



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Χημικών Μηχανικών

Τομέας Σύνθεσης και Ανάπτυξης Βιομηχανικών Διαδικασιών

Εργαστήριο Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας

# Ανάπτυξη και σύγκριση εναλλακτικών διεργασιών αξιοποίησης αποβλήτων τροφίμων

**Δρ. Δημήτριος Μαθιουδάκης**

**Χημικός Μηχανικός ΕΜΠ, MSc, PhD**

**Αθήνα, 2022**



## Ευχαριστίες

Η περίοδος εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής αποτελεί μία ξεχωριστή περίοδο γεμάτη ενδιαφέρουσες αναζητήσεις, δημιουργικότητα αλλά και πολλές προκλήσεις και σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να αποδειχτεί αρκετά επίπονη και περίπλοκη. Αισθάνομαι, λοιπόν, την υποχρέωση να ευχαριστήσω τους ανθρώπους, των οποίων η διαρκής υποστήριξη ήταν καταλυτική για την επιτυχή ολοκλήρωσή της διατριβής μου.

Πρωτίστως, θα ήθελα να εκφράσω τις πιο θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή ΕΜΠ κ. Γεράσιμο Λυμπεράτο. Οι συμβουλές και η επιστημονική του καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διδακτορικής μου διατριβής ήταν ανεκτίμητες ενώ η συνολική του υποστήριξη τα τελευταία χρόνια με βοήθησαν να εξελιχθώ ως επιστήμονας αλλά και ως άνθρωπος.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον καθηγητή ΕΜΠ κ. Απόστολο Βλυσίδη και τον καθηγητή ΕΜΠ κ. Δημήτρη Κέκο των οποίων η συνεισφορά και οι επιστημονικές συμβουλές υπήρξαν πολύτιμες σε όλη τη διάρκεια της διατριβής μου.

Ιδιαίτερα, επίσης, ευχαριστώ τα υπόλοιπα μέλη της επταμελούς εξεταστικής μου επιτροπής: Τον καθηγητή ΕΜΠ κ. Φανούριο Ζαννίκο, την επίκουρη καθηγήτρια ΕΜΠ κ. Διομή Μαμμά, την καθηγήτρια ΕΜΠ κ. Εμμανουέλλα Ρεμουντάκη και τον καθηγητή του Πανεπιστημίου Πατρών κ. Δημήτριο Βαγενά για την τιμή που μου έκαναν να συμμετάσχουν στην κρίση της διδακτορικής μου διατριβής.

Θερμές ευχαριστίες θέλω επίσης να εκφράσω στη Δρ. Κωνσταντίνα Παπαδοπούλου και στο Δρ. Γιώργο Λύτρα, και συνολικά την ερευνητική ομάδα του εργαστηρίου Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας, διότι χωρίς τη βοήθειά τους και την άριστη συνεργασία μας δε θα ήταν εφικτή η εκπόνηση της διατριβής μου.

Δε θα μπορούσα να παραλείψω τους προπτυχιακούς φοιτητές: Βάλια Γκυρτή, Γιώργο Βερυβάκη, Δανάη Φωτίου, Θεοδώρα Δημητρίου, Κυβέλη Μέμου, Κωνσταντίνο Καλογερόπουλο, Κώστα Γαλαζούλα, Πάνο Καραγεώργη και Γεωργία Γιαννακοπούλου, χωρίς την καθημερινή δουλειά των οποίων θα ήταν αδύνατη η διεξαγωγή των πειραμάτων και η παραγωγή του μεγάλου όγκου των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στους δικούς μου ανθρώπους που ήταν πάντα παρόντες για να με βοηθήσουν και να με ενθαρρύνουν. Στη Δέσποινα για τη στήριξη που μου προσέφερε ανιδιοτελώς και απλόχερα σε όλη την προσπάθειά μου και γιατί η συμβολή της ήταν συχνά καθοριστική για να μπορέσω να προχωρήσω και να προσπεράσω τις δυσκολίες που παρουσιάστηκαν. Και φυσικά, πάνω από όλα στον αδελφό μου Αλέξανδρο και τους γονείς μου, Γιώργο και Λίτσα, που αποτέλεσαν και αποτελούν αστείρευτη πηγή έμπνευσης και ενθάρρυνσης και χωρίς αυτούς τίποτα από όσα έχω πετύχει δε θα ήταν δυνατά.

Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από την Ανωτάτη Σχολή Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα. (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202)

## Βιογραφικό Σημείωμα

Εκπαίδευση	
2017-2022	Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Χημικών Μηχανικών Υποψήφιος Διδάκτωρ: Ανάπτυξη και σύγκριση εναλλακτικών σεναρίων αξιοποίηση Οικιακών Ζυμώσιμων Απορριμμάτων
2016-2017	University College London, Dpt of Civil Environmental and Geomatic Engineering MSc Environmental Systems Engineering – Distinction
2010-2016	Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Χημικών Μηχανικών Πτυχίο Χημικού Μηχανικού (Βαθμός 7,3/10)
Επαγγελματική Εμπειρία	
2020-2022	Eunomia Research & Consulting Junior Consultant Υλοποίηση μελετών περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος για τον Δημόσιο και Ιδιωτικό Τομέα με έμφαση στην Κυκλική Οικονομία και την αντιμετώπιση της Κλιματικής Αλλαγής
2020	KKS Advisors Associate Παροχή υπηρεσιών συμβούλου βιώσιμης ανάπτυξης στον Ιδιωτικό Τομέα
2017-2020	Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Χημικών Μηχανικών HORIZON2020 project, Waste4think Ph.D. Researcher
Επιστημονικές Δημοσιεύσεις	
<ol style="list-style-type: none"><li>1. Papanikola, K., Papadopoulou, K., Tsiliyannis, C. et al. Food residue biomass product as an alternative fuel for the cement industry. <i>Environ Sci Pollut Res</i> 26, 35555–35564 (2019). <a href="https://doi.org/10.1007/s11356-019-05318-4">https://doi.org/10.1007/s11356-019-05318-4</a></li><li>2. Michalopoulos, I., Lytras, G.M., Mathioudakis, D. et al. Hydrogen and Methane Production from Food Residue Biomass Product (FORBI). <i>Waste Biomass Valor</i> 11, 1647–1655 (2020). <a href="https://doi.org/10.1007/s12649-018-00550-4">https://doi.org/10.1007/s12649-018-00550-4</a></li><li>3. Lytras, G., Lytras, C., Mathioudakis, D. et al. Food Waste Valorization Based on Anaerobic Digestion. <i>Waste Biomass Valor</i> 12, 1677–1697 (2021). <a href="https://doi.org/10.1007/s12649-020-01108-z">https://doi.org/10.1007/s12649-020-01108-z</a></li><li>4. D. Mathioudakis, I. Michalopoulos, K. Kalogeropoulos, K. Papadopoulou, G. Lyberatos; Anaerobic digestion of dried/shredded food waste in a periodic anaerobic baffled reactor. <i>Water Sci Technol</i> 15 July 2021; 84 (2): 420–430. doi: <a href="https://doi.org/10.2166/wst.2021.230">https://doi.org/10.2166/wst.2021.230</a></li><li>5. Mathioudakis, D., Papadopoulou, K., Lytras, G.M. et al. A Detailed Characterization of Household Municipal Solid Waste. <i>Waste Biomass Valor</i> 12, 2945–2957 (2021). <a href="https://doi.org/10.1007/s12649-020-01260-6">https://doi.org/10.1007/s12649-020-01260-6</a></li><li>6. Mathioudakis D, Karageorgis P, Papadopoulou K, Lyberatos G. LCA and LCC of dried and shredded food waste as an alternative fuel for the cement industry.</li><li>7. <i>Waste Manag Res.</i> 2021 Oct;39(10):1264-1269. doi: 10.1177/0734242X21992416. Epub 2021 Feb 15. PMID: 33586640.</li></ol>	



## Περίληψη

Η αναθεώρηση της σχέσης του ανθρώπου με το φυσικό του περιβάλλον αποτελεί μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις που η ανθρωπότητα αντιμετωπίζει σήμερα. Η ανάπτυξη και εφαρμογή νέων τεχνολογιών, η νομοθέτηση νέων πολιτικών και συνολικά η μεταρρύθμιση των προτύπων παραγωγής και κατανάλωσης προϊόντων αποτελούν πλέον ύψιστης σημασίας κοινωνικές, περιβαλλοντικές και οικονομικές προτεραιότητες. Από την υπερθέρμανση του πλανήτη και την κλιματική αλλαγή έως την απώλεια της βιοποικιλότητας και τη διατάραξη των διαφόρων στοιχειακών κύκλων, οι ανθρωπογενείς επιπτώσεις στο περιβάλλον είναι πλέον ορατές και ο χρόνος που απομένει πριν οι βλάβες γίνουν ανεπανόρθωτες με τραγικές συνέπειες για την επιβίωση του ανθρώπου είναι ελάχιστος.

Από τη βιομηχανική επανάσταση και έως και σήμερα η ευμάρεια των ανθρώπινων κοινωνιών βασίζεται σε ένα γραμμικό μοντέλο παραγωγής, το οποίο διέπεται από το τρίπτυχο “εξόρυξη-κατανάλωση-διάθεση”. Το συγκεκριμένο αναπτυξιακό μοντέλο έχει πλέον αποδειχθεί ότι οδηγεί σε υπερβολική κατανάλωση πόρων πεπερασμένων αποθεμάτων και παραγωγή τεράστιων ποσοτήτων αποβλήτων η διάθεση των οποίων με τη σειρά της οδηγεί με πολλούς και σημαντικούς τρόπους στην περαιτέρω επιβάρυνση του περιβάλλοντος. Το πλέον υποσχόμενο εναλλακτικό μοντέλο ανάπτυξης είναι αυτό της κυκλικής οικονομίας, κατά το οποίο τα υλικά διατηρούνται στις οικονομικές και παραγωγικές δραστηριότητες για πολλούς κύκλους, τους λεγόμενους κλειστούς βρόγχους της κυκλικής οικονομίας.

Η ραγδαία τάση αστικοποίησης που υιοθετήθηκε, ιδιαίτερα στη μεταπολεμική περίοδο, έχει καταστήσει της μεγαλουπόλεις σημαντικά κέντρα παραγωγής προϊόντων, κατανάλωσης πόρων και ενέργειας και παραγωγής αποβλήτων. Ως εκ τούτου, η ανάπτυξη και εφαρμογή εναλλακτικών σχεδιασμών παραγωγής και κατανάλωσης αποτελεί τη μόνη πραγματική λύση για τη βιώσιμη λειτουργία των πόλεων και την αρμονική τους συνύπαρξη με το περιβάλλον.

Σκοπό της παρούσας διδακτορικής διατριβής αποτελεί η μελέτη, ανάπτυξη και αξιολόγηση εναλλακτικών σχεδίων αξιοποίησης του μεγαλύτερου ρεύματος των Αστικών Στερεών Απορριμμάτων, που είναι τα Οικιακά Ζυμώσιμα Απορρίμματα. Συγκεκριμένα, η διατριβή διαρθρώνεται σε τρία επιμέρους τμήματα: (i) την ανάπτυξη και εφαρμογή πρωτοκόλλου για τη μελέτη της ποιοτικής σύστασης των ΑΣΑ του Δήμου Χαλανδρίου (ii) την πειραματική αξιολόγηση εναλλακτικών σχεδίων αξιοποίησης προδιαλεγμένων στην πηγή Οικιακών Ζυμώσιμων Απορριμμάτων με επίκεντρο την ξήρανση και τον τεμαχισμό τους και (iii) την περιβαλλοντική και οικονομική αξιολόγηση των εναλλακτικών σχεδίων μέσω εφαρμογής των εργαλείων της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής και της Ανάλυσης Κόστους Κύκλου Ζωής.

Βάσει των συμπερασμάτων της παρούσας διδακτορικής διατριβής προκύπτει ότι η εκτροπή των Οικιακών Ζυμώσιμων Απορριμμάτων από τους ΧΥΤΑ και η αξιοποίησή τους μπορεί να προσφέρει σημαντικά περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη. Τα βέλτιστα σενάρια, βάσει των πειραματικών δεδομένων και της περιβαλλοντική και οικονομική αξιολόγησης, προκύπτουν αυτά που περιλαμβάνουν την αξιοποίηση των Οικιακών Ζυμώσιμων Απορριμμάτων για παραγωγή ήταν βιομεθανίου είτε βιοϋθανίου και στη συνέχεια την αξιοποίηση του βιοαερίου ως καυσίμου για την κίνηση των απορριμματοφόρων του Δήμου.

## Abstract

One of the most significant challenges that humanity faces is the revision of its relationship with the natural environment. The development and implementation of new technologies, policymaking and transformation of the production and consumption patterns are priorities of the highest environmental, social and economic importance. From the global warming and the climate change to the extreme loss of biodiversity and the change of the elemental cycles, the anthropogenic impacts on the environment are now visible, while the time before those damages become irreparable is not much, with the expected consequences being extreme for the survival and prosperity of the humanity.

Since the industrial revolution, the basis of the human society's prosperity has been the linear production paradigm, which is governed by the model 'extraction-consumption-disposal'. This model has been proved to lead to extreme resource consumption and waste production, leading both to resource depletion and other significant environmental burdens. The most promising alternative model is the Circular Economy, based on which the materials are being reserved in the economic and production activities for several circles, the so-called circular economy loops.

The rapid urbanization adopted, especially in the post-war period, has transformed large cities into significant resource consumption, production and waste generating centres. Hence, the development and implementation of alternative production and consumption systems is the only effective way for the sustainable cities of the future and its co-existence with the natural environment.

The scope of the current PhD thesis is to study, develop and assess alternative scenarios for the valorization of the most significant Municipal Solid Waste Stream: the Household Fermentable Waste. Specifically, the PhD is structured in three sections: (i) the development and implementation of a Municipal Solid Waste characterization protocol for the Municipality of Halandri, (ii) the experimental assessment of alternative valorization pathways for pre-sorted Household Fermentable Waste and (iii) the environmental and economic assessment of the alternative scenarios through Life Cycle Analysis and Life Cycle Costing.

Based on the conclusions of this study it has become apparent that the diversion of the Household Fermentable Waste from the landfills and its valorization can lead to significant environmental and economic benefits. The best-performing alternative scenarios, based on the experimental outcomes and the environmental and economic assessment, are the ones that include the valorization of Household Fermentable Waste for the production of either biomethane or biohythane with the biogas being used as a fuel for the Municipality's waste trucks.



# Πίνακας Περιεχομένων

<b>1.0</b>	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>12</b>
1.1	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΥ ΣΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ .....	12
1.2	ΦΥΣΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ ΚΑΙ ΑΠΟΒΛΗΤΑ .....	15
1.3	ΑΣΤΙΚΑ ΣΤΕΡΕΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ, ΑΣΑ.....	15
1.3.1	<i>Οικιακά Ζυμώσιμα Απορρίμματα – Τροφικά Υπολείμματα</i> .....	16
1.4	ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΑΣΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ .....	18
1.5	ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΟΙΝΟΤΙΚΟ ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ .....	19
1.5.1	<i>Οδηγία Πλαίσιο για τα Απόβλητα – Οδηγία 2008/98/ΕΕ</i> .....	20
1.5.2	<i>Οδηγία 1999/31/ΕΕ περί της υγειονομικής ταφής των αποβλήτων</i> .....	21
1.5.3	<i>Οδικός Χάρτης της ΕΕ για την Κυκλική Οικονομία</i> .....	21
1.5.4	<i>Ελληνικό νομοθετικό πλαίσιο</i> .....	21
1.6	ΚΥΚΛΙΚΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ .....	24
1.7	ΤΟ HORIZON2020 ΕΡΓΟ WASTE4THINK .....	28
<b>2.0</b>	<b>ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ .....</b>	<b>33</b>
2.1	ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΑΣΗΣ ΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ .....	33
2.2	ΦΥΣΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΡΟΦΙΚΩΝ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΩΝ .....	35
2.2.1	<i>Ξήρανση/Τεμαχισμός</i> .....	35
2.2.2	<i>Πελλετοποίηση</i> .....	36
2.3	ΒΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΡΟΦΙΚΩΝ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΩΝ .....	39
2.3.1	<i>Αναερόβια χώνευση</i> .....	39
2.3.2	<i>Κομποστοποίηση</i> .....	58
2.3.3	<i>Παραγωγή βιοαιθανόλης</i> .....	68
2.4	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΒΙΟΑΠΟΙΚΟΔΟΜΗΣΙΜΩΝ ΑΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ.....	70
2.4.1	<i>Ανάλυση Κύκλου Ζωής</i> .....	70
2.4.2	<i>Ανάλυση κύκλου ζωής σε συστήματα διαχείρισης απορριμμάτων</i> .....	78
2.4.3	<i>Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής - LCC</i> .....	86
2.4.4	<i>Ανάλυση κόστους κύκλου ζωής σε συστήματα διαχείρισης απορριμμάτων</i> .....	88
2.4.5	<i>Έλεγχος αξιοπιστίας και εγκυρότητας δεδομένων και αποτελεσμάτων</i> .....	92
<b>3.0</b>	<b>ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΑΣΗΣ ΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ.....</b>	<b>97</b>
3.1	ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ .....	97
3.2	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ .....	97
3.3	ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΠΡΩΤΟΓΕΝΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	102
3.4	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ .....	102
<b>4.0</b>	<b>ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΡΟΦΙΚΩΝ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΩΝ .....</b>	<b>109</b>
4.1	ΞΗΡΑΝΣΗ/ΤΕΜΑΧΙΣΜΟΣ .....	109
4.1.1	<i>Πειραματική Διαδικασία</i> .....	109
4.1.2	<i>Απόδοση Συστήματος</i> .....	110
4.2	ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ .....	111
4.2.1	<i>Αναλυτικές Μέθοδοι</i> .....	111
4.2.2	<i>pH</i> .....	112
4.2.3	<i>Αλκαλικότητα</i> .....	112
4.2.4	<i>Ολικά και πτητικά αιωρούμενα στερεά (TSS - VSS)</i> .....	112
4.2.5	<i>Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (COD)</i> .....	113
4.2.6	<i>Πτητικά Λιπαρά Οξέα (VFA)</i> .....	114
4.2.7	<i>Προσδιορισμός σύστασης βιοαερίου</i> .....	115
4.2.8	<i>Συμβατικό σύστημα αναερόβιας χώνευσης</i> .....	115
4.2.9	<i>Πειραματική Διαδικασία</i> .....	117

4.2.10	Απόδοση Συστήματος.....	120
4.2.11	Ταχύρρυθμο σύστημα αναερόβιας χώνευσης (Περιοδικός Αναερόβιος Αντιδραστήρας με Ανακλαστήρες, PABR).....	125
4.2.12	Πειραματική Διαδικασία.....	125
4.2.13	Απόδοση Συστήματος PABR.....	129
4.2.14	Εργαστηριακής κλίμακας διβάθμιο σύστημα αναερόβιας χώνευσης.....	136
4.2.15	Πειραματική διαδικασία.....	136
4.2.16	Απόδοση Συστήματος.....	138
4.2.17	Ημι-βιομηχανικής κλίμακας διβάθμιο σύστημα αναερόβιας χώνευσης.....	141
4.2.18	Πειραματική Διαδικασία.....	141
4.2.19	Απόδοση Συστήματος.....	143
4.2.20	Εξευγενισμός Υθανίου.....	145
4.3	ΚΟΜΠΟΣΤΟΠΟΙΗΣΗ.....	148
4.3.1	Εργαστηριακής κλίμακας κομποστοποίηση.....	149
4.3.2	Ημι-βιομηχανικής κλίμακας κομποστοποίηση.....	152
4.4	ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΠΕΛΛΕΤΟΠΟΙΗΣΗ.....	153
4.5	ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΑΙΘΑΝΟΛΗΣ.....	156
<b>5.0</b>	<b>ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΣΕΝΑΡΙΩΝ.....</b>	<b>159</b>
5.1	ΑΝΑΠΤΥΞΗ & ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΟΡΙΩΝ ΣΕΝΑΡΙΩΝ.....	159
5.2	ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ.....	159
5.3	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ: ΑΠΟΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	160
5.3.1	Σενάριο 0: Υφιστάμενη κατάσταση.....	160
5.3.2	Σενάριο 0.1: Διαλογή στην πηγή τροφικών υπολειμμάτων και κομποστοποίηση.....	161
5.3.3	Σενάριο 1.1: Παραγωγή συμπιεσμένου βιομεθανίου και συγκομποστοποίηση αναερόβιας εκροής με κλαδέματα.....	162
5.3.4	Σενάριο 1.2: Παραγωγή υθανίου και συγκομποστοποίηση με κλαδέματα.....	164
5.3.5	Σενάριο 2: Συγκομποστοποίηση FORBI και κλαδεμάτων.....	166
5.3.6	Σενάριο 3: Ενζυματική υδρόλυση FORBI προς παραγωγή βιοαιθανόλης.....	167
5.3.7	Σενάριο 4: Μηχανική Πελλετοποίηση FORBI.....	169
5.4	ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ.....	170
5.5	ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ.....	170
5.5.1	Σενάριο 0.....	170
5.5.2	Σενάριο 0.1.....	172
5.5.3	Σενάριο 1.1.....	173
5.5.4	Σενάριο 1.2.....	174
5.5.5	Σενάριο 2.....	176
5.5.6	Σενάριο 3.....	177
5.5.7	Σενάριο 4.....	178
5.6	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ.....	179
5.6.1	Κλιματική Αλλαγή.....	180
5.6.2	Καταστροφή του Όζοντος.....	180
5.6.3	Ανθρώπινη Τοξικότητα.....	181
5.6.4	Αιωρούμενα Στερεά.....	182
5.6.5	Κόστος.....	183
5.7	ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	184
<b>6.0</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>187</b>
<b>7.0</b>	<b>ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ.....</b>	<b>191</b>
<b>8.0</b>	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>193</b>
<b>9.0</b>	<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....</b>	<b>205</b>
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1:	ΠΡΩΤΟΓΕΝΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΥΣΤΑΣΗΣ ΑΣΑ ΔΗΜΟΥ ΧΑΛΑΝΔΡΙΟΥ.....	206



# Διαγράμματα

Διάγραμμα 1-1: Κατηγοριοποίηση σπατάλης τροφίμων

Διάγραμμα 1-2: Εθνική σύσταση ΑΣΑ βάσει του ΕΣΔΑ 2020-2030

Διάγραμμα 1-3: Διαχείριση ΑΣΑ στην Ελλάδα, δεκαετής τάση

Διάγραμμα 2-1: Στάδια αναερόβιας χώνευσης

Διάγραμμα 2-2: Αναμενόμενη σύσταση βιοαερίου ανάλογα με την οξειδωτική κατάσταση του άνθρακα

Διάγραμμα 2-3: Μέθοδοι εξευγενισμού βιοαερίου

Διάγραμμα 2-4: Κατηγοριοποίηση τεχνικών αξιοποίησης χωνεμένου υπολείμματος

Διάγραμμα 2-5: Κατανάλωση λιπασμάτων, % της συνολικής παραγωγής, [71]

Διάγραμμα 2-6: Αναερόβιος χωνευτήρας πλήρους ανάμιξης

Διάγραμμα 2-7: Συμβατική αναερόβια χώνευση δύο σταδίων

Διάγραμμα 2-8: Ο αντιδραστήρας UASB και τα διάφορα μέρη του

Διάγραμμα 2-9: Αντιδραστήρας ABR

Διάγραμμα 2-10: Οι φάσεις της κομποστοποίησης και οι κυριότερες ομάδες μικροοργανισμών σε κάθε φάση [90]

Διάγραμμα 3-1: Στατιστική ανάλυση εποχιακής διακύμανσης σύστασης ΑΣΑ, Αγία Βαρβάρα, Δήμος Χαλανδρίου

Διάγραμμα 3-2: Στατιστική ανάλυση γεωγραφικής διακύμανσης σύστασης ΑΣΑ, Δήμος Χαλανδρίου

Διάγραμμα 3-3: Ύψος αστοχίας ανά ρεύμα ΑΣΑ

Διάγραμμα 3-4: Βαθμός διαλογής στην πηγή για τα διάφορα ρεύματα ΑΣΑ

Διάγραμμα 4-1: Απόδοση ξηραντήρα ως προς τη μείωση της μάζας του εισερχόμενου ρεύματος οικιακών ζυμώσιμων απορριμμάτων.

