

Εφαρμογή Ανάλυσης Κύκλου Ζωής στη διαχείριση βιοαποβλήτων από τον υποβρύχιο καθαρισμό υφάλων πλοίου

Παραδοτέο Π6.2

Γρηγορία Καλυβιώτη

Έργο: «Ολοκληρωμένο Σύστημα Υποβρύχιου Οικολογικού
Καθαρισμού» Ακρωνύμιο: ECOHULLCLEAN

Κωδικός έργου: Τ2ΕΔΚ-05287

Περιεχόμενα

1.	Κυκλική Οικονομία και διαχείριση βιοαποβλήτων.....	5
2.	Μέθοδοι επεξεργασίας βιοαποβλήτων.....	9
2.1.	Μηχανική Βιολογική Επεξεργασία βιοαποβλήτων.....	9
2.1.1.	Κομποστοποίηση - Αερόβια επεξεργασία.....	9
2.1.2.	Αναερόβια χώνευση.....	13
2.2.	Θερμική επεξεργασία.....	16
2.2.1.	Αποτέφρωση (πλήρης καύση).....	16
2.2.2.	Πυρόλυση.....	19
2.2.3.	Αεριοποίηση.....	20
2.3.	Υγειονομική ταφή.....	21
3.	Σύσταση βιοεπίστρωσης.....	22
3.1.	Επικίνδυνα και μη επικίνδυνα απόβλητα.....	22
4.	Εφαρμογή Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (AKZ).....	24
4.1.	Στόχος και αντικείμενο AKZ.....	25
4.2.	Λειτουργική Μονάδα.....	26
4.3.	Όρια συστήματος.....	27
4.4.	Απογραφή δεδομένων.....	27
4.5.	Χρήση λογισμικού AKZ και μεθοδολογία μοντελοποίησης.....	28
4.6.	Εκτίμηση επιπτώσεων (ενδιάμεσα σημεία - midpoints).....	28
4.6.1.	Κλιματική αλλαγή (IPPC, 2007).....	31
4.6.2.	Εξάντληση όζοντος (WMO,1999).....	31
4.6.3.	Τοξικότητα στον άνθρωπο (USEtox).....	32
4.6.4.	Αιωρούμενα σωματίδια (RiskPoll model).....	32
4.6.5.	Ιοντίζουσα ακτινοβολία (Human health effect model).....	32
4.6.6.	Φωτοχημική οξείδωση (LOTOS-EUROS).....	32
4.6.7.	Οξίνιση (Accumulated Exceedance).....	33
4.6.8.	Ευτροφισμός (Accumulated Exceedance).....	33
4.6.9.	Οικοτοξικότητα (Usetox).....	33
4.6.10.	Εξάντληση αβιοτικών πόρων (CML 2002).....	33
4.7.	Περιγραφή σεναρίων.....	34
4.7.1.	Σενάριο 0 - Σενάριο Αναφοράς/ ΧΥΤΑ.....	34
4.7.2.	Σενάριο 1- Αερόβια επεξεργασία και παραγωγή κομπόστ.....	35

4.7.3.	Σενάριο 2 – Αναερόβια χώνευση και παραγωγή βιοαερίου	37
4.7.4.	Σενάριο 3 – Καύση και παραγωγή RDF/SRF	38
4.8.	Γενικές παραδοχές.....	39
5.	Αποτελέσματα Σεναρίων.....	41
5.1.	Σενάριο 0 – Σενάριο Αναφοράς/ΧΥΤΑ	43
5.2.	Σενάριο 1 – Κομποστοποίηση.....	44
5.3.	Σενάριο 2 - Αναερόβια Χώνευση.....	46
5.4.	Σενάριο 3 – Καύση	48
6.	Ανάλυση ευαισθησίας.....	50
7.	Συμπεράσματα.....	52
8.	Βιβλιογραφία.....	58
9.	Παράρτημα	62

Συντομογραφίες

AKZ	Ανάλυση Κύκλου Ζωής
ΑΣΑ	Αστικά Στερεά Απόβλητα
ΑΧ	Αναερόβια Χώνευση
ΔσΠ	Διαλογή στη πηγή
ΕΕ	Ευρωπαϊκή Ένωση
ΕΕΔΣΑ	Ελληνική Εταιρεία Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων
ΕΚΑ	Ευρωπαϊκός Κατάλογος Αποβλήτων
ΕΜΑΚ	Εργοστάσιο Μηχανικής Ανακύκλωσης και Κομποστοποίησης
ΟΕΔΑ	Ολοκληρωμένη Εγκατάσταση Διαχείρισης Απορριμμάτων
ΜΒΕ	Μηχανική Βιολογική Επεξεργασία
ΠΕΣΔΑ	Περιφερειακά Σχέδια Διαχείρισης Αποβλήτων
ΣΜΑ	Σταθμό Μεταφόρτωσης Απορριμμάτων
ΧΥΤΑ	Χώρος Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων
ADP	Abiotic Depletion Potential
AP	Acid-generating potential
APP	Antifouling paint particles
GWP	Global Warming Potential
HTP	Human Toxicity Potentials
ILCD	International Reference Life Cycle Data System
IMO	International Maritime Organization
IPPC	International Plant Protection Convention
LCI	Life Cycle Inventory
LHV	Lower Heating Value
NP	Nutrient profile
PM	Particulate Matter
POCP	Photochemical Ozone Creation Potential
RDF	Refuse-Derived Fuel
SRF	Solid Recovered Fuel
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
WMO	World Meteorological Organization

1. Κυκλική Οικονομία και διαχείριση βιοαποβλήτων

Σύμφωνα με τον Κανονισμό 2020/852 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 18ης Ιουνίου 2020 σχετικά με τη θέσπιση πλαισίου για τη διευκόλυνση των βιώσιμων επενδύσεων και για την τροποποίηση του Κανονισμού 2019/2088 και συγκεκριμένα στο Άρθρο 2 (9), ως **Κυκλική Οικονομία** ορίζεται το οικονομικό σύστημα στο οποίο διατηρείται η αξία των προϊόντων, των υλικών και άλλων πόρων στην οικονομία για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα με την ενίσχυση της αποτελεσματικής χρήσης τους στην παραγωγή και κατανάλωση, μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο της χρήσης τους, και με την ελαχιστοποίηση των αποβλήτων και της αποδέσμευσης επικίνδυνων ουσιών σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής τους, μεταξύ άλλων μέσω της εφαρμογής της **ιεράρχησης των αποβλήτων**. Έτσι, γίνεται μετάβαση από το υπάρχον γραμμικό μοντέλο οικονομικής ανάπτυξης στο κυκλικό, όπου η αξία των προϊόντων, των υλικών και των πόρων, παραμένει στην οικονομία όσο το δυνατόν περισσότερο και η παραγωγή αποβλήτων περιορίζεται στο ελάχιστο (Εικόνα 1).



Εικόνα 1 Μοντέλο γραμμικής και κυκλικής οικονομίας (ΕΚΤ, 2019)

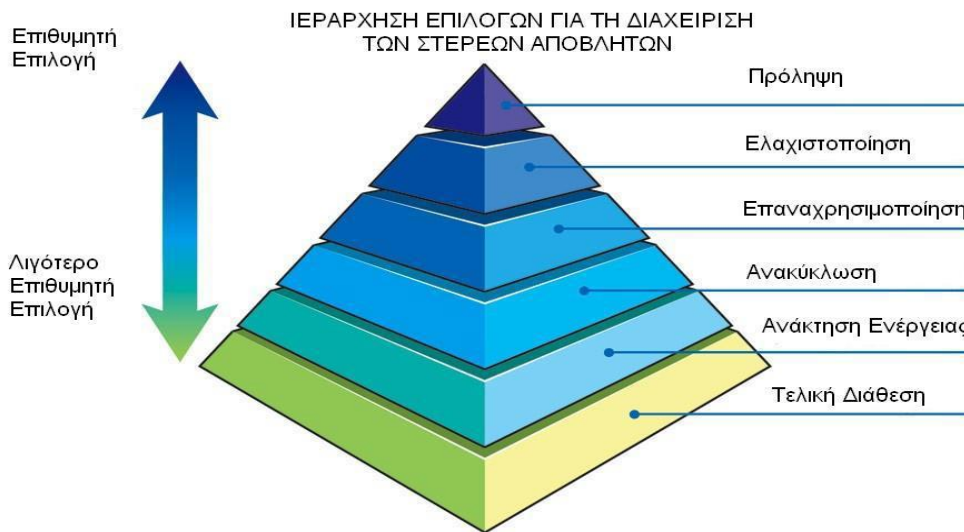
Η κυκλική οικονομία στοχεύει στην ελαχιστοποίηση της σπατάλης φυσικών πόρων σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής ενός προϊόντος, από τον σχεδιασμό του μέχρι την ασφαλή για το περιβάλλον διαχείριση των σχετικών αποβλήτων στο τέλος του κύκλου ζωής του (Εικόνα 2). Ειδικότερα διευκολύνεται η επισκευή του προϊόντος κατά τον σχεδιασμό, ενώ προωθείται η χρήση δευτερογενών υλών, η ανακατασκευή προϊόντων και ο περιορισμός των αποβλήτων κατά την παραγωγή. Στη διανομή, περιορίζεται η σπατάλη ενεργειακών πόρων, ενώ στην κατανάλωση, προωθείται η επαναχρησιμοποίηση και επισκευή του προϊόντος. Στο τέλος του κύκλου ζωής του προϊόντος, προωθείται η συλλογή του προς

ανακύκλωση και η δημιουργία δευτερογενών υλών για την παραγωγή νέων προϊόντων (Βέττας et al., 2022). Με αυτό τον τρόπο μπορούν να δημιουργηθούν επιχειρηματικές και οικονομικές ευκαιρίες με σημαντικά κοινωνικά οφέλη.



Εικόνα 2 Υπόδειγμα της κυκλικής οικονομίας (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2014)

Στο πλαίσιο της Οδηγίας 2008/98/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 19ης Νοεμβρίου «για τα απόβλητα και την κατάργηση ορισμένων οδηγιών, θεσπίζεται η καθοριστικής σημασίας αρχή της ιεράρχησης των αποβλήτων. Η **ιεράρχηση των μεθόδων διαχείρισης** γίνεται με την ακόλουθη προτεραιότητα: α) πρόληψη για τη μείωση των παραγόμενων αποβλήτων, β) προετοιμασία για επαναχρησιμοποίηση των αποβλήτων, γ) ανακύκλωση, δηλαδή η μετατροπή των αποβλήτων σε νέα προϊόντα, δ) άλλου είδους ανάκτηση, όπως ανάκτηση πόρων και ενέργειας, και ε) διάθεση των αποβλήτων σε χώρους υγειονομικής ταφής. Σύμφωνα μάλιστα με το Άρθρο 4 της Οδηγίας 2008/98/ΕΚ, όπως αυτό έχει τροποποιηθεί, ενδέχεται να υπάρξει παρέκκλιση από την ιεράρχηση για ορισμένα ειδικά ρεύματα αποβλήτων, λαμβάνοντας υπόψη τις συνολικές επιπτώσεις της παραγωγής και της διαχείρισής τους.



Εικόνα 3 Ιεράρχηση επιλογών για τη διαχείριση των στερεών αποβλήτων

Ειδικά για τα βιοαπόβλητα στο άρθρο 22 της Οδηγίας γίνεται ξεχωριστή αναφορά στα βιολογικά απόβλητα για τα οποία προβλέπεται α) η χωριστή συλλογή τους ενόψει της κομποστοποίησης και της ζύμωσης των βιοαποβλήτων, β) η επεξεργασία των βιολογικών αποβλήτων κατά τρόπο που να διασφαλίζεται υψηλό επίπεδο περιβαλλοντικής προστασίας και, γ) η χρήση περιβαλλοντικά ασφαλών υλικών, τα οποία παράγονται από τα βιολογικά απόβλητα.

Στην Ελλάδα παράγονται ετησίως περίπου 5,8 εκατομμύρια τόνοι αστικών στερεών αποβλήτων, εκ των οποίων οι 2,6 εκατομμύρια τόνοι είναι βιοαπόβλητα (ΕΠΠΕΡΑΑ, 2014). Το μεγαλύτερο ποσοστό των βιοαποβλήτων εξακολουθεί να καταλήγει ως μέρος των σύμμεικτων αποβλήτων σε χώρους υγειονομικής ταφής ενώ ένα μικρό ποσοστό αξιοποιείται μέσω της οικιακής κομποστοποίησης ή ανακτάται σε εγκαταστάσεις βιολογικής επεξεργασίας (ΕΠΠΕΡΑΑ, 2014).

Επισημαίνεται ότι οι μέθοδοι επεξεργασίας που στοχεύουν στην αξιοποίηση του οργανικού περιεχομένου των βιολογικών αποβλήτων λειτουργούν καλύτερα όταν γίνεται διαλογή στην πηγή (ΔοΠ) καθώς έτσι μειώνεται ο κίνδυνος επιμόλυνσής τους από άλλες πηγές αποβλήτων (JRC, 2014).

Στην παρούσα μελέτη, όπου μελετάται η διαχείριση των καταλοίπων βιοεπίστρωσης (βιοαπόβλητα) από τον υποβρύχιο καθαρισμό των υφάλων των πλοίων, θα μπορούσε να εφαρμοστεί η εξής ιεραρχία των αποβλήτων (Εικόνα 3). Σημειώνεται ότι η Εικόνα 3 έχει προσαρμοστεί σύμφωνα με τις ανάγκες της μελέτης και αναφέρονται οι βασικές τεχνολογίες διαχείρισης βιοαποβλήτων ενώ δεν περιλαμβάνονται άλλες πιθανές τεχνολογίες που μπορεί μέχρι σήμερα να μην είναι ώριμες τεχνολογικά, βρίσκονται σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης ή έχουν εφαρμοστεί πιλοτικά.



Εικόνα 4 Η ιεράρχηση των βιοαποβλήτων υποβρύχιου καθαρισμού υφάλων πλοίων (προσαρμογή σε παρούσα μελέτη από JRC, 2014)

Χρησιμοποιούμε την παραπάνω γενική αρχή ως κατευθυντήρια γραμμή σε συνδυασμό με την εφαρμογή της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Κεφάλαιο 4) για την επιλογή βέλτιστων μεθόδων διαχείρισης της βιοεπίστρωσης από περιβαλλοντική σκοπιά. Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφονται οι βασικές μέθοδοι επεξεργασίας των βιοαποβλήτων.

2. Μέθοδοι επεξεργασίας βιοαποβλήτων

Ως «επεξεργασία» ορίζεται η εφαρμογή φυσικών, θερμικών και βιολογικών διεργασιών, οι οποίες μεταβάλλουν τα χαρακτηριστικά των βιοαποβλήτων με σκοπό τη μείωση του όγκου τους, τη διευκόλυνση του χειρισμού τους και την ανάκτηση υλικών ή ενέργειας. Η «διάθεση» των βιοαποβλήτων αφορά στο τελικό στάδιο της διαχείρισής τους, δηλαδή όταν δε δύναται να υποστούν περαιτέρω επεξεργασία (Πανά και Τακαβάκογλου, 2021).

Οι βασικές μέθοδοι επεξεργασίας που εφαρμόζονται αυτοτελώς ή σε συνδυασμό είναι οι εξής:

1. Μηχανική Βιολογική επεξεργασία, η οποία περιλαμβάνει τη κομποστοποίηση (αερόβια επεξεργασία) και την αναερόβια χώνευση.
2. Θερμική επεξεργασία, η οποία περιλαμβάνει την αποτέφρωση, την πυρόλυση και την αεριοποίηση.
3. Υγειονομική ταφή

2.1. Μηχανική Βιολογική Επεξεργασία βιοαποβλήτων

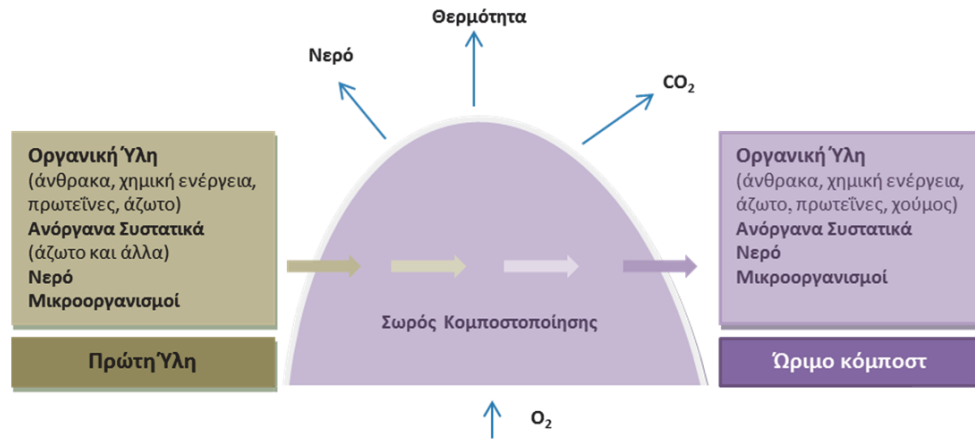
Η Μηχανική Βιολογική Επεξεργασία (ΜΒΕ) βιοαποβλήτων χρησιμοποιείται συχνά για να μειωθεί ο όγκος και η μάζα των απορριμμάτων και για να σταθεροποιηθεί το βιοαποδομήσιμο κλάσμα των ΑΣΑ πριν από την υγειονομική ταφή του. Αυτό με τη σειρά του οδηγεί στη μείωση των οσμών υγειονομικής ταφής και της παραγωγής βιοαερίου, και στη δημιουργία στραγγισμάτων με χαμηλότερες συγκεντρώσεις οργανικής ουσίας και άλλων ρύπων. Η διαδικασία ΜΒΕ ωστόσο μπορεί να οδηγήσει σε παραγωγή διαφόρων αέριων ρύπων (π.χ. μεθάνιο, αμμωνία), γεγονός που καθιστά ζωτικής σημασίας την εφαρμογή εκτεταμένων μέτρων ελέγχου των εκπομπών αυτών (JRC, 2014).

Βασικό πλεονέκτημα των βιολογικών μεθόδων επεξεργασίας των βιοαποβλήτων είναι η δυνατότητα επιστροφής των οργανικών υλικών στο έδαφος (ολοκλήρωση οικολογικού κύκλου) και υποκαθιστώντας μέρος των εισροών χημικών λιπασμάτων στο έδαφος. Οι κύριες μέθοδοι βιολογικής επεξεργασίας των βιοαποβλήτων είναι η κομποστοποίηση (αερόβια επεξεργασία) και η αναερόβια χώνευση.

2.1.1. Κομποστοποίηση - Αερόβια επεξεργασία

Σύμφωνα με την ΚΥΑ 56366/4351/2014 (ΦΕΚ Β 3339 12.12.2014) ως «αερόβια επεξεργασία (κομποστοποίηση)» ορίζεται η ελεγχόμενη αερόβια (οξειδωτική) βιολογική διαδικασία αποδόμησης και σταθεροποίησης οργανικών υλικών, που πραγματοποιείται υπό τις φυσικές και χημικές εκείνες συνθήκες που ευνοούν τη διαδοχή συγκεκριμένων θερμοφίλων, θερμοάντοχων και μεσόφιλων μικροβιακών πληθυσμών. Κατά την κομποστοποίηση αερόβιοι μικροοργανισμοί αποικοδομούν το οργανικό υλικό υπό ελεγχόμενες συνθήκες για να μετατραπεί στη συνέχεια σε σταθεροποιημένη οργανική ύλη, το **κομπόστ** που είναι και το **τελικό προϊόν**. Μαζί με το κομπόστ παράγεται διοξείδιο του άνθρακα, νερό και θερμότητα. Το κομπόστ αποτελεί το 20-40% του καθαρού βάρους της αρχικής οργανικής ύλης και χρησιμοποιείται κυρίως ως

εδαφοβελτιωτικό (ανάλογα με την ποιότητά του υλικού) αλλά και ως υπόστρωμα (Λαζαρίδη et al., 2002).



Εικόνα 5 Διαδικασία κομποστοποίησης (Rynk et al., 1992)

Οι βασικές παράμετροι που επηρεάζουν την κομποστοποίηση είναι ο λόγος άνθρακα-αζώτου (C/N), η θερμοκρασία, το οξυγόνο, η υγρασία, το πορώδες και το pH. Κατά την διάρκεια της κομποστοποίησης οι παράγοντες αυτοί ελέγχονται και ρυθμίζονται ώστε να δημιουργηθεί το βέλτιστο περιβάλλον για τους οργανισμούς και την αποσύνθεση των οργανικών αποβλήτων. Η βέλτιστη κομποστοποίηση παρατηρείται όταν το οργανικό μείγμα έχει τα παρακάτω φυσικοχημικά χαρακτηριστικά (ΕΠΠΕΡΑΑ, 2014):

- Σχέση άνθρακα προς άζωτο (C/N) 27:1 έως 30:1
- Θερμοκρασία περιβάλλοντος max 65°C για αποφυγή καταστροφής μικροοργανισμών και > 55°C για καταστροφή παθογόνων και ζιζανίων
- Οξυγόνο 7-12% κ.ο. (>5% κ.ο. O₂, >10-12% CO₂, >1% κ.ο. CH₄)
- Υγρασία 45-60% κ.β.
- Βέλτιστη τιμή ειδικού βάρους υλικού προς κομποστοποίηση 500-650 kg/m³ και μέγεθος σωματιδίων 25-40mm διάμετρο
- pH 6,5-8

Επίσης, σύμφωνα με την Υ.Α. οικ. 56366/4351/2014 (ΦΕΚ 3339/Β' 12.12.2014) για τον «Καθορισμό απαιτήσεων (προδιαγραφών) για εργασίες επεξεργασίας στο πλαίσιο της μηχανικής-βιολογικής επεξεργασίας των σύμμεικτων αστικών αποβλήτων και καθορισμός χαρακτηριστικών των παραγόμενων υλικών ανάλογα με τις χρήσεις τους, σύμφωνα με το εδάφιο β της παραγράφου 1 του άρθρου 38 του (24/Α)», οι οριακές τιμές

του κομπόστ τύπου Α¹ (ΕΚΑ 19 05 03) και του χωνεύματος τύπου Α² (ΕΚΑ 19 06 04), καθορίζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1 Οριακές τιμές κομπόστ τύπου Α και χωνεύματος τύπου Α (Άρθρο 2, ΦΕΚ 3339/Β' 12.12.2014)

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ – ΜΟΝΑΔΑ	ΟΡΙΑΚΕΣ ΤΙΜΕΣ
Cd, mg/kg ξηρού βάρους	≤3
Cr, mg/kg ξηρού βάρους	≤250
Cu, mg/kg ξηρού βάρους	≤400
Hg, mg/kg ξηρού βάρους	≤2,5
Ni, mg/kg ξηρού βάρους	≤100
Pb, mg/kg ξηρού βάρους	≤300
Zn, mg/kg ξηρού βάρους	≤1200
As, mg/kg ξηρού βάρους	≤10
Πολυχλωριωμένα Διφαινύλια (PCBs), mg/kg ξηρού βάρους	≤0,4
Πολυκυκλικοί Αρωματικοί Υδρογονάνθρακες (PAH), mg/kg ξηρού βάρους	≤3
Προσμίξεις > 2 mm, % σε ξηρή βάση	≤3
Υγρασία	<40%

Η κομποστοποίηση περιλαμβάνει τέσσερις φάσεις (ΕΠΠΕΡΑΑ, 2014):

Ψυχροφιλική Φάση (Φάση της υστέρησης): Οι μικροοργανισμοί ξεκινούν να πολλαπλασιάζονται καταναλώνοντας το άμυλο, τα αμινοξέα και τα σάκχαρα των αποβλήτων. Στη φάση αυτή παρατηρούνται κυρίως βακτήρια αλλά και μύκητες και πρωτόζωα. Η θερμοκρασία φτάνει μέχρι τους 22°C και η διαδικασία διαρκεί συνήθως 1-2 ημέρες.

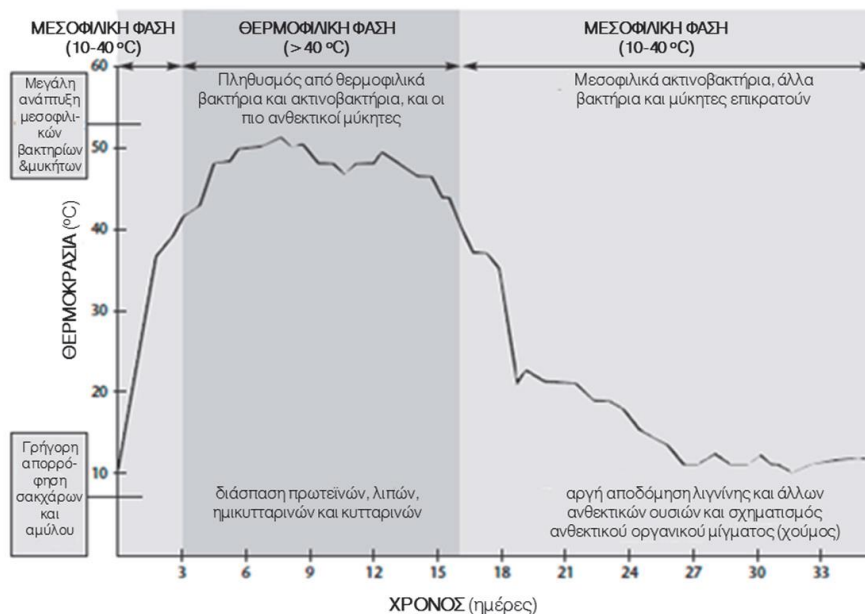
Πρώτη Μεσοφιλική Φάση (Φάση της ανάπτυξης): Στη φάση αυτή η θερμοκρασία μπορεί να φτάσει τους 40°C λόγω του γρήγορου πολλαπλασιασμού των μικροοργανισμών (μεσόφιλοι μικροοργανισμοί) και η διαδικασία διαρκεί 3-4 ημέρες.

¹ «κομπόστ τύπου Α»: το υγειονοποιημένο και σταθεροποιημένο κομπόστ που προκύπτει από την επεξεργασία σύμμεικτων αστικών αποβλήτων, βάσει ΦΕΚ 3339/Β' 12.12.2014.

² «χώνευμα τύπου Α»: το υγειονοποιημένο και σταθεροποιημένο χώνευμα που προκύπτει από την αναερόβια χώνευση σύμμεικτων αστικών αποβλήτων σε μορφή στερεού πλακούντα, βάσει ΦΕΚ 3339/Β' 12.12.2014.

Θερμοφιλική φάση: Στο στάδιο αυτό παρατηρούνται οι μέγιστες θερμοκρασίες κομποστοποίησης όπου οι θερμοφιλοί μικροοργανισμοί διασπούν τις πρωτεΐνες, τα λίπη και τους σύνθετους υδατάνθρακες (κυτταρίνες, ημικυτταρίνες). Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας σε αυτή τη φάση, καταστρέφονται οι σπόροι ζιζανίων και παθογόνων μικροβίων (υγιεινοποίηση). Η θερμοκρασία ωστόσο χρειάζεται να παρακολουθείται ώστε να μην ξεπεράσει τους 60°C (ιδανικές τιμές). Με τη πάροδο του χρόνου τα διαθέσιμα θρεπτικά συστατικά μειώνονται κι έτσι μειώνεται και η βιολογική δραστηριότητα και η θερμοκρασία αρχίζει να σταθεροποιείται φτάνοντας σταδιακά στους 40°C. Η θερμοφιλική φάση διαρκεί 15-20 μέρες.

