 5%, μέταλλα 4%, ξύλο 2%, δέρμα και καουτσούκ 2% και άλλα υλικά 14%, με το οργανικό κλάσμα των ΑΣΑ (OFMSW) να αντιπροσωπεύουν το 34-53% αυτών (Osman et al., 2024). Εάν όμως δεν εφαρμοστεί μία ολοκληρωμένη διαχείριση των ΑΣΑ, η παραγωγή τους εκτιμάται ότι θα διπλασιαστεί.

Πίνακας 1. Μέση ποσοστιαία παγκόσμια σύσταση των ΑΣΑ ανά επίπεδο εισοδήματος (UNEP, 2019).

Επίπεδο εισοδήματος	Φαγητό και απόβλητα κήπου	Χαρτί και χαρτόνι	Πλαστικό	Μέταλλο	Γυαλί	Καουτσούκ	Ξύλο	Άλλα
Χαμηλό	56.0	7.0	6.4	2.0	1.0	-	0.4	27.0
Κάτω – μεσαίο	53.0	12.5	11.0	2.0	3.0	0.5	1.0	17.0
Άνω –μεσαίο	54.0	12.0	11.0	2.0	4.0	1.0	1.0	15.0
Υψηλό	32.0	25.0	13.0	6.0	5.0	4.0	4.0	11.0

Η ακατάλληλη διαχείριση, λοιπόν, των αποβλήτων συχνά οδηγεί σε υποβάθμιση του περιβάλλοντος (δηλαδή ρύπανση του νερού, του αέρα και του εδάφους), μετάδοση ασθενειών και απελευθέρωση εκπομπών GHGs, η οποία συμβάλλει στην κλιματική αλλαγή. Για την καταπολέμηση αυτών των προβλημάτων, αρκετές χώρες ακολουθούν την προσέγγιση μετατροπής των αποβλήτων σε ενέργεια (Waste to Energy, WtE), η οποία μειώνει σημαντικά τον όγκο των αποβλήτων και παράγει ανανεώσιμη ενέργεια (Ram et al., 2021). Επομένως, η υιοθέτηση του συστήματος ενεργειακής αξιοποίησης αποβλήτων (EAA) θα μπορούσε να μειώσει τις αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκαλούνται από την παραγωγή αποβλήτων και να διασφαλίσει την παραγωγή ανανεώσιμης και βιώσιμης ενέργειας, επιτυγχάνοντας παράλληλα κυκλική οικονομία.

Σκοπός της παρούσης εργασίας αποτελεί η παρουσίαση των σύγχρονων τεχνολογιών μετατροπής των αποβλήτων σε ενέργεια με έμφαση στα ΑΣΑ. Οι τεχνολογίες αυτές είναι ανάγκη να περιορίσουν σημαντικά την ποσότητα ΑΣΑ που παράγονται ετήσια σε παγκόσμια κλίμακα και να ανακτήσουν από αυτά όσο το δυνατό περισσότερη ενέργεια είτε θερμική είτε ηλεκτρική. Βέβαια, η ανάκτηση ενέργειας από τα ΑΣΑ είναι πολύ σημαντικό να επιτευχθεί με σεβασμό στο περιβάλλον και στην υγεία των ανθρώπων. Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει να δημιουργηθεί ένα ευνοϊκό κανονιστικό πλαίσιο, το οποίο θα παρέχει κίνητρα για επενδύσεις και έρευνα. Οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής μπορούν να οδηγήσουν τη

μετάβαση σε έναν πιο πράσινο και βιώσιμο ενεργειακό τομέα. Αυτά τα μέτρα πολιτικής όχι μόνο θα επιτρέψουν την αποτελεσματική αξιοποίηση των αποβλήτων, αλλά θα συμβάλουν επίσης στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και στην προώθηση ενός πιο βιώσιμου μέλλοντος.

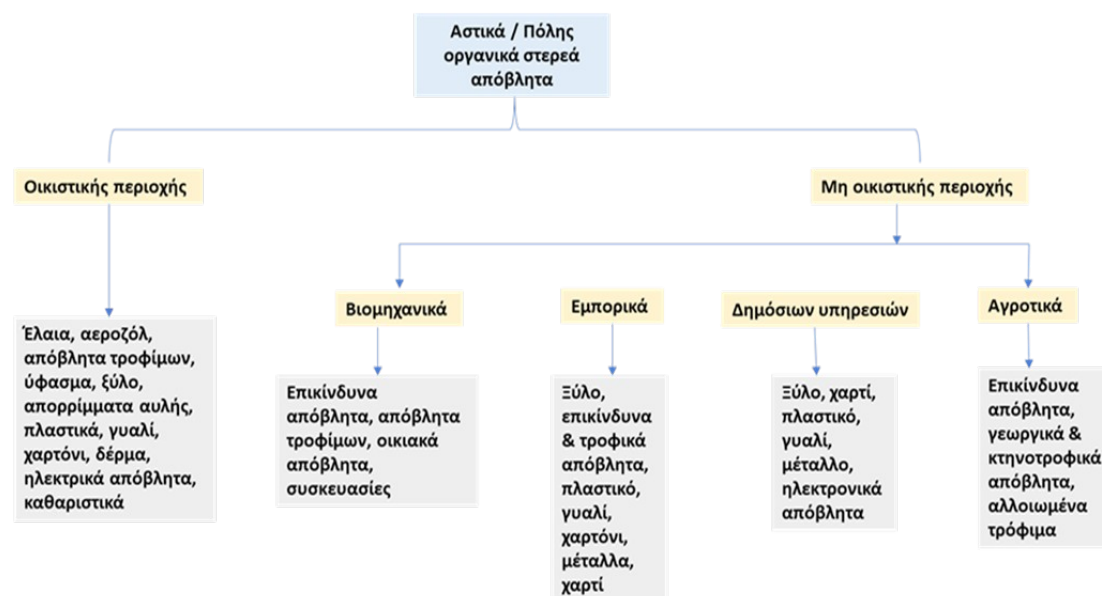
Συνεπώς, η αξιολόγηση των τεχνολογιών ανάκτησης ενέργειας θα πρέπει να γίνει με εκτίμηση των περιβαλλοντικών, κοινωνικών και οικονομικών επιπτώσεων, καθώς και του περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Επίσης, θα παρουσιάσουμε τα δυνατά σημεία και τις αδυναμίες των τεχνολογιών αυτών. Για το λόγο αυτό θα διερευνήσουμε τις μελέτες που υπάρχουν για τις τεχνολογίες και θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα με τρόπο που θα μας οδηγήσουν στην κατάταξη τους.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Αρχικά, ως προς το προσχέδιο και τη δομή της εργασίας βασίστηκα σύμφωνα με τη δήλωση της Διπλωματικής Εργασίας, καθώς επίσης τον σκοπό και τα προσδοκώμενα αποτελέσματά της. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τις λέξεις κλειδιά άντλησα πληροφορίες μέσω του διαδικτύου από Πανεπιστήμια της Ελλάδος, από δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά και από άρθρα σε εφημερίδες και περιοδικά, τόσο ελληνόφωνα όσο και αγγλόφωνα μέσω της δικτυακής πύλης του Ε.Α.Π. και πιο συγκεκριμένα μέσω των πυλών: HELLENIC OPEN UNIVERSITY – HEALLINK - PROQUEST BOOKS, SCOPUS, καθώς και RESEARCH GATE, IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) και GOOGLE SCHOLAR. Στο πρώτο στάδιο αφού συγκέντρωσα αρκετό υλικό από την υπάρχουσα γνώση για τις τεχνολογίες μετατροπής των ΑΣΑ σε ενέργεια, κατόπιν ταξινόμησα αυτό το υλικό σε μελέτες για καθιερωμένες και αναδυόμενες τεχνολογίες. Σε δεύτερη φάση αυτής της εργασίας στόχευσα στην άντληση δεδομένων για την τεκμηρίωση των σκοπών της, πιο συγκεκριμένα να αξιολογήσουμε τις σύγχρονες τεχνολογίες, να εκτιμήσουμε τις περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις και το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα. Η επόμενη φάση είναι να προσφέρουμε πληροφορίες που θα συμβάλλουν στην επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας για τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων ή σχεδιασμού μονάδας μετατροπής των ΑΣΑ σε ενέργεια.

3. ΑΣΤΙΚΑ ΣΤΕΡΕΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ

Τα ΑΣΑ παράγονται από τις καθημερινές δραστηριότητες των πολιτών και θεωρούνται ανεπιθύμητα απορριπτόμενα υλικά, τα οποία παράγονται εντός των ορίων του εκάστοτε δήμου.



Σχήμα 3. Ταξινόμηση οργανικών στερεών αποβλήτων σε οικιακά και μη (επεξεργασμένο από: Μυρωνάκη Ιωάννη, πηγή: Abid et al., 2024).

Είναι μικτά (ετερογενή) απορρίμματα που παράγονται από οικιακές, εμπορικές, βιομηχανικές δραστηριότητες και δημόσιους φορείς (Σχήμα 3). Πιο συγκεκριμένα τα ΑΣΑ περιέχουν ανόργανα, οργανικά και τοξικά απόβλητα και διαχωρίζονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες σε οικιακά και μη οικιακά απόβλητα (Ε.Ρ., 2024). Η σύσταση των ΑΣΑ αποτελεί το πρώτο στάδιο για το σωστό χειρισμό στην όλη διαδικασία διαχείρισής τους. Τα ΑΣΑ αποτελούνται από βιοδιασπώμενα, ανακυκλώσιμα, αδρανή υλικά και άλλα (Πίνακας 2). Η σύσταση των ΑΣΑ εξαρτάται από την οικονομική κατάσταση της χώρας, τις κλιματικές συνθήκες, την εποχικότητα τη γεωγραφική θέση και τις καταναλωτικές συνήθειες. Στην ΕΕ μόνο το 10% από ένα σύνολο απορριμμάτων που παράγονται σε όλη την επικράτεια αντιπροσωπεύουν τα ΑΣΑ, τα οποία καλούνται να τα διαχειριστούν οι δημοτικές αρχές.

Όμως, το τρέχον σύστημα διαχείρισης αποβλήτων δεν είναι μόνο μη φιλικό προς το περιβάλλον, αλλά και ανεπαρκές σύμφωνα με την τρέχουσα πραγματικότητα όσον αφορά τον ρυθμό παραγωγής αποβλήτων. Είναι απογοητευτικό το γεγονός ότι περίπου το 30 - 90% των παραγόμενων αποβλήτων σε παγκόσμια κλίμακα απορρίπτεται σε χώρους υγειονομικής ταφής και ανεξέλεγκτες χωματερές. Τα χαμηλά ποσοστά συλλογής και διάθεσης των ΑΣΑ, τα έχουν καταστήσει τεράστια απειλή για το περιβάλλον. Από την άλλη ο ρυθμός αστικοποίησης και εκβιομηχάνισης ασκεί επίσης πίεση στη διαθέσιμη γη για υγειονομική ταφή αποβλήτων. Επομένως, οι συμβατικές μέθοδοι επεξεργασίας ΑΣΑ (δηλαδή, ανοιχτή απόρριψη και καύση) σε συνδυασμό με τη παραγωγή ενέργειας από ορυκτά καύσιμα αποτελούν σοβαρή απειλή για το περιβάλλον λόγω της εκπομπής επικίνδυνων αερίων και υγρών που είναι ικανά να μολύνουν τη γη, τον αέρα και το νερό.

Πίνακας 2. Ταξινόμηση και σύσταση αστικών στερεών αποβλήτων (Tsui και Wong, 2019).

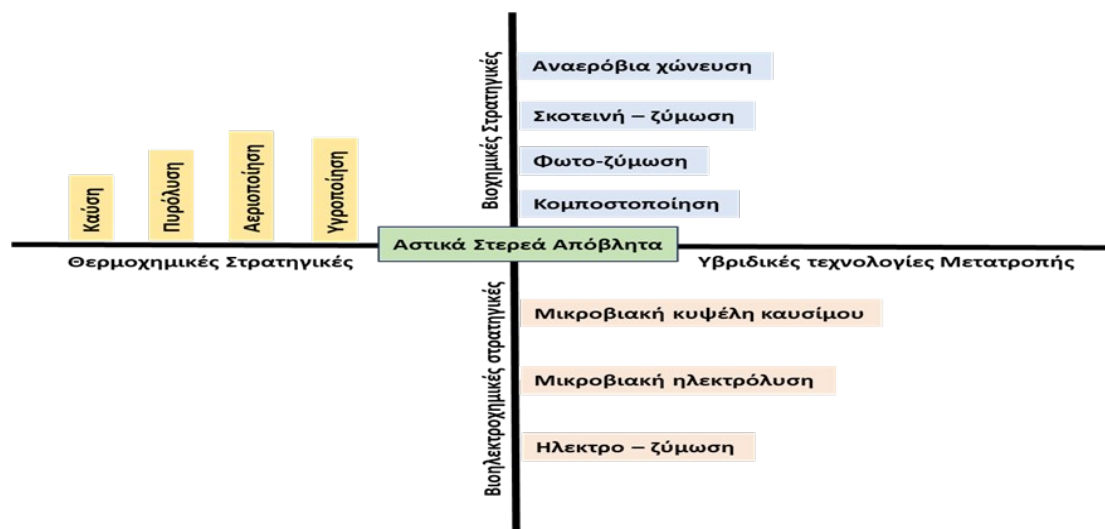
Ταξινόμηση αστικών στερεών αποβλήτων	Σύσταση αστικών στερεών αποβλήτων
Ανακυκλώσιμα απόβλητα	Χαρτί, χαρτόνι, μπουκάλια, γυαλί, τενεκεδάκια, βάζα, αλουμινόχαρτο, αλουμινένια κουτιά, ορισμένα πλαστικά, μέταλλα, ρούχα, υφάσματα, μπαταρίες, ελαστικά κλπ.
Βιοδιασπώμενα απόβλητα	Πράσινα απόβλητα, απόβλητα κουζίνας και τροφίμων, χαρτί
Αδρανή απόβλητα	Απόβλητα κατεδαφίσεων και κατασκευών, συντρίμια, πέτρες, χώμα
Σύνθετα απόβλητα	Ρουχισμός, πλαστικά παιχνίδια, συσκευασίες τροφίμων κλπ.
Ηλεκτρονικά και ηλεκτρικά απόβλητα	Τηλεοράσεις, λάμπες, υπολογιστές, πλυντήρια ρούχων, οθόνες, κινητά τηλέφωνα, ηλεκτρικές συσκευές
Επικίνδυνα απόβλητα	Χημικά, χρώματα, μπαταρίες, ελαστικά, λάμπες φθορίου, λιπάσματα και δοχεία αεροζόλ.
Βιοιατρικά απόβλητα	Ληγμένα φαρμακευτικά προϊόντα κλπ.
Τοξικά απόβλητα	Μυκητοκτόνα, ζιζανιοκτόνα και φυτοφάρμακα.

Συμπερασματικά, η μη διάθεση των αποβλήτων στους υγειονομικούς χώρους ταφής θα μειώσει τους κινδύνους για το περιβάλλον και την υγεία των ανθρώπων (Alao et al., 2022). Στην πραγματικότητα, όμως, ένα κρίσιμο στάδιο αποτελεί ο χαρακτηρισμός των στερεών αποβλήτων, ώστε να αναπτυχθεί και να σχεδιαστεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης τους. Εξαιτίας της ετερογενούς φύσης των ΑΣΑ είναι δύσκολο να γίνει ο χαρακτηρισμός τους μέσω της δειγματοληψίας. Το όφελος από τον χαρακτηρισμό τους είναι ότι βοηθάει να εφαρμοστεί ένα σχέδιο ανακύκλωσης, το οποίο θα συμβάλλει στη μείωση των αποβλήτων και θα εξοικονομηθούν χρήματα. Επίσης, το οργανικό κλάσμα των ΑΣΑ μπορεί να κομποστοποιηθεί, άλλα υλικά, όπως το μέταλλο, το γυαλί, ο ρουχισμός, το χαρτί, μπορούν να ανακυκλωθούν και να επαναχρησιμοποιηθούν για την παραγωγή νέων προϊόντων και τα μη ανακυκλώσιμα υλικά να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ενέργειας, συμβάλλοντας στη στρατηγική για ουδέτερο άνθρακα και μείωσης των εκπομπών GHGs (Abid et al., 2024). Το οργανικό κλάσμα των ΑΣΑ αποτελείται από απορρίμματα κουζίνας (κυρίως τρόφιμα), εφημερίδες, χαρτί και απόβλητα κήπου (φυτά, φύλλα και γρασίδι) παρέχοντας ένα σημαντικό υπόστρωμα άνθρακα για να ανακτηθεί κάποια μορφή ενέργειας (Πίνακας 3).

Πίνακας 3. Βιοχημική μετατροπή ΑΣΑ σε βιοκαύσιμα (Hans et al., 2024).

Συστατικά των ΑΣΑ	Ενεργειακό περιεχόμενο (kcal /τόνο)	Δυναμικό ανάκτησης ενέργειας (kcal/τόνο)
Υφάσματα	3.489	1.237
Ξύλο	2.521	1.301
Τρόφιμα	1.311	1.000
Κλάδεμα αυλής	1.512	1.199
Χαρτί	3.294	1.008
Πλαστική ύλη	7.258	2.090

Παρακάτω στο Σχήμα 4, παρουσιάζονται αρκετές οδοί μετατροπής των ΑΣΑ είτε σε ενέργεια είτε σε ανανεώσιμα προϊόντα. Υπάρχουν διαφορετικές στρατηγικές όπως θερμοχημικές, βιοχημικές, βιοηλεκτροχημικές και υβριδικές. Όλες αυτές οι τεχνολογίες παράγουν μια μεγάλη ποικιλία προϊόντων. Ωστόσο κάποιες από τις τεχνολογίες καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια από ότι παράγουν, για τον λόγο αυτό θα ασχοληθούμε παρακάτω με τις πιο πιθανές να εφαρμοστούν και ενεργειακά θετικές.



Σχήμα 4. Διαθέσιμες οδοί μετατροπής για την παραγωγή προϊόντων προστιθέμενης αξίας από τα ΑΣΑ (επεξεργασμένο από: Μυρωνάκη Ι., πηγή: Haps et al., 2024).

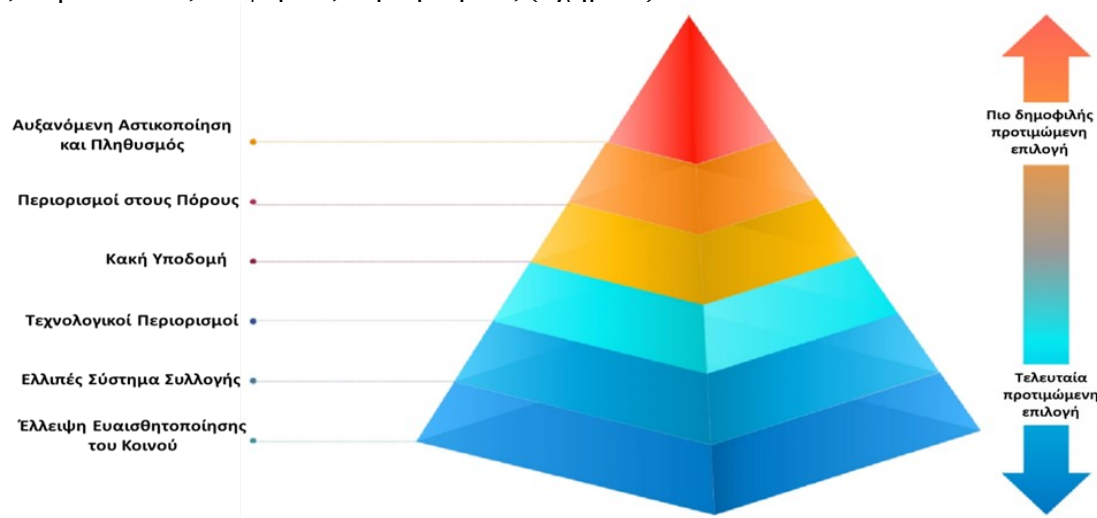
3.1.Διαχείριση των Αστικών Στερεών Αποβλήτων



Σχήμα 5. Χρονοδιάγραμμα προόδου στις τεχνικές διαχείρισης αποβλήτων (Hariyani et al., 2025).

Οι Hariyani et al. (2025) παρουσιάζουν το χρονοδιάγραμμα της προόδου στις τεχνικές διαχείρισης αποβλήτων. Η ανάπτυξη τεχνολογιών επεξεργασίας αποβλήτων έχει εξελιχθεί σημαντικά, επηρεασμένη από τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς, την έλλειψη πόρων και τις τεχνολογικές εξελίξεις. Το 2022 στην ΕΕ επεξεργάστηκαν σχεδόν 2 εκατομμύρια τόνοι αποβλήτων. Αυτός ο αριθμός δεν αντιπροσωπεύει επακριβώς τα παραγόμενα απόβλητα. Περισσότερα από το ήμισυ (61,4%) ανακτήθηκαν, αρκετά (30,2%) οδηγήθηκαν σε χώρους υγειονομικής ταφής, ελάχιστα (0,4%) αποτεφρώθηκαν χωρίς να γίνει ανάκτηση της ενέργειας τους και, τέλος, μερικά (8%) διατέθηκαν με κάποιον άλλο τρόπο. Όσον αφορά τα παραγόμενα ΑΣΑ για το ίδιο έτος, το 48% ανακυκλώθηκαν, ενώ το 23% οδηγήθηκαν σε χωματερές. Στόχος της ΕΕ είναι το 2035 να μειωθεί στο 10% η ποσότητα των ΑΣΑ που αποστέλλεται σε χώρους υγειονομικής ταφής, ενώ για τα ΑΣΑ που επεξεργάζονται οι δήμοι το 60% είτε να ανακτώνται είτε να ανακυκλώνονται. Πλέον, η ΕΕ στοχεύει στην μείωση των αποβλήτων στο ελάχιστο εισάγοντας ως πρακτική την κυκλική οικονομία. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να ξεπεραστεί το παραδοσιακό μοντέλο οικονομίας «παίρνω-φτιάχνω-καταναλώνω-πετώ» και πλέον όταν ένα προϊόν φτάνει στο τέλος της ζωής του να παρατείνεται ο κύκλος ζωής του και να ανακτάται η προστιθέμενη αξία του. Η κυκλική οικονομία συμβάλλει αποτελεσματικά στο να μειωθούν οι εκπομπές των GHGs σε ετήσια βάση, με τη διαχείριση των απορριμμάτων να αντιπροσωπεύει το 3,32% των εκπομπών τους. Η ανακύκλωση συνδυαστικά με την επαναχρησιμοποίηση προϊόντων δύναται να μειώσει δραστικά τη χρήση φυσικών πόρων συμβάλλοντας στην διατήρηση του τοπίου και των οικοτόπων, με απώτερο σκοπό τη αύξηση της βιοποικιλότητας. (E.P., 2024). Σύμφωνα με τους Tisi et al. (2023) η μεγάλη αύξηση στα ποσοστά ανακύκλωσης από οικονομικής άποψης έχει καταλήξει να μην αποτελεί ελκυστική λύση για εμπορική και βιομηχανική χρήση. Αυτή η αύξηση δεν είναι αποτελεσματική πρακτική στη διαχείριση των ΑΣΑ, όταν αυτά τα ανακυκλώσιμα υλικά καταλήγουν είτε σε εγκαταστάσεις θερμικής επεξεργασίας είτε από χειρίστη επιλογή σε χώρους υγειονομικής ταφής. Τα υπολειμματικά υλικά μετά τη διαδικασία της ανακύκλωσης εκτιμώνται σε 1,2 δισεκατομμύρια τόνους σε ετήσια βάση παγκοσμίως, από τα οποία μόνο το 16,6% (0,2 δισεκατομμύρια τόνοι) υποβάλλονται σε διεργασίες επεξεργασίας από τεχνολογίες μετατροπής σε ενέργεια. Το 20% των ΑΣΑ απορρίπτονται σε χώρους υγειονομικής ταφής, οι οποίοι έχουν επενδύσει σε μηχανισμούς που μειώνουν τις εκπομπές αερίων και την εκχύλιση των υγρών στο περιβάλλον. Αν και πλέον οι χώροι υγειονομικής ταφής αποσκοπούν να προστατεύσουν το περιβάλλον, στην καλύτερη περίπτωση μόνο το 50% από σύνολο των εκπομπών των GHGs δύναται να δεσμευτεί. Ενώ ως κεφαλαιουχική επένδυση αυτοί οι χώροι αποτελούν μία οικονομικότερη επιλογή κατά 30% λιγότερη δαπανηρή έναντι των μονάδων ΕΑΑ για τη δέσμευση του μεθανίου, ωστόσο οι μονάδες αυτές επειδή παράγουν περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια αποτελούν πιο οικονομικές λύσεις σε ορίζοντα 30 ετών. Συνεπώς, στη διαχείριση των αποβλήτων, η αξιολόγηση των επιλογών σε πόρους και χρήση τεχνολογιών απαιτεί εφαρμογή Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ), η οποία είναι μια μεθοδολογία για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με ολόκληρη τη διάρκεια ζωής μιας διαδικασίας ή ενός προϊόντος. Επίσης, η πρακτική αυτή ποσοτικοποιεί τις εκπομπές GHGs και τη χρήση ενέργειας που σχετίζονται με τη διαχείριση και την αξιοποίηση των αποβλήτων λαμβάνοντας υπόψη όλα τα ενδιάμεσα στάδια. Η ΑΚΖ συμβάλλει στον τρόπο συγκέντρωσης των πληροφοριών και στη λήψη αποφάσεων. Επιπλέον, η ΑΚΖ εξετάζει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις για το υπό μελέτη σύστημα στους τομείς της οικολογίας, της ανθρώπινης υγείας και της εξάντλησης των πόρων. Στην χώρα μας ο Εθνικός

Σχεδιασμός Διαχείρισης Αποβλήτων (ΕΣΔΑ) προβλέπει για το 2030 το ποσοστό για την επαναχρησιμοποίηση και ανακύκλωση των ΑΣΑ να ανέλθει στο 60%, ενώ μόνο το 10% θα οδηγείται σε χώρους υγειονομικής ταφής. Ο σχεδιασμός αποβλέπει στην μετατροπή των αρχών της νομοθεσίας της ΕΕ σε νόμους του Κράτους. Η παραγωγή για τη δεκαετία 2020-2030 (εκτίμηση ΕΣΔΑ) σε βιοαπόβλητα αναμένεται να αγγίξει και ίσως ξεπεράσει τους 2,3 εκατομμύρια τόνους ετησίως, τα οποία να μην οδηγούνται σε χώρους ταφής. Η βιώσιμη και επιτυχή διαχείριση στα ΑΣΑ πρέπει να ξεπεράσει τους διάφορους περιορισμούς (Σχήμα 6).



Σχήμα 6. Περιορισμοί στη διαχείριση των ΑΣΑ (επεξεργασμένο από: Μυρωνάκη Ι., πηγή: Ganesan & Vedagiri 2024).

Επομένως, η συλλογή των οργανικών αποβλήτων πρέπει να γίνεται με διαχωρισμό στη πηγή προωθώντας τη βιώσιμη διαχείριση. Επίσης, απαραίτητη προϋπόθεση για τη σωστή διαχείριση αποτελεί η καλή συνεργασία με τις τοπικές επιχειρήσεις και τους πολίτες κάθε δήμου της χώρας. Η συνεργασία αυτή θα αποφέρει οικονομικά, κοινωνικά και περιβαλλοντικά οφέλη. Πλέον αποτελεί μονόδρομο η δημιουργία μονάδων επεξεργασίας βιοαποβλήτων και παράλληλα η εγκαθίδρυση μονάδων επεξεργασίας αποβλήτων που στοχεύουν στην παραγωγή βιοπλαστικών, δευτερογενών καυσίμων (SRF/RDF) και ενέργειας είτε θερμικής είτε ηλεκτρικής (ΡΑΑΕΥ, 2025).

3.2. Μετατροπή των ΑΣΑ σε Ενέργεια

Οι αναπτυσσόμενες χώρες μεταξύ των προβλημάτων που αντιμετωπίζουν, σημαντικό ρόλο πλέον διαδραματίζει η πρόσβαση σε αξιόπιστη και οικονομικά προσιτή μορφή ενέργειας, η οποία θα αποσκοπεί σε καθαρό και βιώσιμο περιβάλλον. Έτσι, η συνεχής πρόοδος στην τεχνολογία μπορεί να συμβάλλει στην εμπλοκή των ιδιωτικών επενδύσεων, οι οποίες θα δημιουργήσουν αγορές για «δευτερογενείς» πρώτες ύλες που προέρχονται από απόβλητα. Βέβαια, οποιαδήποτε λύση στη διαχείριση των αποβλήτων δεν πρέπει να εστιάζει μόνο σε περιβαλλοντικές επιπτώσεις, αλλά να είναι κοινωνικά αποδεκτή και οικονομικά αποδοτική. Διάφοροι παράγοντες, οι οποίοι είναι αλληλένδετοι, επηρεάζουν αυτήν την πολύπλοκη διαδικασία (Πίνακας 4). Άρα, οι προκλήσεις στη διαχείριση των αστικών αποβλήτων πηγάζουν από την άμεση εγγύτητα των παραγόμενων αποβλήτων με τους πολίτες, την πολύ υψηλή δημόσια προβολή και την ενεργό συμμετοχή των πολιτών και των επιχειρήσεων (δηλαδή την

προθυμία για ανακύκλωση κ.λπ.). Πλέον έχει αναδυθεί ένας νέος όρος «παραγωγός-καταναλωτής», ο οποίος αποδίδει έναν ρόλο στους ενεργούς καταναλωτές τη δυνατότητα να είναι οι ίδιοι παραγωγοί ενέργειας, ιδίως μέσω της αυτοπαραγωγής ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, της αποθήκευσης, της εξοικονόμησης ενέργειας και της συμμετοχής σε προγράμματα διαχείρισης ζήτησης (Malinauskaite et al., 2017).

Πίνακας 4. Παράγοντες που επηρεάζουν τη διαχείριση των αποβλήτων (Malinauskaite et al., 2017).

Παράγοντες διαχείρισης αποβλήτων

Πολιτικοί: πολιτική βούληση, κυβερνητικοί κανονισμοί (φόροι, επιδοτήσεις), πολυεπίπεδη διακυβέρνηση, παρακολούθηση και συλλογή δεδομένων.

Οικονομικοί: επιχειρηματικό μοντέλο, διαθεσιμότητα χρηματοδότησης, ανάλυση κόστους-οφέλους, διαφάνεια και συνεργασία σε όλη την αλυσίδα αξίας.

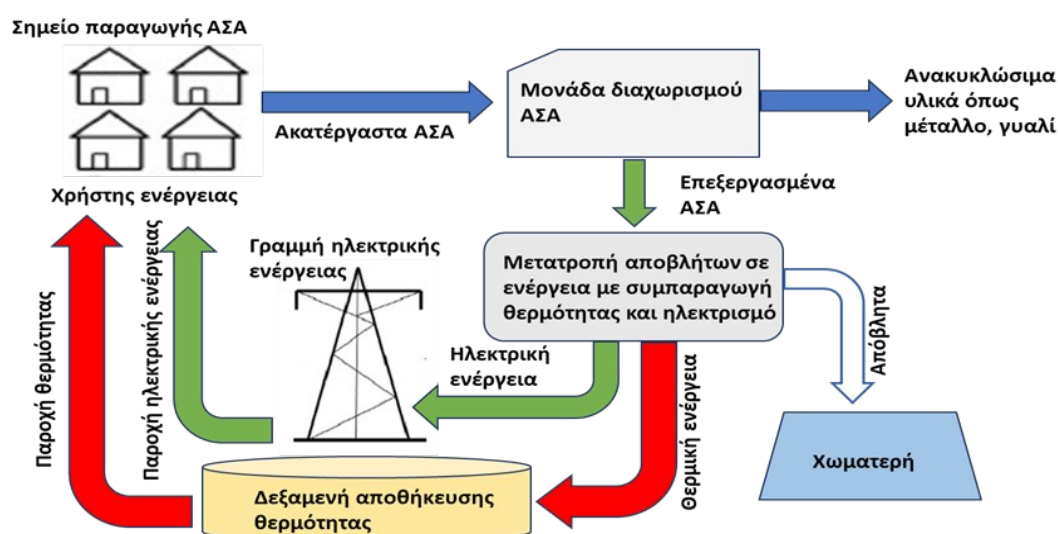
Περιβαλλοντικοί: επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, πολιτική βιωσιμότητας.

Κοινωνικοί: αντίληψη της κοινωνίας.

Εκπαιδευτικοί: ερευνητικά κέντρα, έργα συνεργασίας.

Τεχνολογικές εξελίξεις: υποδομές, καινοτομία.

Επομένως, η υιοθέτηση μονάδων μετατροπής αποβλήτων σε ενέργεια θα μπορούσε να αξιοποιήσει τη δυνατότητα μείωσης των αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκαλούνται από την παραγωγή αποβλήτων και να διασφαλίσει την παραγωγή ανανεώσιμης και βιώσιμης ενέργειας (Σχήμα 7), επιτυγχάνοντας παράλληλα τους στόχους της κυκλικής οικονομίας. Επιπλέον, η χρήση των προσεγγίσεων ΑΚΖ στην αξιολόγηση τέτοιων εγκαταστάσεων είναι υψίστης σημασίας, προκειμένου να αποδειχθεί ότι όταν η μετατροπή αποβλήτων σε ενέργεια εφαρμόζεται για την επεξεργασία υπολειμμάτων μετά την ανακύκλωση και προεπεξεργασμένων αποβλήτων από μανάδες διαχωρισμού, θα συμβάλλει σημαντικά στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος.



Σχήμα 7. Σύνδεση των ΑΣΑ μέσω της ΑΠ.Ε. με την ενέργεια. (επεξεργασμένο από: Μυρωνάκη Ιωάννη, πηγή: Alao et al., 2022).

Στο παραπάνω Σχήμα 6, απεικονίζεται η δημιουργία μιας νέας πρόσθετης μονάδας, η οποία θα συμβάλλει στην εμπορία των απόβλητων ως πορεία για τη βιώσιμη ανάπτυξη. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας τόσο στην ίδια την μονάδα όσο και στη συλλογή και μεταφορά των ΑΣΑ σε μονάδες διαχωρισμού/ προεπεξεργασίας πριν τη νεοσύστατη μονάδα εμπορίας των αποβλήτων. Επιπλέον, η παραγωγή ενέργειας θα συμβάλλει στην τόνωση της οικονομικής ανάπτυξης, δημιουργώντας πρόσθετες θέσεις εργασίας και διασφαλίζοντας ένα καθαρότερο περιβάλλον (Alao et al., 2022).

Οι μονάδες αυτές υπόκεινται σε αυστηρότερη νομοθεσία και διαθέτουν συστήματα επεξεργασίας καυσαερίων υψηλής απόδοσης. Επίσης, επιτυγχάνεται καλύτερο ποσοστό ανακύκλωσης, όπως για παράδειγμα για μία τέτοια μονάδα στη Βραζιλία, στην οποία έχουν ανακτηθεί 23 κιλά ανακυκλώσιμων μετάλλων από κάθε τόνο αποβλήτων. Επιπλέον, μπορούν να εγκατασταθούν κοντά σε αστικά κέντρα, μειώνοντας σημαντικά το κόστος συλλογής και μεταφοράς των αποβλήτων και να διανέμεται πιο εύκολα η ενέργεια που παράγεται στις μονάδες αυτές. Τέλος, σε μία τέτοια μονάδα η ανάκτηση ενέργειας από 10.000 τόνους αποβλήτων μπορεί να δημιουργήσει έως και 40 νέες θέσεις εργασίας, από την άλλη πλευρά για την ίδια ποσότητα σε χώρους υγειονομικής ταφής δημιουργεί περίπου μόνο 10 θέσεις (Tisi et al., 2023).

Σύμφωνα με τους Prajapati et al. (2021) ο χαρακτηρισμός των αποβλήτων κατηγοριοποιείται σε τρεις φάσεις: χημική, φυσική και βιολογική. Ο φυσικός χαρακτηρισμός περιλαμβάνει το μέγεθος των σωματιδίων, την περιεκτικότητα σε υγρασία και την πυκνότητα των αποβλήτων. Η υγρασία αυξάνει το βάρος και το κόστος συλλογής και μεταφοράς τους. Επίσης, ο τεμαχισμός μειώνει το μέγεθος των σωματιδίων. Η μείωση της υγρασίας συνδυαστικά με τον τεμαχισμό επιτυγχάνει συρρίκνωση των σωματιδίων αυξάνοντας την επιφάνεια που είναι διαθέσιμη στους μικροοργανισμούς για αποικοδόμηση και ενισχύοντας παράλληλα την παραγωγή του βιοαερίου. Ο χημικός χαρακτηρισμός των αποβλήτων αποσκοπεί να καθορίσει τις ιδιότητες, όπως το ποσοστό (%) σε άνθρακα, άζωτο, κάλιο και φώσφορο, το οργανικό κλάσμα, την αναλογία N/C και τη θερμαντική αξία.

Βέβαια για την επιτυχία αυτού του εγχειρήματος, πρώτο μέλημα είναι να επιτευχθεί η μέγιστη αξιοποίηση του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ μέσω του ορθού διαχωρισμού στην πηγή. Η ύπαρξη δύο ρευμάτων συλλογής απορριμμάτων συντελεί αποτελεσματικά στο διαχωρισμό του σύμμεικτου κλάσματος από το καθαρό οργανικό απόβλητο (οργανικό υλικό δημοτικών χώρων, τροφικά υπολείμματα κλπ). Επίσης, προτού οδηγηθεί το οργανικό κλάσμα σε μονάδες επεξεργασίας σύγχρονων τεχνολογιών είτε βιοχημικές είτε θερμοχημικές είναι απαραίτητες διεργασίες προκατεργασίας, ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση στην παραγωγή ενέργειας. Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για τη μετατροπή των ΑΣΑ σε ενέργεια αποτελεί η θερμαντική αξία (ενεργειακό περιεχόμενο) των συστατικών των αποβλήτων. Η κλίμακα της θερμαντικής αξίας έχει δυο τιμές: την υψηλότερη (HHV) και τη χαμηλότερη (LHV). Η LHV αποτελεί τη χαμηλότερη (καθαρή) ενεργειακή περιεκτικότητα σε ένα ρεύμα αποβλήτων, η οποία προσδιορίζει το δυναμικό παραγωγής ενέργειας, όταν χρησιμοποιείται σε ένα αποτεφρωτήρα ΑΣΑ:

$$LHV = HHV - (9 \times \%H \times \Delta H_v)$$

Όπου:

HHV: η μέγιστη (ακαθάριστη) ενεργειακή περιεκτικότητα σε ένα καύσιμο (ρεύμα αποβλήτων)

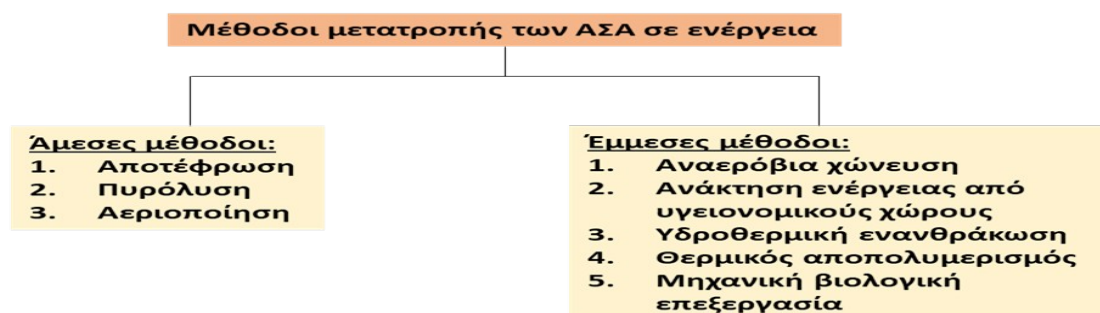
ΔΗν: η θερμότητα εξάτμισης του νερού, η οποία κυμαίνεται περίπου 2,420 MJ/kg

%H: το ποσοστό μάζας του υδρογόνου που υπάρχει σε κάθε οργανική ένωση (Komilis et al., 2014).

Τέλος, η μετατροπή των αποβλήτων σε ενέργεια εναρμονίζεται πλήρως με τους στόχους βιώσιμης ανάπτυξης (ΣΒΑ) των Ηνωμένων Εθνών, πιο συγκεκριμένα με τους ΣΒΑ 7 και 11. Αυτή η στροφή μέσω της κυκλικής οικονομίας θα αποφέρει οφέλη τόσο στην προώθηση της οικονομίας μέσω της τόνωσης της καινοτομίας και της αύξησης της ανταγωνιστικότητας όσο και στη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας. Για το 2030 στην ΕΕ αναμένεται να δημιουργηθούν 700.000 θέσεις εργασίας. Συνεπώς, η χρήση νέων σύγχρονων ενεργειακών συστημάτων και τεχνολογιών αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την επίτευξη βιώσιμης ανάπτυξης με γνώμονα τη κυκλική οικονομία. Οι καθαρότερες τεχνολογίες στη παραγωγή ενέργειας δύναται να βελτιώσουν την ποιότητα της καθημερινότητας στη ζωή των ανθρώπων μειώνοντας σημαντικά την υδάτινη και ατμοσφαιρική ρύπανση. Επίσης, θα δημιουργήσουν ανανεώσιμους πόρους για τις τοπικές κοινωνίες μειώνοντας δραστικά την ενεργειακή εξάρτηση.