Διάγραμμα 4-2: Μείωση μάζας και κατανάλωση ενέργειας κατά τη διάρκεια ενός κύκλου ξήρανσης/τεμαχισμού τροφικών υπολειμμάτων

Διάγραμμα 4-3: Ενδεικτική καμπύλη βαθμονόμησης φασματοφωτομέτρου για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης COD

Διάγραμμα 4-4: Συμβατικό σύστημα αναερόβιας χώνευσης, pH εκροής κατά το σύνολο της πειραματικής διαδικασίας

Διάγραμμα 4-5: Συμβατικό σύστημα αναερόβιας χώνευσης, συγκέντρωση ολικών αιωρούμενων στερεών (TSS) στην εκροή

Διάγραμμα 4-6: Συμβατικό σύστημα αναερόβιας χώνευσης, συγκέντρωση πτητικών αιωρούμενων στερεών (VSS) στην εκροή

Διάγραμμα 4-7: Συμβατικό σύστημα αναερόβιας χώνευσης, συγκέντρωση ολικού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (tCOD) στην εκροή.

Διάγραμμα 4-8: Συμβατικό σύστημα αναερόβιας χώνευσης, συγκέντρωση διαλυτού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (sCOD) στην εκροή.

Διάγραμμα 4-9: Πτητικά λιπαρά οξέα (VFA) στην εκροή.

Διάγραμμα 4-10: Συμβατικό σύστημα αναερόβιας χώνευσης, Παραγωγικότητα βιοαερίου.

Διάγραμμα 4-11: Ταχύρρυθμο σύστημα αναερόβιας χώνευσης, pH διαμερισμάτων αντιδραστήρα κατά το σύνολο της πειραματικής διαδικασίας

Διάγραμμα 4-12: Ταχύρρυθμο σύστημα αναερόβιας χώνευσης, ολικό Χημικώς Απαιτούμενο Οξυγόνο διαμερισμάτων αντιδραστήρα κατά το σύνολο της πειραματικής διαδικασίας

Διάγραμμα 4-13: Ταχύρρυθμο σύστημα αναερόβιας χώνευσης, διαλυτό Χημικώς Απαιτούμενο Οξυγόνο διαμερισμάτων αντιδραστήρα κατά το σύνολο της πειραματικής διαδικασίας

Διάγραμμα 4-14: Ταχύρρυθμο σύστημα αναερόβιας χώνευσης, Ολικά Αιωρούμενα Στερεά διαμερισμάτων αντιδραστήρα κατά το σύνολο της πειραματικής διαδικασίας

Διάγραμμα 4-15: Ταχύρρυθμο σύστημα αναερόβιας χώνευσης, Πτητικά Αιωρούμενα Στερεά διαμερισμάτων αντιδραστήρα κατά το σύνολο της πειραματικής διαδικασίας

Διάγραμμα 4-16: Ταχύρρυθμο σύστημα αναερόβιας χώνευσης, Πτητικά Λιπαρά Οξέα διαμερισμάτων αντιδραστήρα κατά το σύνολο της πειραματικής διαδικασίας

Διάγραμμα 4-17: Ταχύρρυθμο σύστημα αναερόβιας χώνευσης, Παραγωγικότητα βιοαερίου και βιομεθανίου

Διάγραμμα 4-18: Εργαστηριακής κλίμακας διβάθμιο σύστημα αναερόβιας χώνευσης, pH

Διάγραμμα 4-19: Εργαστηριακής κλίμακας διβάθμιο σύστημα αναερόβιας χώνευσης, tCOD & sCOD

Διάγραμμα 4-20: Εργαστηριακής κλίμακας διβάθμιο σύστημα αναερόβιας χώνευσης, TSS & VSS

Διάγραμμα 4-21: Εργαστηριακής κλίμακας διβάθμιο σύστημα αναερόβιας χώνευσης, VFAs

Διάγραμμα 4-22: Εργαστηριακής κλίμακας διβάθμιο σύστημα αναερόβιας χώνευσης, Παραγωγικότητα βιοαερίου

Διάγραμμα 4-23: Ημι-βιομηχανικής κλίμακας διβάθμιο σύστημα αναερόβιας χώνευσης, pH

Διάγραμμα 4-24: Ημι-βιομηχανικής κλίμακας διβάθμιο σύστημα αναερόβιας χώνευσης, tCOD & sCOD

Διάγραμμα 4-25: Ημι-βιομηχανικής κλίμακας διβάθμιο σύστημα αναερόβιας χώνευσης, TSS & VSS

Διάγραμμα 4-26: Ημι-βιομηχανικής κλίμακας διβάθμιο σύστημα αναερόβιας χώνευσης, VFAs

Διάγραμμα 4-27: Ημι-βιομηχανικής κλίμακας διβάθμιο σύστημα αναερόβιας χώνευσης, Παραγωγικότητα Βιοαερίου

Διάγραμμα 4-28: Εργαστηριακής κλίμακας κομποστοποίηση, θερμοκρασιακό προφίλ διεργασίας

Διάγραμμα 4-29: Πιλοτικής κλίμακας κομποστοποίηση, θερμοκρασιακό προφίλ διεργασίας σε συνάρτηση με την αύξηση της υγρασίας

Διάγραμμα 5-1: Σενάριο 0, Αποτίμηση επιπτώσεων AKZ και AKKZ

Διάγραμμα 5-2: Σενάριο 0.1, Αποτίμηση επιπτώσεων AKZ και AKKZ

Διάγραμμα 5-3: Σενάριο 1.1, Αποτίμηση επιπτώσεων ΑΚΖ και ΑΚΚΖ

Διάγραμμα 5-4: Σενάριο 1.2, Αποτίμηση επιπτώσεων ΑΚΖ και ΑΚΚΖ

Διάγραμμα 5-5: Σενάριο 2, Αποτίμηση επιπτώσεων ΑΚΖ και ΑΚΚΖ

Διάγραμμα 5-6: Σενάριο 3, Αποτίμηση επιπτώσεων ΑΚΖ και ΑΚΚΖ

Διάγραμμα 5-7: Σενάριο 4, Αποτίμηση επιπτώσεων ΑΚΖ και ΑΚΚΖ

Διάγραμμα 5-8: Συγκριτική ανάλυση επιπτώσεων για την κατηγορία “Κλιματική Αλλαγή”

Διάγραμμα 5-9: Συγκριτική ανάλυση επιπτώσεων για την κατηγορία “Καταστροφή του Όζοντος”

Διάγραμμα 5-10: Συγκριτική ανάλυση επιπτώσεων για την κατηγορία “Ανθρώπινη Τοξικότητα”

Διάγραμμα 5-11: Συγκριτική ανάλυση επιπτώσεων για την κατηγορία “Αιωρούμενα Στερεά”

Διάγραμμα 5-12: Συγκριτική ανάλυση επιπτώσεων για το Κόστος Κύκλου Ζωής

# Εικόνες

Εικόνα 1-1: Πλανητικά όρια

Εικόνα 1-2: Στόχοι Ευρωπαϊκής νομοθεσίας για τα απόβλητα

Εικόνα 1-3: Πυραμίδα ιεράρχησης των επιλογών διαχείρισης αποβλήτων

Εικόνα 1-4: Γραμμική και κυκλική οικονομία

Εικόνα 1-5: Διάγραμμα "πεταλούδα" κυκλικής οικονομίας, Ellen MacArthur Foundation

Εικόνα 1-6: Πρόγραμμα Κυκλικής Διαχείρισης Οργανικών Απορριμμάτων Δήμου Χαλανδρίου

Εικόνα 1-7: Waste4think, παρουσίαση ενός υποδείγματος κλειστού βρόγχου κυκλικής οικονομίας

Εικόνα 1-8: Υφιστάμενη κατάσταση διαχείρισης ΑΣΑ Δήμου Χαλανδρίου

Εικόνα 1-9: Το υπόδειγμα του Χαλανδρίου για τη διαχείριση των ΑΣΑ

Εικόνα 2-1: (α) τρισδιάστατη απεικόνιση εσωτερικού του PABR, (β) κάτοψη διαμερισμάτων και βανών του PABR, (γ) κυκλική εναλλαγή διαμερισμάτων τροφοδοσίας και εκροής

Εικόνα 2-2: Η διεργασία της αερόβιας κομποστοποίησης [89]

Εικόνα 2-3: Σύστημα μηχανικής ανάδευσης σειραδίων [110]

Εικόνα 2-4 Σύστημα αεριζόμενων στατικών σωρών

Εικόνα 2-5 Κομποστοποιητής περιστρεφόμενου τυμπάνου

Εικόνα 2-6: Σχηματική απεικόνιση του κύκλου ζωής ενός προϊόντος

Εικόνα 2-7: Εξέλιξη της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής

Εικόνα 2-8: Μέθοδος υλοποίησης Ανάλυσης Κύκλου Ζωής

Εικόνα 2-9: Οριοθέτηση υπό μελέτη συστήματος και διάγραμμα εισροών/εκροών

Εικόνα 2-10: Διαγραμματική απεικόνιση τυπικού συστήματος διαχείρισης ΑΣΑ

Εικόνα 2-11: Απαιτούμενα δεδομένα για τη μοντελοποίηση του σταδίου συλλογής και μεταφοράς

Εικόνα 2-12: Οι τρεις τύποι ανάλυσης κόστους κύκλου ζωής

Εικόνα 2-13: Ταξινόμηση αντικειμένων κόστους σε συστήματα διαχείρισης απορριμμάτων

Εικόνα 2-14: Pedigree matrix

Εικόνα 4-1: Ξηραντήρας/τεμαχιστής GAIA GC-300

Εικόνα 4-2: Αρχή λειτουργίας ξηραντήρα

Εικόνα 4-3: FORBI, το ομογενοποιημένο προϊόν της διεργασίας ξήρανσης/τεμαχισμού των τροφικών υπολειμμάτων

Εικόνα 4-4: Συμβατικό σύστημα αναερόβιας χώνευσης, τύπου CSTR

Εικόνα 4-5: Λουτρό παροχής θερμού νερού για τη διατήρηση μεσόφιλων συνθηκών

Εικόνα 4-6: Παγολεκάνη συντήρησης υποστρώματος τροφοδοσίας αναερόβιας χώνευσης

Εικόνα 4-7: Κλικογράφος, σύστημα μέτρησης παραγόμενης ποσότητας βιοαερίου

Εικόνα 4-8: Αντιδραστήρας PABR πιλοτική κλίμακας, Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ

Εικόνα 4-9: Ταχύρρυθμο σύστημα αναερόβιας χώνευσης PABR, ψυγείο αποθήκευσης τροφοδοσίας και περισταλτική αντλία

Εικόνα 4-10: Πίνακας ελέγχου (PLC) ταχύρρυθμου συστήματος αναερόβιας χώνευσης PABR

Εικόνα 4-11: Διάγραμμα ροής. Εργαστηριακής κλίμακας διβάθμιο σύστημα αναερόβιας χώνευσης

Εικόνα 4-12: Πίνακας ελέγχου (PLC) πειραματικής κλίμακας διβάθμιου συστήματος συστήματος αναερόβιας χώνευσης

Εικόνα 4-13 Ημι-βιομηχανική μονάδα διβάθμιου συστήματος αναερόβιας χώνευσης

Εικόνα 4-14: Στήλη απορρόφησης διοξειδίου του άνθρακα και θειούχων ενώσεων

Εικόνα 4-15: Κυλινδρικό αεριοφυλάκιο με σύστημα πλωτής οροφής, χωρητικότητας 2 m<sup>3</sup>

Εικόνα 4-16: (α) Στήλη αφύγρανσης του βιοαερίου και (β) συμπιεστής βιοαερίου

Εικόνα 4-17: (α) Δοχεία αποθήκευσης συμπιεσμένου υθανίου και (β) σταθμός τροφοδοσίας απορριμματοφόρων με βιοαέριο

Εικόνα 4-18: Οικιακός κομποστοποιητής Garantia (280 L)

Εικόνα 4-19: Οπτική απεικόνιση υποστρώματος κατά τη διάρκεια της θερμοφιλής φάσης (αριστερά) και κατά τη διάρκεια της φάσης ωρίμανσης του κόμποστ (δεξιά)

Εικόνα 4-20: Τελικό προϊόν διεργασίας κομποστοποίησης εργαστηριακής κλίμακας

Εικόνα 4-21: Κομποστοποίηση ημι-βιομηχανικής κλίμακας σε σειράδι

Εικόνα 4-22: Πελλετοποιητής MKL225

Εικόνα 4-23: Μήτρα και περιστρεφόμενοι κύλινδροι, πελλετοποιητής τύπου μήτρας

Εικόνα 4-24: Pellets από FORBI

Εικόνα 4-25: Σύστημα ενζυματικής παραγωγής βιοαιθανόλης από FORBI

Εικόνα 5-1: Σενάριο 0, Όρια συστήματος

Εικόνα 5-2: Σενάριο 0.1, Όρια συστήματος

Εικόνα 5-3: Σενάριο 1.1, Όρια συστήματος

Εικόνα 5-4: Σενάριο 1.2, Όρια συστήματος

Εικόνα 5-5: Σενάριο 2, Όρια συστήματος

Εικόνα 5-6: Σενάριο 3, Όρια συστήματος

Εικόνα 5-7: Σενάριο 4, Όρια συστήματος



# Πίνακες

Πίνακας 1-1: Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά ΤΥ

Πίνακας 1-2: ΕΣΔΑ 2020-2030, Σενάρια διαχείρισης ΑΣΑ μέσω ανάκτησης ενέργειας/αποτέφρωσης

Πίνακας 1-3: Στόχοι προετοιμασίας για επαναχρησιμοποίηση και ανακύκλωσης, ΕΣΔΑ 2020-2030

Πίνακας 1-4: Στόχοι και μέτρα ΕΣΔΑ 2020-2030

Πίνακας 1-5: Προβλέψεις Νόμου 4819/2021

Πίνακας 2-1: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μεθόδων δειγματοληψίας ΑΣΑ

Πίνακας 2-2: Τυπική σύσταση βιοαερίου

Πίνακας 2-3: Θερμικά εύρη και χαρακτηριστικοί χρόνοι παραμονής

Πίνακας 2-4: Παράγοντες υπολογισμού βασικής αβεβαιότητας

Πίνακας 2-5: Παράγοντες υπολογισμού πρόσθετης αβεβαιότητας

Πίνακας 3-1: Κατηγοριοποίηση ΑΣΑ και συντομογραφίες

Πίνακας 3-2: Κατηγοριοποίηση ΑΣΑ κατά Waste4think

Πίνακας 3-3: Ανάλυση Σύστασης ΑΣΑ Δήμου Χαλανδρίου, Στοιχεία κύκλων δειγματοληψίας

Πίνακας 4-1: Εργοστασιακές προδιαγραφές ξηραντήρα/τεμαχιστής GAIA GC-300

Πίνακας 4-2: Χαρακτηρισμός ενεργού ιλύος, η οποία χρησιμοποιήθηκε ως καλλιέργεια για την εκκίνηση του συμβατικού συστήματος αναερόβιας χώνευσης

Πίνακας 4-3: Κατανομή και χαρακτηριστικά πειραματικών φάσεων της συμβατικής διεργασίας αναερόβιας χώνευσης αιωρήματος FORBI

Πίνακας 4-4: Συμβατικό σύστημα αναερόβιας χώνευσης, ποσοστιαία μείωση sCOD ανά φάση λειτουργίας

Πίνακας 4-5: Κατανομή και χαρακτηριστικά πειραματικών φάσεων του ταχύρρυθμου συστήματος αναερόβιας χώνευσης αιωρήματος FORBI

Πίνακας 4-6: Απόδοση ταχύρρυθμου συστήματος αναερόβιας χώνευσης, PABR, κατά τις 9 πειραματικές φάσεις

Πίνακας 4-7: Λειτουργικές παράμετροι διεργασίας, εργαστηριακής κλίμακας διβάθμιο σύστημα αναερόβιας χώνευσης

Πίνακας 4-8: Παραγωγικότητα ΗΥΤΗΑΝΕ από FORBI, εργαστηριακής κλίμακας διβάθμιο σύστημα αναερόβιας χώνευσης

Πίνακας 4-9: Λειτουργικές παράμετροι διεργασίας, ημι-βιομηχανικής κλίμακας διβάθμιο σύστημα αναερόβιας χώνευσης

Πίνακας 4-10: Τεχνικά χαρακτηριστικά πελλετοποιητή τύπου MKL225

Πίνακας 4-11: Παρουσίαση λειτουργικών συνθηκών διεργασίας ενζυματικής παραγωγής βιοαιθανόλης

Πίνακας 5-1: Σενάριο 0, Εισροές/Εκροές συστήματος

Πίνακας 5-2: Σενάριο 0.1, Εισροές/Εκροές συστήματος

Πίνακας 5-3: Σενάριο 1.1, Εισροές/εκροές συστήματος

Πίνακας 5-4: Σενάριο 1.2, Εισροές/εκροές συστήματος

Πίνακας 5-5: Σενάριο 2, Εισροές/Εκροές Συστήματος

Πίνακας 5-6: Σενάριο 3, Εισροές/Εκροές Συστήματος

Πίνακας 5-7: Σενάριο 4, Εισροές/Εκροές Συστήματος

Πίνακας 5-8: Σενάριο 0, Αποτίμηση επιπτώσεων ΑΚΖ και ΑΚΚΖ

Πίνακας 5-9: Σενάριο 0.1, Αποτίμηση επιπτώσεων ΑΚΖ και ΑΚΚΖ

Πίνακας 5-10: Σενάριο 1.1, Αποτίμηση επιπτώσεων ΑΚΖ και ΑΚΚΖ

Πίνακας 5-11: Σενάριο 1.2, Αποτίμηση επιπτώσεων ΑΚΖ και ΑΚΚΖ

Πίνακας 5-12: Σενάριο 2, Αποτίμηση επιπτώσεων ΑΚΖ και ΑΚΚΖ

Πίνακας 5-13: Σενάριο 3, Αποτίμηση επιπτώσεων ΑΚΖ και ΑΚΚΖ

Πίνακας 5-14: Σενάριο 4, Αποτίμηση επιπτώσεων ΑΚΖ και ΑΚΚΖ

Π1. 1: Ανάλυση σύστασης ΑΣΑ Δήμου Χαλανδρίου, 1<sup>ος</sup> κύκλος δειγματοληψίας, πρωτογενή δεδομένα

Π1. 2: Ανάλυση σύστασης ΑΣΑ Δήμου Χαλανδρίου, 2<sup>ος</sup> κύκλος δειγματοληψίας, πρωτογενή δεδομένα

Π1. 3: Ανάλυση σύστασης ΑΣΑ Δήμου Χαλανδρίου, 3<sup>ος</sup> κύκλος δειγματοληψίας, πρωτογενή δεδομένα

Π1. 4: Ανάλυση σύστασης ΑΣΑ Δήμου Χαλανδρίου, 3<sup>ος</sup> κύκλος δειγματοληψίας, πρωτογενή δεδομένα



# 1.0 Εισαγωγή

## 1.1 Επίδραση του ανθρώπου στο φυσικό περιβάλλον

Από τη εποχή της βιομηχανικής επανάστασης και έως σήμερα, οι δραστηριότητες του ανθρώπου έχουν αρχίσει σταδιακά να αποτελούν έναν εκ των βασικότερων παραγόντων επίδρασης στο φυσικό περιβάλλον τα οικοσυστήματα της Γης. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτής της τάσης είναι η ανθρωπογενής κλιματική αλλαγή και οι σημαντικές επιπτώσεις στη βιοποικιλότητα. Η εποχή αυτή προτείνεται (αν και έως τώρα δεν έχει επίσημα οριστεί) να ονομαστεί ανθρωπόκαινος εποχή (ή ανθρωπόκαινο) [1], [2].

Μια πρώιμη ιδέα για την ανθρωπόκαινο εποχή ήταν η Νοόσφαιρα του Βλαντίμιρ Βερνάντσκι, ο οποίος το 1938 έγραψε για την «επιστημονική σκέψη ως γεωλογική δύναμη». Οι επιστήμονες στη Σοβιετική Ένωση φαίνεται να έχουν χρησιμοποιήσει τον όρο "ανθρωπόκαινο" ήδη από τη δεκαετία του 1960 για να αναφερθούν στην τεταρτογενή περίοδο, την πιο πρόσφατη γεωλογική περίοδο. Ο οικολόγος Γιουτζίν Στέρμερ στη συνέχεια χρησιμοποίησε τον όρο "ανθρωπόκαινο" με διαφορετική έννοια τη δεκαετία του 1980 και ο όρος διαδόθηκε ευρέως το 2000 από τον χημικό ατμόσφαιρας Πάουλ Κρετσέντο, που θεωρεί την επίδραση της ανθρώπινης συμπεριφοράς στην ατμόσφαιρα της Γης τους τελευταίους αιώνες τόσο σημαντικούς ώστε να αποτελούν μια νέα γεωλογική εποχή [3], [4].