Δεύτερη Μεσοφιλική Φάση (Φάση της ωρίμανσης): Η θερμοκρασία μειώνεται συνεχώς μέχρι να φτάσει στα επίπεδα θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Στο στάδιο αυτό αναλαμβάνουν πάλι οι μεσοφιλικοί μικροοργανισμοί οι οποίοι προέρχονται είτε από εξωτερικό εμπλουτισμό ή διατηρήθηκαν σε ανθεκτικά σπόρια από τα αρχικά στάδια της διαδικασίας. Στο στάδιο αυτό γίνεται η αποικοδόμηση του αμύλου και της κυτταρίνης του υποστρώματος ενώ ξεκινά η αργή αποικοδόμηση της λιγνίνης. Η οργανική ύλη δεν μπορεί να διασπαστεί περισσότερο και το κομπόστ ωριμάζει.



Εικόνα 6 Φάσεις κομποστοποίησης (Trautmann and Krasny E.M., 1997)

Υπάρχουν τριών ειδών συστημάτων κομποστοποίησης: τα ανοιχτά, τα κλειστά και τα μεικτά συστήματα. Τα συστήματα που χρησιμοποιούν αντιδραστήρα ονομάζονται μηχανικά ή κλειστά ενώ αυτά που δεν χρησιμοποιούν αντιδραστήρα ονομάζονται ανοιχτά. Τα μεικτά συστήματα χρησιμοποιούν τεχνικές και από τα δύο συστήματα.

Τα **οφέλη** της μεθόδου της κομποστοποίησης την καθιστούν ανταγωνιστική τεχνολογία καθώς:

1. Χρειάζεται μικρό επενδυτικό και λειτουργικό κόστος σε σχέση με άλλες ανταγωνιστικές τεχνολογίες.
2. Έχει μεγάλη κοινωνική αποδοχή με αποτέλεσμα να μπορεί να χωροθετηθεί σε μικρή απόσταση από την παραγωγή αποβλήτων, μειώνοντας έτσι το κόστος μεταφοράς.
3. Οι εγκαταστάσεις απαιτούν μικρό χρόνο κατασκευής (<6 μήνες).
4. Δεν παράγονται επικίνδυνα και τοξικά αέρια ή καρκινογόνες ουσίες.
5. Δεν παράγει τοξικά στερεά κατάλοιπα.
6. Τα οργανικά επιστέφουν πάλι στη γη και έτσι αποτελεί αειφόρο μέθοδο διαχείρισης και συμβάλει στην έννοια της κυκλικής οικονομίας.
7. Έχει καλύτερες επιδόσεις σχετικά με την κλιματική αλλαγή και την ενεργειακό αποτύπωμα συγκριτικά με άλλες μεθόδους διαχείρισης.
8. Βασίζεται σε απλούστερη τεχνολογία και εξαρτάται λιγότερο από προμηθευτές.

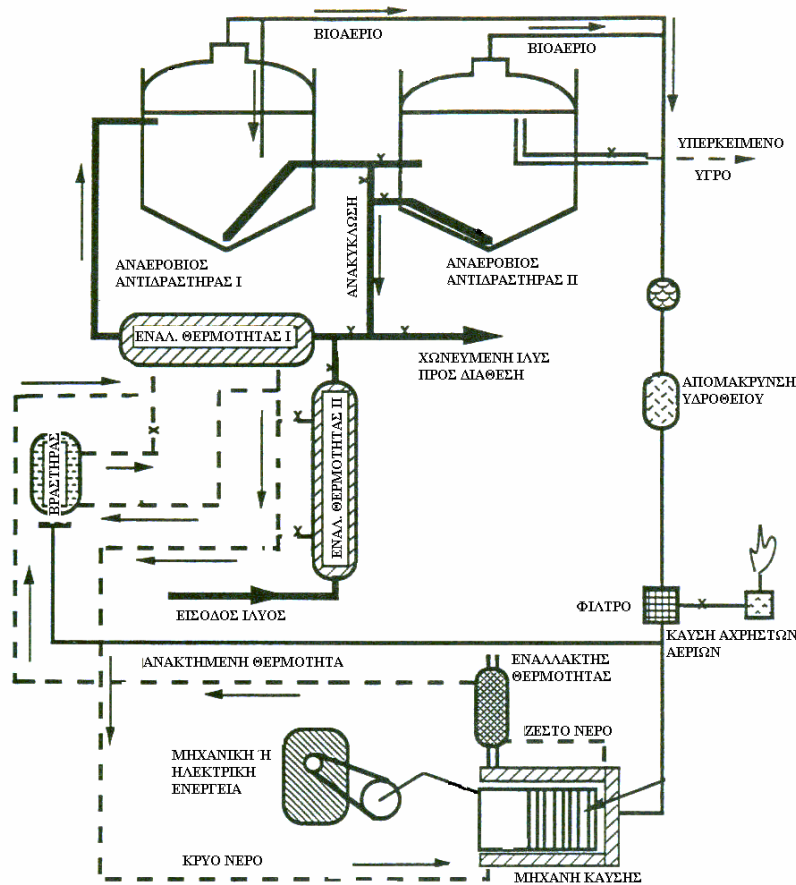
Τα κύρια **μειονεκτήματα** της μεθόδου της κομποστοποίηση είναι (Erstein, 2011):

1. Η οσμή, σκόνη και οι εκπομπές βιοαεροζόλης μπορεί να λάβουν χώρα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Ωστόσο αυτές μπορούν να ελεγχθούν μέσω της βελτίωσης του σχεδιασμού των εγκαταστάσεων και της διαχείρισης των λειτουργιών.
2. Οι εγκαταστάσεις κομποστοποίησης απαιτούν περισσότερο χώρο σε σχέση με άλλες τεχνολογίες διαχείρισης αποβλήτων.

2.1.2. Αναερόβια χώνευση

Στην αναερόβια χώνευση γίνεται ελεγχόμενη αποδόμηση των οργανικών αποβλήτων υπό συνθήκες έλλειψης οξυγόνου (αναερόβιες συνθήκες) και κατά την διαδικασία παράγεται βιοαέριο και ένα υδαρές υπόλειμμα ιλύος, γι' αυτό και συχνά αναφέρεται και ως **βιοαεριοποίηση**. Στόχος της αναερόβιας επεξεργασίας της ιλύος είναι η μετατροπή της σε ένα αβλαβές και αφυδατωμένο υλικό. Κατά τη διαδικασία ένα κλάσμα των οργανικών στερεών μετατρέπεται βιολογικά σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα, ενώ πολλοί παθογόνοι μικροοργανισμοί καταστρέφονται. Η μείωση της μάζας και του όγκου της ιλύος συνήθως φθάνει το 30-40% της αρχικής ποσότητας.

Τελικά προϊόντα της αναερόβιας χώνευσης είναι το **βιοαέριο** και ένα **χωνεμένο υπόλειμμα τύπου κομπόστ**. Το βιοαέριο περιέχει 65-75% μεθάνιο ενώ το υπόλοιπο είναι κυρίως διοξείδιο του άνθρακα (Μουσιόπουλος και Καραγιαννίδης, 2002). Η παραγόμενη ποσότητα βιοαερίου εκτιμάται σε 100-200 m³ από κάθε τόνο βιολογικών αποβλήτων που αποστέλλονται για βιολογική επεξεργασία (Πράσινη Βίβλος, 2008). Το υλικό τύπου κομπόστ που προέρχεται από επεξεργασία σύμμεικτων ΑΣΑ είναι υλικό χαμηλής ποιότητας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό σε άγονες περιοχές, σε ενεργειακές καλλιέργειες (π.χ. καλλιέργεια κράμβης για βιοντίζελ, καλλιέργεια ιτιάς), σε κράσπεδα οδικών αρτηριών, σε κατασκευές κτιρίων και σε ρυπασμένους χώρους (π.χ. ΧΥΤΑ). Επίσης, το μεθάνιο που παράγεται κατά τη διαδικασία μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί από το ίδιο το σύστημα ως πηγή ενέργειας, για τη διατήρηση της θερμοκρασίας του αντιδραστήρα, την θέρμανση των κτιρίων και την παραγωγή μηχανικής ή ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 7 Σύστημα αναερόβιας χώνευσης με ανάκτηση και επαναχρησιμοποίηση βιοαερίου (Μανιός και Φουντουλάκης, 2009)

Οι περιβαλλοντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την αναερόβια χώνευση είναι η θερμοκρασία, το pH, η αλκαλικότητα, τα θρεπτικά στοιχεία και οι τοξικές ουσίες που επιδρούν στη διαδικασία παραγωγής μεθανίου. Οι βέλτιστες περιβαλλοντικές και λειτουργικές συνθήκες για μέγιστη παραγωγή μεθανίου κατά την αναερόβια χώνευση περιλαμβάνουν τα εξής (Μανιός και Φουντουλάκης, 2009; JRC, 2014):

- Θερμοκρασία: Έχουν βρεθεί δυο βέλτιστες θερμοκρασιακές περιοχές για την λειτουργία αναερόβιων αντιδραστήρων, η μεσόφιλη (30-35°C) και η θερμόφιλη (50-56°C).
- pH: 6.8-7.4
- Σχέση άνθρακα προς άζωτο (C/N) σε χωνευτήρες: 20-30
- Υγρασία 15-45%
- Αλκαλικότητα (mg/l CaCO₃): 1500-3000
- Οξειδοαναγωγικό δυναμικό (ORP) (mV): -520 με -530
- Πτητικά οξέα (mg/l οξικού οξέος): 50-500
- Υδραυλικός χρόνος παραμονής (d): 10-15

- Σύσταση βιοαερίου: CH₄ (% κ.ο.)= 65-70, CO₂ (% κ.ο.)= 30-35

Σημειώνεται ότι η διαδικασία της παραγωγής μεθανίου μπορεί να παρεμποδιστεί από την παρουσία οξυγόνου, αμμωνίας, λιπαρών οξέων, βαρέων μετάλλων, θειούχων και θειικών ιόντων και άλλων ξενοβιοτικών ενώσεων.

Η μέθοδος της αναερόβιας χώνευσης περιλαμβάνει τέσσερις φάσεις κατά τις οποίες η αρχική ύλη διασπάται σε μικρότερες μονάδες μέσω διαφορετικών μικροοργανισμών (Εικόνα 4):

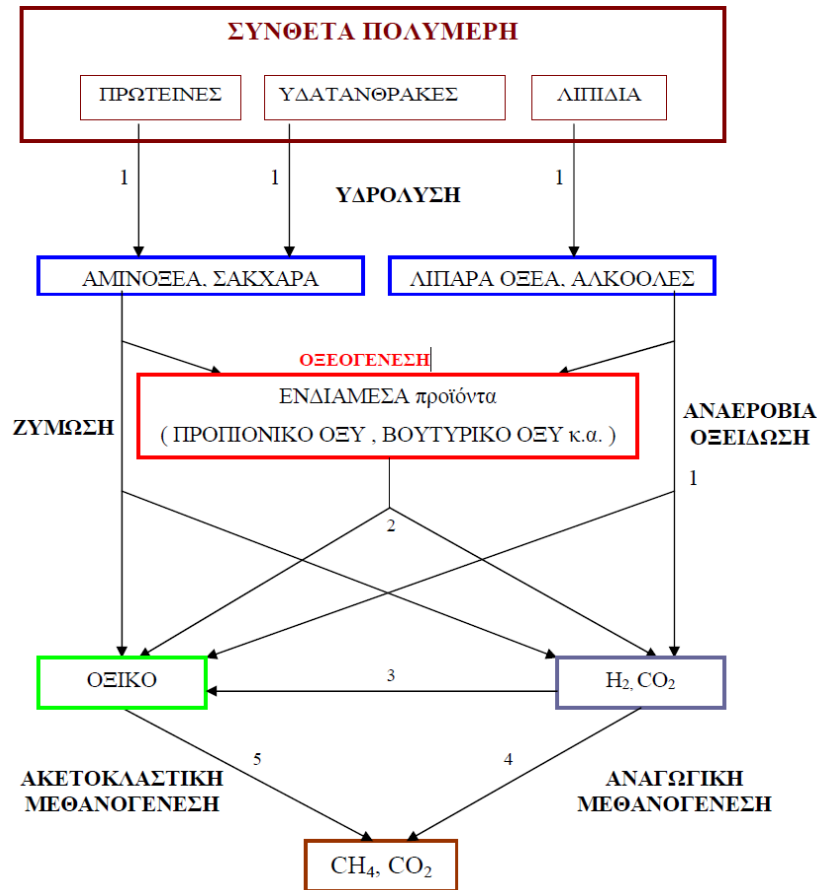
1. Υδρόλυση: Σε αυτή τη φάση τα λίπη, πρωτεΐνες και πολυσακχαρίτες υδραλύονται με τη βοήθεια υδρολυτικών βακτηρίων τα οποία εκλύουν ένζυμα που μετατρέπουν τις οργανικές αυτές ενώσεις σε υδατοδιαλυτά προϊόντα μικρότερου μοριακού βάρους (μονοσακχαρίτες, αμινοξέα κλπ.).
2. Ζύμωση ή Οξεογένεση: Τα σάκχαρα, τα λιπαρά οξέα και τα αμινοξέα που παρήχθησαν κατά το στάδιο της υδρόλυσης χρησιμοποιούνται ως υπόστρωμα για τους ζυμωτικούς μικροοργανισμούς, οι οποίοι παράγουν υδρογόνο, διοξείδιο του άνθρακα, οξικό οξύ καθώς επίσης και ενδιάμεσα προϊόντα όπως πτητικά λιπαρά οξέα (π.χ. προπιονικό, βουτυρικό, ηλεκτρικό, γαλακτικό οξύ) και αλκοόλες (π.χ. αιθανόλη).
3. Οξικογένεση: Οι οξικογενετικοί μικροοργανισμοί αποδομούν περαιτέρω τα προϊόντα της οξυγένεσης, που δε μπορούν να μετατραπούν άμεσα σε μεθάνιο, προς μεθανογενικά υποστρώματα όπως υδρογόνο, διοξείδιο του άνθρακα, οξικό οξύ, αλλά και φορμικό οξύ μεθανόλη και μεθυλαμίνες.
4. Μεθανογένεση: Σε αυτή τη φάση τα προϊόντα της προηγούμενης φάσης μετατρέπονται σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα από τα αναερόβια μεθανογενή βακτήρια. Τελικά προϊόντα της φάσης είναι αέριο μεθάνιο, διοξείδιο του άνθρακα και μεταλλικά άλατα. Η μεθανογένεση είναι η πιο αργή βιοχημική και επομένως ρυθμοκαθοριστική αντίδραση της διεργασίας.

Η αναερόβια χώνευση αποτελεί συχνά την πιο συμφέρουσα οικονομικά βιολογική μέθοδος επεξεργασίας αποβλήτων λόγω της υψηλής ανάκτησης ενέργειας (παραγωγή βιοαερίου) και των περιορισμένων περιβαλλοντικών επιπτώσεων του συστήματος κατά την λειτουργία του. Ειδικά τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί βιολογικά συστήματα για την αναερόβια χώνευση του οργανικού κλάσματος των στερεών απορριμμάτων. Εμπειρικά έχει φανεί ότι η αναερόβια χώνευση είναι περισσότερο συμφέρουσα για επεξεργασία λυμάτων με οργανικό φορτίο πάνω από 2.000 mg COD/L.

Τα σημαντικότερα **πλεονεκτήματα** είναι (Μανιός και Φουντουλάκης, 2009):

1. Η μικρή παραγωγή βιολογικής ιλύος και η υψηλή απόδοση της επεξεργασίας
2. Το χαμηλό αρχικό κεφάλαιο και το χαμηλό λειτουργικό κόστος
3. Η μη απαίτηση οξυγόνου
4. Η παραγωγή μεθανίου (καύσιμο)
5. Οι μικρές απαιτήσεις σε θρεπτικά

Στα **μειονεκτήματα** της της αναερόβιας επεξεργασίας ανήκει η σχετικά μεγάλη ευαισθησία της διεργασίας και η λειτουργία της σε υψηλές θερμοκρασίες (30-35°C ή 50-55°C).



Εικόνα 8 Μετατροπή του οργανικού υλικού σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα κατά τη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης (Μανιός και Φουντουλάκης, 2009)

2.2. Θερμική επεξεργασία

Η θερμική επεξεργασία βιοποβλήτων αφορά στις διαδικασίες μετατροπής των απορριμμάτων σε αέρια, υγρά και στερεά προϊόντα με έκλυση θερμικής ενέργειας. Με την εφαρμογή αυτών των διαδικασιών επιτυγχάνεται η μείωση του όγκου των απορριμμάτων, η μετατροπή τους σε μη βλαβερά προϊόντα και αξιοποίηση της εκλύομενης ενέργειας σε αυτά. Οι βασικές μέθοδοι είναι οι εξής:

2.2.1. Αποτέφρωση (πλήρης καύση)

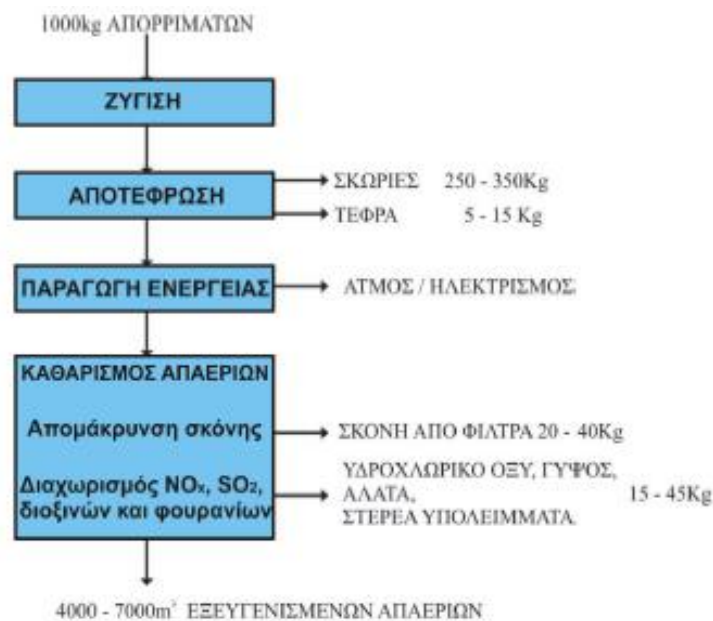
Κατά την αποτέφρωση η χημική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμική μέσω οξείδωσης της οργανικής ύλης υπό συνθήκες περίσσειας οξυγόνου. Έτσι, η οργανική ύλη εξατμίζεται, αποσυντίθεται ή ακόμη καταστρέφεται, τα ανόργανα συστατικά παραμένουν στο στερεό υπόλειμμα ενώ ο όγκος των απορριμμάτων μειώνεται.

Τα **προϊόντα** της αποτέφρωσης περιλαμβάνουν αέριες ενώσεις (π.χ. CO₂, οξείδια αζώτου, όξινα αέρια), οι οποίες χρειάζονται περαιτέρω επεξεργασία πριν απελευθερωθούν στην ατμόσφαιρα και αδρανή στερεά υπολείμματα (τέφρα) τα οποία ενδέχεται να περιέχουν σημαντικούς ανόργανους ρύπους όπως βαρέα μέταλλα. Τα στερεά υπολείμματα (τέφρα) αντιστοιχούν στο 25-40% του βάρους των εισερχομένων αποβλήτων.

Υπάρχουν δύο (2) βασικά είδη μονάδων αποτέφρωσης:

α) Οι μονάδες με ελάχιστης προ-επεξεργασίας των απορριμμάτων (τύπου mass-fired), και

β) Οι μονάδες με επεξεργασμένα απορρίμματα ως καύσιμο, το λεγόμενο δευτερογενές ή απορριμματογενές καύσιμο (Refuse-Derived Fuel, RDF ή Solid Recovered Fuel, SRF). Οι μονάδες αυτές χρησιμοποιούν το καύσιμο αυτό ως υλικό τροφοδοσίας και θεωρούνται αποτελεσματικότερες στη λειτουργία και τον έλεγχο των εκπομπών. Το δευτερογενές καύσιμο αφορά μείγμα κλασμάτων ΑΣΑ μετά από επεξεργασία τους και μπορεί να περιλαμβάνει οργανικά, χαρτί, υφάσματα, δέρμα, ελαστικά.



Εικόνα 9 Διάγραμμα ροής μιας τυπικής σύγχρονης εγκατάστασης αποτέφρωσης ΑΣΑ (Λάλας et al., 2007)

Η περιβαλλοντική απόδοση μιας μονάδας αποτέφρωσης μπορεί να μεταβληθεί εξαιρετικά εύκολα από παραμέτρους όπως τα επίπεδα εκπομπών, η απόδοση ανάκτησης ενέργειας, η ποσότητα και είδος των υπολειμμάτων. Τα παραπάνω εξαρτώνται από (JRC, 2014):

- Τη σύνθεση των αποβλήτων καθώς η καθαρή θερμογόνος δύναμη είναι ίσως και η σημαντικότερη παράμετρος.

- Την τεχνολογία ελέγχου εκπομπών, π.χ. τύπος καθαρισμού καυσαερίων
- Το ενεργειακό ισοζύγιο: δυνατότητα ανάκτησης ενέργειας, είδος ανακτώμενης ενέργειας (ηλεκτρική ενέργεια ή/και θερμότητα και ατμός), που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη βιομηχανική διαδικασία αλλά κι ως εναλλακτικό σύστημα παραγωγής ενέργειας στη διαδικασία.
- Δυνατότητα ανάκτησης υλικών (π.χ. χάλυβας, αλουμίνιο).

Οι μονάδες αποτέφρωσης σύμμεικτων απορριμμάτων, εκτός από τη διαχείριση των αποβλήτων, έχουν ως στόχο και την παραγωγή ενέργειας αντικαθιστώντας τη χρήση ορυκτών καυσίμων, όπως του λιγνίτη και του πετρελαίου. Έτσι, έχουν τη δυνατότητα να παράγουν ηλεκτρισμό, ατμό (για διανομή μέσω δικτύων τηλεθέρμανσης) ή και τα δύο μαζί (συμπαράγωγή θερμική και ηλεκτρικής ενέργειας). Ειδικότερα από το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα απορριμμάτων, μετά τη βιολογική ξήρανση και σταθεροποίησή τους, μπορεί να προκύψει καύσιμο υψηλής θερμογόνου δύναμης (SRF) κατάλληλο προς αποτέφρωση (Λάλας et al., 2007). Το μεγάλο πλεονέκτημα του απορριματογενούς καυσίμου είναι ότι μπορεί να αξιοποιηθεί σε υφιστάμενες εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα για την κάλυψη των αναγκών τους (Wiltsee, 2000), όπως τσιμεντοβιομηχανίες, εργοστάσια παραγωγής ενέργειας, χαρτοποιίες, κεραμοποιίες, χαλυβουργεία και ασβεστοκάμινοι.

Σημαντικές ποιοτικές παράμετροι είναι η υγρασία, η περιεχόμενη τέφρα, το χλώριο και το θείο. Για την Ελλάδα οι προδιαγραφές που καθορίζουν την ποιότητα του RDF αναφέρονται στην Υ.Α. οικ. 56366/4351/2014 (ΦΕΚ 3339/Β/12-12-2014). Σύμφωνα με την παραπάνω υπουργική απόφαση, τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των απορριματογενών ανακτώμενων στερεών καυσίμων (κωδικός ΕΚΑ 19 12 10) από εγκαταστάσεις Μηχανικής - Βιολογικής Επεξεργασίας σύμμεικτων αστικών αποβλήτων, προκειμένου να χρησιμοποιηθούν για ανάκτηση ενέργειας, βασίζονται σύμφωνα με το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 15359:2011, σε τουλάχιστον τέσσερις βασικές παραμέτρους, ως εξής:

1. τη μέση κατώτερη θερμογόνο δύναμη (Lower Heating Value – LHV)
2. τη μέση περιεκτικότητα σε χλώριο επί ξηρής βάσης
3. την διάμεσο της περιεκτικότητας σε υδράργυρο
4. το 80% των τιμών της περιεκτικότητας σε υδράργυρο

Πίνακας 2 Κλάσεις απορριματογενών ανακτώμενων στερεών καυσίμων κατά ΕΛΟΤ EN 15359:2011

Παράμετρος	Μονάδα Μέτρησης	Κλάση				
		1	2	3	4	5
Μέση κατώτερη θερμογόνος αξία	MJ/ kg*	≥25	≥20	≥15	≥10	≥3
Μέση περιεκτικότητα σε χλώριο	% σε ξηρή βάση	≤0,2	≤0,6	≤1,0	≤1,5	≤3,0

Διάμεσος της περιεκτικότητας σε υδράργυρο	mg/ MJ*	≤0,02	≤0,03	≤0,08	≤0,15	≤0,50
80% των τιμών της περιεκτικότητας σε υδράργυρο	mg/ MJ*	≤0,04	≤0,06	≤0,16	≤0,30	≤1,00

* όπως παραλαμβάνονται

Παρά τα θετικά της μεθόδου της αποτέφρωσης, η μέθοδος έχει δύο σημαντικά **μειονεκτήματα**: Πρώτον, το υψηλό κόστος κατασκευής, λειτουργίας και συντήρησης της μονάδας και των δευτερευόντων μονάδων όπως τα συστήματα επεξεργασίας παραγόμενων αέριων εκπομπών και στερεών υπολειμμάτων. Δεύτερον, χρήζει ιδιαίτερης προσοχής η διαχείριση του συστήματος ελέγχου εκλυόμενων ρύπων καθώς και η ασφαλή διάθεση των υπολειμμάτων καύσης.

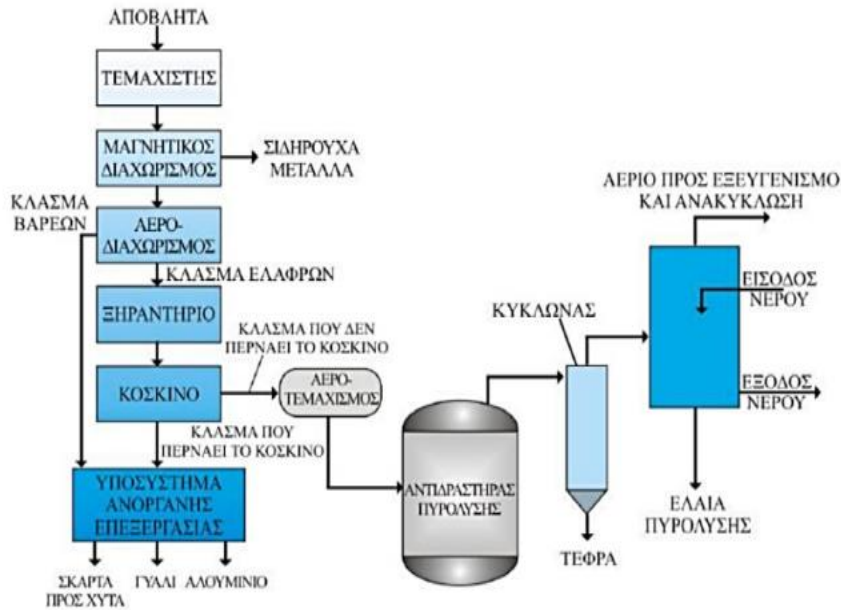
2.2.2. Πυρόλυση

Κατά την πυρόλυση επιτυγχάνεται η θερμική αποσύνθεση (ενδόθερμη αντίδραση) των οργανικών ουσιών απουσία οξυγόνου (ή ελάχιστων ποσοτήτων). Κατά τη διαδικασία τα απορρίμματα βρίσκονται μέσα σε ατσάλινους αγωγούς και δεν έρχονται σε απευθείας επαφή με τη φλόγα καθιστώντας εφικτή την παραγωγή αερίων αλλά όχι την αποτέφρωσή τους. Συνήθως η διεργασία της πυρόλυσης πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες 400-800°C όπου πολύπλοκα μόρια διασπώνται σε απλούστερα.