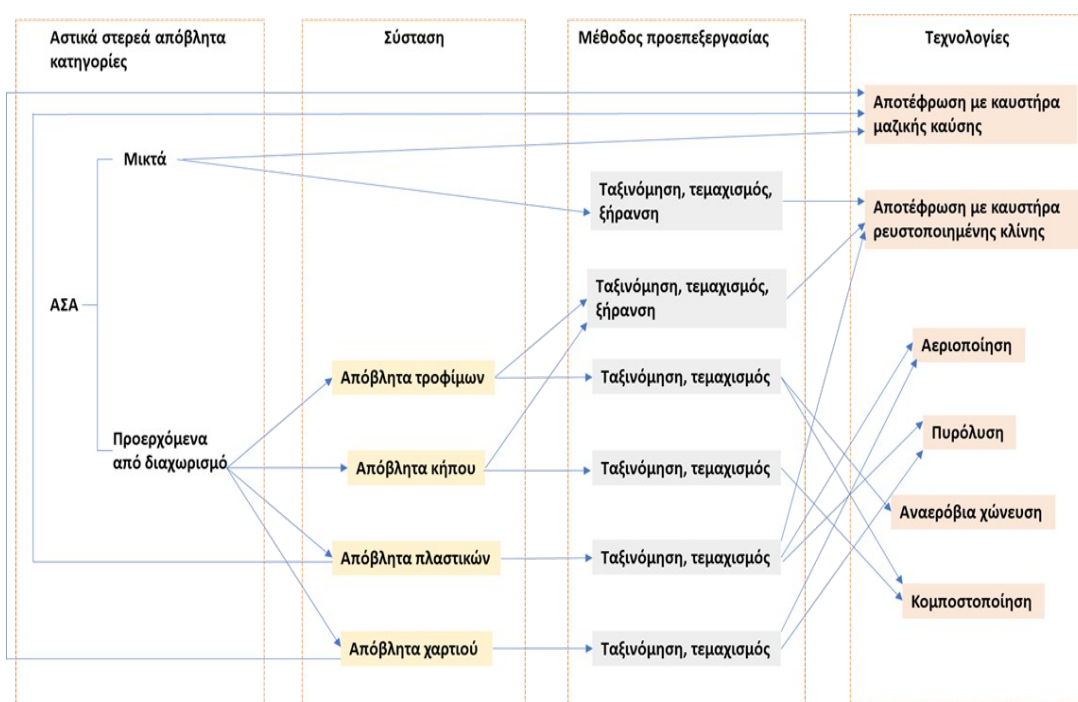
3.3. Τεχνολογίες Ενεργειακής Μετατροπής ΑΣΑ

Για την ανάπτυξη και την οικονομική ευμάρεια κάθε χώρας κρίσιμη προϋπόθεση αποτελεί η πρόσβαση στην ηλεκτρική ενέργεια, εάν όχι η πλήρης αυτάρκεια, καθώς θεωρείται ένας από τους 17 στόχους βιώσιμης ανάπτυξης του ΟΗΕ. Όμως, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας ευθύνεται για την εκπομπή των δυο τρίτων του διοξειδίου του άνθρακα σε παγκόσμια κλίμακα. Επομένως, η ισορροπία μεταξύ των εκπομπών GHGs και παραγωγής ενέργειας αποτελεί μονόδρομο. Αυτό δύναται να επιτευχθεί με ένα αναλυτικό πολιτικό σχεδιασμό που θα περιλαμβάνει τη λεπτομερή αξιολόγηση των πηγών εκπομπής των GHGs, προωθώντας κυρίως πηγές παραγωγής ενέργειας, οι οποίες δύναται να διασφαλίσουν ανταγωνιστικό κόστος, ασφάλεια στον ενεργειακό εφοδιασμό και περιβαλλοντικά οφέλη (Khan, 2018). Καθώς, πλέον, αποτελεί γεγονός ότι η αύξηση της παραγωγής ΑΣΑ σε παγκόσμιο επίπεδο είναι συνεχής, η σωστή διαχείριση στα απόβλητα με χρήση σύγχρονων τεχνολογιών μετατροπής σε ενέργεια των ΑΣΑ θα παράσχει σημαντική μείωση στην εξάρτηση σε ορυκτά καύσιμα, ενώ παράλληλα θα δίνεται έμφαση στην κυκλική οικονομία ώστε να ανακτηθεί το ενεργειακό φορτίο των αποβλήτων περιορίζοντας σημαντικά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.



Σχήμα 8. Τεχνολογίες μετατροπής των ΑΣΑ σε ενέργεια (από: Μυρωνάκη Ιωάννη, πηγή: Kumar et al, 2025).

Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η σωστή διαχείριση των αποβλήτων περιλαμβάνει την ιεράρχηση στη διαχείριση, η οποία θα αποσκοπεί στη μείωση της παραγωγής αποβλήτων μέσω της ανάκτησης και επαναχρησιμοποίησης, της ανακύκλωσης, της κομποστοποίησης και της ανάκτησης ενέργειας με βιολογική ή θερμική μέθοδο προτού καταλήξουν σε υγειονομικούς χώρους ταφής. Για να επιτευχθεί σημαντικά η μείωση του όγκου των παραγόμενων αστικών αποβλήτων και παράλληλα η ζήτηση σε ενέργεια είναι ανάγκη να αξιοποιηθούν οι σύγχρονες τεχνολογικές μέθοδοι μετατροπής των ΑΣΑ σε ενέργεια (Σχήμα 8). Οι τεχνολογίες αυτές, λοιπόν, παρέχουν παράλληλη λύση στην αύξηση της ζήτησης σε ενέργεια και της παραγωγής ΑΣΑ και δύναται να προωθήσουν τη βιώσιμη ανάπτυξη. Παρέχουν, επίσης, μία εναλλακτική λύση στο τωρινό πρόβλημα παραγωγής των ΑΣΑ ανάλογα με τη σύσταση και την περιεκτικότητα σε υγρασία. Η σύσταση των ΑΣΑ, είτε υποστούν επεξεργασία είτε όχι, καθορίζει ποια διαδικασία θα χρησιμοποιηθεί για την ανάκτηση ενέργειας είτε θερμοχημική είτε βιοχημική. Συνεπώς, τα απόβλητα θα αποτελέσουν την πρώτη ύλη για τις μονάδες μετατροπής των αποβλήτων σε ενέργεια, παρέχοντας τη μέγιστη απόδοση (Σχήμα 9).



Σχήμα 9. Αξιολόγηση των στερεών αστικών αποβλήτων ως πρώτη ύλη για τις τεχνολογίες μετατροπής τους σε ενέργεια (επεξεργασία από: Μυρωνάκη Ιωάννη, πηγή: Alao et al., 2022).

Στο Σχήμα 9, παρουσιάζεται η αντιστοιχία μεταξύ της πρώτης ύλης και της τεχνολογίας επεξεργασίας των αποβλήτων, καθώς και η μέθοδος προεπεξεργασίας τους. Η αποτέφρωση με χρήση καυστήρα σχάρας είναι η πλέον κατάλληλη για τα μικτά απόβλητα, αντίθετα η πυρόλυση, η αναερόβια χώνευση και η αεριοποίηση είναι πιο κατάλληλες για ομοιογενή απόβλητα αφού πρώτα απομακρυνθούν τα ανακυκλώσιμα, μη εύφλεκτα και αδρανή υλικά από τη ροή των αποβλήτων. Επίσης, τα προεπεξεργασμένα ΑΣΑ είναι πιο κατάλληλα και πιο αποδοτικά για καυστήρα ρευστοποιημένης κλίνης (Alao et al., 2022). Επιπλέον, οι τεχνολογίες προεπεξεργασίας των ΑΣΑ για τη βελτίωση της ποιότητας του βιοαερίου κατά την

διεργασία της αναερόβιας χώνευσης διακρίνονται σε βιολογικές, φυσικές και χημικές (Πίνακας 5).

Πίνακας 5. Τεχνολογίες προεπεξεργασίας και τα χαρακτηριστικά τους (Prajapati et al., 2021).

	Μέθοδος προ-επεξεργασίας	Σημαντική παράμετρος	Σημαντικά χαρακτηριστικά	Αναφορές
Φυσικές	Μηχανική	Πυκνότητα ισχύος και χρόνος	Σύντομος χρόνος επεξεργασίας Αυξάνει τα διαλυτά συστατικά Υψηλής τεχνολογίας και συμπαγές σύστημα	Coarita Fernandez et al. (2020)
	Θερμική	Θερμοκρασία και χρόνος	Μειώνει τη λιγνοκυτταρίνη και τα παθογόνα Αυξάνει τον ρυθμό της αναερόβιας χώνευσης λόγω της προσβασιμότητας των ενζύμων	Scherzinger and Kaltschmitt (2021)
	Υπερηχητική	Πυκνότητα ισχύος και χρόνος	Αυξάνει τον ρυθμό επεξεργασίας Μειώνει τα παθογόνα Αυξάνει τα διαλυτά συστατικά	Atelge et al. (2020)
	Μικροκύματα	Πυκνότητα ισχύος και χρόνος	Μειώνει τα παθογόνα Σύντομος χρόνος θέρμανσης	Feng et al. (2019)
Βιολογικές	Αναερόβια	Ρυθμός φόρτωσης και θερμοκρασία	Χαμηλή ενεργειακή ζήτηση Παράγει H ₂	Choi et al. (2018)
	Αερόβια	Αέρας και χρόνος	Χαμηλή ενεργειακή ζήτηση Μειώνει το συστατικό της λιγνοκυτταρίνης	Rafieenia et al. (2017)
	Ένζυμα	Ένζυμο, θερμοκρασία, χρόνος και pH	Απαιτεί χαμηλή ενέργεια	Bahreini et al. (2020)
	Μύκητες	Καλλιέργεια, αναλογία μάζας, θερμοκρασία και pH	Απαιτεί χαμηλή ενέργεια Δεν απαιτούνται χημικά	Montoya-Rosales et al. (2020)
Χημικές	Ιοντικά υγρά	Αναλογία μάζας, pH και χρόνος	Μειώνει την κρυσταλλική δομή Βελτιώνει την επιφάνεια	Amin et al. (2017)
	Οξονισμός	Πυκνότητα όζοντος και χρόνος	Μειώνει τους παθογόνους παράγοντες Χωρίς προσθήκη χημικών ουσιών	Zhang et al. (2019)
	Αλκαλικό και όξινο	Χημεία και χρόνος	Χαμηλό κόστος Βελτιώνει τη φάση υδρόλυσης Μειώνει τη λιγνίνη και την ημικυτταρίνη	Carlini et al. (2018)

4. ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ

Επί του παρόντος ως οι πιο εμπορικές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας θεωρούνται η ηλιακή, η αιολική και η υδροηλεκτρική ενέργεια. Βέβαια τόσο η αιολική όσο και η ηλιακή εξαρτώνται από τις καιρικές συνθήκες και τη διάρκεια της ημέρας αντίστοιχα. Η αναδιάρθρωση στους ενεργειακούς τομείς είναι σε παγκόσμια κλίμακα αναγνωρισμένη και ζωτικής σημασίας για τη βιωσιμότητα και τη μακροπρόθεσμη ενεργειακή ασφάλεια. Το κόστος παραγωγής αποτελεί την κρίσιμη παράμετρο για την επιλογή της εκάστοτε τεχνολογίας για την παραγωγή ενέργειας. Στον Πίνακα 6, γίνεται μία σύγκριση επένδυσης κεφαλαίου ανάμεσα σε συμβατικές τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας και τεχνολογίες ανάκτησης ενέργειας από απόβλητα (Roy et al., 2022).

Πίνακας 6. Σύγκριση επένδυσης κεφαλαίου μεταξύ συμβατικών τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας και τεχνολογιών WTE.

	Τύπος Τεχνολογίας Παραγωγής Ενέργειας	Εκτιμώμενη Επένδυση Κεφαλαίου, \$/kW
Συμβατικές τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας	Συνδυασμένος σταθμός παραγωγής με πετρέλαιο / αέριο	950 - 1000
	Χερσαία αιολικά πάρκα	1850
	Θαλάσσια αιολικά πάρκα	5500
	Ηλιακή θερμική ενέργεια	7100
	Φωτοβολταϊκά	1200 – 1600
	Συμβατική υδροηλεκτρική ενέργεια	2800
	Γεωθερμική ενέργεια	2800
	Προηγμένος πυρηνικός σταθμός	6400 – 6800
	Αεριοστρόβιλος με φυσικό αέριο	700 – 1200
	Κυψέλη καυσίμου	7000
	Συμπαγωγή με κάρβουνο	1700
	Ολοκληρωμένος αεριοποιητής με συνδυασμένο κύκλο και κάρβουνο (IGCC)	1570
	IGCC με δέσμευση άνθρακα	2200
Τεχνολογίες ανάκτησης ενέργειας από απόβλητα	Βιομάζα	4100
	Αέριο χωματελής (LFGR)	1600
	Αναερόβια χώνευση (AD)	3700 – 7000
	Αποτέφρωση (INC)	7000 – 10000
	Πυρόλυση (PYR)	8000 - 11500
	Αεριοποίηση (GAS)	7500 – 11000
	Αεριοποίηση με πλάσμα	8000 – 11500

Βέβαια, η ορθή διαχείριση των ΑΣΑ με ενσωμάτωση έργων ΕΑΑ θα μπορέσει να μειώσει σημαντικά τις εκπομπές GHGs που προέρχονται από τα απορριπτόμενα αστικά απόβλητα σε χώρους υγειονομικής ταφής. Ήδη σε 52 χώρες 350 ολοκληρωμένα έργα Waste-to-Energy (WTE) σε όλο τον κόσμο κατάφεραν να μειώσουν τις εκπομπές GHGs κατά 51,3 εκατομμύρια μετρικούς τόνους CO₂. Στον

Πίνακα 7, παρουσιάζονται οι μονάδες WTE που παράγουν λιγότερα αέρια του θερμοκηπίου σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μονάδες που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα.

Πίνακας 7. Σύγκριση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από ΑΣΑ και άλλα ορυκτά καύσιμα (Roy et al., 2022).

Εκπομπές (kg/MWh)	ΑΣΑ	Φυσικό Αέριο	Πετρέλαιο	Άνθρακας
CO ₂	380	515	758.5	1020
SO ₂	0.36	0.04	5.44	16
NO _x	2.45	0.80	1.80	2.8

Είναι προφανές ότι το μέσο κόστος κεφαλαιουχικής επένδυσης είναι υψηλότερο σε έργα WTE σε σύγκριση με άλλες ανανεώσιμες και μη πηγές ενέργειας, ιδιαίτερα για μη συμβατικές τεχνολογίες. Η επεξεργασία της πρώτης ύλης που περιλαμβάνει κυρίως τη μείωση της υγρασίας και την αφαίρεση υλικών με χαμηλή θερμογόνο δύναμη, αυξάνει το κόστος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η υγειονομική ταφή, η αναερόβια χώνευση και η κομποστοποίηση να είναι πιο φιλικές οικονομικά και να περιορίζουν σημαντικά τον οικονομικό ρίσκο (Πίνακας 8).

Πίνακας 8. Σύγκριση του κόστους λειτουργίας και συντήρησης για τεχνολογίες WTE.

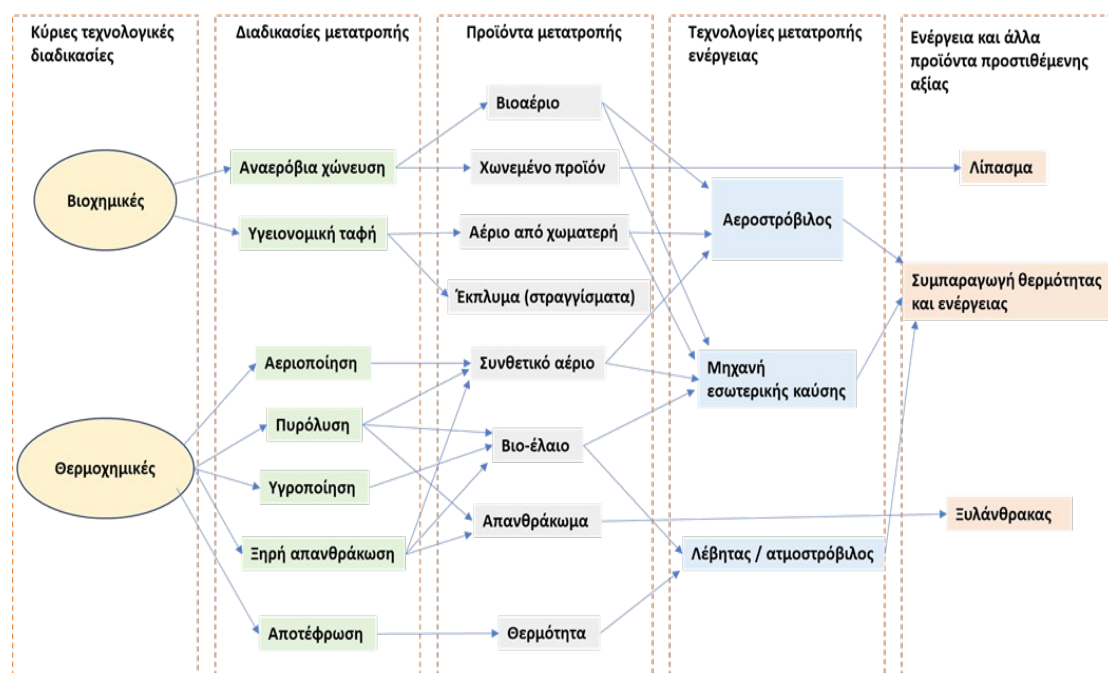
Τύπος τεχνολογίας για παραγωγή ενέργειας		Κόστος λειτουργίας και συντήρησης (USD/ton of MSW)
Συμβατικές Τεχνολογίες	Αποτέφρωση	60 - 90
	Αναερόβια Χώνευση	22 - 55
	Υγειονομική Ταφή	30 - 80
	Κομποστοποίηση	20 - 60
Μη Συμβατικές Τεχνολογίες	Πυρόλυση	100
	Αεριοποίηση	40
	Αεριοποίηση Πλάσματος	300

Το κόστος εργασίας, η κοινωνικοοικονομική κατάσταση, το κόστος συντήρησης του εξοπλισμού ελέγχου ρύπανσης (π.χ. σακκόφιλτρα, πλυντρίδα αερίων, ηλεκτροστατικός κατακρημνιστής) για τη συμμόρφωση με τις εθνικές περιβαλλοντικές πολιτικές, η φορολογία, η υψηλή στοχευμένη απόδοση, η ασφάλιση και το εξειδικευμένο προσωπικό αποτελούν παραμέτρους που επηρεάζουν το λειτουργικό κόστος και κόστος συντήρησης σε έργα WTE (Πίνακας 9).

Πίνακας 9. Σύγκριση του κόστους λειτουργίας και συντήρησης για συμβατικές τεχνολογίες WTE μεταξύ διαφορετικών χωρών.

	Αποτέφρωση (USD/ton)	Αναερόβια Χώνευση (USD/ton)	Κομποστοποίηση (USD/ton)	Υγειονομική Ταφή (USD/ ton)
Χώρες υψηλού εισοδήματος	125	110	63	73
Χώρες ανώτερου μεσαίου εισοδήματος	102	75	45	45
Χώρες κατώτερου μεσαίου εισοδήματος	70	50	25	27
Χώρες χαμηλού εισοδήματος	-	-	20	22

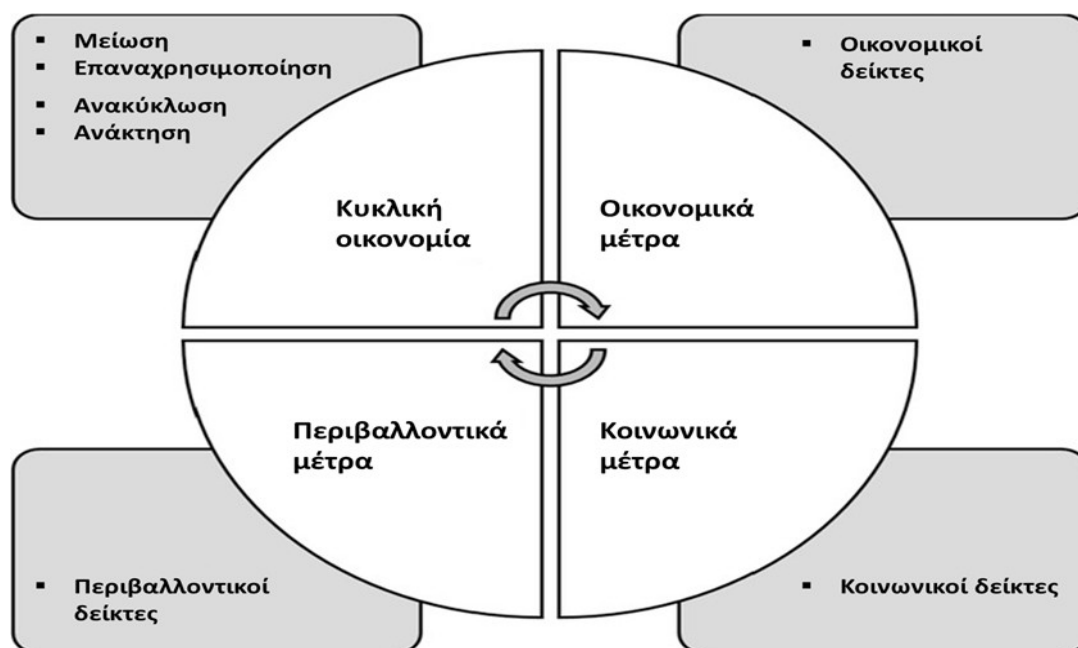
Παρόλο που το κόστος επένδυσης είναι αρκετά υψηλό, τα οφέλη είναι αρκετά όσον αφορά τη μείωση των εκπομπών GHGs. Επίσης, είναι ανάγκη να αμβλύνουμε τα παγκόσμια περιβαλλοντικά προβλήματα που δημιουργούνται από την παραγωγή αποβλήτων και να ικανοποιήσουμε τις ενεργειακές απαιτήσεις της σύγχρονης κοινωνίας με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που βρίσκονται στο προσκήνιο ως βιώσιμες εναλλακτικές λύσεις έναντι των παραδοσιακών με χρήση ορυκτών καυσίμων (Σχήμα 10).



Σχήμα 10. Διαθέσιμες μέθοδοι / τεχνολογίες μετατροπής αποβλήτων σε ενέργεια και τα προϊόντα τους (επεξεργασμένο από: Μυρωνάκη Ι., πηγές: Alao et al., 2022; Wang & Wu, 2023).

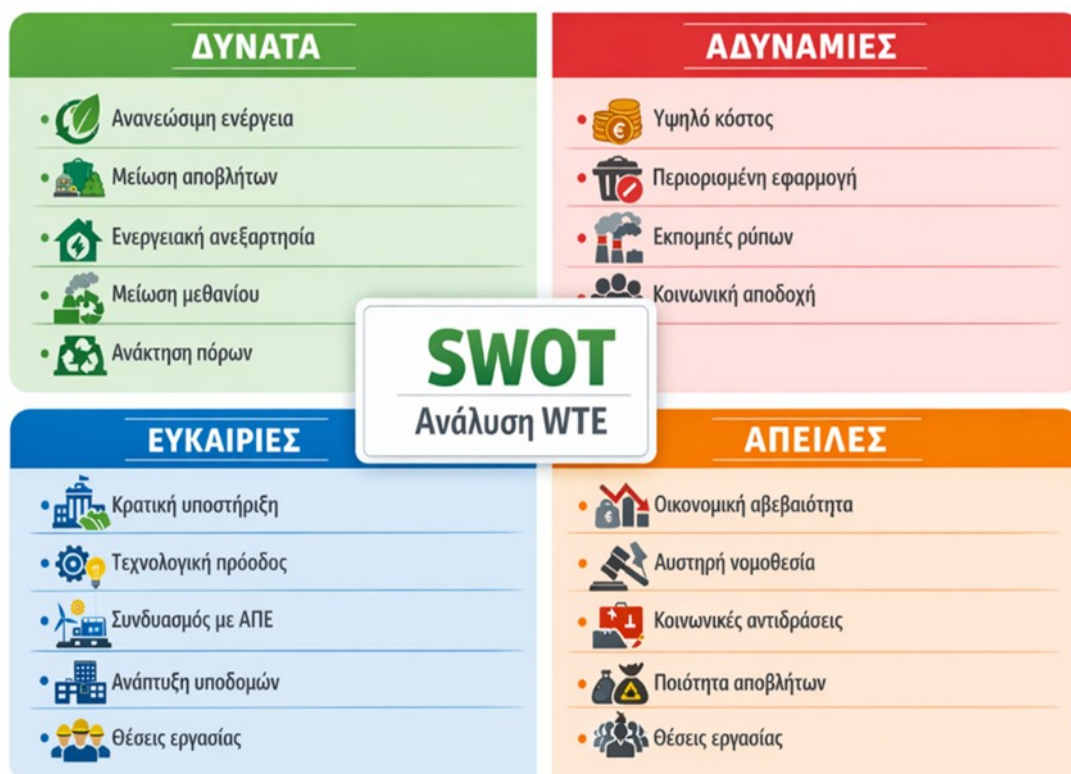
Για την τροφοδοσία του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, οι εναλλακτικές διεργασίες που μπορούν να λειτουργούν 24/7, παρουσιάζουν μια εγγενή έλξη. Η

βιομάζα θεωρείται παγκοσμίως ένα είδος ενέργειας μηδενικού άνθρακα λόγω του κύκλου του άνθρακα στη βλάστηση και έχει γίνει η τέταρτη μεγαλύτερη πηγή ενέργειας μετά τον άνθρακα, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Η βιοενέργεια παρουσιάζει σημαντικό δυναμικό για τη μείωση των εκπομπών GHGs. Επιπλέον, ο συνδυασμός της τεχνολογίας δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα με τη βιοενέργεια μπορεί να δημιουργήσει αρνητικές εκπομπές άνθρακα, οι οποίες θα μπορούσαν να αποτελέσουν μια ουσιαστική διαδικασία για την περιβαλλοντική αποκατάσταση. Επομένως, η αξιολόγηση των τεχνολογιών με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από απόβλητα ως προς τη βιωσιμότητά τους υπόκειται σε τέσσερα κριτήρια, με πρώτο κριτήριο να είναι η κυκλική οικονομία και πλέον να αποτελεί επιτακτική ανάγκη να συνυπολογίζονται και τα περιβαλλοντικά, κοινωνικά και οικονομικά κριτήρια (Σχήμα 11α).



Σχήμα 11α. Τα κριτήρια αξιολόγησης της βιωσιμότητας των τεχνολογιών επεξεργασίας των αποβλήτων (επεξεργασμένο από: Μυρωνάκη Ι., πηγή: Khan & Kabir, 2020).

Οι σύγχρονες τεχνολογίες μετατροπής των αποβλήτων σε ενέργεια συμβάλλουν καθοριστικά στην κυκλική οικονομία, καθώς ανακτούν την ενέργεια από ΑΣΑ και κυρίως επεξεργάζονται απόβλητα που θα οδηγούνταν σε χωματερές. Είναι σημαντικό να αξιολογήσουμε τους οικονομικούς, περιβαλλοντικούς και κοινωνικούς δείκτες για μία πιο ολοκληρωμένη και βιώσιμη διαχείριση των ΑΣΑ. Βέβαια είναι κατανοητό ότι κάθε τεχνολογία διαφοροποιείται από τις άλλες ως προς τα πλεονεκτήματα και τις προκλήσεις ως καθαροί και βιώσιμοι βιοπόροι ανάλογα με το τοπικό πλαίσιο στην περιοχή που εφαρμόζεται. Όμως στο σύνολό τους όλες οι τεχνολογίες για την επεξεργασία των ΑΣΑ παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα. Η ανάλυση SWOT (Σχήμα 11β) αναδεικνύει τα δυνατά σημεία, τις αδυναμίες, τις ευκαιρίες που δύναται να εκμεταλλευτούν και από ποιες απειλές κινδυνεύουν (Abid et al., 2024).



Σχήμα 11β. Ανάλυση SWOT τεχνολογιών WtE.

Δυνατά σημεία:

1. Παράγουν ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές, οι τεχνολογίες ανάκτησης ενέργειας από απόβλητα επεξεργάζονται τα αστικά στερεά απόβλητα, όπως τα οργανικά απόβλητα, ελαχιστοποιώντας την εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα.
2. Μειώνουν σημαντικά τη διάθεση των ΑΣΑ σε χώρους υγειονομικής ταφής.
3. Παρέχουν ενεργειακή αυτονομία στις τοπικές κοινότητες.
4. Μειώνουν τις εκπομπές σε αέρια του θερμοκηπίου, καθώς μετατρέπουν τα οργανικά απόβλητα σε ενέργεια.
5. Ανακτούν χρήσιμους πόρους από τις ροές των αποβλήτων, όπως μέταλλα, πλαστικά, και παράγουν οργανικά λιπάσματα συμβάλλοντας ουσιαστικά στη κυκλική οικονομία.

Αδυναμίες:

1. Σημαντικές επενδύσεις κεφαλαίου σε υποδομές, εξοπλισμούς και σε λειτουργικό κόστος, αποτελώντας εμπόδιο σε αρκετούς φορείς να επενδύσουν.
2. Περιορισμός στη καταλληλότητα των αποβλήτων, καθώς δε δύναται όλοι οι τύποι των αποβλήτων να μετατραπούν σε ενέργεια και απαιτούν διαλογή ή πρόσθετη προεπεξεργασία.
3. Ανησυχία λόγω των εκπομπών, ιδιαίτερα για την αποτέφρωση, οι οποίες εάν δεν ελεγχθούν ή δε διαχειριστούν ορθά θα προκαλέσουν ατμοσφαιρική ρύπανση συμβάλλοντας αρνητικά στην κλιματική αλλαγή.
4. Κοινωνικές αντιδράσεις λόγω των εκπομπών με πιθανές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και ειδικότερα με την αποτέφρωση ως μη βιώσιμη λύση.

Ευκαιρίες:

1. Παροχή κινήτρων από τις κυβερνήσεις και ρυθμιστικούς φορείς, καθώς και επιδοτήσεις και ευνοϊκές πολιτικές για την προώθηση και εφαρμογή τεχνολογιών μετατροπής των αποβλήτων σε ενέργεια.

2. Τεχνολογικές βελτιώσεις και συνεχής έρευνα δύναται να συμβάλλουν στην ανάπτυξη των τεχνολογιών μετατροπής των αποβλήτων σε ενέργεια καθιστώντας τις οικονομικά βιώσιμες, πιο αποδοτικές και φιλικές στο περιβάλλον.
3. Ενσωμάτωση και δημιουργία υβριδικών συστημάτων παραγωγής ενέργειας, οι τεχνολογίες μετατροπής αποβλήτων σε ενέργεια δύναται να ενσωματωθούν με άλλες πηγές ενέργειας, κυρίως με ανανεώσιμες, όπως η αιολική ή η ηλιακή.
4. Η ένταξη των σύγχρονων τεχνολογιών ανάκτησης ενέργειας από απόβλητα σε ολοκληρωμένα συστήματα διαχείρισης των αποβλήτων με σκοπό τη βελτιστοποίηση των πόρων και ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.
5. Τα ολοκληρωμένα συστήματα διαχείρισης των αποβλήτων παρέχουν ευκαιρίες απασχόλησης για τη συλλογή και την ανακύκλωση, συμβάλλοντας στην ανάπτυξη των τοπικών κοινωνιών.

Απειλές:

1. Οικονομική βιωσιμότητα των σύγχρονων τεχνολογιών ανάκτησης ενέργειας από τα απόβλητα μπορεί να επηρεαστεί από πολλούς παράγοντες, όπως ο ανταγωνισμός από άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, το κόστος διάθεσης των αποβλήτων και οι τιμές ενέργειας.
2. Διάφορες ρυθμιστικές παρεμβάσεις για συμμόρφωση σε νέα πρότυπα εκπομπών και σε αυστηρότερους κανονισμούς για την προστασία του περιβάλλοντος θα αυξήσουν το κόστος και την πολυπλοκότητα της λειτουργίας των μονάδων ανάκτησης ενέργειας από απόβλητα.
3. Οι κοινωνικές αντιδράσεις δύναται να καθυστερήσουν ακόμη και να ακυρώσουν τη δημιουργία μονάδων ανάκτησης ενέργειας από απόβλητα.
4. Η ποιότητα και η διαθεσιμότητα των αποβλήτων ως πρώτη ύλη δύναται να επηρεάσουν την απόδοση των τεχνολογιών μετατροπής σε ενέργεια των αποβλήτων είτε με υψηλά επίπεδα σε ρύπος είτε με ασυνεπείς ροές αποβλήτων.

4.1. Παγκόσμια κατάσταση της παραγωγής ενέργειας από απόβλητα

Το 2011 σε σχεδόν 40 χώρες λειτουργούσαν 800 μονάδες θερμικής επεξεργασίας αποβλήτων και παρήγαγαν 429 TWh. Περισσότερες από 1.700 μονάδες αποτέφρωσης λειτουργούν παγκοσμίως με το 80% από αυτές να βρίσκονται στις Ηνωμένες Πολιτείες, την Ιαπωνία, τη Γερμανία και τη Γαλλία. Η δημιουργία νέων μονάδων ΕΑΑ διαρκώς αυξάνεται ανά την υφήλιο. Η εφαρμογή της αναερόβιας χώνευσης για την παραγωγή ενέργειας από απόβλητα διαφοροποιείται σημαντικά από μικρής κλίμακας χωνευτήρες σε αναπτυσσόμενες χώρες, όπως στην Ινδία και την Αφρική, έως μεγάλης κλίμακας σε αναπτυγμένες χώρες κυρίως στις Ηνωμένες Πολιτείες και στην Ευρώπη. Το 2000 η παραγωγή ενέργειας από βιοαέριο σε παγκόσμιο επίπεδο εκτιμήθηκε στα 0,28 εκατομμύρια TJ, ενώ το 2014 έφτασε τα 1,3 εκατομμύρια TJ, με μέση αύξηση ανά έτος στο 13,2%, συμβάλλοντας σημαντικά στην παγκόσμια παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Το 2005 υπήρχαν περίπου 955 μονάδες ανάκτησης και συλλογής αερίου για την παραγωγή ενέργειας από χώρους υγειονομικής ταφής, με τις περισσότερες από αυτές να εντοπίζονται στις Ηνωμένες Πολιτείες. Για την επιλογή όμως της κατάλληλης τεχνολογίας για τη διαχείριση των αποβλήτων σε μία συγκεκριμένη περιοχή είναι ανάγκη να ληφθούν υπόψη διάφοροι παράγοντες, οι οποίοι είναι οικονομικοί, τεχνικοί, κοινωνικοί και περιβαλλοντικοί. Επίσης, πρέπει να συνυπολογιστούν κάποια πιο εξειδικευμένα κριτήρια για την επίτευξη ολοκληρωμένων λύσεων στην επιλογή των τεχνολογιών επεξεργασίας των αποβλήτων για την παραγωγή ενέργειας (Πίνακας 10).

Πίνακας 10. Σύγκριση διαφόρων τεχνολογιών μετατροπής ενέργειας από απόβλητα (Alao et al., 2022).

Παράμετροι	Τεχνολογίες				
	Αναερόβια Χώνευση	Ανάκτηση Αερίων από χώρους Υγειονομικής	Αποτέφρωση	Αεριοποίηση	Πυρόλυση
Τεχνικοί					
Τύπος αποβλήτων	Οργανικό κλάσμα	Μικτά απόβλητα	Μικτά απόβλητα	Ομογενή απόβλητα	Ομογενή απόβλητα
Τεχνολογική ωριμότητα	Πολύ υψηλή	Πολύ υψηλή	Εξαιρετικά υψηλή	Αναδυόμενη	Αναδυόμενη
Μείωση όγκου αποβλήτων	45 – 50%	Χαμηλή	75 – 90%	75 – 90%	50 – 90%
Τεχνολογική πολυπλοκότητα	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Υψηλή	Υψηλή
Αποδοτικότητα συστήματος	50 – 70%	10%	50 – 60%	70 – 80%	70%
Χρόνος παραμονής	15 -30 ημέρες	Χρόνια	2΄΄	10 -20΄΄	΄΄ – Εβδομάδες
Απαιτούμενες εργασιακές δεξιότητες	Χαμηλές	Χαμηλές	Χαμηλές	Υψηλές	Υψηλές
Απαίτηση γης	Μεγάλη	Πολύ μεγάλη	Μικρή	Μικρή	Μικρή
Προεπεξεργασία	Απαιτείται	Δεν απαιτείται	Δεν απαιτείται	Απαιτείται	Απαιτείται
Μελλοντικές δυνατότητες	Υψηλές	Υψηλές	Μέτριες	Υψηλές	Υψηλές
Οικονομικοί					
Κόστος κεφαλαίου	Μέτριο – Υψηλό	Χαμηλό	Μέτριο - Υψηλό	Υψηλό	Υψηλό
Κόστος λειτουργίας και συντήρησης	Μέτριο - Υψηλό	Χαμηλό	Μέτριο - Υψηλό	Υψηλό	Υψηλό
Κόστος προεπεξεργασίας	Μέσο	Καθόλου	Καθόλου	Υψηλό	Υψηλό
Κοινωνικοί και Περιβαλλοντικοί					
Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου	Ελάχιστες	Υψηλές	Εξαιρετικά Υψηλές	Χαμηλές	Χαμηλές
Εκπομπές σε διοξίνες και φουράνια	Εξαιρετικά Χαμηλές	Εξαιρετικά Χαμηλές	Πολύ Υψηλές	Πολύ Χαμηλές	Πολύ Χαμηλές
Κοινωνική αντιπολίτευση	Πολύ Μικρή	Μικρή	Εξαιρετικά Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή

Παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει σημαντική υπεροχή κάποιας τεχνολογίας έναντι των άλλων με βάση τις τεχνικές, οικονομικές, κοινωνικές και περιβαλλοντικές παραμέτρους. Είναι απαραίτητο λοιπόν να εκτιμήσουμε το κόστος κεφαλαίου και το κόστος λειτουργίας και συντήρησης, καθώς αποτελούν σημαντικούς παράγοντες για την επιλογή οποιασδήποτε τεχνολογίας επεξεργασίας των αποβλήτων. Παρακάτω στους Πίνακες 11 και 12 απεικονίζονται από τους Alao et al. (2022) η ανάλυση κόστους κεφαλαίου και λειτουργίας / συντήρησης για μία αναπτυγμένη χώρα το Ηνωμένο Βασίλειο και μία αναπτυσσόμενη χώρα την Ινδία.

Πίνακας 11. Ανάλυση κόστους τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας από απόβλητα για μια αναπτυγμένη χώρα (Ηνωμένο Βασίλειο).

Τεχνολογίες	Κόστος κεφαλαίου (δολάρια ΗΠΑ/τόνο)	Κόστος λειτουργίας (δολάρια ΗΠΑ/τόνο/έτος)
Αποτέφρωση	620 - 700	62 - 70
Πυρόλυση	620 - 850	75 - 102
Αεριοποίηση	620 - 850	74 - 102
Αναερόβια Χώνευση	310 - 400	19 - 28
Υγειονομική ταφή με ανάκτηση αερίου	155 - 200	11 - 14

Πίνακας 12. Ανάλυση κόστους τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας από απόβλητα για μία αναπτυσσόμενη χώρα (Ινδία).

Τεχνολογίες	Κόστος κεφαλαίου (δολάρια ΗΠΑ/τόνο)	Κόστος λειτουργίας (δολάρια ΗΠΑ/τόνο/έτος)
Αποτέφρωση	155 - 250	85
Πυρόλυση	170 - 300	65 - 112
Αεριοποίηση	170 - 300	65 - 112
Αναερόβια Χώνευση	50	2 -30
Υγειονομική ταφή με ανάκτηση αερίου	10	0,2 - 0,3

Το αρχικό κόστος κεφαλαίου είναι αρκετά υψηλό ανεξάρτητα από την περιοχή, ενώ διαφοροποιείται ανάλογα με τη τεχνολογία. Είναι γεγονός ότι το κόστος κεφαλαίου στις αναπτυγμένες περιοχές είναι ιδιαίτερα αυξημένο έναντι των αναπτυσσόμενων, λόγω του υψηλού κόστους εργασίας, των αυστηρότερων προτύπων ελέγχου των εκπομπών και του περιορισμού σε εκτάσεις γης. Μία μονάδα επεξεργασίας αποβλήτων για την παραγωγή ενέργειας έχει διάρκεια ζωής από 20 έως 40 έτη. Έτσι, η διάρκεια ζωής μιας μονάδας, τα κίνητρα από την πολιτεία, το εξειδικευμένο προσωπικό και η διαθεσιμότητα φθηνής πρώτης ύλης επηρεάζουν το κόστος λειτουργίας και συντήρησης. Η υγειονομική ταφή με ανάκτηση αερίου παρουσιάζει το μικρότερο κόστος κεφαλαίου και λειτουργίας, αλλά έχει σημαντικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον, καθώς υποβαθμίζει την περιοχή που υφίσταται και προκαλεί ρύπανση των υπόγειων υδάτων.