Ένας άλλο περιγραφικός και πιο στοχευμένος όρος δίνεται από τον Μάικλ Σάμγουιζ στο άρθρο του στο περιοδικό *Journal of Insect Conservation* με τίτλο "Μετατόπιση της πανίδας σε ξένες περιοχές: Η άφιξη της ομογενόκαινου". Ο όρος "ομογενόκαινο" χρησιμοποιείται για να καθορίσει την τρέχουσα γεωλογική εποχή, κατά την οποία η βιοποικιλότητα μειώνεται και η βιογεωγραφία και τα οικοσυστήματα σε όλον τον κόσμο φαίνονται όλο και πιο ίδια μεταξύ τους, κυρίως λόγω των χωροκατακτητικών ειδών που έχουν εξαπλωθεί σε όλον τον κόσμο, είτε εκούσια (καλλιέργειες και κτηνοτροφία) είτε ακούσια. Βασικότερος χωροκατακτητικός οργανισμός θεωρείται ο άνθρωπος.

Οι σημαντικότερες επιπτώσεις του ανθρωπόκαινου παρατηρούνται στους εξής τομείς:

### 1. Βιοποικιλότητα:

Ο αντίκτυπος της ανθρώπινης δραστηριότητας στη βιοποικιλότητα αποτελεί ένα από τα κυριότερα χαρακτηριστικά του ανθρωπόκαινου. Μάλιστα, η ανθρωπότητα φαίνεται να είναι υπεύθυνη για αυτό που συχνά ονομάζεται η έκτη μεγάλη εξαφάνιση της Γης. Η παγκόσμια επιστημονική κοινότητα συμφωνεί ότι οι ανθρώπινες δραστηριότητες έχουν επιταχύνει σημαντικά και εξακολουθούν να επιταχύνουν το ρυθμό εξαφάνισης ειδών [5].

### 2. Βιογεωγραφία:

Οι μόνιμες αλλαγές στην κατανομή των οργανισμών με ανθρώπινη παρέμβαση θα γίνουν ορατές στο γεωλογικό αρχείο. Οι ερευνητές έχουν τεκμηριώσει τη μετακίνηση πολλών ειδών σε περιοχές που προηγουμένως ήταν πολύ κρύες για αυτά, συχνά με ρυθμούς ταχύτερους από τους αρχικά αναμενόμενους. Αυτό συνέβη εν μέρει ως αποτέλεσμα της αλλαγής του κλίματος, αλλά και ως αποτέλεσμα της γεωργίας και της αλιείας, και στην τυχαία εισαγωγή μη ιθαγενών ειδών σε νέες περιοχές μέσω των παγκόσμιων ταξιδιών. Το οικοσύστημα της Μαύρης Θάλασσας ενδέχεται να έχει αλλάξει τα τελευταία 2000 χρόνια ως αποτέλεσμα της εισροής θρεπτικών ουσιών και διοξειδίου του πυριτίου από διαβρωμένες αποψιλωμένες περιοχές κατά μήκος του ποταμού Δούναβη.

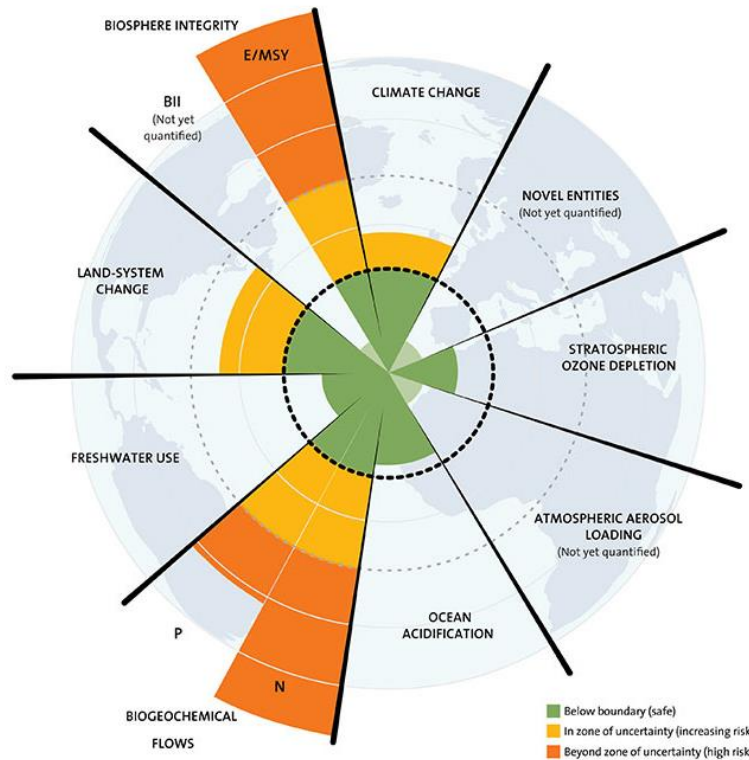
Οι ερευνητές διαπίστωσαν ότι η αύξηση του ανθρώπινου πληθυσμού και η επέκταση της ανθρώπινης δραστηριότητας είχε ως αποτέλεσμα πολλά είδη ζώων που είναι συνήθως ενεργά κατά τη διάρκεια της ημέρας, όπως οι ελέφαντες, οι τίγρεις και οι κάπροι, να γίνουν νυχτερινά για να αποφευχθεί η επαφή με τους ανθρώπους [6][7].

### 3. Κλίμα

Ένα γεωλογικό σύμπτωμα που προκύπτει από την ανθρώπινη δραστηριότητα είναι η αύξηση του ατμοσφαιρικού διοξειδίου του άνθρακα. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων εκατομμυρίων ετών, οι φυσικές διεργασίες προκάλεσαν συγκεντρώσεις διοξειδίου περίπου 100 ppm (από 180 ppm έως 280 ppm). Το 2013, οι καθαρές ανθρωπογενείς εκπομπές διοξειδίου έχουν σχεδόν διπλασιάσει τη συγκέντρωση: Από 280 ppm (ολόκαινος ή προβιομηχανική ισορροπία) σε περίπου 400 ppm, και τα δεδομένα παρακολούθησης κατά το 2015 εμφάνισαν μια ανοδική τάση πάνω από τα 400 ppm. Η επίδραση στο κλιματικό σύστημα της Γης είναι ιδιαίτερα σημαντική επειδή συμβαίνει πολύ ταχύτερα, και σε μεγαλύτερο βαθμό, από τις προηγούμενες, παρόμοιες αλλαγές. Το μεγαλύτερο μέρος αυτής της αύξησης οφείλεται στην καύση ορυκτών καυσίμων όπως ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, αν και μικρότερες ποσότητες προκύπτουν από την παραγωγή τσιμέντου και από αλλαγές στη χρήση της γης (όπως η αποψίλωση των δασών), αλλά και συνολικά στο σύστημα παραγωγής και κατανάλωσης προϊόντων που έχει εφαρμόσει η μεταβιομηχανική ανθρώπινη κοινωνία.

Μία εναλλακτική προσέγγιση για την περιγραφή της κατάστασης του περιβάλλοντος και της επίδρασης της ανθρώπινης δραστηριότητας σε αυτό αποτελεί η ιδέα των "πλανητικών ορίων" (planetary boundaries). Μέσω των πλανητικών ορίων αναγνωρίζονται εννέα παγκόσμιες προτεραιότητες σχετιζόμενες με την αμφίδρομη σχέση του ανθρώπου με το περιβάλλον και τις αλλαγές που η ανθρώπινη δραστηριότητα προκαλεί σε αυτό [8]. Διαχρονικά, μελέτες έχουν αποδείξει ότι οι συγκεκριμένες εννέα πλανητικές διεργασίες και συστήματα ρυθμίζουν τη σταθερότητα και την ανθεκτικότητα της Γης. Συγκεκριμένα, οι αλληλεπιδράσεις της γης, των ωκεανών, της ατμόσφαιρας και της ζωής παρέχουν τις κατάλληλες συνθήκες πάνω στις οποίες βασίζεται η ευημερία των ανθρώπινων και ζωικών κοινωνιών.

Σήμερα, τέσσερα από τα εννέα πλανητικά όρια έχουν ξεπεραστεί, ως αποτέλεσμα της ανθρώπινης δραστηριότητας: το κλίμα, η ακεραιότητα της βιόσφαιρας, οι χρήσεις της γης, και οι βιοχημικοί κύκλοι, ενώ δύο εξ' αυτών αποτελούν "βασικά όρια": το κλίμα και η ακεραιότητα της βιόσφαιρας, καθώς σημαντικές μεταβολές σε αυτά τα συστήματα προβλέπεται ότι θα οδηγήσουν τη Γη σε μία νέα, εντελώς διαφορετική και πιθανότατα όχι φιλική προς τον άνθρωπο κατάσταση.



**Εικόνα 1-1: Πλανητικά όρια**

Η πιο πρόσφατη προσπάθεια καθορισμού των πλανητικών ορίων έγινε το 2015 από τους Steffen et al. και αποτυπώνεται στην Εικόνα 1-1, δείχνοντας ακριβώς την επίδραση του ανθρωπόκainου στο κλίμα, τη βιοποικιλότητα και του βιογεωχημικούς κύκλους [9].

Οι μεταβολές αυτές αν και ακόμα μελετώνται έχουν αρχίσει ήδη να αποτυπώνονται μέσω -συχνά ακραίων- αντιδράσεων του περιβάλλοντος που επηρεάζει τόσο τον άνθρωπο όσο και το σύνολο των ζώντων οργανισμών. Τα τελευταία χρόνια η ανθρωπότητα έχει γίνει μάρτυρας της σημαντικής υποβάθμισης του φυσικού περιβάλλοντος, των ακραίων και επικίνδυνων καιρικών φαινομένων που εμφανίζονται σε όλα τα μήκη και πλάτη της γης και εκτείνονται από ισχυρές καταιγίδες και χιονοπτώσεις μέχρι ακραίες δασικές πυρκαγιές, την εξαφάνιση ή τον εκτοπισμό ειδών κ.ο.κ. Οι ανθρώπινες κοινωνίες έχουν ήδη αρχίσει να αντιλαμβάνονται τις επιπτώσεις που αυτές οι μεταβολές έχουν και θα εξακολουθήσουν να έχουν στην υγεία, την ασφάλεια και την ευημερία τους. Μεγάλος αριθμός μελετών τα τελευταία χρόνια έχει αποδείξει τη συσχέτιση της υποβάθμισης του περιβάλλοντος με την εμφάνιση νέων ασθενειών ή την εξάπλωση άλλων που παλαιότερα ήταν περιορισμένες, την αύξηση μεταναστευτικών ροών λόγω λειψυδρίας, την ακραία φτώχεια και τις απώλειες ζώων λόγω ακραίων καιρικών φαινομένων κ.ο.κ. [10], [11].

Ένα σημαντικό μέρος της παρούσας διδακτορικής διατριβής υλοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της πανδημίας COVID-19 που έπληξε για παραπάνω από δύο χρόνια το σύνολο του πλανήτη, επηρεάζοντας το σύνολο των κοινωνικών και οικονομικών δραστηριοτήτων. Η πανδημία και οι επιπτώσεις της στην καθημερινότητα όλων αποτελούν ένα εξαιρετικό παράδειγμα της εξάρτησης του ανθρώπου από το φυσικό του περιβάλλον, αν και μάλλον η βαρύτητά των επιπτώσεών της είναι ασύγκριτα μικρότερη σε σχέση με ότι πρόκειται να αντιμετωπίσει η ανθρώπινη κοινωνία αν δε λάβει άμεσα και δραστικά μέτρα για την αντιμετώπιση των προκλήσεων όπως η κλιματική αλλαγή.

## 1.2 Φυσικοί πόροι και απόβλητα

### 1.3 Αστικά Στερεά Απόβλητα, ΑΣΑ

Η παραγωγή αποβλήτων, δηλαδή άχρηστων ή ανεπιθύμητων παραπροϊόντων, αποτελεί μία αναπόφευκτη επίπτωση των περισσότερων βιομηχανικών, οικονομικών και κοινωνικών δραστηριοτήτων. Παγκοσμίως, περίπου 7-9 δισεκατομμύρια τόνοι αποβλήτων παράγονται κάθε χρόνο [12]. Τα ΑΣΑ αποτελούν μία συγκεκριμένη κατηγορία αποβλήτων που παράγονται στα νοικοκυριά, και μπορεί να περιλαμβάνουν εμπορικά ή/και βιομηχανικά απόβλητα, ανάλογα με τη μέθοδο αναφοράς [12]. Το 2016 η συνολική παγκόσμια παραγωγή ΑΣΑ ξεπέρασε τα 2 δισεκατομμύρια τόνους.

Τα ΑΣΑ απαιτούν ειδική προσοχή και διαχείριση, λαμβάνοντας υπόψη τις σημαντικές περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις που φέρουν σε τοπικό, περιφερειακό και παγκόσμιο επίπεδο και η εγγύτητά τους στον άνθρωπο (καθώς παράγονται μέσα στις πόλεις) μπορεί να οδηγήσει σε πιθανά ζητήματα δημόσιας υγείας. Από την άλλη πλευρά, η εισαγωγή των αρχών της κυκλικής οικονομίας μπορεί να τα καταστήσει μία σημαντική πηγή αξίας και πόρων [12], [13].

Διαφορετικοί τύποι ΑΣΑ μπορεί να έχουν ποικίλες περιβαλλοντικές επιπτώσεις και επιπτώσεις στη δημόσια υγεία, ανάλογα και με τη μέθοδο διαχείρισής τους [14]. Τα πλαστικά απόβλητα συγκεντρώνουν το ενδιαφέρον της παγκόσμιας κοινότητας λόγω του μεγάλου χρόνου αποικοδόμησης που απαιτείται και των επιπτώσεων που έχουν στην τροφική αλυσίδα λόγω της κατανάλωσής τους από διάφορους οργανισμούς [15], [16]. Επιπλέον, η ρύπανση με άζωτο που προκύπτει από τα στραγγίσματα των αποβλήτων είναι άλλη μία σημαντική και μακροπρόθεσμη επίπτωση, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε ασθένειες και ανισορροπίες θρεπτικών συστατικών τον υδροφόρο ορίζοντα [17]–[19].

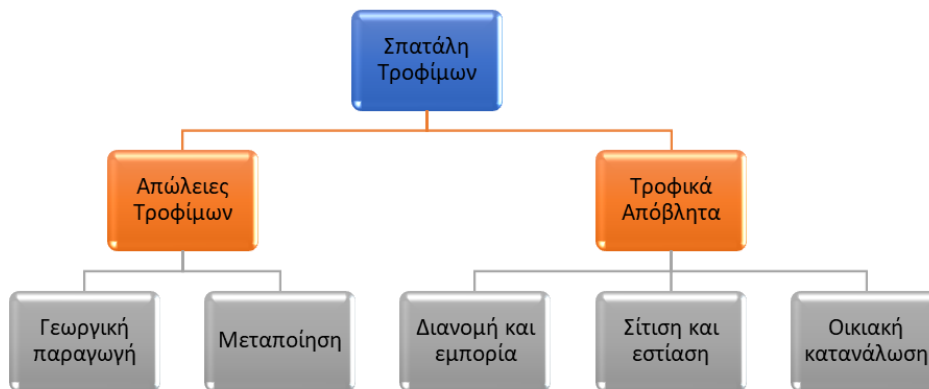
Μέσω της μετάβασης σε μία κυκλική οικονομία, τα απόβλητα επαν-εισέρχονται στην παραγωγική διαδικασία μέσω της επαναχρησιμοποίησης των προϊόντων ή της ανακύκλωσης των υλικών που τα αποτελούν. Η Ευρωπαϊκή Ένωση μέσω του Πακέτου Κυκλικής Οικονομίας έχει θέσει στόχους για κατ' ελάχιστον 65% ανακύκλωση των ΑΣΑ και μέγιστο ποσοστό ταφής στο 10%, έως το 2030. Από την άλλη οι Στρατηγικοί Στόχοι 12.3, 12.4 και 12.5 Βιώσιμης Ανάπτυξης του ΟΗΕ, επιτάσσουν τη μείωση της παγκόσμιας παραγωγής αποβλήτων έως το 2030 [20].

Στην πραγματικότητα, σήμερα, το 70% των παραγόμενων ΑΣΑ παγκοσμίως καταλήγουν σε χωματερές και ΧΥΤΑ, αποτελώντας παγκοσμίως την τρίτη μεγαλύτερη πηγή εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, μετά τους τομείς της παραγωγής ενέργειας και των μεταφορών.

Σημαντική επιβάρυνση στο πρόβλημα των ΑΣΑ, έχει επιφέρει η πανδημία COVID-19. Συγκεκριμένα, έχει ήδη αρχίσει να διαφαίνεται ότι η ραγδαία αύξηση πλαστικών μιας χρήσης όπως γαντιών μιας χρήσης και υγειονομικών масκών (σε μια περίοδο μάλιστα που είχαν αρχίσει στην Ευρωπαϊκή Ένωση να εφαρμόζονται σημαντικά μέτρα μείωσης τους) αναμένεται να αποτελέσει την πρόκληση των επόμενων ετών όσον αφορά τη συλλογή τους στο τέλος της ζωής τους και της διαχείρισής τους. Μελέτη που δημοσιεύτηκε πρόσφατα έδειξε ότι παραπάνω από 8 εκατομμύρια τόνοι πλαστικών αποβλήτων παρήχθησαν λόγω της πανδημικής κρίσης, εκ των οποίων περισσότερο από 25.000 κατέληξαν στον υδροφόρο ορίζοντα και τους ωκεανούς [21].

### 1.3.1 Οικιακά Ζυμώσιμα Απορρίμματα – Τροφικά Υπολείμματα

Ο όρος “απώλειες τροφίμων” αναφέρεται στις “ποσότητες τροφίμων οι οποίες σπαταλώνται στα διάφορα στάδια της τροφικής αλυσίδας αξίας”. Οι απώλειες τροφίμων που εμφανίζονται στα τελευταία στάδια της αλυσίδας αξίας (δηλαδή κατά την εμπορία των προϊόντων και την τελική κατανάλωση) καλούνται “Τροφικά Απόβλητα/Υπολείμματα”. Σύμφωνα με τον Οργανισμό Τροφίμων και Γεωργίας (Food and Agriculture Organization – FAO) περίπου 1,3 δισεκατομμύρια τόνοι τροφίμων (ποσότητα η οποία αντιστοιχεί σε περισσότερο από το 30% των συνολικών ποσοτήτων που παράγονται παγκοσμίως) σπαταλώνται σε ετήσια βάση [22]. Για την καλύτερη κατανόηση του συγκεκριμένου αριθμού, η ποσότητα αυτή αντιστοιχεί στο δεκαπλάσιο της μάζας του νησιού του Μανχάταν. Στο Διάγραμμα 1-1 παρουσιάζεται η βασική κατηγοριοποίηση των πηγών σπατάλης τροφίμων.



**Διάγραμμα 1-1: Κατηγοριοποίηση σπατάλης τροφίμων**

Η συγκεκριμένη παγκόσμιας εμβέλειας πρόκληση αναμένεται να ακολουθήσει μία σημαντικά αυξητική τάση τις επόμενες δεκαετίες, λόγω κατά κύριο λόγο της αναμενόμενης οικονομικής ανάπτυξης και της αύξησης του πληθυσμού, ιδιαίτερα στις αναπτυσσόμενες χώρες, ειδικά εάν εξακολουθήσει να υφίσταται το παρόν μοντέλο χρήσης των πόρων και παραγωγής και κατανάλωσης των προϊόντων [23].

Σε αυτό το πλαίσιο, είναι προφανές ότι οι παραδοσιακές μέθοδοι διαχείρισης των ΤΥ, δηλαδή η ταφή και η αποτέφρωση, δεν μπορούν να θεωρούνται βιώσιμες, ενώ οι εναλλακτικές που έχουν πρόσφατα προταθεί και προωθούνται αντιμετωπίζουν σημαντικά τεχνολογικά και νομικά εμπόδια [24], [25]. Ως εκ τούτου, είναι πλέον κοινώς αποδεκτό ότι η υπέρβαση των εμποδίων για τη μετάβαση από την υφιστάμενη κατάσταση στη διαχείριση των ΤΥ σε μία λογική ολοκληρωμένη αξιοποίηση αποτελεί άμεση ανάγκη.

Οι περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές επιβαρύνσεις που συνδέονται με τις παραδοσιακές μεθόδους διαχείρισης των ΤΥ είναι τεράστιες [26]. Συγκεκριμένα, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ταφής των ΤΥ είναι ευρέως γνωστές, συμπεριλαμβανομένων της ρύπανσης του υδροφόρου ορίζοντα από τα στραγγίσματα των ΧΥΤΑ, τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και την απελευθέρωση οσμών [24]. Για την κατανόηση του μεγέθους του προβλήματος το Ellen MacArthur Foundation αναφέρει ότι το 12% των παγκοσμίως εκπομπών μεθανίου σχετίζονται με την βιοαποικοδόμηση των οργανικών αποβλήτων στους ΧΥΤΑ [27]. Επιπλέον, η αποτέφρωση των ΤΥ (επίσης μία συχνά συναντώμενη πρακτική) είναι ιδιαίτερα αναποτελεσματική λόγω του ιδιαίτερα υψηλού ποσοστού υγρασίας των ΤΥ (που συχνά ξεπερνάει το 80%) το οποίο μειώνει δραματικά των θερμική απόδοση της διεργασίας.



Από την άλλη πλευρά, η εφαρμογή τέτοιου είδους πρακτικών αγνοεί τις δυνατότητες των ΤΥ να μετατραπούν σε πολύτιμες πηγές πόρων. Μελέτες έχουν καταδείξει ότι τα ΤΥ μπορούν να εξελιχθούν σε μία από τις πλέον υποσχόμενες πηγές πόρων [28]. Η χημική ποικιλότητα των ΤΥ τα καθιστά πηγή πολλών πολύτιμων συστατικών (χημικών, υλικών, καυσίμων κ.ο.κ), όπως έχει αποδειχθεί από μία πληθώρα ερευνητικών εργασιών [25], [29]–[38]. Ως εκ τούτου, είναι προφανές ότι η πιθανή αξία που μπορεί να προκύψει από την εφαρμογή διαφόρων τεχνικών αξιοποίησης των ΤΥ είναι τεράστια, τόσο όσον αφορά την οικονομία όσο και όσο αφορά το περιβάλλον, μέσω της δημιουργίας ολοκληρωμένων αλυσίδων αξίας που θα ξεκινούν από τη στιγμή της παραγωγής των ΤΥ.