Τα **προϊόντα της πυρόλυσης** είναι:

- Στερεά, με κύριο συστατικό τον άνθρακα και ανόργανα υλικά όπως μέταλλα και γυαλί, τα οποία μπορούν να διαχωριστούν και να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμα.
- Υγρά, που περιέχουν κετόνες, υδρογονάνθρακες κι άλλες οργανικές ενώσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμα.
- Αέρια, πλούσια σε υδρογόνο, μονοξείδιο και διοξείδιο του άνθρακα, υδρογονάνθρακες κ.ά.

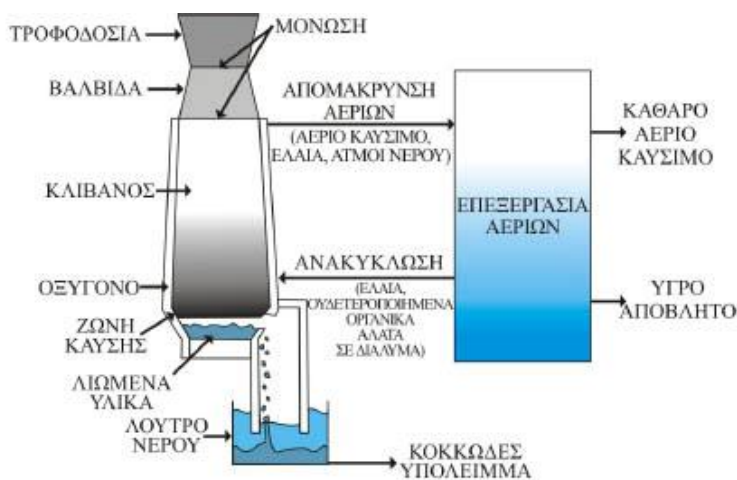
Η μέθοδος της πυρόλυσης, όπως και η μέθοδος της αεριοποίησης, παρότι αποτελούν ελκυστικές τεχνολογίες παρουσιάζουν ακόμη τεχνικές προκλήσεις και δεν μπορούν να θεωρηθούν ώριμες αρκετά για τη διαχείριση των βιολογικών αποβλήτων (JRC, 2014). Σε κάθε περίπτωση τα προϊόντα της πυρόλυσης απαιτούν περαιτέρω διαχείριση πριν την τελική τους διάθεση στο περιβάλλον.



Εικόνα 10 Διάγραμμα ροής διεργασίας πυρόλυσης (Πανά και Τακαβάκογλου, 2021)

2.2.3. Αεριοποίηση

Αεριοποίηση είναι η μερική οξείδωση της οργανικής ύλης η οποία μετατρέπεται σε μείγμα αερίων όπως μονοξείδιο του άνθρακα, υδρογόνο και μεθάνιο. Σε όλα τα στάδια της διαδικασίας παράγονται αέρια, στερεό υπόλειμμα και θερμική ενέργεια. Τελικά προϊόντα της αεριοποίησης είναι α) αέριο πλούσιο σε μονοξείδιο και διοξείδιο του άνθρακα, υδρογόνο και κορεσμένοι υδρογονάνθρακες (κυρίως μεθάνιο) που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο, στερεό υπόλειμμα από άνθρακα και αδρανή και γ) υγρό υπόλειμμα παρόμοιο με αυτό στην πυρόλυση.



Εικόνα 11 Διεργασία Αεριοποίησης (Γιδαράκος, 2006)

2.3. Υγειονομική ταφή

Οι χώροι υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (ΧΥΤΑ) αποτελούν την πλέον διαδεδομένη λύση για την τελική διάθεση των ΑΣΑ παγκοσμίως. Η λειτουργικότητα των ΧΥΤΑ εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως η απαιτούμενη έκταση για την εγκατάσταση, η προσβασιμότητα, η εγγύτητα στον τόπο παραγωγής και συλλογής των απορριμμάτων, η εύκολη πρόσβαση σε δίκτυο ηλεκτρικού ρεύματος, σε υδρευτικό δίκτυο και σε προμηθευτές κατάλληλου υλικού για επικάλυψη των απορριμμάτων, η τοπογραφική καταλληλότητα του χώρου, η σεισμικότητα της περιοχής, η ύπαρξη υδροφόρων οριζόντων και η ύπαρξη ή όχι αντιπλημμυρικών έργων.

Η σωστή εφαρμογή της μεθόδου απαιτεί την χωροθέτηση του ΧΥΤΑ σε κατάλληλο χώρο, την καθημερινή συμπίεση και επικάλυψη των αποτιθέμενων απορριμμάτων, τον έλεγχο και συλλογή του παραγόμενου στραγγίσματος, την απομάκρυνση του παραγόμενου βιοαερίου και τέλος, την αποκατάσταση του χώρου μετά το τέλος των εργασιών απόθεσης που έχει μια μέση διάρκεια περίπου τα 25-30 έτη. Ο σωστός σχεδιασμός ενός σύγχρονου ΧΥΤΑ προβλέπει τη στεγανότητα του πυθμένα και των περιμετρικών πρανών, για να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα διαφυγής του στραγγίσματος προς το υπέδαφος αλλά και η διαρροή ή μετανάστευση βιοαερίου από τη βάση και τα πλευρικά τοιχώματα του ΧΥΤΑ. Σύμφωνα με τις τεχνικές προδιαγραφές ΧΥΤΑ (ΚΥΑ 114218/97/ΦΕΚ 1010Β/17-11-97) το σύστημα μόνωσης του πυθμένα πρέπει να πληροί τις απαιτήσεις υδροπερατότητας και πάχους, οι οποίες αντιστοιχούν σε στρώμα αργίλου με $k=10^{-9}$ m/s και πάχος $D=1$ m. Σε περίπτωση που τα διαθέσιμα υλικά δεν κρίνονται κατάλληλα, τότε μπορεί να γίνει ανάμειξη τους με επεξεργασμένα υλικά, όπως π.χ. ο μπεντονίτης ή να χρησιμοποιηθούν συνθετικά (πολυμερή) (Βουδούρης, 2006).

Η απόθεση των απορριμμάτων στους ΧΥΤΑ γίνεται σε μορφή στρώσεων, οι οποίες συμπιέζονται με τη βοήθεια μηχανημάτων. Κάθε στρώση χωρίζεται σε κελιά ημερησίας επικάλυψης, δηλαδή τμήματα στα οποία αποτίθενται η ημερήσια ποσότητα των απορριμμάτων που φθάνουν στον ΧΥΤΑ και στο τέλος της ημέρας επικαλύπτεται με λεπτό στρώμα υλικού για την προστασία από αυτοανάφλεξη, περιορισμό της δυσσομίας, της διείδυσης νερού και της παρουσίας εντόμων. Το πάχος της ημερησίας επικάλυψης είναι περίπου 0,15 m με υλικό αμμώδες ή αμμοχαλικώδες (Βουδούρης, 2006).

Η υγειονομική ταφή αποτελεί λύση ανάγκης και δεν προτείνεται ως εναλλακτική καθώς είναι επιζήμια για το περιβάλλον και τη δημόσια υγεία. Παρά το οικονομικό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας έχει σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις όπως έκλυση βιοαερίων, εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και μεθανίου, απελευθέρωση επιζήμιων διαλυτών ρύπων. Επίσης συμβάλλει στην οικιστική και αισθητική υποβάθμιση της περιοχής εγκατάστασής του καθιστώντας τη μη κοινωνικά αποδεκτή λύση. Επισημαίνεται ότι σύμφωνα με την Οδηγία 2018/850/ΕΚ για την τροποποίηση της οδηγίας 1999/31/ΕΚ περί υγειονομικής ταφής των αποβλήτων, απαγορεύεται η υγειονομική ταφή χωριστά συλλεγόμενων αποβλήτων, κατάλληλων για ανακύκλωση και ανάκτηση, συμπεριλαμβανομένων των βιοαποβλήτων.

3. Σύσταση βιοεπίστρωσης

Τα κατάλοιπα από τον υποβρύχιο καθαρισμό των υφάλων των πλοίων με χρήση του Συστήματος Καθαρισμού της Diving Status A.E., το οποίο αποτελείται από το ECOHULLCLEAN CART και το σύστημα φιλτραρίσματος, αποτελούνται κυρίως από οργανική ύλη όπως βακτήρια και μικροφύκη μέχρι οστρακοειδή (π.χ μύδια, πολύχαιτους) και μακροφύκη (πολυκύτταρων φυτικών οργανισμών). Ωστόσο, κατά τον καθαρισμό με τη χρήση βουρτσών (brushes) του ECOHULLCLEAN CART και ανάλογα με την κατάσταση του υφαλοχρώματος του πλοίου, ενδέχεται να αποσπαστούν ψήγματα υφαλοχρώματος³. Από μελέτη σε ερασιτεχνικά σκάφη στην Αγγλία (Turner, 2010) σε ναυπηγείο βρέθηκε ότι οι συγκεντρώσεις σύνθετου υφαλοχρώματος αποτελούνται κυρίως από μεταλλικό χαλκό (Cu) και μεταλλικό ψευδάργυρο (Zn). Ωστόσο βρέθηκαν υψηλές συγκεντρώσεις κι από άλλα βαρέα μέταλλα βάριο (Ba), κάδμιο (Cd), χρώμιο (Cr), νικέλιο (Ni), μόλυβδο (Pb) και κασσίτερο (Sn).

Υστερα από τις δοκιμές που έγιναν στο σύστημα αναρρόφησης του ECOHULLCLEAN CART και στο σύστημα φιλτραρίσματος τα παράγωγα του καθαρισμού που αναμένονται να συλλεχθούν, εκτός από τη βιο-επίστρωση και τα υπολείμματα υφαλοχρωμάτων, είναι άμμος θαλάσσης, μικροπλαστικά και μικροαντικείμενα μεγέθους έως 64mm (Diving Status S.A).

Σε μελέτη των Nendissa et al (2021) όπου αναλύθηκαν τα βιολογικά κατάλοιπα προερχόμενα από βιομηχανία επεξεργασίας μαργαριταριών στρειδιών του είδους *Pinctada maxima* L. στην Ινδονησία, βρέθηκαν οι εξής τιμές περιεκτικότητας σε μακροθρεπτικά συστατικά⁴: περιεκτικότητα σε νερό 5,76%, οργανική ύλη 14,48%, οργανικός άνθρακας 24,96 %, ολικό άζωτο (N-total) 0,92 %, ολικός φώσφορος (P-total) 0,25 %, ολικό κάλιο (K-total) 1,02 %, λόγος άνθρακα-αζώτου (C/N) 15,72%.

3.1. Επικίνδυνα και μη επικίνδυνα απόβλητα

Επικίνδυνα χαρακτηρίζονται τα αστικά στερεά απόβλητα που εμφανίζουν ή περιέχουν ουσίες σε τέτοιες συγκεντρώσεις ικανές να προσδώσουν στα απόβλητα μία ή περισσότερες από τις παρακάτω ιδιότητες: εκρηκτικό, οξειδωτικό, εύφλεκτο, ερεθιστικό, επιβλαβές, τοξικό, καρκινογόνο, διαβρωτικό, μολυσματικό, μεταλλαξιογόνο, οικοτοξικολογικό. Μη επικίνδυνα απόβλητα χαρακτηρίζονται τα απόβλητα εκείνα που δε συμπεριλαμβάνονται στην Οδηγία 91/689/EEC για τα επικίνδυνα απορρίμματα.

Κατά τον καθαρισμό των υφάλων πλοίων ενδέχεται να περιέχονται υπολείμματα υφαλοχρωμάτων τα οποία να εμπεριέχουν μεταλλικό χαλκό (Cu), μεταλλικό ψευδάργυρο

³ Μεγάλες ποσότητες αντιρρυπαντικών σωματιδίων υφαλοχρώματος (Antifouling paint particles, APP) παράγονται σε ναυπηγεία κατά την επισκευή, συντήρηση και καθαρισμό των υφάλων του πλοίου. Το μέγεθος των παραγόμενων σωματιδίων εξαρτάται από την μέθοδο αφαίρεσης χρώματος ή καθαρισμού του πλοίου (π.χ. ξύσιμο, απογύμνωση, τρίψιμο, υδροβολή, αμμοβολή κλπ) και μπορεί να κυμαίνεται από μικροεκατοστά σε διάμετρο έως αρκετά εκατοστά σε μήκος.

⁴ Σημειώνεται ότι το συλλεγμένο βιοαπόβλητο βυθιζόταν καθημερινά σε γλυκό νερό για μια εβδομάδα με σκοπό το ξέπλυμα της βιόμαζας από το θαλασσινό νερό, ενώ στη συνέχεια, αφέθηκε να στεγνώσουν στον ήλιο για μία εβδομάδα.

(Zn) που είναι ουσίες τοξικές. Γι' αυτό το λόγο, τα απόβλητά αυτά συλλέγονται σε κατάλληλα μέσα και οδηγούνται προς τελική διάθεση σε νόμιμους αποδέκτες εφόσον έχει προσδιοριστεί η επικινδυνότητά τους μετά από χημική ανάλυση σύμφωνα με τα σχέδια παραλαβής και διαχείρισης αποβλήτων και καταλοίπων φορτίου στους λιμένες.

Η περιεκτικότητα των βιοαποβλήτων σε τοξικές ή άλλες επικίνδυνες ουσίες μπορούν να το καταστήσουν μη αξιοποιήσιμο για ορισμένες χρήσεις όπως το κομπόστ ως εδαφοβελτιωτικό. Στην περίπτωση, για παράδειγμα, της αναερόβιας χώνευσης για παραγωγή βιοαερίου, πρόσφατη μελέτη για την επίδραση των βαρέων μετάλλων στην απόδοση της αναερόβιας χώνευσης αποβλήτων ελαιολιτριβείου (Al bkoor Alrawashdeh et al., 2020) έδειξε ότι η συγκέντρωση Fe, Zn, Cr, Pb, Ni και Cu μπορεί να βελτιώσει με ασφάλεια τη διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης (αύξηση της παραγωγής βιοαερίου και μεθανίου) εάν η συγκέντρωση των παραπάνω είναι χαμηλότερη από 2,9 mg/L, 0,335 mg/L, 1,211 mg/L, 0,297 mg/L, 0,082 mg/L και 1.406,25 mg/L, αντίστοιχα. Αν, ωστόσο, τα βαρέα μέταλλα δεν δύναται να καταστραφούν σε θερμοκρασία αναερόβιας χώνευσης/κομποστοποίησης (π.χ. διοξίνες) τότε είναι απαραίτητη η θερμική τους επεξεργασία. Ανάλογα λοιπόν με τη σύστασή τους επιλέγεται και η κατάλληλη μέθοδος διαχείρισής τους.

Τη χρονική στιγμή που αναπτύσσεται η παρούσα μελέτη οι δοκιμές με το καινοτόμο σύστημα ECOHULLCLEAN Cart και του συστήματος φιλτραρίσματος σε πραγματικές συνθήκες βρίσκονται ακόμη σε πρώιμο στάδιο ώστε να υπάρχουν στη διάθεσή μας πραγματικά δεδομένα για την περιεκτικότητα της βιοεπίστρωσης σε επικίνδυνες ουσίες. Επομένως, στα σενάρια διαχείρισης της βιοεπίστρωσης που θα αναδειχθούν στη συνέχεια της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής των βιοαποβλήτων, λαμβάνεται υπόψη η εν δυνάμει επικινδυνότητα των απορριμμάτων και προτείνονται εναλλακτικά σχέδια δράσης.

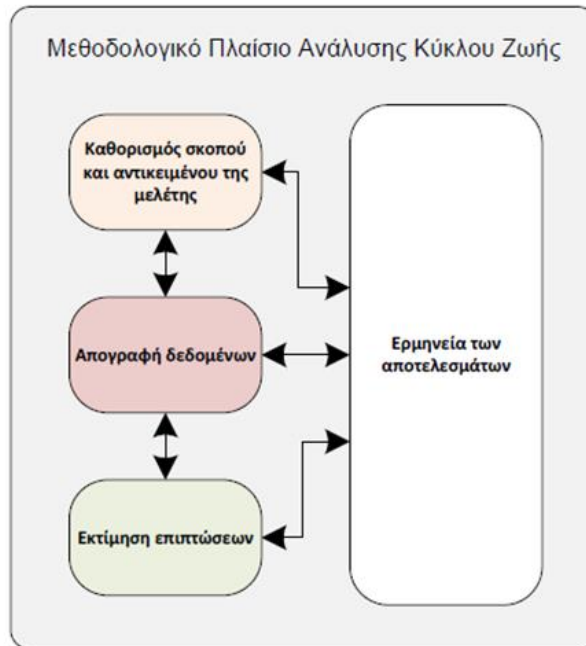
4. Εφαρμογή Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (AKZ)

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής είναι ένα εργαλείο ποσοτικοποίησης της περιβαλλοντικής απόδοσης προϊόντων λαμβάνοντας υπόψη τον πλήρη κύκλο ζωής τους, από την παραγωγή των πρώτων υλών έως την τελική τους διάθεση, καθώς και της ανακύκλωσης υλικών. Με την εφαρμογή της AKZ επιτυγχάνονται κυρίως τα ακόλουθα (Hauschild et al., 2018, Goedkoop et al., 2016):

- Σύγκριση περιβαλλοντικών επιπτώσεων συγκεκριμένων αγαθών ή υπηρεσιών.
- Προσδιορισμός σταδίων ενός προϊόντος που συμβάλλουν περισσότερο στο περιβαλλοντικό αποτύπωμά του.
- Αξιολόγηση δυνατοτήτων βελτίωσης στον σχεδιασμό προϊόντων.
- Τεκμηρίωση της περιβαλλοντικής απόδοσης των προϊόντων (π.χ. χρήση περιβαλλοντικών δηλώσεων προϊόντων).
- Ανάπτυξη κριτηρίων για ένα οικολογικό σήμα.
- Ανάπτυξη πολιτικών που λαμβάνουν υπόψη το περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Σύμφωνα με το Διεθνή Οργανισμό για την Προτυποποίηση (ISO), η AKZ μεθοδολογία αποτελείται από **τέσσερα (4) στάδια** (ISO 14040-14044, 2006):

1. **Καθορισμός στόχου και αντικειμένου μελέτης** (Goals and Scope definition), όπου περιγράφονται οι παράμετροι της μελέτης και καθορίζεται ο σκοπός και το αντικείμενο της ανάλυσης.
2. **Απογραφή δεδομένων** (Life Cycle Inventory Analysis), όπου καθορίζονται τα χαρακτηριστικά της συλλογής δεδομένων και ποσοτικοποιούνται οι εισροές και εκροές (υλικά, ενέργεια, εκπομπές) των διεργασιών υπό μελέτη.
3. **Εκτίμηση επιπτώσεων** (Life Cycle Impact Assessment), όπου γίνεται εκτίμηση των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων βάσει των αποτελεσμάτων από το προηγούμενο στάδιο. Το στάδιο αυτό μπορεί να διαιρεθεί σε τέσσερα υπο-στάδια:
 - 3.1. **Κατηγοριοποίηση** (Classification): η ομαδοποίηση των αποτελεσμάτων της απογραφής των δεδομένων σε κατηγορίες επιπτώσεων, βάσει των διαφορετικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκαλούν.
 - 3.2. **Χαρακτηρισμός** (Characterization): ο υπολογισμός της συμβολής σε κάθε κατηγορία επίπτωσης και κατανάλωσης πόρων.
 - 3.3. **Κανονικοποίηση** (Normalization): τα αποτελέσματα από τον χαρακτηρισμό εκφράζονται σε μια κοινή μονάδα μέτρησης, έτσι ώστε να καθίσταται δυνατή η σύγκρισή τους.
 - 3.4. **Στάθμιση** (Weighting): γίνεται χρήση αριθμητικών παραγόντων για την ενίσχυση της σημαντικότητας κάποιων κατηγοριών επιπτώσεων.
4. **Ερμηνεία αποτελεσμάτων** (Interpretation), όπου γίνεται αξιολόγηση των αποτελεσμάτων από το προηγούμενο στάδιο και εξάγονται αντίστοιχα συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης. Στο στάδιο αυτό μπορεί να συμπεριληφθεί και η «ανάλυση ευαισθησίας» (sensitivity analysis) του συνολικού συστήματος.



Εικόνα 12 Στάδια μεθοδολογίας για την ΑΚΖ σύμφωνα με το ISO 14040 (2006)

4.1. Στόχος και αντικείμενο ΑΚΖ

Στόχος της παρούσας μελέτης είναι η ανάλυση των επικρατέστερων σεναρίων διαχείρισης των καταλοίπων βιοεπίστρωσης που προκύπτουν από τον υποβρύχιο καθαρισμό των υφάλων των πλοίων. Το βιοσυσσωρευμένο υλικό εμπεριέχει σημαντικούς περιβαλλοντικούς κινδύνους λόγω την ύπαρξης θαλάσσιων ξενικών ειδών καθώς και λόγω των βαρέων μετάλλων που εμπεριέχονται στα υφαλοχρώματα και μπορούν να διαρρεύσουν στο θαλάσσιο περιβάλλον κατά τον καθαρισμό. Επίσης, η εναπόθεσή τους σε ΧΥΤΑ προς ταφή συμβάλλει στην αύξηση του συνολικού όγκου των απορριμμάτων στους ΧΥΤΑ όταν, σύμφωνα με την Οδηγία-πλαίσιο 2008/98/ΕΚ, η διάθεση των αποβλήτων σε χώρους υγειονομικής ταφής θα πρέπει να αποτελεί τελική λύση ανάγκης για τα κράτη-μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Η συλλογή και η κατάλληλη διαχείριση του υλικού αυτού μπορεί να συμβάλλει θετικά στην καλή διατήρηση του θαλάσσιου περιβάλλοντος και κατ' επέκταση, να βελτιώσει όχι μόνο τις περιβαλλοντικές αλλά και τις οικονομικές συνέπειες.

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής εφαρμόζεται για την πιλοτική εφαρμογή του καινοτόμου Συστήματος Καθαρισμού Υφάλων, ECOHULLCLEAN Cart (υποβρύχιο όχημα) της εταιρίας Diving Status A.E.. Αναπόσπαστο μέρος του Συστήματος ECOHULLCLEAN είναι και το Σύστημα Φιλτραρίσματος (Filtration System) στο οποίο θα διοχετεύεται μέσω σωλήνα το υγρό και στερεό κλάσμα του βιοσυσσωρευμένου υλικού που θα αποκολλάται από τα ύφαλα του πλοίου. Μέσω του συστήματος φιλτραρίσματος το υγρό κλάσμα θα στραγγίζεται και θα απομακρύνονται οι ρύποι ώστε να ελευθερωθεί, χωρίς κίνδυνο, πίσω στη θάλασσα. Στη συνέχεια θα γίνει επεξεργασία του στερεού κλάσματος με σκοπό την ορθή του διαχείριση και αξιοποίηση, όπου αυτό είναι εφικτό.

Η μελέτη θα βασιστεί στις ήδη υπάρχουσες και επικρατέστερες μεθόδους επεξεργασίας βιοαποβλήτων των ΑΣΑ που ταιριάζουν στο προφίλ του απορριπτόμενου υλικού και στοχεύει να απαντήσει στο ερώτημα: *Ποια μέθοδος επεξεργασίας βιοαποβλήτων είναι πιο φιλική προς το περιβάλλον;*

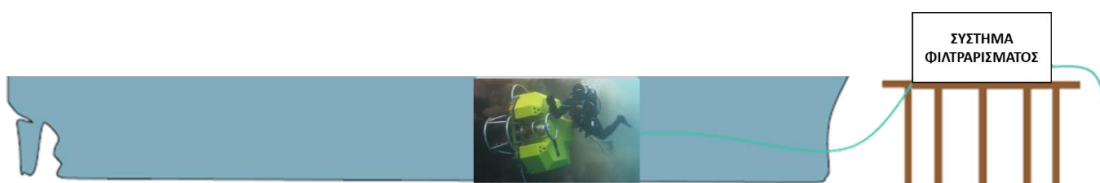
Σημειώνεται ότι η παρούσα μελέτη δεν ασχολείται με τον κύκλο ζωής του ίδιου του ECOHULLCLEAN Cart (κατασκευή) ή του Συστήματος Φιλτραρίσματος αλλά με την διαχείριση της βιοεπίστρωσης που προκύπτει μετά τη χρήση τους, ως τελικό στάδιο της ολοκληρωμένης υπηρεσίας υφαλοκαθαρισμού (βλ. Παράγραφο 4.2 – Όρια συστήματος) που προσφέρει η εταιρεία Diving Status A.E. στους πελάτες της.

Παρότι προς το παρόν δεν προβλέπεται ρητά από την ισχύουσα νομοθεσία η ορθή διαχείριση των αποβλήτων από υποβρύχιο καθαρισμό υφάλων πλοίων, η διεθνής ναυτιλιακή κοινότητα ωστόσο οδεύει προς αυτή της κατεύθυνση με σκοπό την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος και την πρόληψη εξάπλωσης θαλάσσιων ξενικών ειδών που μεταφέρονται μέσω των υφάλων των πλοίων.

Η εταιρεία Diving Status A.E. λαμβάνοντας υπόψη της τα παραπάνω αναζητά μέσω της εφαρμογής AKZ τη βέλτιστη λύση για τη διαχείριση και αξιοποίηση της βιοεπίστρωσης από τις εργασίες υποβρύχιου καθαρισμού των πλοίων. Επομένως, **ο σκοπός της παρούσας AKZ είναι να παρέχει τις κατάλληλες πληροφορίες και κατευθυντήριες γραμμές στην εταιρεία για την ορθότερη επιλογή διαχείρισης των απορριμμάτων του συστήματος υποβρύχιου καθαρισμού.** Η μελέτη AKZ απευθύνεται σε σχετικά εμπλεκόμενα μέρη, όπως επαγγελματίες υποβρύχιου καθαρισμού πλοίων, ναυτιλιακές εταιρείες, οργανισμοί λιμένων και λειτουργεί ως ενδεικτικός οδηγός διαχείρισης της ειδικής αυτής κατηγορίας βιοαποβλήτων από υποβρύχιους καθαρισμούς πλοίων.

4.2. Λειτουργική Μονάδα

Στην παρούσα μελέτη η εφαρμογή της AKZ μεθοδολογίας γίνεται για την παραγωγή ενός (1) κιλού βιοσυσσωρευμένου στερεού υλικού απαλλαγμένο από το αρχικό υγρό κλάσμα (θαλασσινό νερό) μέσω της προ-επεξεργασίας του στο σύστημα φιλτραρίσματος. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας καθαρισμού η βιοεπίστρωση αποκολλάται και μεταφέρεται μέσω σωλήνων μαζί με θαλασσινό νερό από το σημείο εξόδου του CART συστήματος σε δεξαμενή πάνω σε πλωτό για να περάσει από το σύστημα φιλτραρίσματος για να απομονωθούν τα στερεά από τα υγρά κατάλοιπα (Εικόνα 14). Το υγρό κλάσμα (νερό) θα απορρίπτεται πίσω στη θάλασσα μετά την επεξεργασία (μέσω φίλτρων) και απολύμανσή του από παθογόνους οργανισμούς (π.χ. μικρόβια, βακτήρια).