Θετικός είναι ο αντίκτυπος για τις μονάδες παραγωγής ενέργειας από απόβλητα όσον αφορά τις εκπομπές σε αέρια του θερμοκηπίου. Σε μία θερμική μονάδα παραγωγής ενέργειας με καύση αποβλήτων για ένα τόνο ΑΣΑ μπορεί να αποφευχθεί ισοδύναμο 1.010 kg CO₂ από το να οδηγηθεί σε χώρο υγειονομικής ταφής χωρίς ανάκτηση αερίου, εφόσον εξαιρεθούν οι βιογενείς εκπομπές άνθρακα. Οι εκπομπές από μία μονάδα με τεχνολογία αεριοποίησης είναι περίπου 0,114 kg CO₂ / kWh και είναι χαμηλότερες από μία μονάδα αποτέφρωσης αποβλήτων 0,22 kg CO₂ / kWh, ενώ οι εκπομπές που αφορούν το σύστημα ανάκτησης αερίου σε χώρο υγειονομικής ταφής ανέρχονται μεταξύ 1 -1,2 kg CO₂ / kWh και είναι υψηλότερες από τις εκπομπές που παράγονται σε μία μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιεί τη τεχνολογία της αναερόβιας χώνευσης 0,2 kg CO₂ / kWh. Συνεπώς, οι χώροι υγειονομικής ταφής, ακόμη και με σύστημα ανάκτησης αερίου, παραμένουν ως η τελευταία επιλογή (Alao et al., 2022).

4.2. Παγκόσμια περιβαλλοντικά οφέλη της παραγωγής ενέργειας από απόβλητα

Απόβλητα που δεν ανακτώνται και απορρίπτονται σε χώρους υγειονομικής ταφής κατά την αποσύνθεσή τους παράγουν διοξείδιο του άνθρακα και μεθάνιο, αυξάνοντας την εκπομπή GHGs στην ατμόσφαιρα, παρόλο που αυτοί οι χώροι παρέχουν δίκτυα για τη συλλογή τους. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της ενεργειακής αξιοποίησης αποβλήτων σε σχέση με την υγειονομική ταφή είναι η μείωση των εκπομπών CH₄ που παράγονται κατά την αποσύνθεση των αποβλήτων. Στις Ηνωμένες Πολιτείες εκτιμάται ότι οι μέσες εκπομπές CH₄ ανέρχονται σε 0,05t CH₄ ανά τόνο αποβλήτων που οδηγείται σε ταφή. Δεδομένου ότι το CH₄ έχει δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη 84–86 φορές μεγαλύτερο από εκείνο του CO₂ σε χρονικό ορίζοντα 20 ετών (IPCC, 2007), αυτό αντιστοιχεί σε δυνητικές εκπομπές έως και 4,3t CO₂-ισοδυνάμου ανά τόνο αποβλήτων. Σύμφωνα με τα ισχύοντα αποθέματα εκπομπών GHG, οι χώροι υγειονομικής ταφής αποτελούν την τρίτη μεγαλύτερη πηγή ανθρωπογενών εκπομπών CH₄ παγκοσμίως. Οι εκπομπές CO₂ από την καύση 1 τόνου ΑΣΑ σε μονάδες ΕΑΑ είναι σημαντικά χαμηλότερες, δεδομένου ότι μόνο το 28% του άνθρακα που καίγεται μετατρέπεται σε CO₂ και δεν παράγεται CH₄. Επιπλέον, η περαιτέρω μείωση των εκπομπών CO₂ στον κλάδο της WTE ενισχύεται από πρόσφατες εξελίξεις που επιτρέπουν την εφαρμογή τεχνολογιών δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα (Carbon Capture and Storage, CCS) (Bourtsalas, 2023). Επίσης, η καύση ενός μετρικού τόνου ΑΣΑ παράγει 600 kWh ηλεκτρική ενέργεια συμβάλλοντας στη μείωση εμπορίας κατά ένα βαρέλι πετρελαίου ή στη μη εξόρυξη ¼ τόνου υψηλής θερμαντικής αξίας αμερικανικού άνθρακα. Κατά την παραγωγή ενέργειας για ένα τόνο αποβλήτων μειώνονται σημαντικά τόσο οι εκπομπές σε CH₄ όσο και σε CO₂. Όσον αφορά το CO₂ η μείωση εκτιμάται σε 1 t CO₂-ισοδυνάμου ανά τόνο αποβλήτων σε σχέση με την απόρριψη σε χώρο υγειονομικής ταφής. Ο Πίνακας 13, παρουσιάζει τη μείωση που έχει επιτευχθεί στην δεκαετία 1990 – 2000 στις ΗΠΑ στις εκπομπές (εκτός CH₄ και CO₂) από τις μονάδες μετατροπής των αποβλήτων σε ενέργεια. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στη σημαντική μείωση των εκπομπών σε διοξίνες και φουράνια σε ποσοστό 99,7%. Με τη καύση των απορριμμάτων, κυρίως φύλλα, φυτά και γρασίδι που προέρχονται από αυλές σπιτιών, να αγγίζει τα 660 g σε διοξίνες ανά χρόνο (Awasthi et al., 2019).

Πίνακας 13. Εκπομπές από εγκαταστάσεις ανάκτησης ενέργειας από απόβλητα στις ΗΠΑ (Awasthi et al., 2019).

Ρύπος	Ετήσιες εκπομπές 1990	Ετήσιες εκπομπές 2000	Μείωση (%)
Διοξίνες / φουράνια, g TEQ	4260	12	99,7
Υδράργυρος	41,1 τόνοι	2,0 τόνοι	95,1
Διοξείδιο του θείου	27.909 τόνοι	3.705 τόνοι	86,7
Κάδμιο	4,32 τόνοι	0,3 τόνοι	93,0
TEQ, τοξικό ισοδύναμο			

Επιπροσθέτως, η απαίτηση σε έκταση γης για μία μονάδα ανάκτησης ενέργειας από απόβλητα είναι συγκριτικά πολύ μικρότερη από τη γη που απαιτείται για ένα χώρο υγειονομικής ταφής παρόμοιας ποσότητας σε ΑΣΑ, κατά συνέπεια απαιτείται μικρότερο κόστος κεφαλαίου επένδυσης σε γη. Επιπλέον, η διάρκεια λειτουργίας μιας μονάδας ανάκτησης ενέργειας από απόβλητα μπορεί να ξεπεράσει τα 30 έτη με καλή συντήρηση, χωρίς να χρειάζεται επιπλέον έκταση σε γη, εκτός εάν ανακατασκευαστεί για να επεξεργάζεται μεγαλύτερη ποσότητα σε ΑΣΑ. Επίσης, μπορεί να κατασκευαστεί νέα μονάδα στο χώρο της ήδη υπάρχουσας μονάδας μηδενίζοντας το κόστος επένδυσης σε γη. Αντίθετα οι χώροι υγειονομικής ταφής δε δύναται να ανακυκλωθούν και απαιτούνται νέοι χώροι πρασίνου να μετατραπούν σε χώρους υγειονομικής ταφής. Για 1 εκατομμύριο τόνους ΑΣΑ που επεξεργάζονται σε μια μονάδα ανάκτησης ενέργειας από απόβλητα σε ετήσια βάση η έκταση σε γη δεν υπερβαίνει τα 100.000 m² με τα συμπληρωματικά κτήρια, ενώ στην Ελλάδα η έκταση σε γη που απαιτείται για χώρους υγειονομικής ταφής αγγίζει τα 30 εκατομμύρια m² για το σύνολο των αποβλήτων που παράγονται σε 8 έτη και δύναται να μειωθεί σε 3 εκατομμύρια m² γης για τη δημιουργία μονάδων ΕΑΑ. Συνεπώς, η κυκλική οικονομία ως μορφή διαχείρισης των ΑΣΑ θα συμβάλλει ουσιαστικά στη συνύπαρξη ανάμεσα σε μία ευημερούσα οικονομία και ένα υγιές περιβάλλον, δηλαδή στην παραγωγή ενέργειας με παράλληλη μείωση των εκπομπών GHGs. Ωστόσο, η μετατροπή ενέργειας από απόβλητα στο ιεραρχικό οικοδόμημα της διαχείρισης των αποβλήτων κατατάσσεται πριν την τελική διάθεση (Awasthi et al., 2019).

5. ΔΕΔΟΜΕΝΑ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1. Ανάκτηση ενέργειας από χώρους υγειονομικής ταφής

Το αέριο που ανακτάται σε χώρους υγειονομικής ταφής αποτελεί ανανεώσιμη και αξιόπιστη λύση έναντι των ορυκτών καυσίμων. Το CH₄ δημιουργείται από τα ΑΣΑ για την παραγωγή του αερίου. Η σύσταση του αερίου αυτού είναι κατά 55% με CH₄, με θερμογόνο δύναμη 17MJ/m³ και πυκνότητα 0,667 kg/m³ στους 30°C. Παρακάτω στον Πίνακα 14, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της θερμογόνου δύναμης του CH₄ (Noor et al., 2013).

Πίνακας 14. Ενεργειακό δυναμικό εκπομπών σε μεθάνιο από χώρους υγειονομικής ταφής στην Μαλαισία (Noor et al., 2013).

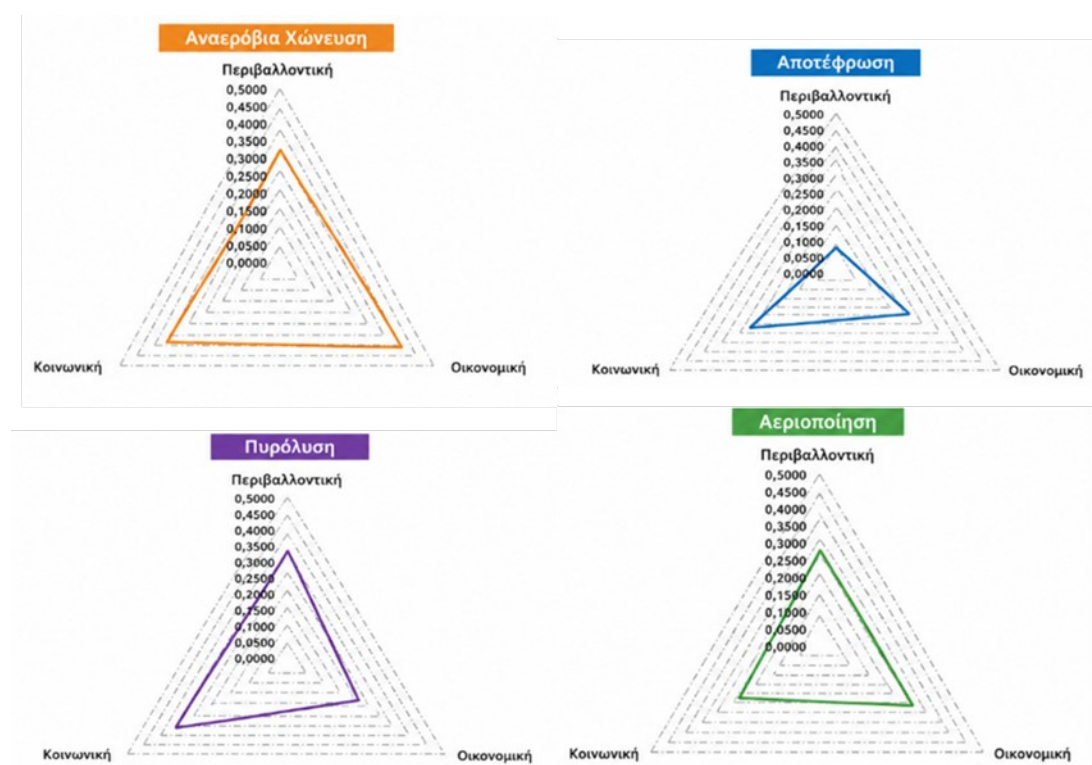
Έτος	Εκπεμπόμενο CH ₄ (ton)	(MtCO ₂ eq) ^a Ισοδύναμο CO ₂	^b Έσοδα από πιστώσεις	Όγκος CH ₄ (×10 ⁶ m ³)	Θερμογόνος αξία ^c (MJ)	^d Ισοδύναμη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας	Έσοδα από ηλεκτρική ενέργεια (×10 ⁶ \$) ^e
1997	211.967	4.45	58.74	317.79	5.40	1.50	149.85
1998	227.104	4.77	62.96	340.49	5.79	1.60	160.07
1999	231.079	4.85	64.02	356.44	5.89	1.53	163.45
2000	241.071	5.06	66.79	361.43	6.14	1.70	170.34
2005	263.820	5.54	73.23	395.53	6.72	1.86	186.48
2006	277.824	5.83	76.96	416.53	7.08	1.97	196.47
2007	289.747	6.08	80.26	434.40	7.38	2.05	204.80
2010	310.225	6.51	85.93	465.10	7.91	2.20	219.50
2015	344.858	7.24	95.57	517.03	8.78	2.44	243.65
2020	371.696	7.81	103.09	557.27	9.47	2.63	262.79
a Με βάση το Δυναμικό Υπερθέρμανσης του Πλανήτη (GWP) ίσο με 21 για το μεθάνιο.							
b Με κόστος 23,20 \$/ton CO ₂ .							
c Θερμογόνος δύναμη 17 MJ/m ³ μεθανίου.							
d 1MJ = 0,2775 kWh.							
e Με 0,1 \$/ kWh							

Το αέριο που παράγεται χρησιμοποιείται κυρίως για την παροχή ενέργειας, παρέχοντας μεγαλύτερη διάρκεια ζωής στους χώρους υγειονομικής ταφής, αμβλύνοντας τις κοινωνικές αντιδράσεις και παράλληλα εξασφαλίζοντας περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη. Πέρα από τα οικονομικά οφέλη λόγω της

παραγωγής ενέργειας με αυξητική τάση σε χρονικό ορίζοντα περί τα 20 έτη, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 14, είναι δυνατή και η αξιοποίηση του CO₂, καθώς υπάρχει σε σημαντική ποσότητα στα αέριο αυτό και με κατάλληλες διαδικασίες φιλτραρίσματος μπορεί να ανακτηθεί και να διατεθεί σε επιχειρήσεις που το χρησιμοποιούν. Επίσης, τα έργα αξιοποίησης του αερίου θα δημιουργήσουν νέες θέσεις εργασίας. Όσον αφορά τις εκπομπές στο περιβάλλον θα μειωθούν δραστικά με την αξιοποίηση του αερίου, μειώνοντας παράλληλα την αιθαλομίχλη, τις οσμές και τις εκπομπές GHGs, και ταυτόχρονα εξασφαλίζοντας ενεργειακή ασφάλεια στη τοπική κοινότητα. Ακόμη, η χρήση του αερίου μειώνει τις επιπτώσεις των ορυκτών καυσίμων στη στιβάδα του όζοντος, την πανίδα και τη χλωρίδα, καθώς επίσης και τη μετακίνηση του στο υπέδαφος από διαρροές. Τέλος, οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από το αέριο που παράγεται σε χώρους υγειονομικής ταφής είναι μικρής κλίμακας και δεν χρησιμοποιούν το νερό ως μέσο ψύξης μειώνοντας τις απορρίψεις ρύπων σε επιφανειακά ύδατα (Noor et al., 2013).

5.2. Μελέτη περίπτωσης αναπτυσσόμενης χώρας

Οι Khan & Kabir (2020) παρουσίασαν μία μελέτη για την αξιολόγηση της βιωσιμότητας τεσσάρων σύγχρονων τεχνολογιών ανάκτησης ενέργειας από απόβλητα στο Μπαγκλαντές (Σχήμα 12). Το πλαίσιο αξιολόγησης βιωσιμότητας περιλάμβανε 34 δείκτες συνολικά, από τους οποίους 12 οικονομικούς, 13 περιβαλλοντικούς και 9 κοινωνικούς.



Σχήμα 12. Σύγκριση τεχνολογιών WtE(Khan & Kabir, 2020).

Σύμφωνα με τα δεδομένα η αεριοποίηση, η πυρόλυση και η αναερόβια χώνευση αποδείχθηκαν κατά 33%, 65% και 111% αντίστοιχα, πιο βιώσιμες τεχνολογίες έναντι της αποτέφρωσης. Η αναερόβια χώνευση αναδείχθηκε ως η πιο βιώσιμη και η

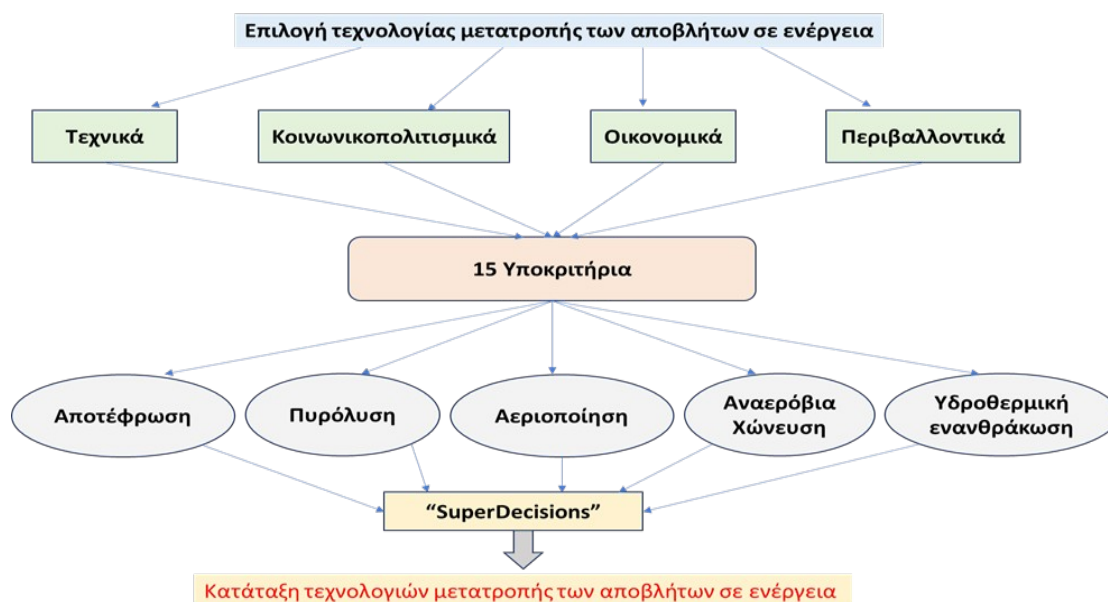
αποτέφρωση η λιγότερο βιώσιμη τεχνολογία επεξεργασίας των αποβλήτων με ανάκτηση ενέργειας. Η υπεροχή της αναερόβιας χώνευσης έναντι των άλλων τεχνολογιών προκύπτει από διάφορους λόγους, πρώτον διότι η πλειοψηφία των αποβλήτων στις αναπτυσσόμενες χώρες αποτελείται από οργανικά υλικά, δεύτερον η ευελιξία της αναερόβιας χώνευσης, δηλαδή ότι ανάλογα με τις ανάγκες δύναται να εφαρμοστεί σε μικρής έως μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις και τρίτον ότι το βιοαέριο που παράγεται έχει μεγαλύτερη θερμαντική αξία (23MJ/Nm^3) έναντι του αερίου σύνθεσης που παράγεται από την πυρόλυση ($10\text{-}20\text{MJ/Nm}^3$) και την αεριοποίηση ($4\text{-}10\text{MJ/Nm}^3$). Από οικονομικής άποψης η υπεροχή της αναερόβιας χώνευσης έγκειται τόσο στο χαμηλότερο κόστος κεφαλαίου και λειτουργικό κόστος, όσο και ότι η ανάκτηση του αερίου είναι λιγότερο δαπανηρή. Από κοινωνικής άποψης η αποτέφρωση απαιτεί περισσότερη γη από άλλες τεχνολογίες και εκπέμπει τοξικούς ρύπους εκθέτοντας σε κίνδυνο τη δημόσια υγεία. Από την άλλη πλευρά οι τεχνολογίες της αεριοποίησης και πυρόλυσης ενώ είναι πιο αποδεκτές από το κοινωνικό σύνολο έναντι της αποτέφρωσης, παραμένουν πιο δαπανηρές από την αναερόβια χώνευση. Επιπλέον, από περιβαλλοντικής άποψης η αποτέφρωση εκπέμπει περισσότερα αέρια (SO_x , NO_x , CO_x) συγκριτικά με τις άλλες τεχνολογίες. Επίσης ευθύνεται για την αέρια ρύπανση διότι απελευθερώνει αέρια σωματίδια PM_{10} και προκαλεί ρύπανση των υδάτων και του εδάφους, λόγω των βαρέων μετάλλων, που υπάρχουν στην ιπτάμενη τέφρα και τη τέφρα πυθμένα, όπως κάδμιο, υδράργυρο και θάλλιο. Τέλος, η όχληση στις κατοικημένες περιοχές θεωρείται αμελητέα λόγω του σχεδιασμού της μονάδας που χρησιμοποιεί τεχνολογία αναερόβιας χώνευσης σε αντίθεση με την αποτέφρωση που είναι σχετικά υψηλότερη. Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας η τεχνολογία της αναερόβιας χώνευσης εκπέμπει σχεδόν το ήμισυ σε CO_2 ανά MWh έναντι των άλλων τριών τεχνολογιών (Khan & Kabir, 2020).

Η σωστή εφαρμογή αυτού του είδους βιώσιμου έργου παραγωγής ενέργειας από απόβλητα σε τέτοιες χώρες απαιτεί μια εθνική ενεργειακή πολιτική, η οποία πρέπει να λαμβάνει υπόψη τα εξής:

- Η κυβέρνηση θα πρέπει να παρέχει υποστήριξη σε οργανισμούς και ιδρύματα που επιθυμούν να υλοποιήσουν βιώσιμα έργα παραγωγής ενέργειας μέσω αναερόβιας χώνευσης.
- Θα πρέπει να παρέχονται κρατικές επιδοτήσεις για μονάδες παραγωγής ενέργειας από απόβλητα που βασίζονται στην αναερόβια χώνευση, αντί για όλες τις τεχνολογίες WtE γενικά.
- Στα αρχικά στάδια, η τοπική αυτοδιοίκηση πρέπει να διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στην προβολή των οφελών των βιώσιμων μονάδων παραγωγής ενέργειας από απόβλητα, ιδιαίτερα εκείνων που χρησιμοποιούν αναερόβια χώνευση.
- Οι κυβερνήσεις θα πρέπει να ενθαρρύνουν την εγκατάσταση μονάδων σε τοπικό επίπεδο για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΣΑ που βασίζονται στην αναερόβια χώνευση. Αυτό θα διασφαλίσει χαμηλό κόστος στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θα δημιουργηθούν νέες θέσεις εργασίας.
- Θα πρέπει να ενθαρρύνονται κοινές επενδύσεις σε έργα WtE βασισμένα στην αναερόβια χώνευση με ξένες εταιρείες. Αυτό θα επιτρέψει στους τοπικούς φορείς να αποκτήσουν γνώση των πιο σύγχρονων τεχνολογιών που σχετίζονται με την παραγωγή ενέργειας από απόβλητα.
- Πρέπει να θεσπιστούν κανονισμοί που να προωθούν τη βιώσιμη παραγωγή ενέργειας από απόβλητα.

5.3. Συγκριτική μελέτη πολλαπλών κριτηρίων

Η μελέτη αυτή, σύμφωνα με τους Patil et al. (2024) εφαρμόζει ένα εργαλείο Πολυκριτηριακής Ανάλυσης Αποφάσεων (MCDA) για την σύγκριση των σύγχρονων τεχνολογιών ανάκτησης ενέργειας από ΑΣΑ, δηλαδή μεταξύ της αποτέφρωσης, της πυρόλυσης, της αναερόβιας χώνευσης, της αεριοποίησης και της αναδεδυμένης τεχνολογίας υδροθερμικής ενανθράκωσης (HTC), μέσω οικονομικών, τεχνολογικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικοπολιτικών πτυχών. Το μοντέλο Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας (AHP) χρησιμοποίησε το λογισμικό «Super Decisions» με τέσσερα κύρια κριτήρια και δεκαπέντε υποκριτήρια (Σχήμα 13). Το μοντέλο AHP συνέλλεξε δεδομένα και πληροφορίες από τριάντα δυο διεθνείς μελέτες και το λογισμικό πραγματοποίησε συγκρίσεις ανά ζεύγος κριτηρίων που προσδιορίστηκαν και κατέταξε εναλλακτικές λύσεις για τις τεχνολογίες αξιοποίησης των αποβλήτων, αναγνωρίζοντας πως οι τοπικές πολιτικές, οι κανονισμοί και τα χαρακτηριστικά των αποβλήτων ανά περιοχή επηρεάζουν την επιλογή τις τεχνολογίας που θα χρησιμοποιηθεί.



Σχήμα 13. Μοντέλο κατάταξης τεχνολογιών μετατροπής των αποβλήτων σε ενέργεια (επεξεργασμένο από: Μυρωνάκη Ι., πηγή: Patil et al., 2024).

Οι τεχνολογίες που επεξεργάζονται μόνο οργανικά απόβλητα ως πρώτη ύλη ακολουθούν τη βιοχημική μετατροπή, ενώ τεχνολογίες θερμικής μετατροπής έχουν τη δυνατότητα να επεξεργάζονται περισσότερους τύπους αποβλήτων (Πίνακας 15). Επίσης, η μελέτη αυτή μας διαφωτίζει ως προς τη δυσκολία της τεχνικής βιωσιμότητας (Πίνακας 16α, β), της κοινωνικοπολιτισμικής προσαρμοστικότητας (Πίνακας 17), της περιβαλλοντικής αναγκαιότητας (Πίνακας 18) και της οικονομικής σκοπιμότητας (Πίνακας 19) προωθώντας τεκμηριωμένες αποφάσεις στη διαχείριση των αποβλήτων. Είναι αναγκαίο όμως να λαμβάνεται υπόψη η γεωγραφική περιφέρεια που αντλούνται τα δεδομένα, αλλά και ο τύπος των αποβλήτων.

Πίνακας 15. Σύσταση τύπων αποβλήτων για διαφορετικές τεχνολογίες μετατροπής των αποβλήτων σε ενέργεια (Patil et al., 2024).

των Εναλλακτικές λύσεις /	Αποτέφρωση	Πυρόλυση	Αεριοποίηση	Ψύξη Υδροθερμική	Αναερόβια νεύση
Τρόφιμα	N	N	N	Y	Y
Χαρτί, Χαρτόνι	Y	Y	Y	N	Y
Ξύλο	Y	Y	Y	Y	N
Μη ανακυκλώσιμο πλαστικό	Y	Y	Y	N	N
Ύφασμα	Y	N	Y	N	N
Καουτσούκ, Δέρμα	Y	N	Y	N	N
ΑΗΡ	Y	N	Y	N	N
*Y= Ευνοϊκό N= Μη ευνοϊκό					

Πίνακας 16α. Τεχνολογικά κριτήρια (Patil et al., 2024).

των Εναλλακτικές λύσεις /		Αποτέφρωση	Πυρόλυση	Αεριοποίηση	Ψύξη Υδροθερμική Ενανθράκωση	Αναερόβια Χώνευση
Πρώτη ύλη	Τύπος	Βιολογικά & συνθετικά οργανικά ξηρά απόβλητα	Ξηρά αναμεμειγμέν α ΑΣΑ χωρίς ανόργανα υλικά	Ξηρά αναμεμειγμέν α ΑΣΑ χωρίς ανόργανα υλικά	Υγρά μικτά οργανικά απόβλητα	Οργανικά απόβλητα
	Μέγιστη περιεκτικότητα σε υγρασία (%)	25 έως 40	Κάτω από 20	Κάτω από 15	-	Έως 75
	Προ επεξεργασία	Λεπτή διαλογή	Τεμαχισμός και ξήρανση	Τεμαχισμός και ξήρανση	Ψυλοκομμένο και προσθήκη νερού	Υγρός πολτοποιητής, σύστημα υγρής διαλογής και πρέσα εξώθησης

Πίνακας 16β. Τεχνολογικά κριτήρια (Patil et al., 2024).

Είδη Εναλλακτικές Λύσεις /		Αποτέφρωση	Πυρόλυση	Αεριοποίηση	Υδροθερμική Ενανθράκωση	Αναερόβια Χώνευση
Αποδοτικότητα (%)	Απόδοση ηλεκτρικής ενέργειας (*παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε εξωτερικό βήμα)	20 – 25	35 – 40*	25 – 30*	50 – 60*	35 – 45*
	Θερμότητα (H) / Βιοκαύσιμο (BF) / Αέριο (G)	65–70 (H)	50 – 55 (BF, Char)	30 – 45 (BF, Syngas)	65 – 70 (BF, Char)	-
	Συνολική απόδοση μετατροπής (CHP)	50 – 60	65 – 70	65 – 75	70 – 75	65 – 75
Ενεργειακή απόδοση	Προϊόντα	Θερμότητα	Συνθετικό αέριο, οξυγονωμένα έλαια και άνθρακας	Συνθετικό αέριο και άνθρακας	Υδρογον-άνθρακας, Οργανική ένωση και Αέρια πλούσια σε ενέργεια	Μεθάνιο και χωνεμένο υπόλειμμα
	Εφαρμογές προϊόντων	Θερμότητα και Ηλεκτρική ενέργεια	Θερμότητα, Ηλεκτρική ενέργεια, Καύσιμα κινητήρων, Συνθετικό αέριο, Βιοάνθρακας ως βελτιωτικό εδάφους	Θερμότητα, Ηλεκτρική ενέργεια, Καύσιμα μεταφορών, Άνθρακας ως «Λίπασμα» και Καταλύτης		Θερμότητα, Ηλεκτρική ενέργεια, Καύσιμα μεταφορών, Συνθετικό αέριο, Βιοκαύσιμο και Λίπασμα
Λειτουργική ευκολία	Χρόνος διαμονής	sec -min	sec - min	10 – 20 sec	1 - 12 h	15 -30 d
	Συμβατότητα με ΑΣΑ	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Χαμηλή	Χαμηλή
	Καταλληλότητα γεωγραφικής τοποθεσίας εγκαταστάσεων	Βιομηχανική Αστική	Βιομηχανική Αστική	Βιομηχανική Αστική	Αγροτική	Αγροτική
	Επίπεδο δεξιοτήτων του εργατικού δυναμικού	Μέτριο έως υψηλό	Μέτριο έως υψηλό	Υψηλό	Μέτριο	Μέτριο
Ελεγκσιμότητα	Τεχνολογική πολυπλοκότητα	Μέτρια ως υψηλή	Μέτρια	Μέτρια ως υψηλή	Μέτρια	Μέτρια
	Τεχνολογική ωριμότητα	Υψηλή	Χαμηλή	Αναδυόμενη	Αναδυόμενη	Υψηλή
	Απαιτήση γης	Μεγάλη	Μικρή	Μικρή	Μικρή	Μεγάλη

Πίνακας 17. Κοινωνικοπολιτισμικά κριτήρια(Patil et al., 2024).

Παράμετροι / Εναλλακτικές λύσεις	Δράση «όχι στην αυλή μου»	Ευκαιρίες απασχόλησης	Υγεία και ασφάλεια (κατάταξη)
Αποτέφρωση	Υψηλή	Υψηλές	4
Πυρόλυση	Μέτρια	Υψηλές	3
Αεριοποίηση	Υψηλή	Υψηλές	1
Υδροθερμική Ενανθράκωση	Μέτρια	Χαμηλές	-
Αναερόβια Χώνευση	Μέτρια	Μέτριες	2

Πίνακας 18. Περιβαλλοντικά κριτήρια (Patil et al., 2024).

Εναλλακτικές λύσεις/ παράμετροι			Αποτέφρωση	Πυρόλυση	Αεριοποίηση	Υδροθερμική	Αναερόβια Χώνευση
Μείωση σε (%) του όγκου αποβλήτων			80 – 85	45 – 55	50 – 70	40 – 50	Έως 25
Ατμοσφαιρικοί ρύποι	CO ₂ ; (kg eq CO ₂ / ton)		0.7 – 1.7		0.114 έως 0.565	0.3 έως 0.45	0.014 έως 0.2
	NO _x ; (kg eq CO ₂ / ton)		0.6 έως 0.950	0.8 έως 1.02	0.45 έως 0.60	–	–
	Syngas (CO, H ₂ , CH ₄ , etc.)		N (με εγκατάσταση καθαρισμού καυσαερίων)	Y	Y	Y	Y
	Σωματίδια (PM) (g/t)		20 – 35	-	15 – 20	-	-
Υποπροϊόντα	Τέφρα πυθμένα (Kg)		230 – 380	N	45 – 55	N	N
	Ιπτάμενη τέφρα (Kg)		30 – 45	N	55 – 60	N	N
	Έχνη μετάλλων (mg/ tonne)	Κάδμιο	70 – 80	Y	0.2 – 0.8	N	Y
		Χρώμιο	80 – 95	Y	1,2 – 2,0	N	Y
		Χαλκός	5000 – 5500	Y	300 –400	N	Y
		Μόλυβδος	1800 – 2000	Y	60 – 75	N	Y
Νικέλιο		500 – 600	Y	1.0 – 1.5	N	Y	
	Ψευδάργυρος	5000 – 6000	Y	120 - 150	N	Y	
Ρύποι νερού	Προϊόντα		Πολυχλωριωμένα διφαινύλια (PCB), πολυαρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAH)	Βενζόλιο, τολουόλιο, αιθυλοβενζόλιο (H) και ξυλόλια (BTEX), πολυκυκλικοί	Μεθανόλη, αιθανόλη, ακετόνη	Αμμωνία (NH ₃), Μεθάνιο (CH ₄)	Ενώσεις υδρογονανθράκων, φουρφουλάνη Υδροξυμεθυλοφουρφουράλη και (HMF)

* Σημείωση –

PCBs: Κοινές οργανικές ρυπαντικές ουσίες που απαντώνται στα παραπροϊόντα αποτέφρωσης ΑΣΑ.

PAHs: Μπορεί να υπάρχουν διάφοροι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες, όπως ναφθαλίνη, ανθρακένιο και βενζοαπυρένιο.

BTEX: Κοινές πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs) που ενδέχεται να παράγονται κατά την πυρόλυση.

PAHs: Παρόμοια με την αποτέφρωση, μπορεί να υπάρχουν διάφοροι PAHs. Ανάλογα με την πρώτη ύλη και τις συνθήκες αεριοποίησης, αυτές και παρόμοιες ενώσεις ενδέχεται να είναι παρούσες.

VOCs: Ανάλογα με τη διαδικασία αεριοποίησης, μπορεί να υπάρχουν διάφορες πτητικές οργανικές ουσίες. Απελευθερώνονται κατά τη διάσπαση οργανικής ύλης που περιέχει άζωτο. Η σύσταση του υδροάνθρακα (hydrochar) μπορεί να ποικίλλει σημαντικά και να περιλαμβάνει οργανικές ενώσεις που προέρχονται από την αρχική πρώτη ύλη.

Πίνακας 19. Οικονομικά κριτήρια (Patil et al., 2024).

Παράμετροι / Εναλλακτικές λύσεις	Κόστος κεφαλαίου (€/ton/year)	Κόστος λειτουργίας και συντήρησης (€/ton/year)	Κόστος προεπεξεργασίας
Αποτέφρωση	80 – 115	180	Χαμηλό
Πυρόλυση	17 – 25	2 – 3	Υψηλό
Αεριοποίηση	35 – 45	30 – 40	Υψηλό
Υδροθερμική Ενανθράκωση	9 – 15	5 – 8	Υψηλό
Αναερόβια Χώνευση	12 -19	10 – 15	Μέτριο

Τα παρουσιαζόμενα δεδομένα υπόκεινται σε μεταβλητότητα λόγω διαφόρων παραγόντων, όπως η σύσταση των αποβλήτων, οι συνθήκες λειτουργίας, οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας, η πρώτη ύλη των ΑΣΑ, συμπεριλαμβανομένων των ηλεκτρονικών αποβλήτων και των οικιακών χημικών. Τα δεδομένα που παρουσιάζονται βασίζονται στη διαθέσιμη βιβλιογραφία και σε μελέτες περίπτωσης, και ενδέχεται να υπάρχουν διαφοροποιήσεις ανάλογα με τους τοπικούς κανονισμούς και τους ειδικούς παράγοντες κάθε εγκατάστασης.

Στον Πίνακα 20, παρουσιάζονται οι συνολικές συνοπτικές προτεραιότητες ως ιδεατές, κανονικοποιημένες και ακατέργαστες, οι οποίες προέκυψαν από τη σύνθεση του ιεραρχικού δικτύου που αναπτύχθηκε στο λογισμικό Super Decisions. Οι ακατέργαστες προτεραιότητες είναι οι αρχικές προτεραιότητες που προκύπτουν άμεσα από τις συγκρίσεις κατά ζεύγη. Οι κανονικοποιημένες τιμές είναι οι τιμές του κανονικοποιημένου διανύσματος προτεραιοτήτων για τις εναλλακτικές, οι οποίες προκύπτουν προσθέτοντας όλες τις προτεραιότητες και διαιρώντας κάθε προτεραιότητα με το άθροισμα, ώστε να προκύψει το κανονικοποιημένο διάνυσμα. Οι προτεραιότητες στο κανονικοποιημένο διάνυσμα αθροίζονται σε ένα. Τα ακατέργαστα διανύσματα προτεραιοτήτων μετατρέπονται σε ιδεατά διανύσματα διαιρώντας κάθε προτεραιότητα του διανύσματος με τη μεγαλύτερη τιμή, έτσι ώστε η βέλτιστη εναλλακτική να λαμβάνει προτεραιότητα ίση με 1 και οι υπόλοιπες να λαμβάνουν το αντίστοιχο μικρότερο ποσοστό τους.

Με βάση την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη, η καταλληλότερη τεχνολογία WtE για τη διαχείριση των ΑΣΑ φαίνεται να είναι η αναερόβια χώνευση, ακολουθούμενη από την υδροθερμική ανθρακοποίηση και την αποτέφρωση. Η αναερόβια χώνευση έχει εξασφαλίσει υψηλή προτεραιότητα στους οικονομικούς, περιβαλλοντικούς και κοινωνικής αποδοχής τομείς, ακολουθούμενη από τις υδροθερμική ενανθράκωση, αποτέφρωση και πυρόλυση με διανύσματα

προτεραιότητας 0.348, 0.202, 0.163 και 0.148, αντίστοιχα, υπό την προϋπόθεση της εφαρμοσιμότητας.

Πίνακας 20. Συνολικές συνοπτικές προτεραιότητες για τις εναλλακτικές λύσεις (Patil et al., 2024).

Εναλλακτικές	Ιδεατά διανύσματα	Κανονικοποιημένα διανύσματα	Ακατέργαστα διανύσματα
Αναερόβια Χώνευση	1.000	0.348	0.190
Αεριοποίηση	0.400	0.139	0.076
Υδροθερμική Ενανθράκωση	0.580	0.202	0.110
Αποτέφρωση	0.468	0.163	0.089
Πυρόλυση	0.426	0.148	0.081

Ωστόσο, η αναερόβια χώνευση δεν κατατάσσεται στην κορυφή ως προς τις τεχνικές πτυχές, λόγω των ειδικών απαιτήσεων της σχετικά με τη σύσταση των αποβλήτων, σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες. Αντίθετα, η αποτέφρωση εξασφάλισε υψηλή προτεραιότητα στις τεχνικές πτυχές, χάρη στην καθιέρωσή της στην αγορά και τις δυνατότητες της. Η αποτέφρωση μπορεί να επεξεργαστεί την πλειονότητα των ΑΣΑ, εκτός από τα απόβλητα τροφίμων με υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία και να μειώσει το 80%–85% του κλάσματος των ΑΣΑ. Έτσι, η αποτέφρωση κατατάσσεται στην κορυφή λόγω της ευκολίας λειτουργίας της και της ευελιξίας ως προς την τροφοδοσία. Όμως, ο προσδιορισμός της αναερόβιας χώνευσης ως της καταλληλότερης τεχνολογίας υποδηλώνει μια πιθανή στροφή προς πιο φιλικές για το περιβάλλον μεθόδους επεξεργασίας αποβλήτων, υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχει η απαραίτητη υποδομή για τον διαχωρισμό των αποβλήτων. Τέλος, σε παγκόσμια κλίμακα, η μεθοδολογία και τα ευρήματα της μελέτης μπορούν να προσαρμοστούν σε διαφορετικές περιοχές, λαμβάνοντας υπόψη τις συστάσεις των αποβλήτων, τα πλαίσια πολιτικής και τις οικονομικές συνθήκες (Patil et al., 2024).