Σε σχετικές μελέτες που έχουν δημοσιευτεί τα τελευταία χρόνια παρουσιάζονται τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των ΤΥ, αναδεικνύοντας τόσο τα πλεονεκτήματα τους για την αξιοποίησή τους ως υπόστρωμα σε μία πληθώρα βιοχημικών διεργασιών (όπως για παράδειγμα ο υψηλός βαθμός βιοαποικοδομησιμότητάς τους), όσο και τα μειονεκτήματά τους (όπως η ανομοιογένεια που χαρακτηρίζει συνολικά το συγκεκριμένο ρεύμα αποβλήτων και η οποία καθιστά αναγκαία την εφαρμογή τεχνικών προκατεργασίας), η αντιμετώπιση των οποίων χρήζει περαιτέρω διερεύνησης και βρίσκεται στο επίκεντρο των επιστημονικών και τεχνικών μελετών [32].

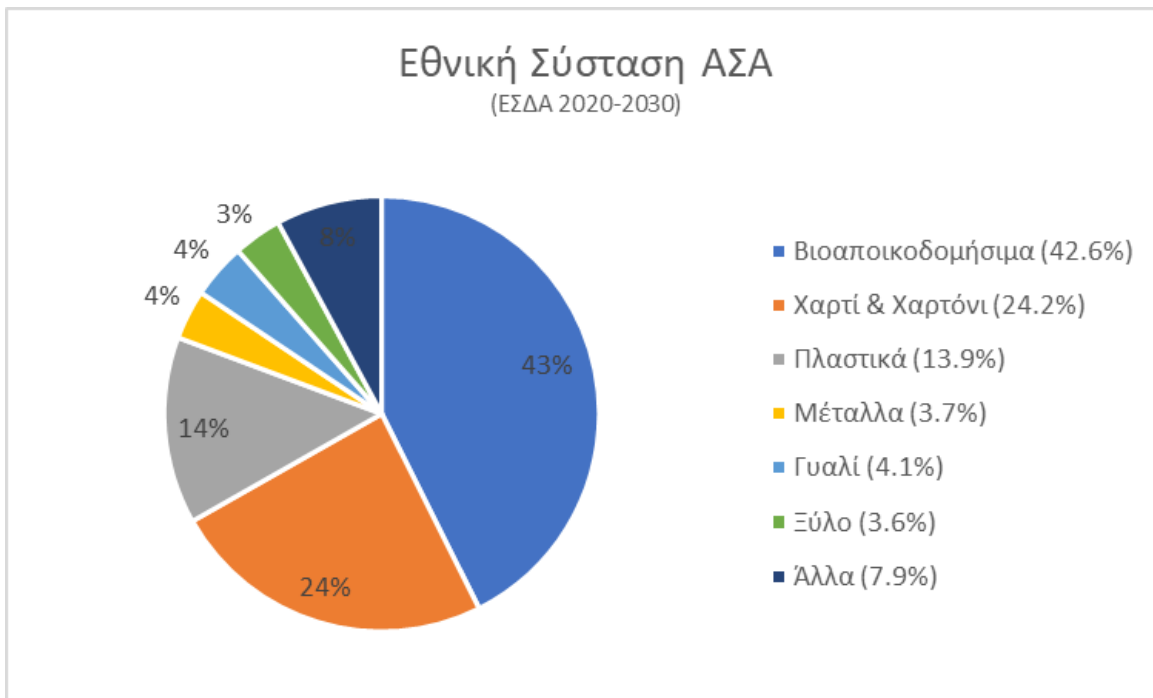
**Πίνακας 1-1: Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά ΤΥ**

Παράμετρος	Τιμή
Ολικά Στερεά (% κ.β.)	18,1-30,9
Πτητικά Στερεά (% κ.β.)	17,1-26,35
Πτητικά Στερεά/Ολικά Στερεά (%)	85-95
ρΗ	4,2-6,5
Υδατάνθρακες (% ξηρή βάση)	55,2-61,9
Πρωτεΐνες (% ξηρή βάση)	15,0
Λίπη (% ξηρή βάση)	23-24
Έλαια (% ξηρή βάση)	4,6
C (% d.b.)	46-57
N (% d.b.)	2,3-3,5
C/N	13,2-24,5

Οι σημαντικές περιβαλλοντικές και οικονομικές επιπτώσεις της διάθεσης των ΤΥ έχει οδηγήσει τη βιομηχανία στην κατανόηση της έκτασης του προβλήματος και της προσπάθειας αναζήτησης βιώσιμων λύσεων. Οι αυξανόμενες ανάγκες παραγωγής ενέργειας σε όλον τον κόσμο καθώς και η κλιματική αλλαγή έχει οδηγήσει στην ανάγκη αξιοποίησης ποικίλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως είναι και η βιομάζα που αποτελεί τα ΤΥ.

## 1.4 Υφιστάμενη κατάσταση στη διαχείριση των ΑΣΑ στην Ελλάδα

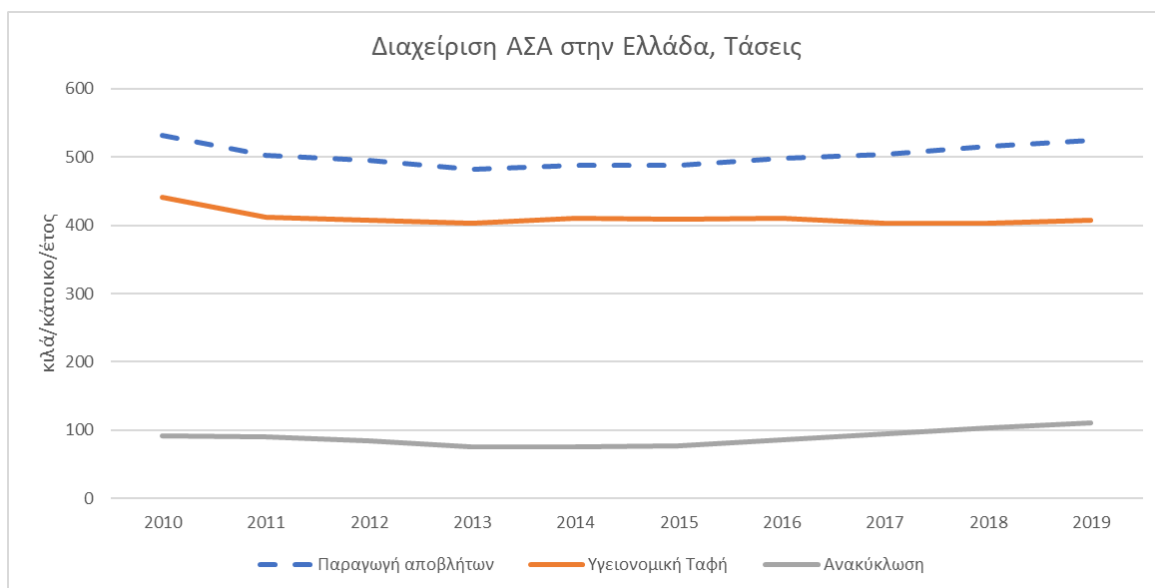
Η σύσταση των ΑΣΑ στην Ελλάδα (βάσει του ΕΣΔΑ 2020-2030) παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 1-2.



**Διάγραμμα 1-2: Εθνική σύσταση ΑΣΑ βάσει του ΕΣΔΑ 2020-2030**

Σύμφωνα με τον ΕΣΔΑ 2020-2030 στην Ελλάδα παράγονται ετησίως περίπου 5.5 εκατομμύρια τόνοι ΑΣΑ. Η βασική μέθοδος διαχείρισης είναι η υγειονομική ταφή με την Ελλάδα στο σύνολό της να διαθέτει περίπου 75 ΧΥΤΑ και άλλες 52 παράνομες χωματερές (εκ των οποίων οι 8 λειτουργούν ακόμα, οι 24 δεν έχουν κλείσει οριστικά και 20 έχουν κλείσει χωρίς όμως να καλύπτονται οι απαραίτητες προϋποθέσεις της ΕΕ) όπου καταλήγουν περίπου 4.3 εκατομμύρια τόνοι ΑΣΑ κάθε χρόνο, που σύμφωνα με τη Eurostat αντιστοιχούν στο 77.7% του συνόλου των παραγόμενων ΑΣΑ. Μόλις το 21% οδηγείται προς ανακύκλωση, με έτος αναφοράς το 2019.

Η ιστορική διακύμανση της παραγωγής απορριμμάτων και των ποσοτήτων που κατέληγαν σε υγειονομική ταφή και ανακύκλωση παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 1-3.



**Διάγραμμα 1-3: Διαχείριση ΑΣΑ στην Ελλάδα, δεκαετής τάση**

Ο ΕΣΔΑ 2020-2030 προβλέπει την κατασκευή και λειτουργία 3-4 μονάδων ανάκτησης ενέργειας/αποτέφρωσης και παρουσιάζει τρία διαφορετικά σενάρια σε σχέση με την ανάκτηση ενέργειας (Πίνακας 1-2). Βάσει του Σεναρίου 1 προβλέπεται η ανάκτηση ενέργειας από τα υπολείμματα των ΜΕΑ και των ΚΔΑΥ, αποκλειστικά από μονάδες ανάκτησης ενέργειας. Τα Σενάρια 2 και 2α προτείνουν την συναποτέφρωση των υπολειμμάτων στις ενεργοβόρες βιομηχανίες (κυρίως στην τσιμεντοβιομηχανία) παράλληλα με την ανάπτυξη δικτύου μονάδων ανάκτησης ενέργειας.

**Πίνακας 1-2: ΕΣΔΑ 2020-2030, Σενάρια διαχείρισης ΑΣΑ μέσω ανάκτησης ενέργειας/αποτέφρωσης**

	Παραγωγή ΑΣΑ (τόνοι)	Εισερχόμενες ροές ΑΣΑ στις μονάδες ανάκτησης ενέργειας και στη τσιμεντοβιομηχανία (τόνοι)	Υγειονομική Ταφή (τόνοι)	Υγειονομική Ταφή (%)
<b>Σενάριο 1</b>	5.301.499	1.429.752	525.310	9,91%
<b>Σενάριο 2</b>	5.301.499	1.027.821	476.219	8,98%
<b>Σενάριο 2α</b>	5.301.499	847.782	422.207	7,96%

## 1.5 Εθνικό και κοινοτικό νομοθετικό πλαίσιο

Οι βασικές αρχές που διέπουν την Ευρωπαϊκή νομοθεσία είναι η φιλική προς το περιβάλλον διαχείριση των αποβλήτων και η αυξανόμενη χρήση των περιεχόμενων στα απόβλητα δευτερογενών υλικών μέσω της ανακύκλωσης. Συγκεκριμένα, διακηρυγμένη θέση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής αποτελεί η μετάβαση σε μία κυκλική οικονομία μέσω της ενίσχυσης της εξαγωγής υψηλής ποιότητας πόρων από τα απόβλητα.

## Στόχοι Ευρωπαϊκής Νομοθεσίας



Βελτιστοποίηση  
διαχείρισης  
απορριμμάτων

Τεχνολογική  
καινοτομία στην  
ανακύκλωση

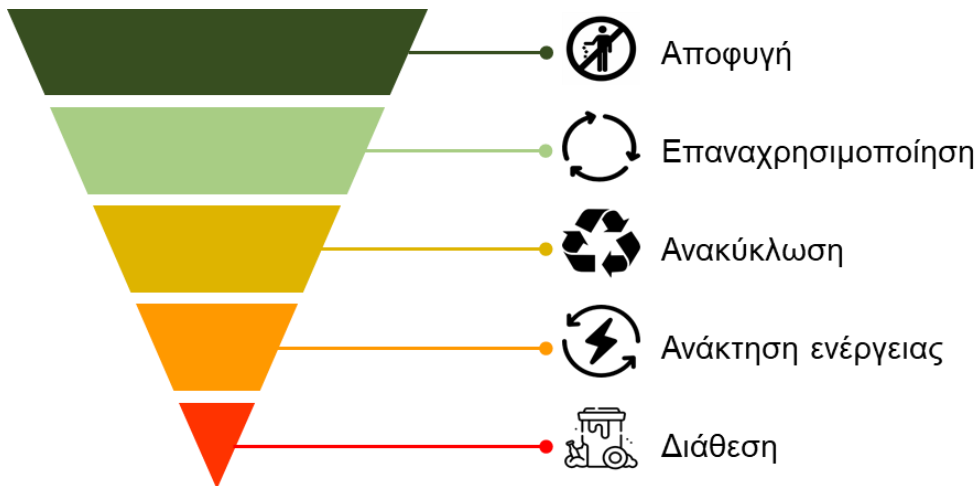
Περιορισμός  
διάθεσης

### Εικόνα 1-2: Στόχοι Ευρωπαϊκής νομοθεσίας για τα απόβλητα

Βάσει του Πακέτου Κυκλικής Οικονομίας της ΕΕ, το οποίο εκδόθηκε το 2018, οι Ευρωπαϊκές Οδηγίες που σχετίζονται με τη διαχείριση πόρων και αποβλήτων έχουν αναθεωρηθεί, ώστε να αναδεικνύουν την κατεύθυνση της Επιτροπής προς την Κυκλική Οικονομία.

### 1.5.1 Οδηγία Πλαίσιο για τα Απόβλητα – Οδηγία 2008/98/ΕΕ

Η Οδηγία Πλαίσιο για τα Απόβλητα (Waste Framework Directive) παρέχει το συνολικό νομικό πλαίσιο που διέπει τη συλλογή, μεταφορά, ανάκτηση και τελική διάθεση των αποβλήτων σε όλη την Ευρώπη. Στον πυρήνα της Οδηγίας βρίσκεται η ιδέα της πυραμίδας ιεράρχησης των επιλογών διαχείρισης των αποβλήτων.



### Εικόνα 1-3: Πυραμίδα ιεράρχησης των επιλογών διαχείρισης αποβλήτων

Το 2018 η Οδηγία Πλαίσιο για τα Απόβλητα αναθεωρήθηκε μέσω της Οδηγίας (ΕΕ) 2018/851 θέτοντας των κάτωθι ορισμό για τα ΑΣΑ:

- i. Μικτά ή/και προδιαλεγμένα στην πηγή απόβλητα νοικοκυριών, συμπεριλαμβανομένων των χαρτί/χαρτόνι, γυαλί, μέταλλα, πλαστικά, βιοαπόβλητα, ξύλα, υφάσματα, συσκευασίες, απόβλητα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού, μπαταρίες και συσσωρευτές και ογκώδη (στρώματα και έπιπλα);
- ii. Μικτά ή/και προδιαλεγμένα στην πηγή απόβλητα από άλλες πηγές, τα οποία προσομοιάζουν ως προς τη φύση και τη σύστασή τους με αυτά των νοικοκυριών.

Επιπλέον, η αναθεωρημένη Οδηγία Πλαίσιο για τα Απόβλητα επεκτείνει τις υποχρεώσεις χωριστής συλλογής ΑΣΑ στα βιο-απόβλητα, τα επικίνδυνα απόβλητα των νοικοκυριών και τα υφάσματα.

### **1.5.2 Οδηγία 1999/31/ΕΕ περί της υγειονομικής ταφής των αποβλήτων**

Η Οδηγία περί της υγειονομικής ταφής των αποβλήτων εκδόθηκε το 1999 θέτοντας δεσμευτικούς στόχους για την εκτροπή των Αστικών Βιοαποικοδομήσιμων Αποβλήτων (ΒΑΑ) από τους ΧΥΤΑ. Οι στόχοι όριζαν ότι έως το 2020 οι ποσότητες των ΒΑΑ που κατέληγαν στους ΧΥΤΑ θα είχαν μειωθεί στο 35% σε σχέση με το 1995.

Το 2018 η Οδηγία περί της υγειονομικής ταφής των αποβλήτων αναθεωρήθηκε μέσω της Οδηγίας (ΕΕ) 2018/850. Οι κύριες αλλαγές ήταν:

- i. Τα κράτη μέλη είναι υποχρεωμένα έως το 2035 να περιορίσουν το ποσοστό των ΑΣΑ που καταλήγουν στους ΧΥΤΑ στο 10% των συνολικά παραγόμενων ΑΣΑ (κατά βάρος).
- ii. Η μέθοδος υπολογισμού σε σχέση με την επίτευξη των στόχων τροποποιήθηκε ώστε να είναι κοινή για όλα τα κράτη μέλη.

### **1.5.3 Οδικός Χάρτης της ΕΕ για την Κυκλική Οικονομία**

Το Μάρτιο του 2020 η Ευρωπαϊκή Επιτροπή υιοθέτησε το νέο Οδικό Χάρτη για την Κυκλική Οικονομία, ο οποίος αποτελεί ένα από τα βασικά συστατικά της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας. Στο επίκεντρο του Οδικού Χάρτη βρίσκεται η μείωση της πίεσης στους φυσικούς πόρους, ταυτόχρονα με τη βιώσιμη ανάπτυξη και τη δημιουργία θέσεων εργασίας. Επιπροσθέτως, ένα από τα προαπαιτούμενα του Οδικού Χάρτη είναι η επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας στην Ένωση έως το 2050 και η αντιστροφή της καταστροφής της βιοποικιλότητας.

Ο νέος Οδικός Χάρτης για την Κυκλική Οικονομία περιλαμβάνει πρωτοβουλίες για το σύνολο του κύκλου ζωής των προϊόντων, από το σχεδιασμό και την εφαρμογή κυκλικών πρακτικών κατά την παραγωγή έως την ενθάρρυνση της βιώσιμης κατανάλωσης και αποσκοπεί στην αποφυγή της παραγωγής αποβλήτων και τη διατήρηση των πόρων στην οικονομία και την παραγωγή κατά το μέγιστο δυνατό.

### **1.5.4 Ελληνικό νομοθετικό πλαίσιο**

Η Ελλάδα την τελευταία δεκαετία έχει προωθήσει πολιτικές που αποσκοπούν στην προώθηση της ανακύκλωσης αλλά και τη μείωση της νόμιμης και παράνομης ταφής απορριμμάτων. Ωστόσο, ακόμα και σήμερα υπάρχει μεγάλο περιθώριο βελτιώσεων τόσο στο νομικό πλαίσιο όσο και στην εφαρμογή του, καθώς η πλειοψηφία των παραγόμενων αποβλήτων οδηγείται σε ταφή ή δεν υφίσταται κατάλληλη διαχείριση.

Οι βασικότερες νομοθετικές πρωτοβουλίες του Ελληνικού Υπουργείου Ενέργειας και Περιβάλλοντος συνοψίζονται παρακάτω:

- i. Υιοθέτηση της αναθεωρημένης Οδηγίας Πλαίσιο για τα απόβλητα (2018/851)
- ii. Ανάπτυξη νέου Εθνικού Σχεδίου Διαχείρισης Απορριμμάτων για την περίοδο 2020-2030
- iii. Κατάρτιση Εθνικού Ενεργειακού και Κλιματικού Σχεδίου για την περίοδο 2020-2030
- iv. Κατάρτιση Εθνικού Σχεδίου Πρόληψης Αποβλήτων
- v. Υιοθέτηση της Οδηγίας για τα πλαστικά μιας χρήσης (2019/904)
- vi. Υιοθέτηση Εθνικού Σχεδίου για της Πράσινες Δημόσιες Συμβάσεις
- vii. Ανάπτυξη Οδικού Χάρτη για την Κυκλική Οικονομία
- viii. Προώθηση της αγοράς δευτερογενών υλικών

Η Ελληνική Κυβέρνηση έχει θέσει μία φιλόδοξη Πράσινη Ατζέντα που αποσκοπεί στην ενεργό στήριξη δύο αλληλένδετων στόχων: της επίτευξης κλιματικής ουδετερότητας πριν το 2050 και της προώθησης των αρχών της κυκλικής οικονομίας. Προς αυτήν την κατεύθυνση, το ΥΠΕΝ έχει

δεσμευτεί για την υιοθέτηση των σχετικών με τη διαχείριση των πόρων και των αποβλήτων οδηγιών της ΕΕ.

#### *Τέλος Ταφής*

Το τέλος ταφής αποτελεί ένα κοινώς αποδεκτό από τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης εργαλείο για την εκτροπή των αποβλήτων από της ταφή και την παροχή κινήτρων για την εφαρμογή βιώσιμων πρακτικών διαχείρισης αποβλήτων (πρόληψη, ανακύκλωση και ανάκτηση ενέργειας).

Στην Ελλάδα, μέχρι και σήμερα, το τέλος ταφής δεν έχει εφαρμοστεί αν και έχει νομοθετηθεί σε πολλές περιπτώσεις. Ως εκ τούτου, η ταφή των ΑΣΑ παραμένει εξαιρετικά φθηνή και άρα η πλέον συμφέρουσα από οικονομικής άποψης για τους Δήμους. Τελευταία, με το νέο Νόμο για τη Διαχείριση Αποβλήτων (ν. 4819/2021) υιοθετείται το τέλος ταφής με χρονικό ορίζοντα εφαρμογής την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου του 2022, ξεκινώντας από τα €20/τόνο και με ετήσια αύξηση €5/τόνο έως τα €35/τόνο το 2025 και στη συνέχεια φτάνοντας στα €55/τόνο από την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 2027.

Το τέλος ταφής θα καταβάλλεται από τους πολίτες, θα συλλέγεται από τους ΟΤΑ και θα αξιοποιείται από το Πράσινο Ταμείο με τους εξής τρόπους:

- Ενίσχυση των ΟΤΑ ώστε να εφαρμόζουν σχέδια πρόληψης, διαλογής στην πηγή και ανακύκλωσης των ΑΣΑ;
- Ως μέσο επιβράβευσης για τους ΟΤΑ που πετυχαίνουν τις υψηλότερες αποδόσεις ανακύκλωσης;
- Για τη χρηματοδότηση της έρευνας και της τεχνολογικής καινοτομίας στους κλάδους της ανακύκλωσης και της διαχείρισης αποβλήτων εν γένει.

#### *Πρόσφατες εξελίξεις στο ρυθμιστικό πλαίσιο – Στόχοι επαναχρησιμοποίησης και ανακύκλωσης*

Το Εθνικό Σχέδιο Διαχείρισης Απορριμμάτων θέτει φιλόδοξους στόχους σχετικά με την προετοιμασία για επαναχρησιμοποίηση και την ανακύκλωσης: 55% κ.β. έως το 2025 και 60% κ.β. έως το 2060 για το σύνολο των ΑΣΑ. Ο Πίνακας 1-3 περιλαμβάνει τους συγκεκριμένους στόχους ανά υλικό για το 2025 και το 2030.