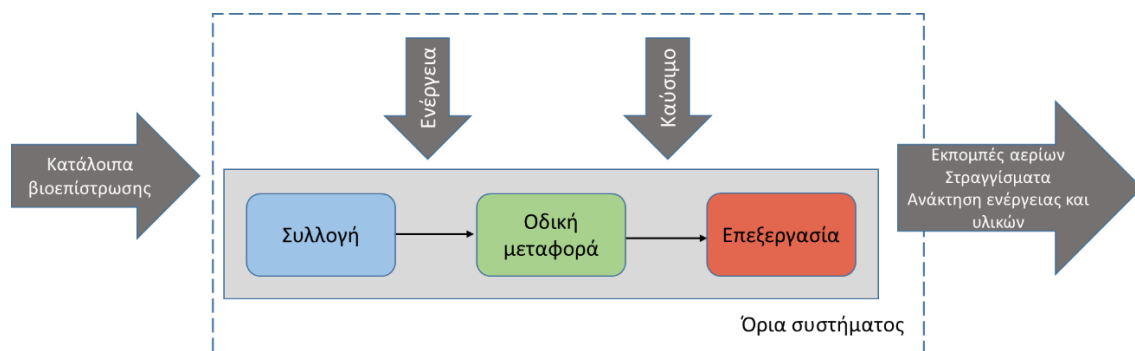


Εικόνα 13 Σχηματική απεικόνιση υποβρύχιου καθαρισμού με συλλογή καταλοίπων και προ-επεξεργασίας τους μέσω του συστήματος φιλτραρίσματος

4.3. Όρια συστήματος

Τα όρια ενός συστήματος διαχωρίζουν το αναλυόμενο σύστημα από την υπόλοιπη τεχνόσφαιρα (περιβάλλον το οποίο τροποποιείται μέσω της ανθρώπινης δραστηριότητας), και καθορίζουν τα όρια μεταξύ του αναλυόμενου συστήματος και της οικόσφαιρας (φυσικό περιβάλλον) (JRC, 2010).

Τα όρια του μελετώμενου συστήματος παρουσιάζονται στην Εικόνα 12 και περιλαμβάνουν: 1) τη συλλογή του αποβλήτου από τους ειδικούς σάκους που βρίσκονται στις δεξαμενές αποθήκευσης του συστήματος φιλτραρίσματος, 2) τη μεταφορά του στερεού αποβλήτου το οποίο είναι απαλλαγμένο από το αρχικό υγρό κλάσμα (νερό), και 3) την επεξεργασία του απορρίμματος ανάλογα με κάθε σενάριο (κομποστοποίηση, αναερόβια χώνευση, αποτέφρωση). Επομένως η έναρξη του συστήματος γίνεται όταν τα στερεά κατάλοιπα έχουν συλλεχθεί σε δεξαμενή (μετά από την προ-επεξεργασία τους στο σύστημα φιλτραρίσματος) μέχρι να εξέλθουν από το σύστημα είτε ως εκπομπή αερίων ή/και στραγγισμάτων (πχ στους ΧΥΤΑ), είτε ως δευτερεύουσα πρώτη ύλη, βιοαέριο ή ενέργεια. Σύμφωνα μάλιστα με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας, το απόβλητο θα πρέπει (όταν αυτό είναι εφικτό) να αξιοποιηθεί όσο το δυνατόν περισσότερες φορές ως εν δυνάμει πόρος (π.χ. ενέργεια, κομπόστ) για την παραγωγή νέων προϊόντων. Η κατασκευή και χρήση του ECOHULLCLEAN Cart και του συστήματος φιλτραρίσματος δεν λαμβάνονται υπόψη. Επισημαίνεται ότι τα απαιτούμενα καύσιμα για τις μεταφορές όσο και η ενέργεια για τη λειτουργία και κατασκευή όλων των απαιτούμενων εγκαταστάσεων περιλαμβάνονται στο μελετώμενο σύστημα.



Εικόνα 14 Όρια συστήματος

4.4. Απογραφή δεδομένων

Στη φάση της απογραφής των δεδομένων στην ΑΚΖ χρειάζεται να αναγνωριστούν και να ποσοτικοποιηθούν όλες οι εισροές (υλικά και ενεργειακή κατανάλωση) και όλες οι εκροές (εκπομπές και προϊόντα) κάθε υποσυστήματος των σεναρίων που συγκρίνονται. Η παρούσα μελέτη αφορά σε πιλοτική εφαρμογή που ωστόσο βρίσκεται σε φάση δοκιμών. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται στην ΑΚΖ αντιπροσωπευτικά δεδομένα των διαδικασιών και των υλικών/προϊόντων των υποσυστημάτων με τη χρήση της ενσωματωμένης στο ΑΚΖ λογισμικό βάσης δεδομένων «Ecoinvent» (βλ. Μεθοδολογία

μοντελοποίησης). Επίσης, οι αποστάσεις που διανύονται για τη μεταφορά της βιοεπίστρωσης υπολογίστηκαν βάσει του προγράμματος Google Maps.

4.5. Χρήση λογισμικού AKZ και μεθοδολογία μοντελοποίησης

Η εφαρμογή της μεθοδολογίας AKZ πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του προγράμματος SimaPro (Έκδοση PhD 9.3.0.3) της εταιρίας PRé Sustainability B.V. (<https://simapro.com>). Μέσω του SimaPro λογισμικού μπορούν να αξιολογηθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις διαφορετικών μεθόδων διαχείρισης και ρευμάτων αποβλήτων. Το πρόγραμμα περιέχει ένα μεγάλο αριθμό μεθόδων αξιολόγησης και βάσεων δεδομένων που βοηθούν στην επίτευξη της ανάλυσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των αποβλήτων και τη δημιουργία σεναρίων.

Η μέθοδος μοντελοποίησης που ακολουθείται είναι η «επαγόμενη AKZ» (consequential) προσέγγιση η οποία λαμβάνει υπόψιν τις ανταλλαγές μεταξύ του συστήματος που μελετάται και των συστημάτων που το περιβάλλουν (background systems) (JRC, 2010).

Σε αυτού του τύπου τη μοντελοποίηση γίνεται χρήση της μεθόδου «επέκτασης ορίων του συστήματος» με υποκατάσταση. Με την «επέκταση ορίων του συστήματος» προστίθενται διεργασίες και προϊόντα στο αναλυόμενο σύστημα και στη συνέχεια, εφαρμόζοντας την έννοια της υποκατάστασης, μια μη επιθυμητή διεργασία ή προϊόν υποκαθίσταται από έναν εναλλακτικό τρόπο παροχής της και αφαιρείται η εισροή (απογραφή) ενός συστήματος από την απογραφή των δεδομένων του κύκλου ζωής του μελετώμενου συστήματος. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να οδηγηθούμε σε αρνητικές συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις για το σύστημα, γεγονός που δείχνει το όφελος για το μελετώμενο σύστημα καθώς οι επιπτώσεις του αντισταθμίζονται από τις επιπτώσεις που αποφεύγονται.

Για την περιγραφή των περιβαλλοντικών επιπτώσεων χρησιμοποιείται η συνακόλουθη (consequential) βάση δεδομένων «Ecoinvent»⁵ η οποία είναι ενσωματωμένη στο λογισμικό SimaPro. Η βάση δεδομένων Ecoinvent περιέχει περίπου 18.000 αξιόπιστες βάσεις δεδομένων απογραφής κύκλου ζωής (Life Cycle Inventory, LCI) που καλύπτουν τομείς όπως η γεωργία και η κτηνοτροφία, οι κατασκευές, τα χημικά και πλαστικά, η ενέργεια, η δασοκομία και ξυλεία, τα μέταλλα, η κλωστοϋφαντουργία, οι μεταφορές, τα τουριστικά καταλύματα, η επεξεργασία απορριμμάτων και η ανακύκλωση και την παροχή νερού κ.ά.⁶ Για κάθε βάση δεδομένων βαθμολογούνται με διάφορες μεθόδους εκτίμησης επιπτώσεων (όπως IPCC 2013⁷, "ReCiPe") και οι αντίστοιχες κατηγορίες επιπτώσεων, όπως η «κλιματική αλλαγή», η «χρήση υδάτινων πόρων» και η «χρήση γης»⁷.

4.6. Εκτίμηση επιπτώσεων (ενδιάμεσα σημεία - midpoints)

Η εκτίμηση επιπτώσεων έγινε για κάθε μελετώμενη διαδικασία και σύστημα διαχείρισης ακολουθώντας τη μέθοδο αξιολόγησης ILCD Recommended 2013. Η μέθοδος αυτή

⁵ <https://support.simapro.com/articles/Article/ecoinvent-Consequential-database>

⁶ <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/>

⁷ <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/>

ακολουθεί τις παρακάτω κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων (δείκτες ενδιάμεσου σημείου), τις αντίστοιχες μεθόδους αποτίμησής τους αλλά και τις αντίστοιχες «Περιοχές προστασίας»⁸ (Πίνακας 7). Η κανονικοποίηση των αποτελεσμάτων περιλαμβάνεται στην έκδοση της μεθόδου «ILCD 2011 Midpoint+» στο λογισμικό SimaPro (PRÉ Sustainability, 2020).

Πίνακας 3 Προτεινόμενες μέθοδοι και η κατηγοριοποίησή τους στο ενδιάμεσο σημείο (Hauschild et al., 2011)

A/A	Κατηγορία επίπτωσης	Προτεινόμενος μέθοδος	Δείκτης	Κατηγοριοποίηση ⁹	Περιοχές Προστασίας
1.	Κλιματική αλλαγή-Φαινόμενο το θερμοκηπίου (Climate change)	Baseline model of 100 years of the IPCC	Radiative forcing as Global Warming Potential (GWP100)	I	Ανθρώπινη υγεία & Φυσικό περιβάλλον
2.	Εξάντληση του όζοντος (Ozone depletion)	Steady-state ODPs 1999 as in WMO assessment	Ozone Depletion Potential (ODP)	I	Ανθρώπινη υγεία & Φυσικό περιβάλλον
3.	Τοξικότητα στον άνθρωπο, καρκινογόνος (Human toxicity, cancer effect)	USEtox model (Rosenbaum et al, 2008)	Comparative Toxic Unit for humans (CTUh)	II/III	Ανθρώπινη υγεία
4.	Τοξικότητα στον άνθρωπο, μη καρκινογόνος (Human toxicity, non-cancer effect)	USEtox model (Rosenbaum et al, 2008)	Comparative Toxic Unit for humans (CTUh)	II/III	Ανθρώπινη υγεία
5.	Αιωρούμενα σωματίδια/Ανόργανα στοιχεία (Particulate matter/Respiratory inorganics)	RiskPoll model (Rabl and Spadaro, 2004) and Greco et al 2007	Intake fraction for fine particles (kg PM2.5-eq/kg)	I	Ανθρώπινη υγεία

⁸ Κατηγορία I (συνιστώμενο και ικανοποιητικό), κατηγορία II (συνιστάται αλλά χρειάζεται κάποιες βελτιώσεις) ή κατηγορία III (συνιστάται, αλλά πρέπει να εφαρμόζεται με προσοχή).

⁹ Οι «Περιοχές προστασίας» διευκολύνουν τη σύνδεση μεταξύ των στοιχειωδών ροών, των δεικτών ενδιάμεσου και τελικού σημείου. Αντιπροσωπεύουν τις προτεραιότητες της κοινωνίας και οι πιο τυπικοί δείκτες αναφέρονται στην ανθρώπινη υγεία, τους φυσικούς πόρους (ποιότητα των οικοσυστημάτων) και το φυσικό περιβάλλον (JRC, 2010).

6.	Ιοντίζουσα ακτινοβολία (Ionising radiation, human health)	Human health effect model as developed by Dreicer et al. 1995 (Frischknecht et al, 2000)	Human exposure efficiency relative to U235	II	Ανθρώπινη υγεία & Φυσικό περιβάλλον
7.	Φωτοχημική οξείδωση (Photochemical ozone formation)	LOTOS-EUROS (Van Zelm et al, 2008) as applied in ReCiPe	Tropospheric ozone concentration increase	II	Ανθρώπινη υγεία & Φυσικό περιβάλλον
8.	Οξίνιση (Acidification)	Accumulated Exceedance (Seppälä et al. 2006, Posch et al, 2008)	Accumulated Exceedance (AE)	II	Φυσικό περιβάλλον
9.	Ευτροφισμός εδάφους (Eutrophication, terrestrial)	Accumulated Exceedance (Seppälä et al. 2006, Posch et al, 2008)	Accumulated Exceedance (AE)	II	Φυσικό περιβάλλον
10.	Ευτροφισμός σε ύδατα (Eutrophication, aquatic)	EUTREND model (Struijs et al, 2009b) as implemented in ReCiPe	Fraction of nutrients reaching freshwater end compartment (P)/ marine end compartment (N)	II	Φυσικό περιβάλλον
11.	Οικοτοξικότητα στα γλυκά ύδατα (Ecotoxicity, freshwater)	USEtox model, (Rosenbaum et al, 2008)	Comparative Toxic Unit for ecosystems (CTUe)	II/III	Φυσικό περιβάλλον
12.	Χρήση γης (Land use)	Model based on Soil Organic Matter (SOM) (Milà i Canals et al, 2007b)	Soil Organic Matter	III	Φυσικό περιβάλλον

13.	Εξάντληση υδάτινων πόρων (Resource depletion, water)	Model for water consumption as in Swiss Ecoscarcity (Frischknecht et al, 2008)	Water use related to local scarcity of water	III	Ανθρώπινη υγεία, Φυσικό περιβάλλον & Φυσικοί πόροι
14.	Εξάντληση μεταλλικών, ορυκτών και ανανεώσιμων πηγών (Resource depletion, mineral, fossil and renewable ¹⁰)	CML 2002 (Guinée et al, 2002)	Scarcity	II	Ανθρώπινη υγεία, Φυσικό περιβάλλον & Φυσικοί πόροι

Σημειώνεται ότι σύμφωνα με το εγχειρίδιο χρήσης του λογισμικού SimaPro (PRé, 2020) ο χαρακτηρισμός των μακροπρόθεσμων εκπομπών έχουν μηδενιστεί ως σιωπηρή απαίτηση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής και οι συντελεστές στάθμισης προστέθηκαν με ίσα βάρη για καθεμία από τις προτεινόμενες κατηγορίες. Οι κατηγορίες επιπτώσεων του Πίνακα 3 αναλύονται εκτενέστερα παρακάτω (PRé Consultants, 2020):

4.6.1. Κλιματική αλλαγή (IPPC, 2007)

Το μοντέλο αυτό χαρακτηρισμού αναπτύχθηκε από τη Διακυβερνητική Ομάδα για την Κλιματική Αλλαγή. Η κλιματική αλλαγή σχετίζεται με τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στον αέρα και μπορεί να έχει δυσμενείς επιπτώσεις στο περιβάλλον, την ανθρώπινη υγεία και τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Το χαρακτηριστικό μοντέλο IPCC 2017 υπολογίζεται ως δυναμικό της παγκόσμιας υπερθέρμανσης (Global Warming Potential) για μια χρονική περίοδο 100 ετών (GWP 100) και εκφράζεται σε:

$$GWP = kg \text{ CO}_2 - eq$$

4.6.2. Εξάντληση όζοντος (WMO, 1999)

Το μοντέλο χαρακτηρισμού αναπτύχθηκε από τον Παγκόσμιο Μετεωρολογικό Οργανισμό (WMO) και ορίζει το δυναμικό καταστροφής του όζοντος. Λόγω της καταστροφής του όζοντος, ένα μεγαλύτερο κλάσμα της ακτινοβολίας UV-B φτάνει στην επιφάνεια της γης με βλαβερές συνέπειες για την υγεία του ανθρώπου, των ζώων, των χερσαίων και υδάτινων οικοσυστημάτων, των βιοχημικών κύκλων και των υλικών. Εκφράζεται σε:

¹⁰ Η εξάντληση των ανανεώσιμων πόρων περιλαμβάνεται στην ανάλυση, αλλά καμία από τις μεθόδους που αναλύθηκαν δεν αποτελεί ώριμη σύσταση.

$$ODP = kg \text{ CFC-11} - eq.$$

4.6.3. Τοξικότητα στον άνθρωπο (USEtox)

Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει τις επιπτώσεις που έχουν οι τοξικές ουσίες στο ανθρώπινο περιβάλλον (εξαιρουμένων των κινδύνων για την υγεία από την έκθεση στο εργασιακό περιβάλλον). Το δυναμικό της τοξικότητας στον άνθρωπο (Human Toxicity Potentials-HTP) υπολογίζεται με το μοντέλο USES-LCA και περιγράφει το ποσοστό των τοξικών ουσιών που μεταφέρονται στο περιβάλλον, την έκθεση και τα αποτελέσματα αυτών για μια συνεχή χρονική περίοδο. Για κάθε τοξική ουσία, το HTP υπολογίζεται βάσει της ημερήσιας αποδεκτής ποσότητας ή της ανεκτής ημερήσιας πρόσληψης από τοξικές ουσίες και εκφράζεται σε:

$$HTP = 1.4 - \text{διχλωροβενζόλιου} - eq$$

Η γεωγραφική εμβέλεια αυτού του δείκτη καθορίζεται ανάλογα με το ποσοστό μεταφοράς της ουσίας στο περιβάλλον και κυμαίνεται μεταξύ τοπικής και ηπειρωτικής κλίμακας.

4.6.4. Αιωρούμενα σωματίδια (RiskPoll model)

Τα αιωρούμενα σωματίδια (Particulate Matter, PM) είναι μικρού μεγέθους στερεά ή υγρά αιωρήματα που βρίσκονται διασκορπισμένα στην ατμόσφαιρα με αρνητική επίδραση στο περιβάλλον και στην ανθρώπινη υγεία. Τα αερολύματα με μικρή διάμετρο (PM_{2.5} για διάμετρο μικρότερη από 2.5 μm) αλλά και με πολύ μικρή διάμετρο (PM₁ για διάμετρο μικρότερη από 1 μm) θεωρούνται ως τα πλέον επικίνδυνα για τον άνθρωπο (<http://www.thermiair.gr>). Ο δείκτης αυτός υπολογίζει τα εισπνεόμενα σωματίδια αερολυμάτων PM_{2.5} και εκφράζεται σε :

$$PM = \text{yr/kg PM}_{2.5} - eq$$

4.6.5. Ιοντίζουσα ακτινοβολία (Human health effect model)

Ιοντίζουσες είναι οι ακτινοβολίες που μεταφέρουν ενέργεια ικανή να εισχωρήσει στην ύλη, να προκαλέσει ιοντισμό των ατόμων, να διασπάσει βίαια χημικούς δεσμούς και να προκαλέσει βιολογικές βλάβες στον ανθρώπινο οργανισμό¹¹. Ο δείκτης για την ιοντίζουσα ακτινοβολία υπολογίζει το επίπεδο έκθεσης του πληθυσμού σε παγκόσμιο επίπεδο και εκφράζεται σε:

$$IR = \text{kBq κοβαλτίου-60 στον αέρα}$$

4.6.6. Φωτοχημική οξείδωση (LOTOS-EUROS)

Ο σχηματισμός φωτοοξειδωτικών είναι ο σχηματισμός δραστικών ουσιών (κυρίως του όζοντος) οι οποίες είναι επιβλαβείς για την ανθρώπινη υγεία και τα οικοσυστήματα και μπορούν επίσης να βλάψουν τις καλλιέργειες. Αυτό το πρόβλημα υποδεικνύεται επίσης με την «καλοκαιρινή αιθαλομίχλη». Η χειμερινή αιθαλομίχλη είναι εκτός του πεδίου εφαρμογής αυτής της κατηγορίας αυτής της μεθόδου. Το φωτοχημικό δυναμικό δημιουργίας όζοντος (POCP) για την εκπομπή ουσιών στον αέρα υπολογίζεται με το

¹¹ Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας, <https://eeae.gr>

μοντέλο τροχιάς UNECE (συμπεριλαμβανομένης της μοίρας) και εκφράζεται σε kg ισοδύναμα αιθυλενίου/kg εκπομπής. Το χρονικό διάστημα είναι 5 ημέρες και η γεωγραφική κλίμακα ποικίλλει μεταξύ τοπικής και ηπειρωτικής κλίμακας.

4.6.7. Οξίνιση (Accumulated Exceedance)

Οι ουσίες που προκαλούν οξύτητα προκαλούν ένα ευρύ φάσμα επιπτώσεων στο έδαφος, τα υπόγεια ύδατα, τα επιφανειακά ύδατα, τους οργανισμούς, τα οικοσυστήματα και τα υλικά (κτίρια). Το δυναμικό οξύτητας (AP) για τις εκπομπές στον αέρα υπολογίζεται με το προσαρμοσμένο μοντέλο RAINS 10, το οποίο περιγράφει την τύχη και την εναπόθεση ουσιών που προκαλούν οξύτητα. Το AP εκφράζεται ως kg ισοδύναμα SO₂/kg εκπομπής. Το χρονικό διάστημα είναι αιωνιότητα και η γεωγραφική κλίμακα ποικίλλει μεταξύ τοπικής κλίμακας και ηπειρωτικής κλίμακας.

4.6.8. Ευτροφισμός (Accumulated Exceedance)

Ο ευτροφισμός (γνωστός και ως θρέψη) περιλαμβάνει όλες τις επιπτώσεις που οφείλονται σε υπερβολικά επίπεδα μακροθρεπτικών συστατικών στο περιβάλλον που προκαλούνται από εκπομπές θρεπτικών ουσιών στον αέρα, το νερό και το έδαφος. Το δυναμικό θρέψης (NP) βασίζεται στη στοιχειομετρική διαδικασία του Heijungs (1992) και εκφράζεται ως kg ισοδύναμα PO₄ ανά kg εκπομπής. Το χρονικό διάστημα είναι άπειρο και η γεωγραφική κλίμακα ποικίλλει μεταξύ τοπικής και ηπειρωτικής κλίμακας.

4.6.9. Οικοτοξικότητα (Usetox)

Αυτός ο δείκτης κατηγορίας αναφέρεται στον αντίκτυπο στα οικοσυστήματα των γλυκών υδάτων, ως αποτέλεσμα των εκπομπών τοξικών ουσιών στον αέρα, το νερό και υπολογίζεται με το USES-LCA (LCA 2014) σε ισοδύναμο 1,4-διχλωροβενζόλιου/χλγ εκπομπών ρύπων. Ο χρονικός ορίζοντας είναι το άπειρο και ο δείκτης ισχύει σε παγκόσμια/ηπειρωτική/ περιφερειακή και τοπική κλίμακα.

4.6.10. Εξάντληση αβιοτικών πόρων (CML 2002)

Αυτή η κατηγορία επιπτώσεων αφορά την προστασία της ανθρώπινης ευημερίας, της ανθρώπινης υγείας και της υγείας των οικοσυστημάτων. Αυτός ο δείκτης κατηγορίας επιπτώσεων σχετίζεται με την εξόρυξη ορυκτών και ορυκτών καυσίμων λόγω εισροών στο σύστημα. Ο Αβιοτικός Συντελεστής Εξάντλησης (ADF) προσδιορίζεται για κάθε εξόρυξη ορυκτών και ορυκτών καυσίμων (kg ισοδύναμο αντιμονίου/kg εξόρυξης) με βάση τα αποθέματα συγκέντρωσης και το ρυθμό αποσυσσώρευσης. Το γεωγραφικό εύρος αυτού του δείκτη είναι σε παγκόσμια κλίμακα.

4.7. Περιγραφή σεναρίων

Στην παρούσα μελέτη θα εφαρμοστεί η ΑΚΖ μεθοδολογία για τη διαχείριση αποβλήτου και σύγκριση των διαφορετικών επιλογών διαχείρισης (σενάρια) και δεν καλύπτεται ολόκληρος ο κύκλος ζωής του προϊόντος (ECOHULLCLEAN Cart) ή του συστήματος φιλτραρίσματος. Επομένως η μελέτη ξεκινά από τη στιγμή που τα στερεά κατάλοιπα της βιοεπίστρωσης εξέρχονται από το σύστημα φιλτραρίσματος (προ-επεξεργασία), απαλλαγμένα από το υγρό κλάσμα της αρχικής βιοεπίστρωσης. Το Σενάριο Αναφοράς και τα εναλλακτικά σενάρια διαχείρισης αποβλήτων περιγράφονται στα επόμενα Κεφάλαια αναλυτικά.

Σενάριο 0 - Σενάριο Αναφοράς όπου τα κατάλοιπα βιοεπίστρωσης συλλέγονται και εναποθέτονται σε ΧΥΤΑ χωρίς καμία επεξεργασία.

Σενάριο 1– Συλλογή, Διαχείριση και Αξιοποίηση της βιοεπίστρωσης μέσω αερόβιας επεξεργασίας με σκοπό την παραγωγή κομπόστ υψηλής ποιότητας.

Σενάριο 2 – Συλλογή, Διαχείριση και Αξιοποίηση της βιοεπίστρωσης μέσω αναερόβιας χώνευσης με σκοπό την παραγωγή βιοαερίου.

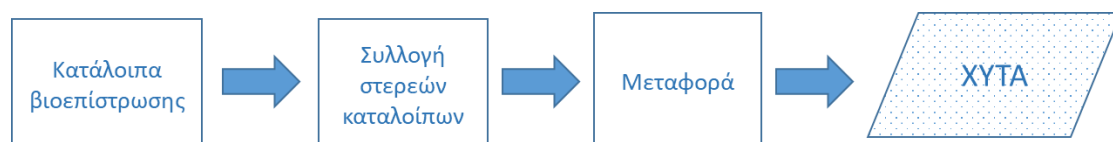
Σενάριο 3 - Συλλογή, Διαχείριση και Αξιοποίηση της βιοεπίστρωσης μέσω θερμικής επεξεργασίας και μετατροπής του σε δευτερογενές καύσιμο (RDF/SRF).

4.7.1. Σενάριο 0 - Σενάριο Αναφοράς/ ΧΥΤΑ

Μέχρι σήμερα στον ελλαδικό χώρο για τον υποβρύχιο καθαρισμό των υφάλων των πλοίων γίνεται χρήση CART (υποβρύχιο όχημα) χωρίς όμως συλλογή των καταλοίπων (απόβλητα). Το υλικό βιοεπίστρωσης που αποκολλάται κατά τη διαδικασία του υποβρύχιου καθαρισμού αφήνεται να καταποντιστεί ως έχει μέσα στη θάλασσα. Ωστόσο, η απευθείας απόρριψη της βιοεπίστρωσης στη θάλασσα ενέχει σοβαρούς κινδύνους τόσο για την εξάπλωση των χωροκατακτητικών θαλάσσιων ειδών στο εγχώριο οικοσύστημα όσο και για τη ρύπανση του θαλάσσιου περιβάλλοντος από τα υφαλοχρώματα των πλοίων και από το επιπλέον υλικό που συσσωρεύεται τοπικά στους χώρους εργασιών του υποβρύχιου καθαρισμού (π.χ. λιμάνια).

Για λόγους σύγκρισης με τα άλλα εναλλακτικά σενάρια, στο σενάριο αυτό θεωρούμε ότι τα κατάλοιπα αυτά συλλέγονται και διατίθεται σε ΧΥΤΑ χωρίς, ωστόσο, ανάκτηση της ενέργειας ή ανακύκλωσής τους.

Το διάγραμμα ροής του Σεναρίου 0 (Σενάριο Αναφοράς) παρουσιάζεται στην Εικόνα 15. και η απογραφή των δεδομένων στον Πίνακα 3.