5.4. Βιβλιομετρική ανασκόπηση για τις τεχνολογίες (WtE)

Η παρούσα μελέτη από τους Chicaiza-Ortiz et al. (2024) ακολουθεί τις κατευθυντήριες γραμμές Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) για τη διεξαγωγή βιβλιομετρικής ανάλυσης των τεχνολογιών WtE για την έρευνα διαχείρισης MSW. Εξετάστηκαν άρθρα με ευρετήριο το Scopus μεταξύ 1971 και 2023. Ορίστηκαν και αναλύθηκαν τέσσερις περίοδοι με βάση τα πιο σημαντικά αποτελέσματά τους (Πίνακας 21). Επιπλέον, τα πιο σχετικά περιοδικά (Waste Management, Chemosphere και Waste Management & Research) κατατάχθηκαν στην πρώτη, δεύτερη και τρίτη θέση αντίστοιχα. Επιπλέον, οι χώρες με τις μεγαλύτερες συνεισφορές περιλαμβάνουν μία στην Αμερική (τις Ηνωμένες Πολιτείες), τρεις στην Ασία (Κίνα, Ιαπωνία και Ινδία) και πέντε στην Ευρώπη (Ισπανία, Ιταλία, Γερμανία, Σουηδία και Ηνωμένο Βασίλειο).

Οι τεχνολογίες ΕΑΑ παρουσιάζονται ως κρίσιμες διαδρομές για τη μετατροπή του παγκόσμιου προβλήματος των αποβλήτων σε ενεργειακή ευκαιρία. Ο Πίνακας 22 συνοψίζει τη σχέση μεταξύ των διαφορετικών τεχνικών WtE και των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης (SDGs), αναδεικνύοντας πως αυτές οι τεχνολογίες μπορούν να συμβάλουν στην επίτευξη σημαντικών περιβαλλοντικών, οικονομικών και κοινωνικών στόχων, που αποτελούν τους πυλώνες της βιωσιμότητας.

Πίνακας 21. Δημοσιευμένες εργασίες για την επεξεργασία των ΑΣΑ από τεχνολογίες WtE (Chicaiza-Ortiz et al., 2024).

Αρίθμηση	Περίοδος	Όγκος δημοσιεύσεων
I	1971 – 1984	58
II	1985 – 1997	403
III	1998 – 2010	1248
IV	2011 – 2023	3308
Σύνολο		5017

Πίνακας 22. Σχέση των τεχνολογιών WtE με SGD's (Chicaiza-Ortiz et al., 2024).

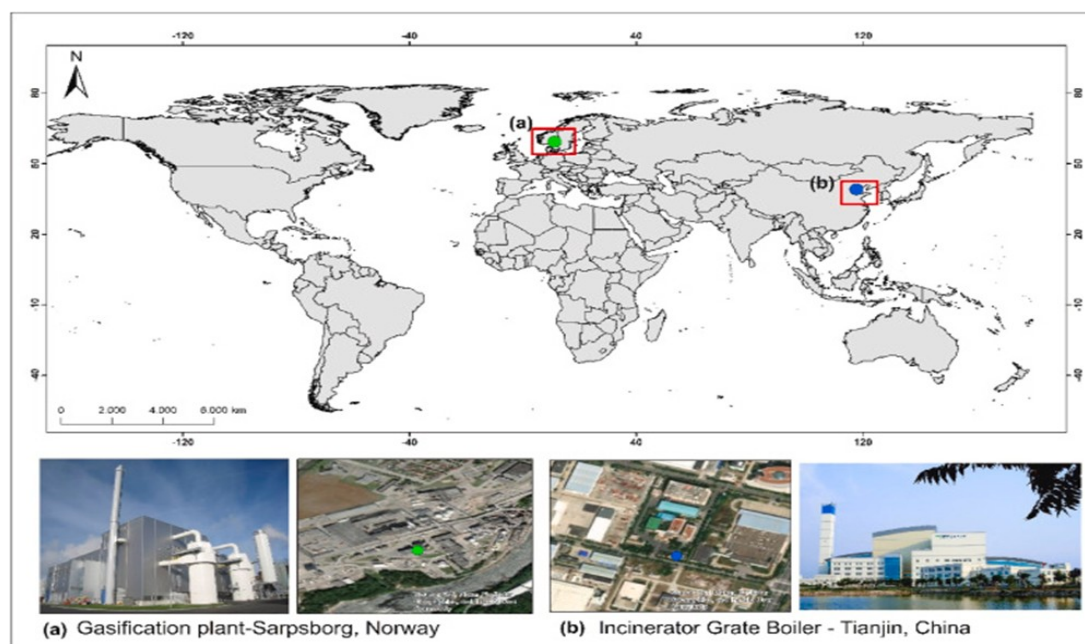
WtE Techniques	Associated Clusters	Contribution to SDGs
Incineration	1, 3, 4	 
Pyrolysis	4, 5	
Gasification	2, 4, 5	    
Plasma gasification	5	   
Hydrothermal Carbonization	4	   

Η αποτέφρωση διευκολύνει την αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΣΒΑ 7), περιορίζοντας έτσι τη συσσώρευση αποβλήτων στους χώρους υγειονομικής ταφής (ΣΒΑ 11). Αντίθετα, η πυρόλυση παράγει ενέργεια και επιτρέπει την ανάκτηση πολύτιμων χημικών προϊόντων, συμβάλλοντας στην ανάπτυξη ανθεκτικών υποδομών και στην προώθηση της καινοτομίας (ΣΒΑ 9). Παράλληλα, η αεριοποίηση έχει αποδειχθεί αποτελεσματική μέθοδος για την παραγωγή αερίου σύνθεσης (syngas), συμβάλλοντας σημαντικά στη βιομηχανική βιωσιμότητα (ΣΒΑ 12) και ενισχύοντας τις εξελίξεις στη βιώσιμη ενέργεια (ΣΒΑ 7), την αστική ανάπτυξη (ΣΒΑ 11) και τη δράση για το κλίμα (ΣΒΑ 13). Η μετάβαση στη χρήση ανανεώσιμων πηγών υδρογόνου συνάδει με την προώθηση βιώσιμων γεωργικών και βιομηχανικών πρακτικών. Ως εκ τούτου, η αεριοποίηση συνδέεται με τον στόχο της μηδενικής πείνας (ΣΒΑ 2). Επιπλέον, η αεριοποίηση και η υδροθερμική ανθρακοποίηση αποτελούν τεχνολογίες αιχμής στον τομέα της μετατροπής αποβλήτων σε ενέργεια, οι οποίες επεξεργάζονται τα απόβλητα με αποδοτικό και φιλικό προς το περιβάλλον τρόπο, συμβάλλοντας ουσιαστικά στη βιώσιμη αστική ανάπτυξη (ΣΒΑ 11), στη δράση για το κλίμα (ΣΒΑ 13) και στην καινοτομία (ΣΒΑ 9). Ειδικότερα, μέσω της παραγωγής βιοάνθρακα, η HTC μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση της υγείας του εδάφους (ΣΒΑ 15), στην ενίσχυση της ενεργειακής απόδοσης (ΣΒΑ 7) και στη

διευκόλυνση της βιώσιμης κατανάλωσης και παραγωγής (ΣΒΑ 12) (Chicaiza-Ortiz et al., 2024).

Μελέτη περίπτωσης

Οι Chicaiza-Ortiz et al. (2024) καταρχάς καθορίσανε 1 τόνο ΑΣΑ ως λειτουργική μονάδα ώστε να επεξεργαστεί με τις τεχνολογίες ανάκτησης ενέργειας από ΑΣΑ: αποτεφρωτήρας – λέβητας με σάρα στη Κίνα και μονάδα αεριοποίησης στη Νορβηγία (Σχήμα 12).



Σχήμα 14. Περιγραφή των εγκαταστάσεων α) Μονάδα αεριοποίησης - Sarpsborg, Νορβηγία και β) αποτεφρωτήρας - Λέβητας με σάρα - Tianjin, Κίνα.

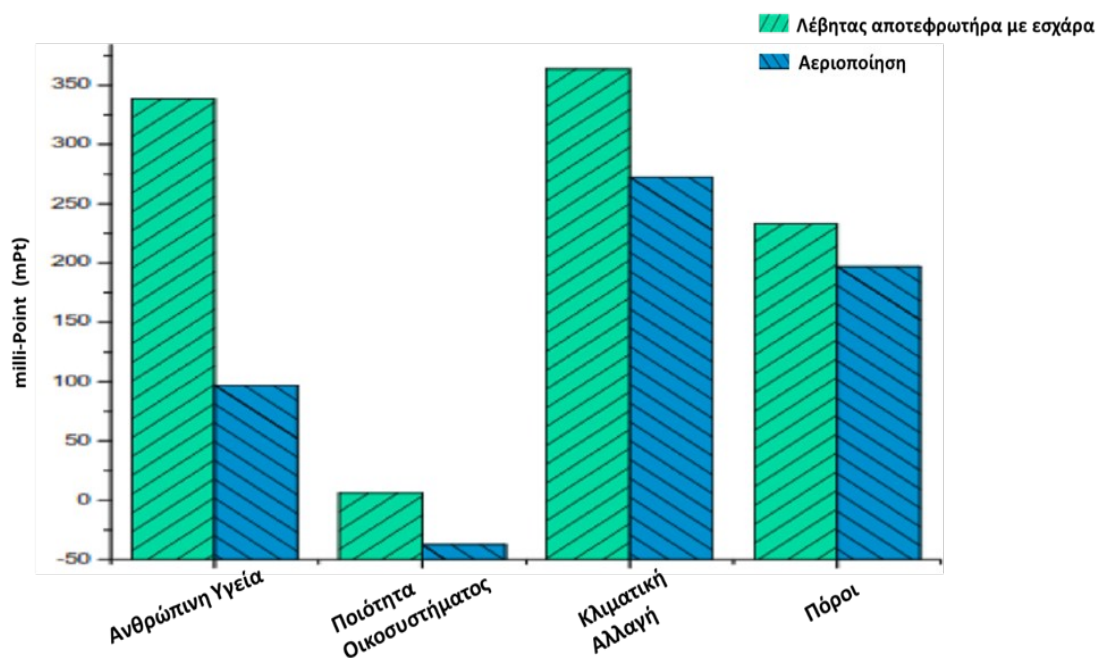
Η μονάδα στη Κίνα επεξεργάζεται σε καθημερινή βάση από 400 έως 1200 τόνους ΑΣΑ και παράγει ενέργεια 123 εκατομμύρια kWh, από τις οποίες οι 108 διοχετεύονται στο δίκτυο ενέργειας της χώρας. Τα χαρακτηριστικά των ΑΣΑ περιέχουν 46,7% υγρασία και 43,3% κ.β. άνθρακα, ενώ η χαμηλότερη θερμαντική αξία προσδιορίστηκε σε περίπου 6480 kJ/kg. Η μονάδα στη Νορβηγία εκτείνεται σε 9000 m², επεξεργάζεται 214 – 427 τόνους ΑΣΑ κάθε μέρα και αποδίδει ατμό (στα 23 bar και 217 °C) με ετήσια θερμική ισχύ 250 GWh. Τα ΑΣΑ θρυμματίζονται και αναμειγνύονται ως μέρος της διαδικασίας προεπεξεργασίας στην εγκατάσταση αεριοποίησης και εφαρμόζεται μια φάση μαγνητικού διαχωρισμού, με το 1 – 3% του μεταλλικού περιεχομένου να διαχωρίζεται και να συλλέγεται. Και οι δυο μονάδες λειτουργούν σε ετήσια βάση κατά προσέγγιση στις 8000 ώρες. Η μονάδα στη Κίνα επεξεργάζεται ΑΣΑ με μέση ετήσια θερμαντική αξία 4,19 MJ/kg και χρησιμοποιεί δύο γεννήτριες, με ισχύ 12 MW και 24 MW, ενώ η μονάδα στη Νορβηγία επεξεργάζεται ΑΣΑ με μέση ετήσια θερμαντική αξία 8–18 MJ/kg και χρησιμοποιεί μία μόνο γεννήτρια με ισχύ 32 MW. Τα συλλεχθέντα δεδομένα παρουσιάζονται στον Πίνακα 24. (Chicaiza-Ortiz et al., 2024).

Πίνακας 23. Εισροές και εκροές για την Tianjin της Κίνας και το Sarpsborg της Νορβηγίας το 2010 με βάση 1 τόνου ΑΣΑ ως λειτουργική μονάδα.(Chicaiza-Ortiz et al., 2024).

Παράμετρος	Μονάδες	Αποτέφρωση σε λέβητα σάρας (Κίνα)	Αεριοποίηση (Νορβηγία)
Διοξίνες (TEQ)	kg/ton	8.17E-13	9.43E-14
Συνολική σκόνη	kg/ton	0.00E+00	6.01E-02
Διοξείδιο του άνθρακα	kg/ton	1.09E+03	3.37E+02
Μονοξείδιο του άνθρακα	kg/ton	1.59E-01	2.73E-02
Οξειδία του αζώτου (NO _x)	kg/ton	1.68E+01	2.27E+00
Διοξείδιο του θείου (SO ₂)	kg/ton	3.51E-01	4.64E-01
Αρσενικό	kg/ton	3.40E-04	2.73E-05
Κάδμιο	kg/ton	6.58E-06	0.00E+00
Υδράργυρος	kg/ton	2.04E-04	5.46E-06
Υδροχλώριο (HCl)	kg/ton	6.52E-01	3.36E-02
Υδροφθόριο	kg/ton	0.00E+00	2.24E-04
Υδρόθειο (H ₂ S)	kg/ton	1.43E-04	0.00E+00
Συνολικός οργανικός άνθρακας (TOC)	kg/ton	0.00E+00	2.73E-02
Αμμωνία	kg/ton	2.64E-03	0.00E+00
Κάδμιο + Τιτάνιο	kg/ton	0.00E+00	2.73E-05
Αντιμόνιο	kg/ton	5.32E-03	8.20E-05
Μόλυβδος	kg/ton	0.00E+00	1.09E-03
Χρώμιο	kg/ton	0.00E+00	5.46E-05
Κοβάλτιο	kg/ton	0.00E+00	2.73E-05
Χαλκός	kg/ton	0.00E+00	2.73E-04
Μαγγάνιο	kg/ton	0.00E+00	8.20E-05
Νικέλιο	kg/ton	0.00E+00	5.46E-05
Βανάδιο	kg/ton	0.00E+00	5.46E-05
Πρώτες ύλες / Αναλώσιμα			
Άσβεστος	kg/ton	7.94	10.8
Ενεργός άνθρακας	kg/ton	0.34	0.45
Νερό βρύσης	m ³ /ton	0.22	0.225
Υδροξείδιο του νατρίου	kg/ton	65.7	2.2
Αμμωνία (NH ₃ -25%)	g/ton	-	2.3
Υδροχλώριο (HCl)	kg/ton	-	0.18
Οξείδιο του ασβεστίου (CaO)	kg/ton	7.5	
Παράγοντες καθίζησης	kg/ton	-	0.17
Πετρέλαιο (Diesel oil) (βοηθητικοί καυστήρες)	L/ton	-	1.8
Ηλεκτρισμός	kwh/ton	-	120
Τέφρα			
Ιπτάμενη τέφρα	kg/ton	1.53E+02	28.6

Η επίδραση της αποτέφρωσης και της αεριοποίησης στα ΑΣΑ με χρήση της μεθόδου τελικών σημείων (endpoint approach) παρουσιάζεται στο Σχήμα 15. Η

αεριοποίηση παρουσιάζει καλύτερη απόδοση από την αποτέφρωση στις περισσότερες παραμέτρους.



*(milli-Point (mPt): χιλιοστό του Point, μονάδα μέτρησης σε μεθόδους αξιολόγησης κύκλου ζωής)

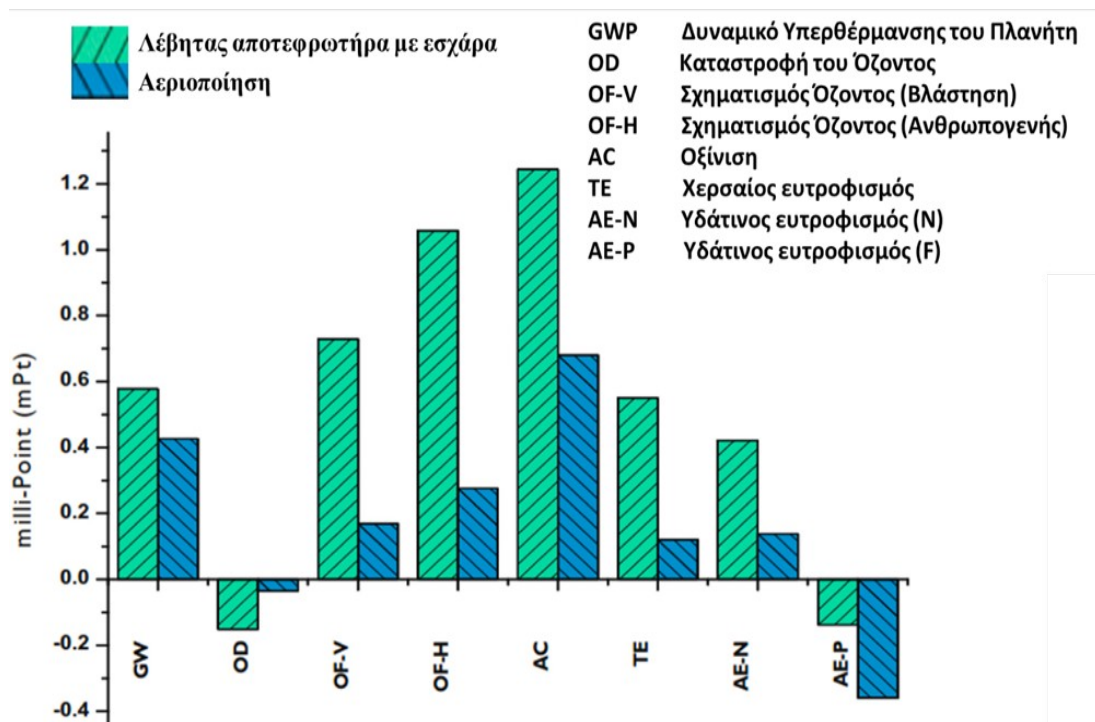
Σχήμα 15. Σύγκριση της επίδρασης της αποτέφρωσης και της αεριοποίησης για την επεξεργασία ΑΣΑ με τη μέθοδο τελικών σημείων (Chicaiza-Ortiz et al., 2024).

Στο πλαίσιο της έρευνάς τους, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 15, η αποτέφρωση κατέδειξε μεγαλύτερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο για όλες τις αξιολογημένες παραμέτρους σε σύγκριση με την αεριοποίηση. Για την ανθρώπινη υγεία παρουσιάζεται η μεγαλύτερη διαφορά, πιθανόν λόγω των αυξημένων εκπομπών επιβλαβών συστατικών που συνδέονται με την αποτέφρωση. Σύμφωνα με τα ευρήματά του Πίνακα 23, παρουσιάζονται οι εκπομπές του CO₂ να είναι αρκετά υψηλές και να αποτελούν κύριο παράγοντα που συμβάλλει στην κλιματική αλλαγή. Ενδιαφέρον παρουσιάζει ότι η τεχνολογία αεριοποίησης εμφανίζει αρνητικές τιμές στον τομέα της ποιότητας οικοσυστήματος, υποδεικνύοντας το δυναμικό της για μείωση των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων.

Για την αξιολόγηση ενός συστήματος σχετικά με την περιβαλλοντική βιωσιμότητα, τα όρια του πρέπει να ορίζονται με ακρίβεια. Ένας από τους κατάλληλους περιβαλλοντικούς δείκτες για την ποσοτικοποίησή της στον τομέα των ΑΣΑ εστιάζει στους ακόλουθους ενδιάμεσους δείκτες: το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη (Global Warming Potential – GWP), που σχετίζεται με την κλιματική αλλαγή, την απομείωση της στιβάδας του όζοντος, το φωτοχημικό νέφος, το οποίο βασίζεται στα οξείδια του αζώτου και τις πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs) και συνδέεται με τη βιομηχανοποίηση και τις μεταφορές μέσω της χρήσης ορυκτών καυσίμων, την ανθρώπινη τοξικότητα και την οικοτοξικότητα, που σχετίζονται με τη δημόσια υγεία, καθώς και το δυναμικό διατήρησης των πόρων. Από την άλλη πλευρά, δεν πρέπει να παραλείπονται η οξίνιση, (Acidification – AC), ο χερσαίος ευτροφισμός (Terrestrial Eutrophication – TE), ο φωτοχημικός σχηματισμός όζοντος με επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία (Photochemical Ozone Formation to human health – POFh), η ανθρώπινη τοξικότητα μέσω του αέρα (Human Toxicity via air – HTa), η τοξικότητα

για τους ανθρώπους μέσω στερεών αποβλήτων (Human Toxicity via solid – HTs) και η οικοτοξικότητα μέσω στερεών αποβλήτων (Ecotoxicity via solid – ETs).

Κατά συνέπεια, θα πρέπει να υιοθετείται μια ολοκληρωμένη προσέγγιση κατά την επιλογή των παραμέτρων για τα σημεία μέσης στάθμης. Οι ακόλουθοι παράμετροι αναλύονται διεξοδικά στην παρούσα μελέτη: η υπερθέρμανση του πλανήτη, η απομείωση της στιβάδας του όζοντος, ο σχηματισμός όζοντος, η οξίνιση και ο ευτροφισμός. Οι αρνητικές τιμές αντιπροσωπεύουν μειωμένες περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις, ενώ οι θετικές τιμές αντιπροσωπεύουν αυξημένα περιβαλλοντικά φορτία. Συνεπώς, οι μεγαλύτερες τιμές έχουν σημαντικότερη επίδραση στην αντίστοιχη παράμετρο (σχήμα 16).



Σχήμα 16. Αξιολόγηση Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής με ενδιάμεσους δείκτες (Midpoint LCIA) της αποτέφρωσης και της αεριοποίησης για την επεξεργασία ΑΣΑ (Chicaiza-Ortiz et al., 2024).

Σύμφωνα με το Σχήμα 16, με εξαίρεση την απομείωση της στιβάδας του όζοντος, όπου η αποτέφρωση παρουσιάζει ευνοϊκότερη περιβαλλοντική επίδοση, η τεχνολογία της αεριοποίησης επιδεικνύει ανώτερη απόδοση στους περισσότερους δείκτες. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι εγκαταστάσεις αποτέφρωσης ΑΣΑ είναι ιδιαίτερα δαπανηρές λόγω του υψηλού αρχικού επενδυτικού κόστους, των λειτουργικών δαπανών, της ανάγκης για εξειδικευμένο προσωπικό και των αυστηρών απαιτήσεων συντήρησης. Από την άλλη πλευρά, η αποτέφρωση αποβλήτων αποτελεί έναν αποτελεσματικό τρόπο αδρανοποίησης των αποβλήτων και μεταξύ των πλεονεκτημάτων της συγκαταλέγονται η σημαντική μείωση του όγκου των αποβλήτων και η δυνατότητα χωροθέτησης των μονάδων κοντά στα σημεία παραγωγής, γεγονός που μειώνει το κόστος μεταφοράς των αποβλήτων.

Δυναμικό Υπερθέρμανσης του Πλανήτη: Στο πλαίσιο Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, η επίδραση εκπομπών, όπως CO₂ και NO_x, από τις τεχνολογίες ανάκτησης ηλεκτρικής

ενέργειας από απόβλητα είναι ιδιαίτερα σημαντική. Η αποτέφρωση συμβάλλει περίπου 30% περισσότερο στο περιβαλλοντικό φορτίο του δυναμικού υπερθέρμανσης του πλανήτη σε σύγκριση με την αεριοποίηση. Οι υψηλότερες εκπομπές CO₂, CO και NO_x που παρατηρούνται στη διεργασία της αποτέφρωσης συμβάλουν σημαντικά στην κλιματική αλλαγή. Η διαφοροποίηση αυτή ενδέχεται να επηρεάζεται από τις διαφορές στη σύσταση της τροφοδοσίας μεταξύ των δύο διεργασιών.

Καταστροφή του Όζοντος: Η αξιολόγηση για τη καταστροφή του όζοντος δείχνει ότι η αποτέφρωση και η αεριοποίηση επηρεάζουν ευνοϊκά το περιβάλλον, όπως φαίνεται από τις αρνητικές τιμές τους στο Σχήμα 14. Ωστόσο, σε σύγκριση με την αεριοποίηση, η αποτέφρωση παρουσιάζει οριακά μεγαλύτερη δυνατότητα αποφυγής περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων. Η παρατήρηση αυτή θα μπορούσε να αποδοθεί στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και ατμού στην αποτέφρωση και την αεριοποίηση αντίστοιχα, καθώς και στην αποφυγή εκπομπών μεθανίου, οι οποίες επηρεάζουν σημαντικά αυτή την παράμετρο. Από την άλλη πλευρά η αποτέφρωση έχει μεγαλύτερη επίδραση στο περιβάλλον όσον αφορά τον σχηματισμό όζοντος, ο οποίος είναι επιβλαβής για τη φυτική ζωή και την ανθρώπινη υγεία. Αυτό επηρεάζει στη συνέχεια την παράμετρο της ποιότητας του οικοσυστήματος και αρκετά άλλα ενδιάμεσα σημεία, γεγονός που υποδηλώνει ότι η αεριοποίηση παρουσιάζει καλύτερη περιβαλλοντική απόδοση.

Οξίνιση: Το περιβαλλοντικό φορτίο που σχετίζεται με την οξίνιση είναι πιο σημαντικό για την αποτέφρωση σε σύγκριση με την αεριοποίηση. Και οι δύο διεργασίες συμβάλλουν σημαντικά στην οξίνιση σε σχέση με άλλες επιπτώσεις ενδιάμεσων σημείων, κυρίως λόγω της υψηλότερης συγκέντρωσης όξινων ενώσεων που παρατηρείται (Πίνακας 24). Η ατμοσφαιρική εναπόθεση αζώτου και άλλων θρεπτικών στοιχείων επηρεάζει τον χερσαίο ευτροφισμό, επηρεάζοντας την ποιότητα των οικοσυστημάτων. Όσον αφορά την αεριοποίηση, ο χερσαίος ευτροφισμός είναι συγκρίσιμος με τον υδάτινο ευτροφισμό (N), με το άζωτο να αποτελεί τον καθοριστικό παράγοντα και στις δύο περιπτώσεις. Στην περίπτωση της αποτέφρωσης, οι τιμές του χερσαίου ευτροφισμού είναι οριακά υψηλότερες από εκείνες του υδάτινου ευτροφισμού λόγω συγκεκριμένων παραγόντων χαρακτηρισμού. Επιπλέον, ο υδάτινος ευτροφισμός (P) παρουσιάζει αξιοσημείωτη μείωση του περιβαλλοντικού φορτίου τόσο για την αεριοποίηση όσο και για την αποτέφρωση, με την αποτέφρωση να είναι οριακά μικρότερη.

Σύμφωνα με τα παραπάνω δεδομένα η αεριοποίηση αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για τη βιώσιμη διαχείριση των ΑΣΑ, αλλά ταυτόχρονα υπογραμμίζεται η σημασία για την αντιμετώπιση τεχνικών και περιβαλλοντικών εμποδίων για την επιτυχή εφαρμογή της σε μεγαλύτερη κλίμακα. Η συμμετοχή του κοινού και οι συνεχείς προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης είναι απαραίτητες για την πλήρη αξιοποίηση των τεχνολογιών WtE στην αντιμετώπιση των τρεχουσών προβλημάτων διαχείρισης αποβλήτων. Ωστόσο, η εφαρμογή της αεριοποίησης ΑΣΑ σε εμπορική κλίμακα παρουσιάζει ορισμένα εμπόδια. Όταν λειτουργεί με ετερογενή απόβλητα, τα συμβατικά συστήματα μπορεί να παρουσιάσουν εγγενή αστάθεια, απαιτώντας περαιτέρω ενέργειες για την επίτευξη υψηλών επιπέδων απόδοσης. Επιπλέον, η αεριοποίηση αποβλήτων παράγει ένα πολύπλοκο μίγμα οργανικών ενώσεων που αυξάνει τα έξοδα των μονάδων. Παράλληλα, μεγάλες ποσότητες ιπτάμενης τέφρας και υπολειμμάτων διαχείρισης ρύπων απαιτούν μεταγενέστερη επεξεργασία για τη μείωση τους πριν τη διάθεσή τους σε χώρους υγειονομικής ταφής.

Επίσης, η αεριοποίηση απαιτεί προεπεξεργασία και ταξινόμηση των αποβλήτων, εκτενή συντήρηση, και δεν είναι κάθε τοποθεσία κατάλληλη για λειτουργία μεγάλης κλίμακας εγκατάσταση (Chicaiza-Ortiz et al., 2024). Τέλος, η επίδραση μέσω της ανάκτησης ενέργειας από τα ΑΣΑ στον ενεργειακό πίνακα στην Κίνα παρουσιάζεται στον Πίνακα 24 και επισημαίνεται η στροφή προς τη μετάβαση αξιοποίησης των ΑΣΑ σε αυτή τη χώρα.

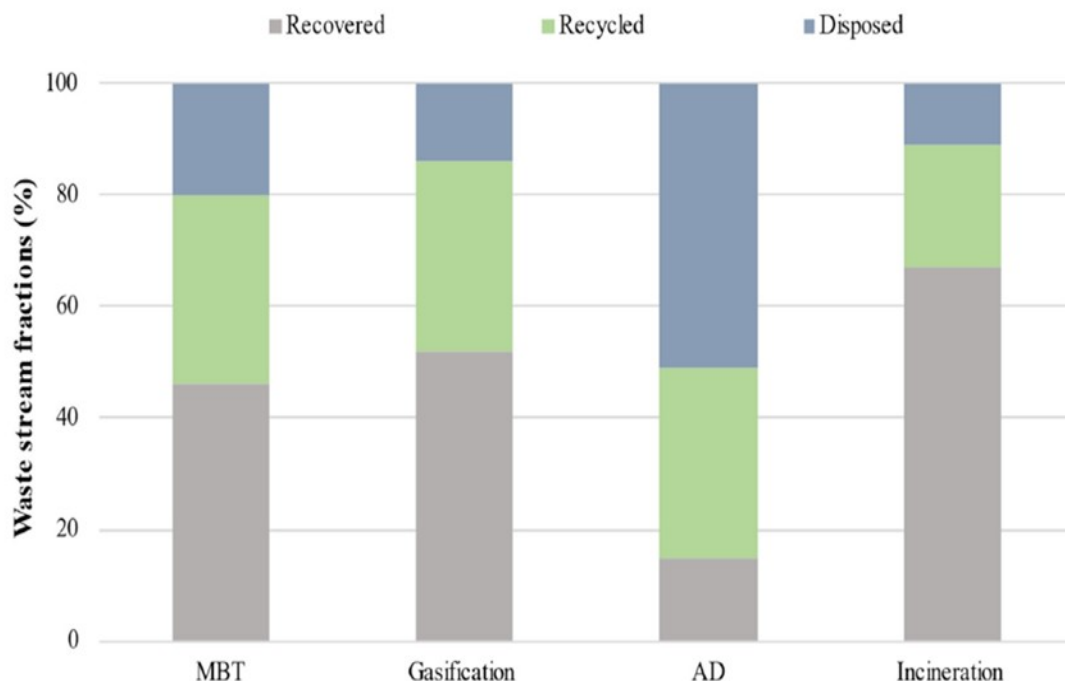
Πίνακας 24. Δυνατότητα υποκατάστασης ενέργειας στο ισοζύγιο ηλεκτρικής ενέργειας και ενέργειας της Κίνας μέσω της αποτέφρωσης και της αεριοποίησης ΑΣΑ (China Statistical Yearbook, 2023).

Μορφή Ενέργειας	Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (kWh)	Ποσοστό ανά πηγή (%)	Πιθανή υποκατάσταση με αποτέφρωση ΑΣΑ (%)	Πιθανή υποκατάσταση με αεριοποίηση ΑΣΑ (%)
Υδροηλεκτρική	1.34E+12	16.31	11.60	13.40
Θερμική	5.81E+12	70.73	2.67	3.09
Πυρηνική	4.08E+11	4.96	38.11	44.03
Αιολική	6.56E+11	8.01	23.67	27.35
Εισαγωγές (+)	5.90E+09	0.07	2632.05	3041.38
Εξαγωγές (-)	2.02E+10	0.25	768.77	888.32

Ο Πίνακας 24, απεικονίζει τη διαθεσιμότητα και την κατανάλωση ενεργειακών πηγών σε διάφορες περιοχές της Κίνας, βάσει δεδομένων από το China Statistical Yearbook (2023). Ο πίνακας παρουσιάζει τα ποσοστά κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και τη δυνητική υποκατάσταση μέσω αποτέφρωσης και αεριοποίησης αποβλήτων για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αξιοσημείωτο είναι ότι οι περιοχές με το υψηλότερο δυναμικό υποκατάστασης είναι οι εισαγωγές, με την αεριοποίηση και την αποτέφρωση να προσφέρουν κλίμακες αντικατάστασης που υπερβαίνουν τις 2,6 και 3,0 χιλιάδες φορές αντίστοιχα, ενισχύοντας την ενεργειακή κυριαρχία της χώρας. Ωστόσο, είναι απαραίτητες αναλύσεις σκοπιμότητας, ιδίως σε περιοχές που αντιμετωπίζουν ενεργειακά ελλείμματα, ώστε να αξιολογηθεί η βιωσιμότητα της υποκατάστασης μέσω WtE (Chicaiza-Ortiz et al., 2024).

5.5.Τεχνοοικονομική και περιβαλλοντική αξιολόγηση τεχνολογιών (WtE) στα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα

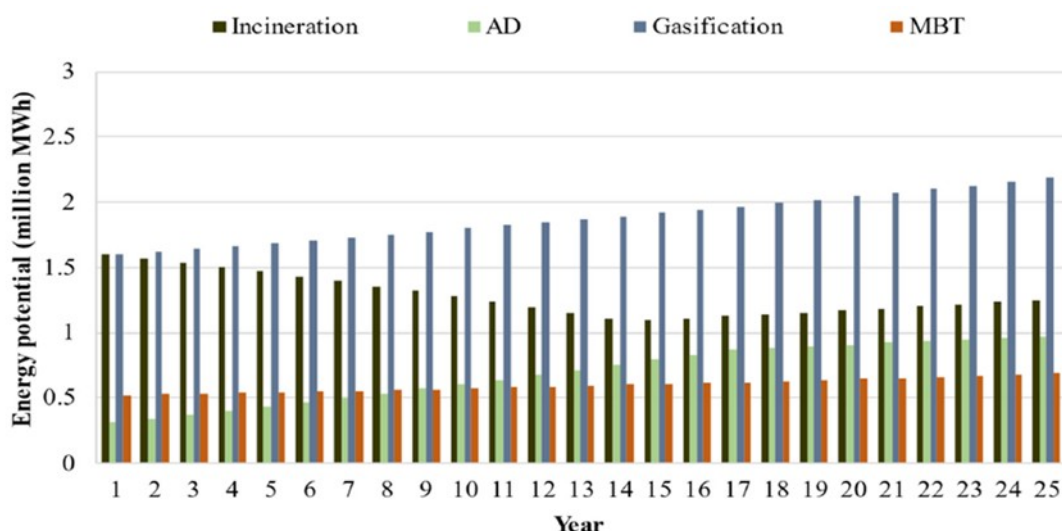
Για την αξιολόγηση της απόδοσης των εξεταζόμενων τεχνολογιών, διεξήχθη ανάλυση διαχείρισης αποβλήτων για την εκτίμηση της συνολικής μείωσης των αποβλήτων που οδηγούνται σε χώρους υγειονομικής ταφής μέσω ανάκτησης υλικών και ενέργειας (Σχήμα 17).



Σχήμα 17. Μέσα κλάσματα ροών αποβλήτων στις προτεινόμενες τεχνολογίες (Abdeljaber et al., 2022).

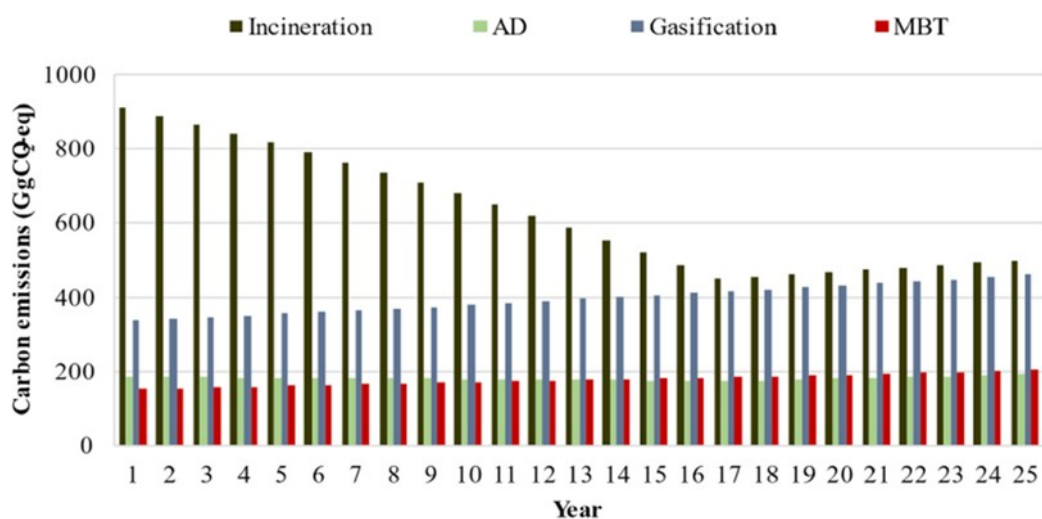
Το Σχήμα 17, παρουσιάζει τα μέσα αποτελέσματα διαχείρισης αποβλήτων των προτεινόμενων τεχνολογιών. Τα ευρήματα έδειξαν ότι η στρατηγική της αποτέφρωσης πέτυχε το υψηλότερο ποσοστό ενεργειακής ανάκτησης (67%), ακολουθούμενη από τη στρατηγική της αεριοποίησης (52%), της μηχανικής-βιολογικής επεξεργασίας (MBT) (46%) και της αναερόβιας χώνευσης (15%). Το ποσοστό ανακύκλωσης των αποβλήτων ήταν ίδιο σε όλες τις στρατηγικές (34%), με εξαίρεση αυτό της αποτέφρωσης, όπου ήταν χαμηλότερο κατά 12% λόγω χαμηλής συμμετοχής στην ανακύκλωση, γεγονός που οδήγησε μικρότερη ποσότητα αποβλήτων σε εγκαταστάσεις ανάκτησης υλικών. Από την άλλη πλευρά, η αποτέφρωση διάθεσε μικρότερη ποσότητα αποβλήτων σε χώρους υγειονομικής ταφής, λόγω της χαμηλής περιεκτικότητας σε τέφρα. Αντίθετα, η αναερόβια χώνευση παρουσίασε το υψηλότερο ποσοστό διάθεσης αποβλήτων σε χώρους υγειονομικής ταφής, ακολουθούμενη από τη στρατηγική MBT, με ποσοστά 51% και 20% αντίστοιχα. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στις χαμηλές ποσότητες χωνεμένου υπολείμματος που ανακτάται, λόγω της περιορισμένης συμμετοχής του κοινού στον διαχωρισμό των αποβλήτων τροφίμων, σε συνδυασμό με τη μεγάλη ποσότητα υπολείμματος που οδηγείται σε χώρους υγειονομικής ταφής εξαιτίας των αυστηρών κανονισμών στα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα σχετικά με την περιορισμένη χρήση του στις καλλιέργειες.

Οι τεχνολογίες ολοκληρωμένης διαχείρισης στερεών αποβλήτων παρουσιάζουν ένα σημαντικό δυναμικό στην ανάκτηση ενέργειας. Στο Σχήμα 18, παρουσιάζεται η παραγωγή ενέργειας των προτεινόμενων τεχνολογιών σε ορίζοντα εικοσιπενταετίας.



Σχήμα 18. Δυναμική παραγωγή ενέργειας των προτεινόμενων τεχνολογιών (Abdeljaber et al., 2022).