**Πίνακας 1-3: Στόχοι προετοιμασίας για επαναχρησιμοποίηση και ανακύκλωσης, ΕΣΔΑ 2020-2030**

<b>Υλικό</b>	<b>2025 (%)</b>	<b>2030 (%)</b>
Πλαστικό	50	55
Ξύλο	25	30
Σιδηρούχα μέταλλα	70	80
Μη-σιδηρούχα μέταλλα	50	60
Γυαλί	70	75
Χαρτί & Χαρτόνι	75	85

Επιπλέον, συμμορφούμενος με την Οδηγία 2018/851 ο ν. 4819/2021 προβλέπει ότι επιπλέον ρεύματα αποβλήτων θα ενταχθούν μεσοπρόθεσμα στο πλαίσιο της Διευρυμένης Ευθύνης Παραγωγού: κλωστοϋφαντουργικά απόβλητα και στρώματα, αλιευτικός εξοπλισμός, αγροπλαστικά, έπιπλα, παιχνίδια, αθλητικός εξοπλισμός, φαρμακευτικά προϊόντα και

φωτοβολταϊκά πάνελ. Η εφαρμογή των σχεδίων Διευρυμένης Ευθύνης Παραγωγού για τα παραπάνω προϊόντα αναμένεται να ενισχύσει σημαντικά τη διαλογή στην πηγή και την προετοιμασία για επαναχρησιμοποίηση και ανακύκλωση των συγκεκριμένων ρευμάτων ΑΣΑ, μειώνοντας αντίστοιχα τις ποσότητες αποβλήτων που καταλήγουν στους ΧΥΤΑ.

Επιπλέον, από την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 2023 προβλέπεται να τεθεί σε ισχύ το σύστημα Πληρώνω Όσο Πετάω (Pay As you Throw – PAYT) με τους πολίτες πλέον να χρεώνονται βάσει της ακριβούς ποσότητας αποβλήτων που παράγουν, δίνοντας σημαντικά κίνητρα για διαλογή στην πηγή.

*Εθνικό Σχέδιο Διαχείρισης Απορριμμάτων – ΕΣΔΑ 2020-2030 [39]*

Ο ΕΣΔΑ 2020-2030 θέτει συγκεκριμένους στόχους και μέτρα για την περαιτέρω ανάπτυξη της διαχείρισης των απορριμμάτων στην Ελλάδα κατά τα επόμενα χρόνια δίνοντας έμφαση στη διαλογή στην πηγή και στην ανάκτηση ενέργειας.

**Πίνακας 1-4: Στόχοι και μέτρα ΕΣΔΑ 2020-2030**

<b>Στόχοι</b>	<b>Μέτρα</b>
<10% ταφή έως το 2030	Παροχή κινήτρων για την εκτροπή των ΑΣΑ από τους ΧΥΤΑ
60% προετοιμασία για επαναχρησιμοποίηση και ανακύκλωση έως το 2030	Εφαρμογή αρχών Πληρώνω Όσο Πετάω
Κλείσιμο όλων των παράνομων χωματερών έως το 2022	Προώθηση χωριστής συλλογής ανακυκλώσιμων υλικών και βιοαποβλήτων
Χωριστή συλλογή βιοαποβλήτων σε εθνικό επίπεδο έως το 2022	Αύξηση και αναβάθμιση των ΚΔΑΥ
Κατασκευή και λειτουργία 30-38 ΜΕΑ έως το 2023	Αύξηση ανάκτησης ενέργειας από τα υπολείμματα των ΚΔΑΥ μέσω της ανάπτυξης δικτύου μονάδων ανάκτησης ενέργειας
Κατασκευή και λειτουργία >30 ΜΕΒΑ έως το 2023	Κατασκευή και λειτουργία ΧΥΤ επικινδύνων έως το 2023
Κατασκευή 3-4 μονάδων ανάκτησης ενέργειας/αποτέφρωσης	Προώθηση χωριστής συλλογής και Διευρυμένης Ευθύνης Παραγωγού νέων ρευμάτων ενδιαφέροντος

*Νόμος 4819/2021 Πλαίσιο για την Ολοκληρωμένη Διαχείριση Αποβλήτων*

Ο βασικός στόχος του ν. 4819/2021 είναι η υιοθέτηση των Ευρωπαϊκών Οδηγιών 2018/851 και 2018/852 από το Ελληνικό νομικό πλαίσιο. Επιπλέον, τίθεται ως υψηλής προτεραιότητας στόχος η σημαντική μείωση των αποβλήτων που καταλήγουν σε ΧΥΤΑ μέσω της ανάπτυξης δικτύου μονάδων ανάκτησης ενέργειας. Ο Πίνακας 1-5 περιλαμβάνει συνοπτικά τις προβλέψεις του νόμου 4819/2021:

**Πίνακας 1-5: Προβλέψεις Νόμου 4819/2021**

Στοχεύει στη συνολική βελτίωση των επιδόσεων του συνολικού σχεδίου διαχείρισης αποβλήτων
Υποστηρίζει του στόχους που τίθενται από το ΕΣΔΑ 2020-2030
Ενσωματώνει τους σχετικούς στόχους της ΕΕ για τα απόβλητα
Καθιερώνει την υποχρέωση διαλογής στην πηγή για τουλάχιστον 10 υλικά
Απαιτεί την ανάπτυξη του πλαισίου Διευρυμένης Ευθύνης Παραγωγού για νέα ρεύματα αποβλήτων
Προτείνει την ανάπτυξη νέων ΜΕΑ και μονάδων ανάκτησης ενέργειας
Θέτει στόχο την κατ' ελάχιστον κατά 30% μείωση της παραγωγής Τροφικών Αποβλήτων
Αναμορφώνει τον Εθνικό Οργανισμό Ανακύκλωσης
Πρωθει τις αρχές τις βιώσιμης παραγωγής και κατανάλωσης για τον ιδιωτικό και το δημόσιο τομέα
Αναθεωρεί το Τέλος Ταφής

## **1.6 Κυκλική Οικονομία**

Η κυκλική οικονομία ως έννοια αλλά και ως παραγωγικό μοντέλο έρχεται να αντιπαρατεθεί με το σημερινό γραμμικό πρότυπο παραγωγής και κατανάλωσης προϊόντων που βασίζεται στο τρίπτυχο 'παραλαβή πρώτων υλών, μεταποίηση, διάθεση'.

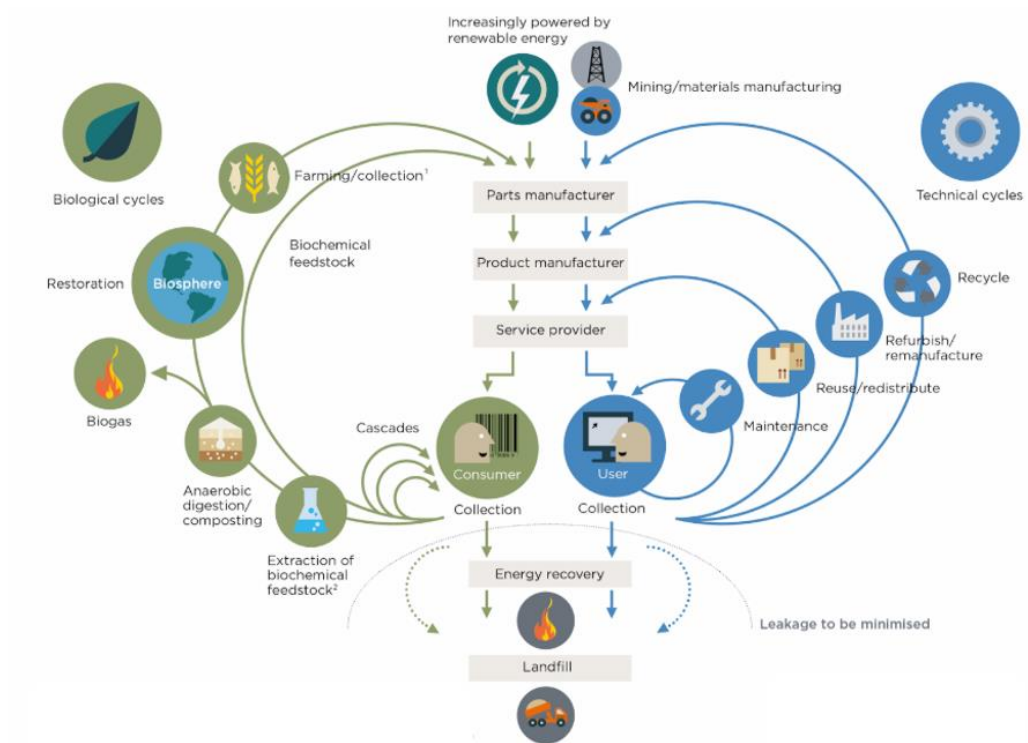




**Εικόνα 1-4: Γραμμική και κυκλική οικονομία**

Το γραμμικό αυτό πρότυπο βασίζεται στην κατανάλωση μεγάλων ποσοτήτων, χαμηλού κόστους και εύκολα προσβάσιμων πρώτων υλών και ενέργειας και ευθύνεται σε σημαντικό βαθμό για την κατασπατάληση των φυσικών πόρων. Η βασική ιδέα γύρω από την κυκλική οικονομία αφορά στην ανάπτυξη προϊόντων και διεργασιών, τα οποία από το σχεδιασμό τους θα είναι κατάλληλα ώστε στο τέλος του κύκλου ζωής τους να είναι δυνατή η επαναχρησιμοποίηση, επιδιόρθωση, ανακύκλωση και ανάκτηση πρώτων υλών (Εικόνα 1-4). Τα βασικά πλεονεκτήματα της κυκλικής οικονομίας έγκεινται στο γεγονός ότι ενισχύει τη συντήρηση του φυσικού κεφαλαίου του πλανήτη (Natural capital), βελτιστοποιεί την απόδοση της χρήσης των πόρων ενώ παράλληλα μειώνει τους συστημικούς οικονομικούς κινδύνους καθώς βελτιστοποιεί τη διαχείριση των μη-ανανεώσιμων πόρων.

Η έννοια της κυκλικής οικονομίας και οι αρχές τις έχουν συστηματικά περιγραφεί και αποτυπώνονται στο διάγραμμα «πεταλούδα» του Ιδρύματος Ellen MacArthur (Σχήμα 3-1)[40].



**Εικόνα 1-5: Διάγραμμα “πεταλούδα” κυκλικής οικονομίας, Ellen MacArthur Foundation**

Η βασική αρχή που διέπει την κυκλική οικονομία είναι η εφαρμογή “φυσικών βρόχων” (physical loops) στην παραγωγή και κατανάλωση προϊόντων. Ωστόσο, για την ανάπτυξη και εφαρμογή τους απαραίτητες προϋποθέσεις είναι [41]:

- Κατάργηση όλων των γνωστών επικίνδυνων ουσιών όσο το δυνατόν ταχύτερα, για τη διευκόλυνση της μελλοντικής επαναχρησιμοποίησης και ανακύκλωσης (αποτροπή χρήσης παλαιότερου τύπου χημικών ουσιών).
- Παροχή καλύτερης πληροφόρησης, στους οργανισμούς προετοιμασίας, επαναχρησιμοποίησης και ανακύκλωσης, π.χ. μέσω των λεγόμενων “διαβατηρίων προϊόντων/product passports”.
- Καλύτερη πληροφόρηση, και οικονομική υποστήριξη σε επιχειρήσεις που θα μπορούσαν να αναπτύξουν επιχειρηματικά μοντέλα Κυκλικής Οικονομίας.
- Καλύτερη πληροφόρηση των καταναλωτών, ώστε να τους παρέχονται συμβουλές σε θέματα όπως η ανθεκτικότητα και η δυνατότητα αποκατάστασης των προϊόντων.
- Σχεδιασμός για: κυκλικότητα, ανθεκτικότητα, αποσυναρμολόγηση/επανασυναρμολόγηση, παράταση της διάρκειας ζωής και ευκολία επισκευής και ανακατασκευής - και φυσικά ανακυκλωσιμότητας, συμπεριλαμβανόμενης της εισαγωγής της έννοιας του σπονδυλωτού σχεδιασμού (modular design) των προϊόντων.
- Ψηφιακή τεχνολογία και τεχνητή νοημοσύνη (AI) για την υποστήριξη επιχειρηματικών μοντέλων Κυκλικής Οικονομίας, για παράδειγμα για τη διευκόλυνση της κοινής χρήσης/εκμίσθωσης προϊόντων και για την παρακολούθηση της κατάστασης των προϊόντων με στόχο τη βελτιστοποίηση της συντήρησης και της παράτασης της διάρκειας ζωής.

Μια έκθεση του 2018 για την Ευρωπαϊκή Επιτροπή με τίτλο «Impact of Circular Economy Policies on Labour Markets» (Ο αντίκτυπος των πολιτικών κυκλικής οικονομίας στις αγορές εργασίας)

καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η κυκλική οικονομία θα μπορούσε να προσθέσει **0,5% στο ΑΕΠ της Ευρώπης και να προκαλέσει καθαρή αύξηση 700.000 θέσεων εργασίας - κυρίως σε κράτη μέλη της Κεντρικής και Ανατολικής Ευρώπης** - μετατοπίζοντας το εργατικό δυναμικό από τις τρέχουσες δραστηριότητες εξόρυξης πόρων σε εργοστάσια ανακύκλωσης, καθώς και μονάδες επισκευής και ανακατασκευής υψηλής έντασης εργασίας.

Η μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος είναι ένα από τους βασικά κίνητρα για την ουσιαστική μετάβαση στην Κυκλική Οικονομία. Σύμφωνα με το πακέτο κυκλικής οικονομίας της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, προβάλλονται τα ακόλουθα οφέλη: μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 500 εκατομμύρια τόνους (μεταξύ 2015 και 2035) και εξοικονόμηση 465 ευρώ από λογαριασμούς ενέργειας ανά έτος/ ανά νοικοκυριό (έως το 2020).

Η υιοθέτηση των αρχών της κυκλικής οικονομίας στη διαχείριση της οργανικής ύλης είναι εξαιρετικά σημαντική [42]. Μέσω μεθόδων διαχείρισης οργανικών αποβλήτων που θα αποσκοπούν στην αξιοποίηση του οργανικού φορτίου και των θρεπτικών συστατικών όπως είναι η αναερόβια χώνευση, καθίσταται δυνατή η παραγωγή καύσιμης ύλης αλλά και άλλων προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται το αποτύπωμα του άνθρακα μέσα από την καύση του μεθανίου και τη μετατροπή του σε διοξείδιο του άνθρακα. Επιπλέον, μέσω της κομποστοποίησης οργανικών υπολειμμάτων παράγεται υψηλής ποιότητας εδαφοβελτιωτικό το οποίο μειώνει τις ανάγκες της καλλιεργήσιμης γης για άρδευση, ενώ ταυτόχρονα μειώνει τις ανάγκες χρήσης χημικών λιπασμάτων. Ταυτόχρονα, η εφαρμογή εδαφοβελτιωτικού στη γη αυξάνει τον αποθηκευμένο άνθρακα των εδαφών και βοηθά στη διεργασία της φωτοσύνθεσης. Τέλος, η αποφυγή διάθεσης οργανικών αποβλήτων σε ΧΥΤΑ μειώνει σημαντικά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου προς την ατμόσφαιρα.

Σύμφωνα με τον A. Masullo, η υιοθέτηση της λογικής του μοντέλου της κυκλικής οικονομίας σε διάφορες φάσεις του κύκλου ζωής της οργανικής ύλης μπορεί να επιδράσει θετικά στο περιβάλλον και τα διάφορα οικοσυστήματα. Μερικά παραδείγματα φαίνονται παρακάτω:

- i. Η χρήση βιομεθανίου ως καύσιμο, το οποίο έχει προέλθει από την αξιοποίηση ενός τόνου οργανικού αποβλήτου μπορεί να αποτρέψει την εκπομπή στην ατμόσφαιρα έως και 155,5kg ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα.
- ii. Η μείωση της χρήση χημικών λιπασμάτων μέσω της χρήσης εδαφοβελτιωτικού υλικού προερχόμενου από κομποστοποίηση μπορεί να μειώσει την εκπομπή στην ατμόσφαιρα έως και 35,7kg ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα για κάθε τόνο οργανικού αποβλήτου.
- iii. Συνολικά -σύμφωνα με τον A. Masullo- από την ολοκληρωμένη διαχείριση ενός τόνου οργανικού αποβλήτου μπορεί να επιτευχθεί μείωση εκπομπών στην ατμόσφαιρα έως και 196,2kg ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα.

Συμπερασματικά, το υπάρχον γραμμικό μοντέλο οικονομικής ανάπτυξης συνδέεται με κατασπατάληση των φυσικών πόρων. Η σταδιακή μετάβαση από την υπάρχουσα γραμμική οικονομία σε μια όσο το δυνατόν περισσότερο κυκλική οικονομία δύναται να συμβάλει στην ελαχιστοποίηση της εξάρτησης από τους φυσικούς πόρους και ταυτόχρονα της παραγωγής αποβλήτων, επιφέροντας ευεργετικές συνέπειες για όλα τα οικοσυστήματα και συνολικά για το περιβάλλον. Στην κατεύθυνση αυτή επιχειρεί να συμβάλει η παρούσα διδακτορική διατριβή, στο πλαίσιο της οποίας αναλύεται η ανάπτυξη μιας μεθόδου για την ολοκληρωμένη διαχείριση του μεγαλύτερου από άποψη ποσοτήτων ρεύματος των ΑΣΑ: του ρεύματος των Βιοαποικοδομήσιμων Αστικών Αποβλήτων.

## 1.7 Το HORIZON2020 έργο Waste4think



Η εφαρμογή της κυκλικής οικονομίας απαιτεί εκτεταμένη πολιτική υποστήριξη σε ευρωπαϊκό, εθνικό, περιφερειακό και τοπικό επίπεδο. Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει ήδη αναλάβει δράση προς αυτή την κατεύθυνση. Υπάρχουν ήδη διάφορα προγράμματα χρηματοδότησης που δίνουν κίνητρα στις εθνικές κυβερνήσεις, την τοπική αυτοδιοίκηση και τις επιχειρήσεις να αξιοποιούν τα απόβλητα τους και να εφαρμόζουν στην πράξη της αρχές της κυκλικής οικονομίας. Ένα από τα σημαντικότερα και πιο υψηλά χρηματοδοτημένα σχετικά ερευνητικά έργα είναι το Waste4think στο πλαίσιο του Horizon 2020 [43].

Πρόκειται για ένα καινοτόμο πρόγραμμα που περιλαμβάνει ανάπτυξη διάφορων λύσεων στην κατεύθυνση της διαχείρισης απορριμμάτων με τη λογική της Κυκλικής Οικονομίας, μεταξύ των οποίων είναι και η συλλογή και αξιοποίηση οικιακών υπολειμμάτων τροφής. Το πρόγραμμα ήταν συνολικού προϋπολογισμού 10.500.000 ευρώ και σε αυτό συμμετέχουν 19 εταιρείες, ανάμεσα τους πανεπιστήμια, οργανισμοί τοπικής αυτοδιοίκησης, δημόσιοι φορείς, επιχειρήσεις και Μη Κυβερνητικές Οργανώσεις από επτά κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Στο πλαίσιο του προγράμματος εξετάστηκαν διαφορετικές περιπτώσεις αξιοποίησης και διαχείρισης οικιακών ΑΣΑ σε 4 ευρωπαϊκές πόλεις, το Χαλάνδρι από την Ελλάδα, το Cascais της Πορτογαλίας, το Zamudio της Ισπανίας και το Seveso της Ιταλίας.

Στον Δήμο Χαλανδρίου, η εφαρμογή του πιλοτικού προγράμματος, προϋπολογισμού 455.250 ευρώ, είχε ως κύριους στόχους την εφαρμογή εναλλακτικών τρόπων συλλογής και αξιοποίησης οικιακών ζυμώσιμων απορριμμάτων καθώς και την ενημέρωση και ευαισθητοποίηση των πολιτών μέσω της διάδοσης των αρχών της κυκλικής οικονομίας. Συγκεκριμένα, στα πλαίσια του προγράμματος εφαρμόστηκε ολοκληρωμένο σχέδιο διαλογής στην πηγή και τοπικής αξιοποίησης των ΤΥ. Από έρευνα που πραγματοποιήθηκε για λογαριασμό του Δήμου Χαλανδρίου την περίοδο 15-22 Δεκεμβρίου 2019, στο πλαίσιο του Waste4Think, προέκυψε ότι τα υπολείμματα τροφών αντιστοιχούν στο 40% των οικιακών αστικών στερεών απορριμμάτων του Δήμου, τα όποια πριν την εφαρμογή του προγράμματος κατέληγαν στο σύνολό τους στο ΧΥΤΑ.

Στο πρόγραμμα συμμετείχαν αρχικά εθελοντικά περίπου 1.000 κάτοικοι (300 νοικοκυριά), ενώ σε δεύτερη φάση το συγκεκριμένο σύστημα επεκτάθηκε στο 10% περίπου του συνόλου του πληθυσμού. Τελικός στόχος του προγράμματος είναι η μείωση των αποβλήτων που καταλήγουν σε ταφή σε ποσοστό μικρότερο του 10%.

Μέσω της εμπειρίας που προέκυψε από την εφαρμογή του Waste4think στο Δήμο Χαλανδρίου αποδείχθηκε στην πράξη ότι τα ΤΥ αποτελούν σημαντική πηγή πόρων, όταν δεν καταλήγουν στους ΧΥΤΑ όπως κατά κόρον γίνεται στη χώρα μας. Η αξιοποίηση των βιοαποβλήτων στο Δήμο Χαλανδρίου έγινε με συλλογή στην πηγή υπολειμμάτων τροφών, περιορισμένης πρόσβασης στον καφέ κάδο μόνο από ενημερωμένους κατοίκους. Ακολούθως, τα προδιαλεγμένα ΤΥ υφίσταντο ξήρανση και τεμαχισμό προς παραγωγή ενός προϊόντος βιομάζας (FORBI, Food Residue Biomass), το οποίο αποτελεί εξαιρετικό υπόστρωμα για την παραγωγή καυσίμων και προϊόντων. Μέσω της αξιοποίησης του FORBI, ο Δήμος Χαλανδρίου σε συνεργασία με το ΕΜΠ έχει επιτύχει την ανάπτυξη ενός πραγματικού υποδείγματος εφαρμογής στην πράξη της κυκλικής βιο-οικονομίας (Εικόνα 1-6).



**Εικόνα 1-6: Πρόγραμμα Κυκλικής Διαχείρισης Οργανικών Απορριμμάτων Δήμου Χαλανδρίου**

Κρίσιμη σε όλη τη διαδικασία διαχείρισης των βιοαποβλήτων αποδείχτηκε η προηγούμενη ενημέρωση των πολιτών και η χρήση κλειδιού για την πρόσβαση στον καφέ κάδο, για να διασφαλίζεται η μεγαλύτερη δυνατή καθαρότητα του υπολείμματος. Στο Δήμο Χαλανδρίου έφτασε στο εντυπωσιακό ποσοστό του 98%, με βάσει τα στοιχεία της έρευνας. Μετά την επί 3 χρόνια ανάπτυξη του προγράμματος και με τη βοήθεια 1000 περίπου εθελοντών, εφαρμόστηκε στο γενικό πληθυσμό για ένα ολόκληρο δημοτικό διαμέρισμα και σε 6 μόνο μήνες διαπιστώθηκε ότι η εκτροπή των βιοαποβλήτων άγγιξε το 50%, στα επίπεδα δηλαδή του εθνικού στόχου. Οι συμμετέχοντες στο πρόγραμμα διαπίστωσαν επίσης ότι με τη διαλογή στην πηγή των βιοαποβλήτων και των ανακυκλώσιμων μειώνεται το ποσοστό των απορριμμάτων που καταλήγουν στον πράσινο κάδο (σύμμεκτα) και από εκεί σε ΧΥΤΑ στο 10-15% του συνόλου.