Εικόνα 15 Διάγραμμα ροής Σεναρίου Αναφοράς

Πίνακας 4 Σενάριο 0- Απογραφή δεδομένων για 1kgρ καταλοίπων βιοεπίστρωσης

Διαδικασίες	Ποσότητα
Συλλογή καταλοίπων βιοεπίστρωσης (βιομάζα)	1 kgρ
Μεταφορά από λιμάνι Πειραιά προς ΣΜΑ Σχιστού και ΧΥΤΑ Φυλής	28,3 km
Μεταφορά από λιμάνι Ελευσίνας προς ΣΜΑ Σχιστού και ΧΥΤΑ Φυλής	31,3 km
Ταφή σε ΧΥΤΑ χωρίς επεξεργασία	1 kgρ

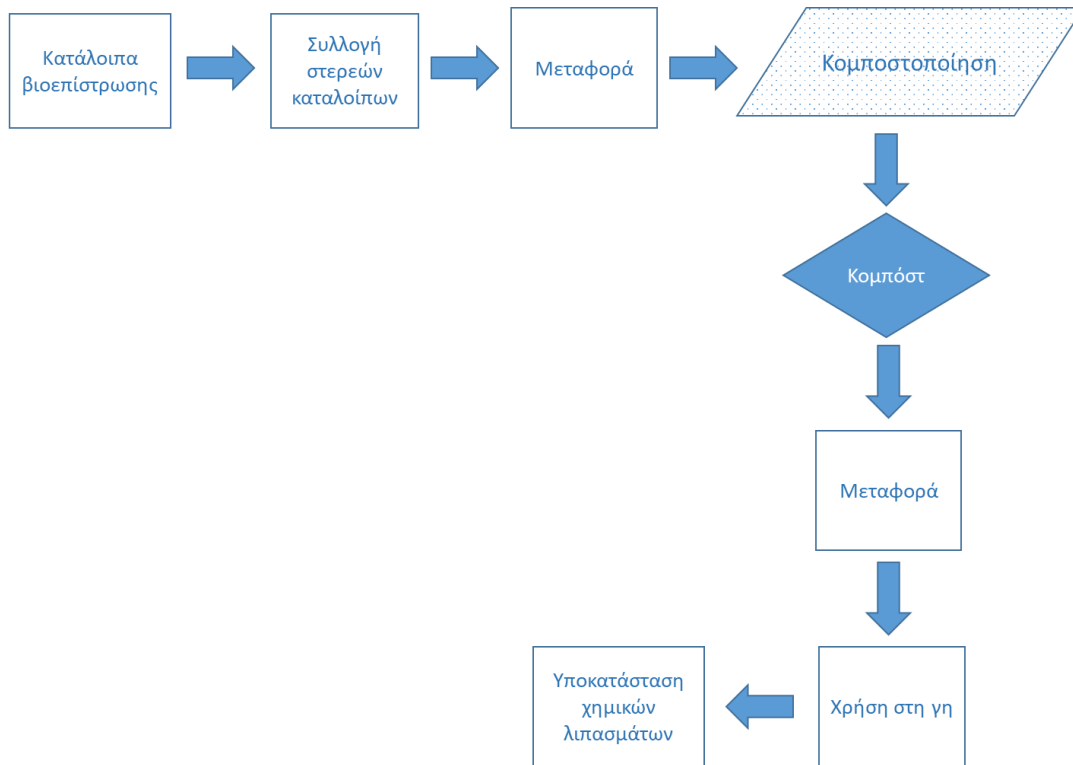
Για την μοντελοποίηση της διαδικασίας με η χρήση του λογισμικού SimaPro, επιλέχθηκε ως βάση η διαδικασία «Municipal solid waste {RoW}| treatment of, sanitary landfill | Conseq, S». από τη βάση δεδομένων Ecoinvent. Στην παραπάνω διαδικασία γίνεται επεξεργασία σύμμεικτων αποβλήτων με συμμετοχή οργανικού κλάσματος σε ποσοστό 22% και με παρουσία 60,4% βιογενούς άνθρακα στο σύνολο των αποβλήτων. Τα δεδομένα της επιλεγείσας διαδικασίας αντιπροσωπεύουν την τεχνολογία μονάδας υγειονομικής ταφής βιογενών ή μη επεξεργασμένων ΑΣΑ στην Ελβετία (Ecoinvent 3).

4.7.2. Σενάριο 1– Αερόβια επεξεργασία και παραγωγή κομπόστ

Στο πλαίσιο του Σεναρίου 1 λαμβάνονται υπόψη τα επιμέρους υποσυστήματα:

1. Ξεχωριστή συλλογή των στερεών αποβλήτων από τον καθαρισμό των υφάλων από την εταιρία καθαρισμού, Diving Status A.E. σε ειδικούς σάκους στην έξοδο του συστήματος φιλτραρίσματος.
2. Μεταφορά στο Σταθμό Μεταφόρτωσης Απορριμμάτων (ΣΜΑ) Σχιστού μέσω χερσαίων μέσων (απορριματοφόρα) και στη συνέχεια στην Ολοκληρωμένη Εγκατάσταση Διαχείρισης Απορριμμάτων (ΟΕΔΑ) Δυτικής Αττικής (περιοχή Φυλής - Άνω Λιοσίων).
3. Τελική διάθεση αποβλήτων για παραγωγή κομπόστ στο Εργοστάσιο Μηχανικής Ανακύκλωσης και Κομποστοποίησης (ΕΜΑΚ) Φυλής - Άνω Λιοσίων που βρίσκεται στην ΟΕΔΑ Δυτικής Αττικής.

Το διάγραμμα ροής του Σεναρίου 1 παρουσιάζεται στην Εικόνα 16 και η απογραφή των δεδομένων στον Πίνακα 4.



Εικόνα 16 Διάγραμμα ροής Σεναρίου 1

Πίνακας 5 Σενάριο 1- Απογραφή δεδομένων για 1kgr καταλοίπων βιοεπίστρωσης

Διαδικασίες	Ποσότητα
Συλλογή καταλοίπων βιοεπίστρωσης (βιομάζα)	1 kgr
Μεταφορά από λιμάνι Πειραιά προς ΣΜΑ Σχιστού και ΧΥΤΑ Φυλής	28,3 km
Μεταφορά από λιμάνι Ελευσίνας προς ΣΜΑ Σχιστού και ΧΥΤΑ Φυλής	31,3 km
Στάδιο κομποστοποίησης με παραγωγή κομπόστ	1 kgr

Για τη μοντελοποίηση της διαδικασίας με τη χρήση του λογισμικού SimaPro, επιλέχθηκε ως βάση η διαδικασία «Biowaste {RoW}| treatment of biowaste, industrial composting | Conseq, S» από τη βάση δεδομένων Ecoinvent. Στην παραπάνω διαδικασία ως «βιοαπόβλητα» ορίζονται τα βιοαποδομήσιμα απόβλητα κήπων και πάρκων, υπολείμματα τροφίμων και κουζίνας από νοικοκυριά, εστιατόρια, καταστήματα εστίασης και καταστήματα λιανικής, συγκρίσιμα απόβλητα από μονάδες επεξεργασίας τροφίμων, συμπεριλαμβανομένου δασικών ή γεωργικών υπολείμματα και κοπριά. Δεν περιλαμβάνει λάσπη λυμάτων ή άλλα βιοαποδομήσιμα απόβλητα όπως φυσικά υφάσματα, χαρτί ή επεξεργασμένο ξύλο (Ecoinvent 3). Προϊόν της διαδικασίας

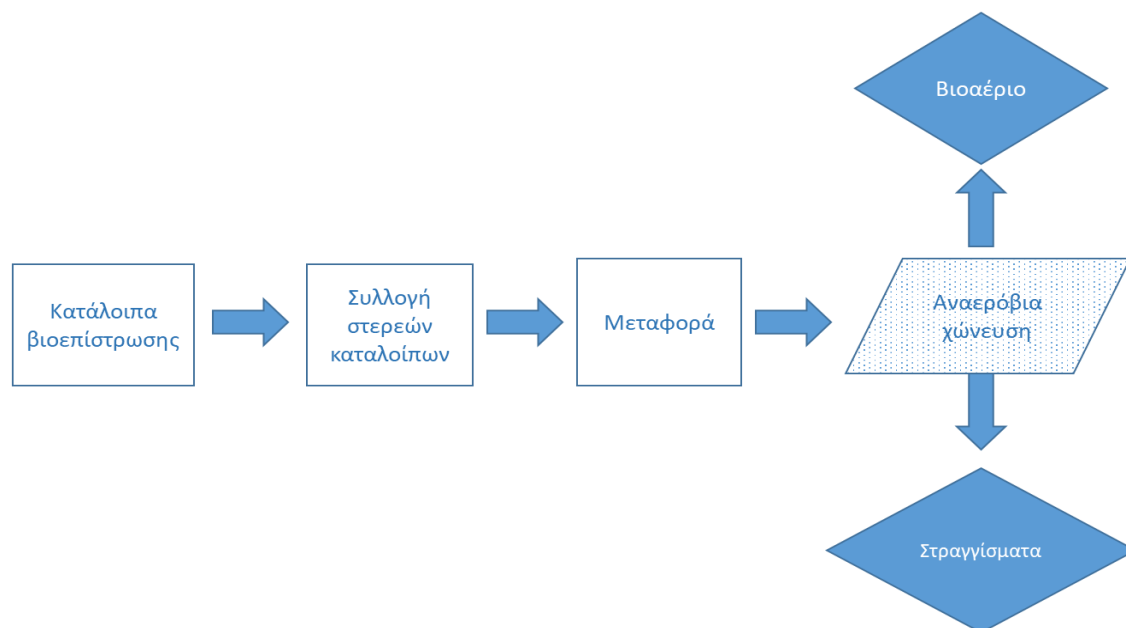
επεξεργασίας είναι το κομπόστ¹² με ποσοστό περιεκτικότητας σε νερό 50% ανά κιλό. Συμπεριλαμβάνονται επίσης οι ενεργειακές ανάγκες για τη λειτουργία της μονάδας κομποστοποίησης καθώς και οι εκπομπές διεργασιών. Επιπλέον, τα δεδομένα της επιλεγείσας διαδικασίας αντιπροσωπεύουν την τεχνολογία μιας μονάδας κομποστοποίησης «ανοιχτού τύπου» στην Ελβετία (Ecoinvent 3).

4.7.3. Σενάριο 2 – Αναερόβια χώνευση και παραγωγή βιοαερίου

Στο πλαίσιο του δεύτερου σεναρίου λαμβάνονται υπόψη τα επιμέρους υποσυστήματα:

1. Ξεχωριστή συλλογή των στερεών αποβλήτων από τον καθαρισμό των υφάλων από την εταιρία καθαρισμού, Diving Status A.E. σε ειδικούς σάκους στην έξοδο του συστήματος φιλτραρίσματος.
2. Μεταφορά στο Σταθμό Μεταφόρτωσης Απορριμμάτων (ΣΜΑ) Σχιστού μέσω χερσαίων μέσων (απορριματοφόρα) και στη συνέχεια σε Χώρο Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ Φυλής).
3. Τελική διάθεση αποβλήτων για παραγωγή βιοαερίου στη Μονάδα Βιοαερίου (εταιρία ΒΙΟΑΕΡΙΟ – ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΝΩ ΛΙΟΣΙΑ Α.Ε. – ΒΕΑΛ) που διατίθεται στον ΧΥΤΑ Φυλής.

Το διάγραμμα ροής του Σεναρίου 2 παρουσιάζεται στην Εικόνα 17 και η απογραφή των δεδομένων στον Πίνακα 5.



Εικόνα 17 Διάγραμμα ροής Σεναρίου 2

¹² Το κομπόστ ορίζεται ως το υγροποιημένο στερεό σωματιδιακό υλικό, αποτέλεσμα κομποστοποίησης, το οποίο αφού εξυγιανθεί και σταθεροποιηθεί μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό.

Πίνακας 6 Σενάριο 2- Απογραφή δεδομένων για 1kgf καταλοίπων βιοεπίστρωσης

Διαδικασία (Process)	Ποσότητα
Κατάλοιπα βιοεπίστρωσης (βιομάζα)	
Συλλογή καταλοίπων	1 kgf
Μεταφορά από λιμάνι Πειραιά προς ΣΜΑ Σχιστού και ΧΥΤΑ Φυλής	28,3 km
Μεταφορά από λιμάνι Ελευσίνας προς ΣΜΑ Σχιστού και ΧΥΤΑ Φυλής	31,3 km
Στάδιο Αναερόβιας Χώνευσης με παραγωγή βιοαερίου	1 kgf

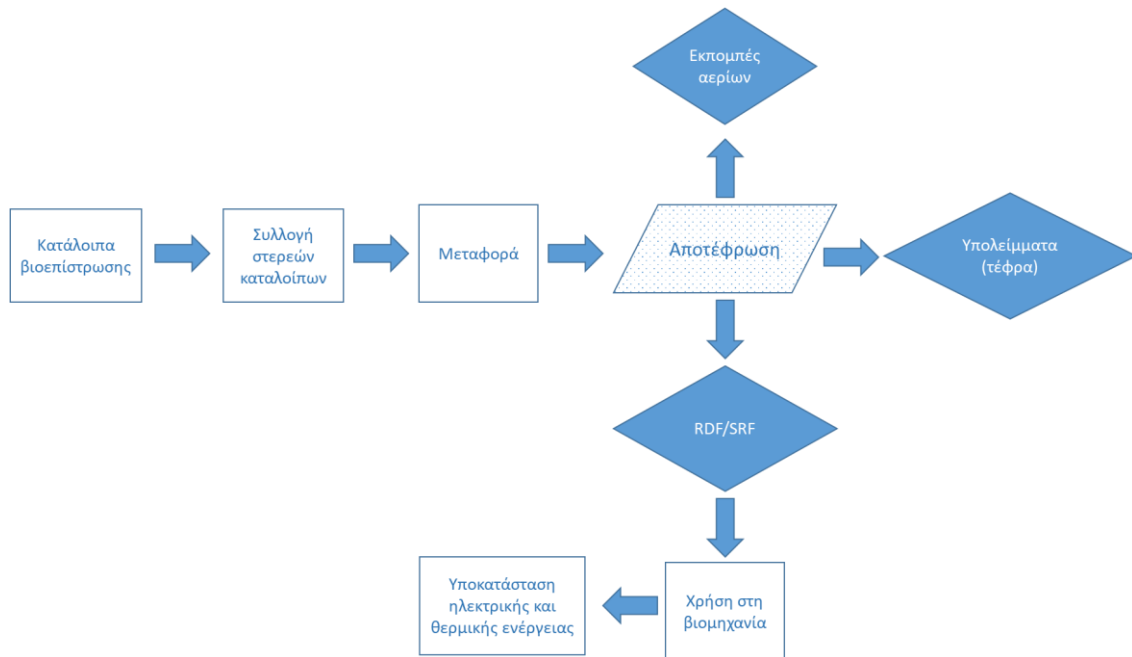
Για την μοντελοποίηση της διαδικασίας με τη χρήση του λογισμικού SimaPro, επιλέχθηκε ως βάση η διαδικασία «Biowaste {RoW}| treatment of biowaste by anaerobic digestion | Conseq, S». από τη βάση δεδομένων Ecoinvent. Στην παραπάνω διαδικασία ως «βιοαπόβλητα» ορίζονται τα βιοαποδομήσιμα απόβλητα κήπων και πάρκων, υπολείμματα τροφίμων και κουζίνας από νοικοκυριά, εστιατόρια, καταστήματα εστίασης και καταστήματα λιανικής, συγκρίσιμα απόβλητα από μονάδες επεξεργασίας τροφίμων, συμπεριλαμβανομένου δασικών ή γεωργικών υπολείμματα και κοπριά. Δεν περιλαμβάνει λάσπη λυμάτων ή άλλα βιοαποδομήσιμα απόβλητα όπως φυσικά υφάσματα, χαρτί ή επεξεργασμένο ξύλο (Ecoinvent 3). Η διαδικασία επεξεργασίας παράγει βιοαέριο (ένα μείγμα κυρίως μεθανίου και διοξειδίου του άνθρακα) και υπολειμματικά προϊόντα που ονομάζονται στερεά και υγρά χωνεμένα προϊόντα. Συμπεριλαμβάνονται επίσης οι ενεργειακές ανάγκες για τη λειτουργία της μονάδας αναερόβιας επεξεργασίας καθώς και οι εκπομπές διεργασιών. Επιπλέον, τα δεδομένα της επιλεγείσας διαδικασίας αντιπροσωπεύουν την τεχνολογία μιας μονάδας αερόβιας χώνευσης στην Ελβετία που χρησιμοποιεί θερμόφιλη, ενός-σταδίου χώνευση με κομποστοποίηση, με περίοδο αναφοράς τα έτη 2009-2011 (Ecoinvent 3).

4.7.4. Σενάριο 3 – Καύση και παραγωγή RDF/SRF

Στο πλαίσιο του Σεναρίου 3 λαμβάνονται υπόψη τα επιμέρους υποσυστήματα:

1. Ξεχωριστή συλλογή των στερεών αποβλήτων από τον καθαρισμό των υφάλων από την εταιρία καθαρισμού, Diving Status A.E. σε ειδικούς σάκους στην έξοδο του συστήματος φιλτραρίσματος.
2. Μεταφορά στο Σταθμό Μεταφόρτωσης Απορριμμάτων (ΣΜΑ) Σχιστού μέσω χειρσαίων μέσων (απορριματοφόρα) και στη συνέχεια σε Χώρο Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ Φυλής).
3. Τελική διάθεση αποβλήτων για παραγωγή δευτερογενούς καυσίμου (RDF/SRF) στη «Μονάδα αποθήκευσης, διαλογής και ανακύκλωσης μη επικίνδυνων στερεών αποβλήτων, αποθήκευσης αποβλήτων ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού και παραγωγής RDF» της εταιρίας Antipollution A.E. στον Ασπρόπυργο.

Το διάγραμμα ροής του Σεναρίου 3 παρουσιάζεται στην Εικόνα 18 και η απογραφή των δεδομένων στον Πίνακα 6.



Εικόνα 18 Διάγραμμα ροής Σεναρίου 3

Πίνακας 7 Σενάριο 3- Απογραφή δεδομένων για 1kgr καταλοίπων βιοεπίστρωσης

Διαδικασία (Process)	Ποσότητα
Συλλογή καταλοίπων βιοεπίστρωσης (βιομάζα)	1 kgr
Μεταφορά από λιμάνι Πειραιά προς Ασπρόπυργο	18,6 χλμ
Μεταφορά από λιμάνι Ελευσίνας προς Ασπρόπυργο	8 χλμ
Στάδιο αποτέφρωσης με παραγωγή ενέργειας/καυσίμου	1 kgr

Για τη μοντελοποίηση της διαδικασίας με τη χρήση του λογισμικού SimaPro, επιλέχθηκε ως βάση η διαδικασία «Biowaste {GLO} treatment of biowaste, municipal incineration | Conseq, S» από τη βάση δεδομένων Ecoinvent. Το σύνολο δεδομένων της παραπάνω διαδικασίας αντιπροσωπεύει τη διάθεση βιολογικών αποβλήτων σε έναν αποτεφρωτή αστικών στερεών αποβλήτων. Συμπεριλαμβάνονται οι βραχυπρόθεσμες εκπομπές των αποβλήτων στα ύδατα μέσω των στραγγισμάτων, καθώς και οι μακροπρόθεσμες εκπομπές από τους χώρους υγειονομικής ταφής στα υπόγεια ύδατα. Επιπλέον, η επιλεγείσα διαδικασία λαμβάνει υπόψη την τεχνολογία που εφαρμόζεται σε μία μέση εγκατάσταση αποτέφρωσης αστικών στερεών αποβλήτων στην Ελβετία, με έτος αναφοράς το 2010 (Ecoinvent 3).

4.8. Γενικές παραδοχές

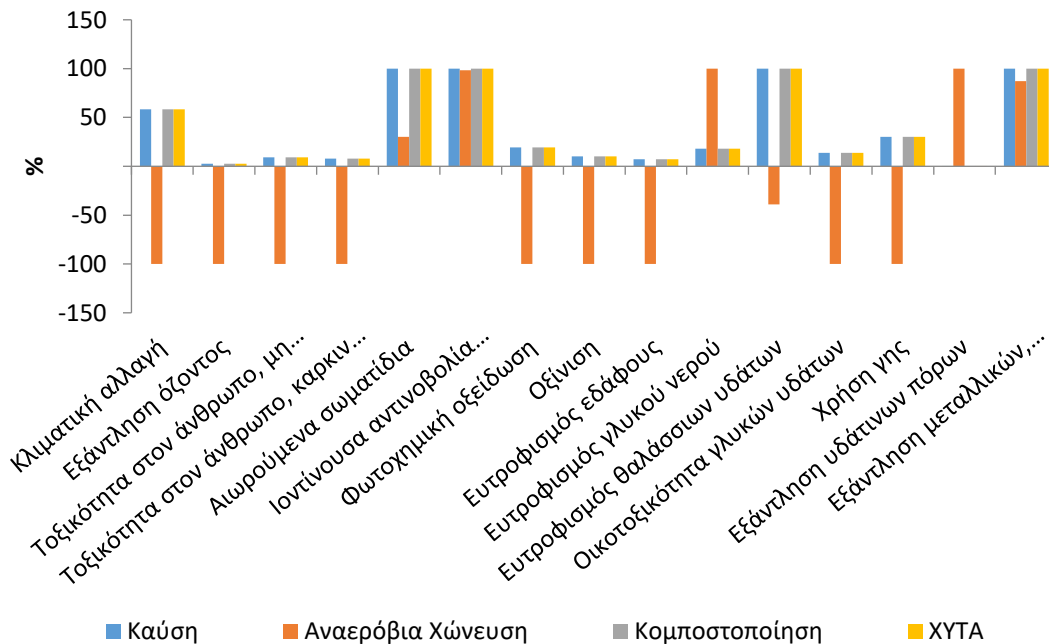
Κατά την εφαρμογή της ΑΚΖ για τα παραπάνω σενάρια διαχείρισης αποβλήτων έγιναν οι εξής παραδοχές:

- Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις του συστήματος ξεκινούν από την μεταφορά του απορρίμματος (zero burden assumption). Επομένως δεν λαμβάνεται υπόψη ο κύκλος ζωής του προϊόντος (ECOHULLCLEAN Cart) και του συστήματος φιλτραρίσματος.
- Δεν λαμβάνονται υπόψη οι επιπτώσεις από το στάδιο κατασκευής των μονάδων διαχείρισης των απορριμμάτων.
- Γίνεται διαλογή του απορρίμματος στην πηγή (ΔσΠ), δηλαδή απευθείας στο χώρο εργασιών του υποβρύχιου καθαρισμού. Επομένως, το στάδιο συλλογή έχει μηδενικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα.
- Για τη μεταφορά των απορριμμάτων λήφθηκε η μέγιστη χιλιομετρική απόσταση (28 χλμ*2) των σεναρίων από τα λιμάνια του Πειραιά και της Ελευσίνας στον ΧΥΤΑ Φυλής, συνυπολογίζοντας και την επιστροφή των χερσαίων μέσων πίσω στην «αφετηρία» (λιμάνια Πειραιά/ και Ελευσίνας).
- Το ποσοστό ανάκτησης της βιοεπίστρωσης θεωρήθηκε 100% για όλα τα σεναρία καθώς γίνεται υλικού Διαλογή στη Πηγή (ΔσΠ).
- Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο βασίζονται σε βιβλιογραφικά δεδομένα και την ενσωματωμένη στο λογισμικό βάση δεδομένων (Ecoinvent) για τις διαδικασίες επεξεργασίας οικιακών βιολογικά αποβλήτων και βιομάζα, ως πιο κοντά στην πραγματική σύνθεση της βιοεπίστρωσης.
- Τα παραγόμενα προϊόντα των διεργασιών υπό μελέτη (κομπόστ, βιοαέριο, δευτερογενές καύσιμο) θεωρήθηκε ότι μεταφέρεται σε μικρή απόσταση (<10 km), στο πνεύμα των αρχών της εγγύτητας και της αυτάρκειας για τη διάθεση και ανάκτηση αποβλήτων, όπως αυτές απορρέουν από το διεθνές δίκαιο για τα κράτη-μέλη.

5. Αποτελέσματα Σεναρίων

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα περιβαλλοντικά αποτελέσματα των σεναρίων υπό μελέτη, εφαρμόζοντας την μέθοδο ILCD Recommended-2013 του λογισμικού SimaPro, (Έκδοση PhD 9.3.0.3) της εταιρίας PRé Sustainability BV. Επισημαίνεται ότι οι αρνητικές τιμές που εμφανίζονται στα γραφήματα αντιπροσωπεύουν εξοικονομήσεις, ενώ οι θετικές τιμές επιβαρύνσεις. Στην Εικόνα 19 παρουσιάζονται οι συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις (αποτελέσματα χαρακτηρισμού) των σεναρίων για 14 κατηγορίες επιπτώσεων.

Βάσει του συγκριτικού διαγράμματος των τεσσάρων (4) σεναρίων (Εικόνα 19) προκύπτει ότι όλα τα Σενάρια παρουσιάζουν περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις με το Σενάριο 2 όμως να εμφανίζει σημαντικές ελαφρύνσεις σε αντίθεση με τα υπόλοιπα Σενάρια. Πιο συγκεκριμένα, τα Σενάρια 0, 1 και 3 έχουν επιβαρύνσεις κυρίως στην εξάντληση αβιοτικών πόρων, τον θαλάσσιο ευτροφισμό, την ιοντίζουσα ακτινοβολία, τα αιωρούμενα σωματίδια και την κλιματική αλλαγή. Για το Σενάριο 2 προκύπτουν, από την μία πλευρά, επιβαρύνσεις κυρίως στον ευτροφισμό γλυκού νερού, την ιοντίζουσα ακτινοβολία και την εξάντληση αβιοτικών και υδάτινων πόρων. Από την άλλη πλευρά, το Σενάριο 2 παρουσιάζει ελαφρύνσεις κυρίως στις κατηγορίες της κλιματικής αλλαγής, της εξάντλησης του όζοντος, της τοξικότητας στον άνθρωπο, της φωτοχημικής οξείδωσης, της οξίνισης, του ευτροφισμού στο έδαφος και της οικοτοξικότητας, κυρίως λόγω της ανάκτησης ενέργειας από την ίδια τη διαδικασία.