Η αεριοποίηση έχει επιτύχει τη μεγαλύτερη ανάκτηση ενέργειας σε σχέση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες με συνολικά 47,0 έναντι 34,2 εκατομμύρια MWh από τη δεύτερη αποτέφρωση. Αυτό οφείλεται κυρίως στην υψηλή ενεργειακή απόδοση των αεριοποιημένων (860 kWh) έναντι των αποτεφρωμένων (626 kWh) αποβλήτων ανά τόνο επεξεργασμένων αποβλήτων. Η αναερόβια χώνευση ξεκίνησε με παραγωγή 0,31 εκατομμυρίων MWh και έφτασε τα 17,2 εκατομμύρια MWh. Η τεχνολογία της MBT είχε τη μικρότερη ειδική παραγωγή ενέργειας (273 kWh/ton αποβλήτων), η οποία μεταφράζεται σε συνολικά 14,9 MWh λόγω των περιορισμένων ποσοτήτων ανακτημένου RDF. Ενώ ως προς το περιβαλλοντικό αποτύπωμα αποτυπώνεται στο Σχήμα 19.



Σχήμα 19. Αποτύπωμα άνθρακα των προτεινόμενων τεχνολογιών (Abdeljaber et al., 2022).

Η αποτέφρωση κατέχει την πρώτη θέση ως προς το αποτύπωμα του άνθρακα περίπου 15.700 t CO₂ - eq καθ' όλη την περίοδο αξιολόγησης. Οι μονάδες αεριοποίησης οδήγησαν σε μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου κατά 36%

λόγω της επεξεργασίας μικρότερης ποσότητας αποβλήτων. Από την άλλη πλευρά, οι στρατηγικές MBT και AD βρέθηκαν να είναι οι πιο περιβαλλοντικά βιώσιμες, εκπέμποντας περίπου 4442 και 4539 t CO₂ - eq, αντίστοιχα. Τέλος, στον Πίνακα 25, συνοψίζονται τα ευρήματα των αναλύσεων αποτυπώματος άνθρακα, κόστους κύκλου ζωής και οικολογικής απόδοσης.

Πίνακας 25. Σύνοψη οικονομικών και περιβαλλοντικών δεικτών για τις προτεινόμενες τεχνολογίες (Abdeljaber et al., 2022).

Τεχνολογίες	Αποτύπωμα Άνθρακα (tCO ₂ -eq)	NPV (\$ × 10 ⁶)	IRR (%)	PI	PP (Year)	LCOE (\$/kWh)	EI
Αποτέφρωση	14,230	248	8	1.16	17	0.134	0.46
Αναερόβια Χώνευση	4539	33	7	1.12	25	0.120	0.99
Αεριοποίηση	9922	364	9	1.44	16	0.108	0.19
Μηχανική Βιολογική Επεξεργασία	4442	284	9	1.35	17	0.141	0.11
NPV: καθαρή παρούσα αξία IRR: εσωτερικός βαθμός απόδοσης PI: δείκτης κερδοφορίας PP: περίοδος αποπληρωμής (έτη) LCOE: σταθμισμένο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας EI: δείκτης οικολογικής απόδοσης							

Ο Πίνακας 25, συνοψίζει τα ευρήματα των αναλύσεων ανθρακικού αποτυπώματος, κόστους κύκλου ζωής (LCC) και οικολογικής απόδοσης. Με βάση τις εκπομπές GHGs των τεσσάρων σεναρίων, η στρατηγική της αποτέφρωσης πέτυχε την υψηλότερη επίδοση, ακολουθούμενη από την αεριοποίηση, την αναερόβια χώνευση και τη μονάδα μηχανικής - βιολογικής επεξεργασίας. Σύμφωνα με τους χρηματοοικονομικούς δείκτες, όλες οι στρατηγικές παρουσίασαν θετική καθαρή παρούσα αξία (NPV), με τη στρατηγική της αεριοποίησης να είναι η πλέον οικονομικά εφικτή, ακολουθούμενη από τις στρατηγικές MBT και AD. Τέλος, η στρατηγική MBT αναδείχθηκε ως η καλύτερη σε σχετικά με την οικολογική απόδοση, ενώ η στρατηγική AD ως η χειρότερη (Abdeljaber et al., 2022).

5.6. Ανασκόπηση των προσεγγίσεων μετατροπής αποβλήτων σε ενέργεια

Η αποτέφρωση, η πυρόλυση και η αεριοποίηση είναι οι ευρέως χρησιμοποιούμενες θερμικές διαδικασίες μετατροπής των ΑΣΑ σε ενέργεια, οι οποίες ανακτούν ενέργεια με τη μορφή θερμότητας ή ηλεκτρισμού. Αυτές οι θερμικές μέθοδοι διαφοροποιούνται ανάλογα με τις συνθήκες της διαδικασίας. Από την άλλη πλευρά οι βιοχημικές μέθοδοι, όπως η μικροβιακή ζύμωση, η αναερόβια χώνευση και οι μικροβιακές κυψέλες καυσίμου, αποτελούν φιλικότερες προς το περιβάλλον εναλλακτικές λύσεις σε σχέση με τις θερμικές διαδικασίες. Όλες αυτές οι μέθοδοι έχουν ορισμένα πλεονεκτήματα, περιορισμούς και περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Ο Πίνακας 26, παρουσιάζει μια συγκριτική ανάλυση των θερμικών μεθόδων, της παραγωγής αερίου από χωματερές και των βιοχημικών προσεγγίσεων.

Πίνακας 26. Σύγκριση Διαφορετικών Τεχνολογιών (WtE) (Ram et al., 2021).

Μέθοδος WtE	Πλεονεκτήματα	Περιορισμοί	Προϊόντα	Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις
Αποτέφρωση	- Μείωση όγκου και βάρους των αποβλήτων προς υγειονομική ταφή	- Διαχείριση βαρέων μετάλλων από την αποτεφρωμένη τέφρα - Απαιτείται εκτεταμένη υποδομή και εξοπλισμός	Θερμότητα, CO ₂ , H ₂ O, υπάμενη και πυθμένα τέφρα	- Ατμοσφαιρικοί ρύποι, που συμπεριλαμβάνουν SO _x , NO _x , CO _x , πολυαρωματικοί
Πυρόλυση	- Παράγει μικρότερη ποσότητα ρύπων (διοξίνες, οξείδια του αζώτου και του θείου) σε σύγκριση με την αποτέφρωση	- Το υψηλό ιξώδες του πυρολυτικού ελαίου μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα κατά τη καύση και τη μεταφορά	Βιοέλαιο, καύσιμο, αέριο, βιοκάρβουνο/ άνθρακας (στερεό υπόλειμμα),	- Αέριοι ρύποι, που συμπεριλαμβάνουν H ₂ S, NH ₃ , SO _x , NO ₂ και των καυσαερίων
Αεριοποίηση	- Μειωμένη παραγωγή ρύπων (π.χ. διοξίνη και φουράνια) σε σύγκριση με την αποτέφρωση - Η αεριοποίηση παράγει	- Απαιτούνται εκτεταμένες υποδομές και εξοπλισμός - Έλλειψη τοπικής τεχνογνωσίας στον	Συνθετικό αέριο, πίσσα, υδρογονάνθρακες	- Αέριοι ρύποι, όπως CO, οξείδια του αζώτου και του θείου, διοξίνες, υδρογονάνθρακες
Βιοχημική Υγειονομική	- Οικονομικά αποδοτικό και λιγότερο απαιτητικό σε εργασία - Συλλογή αερίου και στραγγισμάτων από χώρους	- Υψηλές απαιτήσεις γης - Αν δεν διαχειρίζονται σωστά, γίνονται εστίες για ρακοσυλλέκτες, μύγες, κουνούπια,	- Αέριο χώρων υγειονομικής ταφής (CH ₄ , CO ₂ , N ₂), - Δηθήσιμο	- Παράγονται στραγγίσματα που μολύνουν το έδαφος και τα υπόγεια ύδατα
Βιοχημική	- Μπορεί να πραγματοποιηθεί σε μικρή κλίμακα - Η συμπαγής σχεδίαση απαιτεί λιγότερη επιφάνεια	- Δεν είναι κατάλληλη για απόβλητα με χαμηλή οργανική περιεκτικότητα - Απαιτείται διαλογή αποβλήτων για	Βιοαέριο και ιλύς /υπολείμματα χώνευσης, βιοϋδρογόνο και βιοηλεκτρισμός	- Περιβαλλοντικά φιλικές διαδικασίες - Ελέγχει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου

Οι Ram et al. (2021) βασικά υποστηρίζουν ότι οι τεχνολογίες θερμικής επεξεργασίας ΑΣΑ χρησιμοποιούνται για τη μείωση του όγκου των αποβλήτων με ταυτόχρονη παραγωγή ενέργειας. Μεταξύ των θερμικών διεργασιών μετατροπής, η πυρόλυση παρουσιάζει πλεονεκτήματα έναντι της συμβατικής καύσης, λόγω των χαμηλότερων εκπομπών αέριων ρύπων, όπως τα οξείδια του θείου, του αζώτου και τις διοξίνες. Από την άλλη πλευρά οι βιοχημικές μέθοδοι θεωρούνται πιο φιλικές προς το περιβάλλον και πιο οικονομικά αποδοτικές εναλλακτικές λύσεις για την παραγωγή ενέργειας χρησιμοποιώντας το οργανικό κλάσμα των ΑΣΑ (OFMSW). Βιοχημικές διεργασίες, όπως η μικροβιακή ζύμωση για παραγωγή βιοϋδρογόνου, η αναερόβια χώνευση και οι μικροβιακές κυψέλες καυσίμων, έχουν γνωρίσει ευρεία αποδοχή τα τελευταία χρόνια. Βέβαια, ορισμένες τροποποιήσεις, όπως διαφορετικές μέθοδοι προεπεξεργασίας και η μείωση του μεγέθους των σωματιδίων του OFMSW, έχουν δοκιμαστεί για τη βελτίωση της απόδοσης αυτών των μεθόδων. Επίσης, η απόδοση της βιολογικής διεργασίας μπορεί να βελτιωθεί μέσω της επιλογής κατάλληλης προεπεξεργασίας, η οποία εξαρτάται από τον τύπο του υποστρώματος. Ο εμπλουτισμός του OFMSW με άλλα πλούσια σε θρεπτικά συστατικά υποστρώματα αποτελεί μια ακόμη στρατηγική που βελτιώνει την απόδοση της αναερόβιας χώνευσης.

Τέλος, η έρευνα των Ram et al. (2021) επικεντρώνεται στη βελτίωση της απόδοσης της τεχνολογίας των Μικροβιακών Κυψελών Καυσίμου (MFC). Στο μέλλον, η αποδοτική τεχνολογία MFC θα μπορούσε να συνδυαστεί με χώρους

υγειονομικής ταφής που παράγουν στραγγίσματα. Τα στραγγίσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υπόστρωμα για τα MFC με σκοπό την παραγωγή βιοϋδρογόνου και βιοηλεκτρικής ενέργειας. Συνεπώς, οι τεχνολογίες ανάκτησης ενέργειας από ΑΣΑ αποτελούν μια οικονομικά βιώσιμη και περιβαλλοντικά αειφόρο εναλλακτική λύση, καθώς τα ΑΣΑ αποτελούν μία ευρέως διαθέσιμη πηγή ενέργειας λόγω της συνεχής παραγωγής τους.

5.7. Ολιστική Αξιολόγηση βασισμένη σε πολλαπλά κριτήρια

Αποτελέσματα προέκυψαν για δύο διαφορετικά σενάρια. Στο Σενάριο 1, ο δείκτης που επιλέχθηκε για το οικονομικό κριτήριο ήταν η Κεφαλαιουχική Δαπάνη - CAPEX (€/t πρώτης ύλης), βάσει των υπολογισμένων μέσων τιμών που αναφέρονται στη βιβλιογραφία. Αντίστοιχα, ο δείκτης που επιλέχθηκε για το περιβαλλοντικό κριτήριο ήταν το Δυναμικό Υπερθέρμανσης του Πλανήτη - GWP (kg CO₂ eq./t πρώτης ύλης), επίσης βάσει των υπολογισμένων μέσων τιμών που αναφέρονται στη βιβλιογραφία. Ο δείκτης που χρησιμοποιήθηκε για το κοινωνικό κριτήριο ήταν η κοινωνική προτίμηση, με βάση τις απαντήσεις της δημόσιας έρευνας, ενώ ο δείκτης που χρησιμοποιήθηκε για το τεχνολογικό κριτήριο ήταν η δυνατότητα εφαρμογής κάθε τεχνολογίας σε μεγάλη κλίμακα στην Ελλάδα, βάσει των απόψεων των ειδικών. Στο Σενάριο 2, ενώ τα κοινωνικά και τεχνολογικά κριτήρια παρέμειναν τα ίδια, τα δεδομένα που αφορούσαν τις οικονομικές και περιβαλλοντικές διαστάσεις βασίστηκαν στις απαντήσεις των ειδικών στο αντίστοιχο ερωτηματολόγιο. Ο Πίνακας 27, συνοψίζει τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από τη διεθνή βιβλιογραφία και από την ανάλυση των απαντήσεων της έρευνας, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου στη μέθοδο PROMETHEE. Στα Σενάρια 1 και 2, τα οικονομικά και περιβαλλοντικά κριτήρια ορίστηκαν προς ελαχιστοποίηση στη μέθοδο PROMETHEE, ενώ τα κοινωνικά και τεχνολογικά κριτήρια ορίστηκαν προς μεγιστοποίηση. Συνολικά, εξετάστηκαν τέσσερα υποσενάρια για καθένα από τα δύο σενάρια, μέσω εφαρμογής ανάλυσης ευαισθησίας σύμφωνα με διαφορετικές σταθμίσεις των κριτηρίων.

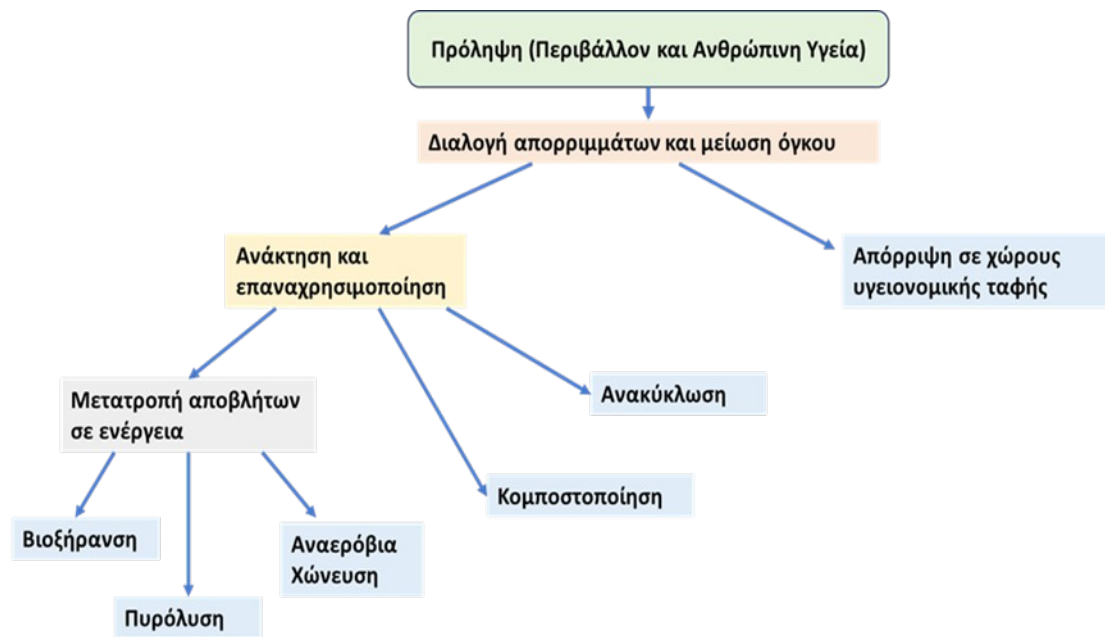
Πίνακας 27. Αρχικό μοντέλο δεδομένων από τη διεθνή βιβλιογραφία και από τις κοινωνικές έρευνες και τις έρευνες ειδικών για τα 2 σενάρια (Mertzanakis et al., 2024).

		Αεριοποίηση	Πυρόλυση	Αναερόβια Χώνευση
Σενάριο 1				
CAPEX(€/t πρώτης ύλης)	610	705	800	113
GWP (kg CO ₂ eq./t πρώτης ύλης)	584	443	482	360
Σενάριο 2				
Οικονομικό κριτήριο (κλίμακα 1-4)	2.06	2.7	3.6	1.65
Περιβαλλοντικό κριτήριο (κλίμακα 1-4)	3.41	2.53	2.35	1.70
Σενάριο 1 και 2				
Κοινωνική προτίμηση (κλίμακα 1–5)	4.31	4.05	4.07	4.16
Δυνατότητα εφαρμογής σε μεγάλη κλίμακα στην Ελλάδα (κλίμακα 1–5)	3.80	3.10	2.50	4.60

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αναερόβια χώνευση θεωρείται η πλέον προτιμητέα και καταλληλότερη επιλογή λόγω της οικονομικής αποδοτικότητας και του χαμηλότερου περιβαλλοντικού φορτίου σε σύγκριση με την αεριοποίηση, την πυρόλυση και την αποτέφρωση. Πιο συγκεκριμένα, όταν όλα τα κριτήρια αξιολογούνται με ίσα βάρη, η αναερόβια χώνευση υπερτερεί σημαντικά της αποτέφρωσης, ενώ η αποτέφρωση γίνεται η καταλληλότερη επιλογή μόνο όταν το κοινωνικό κριτήριο έχει υψηλή βαρύτητα (δηλαδή, πάνω από 63%) (Mertzanakis et al., 2024).

5.8. Η βιοζήρανση ως τεχνολογία μετατροπής αποβλήτων σε ενέργεια

Οι Abid et al. (2024) στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας, με σκοπό την προστασία της ανθρώπινης υγείας και του περιβάλλοντος με παράλληλη ενίσχυση της οικονομικής παραγωγικότητας μιας περιοχής μέσω της ανάκτησης πόρων, θεωρούν ότι η διαχείριση των ΑΣΑ που εφαρμόζεται σήμερα στις περισσότερες αναπτυσσόμενες χώρες είναι μάλλον περιορισμένη, αναποτελεσματική ή ανεπαρκής. Από την άλλη πλευρά στις ανεπτυγμένες χώρες, η μετατροπή των ΑΣΑ σε καύσιμα, θερμότητα και ηλεκτρική ενέργεια με τεχνολογίες μετατροπής αποβλήτων σε ενέργεια είναι καθιερωμένη (Σχήμα 20), αλλά οι δήμοι επικεντρώνονται περισσότερο στη συλλογή αποβλήτων παρά στην επεξεργασία.



Σχήμα 20. Ιεραρχία τεχνολογιών διαχείρισης ΑΣΑ.

Στο πλαίσιο της βιωσιμότητας και της προστασίας του περιβάλλοντος, τόσο οι τεχνικές μικροβιακής μετατροπής, όπως η αναερόβια χώνευση και η κομποστοποίηση οι οποίες παράγουν κομπόστ και βιοαέριο, όσο και οι θερμοχημικές διεργασίες, όπως η πυρόλυση και η αεριοποίηση που παράγουν βιοέλαιο και αέριο σύνθεσης, εκσυγχρονίστηκαν και διατελούν τεχνικές διαχείρισης των αποβλήτων. Η βιοξήρανση παράγει ένα σταθερό και ξηρό υλικό, μέσω της διαδικασίας ξήρανσης οργανικών αποβλήτων σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών και χαμηλής υγρασίας, γνωστό ως στερεό ανακτώμενο καύσιμο (SRF). Το SRF έχει ένα εύρος πιθανών εφαρμογών, όπως:

1. Παραγωγή ενέργειας. Το SRF χρησιμοποιείται ως καύσιμο σε βιομηχανικούς λέβητες και σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής για την παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας αντικαθιστώντας τα ορυκτά καύσιμα.

2. Κλίβανοι παραγωγής τσιμέντου. Το SRF χρησιμοποιείται ως υποκατάστατο ορυκτών καυσίμων και βοηθά στη μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος συμβάλλοντας στη βιώσιμη ανάπτυξη.

3. Σύγκαιση. Το SRF δύναται να καεί μαζί με άλλα καύσιμα ή με άνθρακα σε υφιστάμενους βιομηχανικούς λέβητες ή σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, συμβάλλοντας στην απεξάρτηση από ορυκτά καύσιμα, μειώνοντας σημαντικά τις εκπομπές σε αέρια του θερμοκηπίου, ενώ παράλληλα επιτρέπει τη μετάβαση στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

4. Μονάδες ΕΑΑ. Το SRF χρησιμοποιείται ως καύσιμη για την παραγωγή θερμότητας ή ηλεκτρικής ενέργειας σε μονάδες ενεργειακής αξιοποίησης, επιτρέποντας την αξιοποίηση των οργανικών αποβλήτων με σκοπό την αποτροπή της ταφής τους και τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

5. Τηλεθέρμανση. Το SRF χρησιμοποιείται σε συστήματα τηλεθέρμανσης για παραγωγή θερμότητας σε εμπορικά κτίρια ή οικίες ως ανανεώσιμη και οικονομικά αποδοτική λύση μειώνοντας την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα.

6. Βιομηχανικές διεργασίες. Το SRF χρησιμοποιείται σε διάφορες διεργασίες των βιομηχανιών, στις οποίες απαιτείται θερμότητα, αντικαθιστώντας τα ορυκτά

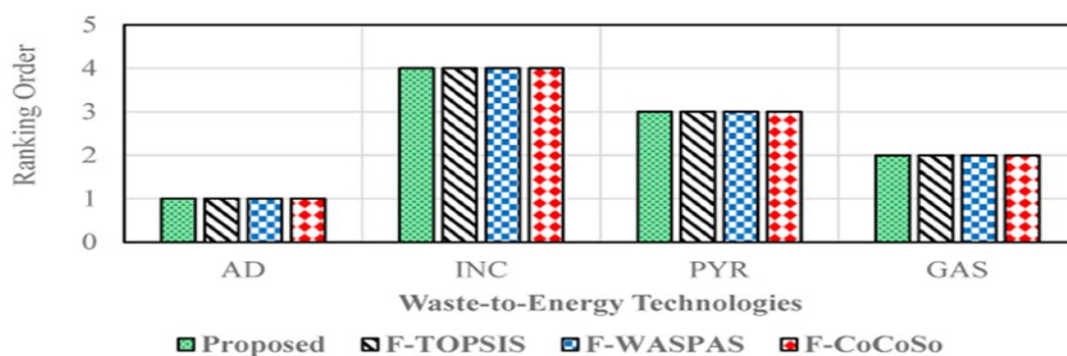
καύσιμα, μειώνοντας τις εκπομπές σε άνθρακα και συμβάλλοντας σε βιώσιμες διαδικασίες στην παραγωγή.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι εφαρμογές του SRF δύναται να διαφοροποιούνται ανάλογα με τους τοπικούς κανονισμούς, τη ζήτηση της αγοράς και τις υποδομές που υπάρχουν, και επιπλέον τα χαρακτηριστικά και η ποιότητα του παραγόμενου SRF από τη βιοξήρανση επηρεάζουν την καταλληλότητά του ως προς την χρήση του.

Η βιοξήρανση ή βιολογική ξήρανση για την επεξεργασία αποβλήτων που περιέχουν υψηλή υγρασία αποτελεί μία εναλλακτική και έξυπνη λύση. Είναι γεγονός ότι η βιοξήρανση αποτελεί μία φυσική και αυτόματη τεχνολογική διαδικασία θέρμανσης, κατά την οποία απελευθερώνεται βιολογική θερμότητα λόγω της αποσύνθεσης της οργανικής ύλης. Χρησιμοποιείται για την εξάτμιση του νερού σε όσο το δυνατό μικρότερο χρόνο παραμονής και στοχεύει στη μείωση της υγρασίας των ΑΣΑ διατηρώντας το μέγιστο της ακαθάριστης θερμαντικής αξίας τους και βελτιώνοντας την ποιότητα του ανακτώμενου στερεού καυσίμου (SRF). Στην πραγματικότητα είναι παρόμοια διαδικασία με την κομποστοποίηση με σκοπό την επαναχρησιμοποίηση του βιοαποξηραμένου υλικού.

5.9. Αξιολόγηση WtE μέσω τεσσάρων μοντέλων

Προκειμένου να επαληθευτεί η αποτελεσματικότητα, η ορθότητα και το επίπεδο συνέπειας του προτεινόμενου μοντέλου, οι Alao et al. (2022) πραγματοποίησαν μία συγκριτική ανάλυση με τρία άλλα εργαλεία πολυκριτήριας ανάλυσης αποφάσεων (MCDM) βασισμένα στη θεωρία των ασαφών συνόλων, συμπεριλαμβανομένων των Fuzzy Weighted Aggregated Sum-Product Assessment (F-WASPAS), Fuzzy Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (F-TOPSIS) και Fuzzy Combined Compromise Solution (Fuzzy-CoCoSo). Η επιλογή αυτών των μοντέλων βασίζεται στην ευελιξία, την απλότητα και την αποδοτικότητά τους. Ένα βασικό χαρακτηριστικό που διαφοροποιεί τα διάφορα μοντέλα MCDM είναι οι μέθοδοι κανονικοποίησης των κριτηρίων. Έχει υποστηριχθεί ότι ο τρόπος κανονικοποίησης των δεδομένων στα MCDM μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τα αποτελέσματα κατάταξης των τεχνολογιών. Για να διασφαλιστεί η ομοιομορφία, η ίδια γραμμική μέθοδος μέγιστης κανονικοποίησης (linear-max normalization) που εφαρμόζεται στο προτεινόμενο μοντέλο υιοθετείται για όλα τα συγκρινόμενα εργαλεία. Τα αποτελέσματα για τα τρία συγκρινόμενα εργαλεία και το προτεινόμενο μοντέλο παρουσιάζονται στο Σχήμα 21.



Σχήμα 21. Σύγκριση της προτεινόμενης μεθόδου με υπάρχοντα μοντέλα (Alao et al., 2022).

Από το Σχήμα 21, προκύπτει ότι όλα τα συγκρινόμενα εργαλεία είναι απολύτως συνεπή με το προτεινόμενο μοντέλο, καθώς παρήγαγαν παρόμοια σειρά κατάταξης για τις τεχνολογίες WtE. Ορισμένα από τα οφέλη των συστημάτων μετατροπής αποβλήτων σε ενέργεια περιλαμβάνουν: 1) τον περιορισμό των περιβαλλοντικών κινδύνων, 2) την παραγωγή καθαρότερης και ανανεώσιμης ενέργειας και 3) τη δημιουργία θέσεων εργασίας για τον τοπικό πληθυσμό. Το μοντέλο αυτό λαμβάνει υπόψη τόσο τη γνώση των ειδικών όσο και τα πραγματικά δεδομένα απόδοσης των τεχνολογιών, επιτρέποντας στους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων να επιλέξουν την καταλληλότερη λύση υπό συνθήκες αβεβαιότητας και πολλαπλών αντικρουόμενων κριτηρίων. Τα συνολικά αποτελέσματα έδειξαν την εξής σειρά κατάταξης:

αναερόβια χώνευση > αεριοποίηση > πυρόλυση >αποτέφρωση

Επομένως, η αναερόβια χώνευση αναδείχθηκε ως η πιο βιώσιμη με την καύση να αναδεικνύεται ως η λιγότερο βιώσιμη τεχνολογία. Στην ανάλυση, η αεριοποίηση κατέλαβε τη δεύτερη θέση, ενώ η πυρόλυση την τρίτη. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν επίσης ότι η προτεινόμενη μέθοδος επιτρέπει ευέλικτη λήψη αποφάσεων, ανάλογα με τις προτιμήσεις των υπευθύνων σχετικά με τις μεθόδους στάθμισης.

5.10. Τρέχουσα κατάσταση των τεχνολογιών μετατροπής αποβλήτων σε ενέργεια

Οι Rashad et al. (2026) παρέχουν μια ολοκληρωμένη επισκόπηση των τεχνολογιών WtE, περιγράφοντας πέντε βασικές μεθόδους: αποτέφρωση, πυρόλυση, αεριοποίηση, κομποστοποίηση και αναερόβια χώνευση. Κάθε τεχνολογία αξιολογείται ως προς τα κύρια προϊόντα της, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τους περιορισμούς της (Πίνακας 28). Επίσης, έγινε μια ανάλυση κόστους-οφέλους για τεχνολογίες WtE (Πίνακας 29). Παρότι η αποτέφρωση μειώνει αποτελεσματικά τον όγκο των αποβλήτων, ενέχει τον κίνδυνο εκπομπής επικίνδυνων ρύπων χωρίς ισχυρά συστήματα ελέγχου ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Η πυρόλυση και η αεριοποίηση παρέχουν καθαρότερες ενεργειακές λύσεις, αλλά περιορίζονται από υψηλό λειτουργικό κόστος και τεχνικές δυσκολίες, όπως ο διαχωρισμός βιο-λαδιού και ο καθαρισμός του αερίου σύνθεσης. Η κομποστοποίηση και η αναερόβια χώνευση, αν και οικονομικές, περιορίζονται από πιο αργούς χρόνους επεξεργασίας και ευαισθησία σε ανασταλτικούς παράγοντες. Οι τεχνολογίες WtE ευθυγραμμίζονται επίσης με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας, μετατρέποντας τα απόβλητα σε ενεργειακές λύσεις που υποστηρίζουν τόσο τη διαχείριση αποβλήτων όσο και τη βιώσιμη παραγωγή ενέργειας. Παρά τα εμπόδια όπως το υψηλό αρχικό κόστος και τους περιορισμούς στις υποδομές για τις τεχνολογίες WtE υπάρχουν οι επιδοτήσεις και τα οικονομικά κίνητρα που έχουν μειώσει το κόστος κεφαλαιουχικών επενδύσεων κατά 15–25%, καθιστώντας τις τεχνολογίες προηγμένης ανάκτησης πιο εύκολα εφαρμόσιμες.

Πίνακας 28. Συνοπτική επισκόπηση τεχνολογιών WtE (Rashad et al., 2026).

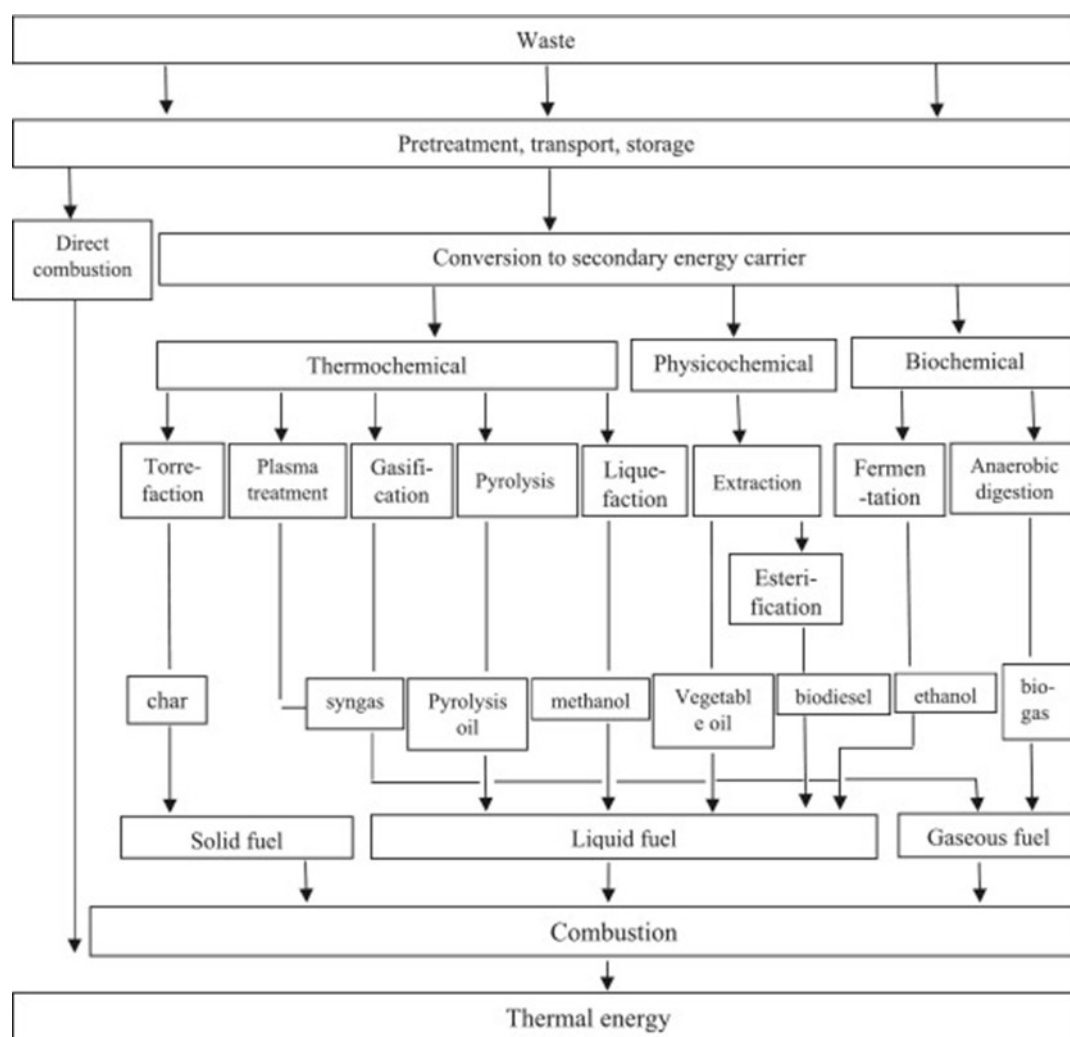
Μέθοδος	Παραγόμενα προϊόντα	Περιβαλλοντικές επιπτώσεις	Πλεονεκτήματα	Περιορισμοί
Αποτέφρωση	Θερμική ενέργεια, H ₂ O, CO ₂ , ιχνοαέρια, τέφρα πυθμένα, υπάμενη τέφρα	Εκπομπές αέριων ρύπων όπως NO _x , SO _x , CO _x , διοξίνες, πολυαρωματικοί υδρογονάνθρακες και σωματιδιακή τέφρα	• Εναλλακτική λύση για την ταφή επικίνδυνων αποβλήτων • Σημαντική μείωση όγκου και μάζας αποβλήτων προς ταφή	• Απαιτείται διαχείριση τέφρας (βαρέα μέταλλα) • Υψηλό κόστος συστημάτων αντιρρύπανσης
Πυρόλυση	Βιοέλαιο, αέριο σύνθεσης, στερεό υπόλειμμα (char), τέφρα	Εκπομπές NO _x , SO _x , NH ₃ , H ₂ S και λοιπών αερίων καύσης	• Χαμηλότερη παραγωγή διοξινών και NO_x σε σχέση με την καύση • Καταλληλότητα για οργανικά απόβλητα και πλαστικά • Ενσωματωμένα συστήματα ελέγχου εκπομπών	• Πολύπλοκη επεξεργασία (προεπεξεργασία, διαχωρισμός, καθαρισμός προϊόντων) • Υψηλό κεφαλαιουχικό κόστος • Δυσκολίες στη διαχείριση βιοελαίου (υψηλό ιξώδες)
Αεριοποίηση	Αέριο σύνθεσης (syngas), υδρογονάνθρακες, πίσσα, στερεά υπολείμματα	Εκπομπές SO _x , NO _x , CO, διοξινών και φουρανίων	• Δυνατότητα άμεσης καύσης του syngas σε μηχανές ή λέβητες • Μειωμένη τοξικότητα εκπομπών • Καταλληλότητα για οργανικά απόβλητα (π.χ. βιομάζα, τρόφιμα)	• Πολύπλοκος σχεδιασμός εγκαταστάσεων • Έλλειψη τεχνογνωσίας λειτουργίας • Κίνδυνοι λόγω υψηλών θερμοκρασιών
Κομποστοποίηση	CO ₂ , H ₂ O, ανόργανα στοιχεία, σταθεροποιημένο οργανικό υλικό (κομπόστ)	Πιθανή παραγωγή στραγγισμάτων με κίνδυνο ρύπανσης εδάφους και υπόγειων υδάτων	• Χαμηλό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας • Μείωση χρήσης χημικών λιπασμάτων • Χαμηλές εκπομπές CH₄	• Απαιτήση μεγάλων εκτάσεων • Κίνδυνος ανάπτυξης εντόμων, τρωκτικών και παθογόνων σε περίπτωση κακής διαχείρισης
Αναερόβια χώνευση	Μεθάνιο (CH ₄), CO ₂ , H ₂ O, CO, χωνεμένο υπόλειμμα (digestate), υδρογόνο	Περιβαλλοντικά φιλική διεργασία με αξιοποίηση οργανικών αποβλήτων	• Συμπαγής σχεδιασμός και μικρές απαιτήσεις χώρου • Παραγωγή βιοαερίου για ενεργειακή αξιοποίηση	• Απαιτήση υψηλής ποιότητας οργανικής πρώτης ύλης για βέλτιστη απόδοση

Πίνακας 29. Ανάλυση κόστους-οφέλους τεχνολογιών WtE(Rashad et al., 2026)

Τύπος τεχνολογίας & τοποθεσία	Εγκατεστημένη ισχύς (MW)	Κεφαλαιουχικό κόστος (εκατ. \$)	Οριακό κόστος ηλεκτρικής ενέργειας (\$/kWh)	Βασικά οφέλη
Καταλυτική πυρόλυση – πλαστικά αστικά απόβλητα, Κίνα	30	45	0.065	Απόδοση 42 MJ/kg βιο-λαδιού, 70–80% θερμική απόδοση, σημαντική μείωση όγκου πλαστικών αποβλήτων, παραγωγή υψηλής ποιότητας υγρών καυσίμων
Αναερόβια χώνευση – οργανικά απόβλητα, Γερμανία	5	12	0.055	Παραγωγή μεθανίου 396 ml/g, το χωνεμένο υπόλειμμα χρησιμοποιείται ως βιολίπασμα, μείωση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, συμβατότητα με κυκλική οικονομία
Αποτέφρωση με ανάκτηση ενέργειας – Ηνωμένο Βασίλειο	20	100	0.085	Απόδοση ανάκτησης ενέργειας 25–30%, μείωση όγκου αποβλήτων έως 90%, ενσωμάτωση σε δίκτυα τηλεθέρμανσης, συμμόρφωση με αυστηρά πρότυπα εκπομπών
Αποτέφρωση MSW – Ινδονησία	10	20	0.070	Μετατροπή αποβλήτων χαμηλής θερμογόνου δύναμης σε ενέργεια, μείωση χρήσης χωματερών, δυνατότητα συν-καύσης με άνθρακα σε υφιστάμενους σταθμούς
Αεριοποίηση – βιομάζα, Ολλανδία	15	30	0.060	Υψηλή ενεργειακή απόδοση, παραγωγή αερίου σύνθεσης (syngas) για ηλεκτρισμό και θερμότητα, ευελιξία καυσίμου, μειωμένες εκπομπές σε σχέση με την καύση
Πυρόλυση – οργανικό κλάσμα MSW, ΗΠΑ	25	50	0.075	Ανάκτηση προϊόντων όπως πυρολυτικό λάδι και άνθρακας, μείωση αποβλήτων ελαστικών, ενσωμάτωση σε βιομηχανικές διεργασίες, συμβολή στην κυκλική οικονομία
Αναερόβια χώνευση – MSW, Ινδία	2	5	0.050	Παραγωγή βιοαερίου για μαγείρεμα και ηλεκτρισμό, μείωση αποβλήτων τροφίμων, παραγωγή πλούσιου σε θρεπτικά στοιχεία του χωνεμένου υπολείμματος
Αποτέφρωση – αστικά στερεά απόβλητα, Ιαπωνία	30	120	0.090	Υψηλή απόδοση μείωσης αποβλήτων, ανάκτηση ενέργειας για ηλεκτρισμό και θέρμανση, προηγμένα συστήματα ελέγχου εκπομπών, ενσωμάτωση σε αστικές υποδομές
Αεριοποίηση – MSW, Βραζιλία	10	25	0.065	Αξιοποίηση αποβλήτων, παραγωγή καθαρής ενέργειας, μείωση καύσης υπαίθρου, υποστήριξη ηλεκτροδότησης αγροτικών περιοχών

5.11.Τεχνικές αξιοποίησης αποβλήτων βιομάζας για παραγωγή ενέργειας

Οι Konyannik & Lavie (2025) παρέχουν μια σύνοψη των διαφόρων τεχνολογιών μετατροπής και των αντίστοιχων παραγόμενων προϊόντων τους (Σχήμα 22), αναδεικνύοντας τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και την αποδοτικότητα κάθε τεχνικής στη διαδικασία αξιοποίησης. Τα τελικά προϊόντα που προκύπτουν από κάθε τεχνική αποτελούν βασικό δείκτη του απόδοσης, καθώς το τελικό αποτέλεσμα αντανakλά ουσιαστικά την αναμενόμενη απόδοση κάθε διαδικασίας.



Σχήμα 22. Μέθοδοι επεξεργασίας αποβλήτων για την αξιοποίηση βιομάζας (Konyannik & Lavie, 2025).