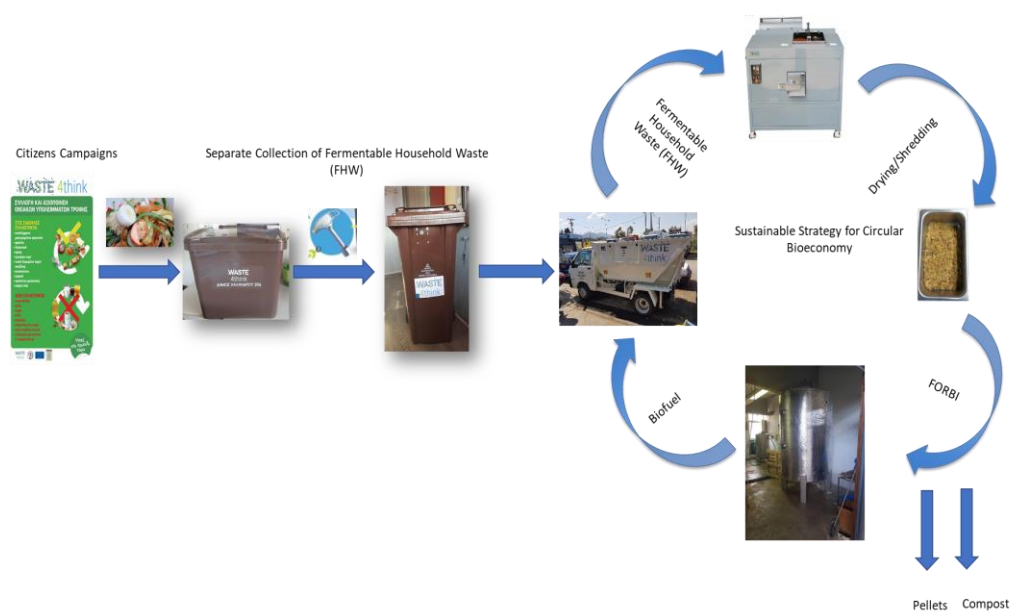
Με τη συνεργασία του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου το προϊόν αυτό βιομάζας δοκιμάστηκε πειραματικά για:

- Παραγωγή αέριων βιοκαυσίμων (μεθανίου, υδρογόνου και υθανίου)
- Παραγωγή υγρού βιοκαυσίμου (βιοαιθανόλης)
- Παραγωγή πέλετ για θέρμανση
- Εναλλακτικό καύσιμο στην τσιμεντοβιομηχανία
- Παραγωγή ηλεκτρισμού σε μικροβιακές κυψέλες καυσίμου
- Παραγωγή κομπόστ
- Παραγωγή προσροφητικού υλικού (ενεργού άνθρακα)

- Παραγωγή ζωοτροφής

Στην πράξη ο Δήμος Χαλανδρίου εφάρμοσε τους τρεις πλέον υποσχόμενους παρακάτω τρόπους αξιοποίησης:

- Παραγωγή αέριου βιοκαυσίμου, το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως καύσιμο για να κινείται ένα απορριματοφόρο του Δήμου, δημιουργώντας ένα κλειστό βρόγχο κυκλικής οικονομίας (Εικόνα 1-7).
- Παραγωγή κομπόστ, το οποίο διανεμήθηκε ως ανταποδοτικό όφελος στους πολίτες που συμμετείχαν εθελοντικά στο Waste4Think.
- Παραγωγή εναλλακτικού καυσίμου για την τσιμεντοβιομηχανία, το οποίο και χρησιμοποιήθηκε πειραματικά, με εξαιρετικά ενθαρρυντικά αποτελέσματα, στην τσιμεντοβιομηχανία TITAN.



**Εικόνα 1-7: Waste4think, παρουσίαση ενός υποδείγματος κλειστού βρόγχου κυκλικής οικονομίας**

Πέρα από τα παραπάνω, στο πλαίσιο του προγράμματος, ο Δήμος Χαλανδρίου ανέπτυξε πολλές και σημαντικές παράλληλες δράσεις που συνέβαλαν στην περαιτέρω ευαισθητοποίηση της κοινωνίας σε σχέση με την ορθή διαχείριση των απορριμμάτων.

#### Ψηφιακά σήματα

Στο πλαίσιο αυτό τοποθετήθηκαν ψηφιακά σήματα σε όλους τους κάδους απορριμμάτων της πόλης, έτσι ώστε να μπορούν οι πολίτες να ενημερώνονται αυτόματα και πλήρως για το ποια αντικείμενα μπορεί να δεχτεί ο καθένας ανάλογα με το χρώμα του. Η σηματοδότηση των κάδων έγινε με την τοποθέτηση ψηφιακών σημάτων τύπου QR (Quick Response).

Η σήμανση έγινε με μία μεθοδολογία που ονομάζεται επιστήμη του πολίτη, citizen science. Πρώτη φορά έγινε κάτι ανάλογο στο Χαλάνδρι και ήταν εντυπωσιακή η ανταπόκριση των κατοίκων του Χαλανδρίου.

Στα πλαίσια του Waste4Think αναπτύχθηκε επίσης η εφαρμογή Sustainable Citizen App, διαθέσιμη δωρεάν στα smartphones, με την οποία οι πολίτες μπορούν να διαπιστώσουν σε ποιο κάδο από αυτούς που χρησιμοποιούνται στο Χαλάνδρι (μπλε, κίτρινο, καφέ ή πράσινο) πρέπει να πετάξουν ένα συγκεκριμένο αντικείμενο.

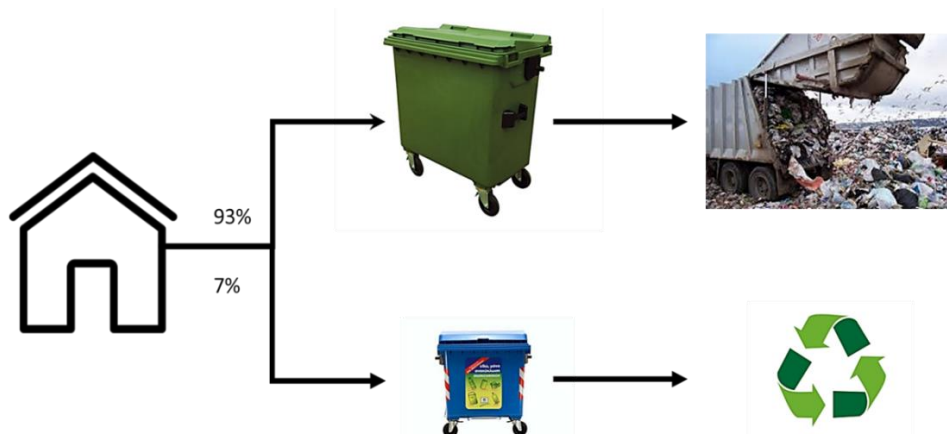
### Εκπαιδευτικά παιχνίδια

Σε συνεργασία με τους εταίρους του προγράμματος δημιουργήθηκαν επιπλέον μια σειρά από «σοβαρά» παιχνίδια για κινητά, τάμπλετ και υπολογιστές (Ways2sort, Mayor's Table, Virtual Cities, Sunflower κ.α.) για τη διαδραστική εξοικείωση μικρών και μεγάλων με την ανακύκλωση και την κυκλική οικονομία.

### Δράσεις στα σχολεία

Σε πέντε (5) σχολικές μονάδες πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο του προγράμματος, με τη στήριξη του Δήμου Χαλανδρίου, μια σειρά από δράσεις, προσαρμοσμένες στις διαφορετικές ηλικιακές ομάδες των παιδιών. Μεταξύ αυτών: Χαρακτηρισμός απορριμμάτων, κομποστοποίηση, εκπαιδευτικές επισκέψεις στις εγκαταστάσεις του Waste4Think, μαθήματα STEAM (επιστήμη, τεχνολογία και μαθηματικά), παραγωγή σαπουνιών και βιοντίζελ από τηγανόλαδα.

Συμπερασματικά, από την εμπειρία του Waste4Think προέκυψε ότι με τη διαλογή στην πηγή και την αξιοποίηση των βιοαποβλήτων με την παραγωγή FORBI, επιτυγχάνεται σημαντική μείωση των αποβλήτων που καταλήγουν στην υγειονομική ταφή (σε ποσοστό άνω του 40%), τη στιγμή που η γενική εικόνα Ελλάδα είναι ότι το 93% των αποβλήτων στους ΧΥΤΑ, ενώ μόλις το 7% στην ανακύκλωση (Εικόνα 1-8).



**Εικόνα 1-8: Υφιστάμενη κατάσταση διαχείρισης ΑΣΑ Δήμου Χαλανδρίου**

Σε σύγκριση επίσης με τα εναλλακτικά σενάρια αξιοποίησης που δοκιμάστηκαν προκύπτει ότι η επιλογή της παραγωγής FORBI και η αξιοποίησή του για παραγωγή βιοαερίου (για κίνηση των απορριμματοφόρων) και κομπόστ από την αναερόβια εκροή είναι η πιο οικονομική και φιλική προς το περιβάλλον λύση (Εικόνα 1-9).



Εικόνα 1-9: Το υπόδειγμα του Χαλανδρίου για τη διαχείριση των ΑΣΑ



## 2.0 Θεωρητικό Μέρος

### 2.1 Ανάλυση Σύστασης Αστικών Στερεών Αποβλήτων

Κύριο στάδιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής αποτελεί η ανάπτυξη ενός εύχρηστου πρωτοκόλλου δειγματοληψίας και ανάλυσης των ΑΣΑ, βάσει του οποίου θα σχεδιαστεί αλλά και θα παρακολουθείται η εφαρμογή ενός καινοτόμου συστήματος διαχείρισης των Οικιακών Ζυμώσιμων Απορριμμάτων του Δήμου Χαλανδρίου.

Η ανάπτυξη σε βάθος κατανόησης της σύστασης των ΑΣΑ, η οποία θα βασίζεται σε ακριβή και αξιόπιστα δεδομένα αποτελεί ιδιαίτερα σημαντικό παράγοντα για την ανάπτυξη ενός φιλικού προς το περιβάλλον και οικονομικά βιώσιμου σχεδίου διαχείρισης τους, τόσο σε τοπικό όσο και σε περιφερειακό και εθνικό επίπεδο. Επιπλέον, αποτελεί εξαιρετικής σημασίας προϋπόθεση για την παρακολούθηση της απόδοσης του οποιουδήποτε συστήματος διαχείρισης των ΑΣΑ μετά την εφαρμογή του. Ωστόσο, δεν υπάρχει κάποια τυποποιημένη και κοινά αποδεκτή μέθοδος για τη μελέτη της σύστασης των ΑΣΑ, αλλά αντιθέτως ένα μεγάλο πλήθος προσεγγίσεων που περιγράφονται στη διεθνή βιβλιογραφία[44], [45].

Τυπικά, η μελέτη της σύστασης των αποβλήτων αποτελείται από τρία στάδια: (1) τη δειγματοληψία, (2) το διαχωρισμό του δείγματος στα επιμέρους ρεύματα (με το επίπεδο λεπτομέρειας και τον αριθμό των ρευμάτων να καθορίζεται από το στόχο της μελέτης) και (3) το χειρισμό, την ερμηνεία και την αξιοποίηση των συγκεντρωμένων δεδομένων. Τα πρώτα δύο στάδια (δηλαδή της δειγματοληψίας και του διαχωρισμού) αποτελούν κρίσιμης σημασίας παράγοντες για την τελική αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της μελέτης. Η απουσία διεθνών προτύπων για την ανάλυση της σύστασης των στερεών αποβλήτων, έχει διαχρονικά οδηγήσει στην εφαρμογή ενός μεγάλου αριθμού μεθόδων δειγματοληψίας και διαχωρισμού καθιστώντας τη συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των διαφόρων μελετών αδύνατη[46].

Επιπλέον, λόγω του υψηλού βαθμού ετερογένειας των ΑΣΑ, η επίδραση των τοπικών συνθηκών, όπως για παράδειγμα τα διαφορετικά συστήματα διαλογής στην πηγή, οι τοπικές οδηγίες διαχωρισμού καθώς και τα συστήματα συλλογής και μεταφοράς σε συνδυασμό με την ποικιλία των μεθόδων ανάλυσης της σύστασης γενικά περιορίζει το εύρος των δυνατών εφαρμογών της εκάστοτε μεθόδου.

Γενικά, η ποιότητα των δεδομένων που λαμβάνονται από την εκάστοτε μελέτη εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διαδικασία δειγματοληψίας που ακολουθείται. Η δειγματοληψία στερεών αποβλήτων μπορεί να υλοποιηθεί με τρεις μεθόδους [45]:

- i. Απευθείας δειγματοληψία στην πηγή, δηλαδή στον οικιακό κάδο ενός αριθμού νοικοκυριών

Η συγκεκριμένη μεθοδολογία είναι αρκετά διαδεδομένη, ωστόσο θεωρείται κατάλληλη κυρίως στις περιπτώσεις όπου η μέθοδος συλλογής των ΑΣΑ που εφαρμόζεται είναι η “πόρτα-πόρτα”, η οποία δεν εφαρμόζεται στο Δήμο Χαλανδρίου. Επιπλέον, η συγκεκριμένη μέθοδος ενδέχεται να οδηγήσει σε ανακριβή αποτελέσματα, εφόσον οι πολίτες των νοικοκυριών θα έχουν εκ των προτέρων ενημερωθεί για την επερχόμενη ανάλυση.

- ii. Δειγματοληψία από τους κάδους συλλογής που βρίσκονται στο δρόμο

Απαραίτητο πρώτο βήμα για την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου αποτελεί η εξεύρεση και επιλογή των κατάλληλων κάδων στους δρόμους του υπό μελέτη δήμου, ώστε να καλύπτουν τις προδιαγραφές και τους στόχους της μελέτης. Στη συνέχεια το υλικό συλλέγεται από όχημα ξεχωριστό από αυτό που εκτελεί τα κανονικά δρομολόγια συλλογής. Το υλικό που συλλέγεται στη

συνέχεια μεταφέρεται σε κατάλληλο σημείο (π.χ. ΚΔΑΥ, Κέντρο Διαλογής Ανακυκλώσιμων Υλικών), ώστε να υλοποιηθεί ο διαχωρισμός και η ζύγιση των υλικών.

Η συγκεκριμένη μέθοδος προσφέρει μία σειρά πλεονεκτημάτων, καθώς προσφέρει τη δυνατότητα για πιο ακριβή αποτελέσματα, λόγω ακριβέστερης διαστρωμάτωσης των δειγμάτων και μικρότερου βαθμού ανάμιξης και συμπίεσης. Ωστόσο, συχνά δεν είναι εγγυημένη η πηγή των αποβλήτων καθώς και άλλοι άνθρωποι πλην των περιοίκων μπορεί να εναποθέτουν απόβλητα στους συγκεκριμένους κάδους (π.χ. επιχειρήσεις ή περαστικοί).

iii. Δειγματοληψία από τα οχήματα συλλογής και μεταφοράς των ΑΣΑ.

Για την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου απαιτείται η εξεύρεση και επιλογή των κατάλληλων δρομολογίων συλλογής, ώστε να είναι αντιπροσωπευτικά για το σύνολο του δήμου ή της υπό μελέτη περιοχής. Για τα συγκεκριμένα δρομολόγια συλλογής, όταν φτάνουν τα απορριμματοφόρα στο σημείο εκφόρτωσης, εναποθέτουν το μεταφερόμενο περιεχόμενό τους σε ξεχωριστό, ειδικά διαμορφωμένο χώρο, ώστε να υλοποιηθεί η εξαγωγή του δείγματος, ο διαχωρισμός και η ζύγιση των υλικών.

Η δειγματοληψία μέσω των οχημάτων μεταφοράς είναι απλούστερη επιχειρησιακά, καθώς δεν απαιτείται οποιαδήποτε επιπλέον λειτουργία, μιας και βασίζεται στα ήδη υπάρχοντα δρομολόγια συλλογής και μεταφοράς. Από την άλλη πλευρά απαιτεί υψηλό βαθμό προγραμματισμού και οργάνωσης, προκειμένου να οδηγήσει σε ακριβή αποτελέσματα. Σημαντικό χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης μεθόδου απαιτεί η ανάγκη εξαγωγής δείγματος από τη συνολική μεταφερόμενη από το απορριμματοφόρο ποσότητα.

Συνοπτικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου παρουσιάζονται παρακάτω (Πίνακας 2-1).

**Πίνακας 2-1: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μεθόδων δειγματοληψίας ΑΣΑ**

<b>Μέθοδος δειγματοληψίας</b>	<b>Πλεονεκτήματα</b>	<b>Μειονεκτήματα</b>
<b>Δειγματοληψίας σε επίπεδο κάδου</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Επιτρέπει πιο ακριβή δειγματοληψία, καθώς συνδέεται με συγκεκριμένες περιοχές του Δήμου.</li><li>• Το συλλεγόμενο δείγμα δεν έχει υποστεί συμπίεση, οπότε και ο διαχωρισμός είναι ευκολότερος και ταχύτερος.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Αβεβαιότητα σχετικά με την προέλευση των συλλεγόμενων αποβλήτων, καθώς μπορεί να προέρχονται από περαστικούς εκτός από τους περιοίκους.</li><li>• Υψηλότερο κόστος, καθώς απαιτείται ξεχωριστό όχημα για τη συλλογή και μεταφορά του δείγματος, καθώς και περισσότερες εργατώρες για τη συλλογή του δείγματος.</li><li>• Υψηλότερος βαθμός λειτουργικής πολυπλοκότητας</li></ul>

<b>Δειγματοληψία σε επίπεδο νοικοκυριού</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Επίτευξη μέγιστου βαθμού αξιοπιστίας όσο αφορά την πηγή των αποβλήτων.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ανάγκη προγραμματισμού και συνεννόησης με τα νοικοκυριά.</li> <li>• Αβεβαιότητα ως προς την ακρίβεια των δειγμάτων λόγω “προετοιμασίας” των πολιτών.</li> </ul>
<b>Δειγματοληψία σε επίπεδο οχήματος συλλογής και μεταφοράς</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Τα δείγματα είναι αντιπροσωπευτικά μεγαλύτερων τμημάτων της υπό μελέτη περιοχής.</li> <li>• Λειτουργικά απλούστερη διαδικασία, καθώς δεν απαιτείται ξεχωριστό δρομολόγιο συλλογής των δειγμάτων.</li> <li>• Χαμηλότερο κόστος.</li> <li>• Επίτευξη μεγαλύτερου όγκου δείγματος σε μικρότερες περιόδους.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Λιγότερο ακριβής διαστρωμάτωση δειγμάτων.</li> <li>• Η εξαγωγή δείγματος από τη συλλεγμένη ποσότητα απαιτεί επιπλέον εργατώρες.</li> <li>• Η ανάμιξη των αποβλήτων στο όχημα συλλογής και μεταφοράς ενδέχεται να οδηγήσει σε διασταυρούμενες επιμολύνσεις του δείγματος, κυρίως όσον αφορά στην υγρασία που απορροφάται από το χαρτί/χαρτόνι.</li> <li>• Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται όχημα με συμπίεση, τότε αυτή καθιστά δυσχερέστερη τη διαλογή των υλικών.</li> </ul>

Λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου, τις τεχνικές δυνατότητες του Δήμου Χαλανδρίου αλλά και το στόχο της ανάλυσης επιλέχθηκε η δειγματοληψία στο επίπεδο κάδου, ώστε να επιτευχθεί ο μέγιστος βαθμός ακρίβειας και επαναληψιμότητας των αποτελεσμάτων, χωρίς σημαντική αύξηση του λειτουργικού κόστους και της πολυπλοκότητας.

## 2.2 Φυσικές διεργασίες επεξεργασίας τροφικών υπολειμμάτων

### 2.2.1 Ξήρανση/Τεμαχισμός

Τα τροφικά υπολείμματα αποτελούν μία δυνητικά πολύτιμη πρώτη ύλη προς αξιοποίηση μέσω ενός μεγάλου εύρους διεργασιών. Ωστόσο, λόγω των φυσικοχημικών και μορφολογικών χαρακτηριστικών τους, αλλά και του υψηλού βαθμού εποχικής και γεωγραφικής ετερογένειας και ποικιλομορφίας εμφανίζουν σημαντικούς περιορισμούς όσον αφορά στη βελτιστοποίηση των διεργασιών της μετατροπής του οργανικού φορτίου.

Η πλέον υποσχόμενη λύση για την αντιμετώπιση των συγκεκριμένων περιορισμών είναι η εφαρμογή μεθόδων προ-επεξεργασίας προς μετασχηματισμό της οργανικής ύλης σε πιο εύκολα αποικοδομήσιμες μορφές, μέσω των οποίων επιτυγχάνονται υψηλότερες αποδόσεις. Οι πιθανές τεχνολογικές προσεγγίσεις για την προ-επεξεργασία των τροφικών υπολειμμάτων εκτείνονται από μηχανικές και θερμικές μεθόδους έως βιολογικές και χημικές. Επιπλέον, η εφαρμογή τεχνικών προ-επεξεργασίας των ΤΥ μπορεί να αποτελεί το κλειδί για την αντιμετώπιση ενός εκ των σημαντικότερων βιοχημικών περιορισμών της Αναερόβιας Χώνευσης: την ανάγκη για εφαρμογή υψηλών Υδραυλικών Χρόνων Παραμονής και των χαμηλών αποδόσεων βιοαποικοδόμησης.

Η πλέον κοινή βιβλιογραφικά προσέγγιση είναι η θερμική προ-επεξεργασία των τροφικών υπολειμμάτων σε θερμοκρασίες μεταξύ των 90 °C και 120 °C [47]–[51]. Όσον αφορά συγκεκριμένα στην αναερόβια χώνευση, οι περισσότερες μελέτες επικεντρώνονται στην επίδραση της προ-επεξεργασίας στην απόδοση της διεργασίας, χωρίς να συμπεριλαμβάνουν στην αξιολόγησή της τις ενεργειακές ανάγκες για την εφαρμογή της συγκεκριμένης τεχνικής.