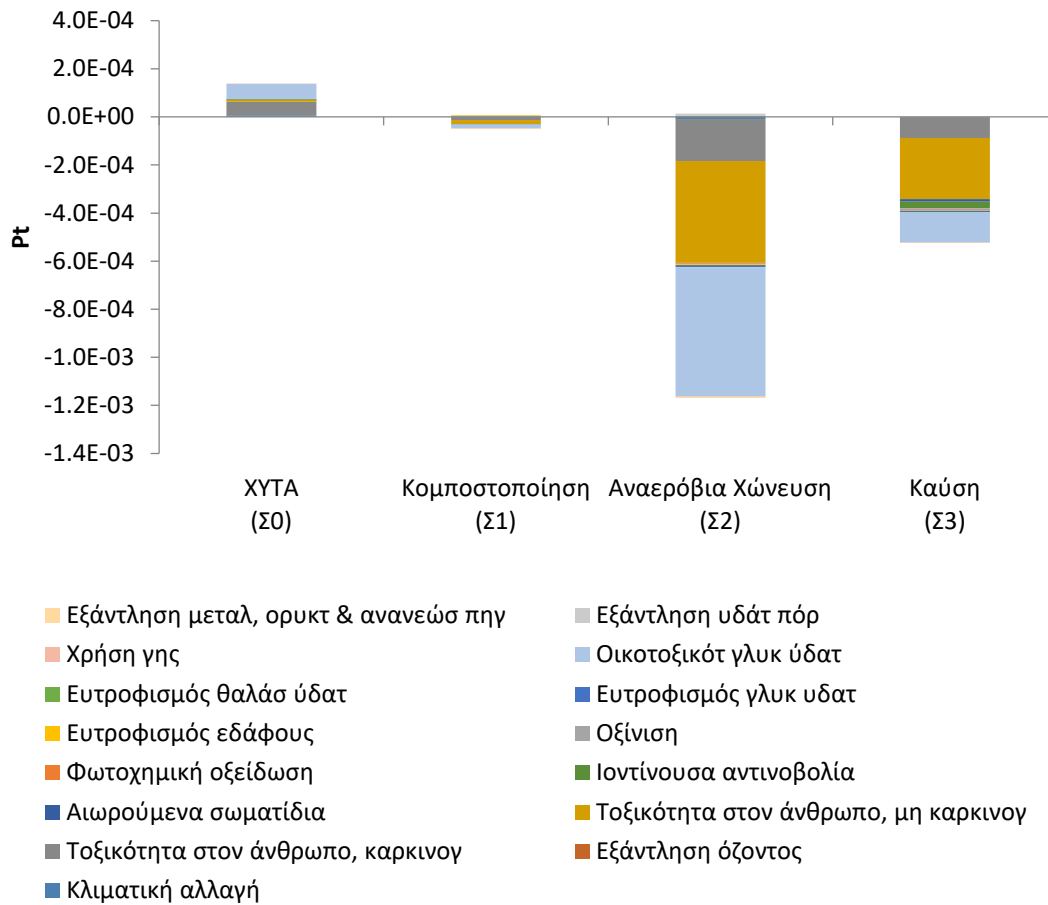
Εικόνα 19 Συνολική περιβαλλοντική αξιολόγηση Σεναρίων διαχείρισης βιοεπίστρωσης

Στην Εικόνα 20 συγκρίνονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των επιμέρους διαδικασιών των Σεναρίων (στάδια επεξεργασίας) υπό εξέταση. Από το γράφημα προκύπτει ότι η

διαδικασία του Σεναρίου 2 (Αναερόβια Χώνευση) έχει συγκριτικά τα περισσότερα περιβαλλοντικά οφέλη, ακολουθούμενη με μικρή διαφορά από το Σενάριο 1 (Κομποστοποίηση) και το Σενάριο 3 (Καύση). Αντίθετα, η διαδικασία του Σεναρίου 0 (Σενάριο Αναφοράς/ ΧΥΤΑ) παρουσιάζει συνολικά επιβάρυνση στο περιβάλλον. Ειδικότερα, το Σενάριο 2 και 3 παρουσιάζει οφέλη στις κατηγορίες της τοξικότητας για τον άνθρωπο και το οικοσύστημα, λόγω κυρίως της ανάκτησης ενέργειας από την ίδια τη διαδικασία. Το Σενάριο 1 παρουσιάζει ελαφρύνσεις, αν και μικρότερες, κυρίως στις κατηγορίες τοξικότητας για τον άνθρωπο, την οικοτοξικότητα νερού, τον ευτροφισμό και της εξάντλησης βιοτικών πόρων, κυρίως από την αντικατάσταση των χημικών λιπασμάτων από την παραγωγή κομπόστ. Αντίθετα, το Σενάριο Αναφοράς έχει επιβαρύνσεις κυρίως στις κατηγορίες της οικοτοξικότητας, της τοξικότητας για τον άνθρωπο, την κλιματική αλλαγή και τον ευτροφισμό, λόγω κυρίως των εκπομπών CH₄ κατά την αναερόβια αποδόμηση των αποβλήτων και των στραγγισμάτων και των ουσιών που απελευθερώνονται στα επιφανειακά και υπόγεια ύδατα.

Τα αποτελέσματα των δύο παρακάτω γραφημάτων είναι παρόμοια καθώς η μεταφορά των αποβλήτων δεν συμμετέχει σημαντικά στην συνολική περιβαλλοντική αξιολόγηση των Σεναρίων, όπως θα αναλυθεί και στη συνέχεια. Ο λόγος είναι το γεγονός ότι οι εργασίες υποβρύχιου καθαρισμού πραγματοποιούνται σε σημεία της Αττικής (ευρύτερη περιοχή λιμανιών Πειραιά και Ελευσίνα) με εύκολη πρόσβαση με χερσαία μέσα σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας αποβλήτων. Επομένως, η κατανάλωση καυσίμου είναι περιορισμένη συγκριτικά με τη διαχείριση αποβλήτων για παράδειγμα σε νησιωτικές περιοχές ή στη διαχείριση ορισμένων επικίνδυνων αποβλήτων όπου κρίνεται απαραίτητη η διασυνοριακή μεταφορά τους σε κατάλληλες μονάδες επεξεργασίας στο εξωτερικό.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται κάθε μελετώμενο σενάριο ξεχωριστά και παρουσιάζονται οι διαδικασίες που συνεισφέρουν στις επιπτώσεις (στάδια επεξεργασίας, μεταφορές), με σκοπό να διαπιστωθούν οι πηγές εκείνες, οι οποίες αποτελούν επιβάρυνση ή ελάφρυνση σε κάθε κατηγορία επίπτωσης και σεναρίου (κανονικοποιημένα αποτελέσματα). Επίσης, αναδεικνύεται η συμμετοχή των σταδίων επεξεργασίας σε σχέση και με τα αντίστοιχα προϊόντα και διαδικασίες που αποφεύγονται (avoided products) στην συνολική αξιολόγηση των Σεναρίων.

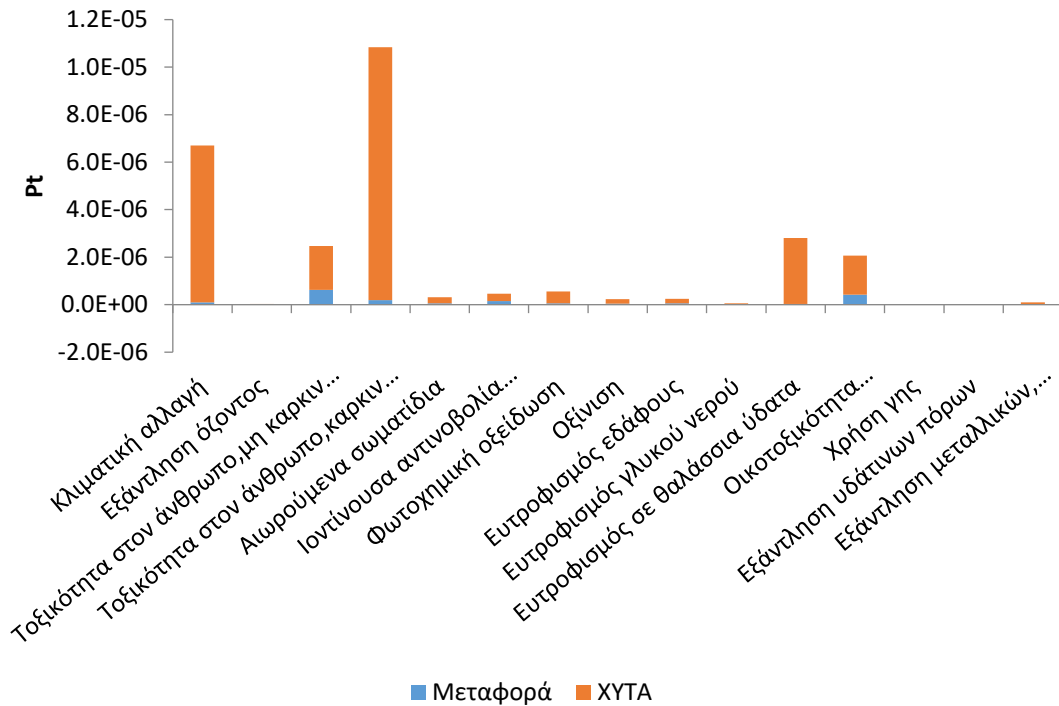


Εικόνα 20 Συνολική περιβαλλοντική αξιολόγηση διαδικασιών επεξεργασίας Σεναρίων

5.1. Σενάριο 0 – Σενάριο Αναφοράς/ΧΥΤΑ

Στην Εικόνα 21 παρουσιάζεται η σύνθεση των κατηγοριών επίπτωσης του Σεναρίου Αναφοράς. Στο παρακάτω γράφημα παρατηρείται ότι η διαδικασία ταφής σε ΧΥΤΑ έχει αρνητικές επιδράσεις στις περισσότερες κατηγορίες, με σημαντικότερη την τοξικότητα στον άνθρωπο και την κλιματική αλλαγή, κυρίως λόγω των εκπομπών CH₄ κατά την αναερόβια αποδόμηση των αποβλήτων¹³. Ακολουθούν επιβαρύνσεις στις κατηγορίες του ευτροφισμού και της οικοτοξικότητας, λόγω των στραγγισμάτων και των ουσιών που απελευθερώνονται στα επιφανειακά και υπόγεια ύδατα, καθώς και της φωτοχημικής οξείδωσης, λόγω των εκπομπών SO₂, NO_x και NMVOC στην ατμόσφαιρα.

¹³ Οι εκπομπές CO₂ από την αποδόμηση των αποβλήτων θεωρούνται βιογενείς και δεν συνεισφέρουν αρνητικά στις επιπτώσεις της κατηγορίας της κλιματικής αλλαγής.

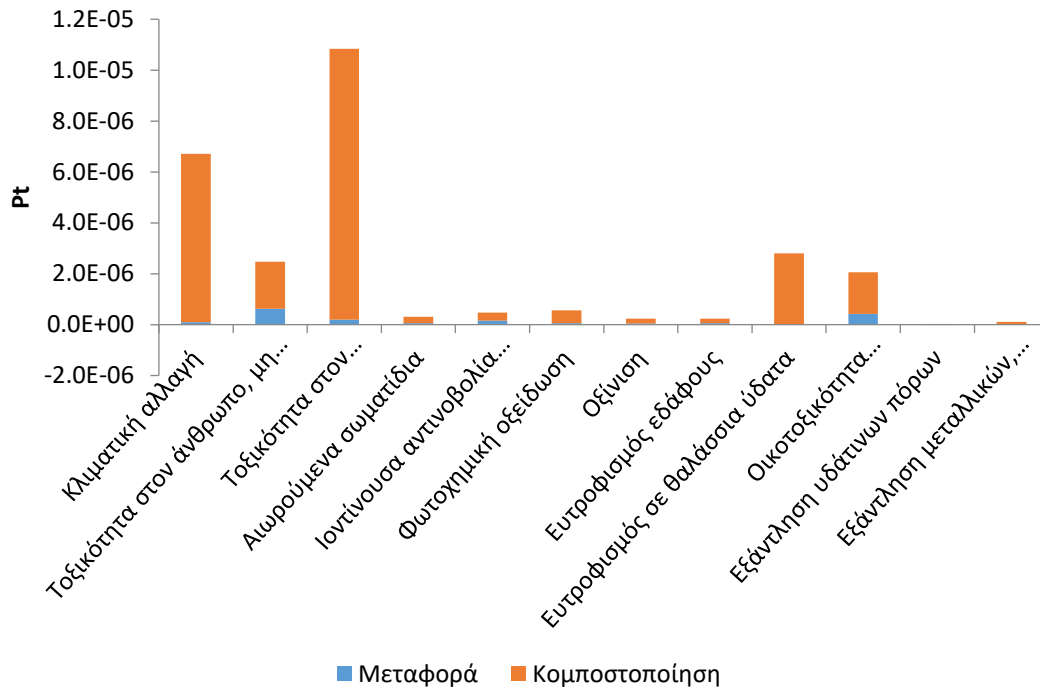


Εικόνα 21 Συνολική περιβαλλοντική αξιολόγηση Σεναρίου Αναφοράς

Στο Σενάριο Αναφοράς (Σ0) παρουσιάζονται επιβαρύνσεις λόγω της κατανάλωσης καυσίμων των χερσαίων μέσων (απορριμματοφόρων) για την πραγματοποίηση της μεταφοράς της βιοεπίστρωσης από τον χώρο εργασιών του υποβρύχιου καθαρισμού στον πλησιέστερο Σταθμό Μεταφόρτωσης Απορριμμάτων (ΣΜΑ Σχιστού) και Χώρο Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ Φυλής). Πιο συγκεκριμένα, η χερσαία μεταφορά συμβάλλει στην τοξικότητα, λόγω της εκπομπής ποσοτήτων βαρέων μετάλλων στον αέρα και το έδαφος (νικέλιο, ψευδάργυρο και υδράργυρο) και στην κλιματική αλλαγή μέσω των εκπομπών CO₂, CO και ενώσεων CH₄ στην ατμόσφαιρα. Ωστόσο, η χερσαία μεταφορά των απορριμμάτων συμβάλλει σε πολύ μικρότερο βαθμό αρνητικά στις κατηγορίες επίπτωσης της τοξικότητας και της κλιματικής αλλαγής του Σεναρίου, λόγω της κατανάλωσης καυσίμου και εξόρυξης πόρων για την παραγωγή τους.

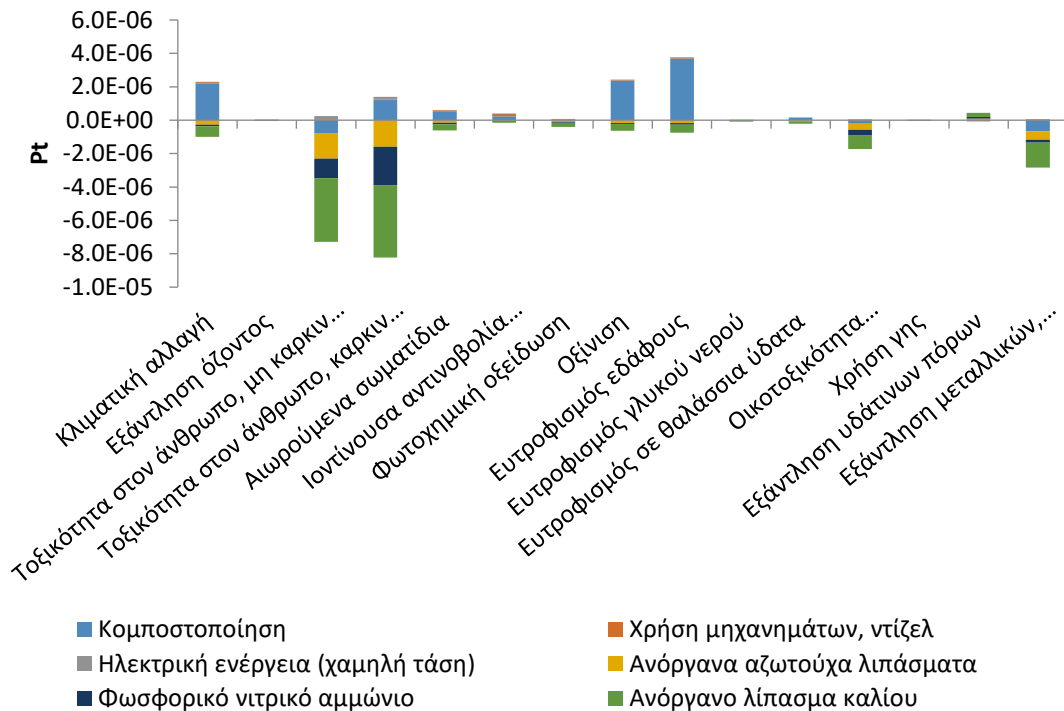
5.2. Σενάριο 1 – Κομποστοποίηση

Στην Εικόνα 22 παρουσιάζεται η σύνθεση των κατηγοριών επίπτωσης του Σεναρίου 1. Για το Σενάριο 1 παρατηρείται ότι η διαδικασία της κομποστοποίησης έχει επιβαρύνσεις κυρίως στην τοξικότητα, την κλιματική αλλαγή και τον ευτροφισμό, κυρίως λόγω αέριων εκπομπών κατά την αποδόμηση των αποβλήτων και των στραγγισμάτων από τα οποία απελευθερώνονται ουσίες στα επιφανειακά και υπόγεια ύδατα. Το στάδιο της μεταφοράς των βιοαποβλήτων συνεισφέρει σε μικρότερο βαθμό, στις κατηγορίες επίπτωσης της τοξικότητας και της κλιματικής αλλαγής, λόγω των εκπομπών από την κατανάλωση των καυσίμων, αλλά σε μικρότερο βαθμό από το στάδιο της κομποστοποίησης.



Εικόνα 22 Συνολική περιβαλλοντική αξιολόγηση Σεναρίου 1

Στην Εικόνα 23 παρατηρείται η έντονη παρουσία του σταδίου της κομποστοποίησης και της υποκατάστασης των χημικών λιπασμάτων, στην πλειοψηφία των κατηγοριών επίπτωσης. Ειδικότερα, η κατηγορία της κλιματικής αλλαγής παρουσιάζει επιβαρύνσεις από τις εκπομπές της ίδιας της διεργασίας της κομποστοποίησης, όπως CO₂, CH₄, CO, και τις εκπομπές από την κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας. Αντίθετα οι ελαφρύνσεις που παρουσιάζονται κυρίως στις κατηγορίες τοξικότητας, εξάντλησης αβιοτικών πόρων και ευτροφισμού, μετριάζονται από την υποκατάσταση των χημικών λιπασμάτων καθώς αποφεύγεται η παραγωγή τους και η εφαρμογή τους στη γη απ' όπου θα απελευθέρωναν βαρέα μέταλλα στο έδαφος. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι μέσω της διαδικασίας της κομποστοποίησης υπάρχει περιβαλλοντικό όφελος από την μείωση της ποσότητας οργανικών αποβλήτων προς υγειονομική ταφή, η οποία είναι περισσότερο επιβαρυντική περιβαλλοντικά σαν διαδικασία συνολικά.

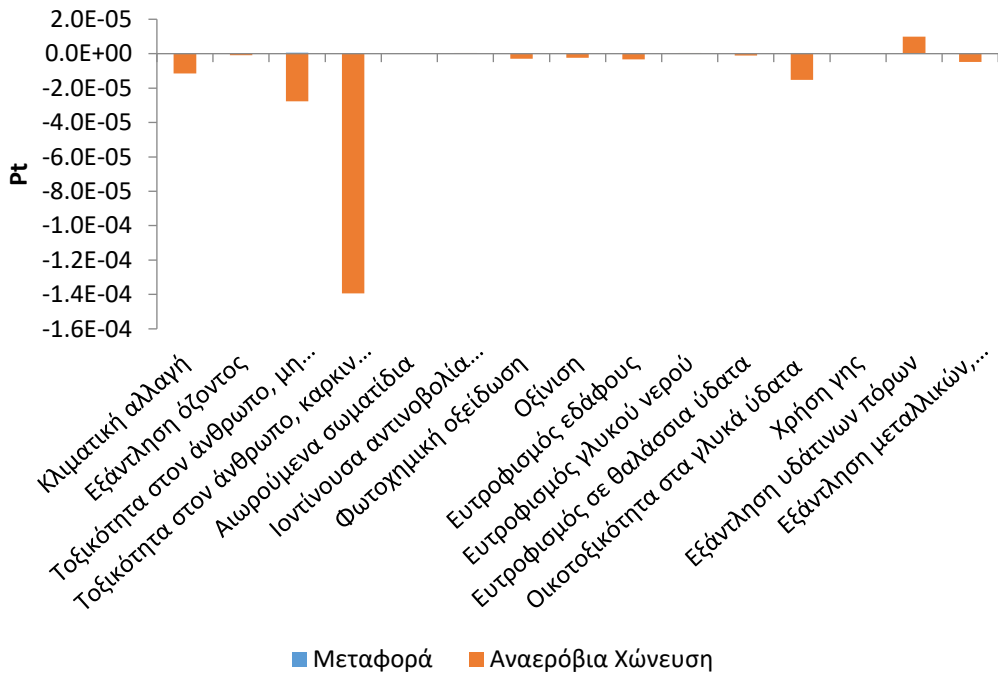


Εικόνα 23 Κατηγορίες επιπτώσεων του σταδίου της κομποστοποίησης στο Σενάριο 1

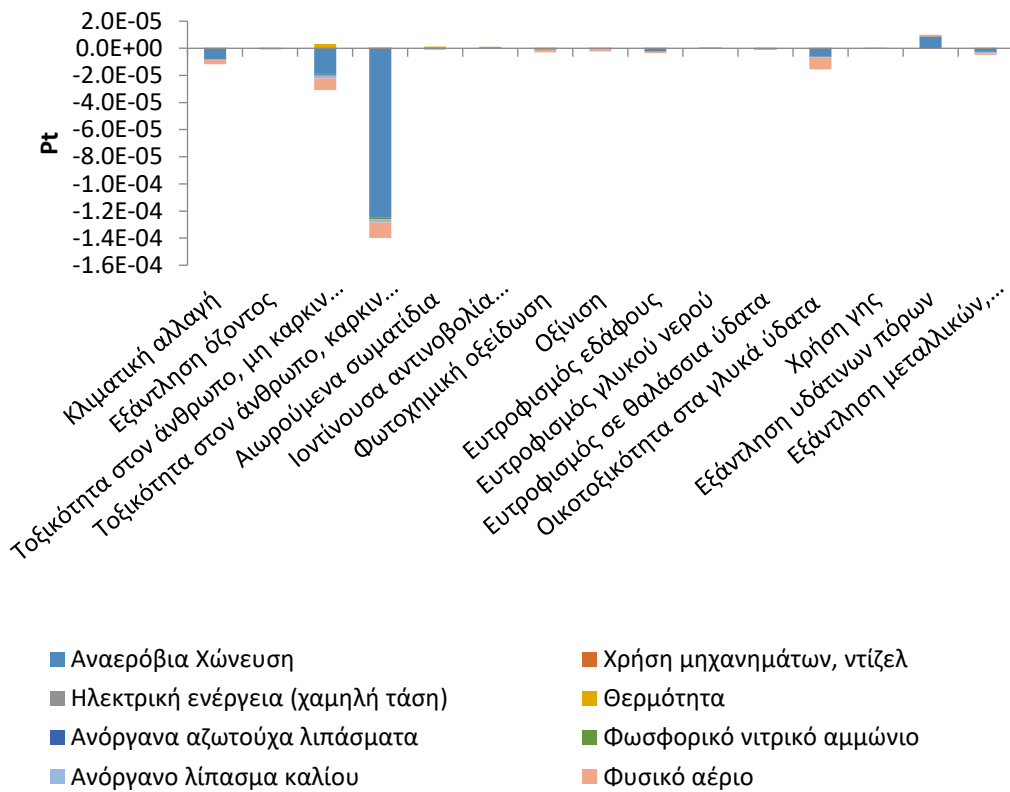
5.3. Σενάριο 2 - Αναερόβια Χώνευση

Στην Εικόνα 24 παρουσιάζεται η σύνθεση των κατηγοριών επίπτωσης του Σεναρίου 2. Για το Σενάριο 2 παρατηρείται ότι η διαδικασία της Αναερόβιας Χώνευσης έχει επιβαρύνσεις κυρίως στην εξάντληση υδατικών πόρων λόγω του νερού (υγρασίας) ή της προσθήκης του κατά τη διαδικασίας της αναερόβιας χώνευσης. Ελαφρύνσεις προσδίδονται κυρίως στην κατηγορίας της τοξικότητας και της κλιματικής αλλαγής, κυρίως λόγω αποφυγής αέριων εκπομπών (CH₄, CO₂) κατά την αποδόμηση των αποβλήτων. Το στάδιο της μεταφοράς έχει ελάχιστη συνεισφορά στις περισσότερες κατηγορίες επίπτωσης.

Στην Εικόνα 25 παρατηρείται η έντονη παρουσία του σταδίου της Αναερόβιας Χώνευσης στις περιβαλλοντικές ελαφρύνσεις, όπως και της υποκατάστασης της παραγωγής και χρήσης του φυσικού αερίου λόγω της παραγωγής βιοαερίου από την διαδικασία. Ειδικότερα, τα οφέλη προκύπτουν στις κατηγορίες της τοξικότητας και της κλιματικής αλλαγής λόγω της υποκατάστασης, ενώ αντίθετα προκύπτουν επιβαρύνσεις στην κατηγορία εξάντλησης υδάτινων πόρων από τη χρήση νερού στη διαδικασία.



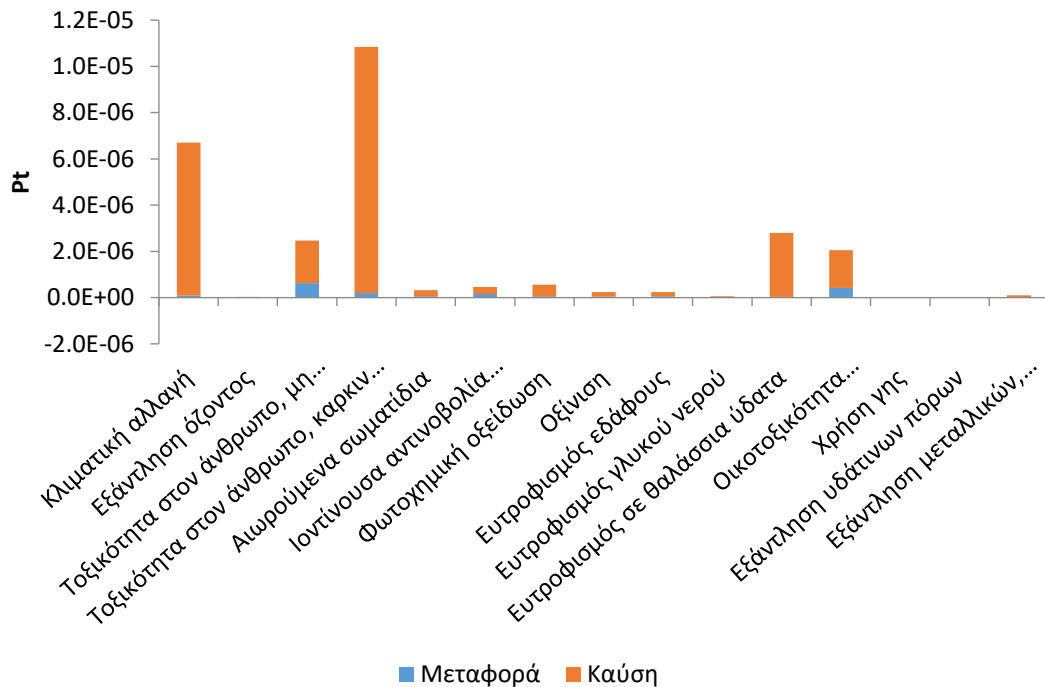
Εικόνα 24 Συνολική περιβαλλοντική αξιολόγηση Σεναρίου 2



Εικόνα 25 Κατηγορίες επιπτώσεων του σταδίου της αναερόβιας χώνευσης στο Σενάριο 2

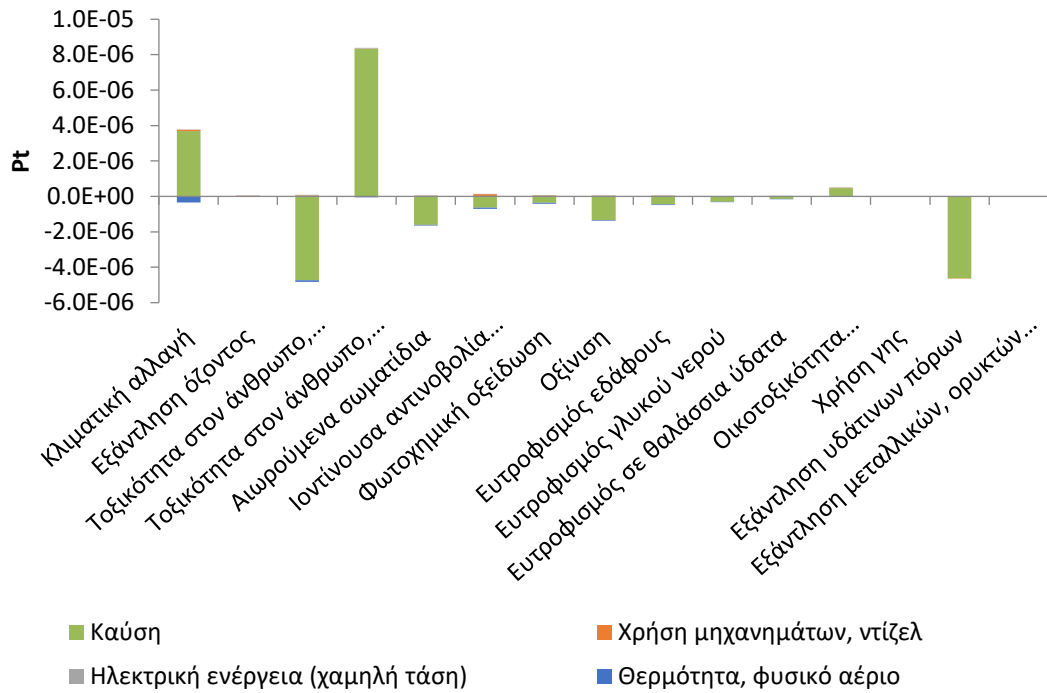
5.4. Σενάριο 3 – Καύση

Στην Εικόνα 26 παρουσιάζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις του Σεναρίου 3 που αφορά στην καύση της βιοεπίστρωσης με αξιοποίηση ενέργειας. Η διαδικασία της καύσης έχει επιβαρύνσεις σε όλες τις κατηγορίες, με σημαντικότερες την τοξικότητα και την κλιματική αλλαγή, λόγω των αέριων εκπομπών από την καύση και τα αδρανή στερεά υπολείμματα (τέφρα). Τα τελευταία ενδέχεται να εμπεριέχουν βαρέα μέταλλα, από τις πιο σημαντικές ομάδες τοξικών εκπομπών που προέρχονται από την καύση και σχετίζονται με πιθανές επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου. Επίσης, η καύση έχει αυξημένη επίπτωση και στην κατηγορία του θαλάσσιου ευτροφισμού, λόγω των εκπομπών NO_x από τη μεγάλη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας στη διαδικασία (Pradel et al., 2014). Το στάδιο της μεταφοράς εμφανίζει αρκετά μικρότερη επιβάρυνση σε σχέση με τη διαδικασία της αποτέφρωσης.