Η περιβαλλοντική επίπτωση των διεργασιών αξιοποίησης αποβλήτων βιομάζας αποτελεί μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους για την αξιολόγηση της βιωσιμότητάς τους. Ανάλογα με τη διεργασία αξιοποίησης και τον τύπο της πρώτης ύλης, ο βαθμός εκπομπών και παραγωγής παραπροϊόντων διαφέρει σημαντικά. Για παράδειγμα, οι διεργασίες πυρόλυσης και αεριοποίησης παράγουν αέριες εκπομπές υπό μορφή CO₂, CO και πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs), οι οποίες πρέπει να ελέγχονται και να υφίστανται κατάλληλη επεξεργασία ώστε να ελαχιστοποιούνται οι περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις. Αντίθετα, η αναερόβια χώνευση παράγει ένα πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά παραπροϊόν, γνωστό ως χωνεμένο υπόλειμμα, το

οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βιολίπασμα. Ωστόσο, η διαδικασία αυτή συνοδεύεται από ζητήματα ελέγχου οσμών και παθογόνων μικροοργανισμών, τα οποία μπορούν να αντιμετωπιστούν μέσω προσεκτικής παρακολούθησης της διεργασίας και βελτιστοποίησης των συνθηκών χώνευσης. Για το λόγο αυτό έχουν πραγματοποιηθεί αξιολογήσεις AKZ με σκοπό τη συνολική αποτίμηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των διεργασιών αξιοποίησης αποβλήτων βιομάζας, λαμβάνοντας υπόψη εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, κατανάλωση ενέργειας και νερού, καθώς και εξάντληση φυσικών πόρων. Είναι σημαντικό, επίσης, να τονιστεί ότι αναπτύσσονται υβριδικά συστήματα και νέοι καταλύτες με στόχο τη βελτίωση της αποδοτικότητας και της βιωσιμότητας των διεργασιών αξιοποίησης αποβλήτων βιομάζας. Οι τεχνολογίες αυτές έχουν τη δυνατότητα να παράγουν ανανεώσιμη ενέργεια, να μειώνουν τα απόβλητα και να προωθούν βιώσιμες μεθόδους παραγωγής. Για παράδειγμα, οι υβριδικοί καταλύτες μπορούν να μετατρέπουν το CO₂ σε πολύτιμες χημικές ενώσεις, όπως το αιθυλένιο, συμβάλλοντας στην παγκόσμια προσπάθεια επίτευξης μηδενικών καθαρών εκπομπών άνθρακα.

Η οικονομική σκοπιμότητα της αξιοποίησης αποβλήτων βιομάζας επηρεάζεται από ένα σύνολο παραγόντων, όπως ο τύπος και η ποιότητα της πρώτης ύλης, η αποδοτικότητα της διεργασίας και η ζήτηση της αγοράς για ενεργειακά προϊόντα και παραπροϊόντα. Οι θερμικές διεργασίες, και ιδιαίτερα η αεριοποίηση, απαιτούν συχνά σημαντικές αρχικές επενδύσεις, γεγονός που μπορεί να αποτελέσει εμπόδιο εισόδου για ορισμένους ενδιαφερόμενους φορείς. Ωστόσο, οι διεργασίες αυτές μπορούν να προσφέρουν μακροπρόθεσμα οικονομικά οφέλη μέσω υψηλών ενεργειακών αποδόσεων και της αξιοποίησης πολύτιμων παραπροϊόντων. Αντίθετα, οι βιολογικές διεργασίες, όπως η αναερόβια χώνευση, απαιτούν συνήθως χαμηλότερες κεφαλαιουχικές επενδύσεις. Τέλος, η οικονομική βιωσιμότητα των υβριδικών συστημάτων επηρεάζεται από την πολυπλοκότητα της ενσωμάτωσής τους και το αυξημένο αρχικό κόστος εγκατάστασης. Παρ' όλα αυτά, οι νέοι καταλύτες μπορούν να ενισχύσουν τη βιωσιμότητα των διεργασιών μέσω της βελτίωσης της αποδοτικότητας, της αύξησης των αποδόσεων των προϊόντων και της μείωσης των λειτουργικών δαπανών.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 30, η αναερόβια χώνευση και η ζύμωση παρουσιάζουν συγκριτικά χαμηλότερο κεφαλαιουχικό κόστος, ύψους 5 εκατομμυρίων και 3 εκατομμυρίων δολαρίων αντίστοιχα. Αντίθετα, η αποτέφρωση και η πυρόλυση απαιτούν υψηλές αρχικές επενδύσεις, της τάξης των 10 εκατομμυρίων και 7 εκατομμυρίων δολαρίων αντίστοιχα. Επιπλέον, οι χρόνοι αποπληρωμής των διεργασιών κυμαίνονται από 4 έτη στην περίπτωση της ζύμωσης έως 8 έτη στην περίπτωση της αποτέφρωσης.

Η αξιοποίηση αποβλήτων βιομάζας παρουσιάζει σύνθετες τεχνικές προκλήσεις, οι οποίες διαφοροποιούνται ανάλογα με την εφαρμοζόμενη τεχνική. Οι τεχνικές προκλήσεις που σχετίζονται με την αξιοποίηση αποβλήτων βιομάζας μπορούν να κατηγοριοποιηθούν γενικά σε τρεις βασικούς τομείς: την προεπεξεργασία της πρώτης ύλης, τη βελτιστοποίηση της διεργασίας και την ενσωμάτωση με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και συστήματα διαχείρισης αποβλήτων. Για την αντιμετώπιση αυτών των τεχνικών προκλήσεων και τη βελτίωση της συνολικής αποδοτικότητας, βιωσιμότητας και εφαρμοσιμότητας της αξιοποίησης αποβλήτων βιομάζας, μπορούν να εφαρμοστούν διάφορες βασικές λύσεις (Πίνακας 31).

Πίνακας 30. Οικονομική βιωσιμότητα και ανάλυση κόστους.

Τεχνική αξιοποίησης	Κεφαλαιου- χικό κόστος (\$)	Λειτουργικό κόστος (\$/έτος)	Περίοδος αποπληρωμής (έτη)	Εμπόδια κλιμάκωσης
Αναερόβια χώνευση	5.000.000	500.000	5	Μεταβλητότητα πρώτης ύλης, έλεγχος ποιότητας βιοαερίου
Αποτέφρωση	10.000.000	1.000.000	8	Υψηλό κεφαλαιουχικό κόστος, έλεγχος ατμοσφαιρικής ρύπανσης
Πυρόλυση	7.000.000	700.000	6	Προετοιμασία πρώτης ύλης, έλεγχος ποιότητας προϊόντων
Ζύμωση	3.000.000	300.000	4	Εποχικές διακυμάνσεις πρώτων υλών, κίνδυνος επιμόλυνσης
Υβριδικά συστήματα	8.000.000– 12.000.000	800.000– 1.200.000	5–7	Πολυπλοκότητα ενσωμάτωσης, υψηλότερο αρχικό κόστος, βελτιστοποίηση συνεργειών μεταξύ τεχνολογιών
Νέοι καταλύτες	Στάδιο έρευνας και ανάπτυξης	Μεταβλητό, ανάλογα με τη διάρκεια ζωής και την αποδοτικότητα του καταλύτη	Πιθανώς μικρότερη με βελτιστοποιημ ένη απόδοση	Δυνατότητα κλιμάκωσης, οικονομική αποδοτικότητα, σταθερότητα και αναγέννηση καταλυτών

Επομένως, η ενσωμάτωση πολλαπλών τεχνολογιών είναι κρίσιμη για τη μεγιστοποίηση της ανάκτησης ενέργειας και την υποστήριξη της μετάβασης προς ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η πυρόλυση, η αεριοποίηση, η καύση και οι βιοχημικές διεργασίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ποικιλίας ενεργειακών προϊόντων, όπως υγρά καύσιμα, στερεός βιοάνθρακας και αέριο σύνθεσης. Τα προϊόντα αυτά μπορούν είτε να υποστούν περαιτέρω επεξεργασία είτε να χρησιμοποιηθούν απευθείας, αναδεικνύοντας τη σημασία μιας ολοκληρωμένης προσέγγισης στην αξιοποίηση αποβλήτων βιομάζας. Με την ενσωμάτωση διαφόρων τεχνολογιών μέσω υβριδικών συστημάτων και νέων καταλυτών, ενισχύεται

σημαντικά η δυνατότητα παραγωγής στερεών, υγρών και αέριων καυσίμων από απόβλητα βιομάζας, συμβάλλοντας σε ένα πιο βιώσιμο ενεργειακό πλαίσιο παραγωγής.

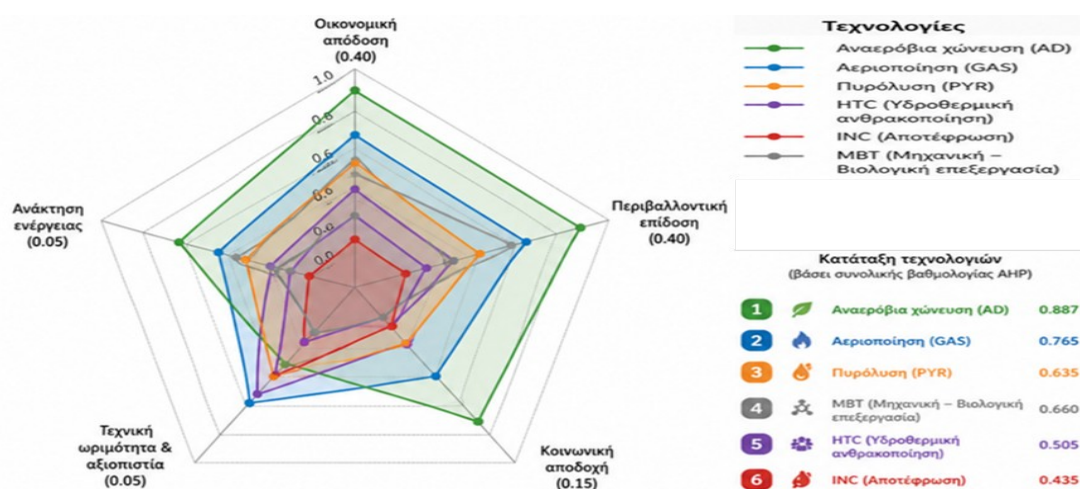
Πίνακας 31. Προκλήσεις και περιορισμοί των τεχνικών αξιοποίησης.

Τεχνική αξιοποίησης	Τεχνικές προκλήσεις	Προτάσεις βελτίωσης
Αναερόβια χώνευση	Μεταβλητότητα στην ποιότητα της πρώτης ύλης	Τεχνολογίες προεπεξεργασίας
Αποτέφρωση	Ατμοσφαιρική ρύπανση	Προηγμένα συστήματα ελέγχου εκπομπών
Πυρόλυση	Υψηλή ενεργειακή απαίτηση	Ανάπτυξη καταλυτών
Αεριοποίηση	Σχηματισμός πίσσας	Τεχνικές απομάκρυνσης πίσσας
Ζύμωση	Βελτιστοποίηση διεργασίας	Ενίσχυση ενζυμικής απόδοσης
Υβριδικά συστήματα	Πολυπλοκότητα ενσωμάτωσης, βελτιστοποίηση συνεργειών	Προηγμένος έλεγχος διεργασιών, βελτιστοποίηση σχεδιασμού συστημάτων
Νέοι καταλύτες	Σταθερότητα καταλυτών, αναγέννηση και οικονομική αποδοτικότητα	Έρευνα για ανθεκτικούς και αποδοτικούς καταλύτες, στρατηγικές μείωσης κόστους

5. 12. Αξιολόγηση τεχνολογιών WtE

Σύμφωνα με τους Khan & Kabir (2020) η αεριοποίηση, η πυρόλυση και η αναερόβια χώνευση αναδείχθηκαν πιο βιώσιμες τεχνολογίες έναντι της αποτέφρωσης κατά 33%, 65% και 111% αντίστοιχα, με την αναερόβια χώνευση να υπερτερεί από οικονομικής, κοινωνικής και περιβαλλοντικής άποψης. Οι Patil et al. (2024) κατατάσσουν την αναερόβια χώνευση στην κορυφή, ακολουθούμενη από τις HTC, INC και PYR με διανύσματα προτεραιότητας 0.348, 0.202, 0.163 και 0.148 στους οικονομικούς, περιβαλλοντικούς και κοινωνικούς τομείς. Οι Chicaiza-Ortiz et al. (2024) συνέκριναν την αεριοποίηση με την αποτέφρωση με παραμέτρους, όπως την ανθρώπινη υγεία, την ποιότητα οικοσυστήματος, την κλιματική αλλαγή και τους πόρους, με την αεριοποίηση να παρουσιάζει καλύτερη απόδοση στις περισσότερες παραμέτρους. Οι Abdeljaber et al. (2022) παρουσίασαν με ορίζοντα 25ετίας το δυναμικό ανάκτησης σε ενέργεια από ΑΣΑ με την αεριοποίηση να έχει επιτύχει τη μεγαλύτερη έναντι των υπολοίπων τεχνολογιών, καθώς ανέκτησε ενέργεια 47,0 έναντι 34,2 εκατομμύρια MWh από τη δεύτερη αποτέφρωση. Η αποτέφρωση κατέχει την πρώτη θέση σχετικά με το αποτύπωμα του άνθρακα περίπου 15.700 t CO₂-eq. Η αναερόβια χώνευση και η MBT κατατάχθηκαν στις πιο περιβαλλοντικά βιώσιμες τεχνολογίες εκπέμποντας περίπου 4.442 και 4.539 t CO₂-eq αντίστοιχα. Οι Ram et al. (2021) υποστηρίζουν ότι οι τεχνολογίες θερμικής επεξεργασίας ΑΣΑ μειώνουν δραστικά τον όγκο των αποβλήτων με παράλληλη ανάκτηση ενέργειας, με την πυρόλυση να έχει τις χαμηλότερες εκπομπές σε αέριους ρύπους, όπως οξείδια του θείου, του αζώτου και τις διοξίνες. Οι βιοχημικές τεχνολογίες έχουν επιτύχει τα τελευταία χρόνια ευρύτερη κοινωνική αποδοχή, έχοντας ως περιορισμό την αξιοποίηση του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ. Οι Mertzanakis et al. (2024) ανέδειξαν ότι η αναερόβια χώνευση θεωρείται η πλέον προτιμητέα και καταλληλότερη επιλογή λόγω της

οικονομικής αποδοτικότητας και του χαμηλότερου περιβαλλοντικού φορτίου σε σύγκριση με την αεριοποίηση, την πυρόλυση και την αποτέφρωση. Οι Abid et al. (2024) στο πλαίσιο της βιωσιμότητας και της προστασίας του περιβάλλοντος ισχυρίζονται ότι η τεχνολογία της βιοξήρανσης παράγει ένα σταθερό και ξερό υλικό, το οποίο δύναται να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας, την τηλεθέρμανση, τη σύγκausη με άλλα καύσιμα, στους κλιβάνους τσιμέντου, στις μονάδες ΕΑΑ και σε διάφορες βιομηχανικές διεργασίες. Οι Alao et al. (2022) κατέταξαν την αναερόβια χώνευση πρώτη ως τεχνολογία ανάκτησης ενέργειας από ΑΣΑ, ακολουθούμενη από την αεριοποίηση, την πυρόλυση και την αποτέφρωση. Επίσης, σύμφωνα με τους Rashad et al. (2026) τα ευρήματα δείχνουν ότι η αποτέφρωση είναι η πιο διαδεδομένη τεχνική, παρέχοντας μείωση όγκου 80–90% και ανάκτηση ενέργειας 20–35%, αλλά με υψηλές εκπομπές NO_x, SO_x και διοξινών που απαιτούν δαπανηρά συστήματα ελέγχου ατμοσφαιρικής ρύπανση. Η πυρόλυση αποδίδει 40–60% βιοέλαιο, 20–35% syngas και 10–15% βιοάνθρακα, αλλά είναι ευαίσθητη στην πρώτη ύλη, περιορίζοντας τη μεγάλη κλίμακα εφαρμογής, αν και η πλάσμα-ενισχυμένη πυρόλυση αύξησε την απόδοση βιοελαίου κατά 18%. Η αεριοποίηση, με θερμική απόδοση 45%, παράγει συνθετικό αέριο, υδρογόνο και βιοκαύσιμα, αλλά απαιτεί εκτεταμένη προεπεξεργασία, ενώ οι αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης βελτιώνουν τη μετατροπή άνθρακα κατά 12% αλλά αυξάνουν την παραγωγή πίσσας. Η αναερόβια χώνευση, κατάλληλη για απορρίμματα με υψηλή οργανική περιεκτικότητα, παράγει βιοαέριο με απόδοση 30–45%, αλλά είναι ευαίσθητη σε αμμωνία και βαρέα μέταλλα, ενώ η συγχώνευση με ζωική κοπριά αυξάνει την παραγωγή βιοαερίου κατά 20–25%. Τέλος, η κομποστοποίηση, αν και δεν αποτελεί άμεση τεχνολογία παραγωγής ενέργειας WtE, συμβάλλει σημαντικά στην εκτροπή αποβλήτων από χώρους υγειονομικής ταφής και στη μείωση εκπομπών μεθανίου, ενισχύοντας τη θέση της στην κυκλική οικονομία. Τέλος, σύμφωνα με τους Konyanlık & Lavie (2025) η αναερόβια χώνευση και η ζύμωση παρουσιάζουν συγκριτικά χαμηλότερο κεφαλαιουχικό κόστος, ύψους 5 εκατομμυρίων και 3 εκατομμυρίων δολαρίων αντίστοιχα. Αντίθετα, η αποτέφρωση και η πυρόλυση απαιτούν υψηλές αρχικές επενδύσεις, της τάξης των 10 εκατομμυρίων και 7 εκατομμυρίων δολαρίων αντίστοιχα. Επιπλέον, οι χρόνοι αποπληρωμής των διεργασιών κυμαίνονται από 4 έτη στην περίπτωση της ζύμωσης έως 8 έτη στην περίπτωση της αποτέφρωσης. Παρακάτω στο Σχήμα 23α και 23β, παρουσιάζεται πολυκριτηριακή αξιολόγηση ενεργειακής αξιοποίησης ΑΣΑ, σύμφωνα με τα παραπάνω δεδομένα.



Σχήμα 23α. Πολυκριτηριακή αξιολόγηση τεχνολογιών ΕΑΑ

ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΣΑ



Σχήμα 23β. Πολυκριτηριακή αξιολόγηση τεχνολογιών ΕΑΑ.

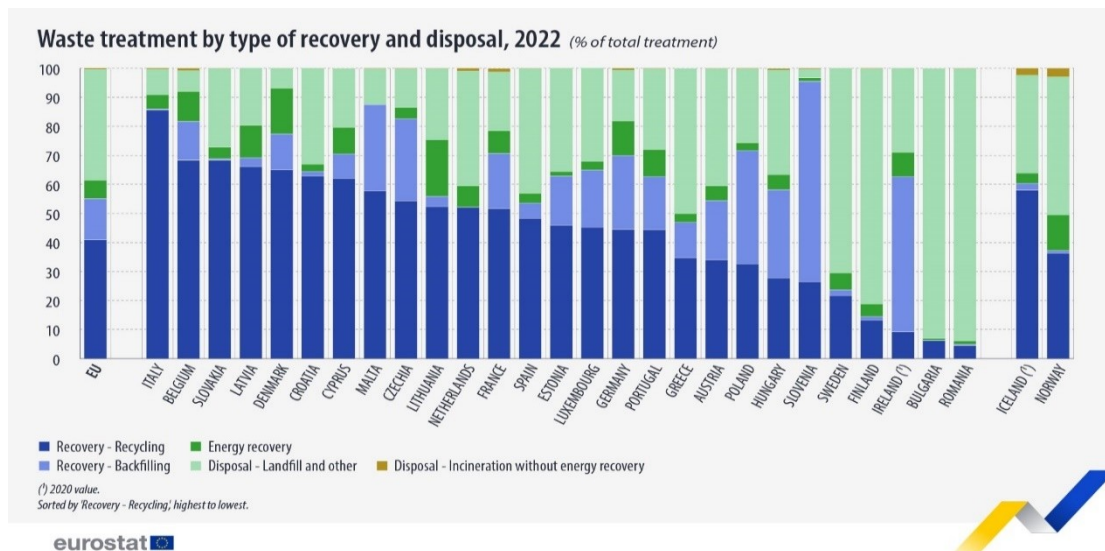
5.13. Ανάκτηση Ενέργειας από ΑΣΑ στην Ελλάδα

Σύμφωνα με το Εθνικό Σχέδιο Διαχείρισης Αποβλήτων (ΕΣΔΑ, 2020) γίνεται αναφορά για τη δημιουργία 28 μονάδων επεξεργασίας βιοαποβλήτων (ΜΕΒΑ) και αποβλήτων (ΜΕΑ), για τον σχεδιασμό 4 μονάδων παραγωγής ενέργειας από ΑΣΑ και 30 επιυλτόν μονάδων διαχείρισης βιοαποβλήτων, στις οποίες θα αξιοποιούνται τα υπολείμματα από τα κέντρα διαλογής ανακυκλώσιμων υλικών (ΚΔΑΥ) και των ΜΕΑ, με σκοπό την παραγωγή δευτερογενούς εναλλακτικού καυσίμου (RDF/SRF). Οι μονάδες ΕΑΑ θα υποδέχονται τα υπολείμματα των σύμμεικτων αποβλήτων ή και δευτερογενών καυσίμων για την παραγωγή ενέργειας. Παρόλο τον σχεδιασμό η ανάκτηση ενέργειας από απόβλητα στην Ελλάδα παραμένει σε χαμηλά ποσοστά σε σχέση με τις υπόλοιπες χώρες στην Ευρώπη (Σχήμα 24 και 25).

Μέχρι το 2022, μόνο το 3% των απορριμάτων αξιοποιούνταν ενεργειακά



Σχήμα 24. Διαχείριση απορριμμάτων στην Ελλάδα, 2018 – 2022. (πηγή: <http://ec.europa.eu/eurostat>).



Σχήμα 25. Επεξεργασία αποβλήτων στις χώρες της Ευρώπης ανά τύπο ανάκτησης και διάθεσης, 2022 (πηγή: <http://ec.europa.eu/eurostat>).

Στόχος της χώρας μας αποτελεί να έχουν ολοκληρωθεί οι μονάδες ΕΑΑ και έως το 2030 να καλύπτουν τις ενεργειακές ανάγκες στο 1,5%. Βέβαια, πρωταρχικός σκοπός αποτελεί να ξεπεραστούν κάποιες αδυναμίες, όπως:

- Το υψηλό κόστος επένδυσης
- Τα υψηλά λειτουργικά κόστη
- Η έλλειψη έμπειρου προσωπικού
- Πιθανοί γεωγραφικοί περιορισμοί χωροθέτησης

Ωστόσο παραμένει ο στόχος η ενεργειακή αξιοποίηση να φτάσει το 32% το 2030. Όσον αφορά την παραγωγή βιομεθανίου στην ΕΕ μπορεί να φτάσει τα 41 δισ. m³ ως το 2030, ενώ στην Ελλάδα ήταν μόλις 0,51 το δυναμικό αναερόβιας επεξεργασίας και 0,03 δισ. m³ θερμικής αεριοποίησης ετησίως, με την απόρριψη των ΑΣΑ σε χώρους υγειονομικής ταφής να παραμένει υψηλό (50%).

Η ενεργειακή αξιοποίηση των ΑΣΑ αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα της σύγχρονης διαχείρισης αποβλήτων στην Ελλάδα, ιδιαίτερα υπό το πρίσμα των ευρωπαϊκών στόχων για τη μείωση της υγειονομικής ταφής, την ενίσχυση της κυκλικής οικονομίας και τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Οι μελέτες που εξετάζονται αναδεικνύουν τις τεχνολογικές, οικονομικές, περιβαλλοντικές και κοινωνικές διαστάσεις των διαφορετικών μεθόδων ενεργειακής αξιοποίησης αποβλήτων, όπως η ανάκτηση βιοαερίου από ΧΥΤΑ, η αναερόβια χώνευση, η αποτέφρωση, η παραγωγή RDF/SRF και η κομποστοποίηση.

Οι Tsatsarelis & Karagiannidis (2008) ανέδειξαν τη σημασία της έγκαιρης εκτίμησης της παραγωγής βιοαερίου στους ελληνικούς ΧΥΤΑ, προκειμένου να αξιολογηθεί η δυνατότητα παραγωγής ενέργειας και να περιοριστούν οι περιβαλλοντικοί και υγειονομικοί κίνδυνοι. Διαπιστώθηκε ότι η ενεργειακή αξιοποίηση του βιοαερίου είναι οικονομικά βιώσιμη κυρίως σε μεγάλους χώρους ταφής, ενώ η συμμόρφωση με την ευρωπαϊκή νομοθεσία για τον περιορισμό των βιοαποδομήσιμων αποβλήτων επηρεάζει σημαντικά τη μελλοντική παραγωγή μεθανίου. Παράλληλα, τονίστηκε η ανάγκη εγκατάστασης αποδοτικών συστημάτων συλλογής βιοαερίου ήδη από τα πρώτα στάδια λειτουργίας των ΧΥΤΑ.

Οι Gewald et al. (2012) επικεντρώθηκαν στη μονάδα αξιοποίησης βιοαερίου στα Άνω Λιόσια, επισημαίνοντας ότι, παρά την υψηλή ηλεκτρική απόδοση, μεγάλο ποσοστό της θερμικής ενέργειας παραμένει ανεκμετάλλευτο. Για τον λόγο αυτό

προτάθηκαν τεχνολογίες ανάκτησης θερμότητας, όπως ο οργανικός κύκλος Rankine, με στόχο τη βελτίωση της συνολικής ενεργειακής απόδοσης των εγκαταστάσεων.

Οι Kondili et al. (2012) πραγματοποίησαν πολυκριτηριακή ανάλυση διαφορετικών τεχνολογιών ενεργειακής αξιοποίησης ΑΣΑ στην Ελλάδα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο ελεγχόμενος χώρος υγειονομικής ταφής υπερτερεί όταν δίνεται έμφαση στο χαμηλό αρχικό κόστος, ενώ η αποτέφρωση καθίσταται ανταγωνιστικότερη όταν αυξάνεται η βαρύτητα της υποκατάστασης ορυκτών καυσίμων και της ενεργειακής απόδοσης. Η μελέτη υπογράμμισε ότι η βελτίωση της τεχνολογικής απόδοσης των μονάδων αποτέφρωσης μπορεί να ενισχύσει σημαντικά τη βιωσιμότητά τους.

Σημαντική διάσταση στη διαχείριση των βιοαποβλήτων παρουσιάζουν οι μελέτες των Malamis et al. (2017) και Maragkaki et al. (2022), οι οποίες εξετάζουν τη χωριστή συλλογή οργανικών αποβλήτων και την κομποστοποίηση. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η παραγωγή κομπόστ από διαχωρισμένα βιοαπόβλητα παρουσιάζει σημαντικά καλύτερα ποιοτικά χαρακτηριστικά σε σύγκριση με το compost-like output (CLO) από σύμμεικτα απορρίμματα, ιδιαίτερα ως προς τις συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων και παθογόνων μικροοργανισμών. Παράλληλα, διαπιστώθηκε ότι οι αποκεντρωμένες μονάδες κομποστοποίησης μπορούν να προσφέρουν περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη, ιδιαίτερα σε νησιωτικές και τουριστικές περιοχές.

Οι Zorpas et al. (2018) ανέδειξαν τη σημασία της οικιακής κομποστοποίησης στις νησιωτικές περιοχές της Ελλάδας, όπου το οργανικό κλάσμα των αποβλήτων είναι ιδιαίτερα αυξημένο. Η εφαρμογή της συμβάλλει στη μείωση των αποβλήτων που οδηγούνται σε ταφή και στη μείωση του κόστους διαχείρισης, ενώ απαιτείται παράλληλα ενημέρωση και παροχή κινήτρων προς τους πολίτες.

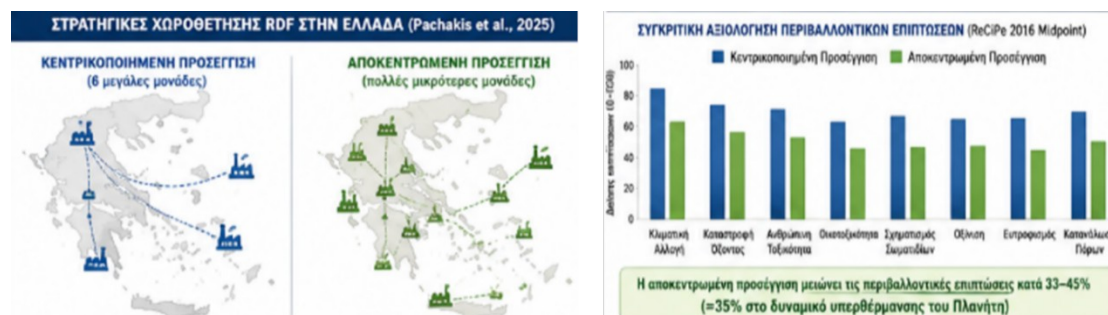
Στον τομέα των δευτερογενών καυσίμων RDF/SRF, οι Gerassimidou et al. (2020) ανέλυσαν τη θερμική συμπεριφορά των καυσίμων αυτών μέσω θερμοσταθμικής ανάλυσης (TGA), αναδεικνύοντας τη σύνθετη και ετερογενή φύση τους. Η μελέτη υπογράμμισε τους βασικούς περιορισμούς, οι οποίοι είναι οι επικαλυπτόμενες περιοχές αποικοδόμησης, η αβεβαιότητα σχετικά με τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ συστατικών και η δυσκολία λήψης αντιπροσωπευτικών αποτελεσμάτων και τυποποίησης των υλικών.

Οι Morforoulou & Samolada (2025) εξέτασαν τη χρήση RDF/SRF στην τσιμεντοβιομηχανία ως εναλλακτικό καύσιμο, επισημαίνοντας ότι η υποκατάσταση συμβατικών καυσίμων μπορεί να μειώσει σημαντικά τις εκπομπές CO₂ και να συμβάλει στην επίτευξη των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης. Ωστόσο, η αποτελεσματική εφαρμογή απαιτεί αυστηρό έλεγχο της ποιότητας του SRF, ιδιαίτερα ως προς την περιεκτικότητα σε χλώριο, υγρασία, τέφρα και βαρέα μέταλλα. Επιπλέον, επισημάνθηκαν ζητήματα που σχετίζονται με τις εκπομπές διοξινών, τη διαχείριση της τέφρας και την κοινωνική αποδοχή της αποτέφρωσης.

Οι Vlachokostas et al. (2021) πραγματοποίησαν ανασκόπηση MCDA για τεχνολογίες WtE. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αποτέφρωση υπερέρχει τεχνολογικά λόγω υψηλής ανάκτησης ενέργειας και μεγάλης μείωσης όγκου αποβλήτων, αλλά παρουσιάζει χαμηλή κοινωνική αποδοχή. Αντίθετα, η αναερόβια χώνευση αξιολογείται θετικά σε οικονομικά και κοινωνικά κριτήρια, ιδιαίτερα για βιοαποδομήσιμα απόβλητα. Η ανάκτηση αερίου από ΧΥΤΑ θεωρείται η λιγότερο φιλική προς το περιβάλλον επιλογή λόγω χαμηλής ενεργειακής απόδοσης και υψηλών εκπομπών μεθανίου.

Η πρόσφατη μελέτη των Pachakis et al. (2025) ανέδειξε τη σημασία της αποκεντρωμένης χωροθέτησης μονάδων ενεργειακής αξιοποίησης RDF στην Ελλάδα

(Σχήμα 26). Μέσω ΑΚΖ, διαπιστώθηκε ότι οι αποκεντρωμένες μονάδες μειώνουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά 33–45% σε σύγκριση με τις μεγάλες κεντροποιημένες μονάδες, κυρίως λόγω της μείωσης των μεταφορών. Παράλληλα, οι αποκεντρωμένες υποδομές θεωρούνται πιο ευέλικτες, ανθεκτικές και κοινωνικά αποδεκτές.



Σχήμα 26. Χωροθέτησης μονάδων ενεργειακής αξιοποίησης RDF στην Ελλάδα.

Τέλος, οι Petkou et al. (2020) και ο Κιαχίδης (2022) υπογράμμισαν τη σημασία της περιβαλλοντικής εκπαίδευσης και της συμμετοχής των πολιτών για την επιτυχή εφαρμογή βιώσιμων συστημάτων διαχείρισης αποβλήτων. Η αναερόβια χώνευση αναγνωρίζεται ως ιδιαίτερα κατάλληλη τεχνολογία για τους ελληνικούς δήμους, ιδίως όταν συνδυάζεται με προγράμματα διαλογής στην πηγή και συνεργασίες δημόσιου και ιδιωτικού τομέα.

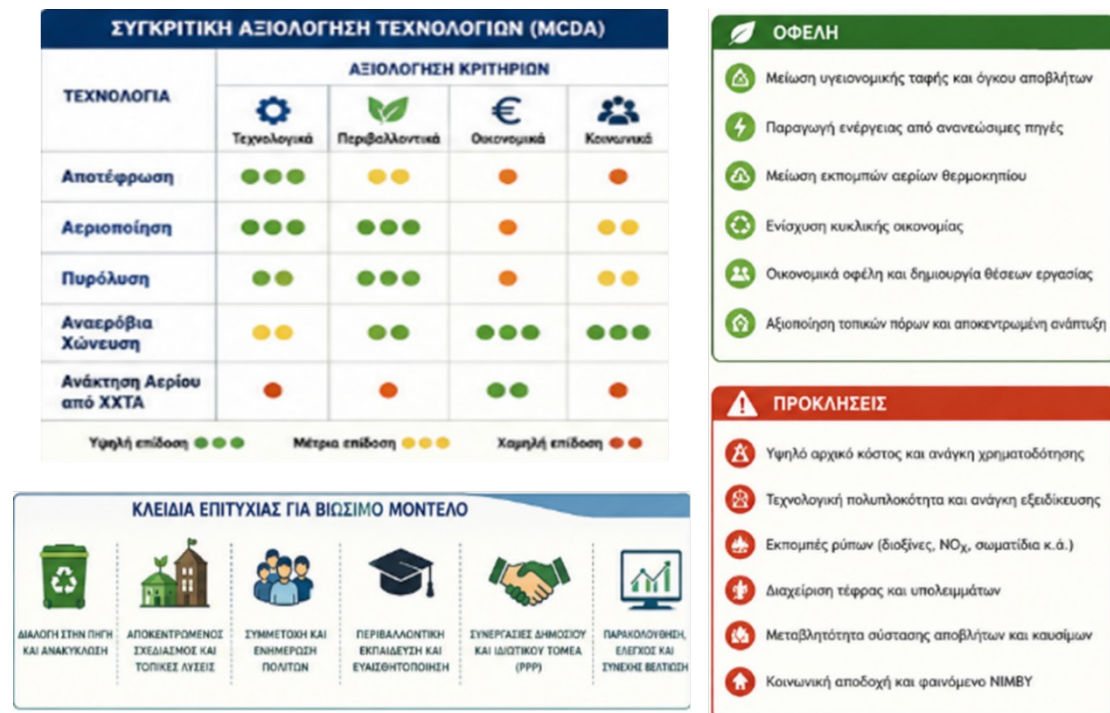
Επομένως, η καταλληλότερη στρατηγική για την Ελλάδα θα μπορούσε να βασίζεται στα εξής:

1. **Διαλογή στην πηγή**
 - ο Υποχρεωτική χωριστή συλλογή βιοαποβλήτων.
 - ο Ενίσχυση των «καφέ κάδων».
 - ο Εκτεταμένα προγράμματα ενημέρωσης πολιτών.
2. **Αναερόβια χώνευση οργανικών αποβλήτων**
 - ο Παραγωγή βιοαερίου και ηλεκτρικής/θερμικής ενέργειας.
 - ο Παραγωγή χωνεμένου υπολείμματος που μπορεί να αξιοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό.
 - ο Ιδιαίτερα κατάλληλη για αστικά κέντρα και αγροτικές περιοχές με οργανικά υπολείμματα.
3. **Αποκεντρωμένες μονάδες κομποστοποίησης**
 - ο Κατάλληλες για νησιά και τουριστικές περιοχές.
 - ο Μείωση μεταφορικού κόστους και εκπομπών.
 - ο Ενίσχυση της τοπικής κυκλικής οικονομίας.
4. **Παραγωγή RDF/SRF από το υπολειμματικό κλάσμα**
 - ο Αξιοποίηση κυρίως στην τσιμεντοβιομηχανία.
 - ο Αυστηρός ποιοτικός έλεγχος για περιορισμό εκπομπών και προστασία δημόσιας υγείας.
5. **Περιορισμένη χρήση αποτέφρωσης**
 - ο Μόνο για το μη ανακυκλώσιμο υπόλειμμα.
 - ο Με σύγχρονα συστήματα αντιρρύπανσης.
 - ο Όχι ως κύρια τεχνολογία, λόγω υψηλού κόστους και χαμηλής κοινωνικής αποδοχής.
6. **Σταδιακή κατάργηση της ταφής**

- ο Οι ΧΥΤΑ να λειτουργούν μόνο για τελικό αδρανές υπόλειμμα.
- ο Υποχρεωτική ανάκτηση και αξιοποίηση βιοαερίου.

Οι Ντοάς & Δούναβης (2024) ισχυρίζονται ότι τα τελευταία χρόνια στην Ελλάδα σε νομοθετικό επίπεδο έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος όσον αφορά στη διαχείριση των αποβλήτων. Αντίθετα, σε επίπεδο εφαρμογής δεν ακολουθήθηκε από ανάλογη πρόοδος με αποτέλεσμα οι επιπτώσεις στο περιβάλλον και στην κοινωνία να είναι σημαντικές. Επομένως, είναι γενικά αποδεκτό ότι πρέπει να αναζητηθεί μια λύση άμεσα από περιβαλλοντικής, κοινωνικής και τεχνικό-οικονομικής πλευράς. Η ΕΕ έχει θέσει φιλόδοξους στόχους έως το 2030, οι οποίοι προβλέπουν η ανακύκλωση/ επαναχρησιμοποίηση να φτάσει το 80% για τα απορρίμματα συσκευασίας, το 70% για τα αστικά απόβλητα και να καταργηθεί η υγειονομική ταφή για το χαρτί, το γυαλί, τα πλαστικά, τα μέταλλα και τα οργανικά. Συνεπώς, για να ξεπεραστούν τα προβλήματα που υφίστανται στο σχεδιασμό της διαχείρισης των αποβλήτων σε τοπικό, περιφερειακό και κεντρικό επίπεδο, είναι ανάγκη να δημιουργηθεί ένα συλλογικό όργανο που θα συμβάλλει με στοχευόμενες ενέργειες στην επίτευξη των στόχων.

Συνολικά, η βιβλιογραφία καταδεικνύει ότι η αποτελεσματική ενεργειακή αξιοποίηση των ΑΣΑ στην Ελλάδα απαιτεί συνδυασμό τεχνολογικών λύσεων, αποκεντρωμένο σχεδιασμό, ενίσχυση της ανακύκλωσης και της διαλογής στην πηγή, καθώς και ενεργή συμμετοχή των πολιτών (Σχήμα 27). Η μετάβαση προς ένα βιώσιμο μοντέλο διαχείρισης αποβλήτων προϋποθέτει ισορροπία μεταξύ περιβαλλοντικών, οικονομικών και κοινωνικών παραμέτρων, με στόχο τη μείωση της υγειονομικής ταφής και την προώθηση της κυκλικής οικονομίας.



Σχήμα 27. Ενεργειακή αξιοποίηση των ΑΣΑ στην Ελλάδα

6. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η Δυτική Ευρώπη ήταν η μεγαλύτερη αγορά στην ηλεκτρική ενέργεια από βιομάζα το 2024, ακολουθούμενη από την περιοχή Ασίας-Ειρηνικού. Η παραγωγή ενέργειας από βιομάζα αναμένεται να παρουσιάσει υψηλή ανάπτυξη στο μέλλον λόγω της αύξησης του πληθυσμού, της αστικοποίησης και των αυξανόμενων επενδύσεων στην παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Το μέγεθος της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από βιομάζα αναμένεται να φτάσει τα 75,7 δισεκατομμύρια δολάρια έως το 2029, με ετήσιο σύνθετο ρυθμό ανάπτυξης 5,8% (Σχήμα 28).



Σχήμα 28. Παγκόσμια έκθεση αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από βιομάζα 2025 (Konyannik & Lavie, 2025 πηγή: <https://www.thebusinessresearchcompany.com/>).