Η θερμική προ-επεξεργασία των ΤΥ, μέσω της οποίας ευνοείται η υδρόλυση των μακρομορίων υπό συγκεκριμένες χρονικές και θερμοκρασιακές συνθήκες, οδηγεί στη αποσύνθεση των κυτταρικών μεμβρανών και διευκολύνει τη διάλυση των ανθεκτικότερων οργανικών ενώσεων [52].

Επιπλέον, ο ταυτόχρονος τεμαχισμός των ΤΥ αφενός ευνοεί την ίδια τη διεργασία της ξήρανσης καθώς αυξάνει την ελεύθερη επιφάνεια του υποστρώματος και αφετέρου ενισχύει την ομογενοποίηση του μίγματος των ΤΥ.

Συνολικά, μέσω της συγκεκριμένης τεχνικής προ-επεξεργασίας επιτυγχάνεται η παραγωγή ενός καταλληλότερου (σε σχέση με το αρχικό ρεύμα ΤΥ) προϊόντος το οποίο χαρακτηρίζεται από ομοιογένεια, υψηλότερο βαθμό βιοσταθεροποίησης (που το καθιστά κατάλληλο για αποθήκευση σε συνήθεις συνθήκες για μεγάλες χρονικές περιόδους), ενώ είναι φιλικότερο προς τις απαιτήσεις του αστικού ιστού καθώς είναι απελευθερωμένο από οσμές.

## **2.2.2 Πελλετοποίηση**

### **2.2.2.1 Γενικά στοιχεία**

Τα πέλλετς (pellets) αποτελούν μία συμπυκνωμένη μορφή βιομάζας, η οποία παράγεται γενικά από πυκνοποίηση υλικών όπως πριονίδια, γρασίδι, υπολείμματα τροφών αλλά και άλλες μορφές οργανικής ύλης. Οι πιο συχνά εφαρμοσμένες μορφές πυκνοποίησης της βιομάζας είναι η μπρικετοποίηση και η πελλετοποίηση, οι οποίες αποτελούν παρόμοιες τεχνικές ωστόσο, το τελικό προϊόν διαφέρει ως προς το μέγεθος με τις μπρικέτες γενικά να έχουν μεγαλύτερη διάμετρο (περί τα 40 mm) σε σχέση με τα πέλλετς (περί τα 10 mm).

Στόχο της πυκνοποίησης της αρχικής βιομάζας για την παραγωγή πέλλετς ή μπρικετών αποτελεί η αύξηση της ενεργειακής πυκνότητας, διεργασία που επιφέρει ποικίλα πλεονεκτήματα όπως το μειωμένο κόστος μεταφοράς και η εξοικονόμηση αποθηκευτικού χώρου, καθώς και η παραγωγή ενός ομοιόμορφου υλικού κατάλληλου για τροφοδοσία σε καυστήρες και καύση [53]. Παράλληλα, με την εφαρμογή πίεσης και υψηλής θερμοκρασίας κατά την πελλετοποίηση επιτυγχάνεται σημαντική μείωση της υγρασίας, καθώς εξατμίζεται σημαντικό μέρος της ποσότητας του νερού που βρίσκεται στην αρχική ποσότητα βιομάζας [54]. Τέλος, κατά τη διάρκεια της καύσης η συμπυκνωμένη βιομάζα παράγει μικρότερη ποσότητα εκπεμπόμενων σωματιδίων σε σχέση με την ασυμπιεστή [55].

### 2.2.2.2 Παραγωγή Πέλλετ

Η παραγωγή πέλλετ βασίζεται στην εφαρμογή πίεσης σε τιμές που ξεπερνούν τα 50 MPa και φτάνουν έως και τα 200 MPa, με αποτέλεσμα την αύξηση των τριβών, η οποία προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας, που με τη σειρά της οδηγεί τα οργανικά μακρομόρια, όπως η λιγνίνη και η ημικυτταρίνη να υπερβαίνουν τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης και να λειτουργούν ως συγκολλητική ουσία για το πέλλετ. Οι ακριβείς συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας εξαρτώνται από το είδος του πελλετοποιητή, την υγρασία, το ρυθμό τροφοδοσίας κ.α. [56].

### 2.2.2.3 Απαιτήσεις & Χαρακτηριστικά Πέλλετ

Η παραγωγή πέλλετ από βιομάζα προερχόμενη από οικιακά ζυμώσιμα απορρίμματα αποτελεί καινοτόμο τεχνολογική προσέγγιση και επομένως δεν υπάρχουν διαθέσιμες συγκεκριμένες προδιαγραφές. Ωστόσο, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τυποποίησης (CEN: Comité Européen de Normalisation) έχει ορίσει απαραίτητες προδιαγραφές μέσω του ISO 17225-6:2014 για τα «μη ξυλώδους προέλευσης» πέλλετ από το Μάρτιο του 2014. Σύμφωνα με το ISO 17225-6:2021, ορίζονται διαφορετικές προδιαγραφές για δύο διαφορετικούς τύπους πέλλετ:

- Τύπος Α: Πέλλετ από χορδή, φρουτώδη, υδρόβια βιομάζα και μείγματά τους.
- Τύπος Β: Πέλλετ από άχυρα δημητριακών, μίσχανθο, φάλαρη, καλαμοειδή.

Τα πέλλετ από ΤΥ είναι συμβατά με την πρώτη κατηγορία, συνεπώς είναι κατάλληλα για σύγκριση με αυτά τα όρια, ώστε να διαπιστωθεί αν συμμορφώνονται με τις απαιτήσεις της ΕΕ. Οι σημαντικότερες εκ των παραμέτρων που περιγράφονται από το ISO 17225-6:2021 είναι:

#### i. Μήκος και διάμετρος (L,D):

Οι διαστάσεις των πέλλετ επηρεάζουν σημαντικά τις μηχανικές αντοχές τους. Ο λόγος L/D (μήκος/διάμετρο του κυλινδρικού πέλλετ) αυξάνει τις αντοχές στις κρούσεις, ωστόσο, η υπερβολική αύξησή του εμποδίζει την παραγωγή τους στη μήτρα μορφοποίησης [55],[57]. Οι συνήθεις διαστάσεις είναι  $D = 6-8 \text{ mm}$  και  $L \geq 40 \text{ mm}$ . Επιπλέον, η καθορισμένη σχετική γεωμετρία του στερεού πυκνοποιημένου καυσίμου επιτρέπει ευκολότερη αποθήκευση, καλύτερο χειρισμό και μεταφορά, καθώς και αυτοματοποιημένη τροφοδοσία σε μεγάλη βιομηχανική κλίμακα.

#### ii. Υγρασία (M):

Η υγρασία των πέλλετ μετά την παραγωγή και ψύξη τους συνιστάται να είναι μεταξύ 5-12%. Υψηλότερο ποσοστό υγρασίας από το προτεινόμενο αυτό όριο, οδηγεί σε μικροβιακή αποσύνθεσή τους και στη δημιουργία δύο φάσεων πέλλετ που οδηγεί σε διόγκωση (swelling), αποσύνθεση τους (disintegration). Υγρασία μικρότερη της συνιστώμενης, έχει ως αποτέλεσμα πέλλετ με μικρή μηχανική αντοχή. Επίσης, για πέλλετ με υγρασία μικρότερη του 4%, παρατηρείται το φαινόμενο της απορρόφησης μορίων νερού από το περιβάλλον προς το πέλλετ λόγω της διαφοράς συγκέντρωσης, καθιστώντας τα πέλλετ εύθραυστα. Από την άλλη πλευρά, η χαμηλή (εντός των ορίων) υγρασία οδηγεί σε υψηλότερη Κατωτέρα Θερμογόνο Δύναμη [54].

#### iii. Στάχτη:

Η περιεκτικότητα του πέλλετ σε στάχτη/τέφρα επηρεάζει σημαντικά την ποιότητα του, ως στερεού καυσίμου. Συγκεκριμένα, η χαμηλή περιεκτικότητα τέφρας οδηγεί σε [54]:

- Υψηλότερη θερμογόνο δύναμη
- Ευκολότερη θερμοχημική και βιοχημική μετατροπή
- Χαμηλότερες εκπομπές λόγω καύσης

- Μείωση λειτουργικού κόστους όσον αφορά τη μεταφορά, επεξεργασία, αποικοδόμηση και αξιοποίηση της τέφρας, καθώς και την τεχνολογία δέσμευσης και επεξεργασίας απαερίων της καύσης.
- Μειωμένη συχνότητα καθαρισμού οικιακών και βιομηχανικών καυστήρων, καθώς δεν υφίσταται συσσώρευση στάχτης.

Γενικά, η περιεκτικότητα του πέλλετ σε τέφρα εξαρτάται αποκλειστικά από το είδος και τη σύσταση της πρώτης ύλης.

#### iv. **Μηχανική Αντοχή:**

Όταν η μηχανική αντοχή των πέλλετ είναι χαμηλή, μπορεί να δημιουργηθεί μεγάλη ποσότητα σκόνης και κόκκων, μπλοκάροντας την τροφοδοσία και αυξάνοντας την εκπομπή αιωρούμενων σωματιδίων κατά την καύση, καθώς και σκόνης κατά τη διαχείριση των πέλλετ. Επίσης, μπορεί να οδηγήσει σε εκρήξεις λόγω διαρροής της σκόνης [54]. Για τον έλεγχο της μηχανικής αντοχής του καυσίμου πέλλετ έχουν αναπτυχθεί και εφαρμόζονται κατάλληλες δοκιμασίες [58].

#### v. **Κόκκοι και σκόνη:**

Ως κόκκοι και σκόνη χαρακτηρίζονται τα σωματίδια διαμέτρου έως 3.15 mm. Τα σωματίδια αυτών των διαστάσεων δημιουργούν προβλήματα σχετικά με την Υγιεινή και Ασφάλεια κατά την καύση των πέλλετ και δημιουργούν αποθέσεις που οδηγούν στη δημιουργία σκωρίας στους καυστήρες. Επίσης, η ομοιογένεια του καυσίμου μειώνεται και υπάρχει κίνδυνος εκρήξεων και απότομης αύξησης της θερμοκρασίας [57]. Για την αφαίρεση της σκόνης και των κόκκων εφαρμόζεται μέθοδος με χρήση πίδακα αέρα [59].

#### vi. **Πρόσθετα:**

Τα πρόσθετα, όπως ορίζεται από την οδηγία DINENISO 17225-6, είναι συστατικά τα οποία διευκολύνουν την παραγωγή και αναβαθμίζουν την ποιότητα του τελικού προϊόντος.

#### vii. **Κατωτέρα Θερμογόνος Δύναμη:**

Η Κατωτέρα Θερμογόνος Δύναμη αποτελεί ζωτικής σημασίας χαρακτηριστικό του καυσίμου, καθώς ο σκοπός παραγωγής των πέλλετ είναι η καύση για εκμετάλλευση της θερμικής τους ενέργειας. Δίνονται διάφοροι ορισμοί κατά καιρούς, αλλά σύμφωνα με τη Διεθνή Ένωση Ενέργειας η Κατωτέρα Θερμογόνος Δύναμη ενός καυσίμου είναι η ολική θερμότητα που παράγεται από την καύση του, μείον τη θερμότητα που απαιτείται για την εξάτμιση της υγρασίας που περιέχεται στο καύσιμο ή παράγεται κατά τη διάρκειά της [60].

#### viii. **Πυκνότητα:**

Η πυκνότητα του στερεού καυσίμου αποτελεί έναν ιδιαίτερα σημαντικό παράγοντα που επηρεάζει τόσο την ποιότητα της καύσης του όσο και τα λειτουργικά κόστη του προϊόντος. Συγκεκριμένα, αυξημένη πυκνότητα οδηγεί σε χαμηλότερες απαιτήσεις σε αποθηκευτικό χώρο, μικρότερα μέσα μεταχείρισης των καυσίμων και χαμηλότερο κόστος μεταφοράς. Επίσης, αυξημένη πυκνότητα αποτελεί ένδειξη αυξημένης μηχανικής αντοχής και οδηγεί σε μειωμένη εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου και υψηλότερη θερμογόνο δύναμη [53], [54], [57].

#### ix. **Στοιχειακή σύσταση:**

Οι απαιτούμενες από τη νομοθεσία στοιχειακές αναλύσεις περιλαμβάνουν τα: Άζωτο (N), Θείο (S), Χλώριο (Cl), Αρσενικό (As), Κάδμιο (Cd), Χρώμιο (Cr), Χαλκός (Cu), Μόλυβδος (Pb), Υδράργυρος (Hg), Νικέλιο (Ni) και Ψευδαργυρος (Zn). Ειδικά για τα άζωτο, θείο και χλώριο, όταν βρίσκονται σε υψηλές συγκεντρώσεις, δημιουργούν μακροπρόθεσμα οξειδώσεις και διαβρώσεις στους καυστήρες των πέλλετ, λόγω των παραγόμενων απαερίων. Από την άλλη το αρσενικό, το

κάδμιο, το χρώμιο, ο χαλκός, ο μόλυβδος, ο υδράργυρος, το νικέλιο και ο ψευδάργυρος αποτελούν τοξικά μέταλλα με πολυάριθμες επιπτώσεις στην υγεία. Κατά την καύση βιομάζας που τα περιέχει σε βιομηχανικούς και οικιακούς καυστήρες δημιουργείται τέφρα, η οποία πρέπει να καθαρίζεται συχνά.

## **2.3 Βιολογικές διεργασίες επεξεργασίας τροφικών υπολειμμάτων**

### **2.3.1 Αναερόβια χώνευση**

#### **2.3.1.1 Εισαγωγή**

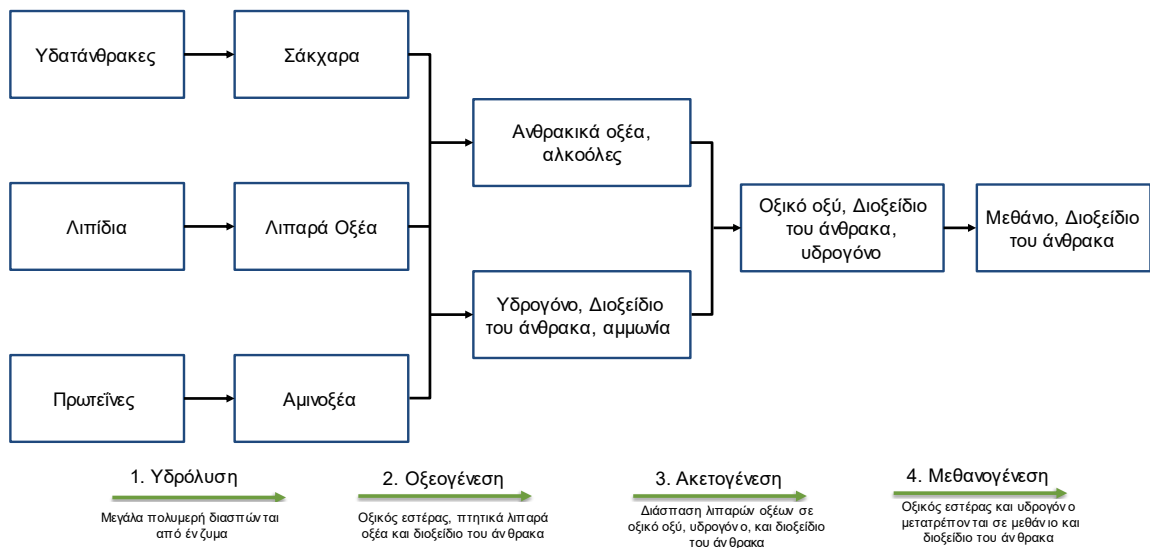
Η αναερόβια χώνευση καταγράφεται για πρώτη φορά ιστορικά κατά τον 10<sup>ο</sup> αιώνα όταν οι Ασύριοι την αξιοποιούσαν για να ζεστάνουν νερό. Η ιστορική επανεμφάνισή της έγινε τον 17<sup>ο</sup> αιώνα όταν ο Ιταλός φυσικός Alessandro Volta παρατήρησε πως από τα ιζήματα του πυθμένα μιας βαλτώδους λίμνης εκπέμπονται αέρια τα οποία συνέλεξε και απέδειξε πως ήταν εύφλεκτα. Έτσι, οι επιστήμονες άρχισαν να μελετούν πως μπορούν να παράγουν αέρια καύσιμα με βιολογικές διεργασίες. Εν τω μεταξύ, έναν αιώνα νωρίτερα, το 1680, ο Ολλανδός έμπορος και επιστήμονας Antoni van Leeuwenhoek ήταν ο πρώτος επιστήμονας που είχε παρατηρήσει αναερόβιους μικροοργανισμούς. Βέβαια εκείνη την εποχή δεν ήταν ακόμη κατανοητή η ανακάλυψη του αυτή. Χρειάστηκε να φτάσουμε στο έτος 1862 ώστε να πιστοποιηθεί η ύπαρξη αναερόβιων βακτηρίων από τον γνωστό Γάλλο χημικό και λεγόμενο “πατέρα της μικροβιολογίας” Louis Jean Pasteur. Από εκείνες τις πρώτες παρατηρήσεις, η επιστημονική κοινότητα έχει φτάσει σήμερα στον ορισμό και την, σε βάθος, ανάλυση της διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης [61].

Ως αναερόβια χώνευση ορίζεται η βιοχημική διεργασία κατά την οποία σύνθετα οργανικά υλικά αποσυντίθεται απουσία οξυγόνου με τη συνδυασμένη δράση μικτής καλλιέργειας αναερόβιων μικροοργανισμών. Περιλαμβάνει ένα μεγάλο αριθμό μικροβιακών πληθυσμών οι οποίοι συνδέονται μέσω των διαφόρων υποστρωμάτων και ιδιαίτερων προϊόντων τους. Η συνολική διεργασία περιλαμβάνει άμεσες και έμμεσες συμβιωτικές σχέσεις μεταξύ διαφορετικών ομάδων μικροοργανισμών. Οι μικροοργανισμοί αυτοί ως τελικό στάδιο έχουν την παραγωγή βιοαερίου με κύρια συστατικά το μεθάνιο και το διοξείδιο του άνθρακα.

Σημειώνεται πως το ενδιαφέρον για τη διεργασία αυτή αυξήθηκε σημαντικά όταν έγινε φανερό πως είναι η πιο συμφέρουσα οικονομικά βιολογική μέθοδος επεξεργασίας διαφόρων οργανικών αποβλήτων (αστικών, βιομηχανικών, ζωικών, φυτικών), αφενός λόγω της υψηλής ανάκτησης ενέργειας που λαμβάνει χώρα με την παραγωγή του βιοαερίου και αφετέρου λόγω των περιορισμένων περιβαλλοντικών επιπτώσεων κατά τη λειτουργία της. Όσον αφορά τα αστικά και οικιακά στερεά απορρίμματα, έρευνες δείχνουν πως σχεδόν το 50-60% αυτών αποτελούνται από βιοαποικοδομήσιμα υλικά. Το γεγονός αυτό τα καθιστά πολύ ενδιαφέροντα για την εφαρμογή τεχνολογιών αναερόβιας χώνευσης [62].

#### **2.3.1.2 Τα στάδια της αναερόβιας χώνευσης**

Η αναερόβια χώνευση διακρίνεται σε τέσσερα κύρια στάδια: την υδρόλυση, την οξεογένεση, την οξικογένεση και τη μεθανογένεση. Οι συνεργιστικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διαφόρων ομάδων μικροοργανισμών είναι απαραίτητες σε αυτά τα στάδια. Στο Διάγραμμα 2-1 φαίνονται τα στάδια αυτά, τα οποία αναλύονται στη συνέχεια [61].



## Διάγραμμα 2-1: Στάδια αναερόβιας χώνευσης

### Υδρόλυση

Το πρώτο στάδιο της αναερόβιας χώνευσης είναι η υδρόλυση. Στο στάδιο αυτό, αδιάλυτες και πολύπλοκες πολυμερικές ενώσεις όπως οι πρωτεΐνες, οι υδατάνθρακες και τα λιπίδια διασπώνται από εξωκυτταρικά ένζυμα σε απλούστερα μονομερή μικρομόρια όπως μονοσακχαρίτες, αμινοξέα και λιπαρά οξέα, ώστε να εισχωρήσουν διαμέσου της κυτταρικής μεμβράνης στο κύτταρο.

### Οξεογένεση

Κατά το στάδιο της οξεογένεσης, οι σχετικά απλές και διαλυτές ενώσεις που προκύπτουν από το στάδιο της υδρόλυσης ζυμώνονται ή οξειδώνονται αναερόβια. Ως αποτέλεσμα, παράγονται διοξείδιο του άνθρακα, αέριο υδρογόνο, αλκοόλες, οργανικά οξέα, και ορισμένες οργανικές ενώσεις του θείου και του αζώτου. Από τις δράσεις του σταδίου αυτού προκύπτουν και νέα βακτηριακά κύτταρα. Από τις παραπάνω ουσίες ορισμένες όπως το οξικό οξύ, η μεθανόλη, η μεθυλαμίνη και το μυρμηκικό οξύ αποτελούν υπόστρωμα για τους μεθανογόνους μικροοργανισμούς του τελευταίου σταδίου. Όμως, κάποια πτητικά λιπαρά οξέα, όπως το προπιονικό και το βουτυρικό οξύ, καθώς και η αιθανόλη πρέπει πρώτα να αποδομηθούν από τα ζυμωτικά βακτήρια σε οξικό οξύ, ώστε να μπορέσουν να αξιοποιηθούν από τα μεθανοβκτήρια. Το οξικό οξύ, όπως αναφέρεται παρακάτω, είναι το οργανικό οξύ που χρησιμοποιούν κατά κύριο λόγο οι μεθανογόνοι μικροοργανισμοί για την παραγωγή του βιοαερίου.

### Οξικογένεση

Κατά το τρίτο στάδιο, αυτό της οξικογένεσης, τα πτητικά λιπαρά οξέα και τα άλλα προϊόντα της οξεογένεσης, όπως οι αλκοόλες, καταβολίζονται σε οξικό οξύ ενώ παράλληλα παράγεται υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα. Το υδρογόνο που παράγεται συσσωρεύεται και αυξάνεται η μερική του πίεση σημαντικά. Αυτή η αύξηση έχει ως αποτέλεσμα την παύση της δραστηριότητας των οξικογόνων βακτηρίων και τερματισμό της παραγωγής οξικού οξέος. Τα οξικογόνα βακτήρια μπορούν να επιβιώσουν μόνο σε χαμηλές συγκεντρώσεις υδρογόνου άρα πρέπει με κάποιο τρόπο να απομακρυνθεί το υδρογόνο που τα ίδια παράγουν. Πράγματι, τα μεθανογόνα βακτήρια του επόμενου σταδίου καταναλώνουν την περίσσεια αυτή υδρογόνου για

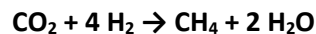


την παραγωγή του μεθανίου και επομένως η συγκέντρωση και άρα και η μερική πίεση του υδρογόνου εντέλει παραμένει σε φυσιολογικά επίπεδα. Δηλαδή, τα οξικογόνα και τα μεθανογόνα βακτήρια συμβιώνουν αφού τα απόβλητα του μεταβολισμού των πρώτων αποτελούν κατάλληλο υπόστρωμα για τη δράση των δεύτερων.