Εικόνα 26 Συνολική περιβαλλοντική αξιολόγηση Σεναρίου 23

Από την Εικόνα 27 διαφαίνεται ότι το στάδιο της καύσης έχει τη μεγαλύτερη συμμετοχή στις συνολικές επιβαρύνσεις κυρίως στην τοξικότητα για τον άνθρωπο και την κλιματική λόγω των αέριων εκπομπών από τη διαδικασία της αποτέφρωσης. Αντίθετα, ελαφρύνσεις προκύπτουν σε αρκετές κατηγορίες με μεγαλύτερες εκείνες στην κατηγορία της τοξικότητας (μη καρκινογόνα) και της εξάντλησης υδάτινων πόρων. Τις παραπάνω επιβαρύνσεις ισοσταθμίζει για όλες τις κατηγορίες και κυρίως στην κλιματική αλλαγή, η παραγωγή ενέργειας (ηλεκτρική και θερμική) αντικαθιστώντας τη εξόρυξη και χρήση ορυκτών καυσίμων, όπως του λιγνίτη και του πετρελαίου.

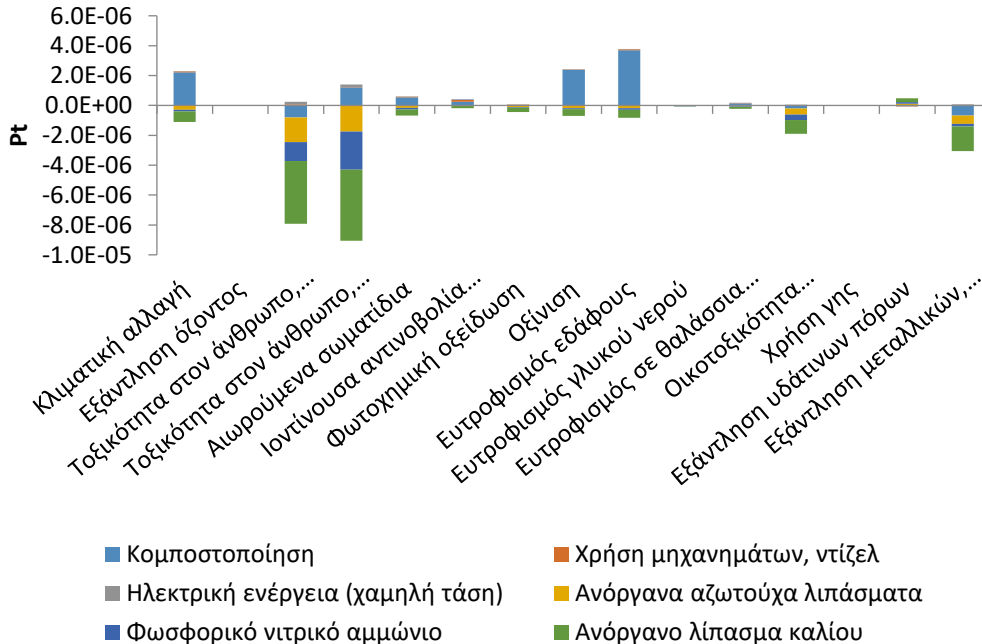


Εικόνα 27 Κατηγορίες επιπτώσεων του σταδίου της καύσης στο Σενάριο 3

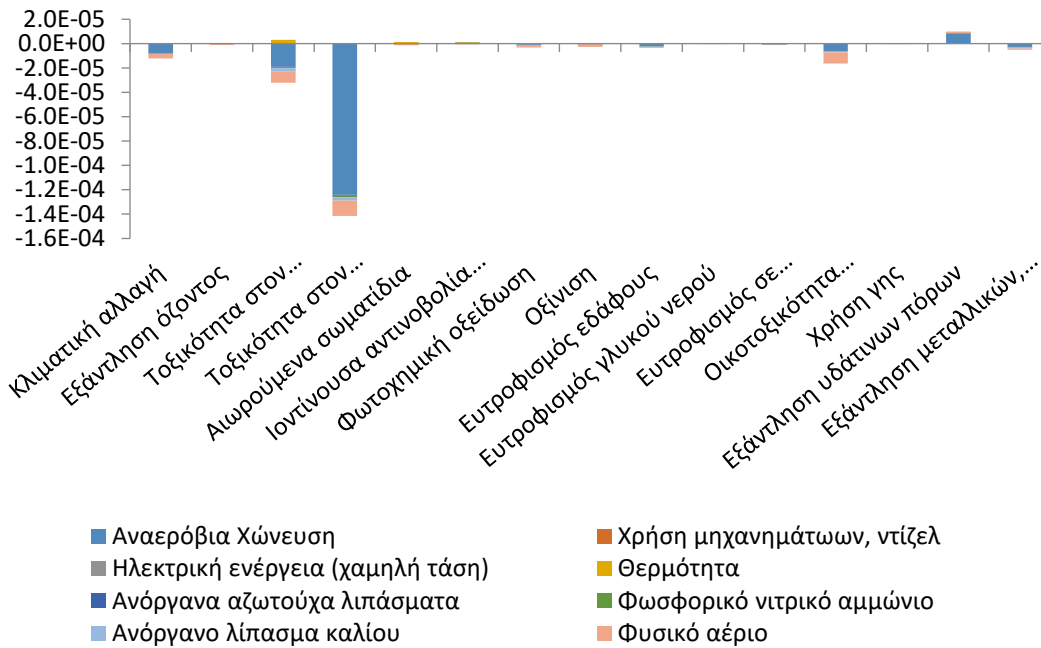
6. Ανάλυση ευαισθησίας

Στο Κεφάλαιο 6 αξιολογείται η ευαισθησία των περιβαλλοντικών αποτελεσμάτων στη μεταβολή συγκεκριμένων παραμέτρων στις παραδοχές που έχουν γίνει στα Σενάρια. Στην παρούσα μελέτη αξιολογείται η αύξηση της ανάκτησης υλικών (μέσω της υποκατάστασης) και ανάκτησης ενέργειας από τις διαδικασίες της κομποστοποίησης (Σενάριο 1), Αναερόβιας Χώνευσης (Σενάριο 2) και της αποτέφρωσης (Σενάριο 3).

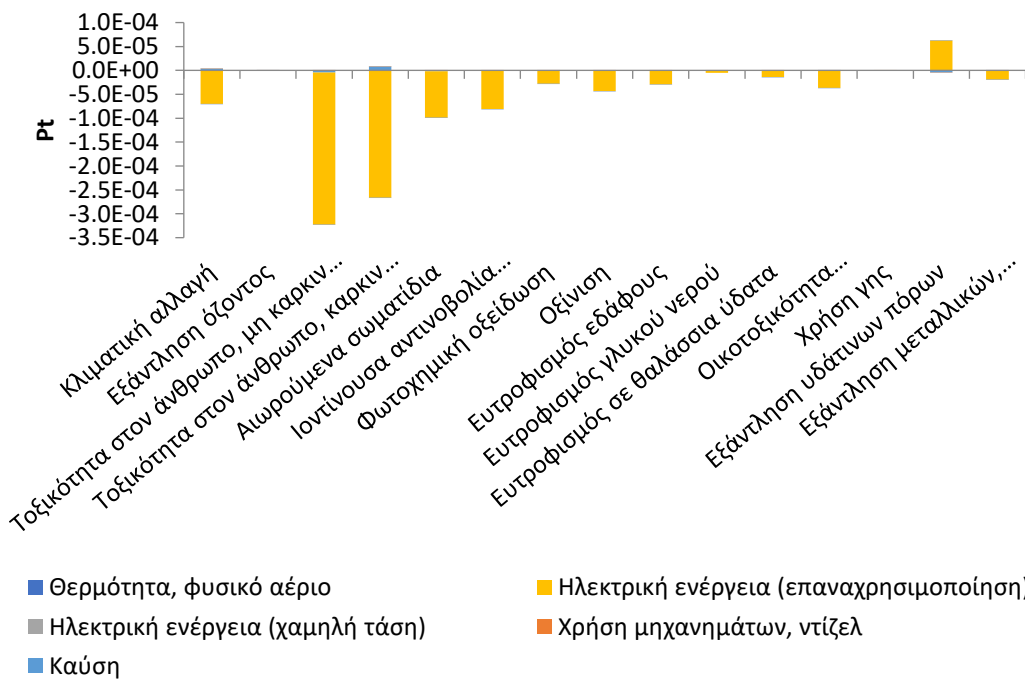
Στο Σενάριο 1 (κομποστοποίηση) θεωρήθηκε μια αύξηση κατά 10% της υποκατάστασης των χημικών λιπασμάτων από την παραγωγή κομπόστ. Από το παρακάτω γράφημα (Εικόνα 28) παρατηρείται ότι με την αύξηση του ποσοστού υποκατάστασης υλικών (ουσιών), το Σενάριο 1 δεν παρουσιάζει κάποια περαιτέρω περιβαλλοντική ελάφρυνση στις κατηγορίες επίπτωσης. της μελέτης. Στο Σενάριο 2 (αναερόβια χώνευση) θεωρήθηκε κατά 10% την ανάκτηση ενέργειας από την παραγωγή βιοαερίου. Από το παρακάτω γράφημα (Εικόνα 29) παρατηρείται ότι με την παραπάνω αύξηση, το Σενάριο 2 δεν παρουσιάζει κάποια περαιτέρω περιβαλλοντική ελάφρυνση στις κατηγορίες επίπτωσης. Στο Σενάριο 3, αντίστοιχα, θεωρήθηκε μια αύξηση 10% στην ανάκτηση ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας από την ίδια τη διαδικασία. Από το παρακάτω γράφημα (Εικόνα 30) παρατηρείται ότι με την παραπάνω αύξηση, το Σενάριο 3 παρουσιάζει ελαφρύνσεις στις περισσότερες κατηγορίες επιπτώσεων, κυρίως στην τοξικότητα και την κλιματική αλλαγή λόγω της υποκατάστασης ηλεκτρικής ενέργειας στη διαδικασία που είναι αρκετά ενεργοβόρα.



Εικόνα 28 Ανάλυση ευαισθησίας για το ποσοστό υποκατάστασης χημικών λιπασμάτων στο Σενάριο 1



Εικόνα 29 Ανάλυση ευαισθησίας για το ποσοστό ανάκτησης ενέργειας στο Σενάριο 2



Εικόνα 30 Ανάλυση ευαισθησίας για το ποσοστό ανάκτησης ενέργειας στο Σενάριο 3.

7. Συμπεράσματα

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων στο Κεφάλαιο 5, τις περισσότερες περιβαλλοντικές ελαφρύνσεις παρουσιάζει το Σενάριο 2 (Αναερόβια Χώνευση), ακολουθούμενο από το Σενάριο 1 (Κομποστοποίηση), το Σενάριο 3 (Καύση) με μικρή διαφορά, και τέλος το Σενάριο 0 (Σενάριο Αναφοράς). Επισημαίνεται ότι τα αποτελέσματα της ανάλυσης λειτουργούν ενδεικτικά στην παρούσα μελέτη καθότι τα δεδομένα για το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε βασίζονται σε βιβλιογραφικά δεδομένα και τις ενσωματωμένες στο λογισμικό SimaPro, βάσεις δεδομένων απογραφής κύκλου ζωής (Ecoinvent) για τις διεργασίες επεξεργασίας οικιακών βιολογικών αποβλήτων και βιομάζας (βλ. Παράρτημα 9). Η επιλογή τους έγινε γιατί θεωρήθηκαν πιο κοντά στην πραγματική σύνθεση της βιοεπίστρωσης, ελλείψει πρωτογενών δεδομένων, καθώς η χρήση του ECOHULLCLEAN CART και του συστήματος φιλτραρίσματος σε πραγματικές συνθήκες βρίσκονται σε αρχικό στάδιο δοκιμαστικής περιόδου.

Είναι εμφανές ότι κανένα σενάριο δεν έρχεται με μηδενικές επιβαρύνσεις για το περιβάλλον. Επιπλέον, πέρα από τα περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις, υπάρχουν κι άλλα κριτήρια που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη για τη λήψη αποφάσεων από τους αρμόδιους. Ενδεικτικά, στον Πίνακα 8 αναφέρονται ορισμένα κριτήρια-κλειδιά (JRC, 2014):

Πίνακας 8 Κριτήρια-κλειδιά για τη λήψη αποφάσεων για τα βιολογικά απόβλητα (προσαρμογή από JRC, 2014)

A/A	Κριτήρια	Είδος επιρροής
1.	Ποσότητα βιοαποβλήτων	Προσδιορισμός οικονομικής και τεχνικής σκοπιμότητας διαδικασίας επεξεργασίας
2.	Ποιότητα και σύνθεση βιοαποβλήτων	Προσδιορισμός τεχνικής σκοπιμότητας διαδικασίας επεξεργασίας
3.	Διαθεσιμότητα εγκαταστάσεων επεξεργασίας	Προσδιορισμός οικονομικής σκοπιμότητας διαδικασίας επεξεργασίας
4.	Ζήτηση/προσφορά ενέργειας	Οφέλη από ανάκτηση ενέργειας
5.	Ανάγκες αγοράς προϊόντων αποβλήτων	Περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη από τη χρήση κομπόστ στη γη, βιοαερίου κλπ.
6.	Μακροπρόθεσμο ισοζύγιο χημικών από τη διάθεση βιοαποβλήτων	Προσδιορισμός τεχνικής σκοπιμότητας διαδικασίας επεξεργασίας
7.	Επιμόλυνση βιοαποβλήτων από άλλες πηγές	Προσδιορισμός τεχνικής σκοπιμότητας χρήσης βιοαποβλήτων

8.	Κοινωνική αποδοχή	Επίπεδο κοινωνικής αποδοχής εγκαταστάσεων και διαδικασιών επεξεργασίας αποβλήτων
----	-------------------	--

Εφαρμόζοντας στην παρούσα μελέτη το μοντέλο της κυκλικής οικονομίας στη διαχείριση της βιοεπίστρωσης από τον υποβρύχιο καθαρισμό των υφάλων των πλοίων, λαμβάνονται υπόψη, εκτός από τα αποτελέσματα των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των σεναρίων υπό μελέτη, η ιεράρχηση των αποβλήτων και η μεγιστοποίηση της αξιοποίησης των αποβλήτων ως δευτερογενής πρώτη ύλη. Έτσι, στην Εικόνα 31, προτείνεται η παρακάτω προτεραιοποίηση των διαδικασιών επεξεργασίας, όπου περιλαμβάνονται και βασικοί συνδυασμοί διαφορετικών τεχνολογιών, όπως για παράδειγμα η αναερόβια χώνευση με ανάκτηση ενέργειας και παραγωγή κομπόστ, με σκοπό τη μεγιστοποίηση της αξιοποίησης των αποβλήτων. Επισημαίνεται ότι η κατάταξη των Σεναρίων, όπως αυτή προέκυψε από την AKZ, είναι σύμφωνη με την ιεράρχηση διαχείρισης των αποβλήτων.

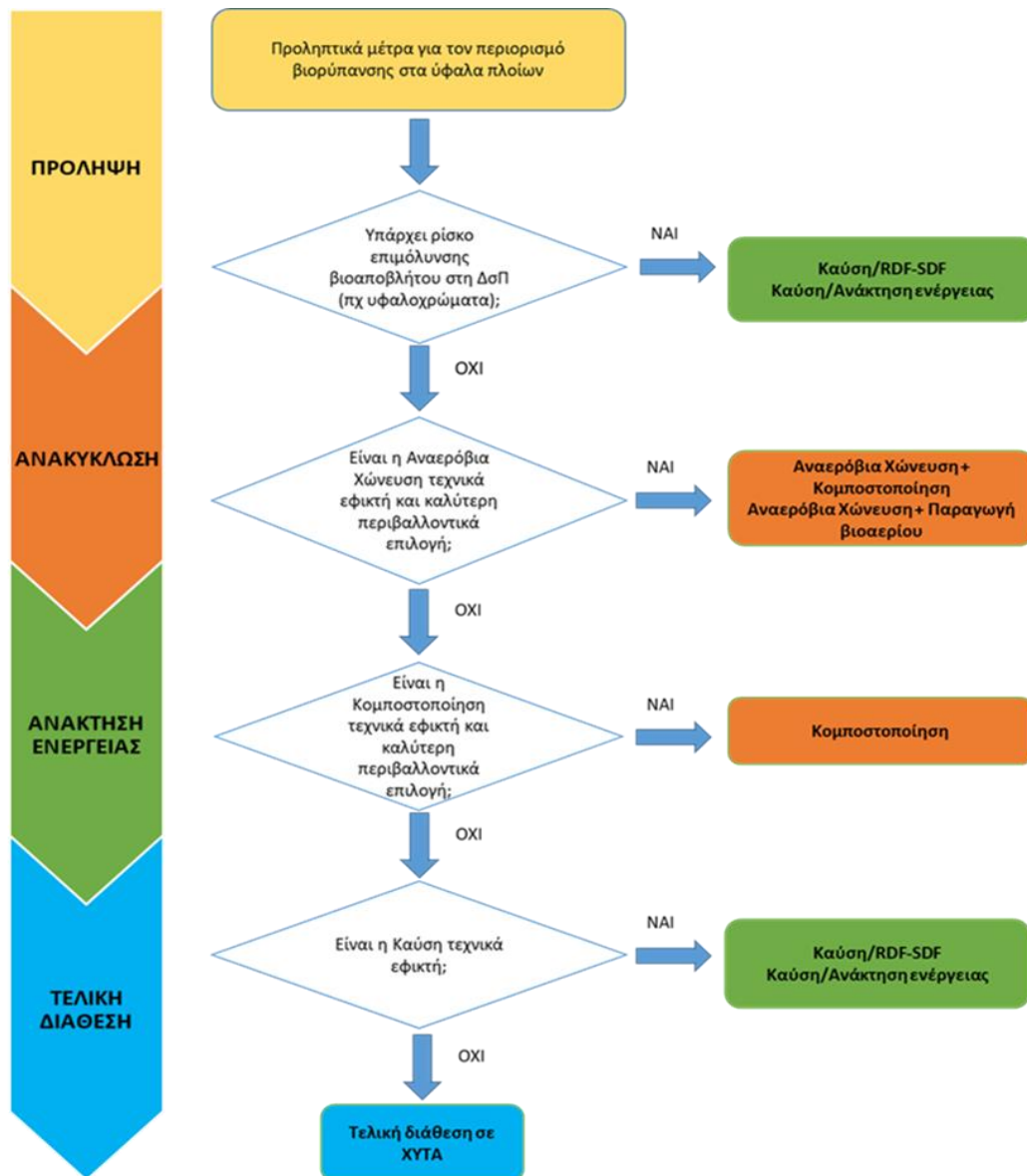
Η **μείωση** των καταλοίπων βιοεπίστρωσης μέσω της **πρόληψης** δημιουργίας της στα πλοία, κρίνεται η βέλτιστη μέθοδος διαχείρισης βιοαποβλήτων για δύο βασικούς λόγους. Πρώτον, προλαμβάνεται η δημιουργία βαριάς βιοεπίστρωσης στα πλοία η οποία προκαλεί σοβαρές περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις. Ενδεικτικά, ένα στρώμα ελαφρούς κολλώδους στρώματος (slime) πάχους 0,5 mm που καλύπτει έως και το 50% της επιφάνειας της γάστρας μπορεί να προκαλέσει αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στην περιοχή από 20 έως 25%, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του πλοίου, την ταχύτητα και άλλες συνθήκες που επικρατούν (Εικόνα 32). Δεύτερον, μειώνονται οι περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις καθώς μειώνονται τα παραγόμενα απόβλητα και άρα αποφεύγονται επιπλέον διαδικασίες διαχείρισης και επεξεργασίας τους. Ενδεικτικά, σε ευρωπαϊκό επίπεδο, οι εκπομπές CO₂ για το 2019 από τα βιοαποικοδομήσιμα απόβλητα σε χώρους υγειονομικής ταφής αντιπροσώπευαν το 3% των συνολικών εκπομπών CO₂ της ΕΕ (Linden at al., 2020). Αντίστοιχες εκπομπές CO₂, ή και περισσότερες (3-4%), προκλήθηκαν από τις θαλάσσιες μεταφορές στην ΕΕ για το ίδιο έτος¹⁴.

Η πρόληψη της βιοεπίστρωσης επιτυγχάνεται με διάφορους τρόπους όπως με τη χρήση υφαλοχρωμάτων που εμποδίζουν την ανάπτυξη και προσκόλληση των θαλάσσιων οργανισμών, και την συχνή παρακολούθηση και καθαρισμό των υφάλων του πλοίου (υποβρύχιο ή με δεξαμενισμό). Ειδικότερα ο υποβρύχιος καθαρισμός με συλλογή των καταλοίπων αποτελεί μια γρήγορη, οικονομικότερη και φιλική προς το περιβάλλον λύση.

Ωστόσο, όταν κριθεί αναγκαίος ο υποβρύχιος καθαρισμός των υφάλων ενός πλοίου λόγω μέτριας ή έντονης βιοεπίστρωσης, τότε τα κατάλοιπα από τις εργασίες καθαρισμού θα πρέπει να τύχουν κατάλληλης διαχείρισης προς αποφυγή τόσο εξάπλωσης ξενικών ειδών στο τοπικό θαλάσσιο οικοσύστημα όσο και της θαλάσσιας ρύπανσης. Σύμφωνα, λοιπόν, με τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης, η διαδικασία επεξεργασίας της **Αναερόβιας**

¹⁴ https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport-emissions/reducing-emissions-shipping-sector_en

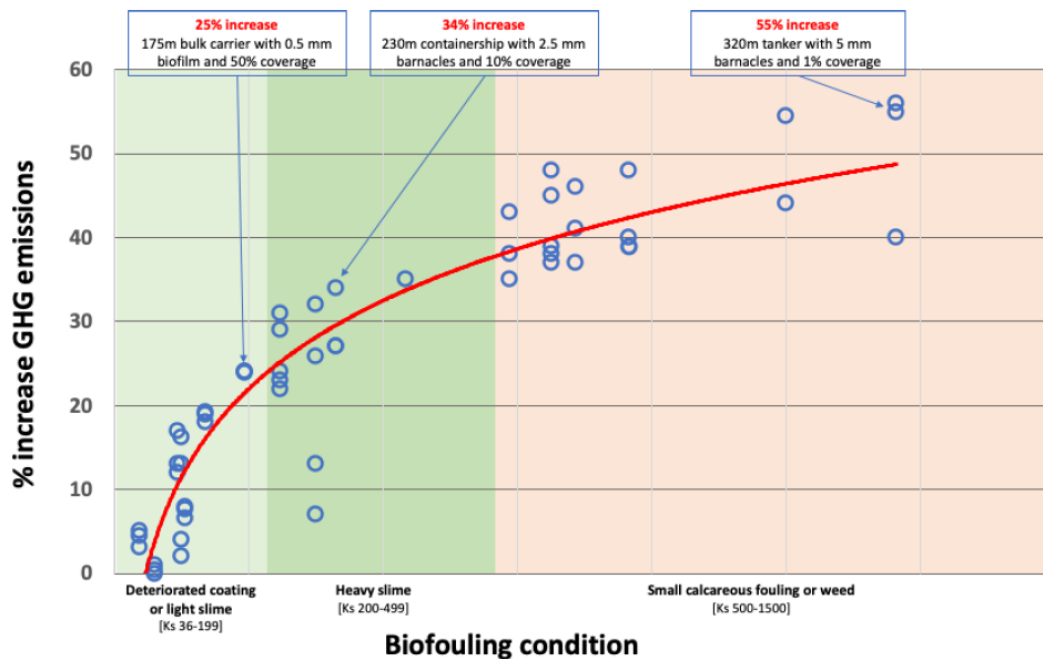
Χώνευση εμφανίζεται ως η πιο ωφέλιμη επιλογή για το περιβάλλον (Antonopoulos et al., 2013) συγκριτικά με τη διαδικασία της καύσης (Di Maria, et al., 2015), της κομποστοποίησης και της υγειονομικής ταφής (Yang et al., 2022).



Εικόνα 31 Διάγραμμα για την υποστήριξη ορθών περιβαλλοντικών αποφάσεων για τα βιολογικά απόβλητα (προσαρμογή από JRC, 2014)

Η διαδικασία παρουσιάζει επιβαρύνσεις κυρίως στην κατηγορία εξάντλησης υδάτινων πόρων, λόγω της χρήσης νερού στη διαδικασία. Αντίθετα, παρατηρούνται αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις (ελαφρύνσεις) στις κατηγορίες της τοξικότητας και της κλιματικής αλλαγής, λόγω υποκατάστασης ηλεκτρική και θερμικής ενέργειας από την

παραγωγή βιοαερίου. Πέρα από το παραγόμενο βιοαέριο, παράγεται χωνεμένο υπόλειμμα (υγρό και στερεό) (digest) το οποίο περιέχει συστατικά που είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη των φυτών και περιέχονται σε λιπάσματα.