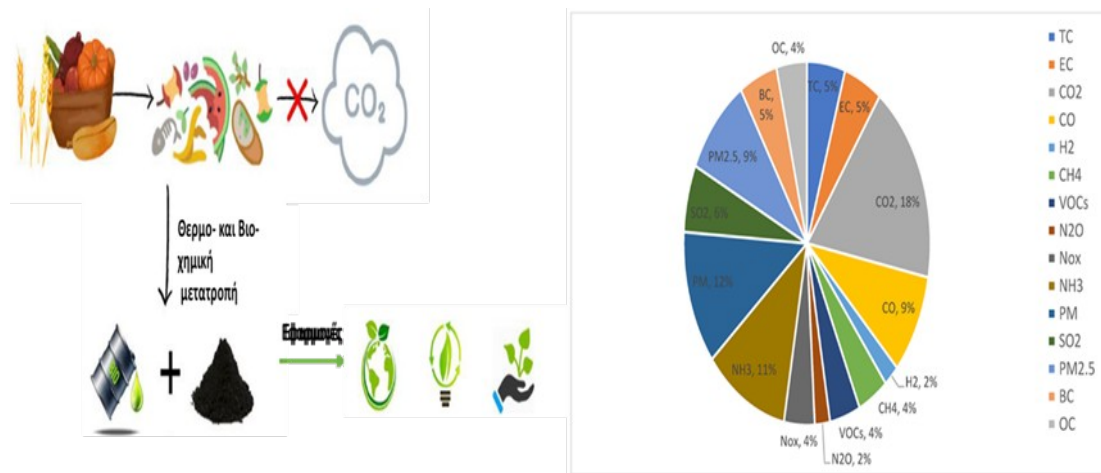
Η πρωτογενής κατανάλωση ενέργειας της Ευρωπαϊκής Ένωσης έχει υποστεί σημαντικές αλλαγές από το 1990 έως το 2020. Σύμφωνα με το Σχήμα 29, η κατανάλωση ενέργειας κορυφώθηκε το 2005, με αύξηση 15,1% σε σχέση με τον βασικό στόχο αναφοράς. Ωστόσο, από τότε ακολούθησε γενικά πτωτική πορεία, με ορισμένες αξιοσημείωτες μειώσεις αλλά και μικρές αυξήσεις. Το 2020, η κατανάλωση ενέργειας της ΕΕ ήταν 3,0% πάνω από τον στόχο που είχε τεθεί για το συγκεκριμένο έτος.



Σχήμα 29. Πρωτογενής κατανάλωση ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση (Konyannik & Lavie, 2025, πηγή: <http://ec.europa.eu/eurostat>)

Ο μπλε δείκτης στο γράφημα υποδεικνύει ότι απαιτείται περαιτέρω μείωση κατά 19,9% για την επίτευξη αυτού του στόχου. Αυτό αναδεικνύει τις συνεχιζόμενες προσπάθειες που απαιτούνται από την ΕΕ για τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και την επίτευξη των στόχων της. Συνεπώς, ο στόχος του 2030 απαιτεί σημαντική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και η ΕΕ θα χρειαστεί να εφαρμόσει πολιτικές και μέτρα για την επίτευξη αυτής της μείωσης. Επομένως, η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας από βιομάζα αποτελεί μια νέα μορφή βιώσιμης παραγωγής ενέργειας, μετριάζοντας έτσι τα αυξανόμενα ζητήματα της κλιματικής αλλαγής και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τα ορυκτά καύσιμα (Konyannik & Lavie, 2025).

Επειδή η βιομάζα χρησίμευε ως πηγή καυσίμου εδώ και αιώνες και η καύση της οδηγούσε στην εκπομπή ρύπων, ιδίως αερίων του θερμοκηπίου με το CO₂ να είναι το κυρίαρχο συστατικό (Σχήμα 30), υπάρχει πλέον η δυνατότητα μετατροπής της σε ενέργεια μέσω σύγχρονων τεχνολογιών. Η μετατροπή της βιομάζας μέσω πράσινων τεχνολογιών αποσκοπεί στην επίλυση του προβλήματος ανάκτησης ενέργειας και της διαχείρισης των οργανικών αποβλήτων. Αυτές οι διαδικασίες αποτελούν ένα πιο περιβαλλοντικά βιώσιμο υποκατάστατο των ορυκτών καυσίμων.



Σχήμα 30. Μετατροπή της βιομάζας σε προϊόντα υψηλότερης προστιθέμενης αξίας και παγκόσμιες συνεισφορές των προϊόντων καύσης βιομάζας στις εκπομπές (πηγή: Kataya et al., 2023)

Συνεπώς, η διαχείριση και η μετατροπή της βιομάζας σε ενέργεια γίνονται ολοένα και πιο δημοφιλείς λόγω των αρνητικών επιπτώσεων που έχουν τα απόβλητα στην οικονομία, το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Άρα, τα απόβλητα μπορούν να μετατραπούν σε πολύτιμους πόρους με υψηλή απόδοση και χαμηλό κόστος, γεγονός που μπορεί να εξοικονομήσει χρήματα και να διατηρήσει τους φυσικούς πόρους. Η διαδικασία μετατροπής της οργανικής ύλης από τα ΑΣΑ οδηγεί σε αξιοποιήσιμες μορφές ενέργειας και προϊόντα υψηλής αξίας. Σε γενικές γραμμές, οι τεχνολογίες μετατροπής αποβλήτων εμπίπτουν σε δύο κατηγορίες: βιοχημικές και θερμοχημικές. Η επιλογή συγκεκριμένης τεχνολογίας ανάκτησης ενέργειας από ΑΣΑ επηρεάζεται από διάφορες μεταβλητές, όπως ο τύπος της πρώτης ύλης, η περιεκτικότητά της σε υγρασία, η ποιότητα και η ποσότητα της πρώτης ύλης βιομάζας, η διαθεσιμότητά της, τα επιθυμητά τελικά προϊόντα, οι οικονομικές παραμέτρους όπως η κερδοφορία και η προσβασιμότητα στην αγορά, και οι περιβαλλοντικές παραμέτρους. Βέβαια, ο συνδυασμός δυο ή περισσότερων διεργασιών ανάκτησης ενέργειας από απόβλητα θα μπορούσε να έχει καλύτερα αποτελέσματα (Kataya et al., 2023).

Μια ανάλυση SWOT μπορεί να αποτελέσει τη βάση για την επιλογή του καλύτερου τρόπου διαχείρισης των αποβλήτων. Οι τεχνολογίες ΕΑΑ αποτελούν εναλλακτικές λύσεις διαχείρισης και πριν την επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας η ανάλυση SWOT εξετάζοντας το τοπικό πλαίσιο εφαρμογής θα βοηθούσε σε αυτό (Σχήμα 31). Βέβαια, όλες οι απειλές και οι αδυναμίες μπορούν να επιλυθούν με μια απλή συνεργασία μεταξύ κυβερνήσεων και υπευθύνων χάραξης πολιτικής, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι και έχουν τον πρώτο λόγο.



Σχήμα 31. Ανάλυση SWOT τεχνολογιών WtE (Abid et al., 2024).

Βιοξήρανση ή Βιολογική Ξήρανση

Οι Picorini et al. (2020) διεξήγαγαν δύο δοκιμές πιλοτικής κλίμακας με στόχο να γίνει αξιολόγηση αν η βιοξήρανση δύναται να ενισχύσει τη συνολική απόδοση στη διαχείριση των ΑΣΑ σύμφωνα με τις ευρωπαϊκές προτεραιότητες. Οι δοκιμές αφορούσαν μια σημαντική ποσότητα ελαφρού κλάσματος που απορρίπτεται σε χώρους υγειονομικής ταφής, η οποία παράγεται σε μια μονάδα αναερόβιας χώνευσης κατά την υδρομηχανική προεπεξεργασία, με αποτέλεσμα να αυξάνονται το κόστος και οι επιπτώσεις απόρριψης του. Με την χρήση της βιοξήρανσης είχε ως αποτέλεσμα η ποσότητα αυτή να μειώσει το βάρος της (47-48%) και να αυξήσει τη βιολογική σταθερότητά της. Έτσι, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο με στόχο την ανάκτηση ενέργειας έπειτα από τη διαδικασία της βιοξήρανσης. Στην πραγματικότητα, η χαμηλή θερμαντική αξία που λαμβάνεται μετά την επεξεργασία βιοξήρανσης συμμορφώνεται με τις προδιαγραφές ποιότητας του ευρωπαϊκού προτύπου για τα καύσιμα που προέρχονται από απορρίμματα. Συμπερασματικά, η βιοξήρανση αποδείχθηκε μια χρήσιμη επεξεργασία που εφαρμόζεται στο ελαφρύ κλάσμα από την προεπεξεργασία του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ σε πολτοποιητή. Αυτή η μελέτη για τη βιοξήρανση ελαφρού κλάσματος έχει καταδείξει τη σκοπιμότητα αυτής της διαδικασίας στο συγκεκριμένο υπόστρωμα και ενθαρρύνει μελλοντικές έρευνες που θα μπορούσαν να διερευνήσουν την ποιότητα των εκπομπών που παράγονται από τη βιοξήρανση ή σε ενεργειακούς όρους την απώλεια ενέργειας από τη στιγμή που το οργανικό υλικό μετατρέπεται σε αέρια.

Αποτέφρωση

Οι πρώτοι αποτεφρωτήρες χρησιμοποιήθηκαν στο Ηνωμένο Βασίλειο το 1874 στο Νότιγχαμ, και στη συνέχεια στη Νέα Υόρκη των ΗΠΑ το 1885. Επί του παρόντος, υπάρχουν περισσότερες από 500 μονάδες στην ΕΕ, 76 στις ΗΠΑ και περίπου 400 στην Κίνα, όπου η συνολική δυναμικότητα επεξεργασίας έχει ξεπεράσει αυτή της ΕΕ (ISWA, 2023). Πλέον η αποτέφρωση αποτελεί την πιο δημοφιλή μέθοδο παγκοσμίως, με τη Δανία και τη Σουηδία να είναι οι ηγέτες στην παραγωγή ενέργειας από απόβλητα εδώ και έναν αιώνα. Η τεχνολογία αποτέφρωσης θεωρείται μια αποτελεσματική και ορθή τεχνολογία για τη διαχείριση των ΑΣΑ, καθώς συντελεί αποτελεσματικά στη μείωση τόσο της μάζας των αποβλήτων κατά 80 – 85 %, όσο και του όγκου κατά 95 – 96 %, ανάλογα με τις ιδιότητες των αποβλήτων. Παρόλου που η αποτέφρωση έχει πλεονεκτήματα λόγω της μείωσης των απαιτήσεων υγειονομικής ταφής και του δυναμικού ανάκτησης ενέργειας από τα στερεά απόβλητα που καίγονται, ωστόσο, εξακολουθούν να υπάρχουν διάφορες προκλήσεις που σχετίζονται με την αποτέφρωση, οι οποίες περιλαμβάνουν τον χαρακτηρισμό, την αξιοποίηση και την απομάκρυνση βαρέων μετάλλων από την τέφρα και τις εκπομπές στην ατμόσφαιρα, όπως οι διοξίνες. Έτσι, για τον μετριασμό των δυσμενών περιβαλλοντικών επιπτώσεων, οι ερευνητές επικεντρώθηκαν στην τεχνολογική διαχείριση των καταλοίπων και της υπάρχουσας τέφρας, η οποία αυξάνεται συνεχώς στην αποτέφρωση ΑΣΑ, ιδιαίτερα στις αναπτυσσόμενες χώρες. Ενδεικτικές πρακτικές αποτελούν η ανάκτηση δευτερογενών υλικών και προϊόντων μέσω αποτοξικοποίησης (π.χ. πλύση), η παραγωγή προϊόντων (π.χ. κεραμικά προϊόντα και τσιμέντο), οι πρακτικές εφαρμογών (π.χ. δέσμευση CO₂) και η ανάκτηση υλικών (π.χ. Zn και άλατα). Ένα ακόμη σημαντικό πρόβλημα λόγω της σχετικά χαμηλής θερμαντικής αξίας και της υψηλής περιεκτικότητας σε υγρασία των ΑΣΑ δύναται να ξεπεραστεί συνδυαστικά με βιοχημική μέθοδο επιτυγχάνοντας εξοικονόμηση ορυκτών καυσίμων, ικανοποιητική απόδοση του αποτεφρωτήρα και βελτιωμένη ευελιξία λειτουργίας. Συγκεκριμένα, τα στραγγίσματα και τα οργανικά απόβλητα τροφίμων χαμηλής θερμαντικής αξίας στα ΑΣΑ υποβάλλονται σε αναερόβια χώνευση, και το αναερόβια χωνεμένο υπόλειμμα ξηραίνεται και αναμιγνύεται με τα καύσιμα συστατικά υψηλής θερμαντικής αξίας των ΑΣΑ. Επομένως, η βελτιωμένη αυτή στρατηγική, προσφέρει σημαντικά οικονομικά και περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα στη μικτή αποτέφρωση καθιστώντας την ως τη καταλληλότερη επιλογή στο μελλοντικό ενεργειακό σύστημα (Ram et al., 2021). Ο Islam (2016), επίσης, παρουσίασε μία μελέτη για τη διαχείριση των ΑΣΑ στο Μπαγκλαντές για δύο μεγάλες πόλεις, την Ντάκα και την Τσιταγκόνγκ, η οποία ανέδειξε ότι ένα σενάριο με ένα σύστημα αποτέφρωσης σε ποσοστό 70% συνδυαστικά με την ανάκτηση αερίου υγειονομικής ταφής σε ποσοστό 30%, είχε τη καλύτερη απόδοση τόσο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας 0.31 MWh / t ΑΣΑ, όσο και σε καθαρές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που έφτασαν σε αρνητικές τιμές -0.01 t ισοδύναμου CO₂ / t ΑΣΑ.

Αεριοποίηση

Η αεριοποίηση των ΑΣΑ παρουσιάζεται ως μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση για τη διαχείριση των αποβλήτων, καθώς είναι μία από τις τεχνικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μετατροπή των ΑΣΑ σε αέριο σύνθεσης εμπλουτισμένο με υδρογόνο. Έτσι, η παραγωγή υδρογόνου χρησιμοποιώντας ως πρώτη ύλη τα ΑΣΑ δύναται να μειώσει δραστικά το κόστος παραγωγής καθώς μειώνονται τα έξοδα για αγορά πρώτων υλών. Οι εναλλακτικές πηγές παραγωγής υδρογόνου, συμπεριλαμβανομένων των ΑΣΑ, είναι σημαντικές για τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης που σχετίζεται με την παραγωγή αμμωνίας, συμβάλλοντας έτσι στις προσπάθειες βιωσιμότητας και διευκολύνοντας παράλληλα την ενσωμάτωση των σύγχρονων τεχνολογιών μετατροπής των αποβλήτων στις κοινωνικές απαιτήσεις. Ο κόσμος, πλέον εισέρχεται σε μια επικείμενη επισιτιστική κρίση που επιδεινώνεται από τις ελλείψεις λιπασμάτων, θέτοντας απειλές για την παγκόσμια οικονομία και τα μέσα διαβίωσης. Η εξάντληση των φυσικών πόρων και η κλιμακούμενη ζήτηση για μακροθρεπτικά συστατικά λιπασμάτων συμβάλλουν σε αυτήν την κρίση, εμποδίζοντας την προσβασιμότητα για τους αγρότες. Αυτό το δυναμικό υπογραμμίζεται από προβλέψεις που δείχνουν αύξηση 30% στον παγκόσμιο πληθυσμό έως το 2050, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την αύξηση της παραγωγής τροφίμων κατά 70%. Συνεπώς, το υδρογόνο που προέρχεται από τα ΑΣΑ είναι πολλά υποσχόμενο, ιδιαίτερα σε εφαρμογές όπου το υδρογόνο είναι ένα επιθυμητό προϊόν. Το υδρογόνο είναι καθοριστικής σημασίας στη διεργασία Haber-Bosch (H-B) και αποτελεί βασικό στοιχείο για την παραγωγή λιπασμάτων NH_3 . Η διεργασία H-B είναι η κυρίαρχη τεχνική παραγωγής αμμωνίας παγκοσμίως παράγοντας περίπου το 80% της παγκόσμιας παραγωγής σε αμμωνία. Ωστόσο, η συμβατική παραγωγή αμμωνίας μέσω της διεργασίας H-B είναι ενεργοβόρα, συμβάλλοντας περίπου στο 1,6% των παγκόσμιων ανθρωπογενών εκπομπών. Η αντίδραση του υδρογόνου με το άζωτο παράγει αμμωνία, ένα θεμελιώδες συστατικό των ανόργανων λιπασμάτων. Η ενσωμάτωση υδρογόνου που προέρχεται από ΑΣΑ στη διεργασία H-B μπορεί να ενισχύσει τα συστήματα παραγωγής τροφίμων και να βελτιώσει τη βιωσιμότητα της παραγωγής λιπασμάτων. Πρόσφατες εξελίξεις στοχεύουν στη βελτίωση της βιωσιμότητας της διεργασίας H-B μέσω της ενσωμάτωσης υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές ή από ΑΣΑ, μειώνοντας έτσι την εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα και μετατρέποντας ρυπογόνες θρεπτικές ουσίες σε πολύτιμους πόρους για την παραγωγή λιπασμάτων. Η ενσωμάτωση αυτή προάγει την κυκλική οικονομία στη διαχείριση αποβλήτων και στην παραγωγή λιπασμάτων, μειώνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο τις ενεργειακές απαιτήσεις και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και προάγοντας πιο βιώσιμες γεωργικές πρακτικές (Chicaiza-Ortiz et al., 2024).

Οι Khosravi et al. (2023) παρουσιάζουν ένα καινοτόμο σύστημα αεριοποίησης ενισχυμένης ρόφησης (sorption-enhanced gasification) βασισμένο στην ηλιακή ενέργεια, με στόχο τη συμπαραγωγή ενέργειας και υδρογόνου. Το σύστημα αυτό, το οποίο ενσωματώνει την αεριοποίηση ΑΣΑ και μια επιτόπια (in situ) διεργασία δέσμευσης και υδροποίησης CO_2 , παρουσιάζει αξιοσημείωτη συνεργατική επίδραση που ενισχύει την απομάκρυνση του CO_2 και βελτιστοποιεί την παραγωγή ενέργειας και «πράσινου» H_2 . Με ετήσια ηλεκτρική απόδοση 11,9% και συνολική ενεργειακή απόδοση 54,8%, το σύστημα υπόσχεται καθαρή παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος 19,5 MW και παραγωγή 0,58 kg/s καθαρού H_2 , αναδεικνύοντας τη δυναμική του συμβολή στην Κυκλική Οικονομία και στην Αξιολόγηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων. Η μελέτη υπογραμμίζει τη σημασία της βελτιστοποίησης της απόδοσης δέσμευσης CO_2 , του σχετικού κόστους και της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας, προτείνοντας

μελλοντική έρευνα για την περαιτέρω αξιοποίηση και αναβάθμιση αυτών των ολοκληρωμένων συστημάτων.

Οι Kataya et al. (2023) επισημαίνουν ότι η αεριοποίηση βιομάζας είναι μια μετασχηματιστική διαδικασία που μετατρέπει τη βιομάζα σε πολύτιμα προϊόντα, συμπεριλαμβανομένων βιοκαυσίμων, βιοκάρβουνου, αερίου σύνθεσης, ηλεκτρικής ενέργειας, θερμότητας και λιπασμάτων. Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ενώ η αεριοποίηση βιομάζας έχει τη δυνατότητα να παράγει ένα καύσιμο αέριο κατάλληλο για εφαρμογές παραγωγής ενέργειας ή αερίου σύνθεσης, τα πτητικά συστατικά στη βιομάζα συχνά περιέχουν πίσσα, η οποία είναι ένα σύνθετο μείγμα αρωματικών. Ο Πίνακας 32, παρέχει μια επισκόπηση των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων που σχετίζονται με την αεριοποίηση βιομάζας.

Πίνακας 32. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της αεριοποίησης βιομάζας (Walling et al., 2019).

Αεριοποίηση Βιομάζας	
Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Υψηλή απόδοση ανάκτησης ενέργειας.	Σύνθετη τεχνολογία.
Μειωμένες εκπομπές.	Υψηλό επενδυτικό και λειτουργικό κόστος.
Παραγωγή συνθετικού αερίου (syngas) και βιοάνθρακα (biochar).	Εκτεταμένος καθαρισμός του συνθετικού αερίου (syngas).

Τέλος, οι Jha et al. (2022) παρουσιάζουν στο Σχήμα 32 μία ανάλυση SWOT για την αεριοποίηση με τη μορφή δυνατών σημείων, αδυναμιών, ευκαιριών και απειλών της θερμοχημικής τεχνολογίας ανάκτησης ενέργειας από απόβλητα.



Δυνατά Σημεία

Το συνθετικό αέριο (syngas) μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα ως καύσιμο ή για την παραγωγή προϊόντων προστιθέμενης αξίας, όπως συνθετικό φυσικό αέριο, χημικά, υδρογόνο, κηροζίνη, νάφθα κ.ά.

Δυνατότητα αξιοποίησης διαφόρων τύπων βιομάζας και αποβλήτων.

Αδυναμίες

Υψηλό λειτουργικό κόστος.

Υψηλό κόστος συντήρησης.

Προβλήματα με την ανακυκλωσιμότητα ομογενών καταλυτών και καταλυτών με βάση τον άνθρακα.

Ευκαιρίες

Είναι δυνατές οι επιχειρήσεις μεγάλης κλίμακας.

Υψηλό ανεκμετάλλευτο δυναμικό.

Δυνατότητα ένταξης σε κυκλικές οικονομίες και διαχείριση αποβλήτων.

Απειλές

Αστάθεια τιμών πρώτων υλών (βιομάζα, απόβλητα).

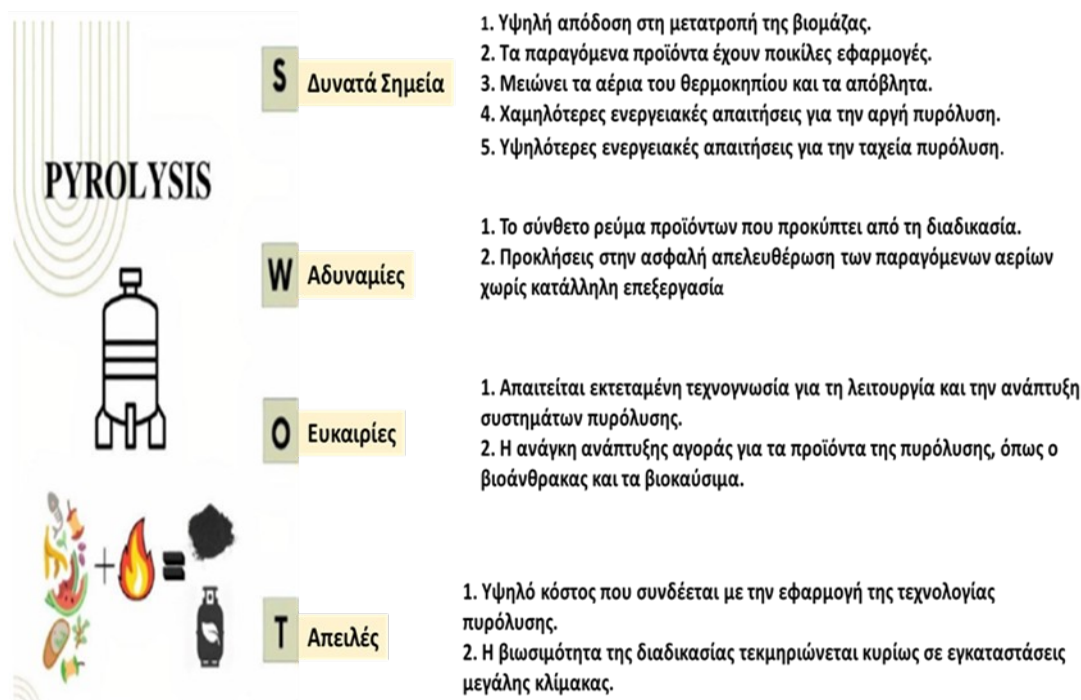
Υψηλό κόστος.

Σχήμα 32. Ανάλυση SWOT για την αεριοποίηση με σκοπό την μετατροπή των αποβλήτων σε ενέργεια (επεξεργασμένο από Μυρωνάκη Ι., πηγή: Jha et al., 2022).

Πυρόλυση

Η πυρωμένη βιομάζα, ιδιαίτερα η ξυλώδης που έχει υποστεί πυρόλυση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αεριοποίηση και σύγκausη. Η πυρόλυση βελτιώνει σημαντικά την ποιότητα του αερίου σύνθεσης και την απόδοση της ψυχρής αεριοποίησης. Επιπλέον, στο εύρος θερμοκρασιών πυρόλυσης, η απελευθέρωση Cl, S και K είναι σημαντική, γεγονός που προσφέρει σημαντικά πρόσθετα οφέλη για τη μείωση ή την εξάλειψη προβλημάτων που σχετίζονται με την τέφρα (όπως η δημιουργία σκωρίας, η διάβρωση και η συσσωμάτωση) κατά τη θερμική μετατροπή της βιομάζας σε ενέργεια. Κατά τη διάρκεια της πυρόλυσης, ο λόγος απελευθέρωσης Cl αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και τον χρόνο παραμονής, επιτυγχάνοντας παράλληλα μείωση του μεγέθους των σωματιδίων και του βάρους του δείγματος στην αρχική βιομάζα. Το μεγαλύτερο βάρος του δείγματος έχει αρνητική επίδραση στην απελευθέρωση K, ενώ το μέγεθος των σωματιδίων παρουσιάζει αμελητέα επίδραση. Η απελευθέρωση S προέρχεται κυρίως από την αποσύνθεση του οργανικού θείου στη αρχική βιομάζα (Niu et al., 2019).

Οι Kataya et al. (2023) στο Σχήμα 33, απεικονίζουν τα δυνατά σημεία, τις αδυναμίες, καθώς και τις ευκαιρίες και τις προκλήσεις που σχετίζονται με την πυρόλυση για την επεξεργασία βιομάζας. Συνοψίζοντας, η πυρόλυση αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση για τη μετατροπή οργανικών αποβλήτων σε προϊόντα υψηλότερης αξίας. Ωστόσο, εξακολουθεί να παρουσιάζει σημαντικό μειονέκτημα που σχετίζεται με το αρχικό κόστος.



Σχήμα 33. Ανάλυση SWOT για την πυρόλυση μετατροπής οργανικών αποβλήτων σε προϊόντα υψηλής αξίας.

Σύμφωνα με τους Jha et al. (2022) η θερμική διεργασία ήπιας πυρόλυσης είναι μια καθαρή και πολλά υποσχόμενη θερμοχημική τεχνολογία που χρησιμοποιείται συχνά ως θερμική προεπεξεργασία της βιομάζας. Έχει αποδειχθεί ότι βελτιώνει την απόδοση των θερμοχημικών διεργασιών μετατροπής, όπως της πυρόλυσης, της υγροποίησης και της αεριοποίησης, μέσω της απομάκρυνσης της υγρασίας και της μερικής αποδόμησης της βιομάζας. Επίσης, έχει προσελκύσει σημαντικό ενδιαφέρον όχι μόνο επειδή η συμπυκνωμένη βιομάζα παρουσιάζει βελτιωμένες ιδιότητες, αλλά και επειδή οι τεχνολογίες που συνδέονται με αυτήν βρίσκονται κοντά στην εμπορική αξιοποίηση. Ορισμένες από τις ανώτερες ιδιότητες της ήπιας πυρολυμένης βιομάζας σε σύγκριση με την ακατέργαστη βιομάζα είναι η υδροφοβικότητα, η ευκολία άλεσης, η υψηλότερη θερμογόνος δύναμη, η χαμηλή περιεκτικότητα σε υγρασία και η δυνατότητα πελλετοποίησης. Τέλος, συμβάλλει στην αύξηση του ποσοστού άνθρακα και στη μείωση της περιεκτικότητας σε οξυγόνο, ενισχύοντας κατ' αυτόν τον τρόπο τη θερμογόνος αξία της βιομάζας. Παρακάτω στον Πίνακα 33, παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της ήπιας πυρόλυσης της βιομάζας.

Πίνακας 33. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της ήπιας πυρόλυσης βιομάζας.

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο ως	Χαμηλότερη συνολική απόδοση.

προεπεξεργασία όσο και ως τεχνολογία μετατροπής της βιομάζας. Υψηλή ενεργειακή περιεκτικότητα ανά μονάδα όγκου. Βελτιώνει τη θερμογόνο αξία της βιομάζας. Η πελλετοποίηση της πυρολυμένης βιομάζας διευκολύνει τη μεταφορά της σε μεγάλες αποστάσεις. Μειώνει την περιεκτικότητα σε υγρασία. Χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση. Μειωμένο λειτουργικό κόστος. Η ήπια πυρόλυση βελτιώνει τα χαρακτηριστικά της πρώτης ύλης με πολλούς τρόπους και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως άμεσο καύσιμο. Δεν απαιτείται καταλύτης.	Η βελτιστοποίηση των αντιδραστών ήπιας πυρόλυσης είναι απαραίτητη για να καλύπτονται οικονομικά οι απαιτήσεις τελικής χρήσης και να επιτυγχάνεται τυποποίηση του προϊόντος για την αγορά. Η εξάτμιση φαινόλης, ακετόνης και άλλων ρυπαντών καθιστά τον καθαρισμό των καυσαερίων πιο δύσκολο.
--	--

Αέριο από χώρους υγειονομικής ταφής

Η ανάκτηση LFG περιλαμβάνει τη δέσμευση και αξιοποίηση του μεθανίου που παράγεται από την αποσύνθεση των ΑΣΑ σε χώρους υγειονομικής ταφής. Καθώς τα ΑΣΑ αποσυντίθενται, το μεθάνιο και άλλα αέρια απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα. Τα συστήματα ανάκτησης LFG συλλέγουν μεθάνιο και άλλα αέρια, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή θερμότητας. Το LFG μπορεί επίσης να αναβαθμιστεί σε βιομεθάνιο για έγχυση σε αγωγούς φυσικού αερίου ή να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο μεταφορών. Λόγω αυτών των εξελίξεων, η παραγωγή βιοαερίου από ΑΣΑ μπορεί να δημιουργήσει νέες ευκαιρίες αγοράς για τον κλάδο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η χρήση βιοαερίου ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας κερδίζει δυναμική παγκοσμίως και υπάρχει αυξανόμενη ζήτηση για ανανεώσιμο φυσικό αέριο (RNG) ως καύσιμο μεταφορών χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Η παραγωγή βιοαερίου από ΑΣΑ μπορεί να αποτελέσει σημαντική πηγή RNG, το οποίο μπορεί να πωληθεί σε εταιρείες μεταφορών ή να εγχυθεί σε αγωγούς φυσικού αερίου. Η ανάπτυξη αγορών για RNG μπορεί να προσφέρει νέες ροές εσόδων για τον κλάδο του βιοαερίου και μπορεί επίσης να υποστηρίξει τη μετάβαση σε μια οικονομία χαμηλών εκπομπών άνθρακα (Farid et al., 2024).

Αναερόβια Χώνευση

Η ανάκτηση πόρων από ΑΣΑ μέσω αναερόβιας χώνευσης μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην περιβαλλοντική βιωσιμότητα. Αυτή η προσέγγιση θα μπορούσε να

αποφύγει την εκπομπή CO₂ στην ατμόσφαιρα και ρύπανση του εδάφους από στραγγίσματα σε χώρο υγειονομικής ταφής, ενώ παράλληλα θα παράγει καθαρή ηλεκτρική ενέργεια κάθε ημέρα. Επίσης, θα αποδίδει οργανικά λιπάσματα. Κατά συνέπεια, η εφαρμογή πολλαπλών εγκαταστάσεων παραγωγής βιοαερίου με αναερόβια χώνευση οργανικών στερεών αποβλήτων μπορεί να ενθαρρύνει μια θετική παραδειγματική μετατόπιση στη διαχείριση στερεών αποβλήτων προς μια πιο βιώσιμη πρακτική με μια οικονομική δραστηριότητα που παράγει έσοδα. Η παραγωγή βιοαερίου εκπληρώνει πολυάριθμους στόχους βιώσιμης ανάπτυξης, όπως καθαρό νερό, οικονομικά προσιτή και καθαρή ενέργεια, βιώσιμες πόλεις και κοινότητες, υπεύθυνη κατανάλωση και παραγωγή, δράση για το κλίμα.

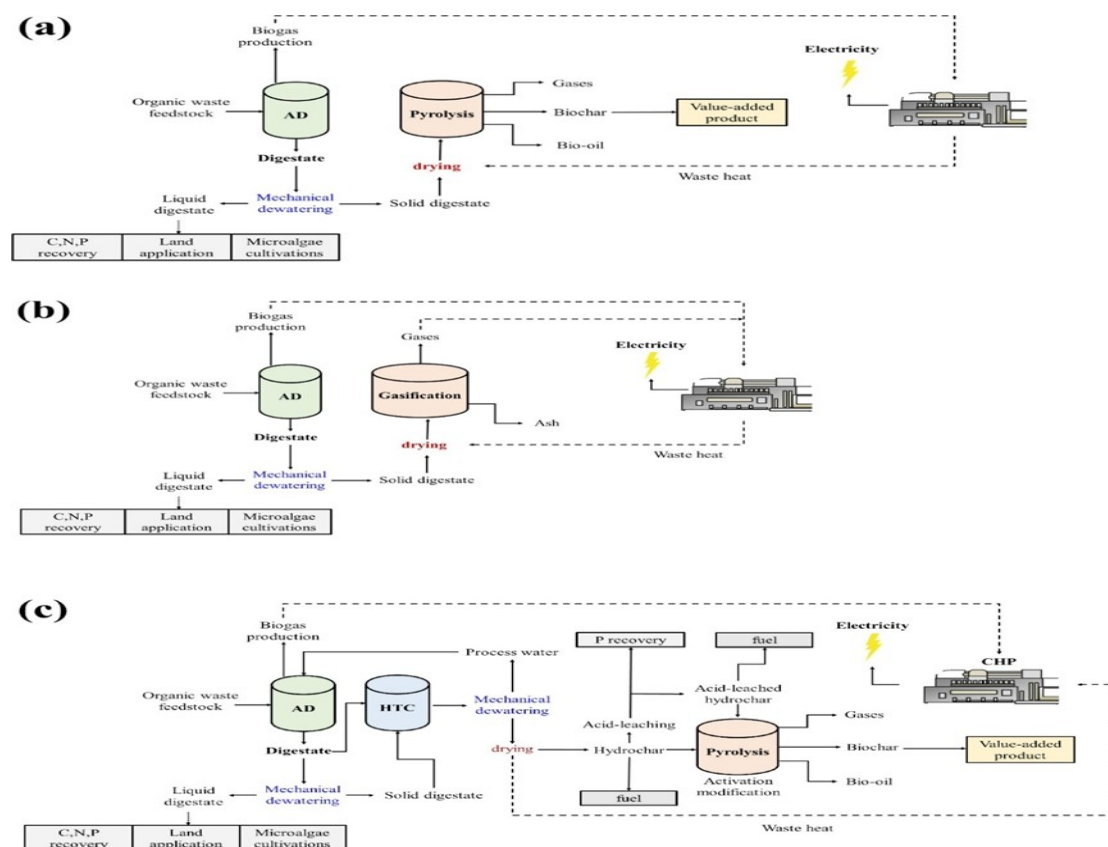
Σύμφωνα με τους Dwivedi et al. (2022), ένας αναερόβιος χωνευτής τροφοδοτείται με εισροές όπως κτηνοτροφικά απόβλητα, καλλιέργειες, λύματα και απόβλητα τροφίμων (σχήμα 34). Ο χωνευτής αυτός έχει δύο κύριες εκροές: βιοαέριο και χωνεμένο υπόλειμμα. Το βιοαέριο που παράγεται μπορεί να αναβαθμιστεί σε βιομεθάνιο και να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο ή να εγχυθεί στο δίκτυο φυσικού αερίου και να παράγει θερμότητα και ηλεκτρική ενέργεια. Ενώ το χωνεμένο υπόλειμμα μπορεί να εφαρμοστεί ως λίπασμα, στρωμή ζώων και βελτιωτικά εδάφους.



Σχήμα 34. Συστηματικό γενικό μοντέλο ροής της αναερόβιας χώνευσης με τις σημαντικότερες πηγές και οι εφαρμογές της (επεξεργασμένο από Μυρωνάκη Ι., πηγή: Dwivedi et al, 2022).

Ακόμη οι Wang and Lee (2021) παρουσιάζουν ένα ολοκληρωμένο σύστημα που μπορεί να βελτιστοποιηθεί με επιπλέον βαθμούς ελευθερίας των επιμέρους διεργασιών, ώστε να μεγιστοποιηθούν τα συνολικά οφέλη (Σχήμα 35). Τα συχνότερα αναφερόμενα σενάρια ολοκληρωμένης διεργασίας για την αξιοποίηση του χωνεμένου

υπολείμματος περιλαμβάνει τις διεργασίες AD/PYR (Σχήμα 35(α)) και AD/HTC (Σχήμα 35(γ)).



Σχήμα 35. Διαφορετικά σενάρια ολοκληρωμένων διεργασιών για την αξιοποίηση του χωνεμένου υπολείμματος. (α) Ολοκληρωμένο σύστημα AD/PYR, (β) Ολοκληρωμένο σύστημα AD/GAS και (γ) Ολοκληρωμένο σύστημα AD/HTC/PYR (Wang and Lee, 2021).

Η ενσωμάτωση AD στην HTC μπορεί να ωφελήσει όχι μόνο την ανάκτηση θρεπτικών και την ανάκτηση νερού, αλλά και να επιτύχει υψηλή προσρόφηση CO₂. Επίσης, οι ιδιότητες του άνθρακα με υδροθερμικές διεργασίες μπορούν να βοηθήσουν στην ανάκτηση N και P. Ακόμη, μέσω AKZ έδειξε ότι η HTC είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για παραγωγή στερεού καυσίμου με παράλληλη μείωση εκπομπών έως 1,3 εκατ. τόνους CO₂/έτος.

Επίσης, η AKZ έδειξε ότι το σενάριο AX/πυρόλυση ή AX/αποτέφρωση ήταν πιο φιλικό προς το περιβάλλον από το σενάριο λειτουργίας μόνο της αποτέφρωσης, με την AX/πυρόλυση να προτιμάται από την AX/αποτέφρωση. Το σύστημα AX/πυρόλυσης έδειξε θετικά οφέλη ως προς το καθαρό κέρδος που κυμαινόταν από 1,18 έως 5,21 \$/kg πρώτης ύλης, ανεξάρτητα από τον σύνθεση της πρώτης ύλης. Η δυνατότητα χρήσης του χωνεμένου υπολείμματος ως ανανεώσιμου πόρου στους ενεργειακούς τομείς παρουσιάζεται ως μια νέα μορφή διαχείρισης των ΑΣΑ, με την

προϋπόθεση ότι θα λαμβάνεται υπόψη στο στάδιο του σχεδιασμού (Wang and Lee, 2021).

Επίσης, η διαχείριση ΑΣΑ με αναερόβια χώνευση στην Τεχεράνη και το Πεκίνο μείωσε το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη μεταξύ 79,2% και 92,6% αντίστοιχα. Αυτό δείχνει ότι η διαχείριση ΑΣΑ με ενσωμάτωση ΑΧ οδήγησε σε θετικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο και στις δύο περιοχές. Τέλος, σύμφωνα με την ΑΚΖ, εκτιμάται ότι η ενέργεια που παράγεται από βιοαέριο που προέρχεται από ΑΣΑ παράγει 11 gCO₂e ανά kWh, ενώ η ενέργεια που παράγεται από καύσιμο πετρέλαιο παράγει 680 gCO₂e ανά kWh (Πίνακας 34).