Εικόνα 32 Επιπτώσεις βιορύπανσης στα ύφαλα πλοίων στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (IMO, 2021)

Όταν η Αναερόβια Χώνευση δεν είναι εφικτή, τότε η διαδικασία της **Κομποστοποίησης** αποτελεί την καλύτερη περιβαλλοντικά λύση. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μελέτης, η κομποστοποίηση έχει επιβαρύνσεις στην κατηγορία της κλιματικής αλλαγής, λόγω των εκπομπών CO₂, CH₄, CO της ίδιας της διαδικασίας, καθώς και των εκπομπών από την κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας. Αντίθετα ελαφρύνσεις παρουσιάζονται κυρίως στις κατηγορίες τοξικότητας, εξάντλησης αβιοτικών πόρων και ευτροφισμού, λόγω της υποκατάστασης των χημικών λιπασμάτων. Ωστόσο, στα κατάλοιπα της βιοεπίστρωσης είναι πιθανό να υπάρχουν ψήγματα υφαλοχρωμάτων τα οποία περιέχουν τοξικές ουσίες, όπως βαρέα μέταλλα. Υψηλή συγκέντρωσή τους μπορεί να καταστήσει το απόβλητο επικίνδυνο και ακατάλληλο για την αξιοποίησή του ως κομπόστ στη γη. Σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να επιλεγεί η διαδικασία της καύσης αντί της Κομποστοποίησης.

Η διαδικασία της **Καύσης** με ενεργειακή αξιοποίηση είναι η αμέσως επόμενη πιο ωφέλιμη μέθοδος. Η διαδικασία της καύσης παρουσιάζει επιβαρύνσεις κυρίως στην τοξικότητα για τον άνθρωπο και την κλιματική, λόγω των αέριων εκπομπών από τη διαδικασία της αποτέφρωσης. Σημαντική, ωστόσο, στην ισοστάθμιση των επιπτώσεων στην κατηγορία της κλιματικής αλλαγής είναι η ανάκτηση ενέργειας και η παραγωγή δευτερογενούς καυσίμου (SRF/RDF) από τη διαδικασία, αντικαθιστώντας τη εξόρυξη και

χρήση ορυκτών καυσίμων. Αντίθετα, ελαφρύνσεις προκύπτουν κυρίως στην κατηγορία της τοξικότητας (μη καρκινογόνες συνέπειες) και της εξάντλησης υδάτινων πόρων.

Το RDF/SRF, ως εναλλακτικό καύσιμο, έχει χρήση κυρίως στην τσιμεντοβιομηχανία. Κατά μέσο όρο το 38,7% της κατανάλωσης θερμικής ενέργειας στην τσιμεντοβιομηχανία της ΕΕ προέρχεται από δευτερογενή καύσιμα βάσει στοιχείων του έτους 2013 (ΕΕΔΣΑ 2015). Η χρήση απορριμματογενών καυσίμων σε εργοστάσιο τσιμέντου παρουσιάζεται ως η περισσότερο φιλική προς το περιβάλλον, καθώς ταυτόχρονα μειώνει τις εκπομπές του θερμοκηπίου τόσο από τσιμεντοβιομηχανίες, όσο και από χώρους υγειονομικής ταφής (Benhelal et al., 2013). Αρκεί να χρησιμοποιηθούν τα καύσιμα αυτά στην διαδικασία παραγωγής τσιμέντου, διαφορετικά θα καταλήξουν σε ΧΥΤΑ.

Τέλος, όταν καμία από τις παραπάνω διαδικασίες επεξεργασίας δεν είναι εφικτή, τότε η **τελική διάθεση** των αποβλήτων γίνεται σε **ΧΥΤΑ**, ως τελευταία λύση διαχείρισης των αποβλήτων.

Τα τελικά προϊόντα των διαδικασιών επεξεργασίας των βιοαποβλήτων που αναλύθηκαν παραπάνω βάσει των Σεναρίων (όπως βιοαέριο, κομπόστ, θερμοηλεκτρική ενέργεια, βιοαέριο, βιοκαύσιμο) μπορούν να αξιοποιηθούν εμπορικά με οικονομικό όφελος (πχ. αγορά παραγόμενης ενέργειας από τη ΔΕΗ). Μία ιδιαιτερότητα της εμπορικής αξιοποίησης της βιοεπίστρωσης από τα ύφαλα των πλοίων έγκειται στο γεγονός ότι είναι οργανικό υλικό που δεν ανταγωνίζεται τις καλλιέργειες (τροφή), όπως υφίσταται για παράδειγμα στις ενεργειακές καλλιέργειες στο έδαφος. Δημιουργείται φυσικά από την προσκόλληση θαλάσσιων οργανισμών στις βυθιζόμενες επιφάνειες του πλοίου. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η παρουσία της δεν είναι επιθυμητή καθώς προκαλεί επιβράδυνση του πλοίου κι έτσι, αυξάνει την ανάγκη κατανάλωσης καυσίμου για τη διατήρησή της ταχύτητας. Επιπλέον, αποτελεί βασικό μέσο εξάπλωσης ξενικών ειδών, των οποίων η εισαγωγή δημιουργεί τόσο περιβαλλοντικά όσο και κοινωνικο-οικονομικά προβλήματα στο τοπικό θαλάσσιο οικοσύστημα και την τοπική κοινωνία, αντίστοιχα.

Παρόλο που έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος στην έρευνα και καινοτομία για την αξιοποίηση της θαλάσσιας βιομάζας, εξακολουθεί να είναι περιορισμένη η εφαρμογή τεχνολογιών στον τομέα αυτό σε μεγάλη κλίμακα, λόγω έλλειψης τόσο τεχνολογικής ωριμότητας όσο και επιχειρηματικών ευκαιριών (Vita et al., 2021). Σήμερα, ωστόσο, υπάρχουν παραδείγματα αξιοποίησης θαλάσσιας βιομάζας. Ενδεικτικά, σύμφωνα με τη Zero Waste Scotland (2015), τα απόβλητα οστρακοειδών και καρκινοειδών μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ζωοτροφές, για αρωματισμό τροφίμων, την αναερόβια χώνευση, σε λιπάσματα (και φυτοφάρμακα), για την εξαγωγή ενζύμων, καρροτενοειδή, ως πηγή ασβεστίου σε διάφορες βιομηχανίες και ως δομικό υλικό¹⁵. Στη Νορβηγία τα όστρακα επεξεργάζονται ή πωλούνται από νορβηγικές εταιρείες αλιείας και επεξεργασίας τροφίμων σε διεθνείς εταίρους για την εξαγωγή χιτίνης/χιτοζάνης (Vita et al., 2021). Στη Γαλικία της Ισπανίας, τα κελύφη των μπλε μυδιών (*Mytilus galloprovincialis*) χρησιμοποιούνται στη γεωργία για την ασβέστωση του οξιτισμένου εδάφους (Morris et

¹⁵ Τα κελύφη πολλών δίθυρων είναι πλούσια σε ασβεστίτη (CaCO₃), ορυκτό που εξάγεται από τον ασβεστόλιθο.

al., 2019) ή για την απορρόφηση βαρέων μετάλλων (π.χ. αρσενικό) για τη μείωση της ρύπανσης του εδάφους (Osorio-López et al., 2014). Ωστόσο, η μικρή ή περιοδική ροή των απορριμμάτων θαλάσσιας βιομάζας, η έλλειψη τεχνολογικών λύσεων αποθήκευσης και επεξεργασίας στα αλιευτικά σκάφη, τα οικονομικά κίνητρα, η υποδομή για νέες μεθόδους επεξεργασίας, τεκμηρίωση, κανονισμούς και άδειες αγοράς για νέα θαλάσσια συστατικά ή προϊόντα, το υφιστάμενο ρυθμιστικό πλαίσιο, είναι κάποιες από τις υπάρχουσες προκλήσεις που καθιστούν τις λύσεις αυτές μη ελκυστικές.

Ειδικότερα στη περίπτωση των καταλοίπων βιοεπίστρωσης από τον καθαρισμό των υφάλων πλοίου, χρειάζεται να λάβουμε υπόψη ότι το υλικό αυτό, αν και οργανικό, μπορεί να περιέχει τοξικές ουσίες, όπως βαρέα μέταλλα από τα υφαλοχρώματα του πλοίου. Το γεγονός αυτό μπορεί να τα καταστήσει εν δυνάμει επικίνδυνα μειώνοντας έτσι, το πιθανό εύρος αξιοποίησή τους, όπως για λίπασμα σε καλλιέργειες ή χρήσεις στην Ιατρική. Γι' αυτό το λόγο κρίνεται απαραίτητο να προηγείται χημικός δειγματοληπτικός έλεγχος στο υλικό πριν οποιαδήποτε περαιτέρω επεξεργασία και αξιοποίησή του.

8. Βιβλιογραφία

- Βέττας, Ν., Ντεμιάν, Η., Βαλάσκας, Κ., Σταυράκη, Σ., Μουστάκας, Α., Danchev, S., Μανιάτης, Γ., 2022. Κυκλική οικονομία: Ευκαιρίες, προκλήσεις και επιδράσεις στην ελληνική οικονομία, Ίδρυμα Οικονομικών και Βιομηχανικών Ερευνών (IOBE). https://www.dianeosis.org/wp-content/uploads/2022/10/Circular_economy-14102022.pdf
- Βουδούρης, Κ., 2006. Το έδαφος ως αποδέκτης στερεών αποβλήτων - Χώροι Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων - Κεφάλαιο 6, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωλογίας, Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Υδρογεωλογίας. <http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg887e/>.
- Γιδαράκος, Ε., 2006. Επικίνδυνα Απόβλητα: Διαχείριση-Επεξεργασία-Διάθεση, Εκδόσεις Ζυγός, Θεσσαλονίκη.
- Δίκτυο Μέτρησης Αιωρούμενων Σωματιδίων Δήμου Θέρμης. <http://www.thermiair.gr>.
- Εθνικό Κέντρο Τεκμηρίωσης – ΕΚΤ, 2019. Κυκλική Οικονομία: Ένα νέο οικονομικό μοντέλο βιώσιμης ανάπτυξης, Τεύχος 115. <https://www.ekt.gr/el/magazines/features/23377>.
- ΕΕΔΣΑ, 2015. Θέσεις του Δ.Σ. της Ελληνικής Εταιρείας Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων σχετικά με την χρήση δευτερογενών καυσίμων στην τσιμεντοβιομηχανία. https://eedsa.gr/site/wp-content/uploads/2018/10/ΘΕΣΕΙΣ-ΔΣ-ΕΕΔΣΑ_ΣτΕ-RDF.pdf.
- ΕΠΠΕΡΑΑ, 2014. Οδηγός λειτουργίας ανοιχτών εγκαταστάσεων κομποστοποίησης (αερόβια επεξεργασία) προδιαλεγμένων βιοαποβλήτων. http://www.epper.gr/el/Documents/Dhmosiothta/ekdoseis/ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ%20ΒΙΟΑΠΟΒΛΗΤΩΝ/ΟΔΗΓΟΣ_LEITOURG_EGKATAST_KOMPOSTOP_2014_PAGES_1-97.pdf.
- Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2014. Προς μια κυκλική οικονομία: πρόγραμμα μηδενικών αποβλήτων για την Ευρώπη, COM/2014/0398 final. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:50edd1fd-01ec-11e4-831f-01aa75ed71a1.0013.01/DOC_1&format=PDF.
- Λαζαρίδη, Κ., Κουλουμπής, Π., Σκουλαξίνου, Σ., Κανακόπουλος, Δ., Λώλος, Γ., 2002. Προδιαγραφές Ποιότητας και Διάθεση Κομπόστ: η Ελληνική και Διεθνής Εμπειρία, 1^ο Διεθνές Συνέδριο ΕΕΔΣΑ για την διαχείριση Στερεών Αποβλήτων, Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων για μια Βιώσιμη Ανάπτυξη στον 21ο αιώνα, ΕΕΔΣΑ, 28/2/2002 – 1/3/02, Αθήνα.
- Λάλας, Δ., Γεωργοπούλου, Ε., Γιδαράκος, Ε., Γκέκας, Ρ., Λαζαρίδη, Α., Μαυρόπουλος, Α., Μοιρασγεντής, Σ., Σελλάς, Ν., 2007. Εκτίμηση των γενικευμένων επιπτώσεων και κόστους διαχείρισης στερεών αποβλήτων, Ινστιτούτο Τοπικής Αυτοδιοίκησης, Τελική έκθεση, Απρίλιος, Αθήνα.

- Μανιός, Θ. και Φουντουλάκης, Μ., 2009. Αναερόβια Επεξεργασία, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης, Εργαστήριο Διαχείρισης Στερεών Υπολειμμάτων & Υγρών Αποβλήτων.
<https://eclass.teicrete.gr/modules/document/index.php?course=TM150&download=/560c830aTvH3/560c8364I9f5/560c8364CRx0/560c8364XAZi.pdf>.
- Μουσιόπουλος, Ν. και Καραγιαννίδης, Α., 2002. Σημειώσεις στο μάθημα Διαχείριση απορριμμάτων, Θεσσαλονίκη: Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Α.Π.Θ.
<https://docplayer.gr/2199537-Siueioseis-sto-uathiua-iaheirisi-aporrimmaton.html>.
- Πανά, Ε. και Τακαβάκογλου, Β., 2021. Βιοαπόβλητα – Εκπαιδευτικό εγχειρίδιο Π.3.1.2 της Πράξης BIOREAL/Interreg IPA CBC Greece-Republic of North Macedonia 2014-2020. Δήμος Θερμαϊκού-Μεσογειακό Εκπαιδευτικό Κέντρο (Μ.Ε.Κ. ΚΔΒΜ2 Α.Ε.). Θέρμη Θεσσαλονίκης. <https://pubhtml5.com/ujsn/cyhh/>.
- Πράσινη Βίβλος για τη διαχείριση των βιολογικών αποβλήτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση, Ευρωπαϊκή Επιτροπή 2008: COM 2008/811. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/HTML/?uri=CELEX:52008DC0811&from=EN>.
- Al bkoor Alrawashdeh, K., Gul, E., Yang, Q., Yang, H. Bartocci, P., Fantozzi, F., 2020. Effect of Heavy Metals in the Performance of Anaerobic Digestion of Olive Mill Waste, Processes 2020, 8, 1146. <https://doi.org/10.3390/pr8091146>.
- Antonopoulos, L.S., Karagiannidis, A., Tsatsarelis, T., Perkoulidis, G., 2013. Applying waste management scenarios in the Peoploponnese region in Greece: A critical analysis in the frame of life cycle assessment. Environ. Sci. Pollut. Res., 20, pp. 2499–2511. <https://doi.org/10.1007/s11356-012-1139-y>.
- Benhelal, E., Zahedi, G., Shamsaei, E., Bahadori, A., 2013. Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry. J. Clean. Prod., Volume 51, pp. 142-161. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.10.049>.
- Di Maria, F. and Micale, C., 2015. Life cycle analysis of incineration compared to anaerobic digestion followed by composting for managing organic waste: The influence of system components for an Italian district. Int. J. Life Cycle Assess., 20, pp. 377–388. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0833-z>.
- Epstein, E., 2011. Industrial Composting: Environmental Engineering and Facilities Management (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b10726>.
- European Commission - Joint Research Centre (JRC) - Institute for Environment and Sustainability, 2010. International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook – General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance. First edition March 2010. EUR 24708, EN. Luxembourg. Publications Office of the European Union; 2010. https://vpt.lrv.lt/uploads/vpt/documents/files/mp/kiti_leidiniai/ILCD_handbook.pdf.

- European Commission - Joint Research Centre (JRC), Institute for Environment and Sustainability, 2012. Characterisation factors of the ILCD Recommended Life Cycle Impact Assessment methods. Database and Supporting Information. First edition. February 2012. EUR 25167. Luxembourg, Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2788/60825>.
- Goedkoop, M., Oele, M., Leijting, J., Ponsioen, T., Meijer E., 2016. Introduction to LCA with SimaPro, Report version: 5.2, PRé. <https://pre-sustainability.com/legacy/download/SimaPro8IntroductionToLCA.pdf>.
- Hauschild, M.Z., Rosenbaum, R.K, Olsen. S.I., 2018. Life Cycle Assessment Theory and Hauschild M, Goedkoop M, Guinee J, Heijungs R, Huijbregts M, Joliet O, Margni M, De Schryver A, Pennington D, Pant R, Sala S, Brandao M, Wolf M. Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context - based on existing environmental impact assessment models and factors (International Reference Life Cycle Data System - ILCD handbook). EUR 24571 EN. Luxembourg (Luxembourg): Publications Office of the European Union; 2011. JRC61049. <http://dx.doi.org/10.2788/33030>.
- IMO, 2021. Preliminary results Impact of Ships' Biofouling on Greenhouse Gas Emissions. <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/MediaCentre/Documents/Biofouling%20report.pdf>.
- Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, 2014. Supporting environmentally sound decisions for bio-waste management: a practical guide to Life Cycle Thinking (LCT) and Life Cycle Assessment (LCA), Manfredi, S.(editor), Pant, R.(editor), Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2788/53692>. Practice, Springer International Publishing, doi: 1007/978-3-319-56475-3.
- Linden, A., Reichel, A, 2020. Bio-waste in Europe: turning challenges into opportunities, European Environment Agency (EEA), Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2800/630938>.
- Morris, J.P., Backeljau, T., Chapelle, G., 2019. Shells from aquaculture: a valuable biomaterial, not a nuisance waste product. Rev. Aquac. 11, 42–57. <https://doi.org/10.1111/raq.12225>.
- Nendissa, J.I., Makaruku, M.H., Tanasale, V.L., Kilkoda, A.K., Taribuka, J., 2021. Analysis of macro nutrient content in biofouling waste organic fertilizer pearl oyster (*Pinctada maxima* L.), IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 883 012038, <http://doi.org/10.1088/1755-1315/883/1/012038>.
- Osorio-López, C., Seco-Reigosa, N., Garrido-Rodríguez, B., Cutillas-Barreiro, L., Arias-Estévez, M., Fernández-Sanjurjo, M.J., 2014. As(V) adsorption on forest and vineyard soils and pyritic material with or without mussel shell: kinetics and fractionation. J. Taiwan Inst. Chem. Eng. 45, 1007–1014. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2013.10.001>.

- Pradel, M., Reverdy, A.L, Richard, M., Chabat, L., 2014. Environmental impacts of sewage sludge, treatment and disposal routes: A Life Cycle Assessment perspective, 4th European Conference on Sludge Management, Izmir, Turkey.8p. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01094562>.
- PRé Sustainability, 2020. Simapro database manual- Methods library, v.4.15. <https://simapro.com/wp-content/uploads/2020/10/DatabaseManualMethods.pdf>.
- Rynk, R., 1992. On-Farm Composting Handbook. 54th ed., Ithaca, NY, NRAES Publications.
- Trautmann, M.N. and Krasny, E.M., 1997. Composting in the classroom, Cornell University. <https://cwmi.css.cornell.edu/compostingintheclassroom.pdf>.
- Turner, A., 2010. Marine pollution from antifouling paint particles, Mar Pollut Bull. Feb; 60(2):159-71, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2009.12.004>.
- Yang, N.; Li, F.; Liu, Y.; Dai, T., Wang, Q.; Zhang, J.; Dai, Z.; Yu, B., 2022. Environmental and Economic Life-Cycle Assessments of Household Food Waste Management Systems: A Comparative Review of Methodology and Research Progress. Sustainability 2022, 14, 7533. <https://doi.org/10.3390/su14137533>.
- Vita, R., Rotter, A., Gaudêncio, P.S., Novoveská, L., Füsün, A., Akslen-Hoel L.K., Diogo, A.M. A., Anne, O., Lauris, A., Miroslava, A., Bełdowska, M., Bełdowski, J., Bhatnagar, A., Bikovens, O., Bisters, V, Carvalho, M.F., Catalá, T.S., Dubnika, A., Erdoğan, A., Ferrans, L., Haznedaroglu, B.Z., Setyobudi, R.H., Graca, B., Grinfelde, I., Hogland, W, Ioannou, E., Jani, Y., Katarzytė, M., Kikionis, S., Klun, K., Kotta, J., Kriipsalu, M., Labidi, J., Lukić, L.B., Martínez-Sanz, M., Oliveira, J., Ozola-Davidane, R., Pilecka-Ulcugaceva, J., Pospiskova, K., Rebours, C. Roussis, V., López-Rubio, A., Safarik, I., Schmieder, F., Stankevica, K., Tamm, T., Tasdemir, D., Torres, C., Varese, G.C., Vincevica-Gaile, Z., Zekker, I., Burlakovs, J., 2021. Valorization of Marine Waste: Use of Industrial By-Products and Beach Wrack Towards the Production of High Added-Value Products, Front. Mar. Sci., Vol. 8, <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.723333>.
- Wiltsee, G., 2000. Lessons learned from existing biomass power plants, Final report, Appel consultants, Inc, Prepared for National Renewable Energy Laboratory, USA. <https://www.nrel.gov/docs/fy00osti/26946.pdf>.
- Zero Waste Scotland, 2015. Sector Study on Beer, Whisky and Fish. [Final Report]. Harwell: Ricardo-AEA Ltd. https://www.zerowastescotland.org.uk/sites/default/files/ZWS645%20Beer%20Whisky%20Fish%20Report_0.pdf.

9. Παράρτημα

Life Cycle Inventory (LCI) - Functional Unit: 1kg of solid biofouling residues

RAW MATERIAL/PROCESS	INVENTORY BALANCE		DATA QUALITY	
	Input/ Description	Quantity	Unit	Source
Marine biofouling residues content	Biomass	1,45E-01	kg	Nendissa et al., 2021
	Carbon, organic, in soil or biomass stock	2,50E-01	kg	Nendissa et al., 2021
	Nitrogen, atmospheric	9,20E-03	kg	Nendissa et al., 2021
	Phosphorus	2,50E-03	kg	Nendissa et al., 2021
	Potassium	1,02E-02	kg	Nendissa et al., 2021
	Energy, gross calorific value, in biomass	5,30E+00	MJ	Haupt, M. et al., 2018
Collection and transportation of collected biofouling residue from Filtration System to landfill Scenario 0 - Landfill	Municipal solid waste {RoW} treatment of, sanitary landfill Conseq, S	1,00E+00	kgr	LCI in ecoinvent
	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro5 {RoW} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 Conseq, S	5,60E+01	kg*km	
Collection and transportation of collected biofouling residue from Filtration System to waste facility for Aerobic Digestion treatment and compost production Scenario 1-Aerobic Treatment/Composting	Biowaste {RoW} treatment of biowaste, industrial composting Conseq, S	1,00E+00	kgr	LCI in Ecoinvent
	Electricity, low voltage {GR} electricity voltage transformation from medium to low voltage Conseq, S	1,18E-02	kWh	Haupt, M. et al., 2018
	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor {GLO} machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor Conseq, S	3,52E-04	h	Haupt, M. et al., 2018
	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro5 {RoW} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 Conseq, S	5,60E+01	kg*km	-
	Output/ Description			
	Compost	5,00E-01	kgr	Haupt, M. et al., 2018
	Wastewater, average {Europe without Switzerland} treatment of wastewater, average, capacity 1E9l/year Conseq, S	2,25E-04	m3	Haupt, M. et al., 2018

		Avoided materials			
		Inorganic nitrogen fertiliser, as N {RoW} market for inorganic nitrogen fertiliser, as N Conseq, S	4,44E-03	kg	Haupt, M. et al., 2018
		Ammonium nitrate phosphate {RoW} market for ammonium nitrate phosphate Conseq, S	5,39E-03	kg	Haupt, M. et al., 2019
		Inorganic potassium fertiliser, as K2O {RoW} market for inorganic potassium fertiliser, as K2O Conseq, S	1,92E-02	kg	Haupt, M. et al., 2020
Collection and transportation of pre-treated biofouling waste to waste facility for Aerobic Digestion treatment and biogas production Scenario 2-Anaerobic Treatment/Biogas production		Biowaste {RoW} treatment of biowaste by anaerobic digestion Conseq, S	1,00E+00	kg	LCI in ecoinvent
		Anaerobic digestion plant, for biowaste {RoW} construction Conseq, S	1,67E-09	p	Haupt, M. et al., 2022
		Electricity, low voltage {GR} electricity voltage transformation from medium to low voltage Conseq, S	2,14E-03	kWh	Haupt, M. et al., 2022
		Heat, central or small-scale, other than natural gas {RER} market group for Conseq, S	2,42E-01	MJ	Haupt, M. et al., 2023
		Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor {GLO} machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor Conseq, S	3,52E-04	h	Haupt, M. et al., 2024
		Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro5 {RoW} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 Conseq, S	5,60E+01	kg*km	-
		Output/ Description			
		Digestate, liquid	3,00E-01	kgr	Haupt, M. et al., 2018
		Digestate, solid	3,20E-01	kgr	Haupt, M. et al., 2019
		Biogas	1,00E-01	m3	Haupt, M. et al., 2020
		Wastewater, average {Europe without Switzerland} treatment of wastewater, average, capacity 1E9l/year Conseq, S	1,60E-04	m3	Haupt, M. et al., 2021
		Avoided materials			
		Inorganic nitrogen fertiliser, as N {RoW} market for inorganic nitrogen fertiliser, as N Conseq, S	2,50E-03	kg	Haupt, M. et al., 2018
		Ammonium nitrate phosphate {RoW} market for ammonium nitrate phosphate Conseq, S	3,00E-03	kg	Haupt, M. et al., 2019
		Inorganic potassium fertiliser, as K2O {RoW} market for inorganic potassium fertiliser, as K2O Conseq, S	1,02E-02	kg	Haupt, M. et al., 2020

Collection and transportation of pre-treated biofouling waste to waste facility for Aerobic Digestion treatment and RDF production Scenario 3-Incineration/SRF production	Natural gas, low pressure {RoW} market for Conseq, S	6,67E-01	m3	Haupt, M. et al., 2025
	Carbon dioxide, in chemical industry {GLO} market for carbon dioxide, in chemical industry Conseq, S	1,46E+00	kg	Haupt, M. et al., 2026
	Biowaste {GLO} treatment of biowaste, municipal incineration Conseq, S	1,00E+00	kg	LCI in ecoinvent
	Electricity, low voltage {GR} electricity voltage transformation from medium to low voltage Conseq, S	1,18E-02	kWh	Haupt, M. et al., 2018 (as for biogas production)
	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor {GLO} machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor Conseq, S	3,52E-04	h	Haupt, M. et al., 2018 (as for biogas production)
	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro5 {RoW} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 Conseq, S	5,60E+01	kg*km	-
	Output/ Description			
	Electricity, for reuse in municipal waste incineration only {RoW} electricity, from municipal waste incineration to generic market for electricity, medium voltage Conseq, S	1,30E-01	kWh	Doka, G., 2009
	Heat, district or industrial, natural gas {Europe without Switzerland} heat production, natural gas, at industrial furnace >100kW Conseq, S	5,10E-01	MJ	Doka, G., 2009
	Avoided materials			
Electricity, medium voltage {RoW} electricity voltage transformation from high to medium voltage Conseq, S	1,00E+00	kWh	Haupt, M. et al., 2018	
Heat, for reuse in municipal waste incineration only {RoW} heat, from municipal waste incineration to generic market for heat district or industrial, other than natural gas Conseq, S	2,42E-01	MJ	Haupt, M. et al., 2018	