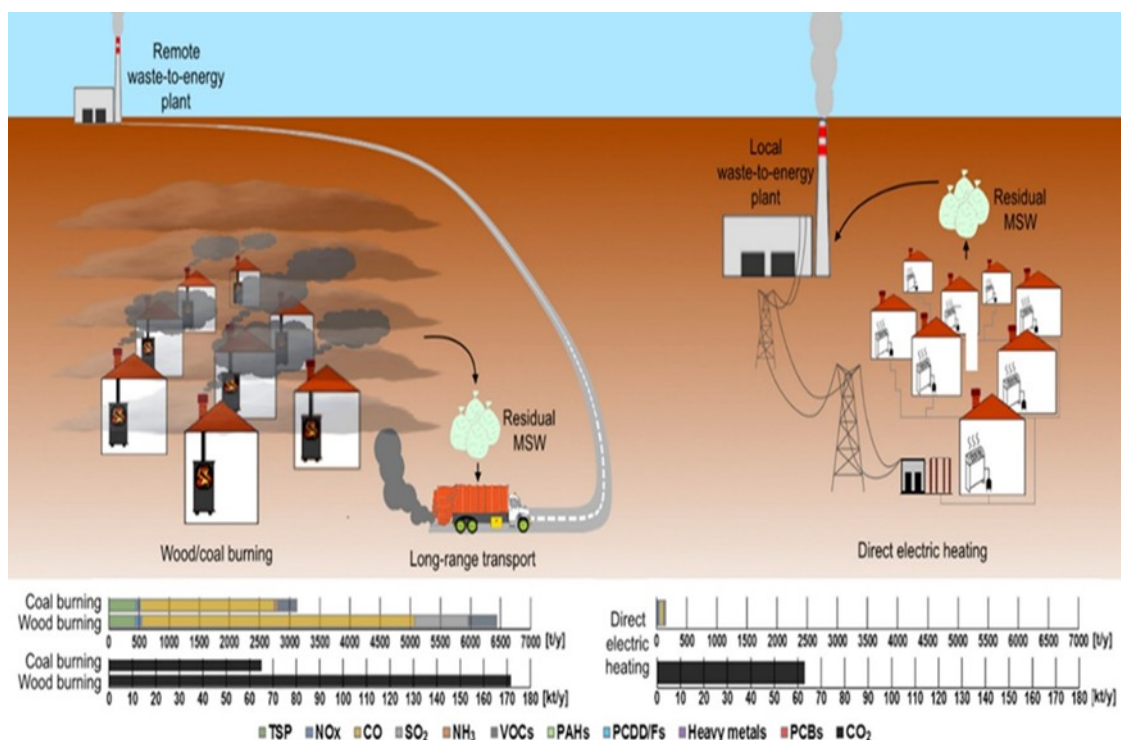
Πίνακας 34. Συντελεστής εκπομπών κύκλου ζωής για τις εκπομπές δικτύου γεννητριών ενέργειας στην Κένυα (Farid et al., 2024).

Γεννήτρια ενέργειας		Αιολική ενέργεια		Ηλιακή φωτοβολταϊκή ενέργεια	Βιοαέριο	Πετρέλαιο
Εκπομπές CO ₂	Μονάδα	1 kWh		1 kWh	1 kWh	1 kWh
	g	10		30 - 100	11	680 - 780

Αυτό σημαίνει ότι η χρήση κινητήρα βιοαερίου αντί για κινητήρα πετρελαίου μπορεί να εξοικονομήσει 670 gCO₂e ανά kWh, γεγονός που αποτελεί σημαντικό περιβαλλοντικό πλεονέκτημα. Ο σχεδιασμός ενός υβριδικού συστήματος βιοαερίου στην Κένυα αποδείχθηκε ότι βοηθά στην αποφυγή εκπομπών 17 τόνων CO₂ ετησίως, σε σύγκριση με τη χρήση ενός κινητήρα πετρελαίου ως εφεδρικό σύστημα (48 τόνοι CO₂ ετησίως) (Farid et al., 2024).

7. ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΑΣΑ

Η καύση βιομάζας με βάση το ξύλο για οικιακή θέρμανση, η οποία είναι συνηθισμένη στις αγροτικές και ορεινές περιοχές της Ευρώπης, συνεπάγεται σημαντικές τοπικές επιπτώσεις στην ποιότητα του αέρα. Χειρότερες συνθήκες επικρατούν σε χώρες χαμηλού εισοδήματος όπου η χρήση άνθρακα σε οικιακές θερμάστρες είναι μια κοινή πρακτική. Οι Adami et al. (2020) καταδεικνύουν ότι ο συνδυασμός μονάδων μετατροπής αποβλήτων σε ενέργεια και η παροχή άμεσης ηλεκτρικής θέρμανσης θα ήταν επωφελής για τη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και παράλληλα για τη βελτιστοποίηση της τοπικής διαχείρισης αποβλήτων (Σχήμα 36). Πιο συγκεκριμένα μία μονάδα WtE τροφοδοτεί το ηλεκτρικό δίκτυο και προκαλεί μείωση στις εκπομπές ολικών αιωρούμενων σωματιδίων, NO_x, CO₂, VOCs, διοξινών, PAH και βαρέων μετάλλων κατά >99%, 27%, 97%, 96%, 93%, 94% και 32% αντίστοιχα, σε σχέση με τη χρήση στερεού καυσίμου σε οικιακές θερμάστρες. Επίσης, ο υψηλός έλεγχος της ατμοσφαιρικής διασποράς των απαερίων από την καπνοδόχο της μονάδας WtE αναμένεται να μειώσει περαιτέρω τις επιπτώσεις στην ποιότητα του αέρα. Επιπλέον, η αποφυγή μεταφοράς αποβλήτων σε άλλες εγκαταστάσεις αποβλήτων εκτός της περιοχής θα μείωνε τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου σε σχέση με την καύση άνθρακα και βιομάζας, κατά 63% και 3% αντίστοιχα. Τέλος, η ενσωμάτωση τοπικών WtE ακόμη και σε ορεινές περιοχές χωρίς να εγκαταλειφθούν πλήρως οι συνήθειες της οικιακής καύσης ξύλου θα μπορούσαν να βελτιώσουν την τοπική ποιότητα του αέρα μειώνοντας την κατανάλωση καυσίμων και την ατμοσφαιρική ρύπανση.



Σχήμα 36. Η ενσωμάτωση τοπικών WtE σε αγροτικές περιοχές (Adami et al., 2020).

Επίσης, η χρήση της Τεχνητής Νοημοσύνης (TN) στη διαχείριση και στις πρακτικές αξιοποίησης των αποβλήτων εξελίσσεται ραγδαία, καθοδηγούμενη από τις τρέχουσες τάσεις και εξελίξεις. Από τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών συλλογής

και διαλογής αποβλήτων έως την ενίσχυση των λειτουργιών ανακύκλωσης και παράλληλα με την ανάλυση των μεγάλων δεδομένων, δύναται να διευκολύνουν τις διοικήσεις στη λήψη αποφάσεων. Ακόμη, η ΤΝ έχει τη δυνατότητα να μετατρέψει τη διαχείριση των αποβλήτων σε μια πιο αποτελεσματική, βιώσιμη και περιβαλλοντικά συνειδητή προσπάθεια. Έτσι, αξιοποιώντας τη δύναμη της ΤΝ, τα συστήματα διαχείρισης αποβλήτων μπορούν να αντιμετωπίσουν τις αυξανόμενες προκλήσεις που σχετίζονται με τα απόβλητα και να συμβάλουν σε ένα πιο πράσινο και βιώσιμο μέλλον (Olawade et al., 2024).

Για την επίτευξη μιας πιο βιώσιμης βιοοικονομίας, υπάρχει κρίσιμη ανάγκη για αποτελεσματική μετατροπή των οργανικών αποβλήτων από εμπορικές και οικιακές δραστηριότητες σε ενέργεια και άλλα χρήσιμα υλικά. Επιπλέον, τα απόβλητα μπορούν να ελαχιστοποιηθούν ή ακόμα και να εξαλειφθούν με την εφαρμογή συστημάτων που δίνουν προτεραιότητα στην επαναχρησιμοποίηση υλικών και την πρόληψη των αποβλήτων σε μια κυκλική βιοοικονομία.

Δεδομένου, λοιπόν, των σημαντικών πολύτιμων πρώτων υλών και της περιεκτικότητας σε ενέργεια των στερεών αποβλήτων, η δυνατότητα αποτελεσματικής εξαγωγής και αξιοποίησης αυτών των πόρων θα αύξανε την οικονομική αξία στη διαδικασία διαχείρισης αποβλήτων. Καθώς, υπάρχει μια πολυεπίπεδη δομή διακυβέρνησης στα περισσότερα υπάρχοντα συστήματα διαχείρισης αποβλήτων, γίνεται αντιληπτό ότι οι δήμοι δεν υπάρχουν μόνοι τους και συνήθως λειτουργούν συνδυαστικά με τις γύρω αστικές και αγροτικές περιοχές. Αυτές οι περιοχές είναι εξαιρετικά πολύπλοκες και αλληλένδετες μεταβλητές, οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν τις στρατηγικές διαχείρισης των ΑΣΑ (Πίνακας 35).

Πίνακας 35. Κρίσιμοι παράγοντες που επηρεάζουν τις στρατηγικές διαχείρισης των ΑΣΑ (Hoang et al., 2022).

Παράγοντες	
Εκπαιδευτικοί:	Ερευνητικά κέντρα, έργα συνεργασίας.
Πολιτικοί:	Πολιτική βούληση, πολυεπίπεδη διακυβέρνηση, κυβερνητικοί κανονισμοί, συλλογή και παρακολούθηση δεδομένων.
Οικονομικοί:	Επιχειρηματικό μοντέλο, ανάλυση οφειλών, διαθεσιμότητα χρηματοδότησης, συνεργασία, αλυσίδα αξίας.
Περιβαλλοντικοί:	Πολιτική βιωσιμότητα, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία.
Κοινωνικοί:	Αντίληψη της κοινότητας.
Τεχνολογικές Εξελίξεις:	Καινοτομία, υποδομές.

Επομένως, σύμφωνα με τους Khan & Kabir (2020) η σωστή εφαρμογή ενός βιώσιμου έργου παραγωγής ενέργειας από απόβλητα σε χώρες απαιτεί μια εθνική ενεργειακή πολιτική που πρέπει να λαμβάνει υπόψη τα ακόλουθα:

- Θα πρέπει να παρέχεται κυβερνητική υποστήριξη σε ιδρύματα, όπως νοσοκομεία, τα οποία είναι πρόθυμα να εφαρμόσουν έργα βιώσιμης αναερόβιας χώνευσης από απόβλητα.
- Θα πρέπει να παρέχονται κρατικές επιδοτήσεις για σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από απορρίμματα που βασίζονται στην αναερόβια

ενέργεια και όχι για όλες τις τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από απορρίμματα.

- Στα αρχικά στάδια, η τοπική αυτοδιοίκηση πρέπει να διαδραματίσει ζωτικό ρόλο στη διαφήμιση των οφελών των βιώσιμων μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από απόβλητα, ιδίως με τη χρήση αναερόβιας χώνευσης.
- Οι κυβερνήσεις θα πρέπει να ενθαρρύνουν τη δημιουργία τοπικών εγκαταστάσεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από λύματα που βασίζονται στην αναερόβια χώνευση. Αυτό θα διασφαλίσει σημαντικά μειωμένο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από βιώσιμη πηγή, τοπικές επενδύσεις και θέσεις εργασίας.
- Πρέπει να ενθαρρυνθούν τα κοινοπραξιακά έργα WtE με ξένες εταιρείες που βασίζονται στην αναερόβια ενέργεια. Αυτό θα επιτρέψει στους τοπικούς φορείς να ενημερώνονται για τις τελευταίες τεχνολογικές εξελίξεις σε σχέση με την ανάκτηση ενέργειας από ΑΣΑ.
- Πρέπει να θεσπιστούν κανονισμοί για μια βιώσιμη παραγωγή ενέργειας από απόβλητα.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι τεχνολογίες ΕΑΑ αποτελούν μια σημαντική ευκαιρία για την περιβαλλοντική βιωσιμότητα, καθώς μετατρέπουν τα ΑΣΑ σε ενέργεια. Τεχνικές όπως η αποτέφρωση, η πυρόλυση και η αεριοποίηση προσφέρουν σημαντικά οφέλη, όπως μείωση της εξάρτησης από τους χώρους υγειονομικής ταφής και αξιοποίηση των αποβλήτων. Ωστόσο, οι μέθοδοι αυτές αντιμετωπίζουν προκλήσεις που σχετίζονται με οικονομικούς περιορισμούς και περιβαλλοντικές ανησυχίες.

Η έμμεση επεξεργασία αποβλήτων σε ενέργεια είναι μια επίπονη διαδικασία με στόχο τη μετατροπή των αποβλήτων σε ενδιάμεσα προϊόντα πριν από την ανάκτηση ενέργειας από αυτά. Τεχνολογικά, η έμμεση επεξεργασία αποβλήτων βασίζεται σε θερμοχημικές ή βιολογικές προσεγγίσεις. Παραδείγματα έμμεσων θερμοχημικών διεργασιών για την επεξεργασία ΑΣΑ περιλαμβάνουν την αεριοποίηση, την πυρόλυση και την ενανθράκωση. Η αποτέφρωση είναι επίσης θερμική αλλά άμεση επεξεργασία. Συνήθως, οι θερμοχημικές διεργασίες προκαλούν ταχεία διαδικασία μετατροπής των αποβλήτων, ποικιλία ενεργειακών προϊόντων (άνθρακας, βιοέλαιο, εύφλεκτα αέρια όπως αέριο σύνθεσης και βιοαέριο), ενώ χαρακτηρίζονται από επεκτασιμότητα. Από την άλλη πλευρά, οι βιολογικές διεργασίες, όπως η κομποστοποίηση, η αναερόβια χώνευση και οι MFC, αποικοδομούν μόνο τα οργανικά υλικά των αποβλήτων απελευθερώνοντας ενεργειακά προϊόντα (κυρίως βιοαέριο ή αιθανόλη). Η εφαρμογή βιολογικών μεθόδων για την επεξεργασία ΑΣΑ παρεμποδίζεται κυρίως από την παρουσία μη οργανικών συστατικών, που καταστέλλουν σε σημαντικό βαθμό τη δραστηριότητα των μικροοργανισμών.

Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία η αναερόβια χώνευση υπερτερεί οικονομικά, περιβαλλοντικά (χαμηλές εκπομπές CO_2 , $\sim 4,4\text{t CO}_{2\text{-eq}}$) και κοινωνικά ενώ είναι κατάλληλη για υγρά/οργανικά απόβλητα και κατατάσσεται στην πρώτη θέση. Η αεριοποίηση παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ανάκτηση ενέργειας παγκοσμίως (47,0 εκ. MWh σε ορίζοντα 25ετίας) και καλύτερη επίδοση από την αποτέφρωση στις περισσότερες περιβαλλοντικές παραμέτρους, ενώ μειώνει τον όγκο των αποβλήτων 70-80% και κατατάσσεται στη δεύτερη θέση. Η πυρόλυση, η οποία κατατάσσεται στην τρίτη θέση, έχει τις χαμηλότερες εκπομπές SO_x , NO_x και διοξινών με καλή ενεργειακή απόδοση και μείωση του όγκου των αποβλήτων κατά 60-70%. Η βιοζήρανση, η οποία κατατάσσεται στην τέταρτη θέση, είναι απλή τεχνολογία, παρουσιάζει χαμηλό κόστος, συμβάλλει στην μείωση των αποβλήτων που οδηγούνται σε ΧΥΤΑ και έχει υψηλή κοινωνική αποδοχή. Η μηχανική βιολογική επεξεργασία, η οποία κατατάσσεται στην πέμπτη θέση, παρουσιάζει το μικρότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα και έχει μέτρια ενεργειακή απόδοση και κοινωνική αποδοχή. Η αποτέφρωση, η οποία κατατάσσεται στην έκτη θέση, είναι ώριμη τεχνολογία, έχει υψηλή ενεργειακή απόδοση και μειώνει τον όγκο των αποβλήτων 80-90%, ενώ αντίθετα παρουσιάζει υψηλό κόστος επένδυσης και λειτουργικό κόστος, αργή απόσβεση (8 έτη), υψηλές εκπομπές SO_x , NO_x και διοξινών, ανάγκη δαπανηρού ελέγχου, χαμηλή κοινωνική αποδοχή και ανησυχία για την υγεία των ανθρώπων. Τέλος, η υδροθερμική ενανθράκωση, ως νέα τεχνολογία, σε μερικές έρευνες κατατάσσεται σε ανώτερη θέση από την αποτέφρωση, καθώς έχει υψηλή ενεργειακή απόδοση, ενώ αντίθετα παρουσιάζει χαμηλή λειτουργική ευκολία.

Οι έρευνες για την ενεργειακή αξιοποίηση των ΑΣΑ στην Ελλάδα παρουσιάζουν την αναερόβια χώνευση που έχει εφαρμοστεί ευρέως στην ΕΕ για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αξιοποιώντας το οργανικό κλάσμα από τα ΑΣΑ, ως τη βέλτιστη επιλογή. Ακολουθούμενη από την αεριοποίηση, την πυρόλυση, την αποτέφρωση και την ανάκτηση αερίου από ΧΥΤΑ ως την τελευταία λύση. Οι τεχνολογίες αυτές μειώνουν τον όγκο των αποβλήτων και τις εκπομπές CH₄, παράγουν ανανεώσιμη ενέργεια και παρέχουν ενεργειακή ανεξαρτησία, ενισχύουν την κυκλική οικονομία, παρέχουν οικονομικά οφέλη και δημιουργούν νέες θέσεις εργασίας.

Η αποτέφρωση, η οποία είναι η πιο ώριμη τεχνολογία για τη διαχείριση αποβλήτων, συμπεριλαμβανομένων των επιλογών μετατροπής των αποβλήτων σε ενέργεια, είναι πιθανό να παραμείνει μια εναλλακτική λύση που θα εξετάσουν οι κυβερνήσεις. Ωστόσο, το οικονομικό και οικολογικό κόστος της μετατροπής των αποβλήτων σε ενέργεια είναι συγκριτικά υψηλό. Η αυξανόμενη εξάρτηση από μια ροή αποβλήτων για την παραγωγή ενέργειας αντισταθμίζει την ανάγκη μείωσης των αποβλήτων συνολικά. Η αποτέφρωση δεν είναι χωρίς προβλήματα και ως εκ τούτου είναι μια επιλογή που πρέπει να εξεταστεί προσεκτικά. Οι τοπικές κοινοτικές ομάδες έχουν λόγους να ανησυχούν εύλογα και επομένως η χωροθέτηση εγκαταστάσεων αποτέφρωσης πρέπει να λαμβάνει υπόψη αυτές τις ανησυχίες. Η έγκαιρη διαφανής διαβούλευση με τις κοινότητες σχετικά με αυτές τις εγκαταστάσεις είναι απαραίτητη.

Για τις ελληνικές συνθήκες, η πλέον κατάλληλη προσέγγιση δεν είναι η αποκλειστική εφαρμογή της αποτέφρωσης ή της ταφής, αλλά ένα υβριδικό και αποκεντρωμένο μοντέλο που δίνει προτεραιότητα:

- στη διαλογή στην πηγή,
- στην αναερόβια χώνευση,
- στην κομποστοποίηση,
- και στη συμπληρωματική ενεργειακή αξιοποίηση RDF/SRF.

Το μοντέλο αυτό ανταποκρίνεται καλύτερα:

- στη σύσταση των ελληνικών ΑΣΑ (υψηλό οργανικό κλάσμα),
- στη γεωγραφική πολυμορφία της χώρας,
- στους στόχους της κυκλικής οικονομίας,
- και στην ανάγκη μείωσης της υγειονομικής ταφής και των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου.

Συνολικά, η ενεργειακή αξιοποίηση των ΑΣΑ στην Ελλάδα απαιτεί ολοκληρωμένο στρατηγικό σχεδιασμό, ενίσχυση της ανακύκλωσης και της διαλογής στην πηγή, εφαρμογή προηγμένων τεχνολογιών επεξεργασίας και αυστηρή περιβαλλοντική παρακολούθηση. Η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας μπορεί να μεταβάλλεται από περιοχή σε περιοχή, ανάλογα με τη βαρύτητα που δίνεται είτε αυτή

είναι τουριστική είτε αγροτική και πρέπει να βασίζεται σε πολυκριτηριακή αξιολόγηση που λαμβάνει υπόψη τεχνολογικούς, οικονομικούς, περιβαλλοντικούς και κοινωνικούς παράγοντες, ώστε να επιτευχθεί η μετάβαση προς ένα βιώσιμο και κυκλικό μοντέλο διαχείρισης αποβλήτων.

Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη τα τρέχοντα περιβαλλοντικά ζητήματα, έχει καταστεί αναγκαία η εφαρμογή μέτρων προστασίας του περιβάλλοντος, μαζί με τη βιώσιμη διαχείριση των πόρων, τα οποία μπορούν να έχουν αρνητικό αντίκτυπο στη συνολική οικονομική ανάπτυξη. Συνεπώς, υπάρχει ανάγκη εφαρμογής σχετικών πολιτικών και στρατηγικών που όχι μόνο εξαρτώνται από το τρέχον αποτύπωμα άνθρακα, αλλά και διασφαλίζουν την οικονομική τους ανάπτυξη. Η εφαρμογή νομικών μεταρρυθμίσεων σύμφωνα με τη συμφωνία του Παρισιού μπορεί να βοηθήσει τις χώρες να επιτύχουν μηδενικό καθαρό αποτύπωμα μειώνοντας την υπερθέρμανση του πλανήτη κάτω από τους 2 °C έως το 2050.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ

- Abdeljaber, A., Zannerni, R., Masoud, R., Abdallah, M., Rocha-Meneses, L. (2022). Eco-Efficiency Analysis of Integrated Waste Management Strategies Based on Gasification and Mechanical Biological Treatment. *Sustainability*, 14, 3899. <https://doi.org/10.3390/su14073899>
- Abid, W., Masmoudi, F., Ammar, E. (2024). *Municipal Solid Waste Management: Waste to Energy Technologies Versus Composting – Two Sustainable Development Models*. Generation of Energy from Municipal Solid Waste, 1st Chapter, pp. 115-141. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-35667-8>
- Adami, L., Schiavon, M., Rada, E.C. (2020). Potential environmental benefits of direct electric heating powered by waste-to-energy processes as a replacement of solid-fuel combustion in semi-rural remote areas. *Science of the Total Environment*, 740, 140078. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140078
- Alao, M.A., Popoola, O.M., Ayodele, T.R. (2022). A novel fuzzy integrated MCDM model for optimal selection of waste-to-energy-based-distributed generation under uncertainty: A case of the City Cape Town, South Africa. *Journal of Cleaner Production*, 343, 130824. <https://doi.org/10.1016/j.cles.2022.100034>
- Alao, M.A., Popoola, O.M., Ayodele, T.R. (2022). Waste-to-energy nexus: An overview of technologies and implementation for sustainable development. *Cleaner Energy Systems*, 3, 100034. DOI: 10.1016/j.cles.2022.100034
- Amin, F.R., Khalid, H., Zhang, H., u- Rahman, S., Zhang, R., Liu, G., Chen, C. (2017). Pretreatment methods of lignocellulosic biomass for anaerobic digestion, *ABM Express*, 7, 72. <https://doi.org/10.1186/s13568-017-0375-4>
- Atelge, M.R., Atabani, A.E., Rajesh Banu, J., Krisa, D., Kaya, M., Eskicioglu, C., Kumar, G., Lee, C., Yildiz, Y.Ş., Unalan, S., Mohanasundaram, R., Duman, F. (2020). A critical review of pretreatment technologies to enhance anaerobic

- digestion and energy recovery. *Fuel*, 270, 117494.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117494>
- Awasthi, M.K., Sarsaiya, S., Chen, H., Wang, Q., Wang, M., Awasthi, S.K., Li, J., Liu, T., Pandey, A., Zhang, Z. (2019). *Global Status of Waste-to-Energy Technology*, Current Developments in Biotechnology and Bioengineering, Chapter 3, 31-52. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64083-3.00003-8>
- Bahreini, G., Nazari, L., Ho, D., Flannery, C. C., Elbeshbishy, E., Santoro, D., Nakhla, G. (2020). Enzymatic pre-treatment for enhancement of primary sludge fermentation, *Bioresource Technology*, 305, 123071. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.123071
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123071>
- Bourtsalas, A.C. (2023). Energy recovery from solid waste in China and a Green-BRI mechanism for advancing sustainable waste management of the global South, *Waste Disposal & Sustainable Energy*, 5: 309 – 321.
<https://doi.org/10.1007/s42768-022-00130-2>
- Bun, R., Marland, G., Oda, T., See, L., Puliafito, E., Nahorski, Z., Jonas, M., Konalyshyn, V., Ialongo, I., Yashchun, O., Romanchuk, Z. (2024). Tracking unaccounted greenhouse gas emissions due to the war in Ukraine since 2022. *Science of The Total Environment*, 914: 169879.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.169879>
- Carlini, M., Castellucci, S., Mennuni, A. (2018). Water hyacinth biomass: chemical and thermal pre-treatment for energy utilization in anaerobic digestion process, *Energy Procedia*, 148, 431-438.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.106>
- Chicaiza - Ortiz, C., Peñafiel - Arcos, P., Herrera - Feijoo, W., Ma, W., Logroño, W., Tian, H., Yuan, W. (2024). Waste-to-Energy technologies for municipal solid waste management: Bibliometric review, life cycle assessment, and energy potential case study, *Journal of Cleaner Production*, 430, 143993.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143993>

- China Statistical Yearbook, (2023). China Statistical Press, Beijing, China.
www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2023/indexeh.htm (Διαθέσιμο 25/1/2026:
<https://scholar.google.com/scholar?q=China%20Statistical%20Yearbook%202023%2C%20China%20Statistical%20Press%3A%20Beijing%2C%20China.%20https%3A%2F%2Fwww.stats.gov.cn%2Fsj%2Fndsj%2F2023%2Findexeh.htm>)
- Choi, J.-M., Han, S.-K., Lee, C.-Y. (2018). Enhancement of methane production in anaerobic digestion of sewage sludge by thermal hydrolysis pretreatment. *Bioresource Technology*, 259, 207 - 213.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.02.123>
- Coarita Fernandez, H., Teixeira Franco, R., Bayard, R., Buffiere, P. (2020). Mechanical Pre-treatments Evaluation of Cattle Manure Before Anaerobic Digestion. *Waste and Biomass Valorization*, 11, 5175 – 5184. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01022-4>
- Dwivedi, M.K., Pandey, S.K., Singh, P.K. (2022). Biogas from waste and nanoparticles as renewable energy: current status and outlook. *Artificial Intelligence for Renewable Energy System, Woodhead Publishing Series in Energy*, 4, 81-103. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90396-7.00006-7>
- E.P., (2024). European Parliament. Sustainable waste management: what the EU is doing. (Διαθέσιμο 16/11/2025: <https://www.europarl.europa.eu/topics/el/>).
- EPA, (2023). Overview of Greenhouse Gases. US Environmental Protection Agency. (Διαθέσιμο 15/11/2025: www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases)
- Eurostat. (2020). Waste treatment by type of recovery and disposal. (Διαθέσιμο 3/5/2026: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20241017-1>)
- Farid, M.A.A., Norrrahim, M.N.F., Lease, J., Andou, Y. (2024). Biogas Production from Municipal Solid Waste (MSW) Insights into Feedstock Preparation and

- Upgrading Techniques. (eds) *Generation of Energy from Municipal Solid Waste*. Springer, 313-343. https://doi.org/10.1007/978-3-031-74334-4_14
- Feng, R. Z., Zaidi, A. A., Zhang, K., Shi, Y. (2019). Optimization of Microwave Pretreatment for Biogas Enhancement through Anaerobic Digestion of Microalgal Biomass, *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 63(1), 65-72. <https://doi.org/10.3311/PPch.12334>
- Ganesan, S., Vedagiri, P. (2024). Optimizing refuse-derived fuel production: a review of pre-treatment techniques for municipal solid waste reclamation. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 149: 12455-12468. <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13713-4>
- Gerassimidou, S., Velis, C.A., Williams, P., Komilis, D. (2020). Characterization and composition identification of waste-derived fuels obtained from municipal solid waste using thermogravimetry: A review. *Waste Management & Research*, 38(9), 942 -965. <https://doi.org/10.1177/0734242X20941085>
- Gewald, D., Siokos, K., Karellas, S., Spliethoff, H. (2012). Waste heat recovery from a landfill gas-fired power plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 4, 1779 – 1789. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.036>
- Hans, M., Umrao, D., Velusamy, M., Kumar, D., Kumar, S. (2024). Biochemical conversion of municipal solid waste to biofuels and bioproducts: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 32: 19204-19224. doi: 10.1007/s11356-024-35667-8
- Hariyani, D., Hariyani, P., Mishra, S., Sharma, M.K. (2025). A literature review on waste management and control techniques. *Sustainable Future*, 9, 100728. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.100728>
- Hoang, A.T., Varbanov, P.S., Nižetić, S., Sirohi, R., Pandey, A., Ng, K.H., Pham, V.V. (2022). Perspective review on Municipal Solid Waste-to-energy route: Characteristics, management strategy, and role in circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 359, 131897. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131897>

- IPCC, (2006). H.S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe (Eds.), IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme (2006). (Διαθέσιμο 14/11/2025: <https://www.ipcc.ch/report/2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>).
- IPCC, (2007). Climate Change 2007: Working Group III: Mitigation of Climate Change: Chapter 10: Waste management. (Διαθέσιμο 14/11/26: https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg3/en/ch10.html)
- IPCC, (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report. *Cambridge University Press*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.(Διαθέσιμο 14/11/2025: <https://icsusa.org/reports/2013-ipcc-full-report/>).
- Islam, K.M.N. (2016). Municipal Solid Waste to Energy Generation in Bangladesh: Possible Scenarios to Generate Renewable Electricity in Dhaka and Chittagong City. *Journal of Renewable Energy*, 16, 1712370. <https://doi.org/10.1155/2016/1712370>
- ISWA, (2023). *White Book on Energy-from-Waste (EfW) Technologies*. Rotterdam, The Netherlands. (Διαθέσιμο 23/3/2026: <https://www.iswa.org>).
- Jha, S., Nanda, S., Acharya, B., Dalai, A.K. (2022). A Review of Thermochemical Conversion of Waste Biomass to Biofuels. *Energies*, 15 (17), 6352. <https://doi.org/10.3390/en15176352>
- Kataya, G., Cornu, D., Bechelany, M., Hijazi, A., Issa, M. (2023). Biomass Waste Conversion Technologies and Its Application for Sustainable Environmental Development – A Review. *Agronomy*, 13, 2833. <https://doi.org/10.3390/agronomy13112833>
- 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. *World Bank Publications*. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>

- Khan, I. (2018). Importance of GHG emissions assessment in the electricity grid expansion towards a low-carbon future: A time-varying carbon intensity approach. *Journal of Cleaner Production*, 196,1587-1599. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.162>
- Khan, I. & Kabir, Z. (2020). Waste-to-energy generation technologies and the developing economies: A multi-criteria analysis for sustainability 10assessment, *Renewable Energy*, 150, 320-333. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.132>
- Khosravi, S., Khoshbakhti Saray, R., Neshat, E., Arabkoohsar, A. (2023). Towards an environmentally friendly power and hydrogen co-generation system: Integration of solar-based sorption enhanced gasification with in-situ CO₂ capture and liquefaction process. *Chemosphere*, 343, 140226. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140226>
- Komilis, D., Kissas, K., Symeonidis, A. (2014). Effect of organic matter and moisture on calorific value of solid waste: an update of the Tanner diagram. *Waste Management*, 34, 2, 249-255. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.09.023>
- Kondili, E., Bartzis, I., Kapsali, M., Kaldellis, J.K. (2012). Multicriteria analysis of municipal solid wastes energy recovery technologies in Greece. *Global Nest Journal*, 14(2), 225-234. <https://www.researchgate.net/publication/266006089>
- Konyannik, B.Y. and Lavie, J.D. (2025). Valorization techniques for biomass waste in energy Generation: A systematic review. *Bioresource Technology*, 435, 132973. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2025.132973>
- Kumar, R., Sharma, S., Kumar, A., Singh, R., Awwad, F.A., Khan, M.I., Ismail, E.A.A. (2025). Sustainable energy recovery from municipal solid wastes: An in-depth analysis of waste-to-energy technologies and their environmental implications in India. *Energy Exploration & Exploitation*, Volume 43(1): 3-28. <https://doi.org/10.1177/01445987231210323>
- Malamis, D., Bourka, A., Stamatopoulou, E., Moustakas, K., Skiadi, O., Loizidou, M. (2017). Study and assessment of segregated biowaste composting: The case

- study of Attica municipalities. *Journal of Environmental Management*, 203, 2, 664 – 669. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.070>
- Malinauskaite, J., Jouhara, H., Czajczyńska, D., Stanchev, P., Katsou, E., Rostkowski, P., Thorne, R.J., Colón, J., Ponsá, S., Al-Mansour, F., Anguilano, L., Krzyżyńska, R., López, I.C., Vlasopoulos, A., Spencer, N. (2017). Municipal solid waste management and waste-to-energy in the context of a circular economy and recycling in Europe. *Energy*, 141, 2013 – 2044. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.128>
- Maragkaki, A., Gamvroudis, C., Lountou, C., Stamatiadis, P., Sampathianakis, I., Papadaki, A., Manios, T. (2022). Autonomous Home Composting Units for Urban Areas in Greece: The Case Study of the Municipality of Rhodes. *Sustainability*, 14, 12362. <https://doi.org/10.3390/su141912362>
- Mertzanakis, C., Vlachokostas, C., Toufexis, C., Michailidou, A.V. (2024). Closing the Loop between Waste-to-Energy Technologies: A Holistic Assessment Based on Multiple Criteria. *Energies*, 17, 2971. <https://doi.org/10.3390/en17122971>
- Montoya-Rosales, J.J., Peces, M., González-Rodríguez, L.M., Alatríste-Mondragón, F., Villa-Gómez, D.K. (2020). A broad overview comparing a fungal, thermal and acid pre-treatment of bean straw in terms of substrate and anaerobic digestion effect, *Biomass and Bioenergy*, 142, 105775. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105775>
- Morfopoulos, N. & Samolada, M.C. (2025). Effect of Waste-Derived Fuels (SRF/RDF) Composition on the Cement Industry's Environmental Footprint. *Waste and Biomass Valorization*, 16, 4017-4040. <https://doi.org/10.1007/s12649-025-03077-7>
- NAS, (2022). National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2022. Greenhouse Gas Emissions Information for Decision Making: A Framework Going Forward. *The National Academies Press*, Washington, DC: <https://doi.org/10.17226/26641>

- Niu, Y., Lv, Y., Lei, Y., Liu, S., Liang, Y., Wang, D. (2019). Biomass torrefaction: properties, challenges, and economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115, 109395. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109395>
- Noor, Z.Z., Yusuf, R.O., Abba, A.H., Hassan, M.A.A., Din, M.F.M. (2013). An overview for energy recovery from municipal solid wastes (MSW) in Malaysia scenario. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20: 378 – 384. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.050>
- Olawade, D.B., Fapohunda, O., Wada, O.Z., Usman, S.O., Ige, A.O., Ajisafe, O., Oladapo, B.I. (2024). Smart waste management: A paradigm shift enabled by artificial intelligence. *Waste Management Bulletin*, 2, 244 – 263. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.05.001>
- Osman, A.I., Nasr, M. Farghali, M., Rashwan, A.K., Abdelkader, A., Al-Muhtaseb, A.H., Ihara, I., Rooney, D.W. (2024). Optimizing biodiesel production from waste with computational chemistry, machine learning and policy insights: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 22, 1005 – 1071. <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01700-y>
- Pachakis, G., Malamis, D., Mai, S., Barampouti, E.M. (2025). Spatial Influence on Waste-to-Energy Sustainability: A Life Cycle Assessment of RDF Transport and Plant Siting. *Energies*, 18, 6238. <https://doi.org/10.3390/en18236238>
- Patil, S.C., Shulze-Netzer, C., Korpås, M. (2024). Current and emerging waste-to-energy technologies: A comparative study with multi-criteria decision analysis, *Smart Energy*, 16, 100157. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2024.100157>
- Pecorini, I., Bacchi, D., Iannelli, R. (2020). Biodrying of the light fraction from anaerobic digestion pretreatment in order to increase the total recovery rate. *Processes*, 8(3), 276. <https://doi.org/10.3390/pr8030276>
- Petkou, D., Andrea, V., Anthrakopoulou, K. (2020). The Impact of Training Environmental Perceptions and Attitudes of Pre-Primary and Primary School

- Teachers in Greece. *Education Sciences*, 11, 274. <https://doi.org/10.3390/educsci11060274>
- Prajapati, P., Varjani, S., Singhania, R.R., Patel, A.K., Awasthi, M.K., Sinshu, R., Zhang, Z., Binod, P., Awasthi, S.K., Chaturvedi, P. (2021). Critical review on technological advancements for effective waste management of municipal solid waste – Updates and way forward. *Environmental Technology & Innovation*, 23, 101749. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101749>
- Rafieenia, R., Girotto, F., Peng, W., Cossu, R., Pivato, A., Raga, R., Lavagnolo, M.C. (2017). Effect of aerobic pre-treatment on hydrogen and methane production in a two-stage anaerobic digestion process using food waste with different compositions, *Waste Management*, 59, 194 – 199. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.028>
- Ram, C., Kumar, A., Rani, P. (2021). Municipal Solid Waste Management: A review of Waste to Energy (WtE) Approaches. *BioResources*, 16(2), 4275 - 4320. <https://doi.org/10.15376/biores.16.2.Ram>
- Rashad, M.A., Hussain, M., Akhter, P., Hamayum, M.H., Ahsan, A., Jamil, F., Lee, D., Park, Y.-K. (2026). Transforming municipal solid waste management: Current status of segregation challenges, waste-to-energy technologies, and circular economy strategies. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 153, 122 – 134. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2025.06.009>
- Roy, H., Alam, S.R., Bin-Masud, R., Prantika, T.R., Pervez, M.N., Islam, M.S., Naddeo, V.A. (2022). Review on characteristics, techniques, and waste-to-energy aspects of municipal solid waste management: Bangladesh perspective. *Sustainability*, 14, 10265. <https://doi.org/10.3390/su141610265>
- Scherzinger, M. & Kaltschmitt, M. (2021). Thermal pre-treatment options to enhance anaerobic digestibility – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 137, 110627. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110627>
- Tisi, Y. S. A. B., Matos, F. A., Carneiro, M. L. N. M. (2023). Development of waste-to-energy through integrated sustainable waste management: the case of

- ABREN WtERT Brazil towards changing status quo in Brazil. *Waste Disposal & Sustainable Energy*, 5, 295–308. <https://doi.org/10.1007/s42768-022-00127-x>
- Tsatsarelis, T. & Karagiannidis, A. (2008). Estimation of future methane production from Hellenic landfills. *Global Nest Landfills*, 11(2), 162 – 171. <https://journal.gnest.org/publication/591>
- Tsui, T.H., Wong, J.W.C. (2019). A critical review: emerging bioeconomy and waste-to-energy technologies for sustainable municipal solid waste management. *Waste Disposal & Sustainable Energy*, 1, 151-167. <https://doi.org/10.1007/s42768-019-00013-z>
- UNEP, (2019) In: Kemsey, J. Waste To Energy: Considerations for Informed Decision – Making. *United Nations Environment Programme*.
- Vlachokostas, Ch., Michailidou, A.V., Achillas, Ch. (2021). Multi-Criteria Decision Analysis towards promoting Waste-to-Energy Management Strategies: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 138, 110563. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110563>
- Walling, E., Babin, A., Vaneeckhaute, C. (2019). Nutrient and Carbon Recovery from Organic Wastes. In *Biorefinery*; Springer: Cham, Switzerland. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-10961-5_14
- Wang, W. and Lee, D.-J. (2021). Valorization of anaerobic digestion digestate: A prospect review. *Bioresource Technology*, 323, 124626. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124626>
- Wang, Y. and Wu, J.J. (2023). Thermochemical conversion of biomass: Potential future prospects, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 187, 113754. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113754>
- Zhang, L., Loh, K.-C., Zhang, J. (2019). Enhanced biogas production from anaerobic digestion of solid organic wastes: Current status and prospects, *Bioresource Technology Reports*, 5, 280-296. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2018.07.005>

Zorpas, A.A., Lasaridi, K., Pociovalisteanu, D.M., Loizia, P. (2018). Monitoring and evaluation of prevention activities regarding household organics waste from insular communities. *Journal of Cleaner Production*, 172, 3567 –3577. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.155>

ΕΛΛΗΝΟΓΛΩΣΣΗ

Εθνικό Σχέδιο Διαχείρισης Αποβλήτων (Ε.Σ.Δ.Α.) (2020). Τροποποίηση της υπ' αρ. 39/31.8.2020 Πράξης Υπουργικού Συμβουλίου (Α' 185), 18/4/2023.

Ντοάς, Ε. & Δούναβης, Α.Σ. (2024). Διαχείριση και Αξιοποίηση Αστικών Αποβλήτων. *14^ο Πανελλήνιο Επιστημονικό Συνέδριο Χημικής Μηχανικής*, 29 – 31 Μαΐου, Θεσσαλονίκη.

Κιαχίδης, Δ. (2022). Θερμική επεξεργασία και ενεργειακή αξιοποίηση στερεών αποβλήτων σε μονάδες μικρής κλίμακας. *Μεταπτυχιακή Εργασία*, ΕΑΠ, Πάτρα.

ΡΑΑΕΥ, (2025). *Ρυθμιστική Αρχή Αποβλήτων, Ενέργειας & Υδάτων. Πρόταση Ολοκληρωμένης Δέσμης Μέτρων για την διασφάλιση της επιχειρησιακής λειτουργίας των Φορέων Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων (ΦοΔΣΑ)*. 1^η Έκδοση – Μάιος 2025, No. 07/2025. (Διαθέσιμο 17/11/2025: ΡΑΑΕΥ_Δέσμη_Μέτρων PDF www.moneyreview.gr).