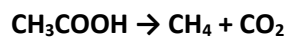
### **Μεθανογένεση**

Το τελικό στάδιο της διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης είναι η μεθανογένεση. Είναι το στάδιο όπου τα μεθανογόνα βακτήρια παράγουν μεθάνιο μέσω δύο διαφορετικών μεταβολικών οδών.

Κατά την πρώτη μεταβολική οδό, μεθανογόνα βακτήρια, που ονομάζονται υδρογονοχρήστες, χρησιμοποιούν το υδρογόνο ως υπόστρωμα και μαζί με το διαθέσιμο διοξείδιο του άνθρακα παράγουν μεθάνιο σύμφωνα με την παρακάτω χημική εξίσωση:



Στη δεύτερη μεταβολική οδό, μεθανογόνοι μικροοργανισμοί, που ονομάζονται οξικοκλαστικοί, καταναλώνουν το οξικό οξύ και μέσα από την αποκαρβοξυλίωσή του παράγουν μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα. Η δράση αυτή αποτυπώνεται στην παρακάτω χημική εξίσωση:

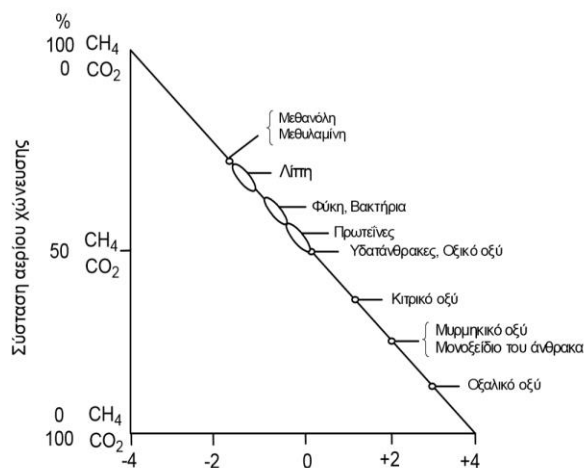


Τα διάφορα οξέα, αλκοόλες και οργανικές ενώσεις του αζώτου που δεν αποικοδομούνται από τα μεθανογόνα βακτήρια συσσωρεύονται στο χωνεμένο υπόλειμμα.

### **2.3.1.3 Τα προϊόντα της αναερόβιας χώνευσης**

#### **Βιοαέριο**

Το κύριο προϊόν της διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης είναι το βιοαέριο. Η ποσότητα και η σύσταση του παραγόμενου βιοαερίου εξαρτάται από το υπόστρωμα και η ποσοστιαία σύσταση του σε μεθάνιο εξαρτάται από την οξειδωτική κατάσταση του άνθρακα στο απόβλητο αυτό. Φυσικά, στο βιοαέριο που παράγεται επιθυμείται να υπάρχει όσο το δυνατόν μεγαλύτερο ποσοστό μεθανίου που αντιστοιχεί στη λιγότερο οξειδωμένη κατάσταση του άνθρακα (-4) και μπορεί να προσφέρει το μέγιστο ενεργειακό όφελος και συνακόλουθα όσο λιγότερο διοξείδιο του άνθρακα που αντιστοιχεί στη μέγιστη οξειδωμένη κατάσταση του άνθρακα (+4) και δεν προσφέρει κάποιο ενεργειακό όφελος. Όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 2-2, η μεθανόλη και τα λιπίδια μετατρέπονται σε περισσότερο μεθάνιο απ' ό,τι διοξείδιο του άνθρακα, ενώ οι υδατάνθρακες σε ίσες ποσότητες μεθανίου και διοξειδίου του άνθρακα. Από την άλλη, το μεθανικό και το οξαλικό οξύ δίνουν μεγαλύτερη ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα από ότι μεθάνιο, ενώ από την υδρόλυση της ουρίας δεν παράγεται καθόλου μεθάνιο.



**Διάγραμμα 2-2: Αναμενόμενη σύσταση βιοαερίου ανάλογα με την οξειδωτική κατάσταση του άνθρακα**

Η τυπική χημική σύσταση του βιοαερίου που παράγεται κατά την αναερόβια χώνευση δίνεται στον Πίνακα 2-2.

**Πίνακας 2-2: Τυπική σύσταση βιοαερίου**

Συστατικό	Χημικός Τύπος	Περιεκτικότητα (% κ.ο.)
Μεθάνιο	CH <sub>4</sub>	55-70
Διοξείδιο του άνθρακα	CO <sub>2</sub>	30-45
Άζωτο	N <sub>2</sub>	0-5
Οξυγόνο	O <sub>2</sub>	<1
Υδρογονάνθρακες	C <sub>n</sub> H <sub>2n+2</sub>	<1
Υδρόθειο	H <sub>2</sub> S	0-0,5
Αμμωνία	NH <sub>3</sub>	0-0,05
Υδρατμοί	H <sub>2</sub> O	1-5

### Αξιοποίηση Βιοαερίου

Η θερμιδική αξία του βιοαερίου είναι περίπου 6 kWh/m<sup>3</sup>. Ο πιο κοινός τρόπος χρήσης του βιοαερίου είναι η καύση του για την παραγωγή ζεστού νερού ή γενικότερα ελεύθερης θερμότητας. Άλλος τρόπος χρήσης του βιοαερίου είναι η καύση και αξιοποίηση του παραγόμενου ατμού ή της ηλεκτρικής ενέργειας σε περίπτωση γεννήτριας. Η αποδοτικότητα της καύσης του ανέρχεται στο 55% σε κλιβάνους και 24% σε μηχανές και προκειμένου να είναι συμφέρουσα η χρήση βιοαερίου, είναι απαραίτητη η παραγωγή της τάξεως των 10 κυβικών μέτρων τη μέρα. Γενικότερα, όταν το βιοαέριο δεν έχει εξουγενιστεί, δεν εμφανίζει ικανοποιητική απόδοση κατά

την καύση του στις διάφορες μηχανές. Από την άλλη μεριά, όταν το βιοαέριο περάσει από τη διαδικασία του εξευγενισμού προς απομάκρυνση των ανεπιθύμητων προσμίξεων μετατρέπεται σε ένα καύσιμο υψηλής θερμογόνου δύναμης όμοιο με το φυσικό αέριο [63].

#### **2.3.1.4 Εξευγενισμός βιοαερίου**

Όπως αναφέρθηκε, το βιοαέριο μπορεί είτε να τροφοδοτηθεί απευθείας προς καύση σε μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας, είτε να υποστεί διεργασία εξευγενισμού προς παραγωγή βιομεθανίου. Για την επίτευξη του εξευγενισμού του βιοαερίου υλοποιούνται τα εξής στάδια:

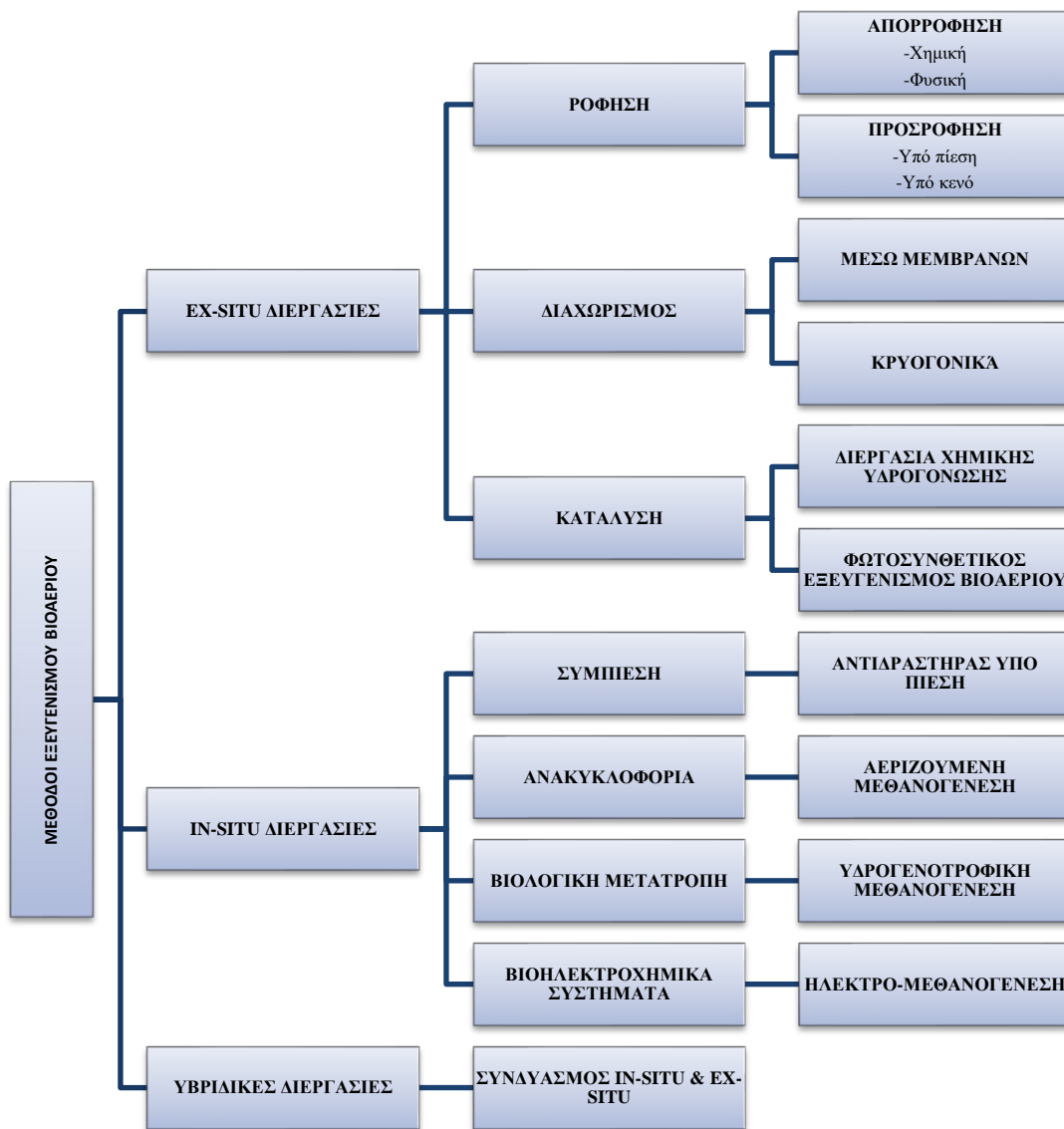
- i. Απομάκρυνση χημικών στοιχείων (καθαρισμός βιοαερίου)
- ii. Αύξηση θερμοδικής αξίας (αναβάθμιση βιοαερίου)

Στο τελικό προϊόν η συγκέντρωση του μεθανίου πρέπει να είναι της τάξης του 95-97% και του διοξειδίου του άνθρακα να μην υπερβαίνει το 3%, ώστε να συνάδει με τις διεθνείς προδιαγραφές. Το βιομεθάνιο γενικά αξιοποιείται είτε μέσω εισαγωγής του στο δίκτυο φυσικού αερίου, είτε μέσω της συμπίεσής του προς παραγωγή συμπιεσμένου βιομεθανίου, το οποίο έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με το συμπιεσμένο φυσικό αέριο. Η αναμενόμενη χρήση του εξευγενισμένου βιοαερίου είναι που καθορίζει και τις απαιτήσεις ποιότητάς του [64].

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τυποποίησης (European Committee for Standardization) έχει εκδώσει σειρά προτύπων για τη χρήση του βιομεθανίου τόσο ως καύσιμο κίνησης όσο και για την έκχυση του στο δίκτυο φυσικού αερίου. Τα πρότυπα είναι τα εξής:

- EN 16723-1:2016 – Part 1 (απαιτήσεις έκχυσης στο δίκτυο φυσικού αερίου)
- EN 16723-2:2017 – Part 2 (απαιτήσεις για χρήση ως καύσιμο κίνησης)

Ο εξευγενισμός του βιοαερίου προς βιομεθάνιο επιτυγχάνεται μέσω της εφαρμογής κάποιων εκ των μεθόδων που περιγράφονται στο Διάγραμμα 2-3 [65].



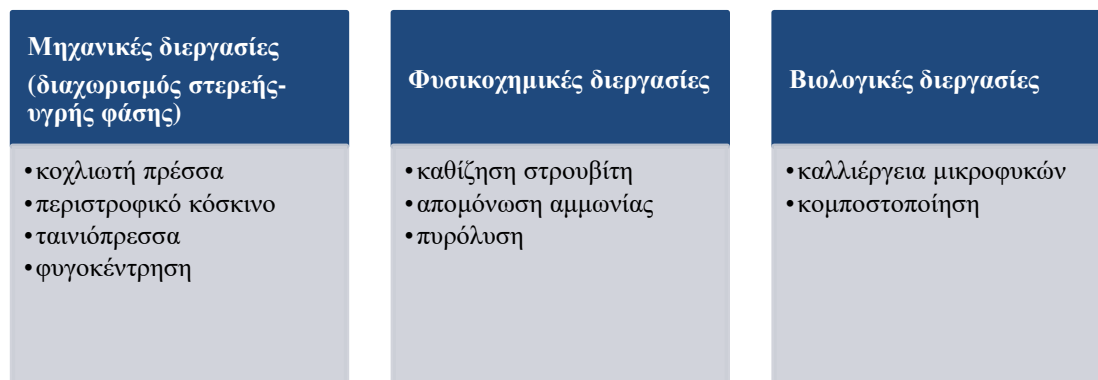
**Διάγραμμα 2-3: Μέθοδοι εξευγενισμού βιοαερίου**

Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής εφαρμόστηκε η ex-situ μέθοδος της χημικής απορρόφησης, κατά την οποία το αέριο ρεύμα (βιοαέριο) διαχέεται μέσω στήλης με πληρωτικό υλικό, ενώ σε αντροπή εισέρχεται το απορροφητικό μέσο. Στην περίπτωση της χημικής απορρόφησης το απορροφητικό μέσο είναι είτε διμεθυλο-εθανολαμίνη (dimethyl ethanol amine – DMEA) ή μονοεθανολαμίνη (mono ethanol amine – MEA). Βάσει προηγούμενων πειραμάτων που είχαν υλοποιηθεί στο Εργαστήριο Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας, επιλέχθηκε η μονοεθανολαμίνη. Η χημική απορρόφηση βασίζεται στην ιδέα ότι οι βασικότερες προσμίξεις του βιοαερίου (διοξείδιο του άνθρακα και υδρόθειο) εμφανίζουν υψηλότερο βαθμό διαλυτότητας στο απορροφητικό μέσο σε σχέση με το βιομεθάνιο. Απαραίτητη για την επίτευξη ικανοποιητικών αποδόσεων είναι η αναγέννηση του απορροφητικού μέσου όταν αυτό έρχεται σε κορεσμό.

### 2.3.1.5 Αξιοποίηση του χωνεμένου υπολείμματος της αναερόβιας χώνευσης

Το βασικό υπο-προϊόν της αναερόβιας χώνευσης είναι το υγρό χωνεμένο υπόλειμμα. Μέχρι πρόσφατα, η αξιοποίηση του χωνεμένου υπολείμματος αποτελούσε τον βασικότερο οικονομικό και περιβαλλοντικό περιορισμό για τις μονάδες αναερόβιας χώνευσης. Συγκεκριμένα, η μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων χωνεμένου υπολείμματος σε καθημερινή βάση συνεπάγεται υψηλά λειτουργικά κόστη για τις μονάδες [66]. Άλλες μελέτες έχουν δείξει ότι οι μονάδες αναερόβιας χώνευσης που έχουν εφαρμόσει συστήματα αξιοποίησης του χωνεμένου υπολείμματος παρουσιάζουν σημαντικά αυξημένη οικονομική απόδοση σε σχέση με αυτές που δεν έχουν [67].

Επιπλέον, το χωνεμένο υπόλειμμα αποτελεί ένα ρεύμα πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά (κατά κύριο λόγο άζωτο, φώσφορο και οργανική ύλη), γεγονός που το καθιστά εξαιρετικό υπόστρωμα για μία σειρά εναλλακτικών διεργασιών αξιοποίησης προς παραγωγή προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας για τη γεωργία και τη χημική βιομηχανία. Τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του χωνεμένου υπολείμματος εξαρτώνται από σειρά παραγόντων όπως είναι τα χαρακτηριστικά του αρχικού υποστρώματος, οι λειτουργικές συνθήκες της αναερόβιας χώνευσης αλλά και ο τύπος του συστήματος αναερόβιας χώνευσης [68]. Ωστόσο, το χωνεμένο υπόλειμμα πρέπει να υποστεί κάποιας μορφής επεξεργασία για τη βιοσταθεροποίησή του. Οι πιθανές διεργασίες που είναι κατάλληλες για την επεξεργασία του χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες: μηχανικές μέθοδοι, φυσικοχημικές μέθοδοι και βιολογικές μέθοδοι. Κάθε μία από τις διαθέσιμες τεχνικές παρουσιάζει σειρά πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων βάσει των χαρακτηριστικών του χωνεμένου υπολείμματος αλλά και των επιθυμητών χαρακτηριστικών του τελικού προϊόντος.



Διάγραμμα 2-4: Κατηγοριοποίηση τεχνικών αξιοποίησης χωνεμένου υπολείμματος

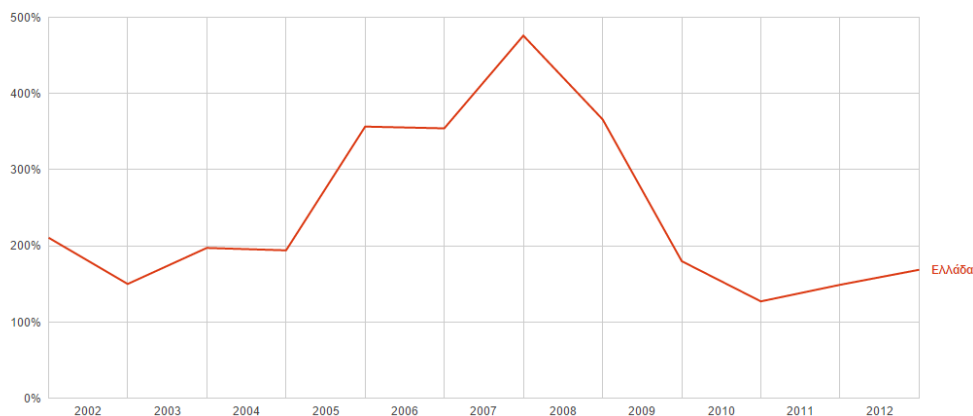
### 2.3.1.6 Πλεονεκτήματα & μειονεκτήματα αναερόβιας χώνευσης

Η αναερόβια χώνευση είναι μια διεργασία που εμφανίζει σημαντικά πλεονεκτήματα, στην κατεύθυνση της επεξεργασίας αποβλήτων, τόσο από οικονομική όσο και από περιβαλλοντική άποψη [69]:

- Βασικό της προϊόν αποτελεί το βιοαέριο το οποίο είναι δυνατόν να εξευγενιστεί μέσω της αφαίρεσης των ανεπιθύμητων προσμίξεων ή να καεί ως έχει σε ειδικούς καυστήρες δίνοντας θερμότητα και ηλεκτρική ενέργεια, και άρα μειώνοντας το κόστος επένδυσης για την εγκατάσταση [70].
- Απαιτεί μικρή δαπάνη ενέργειας για την επεξεργασία των αποβλήτων.

- Σε σχέση με την αερόβια επεξεργασία εμφανίζει μειωμένες απαιτήσεις προσθήκης θρεπτικών συστατικών, που χρειάζονται για την ανάπτυξη της κατάλληλης καλλιέργειας.
- Επιτυγχάνεται υψηλή απομάκρυνση του οργανικού φορτίου (COD).
- Είναι κατάλληλη για τους περισσότερους τύπους οργανικών αποβλήτων (κτηνοτροφικά, γεωργικά, βιομηχανικά, οργανικό κλάσμα ΑΣΑ, λυματολάσπες κ.ο.κ.).
- Είναι δυνατόν μέσω της αναερόβιας χώνευσης να παραχθεί υψηλής ποιότητας κομπόστ, κατάλληλο για τη λίπανση καλλιεργήσιμων εδαφών.

Ειδικότερα, όσον αφορά το τελευταίο πλεονέκτημα που αναφέρεται, είναι σημαντικό ειδικά στην Ελλάδα που αποτελεί μία χώρα με έντονο γεωργικό χαρακτήρα να αναφερθεί ότι η παραγωγή λιπασμάτων μέσω της αναερόβιας χώνευσης θα επιφέρει σημαντικά οικονομικά οφέλη, σε μία οικονομία που έχει πληγεί σοβαρά, ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια. Παρατηρώντας το Διάγραμμα 2-5 κανείς αντιλαμβάνεται ότι η μείωση του χάσματος ανάμεσα στην κατανάλωση και την ιδιοπαραγωγή λιπασμάτων στην Ελλάδα, μπορεί να μειώσει σε μεγάλο βαθμό της εισαγωγή λιπασμάτων που αυξάνει σημαντικά το κόστος της γεωργικής παραγωγής.



**Διάγραμμα 2-5: Κατανάλωση λιπασμάτων, % της συνολικής παραγωγής, [71]**

Αντίστοιχα, τα σημαντικότερα μειονεκτήματα της αναερόβιας χώνευσης, ως μεθόδου επεξεργασίας των οργανικών αποβλήτων είναι:

- Απαιτεί μεγάλο χρονικό διάστημα ο εγκλιματισμός της μικροβιακής καλλιέργειας και γενικά αποτελεί πιο αργή διεργασία συγκριτικά με την αερόβια επεξεργασία [72].
- Οι μεθανογόνοι μικροοργανισμοί των καλλιεργειών εμφανίζουν σχετικά μεγάλη ευαισθησία σε ένα ευρύ φάσμα τοξικών ενώσεων.
- Απαιτείται περαιτέρω επεξεργασία των εκρών, δηλαδή του υπολείμματος της διεργασίας.

Ωστόσο, το τελευταίο όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα μπορεί μέσω της εφαρμογής κατάλληλων μεθόδων να αντιστραφεί και να αποτελέσει ένα ακόμα πλεονέκτημα, μία ακόμα πηγή οικονομικού και περιβαλλοντικού οφέλους της διεργασίας.

### 2.3.1.7 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση της αναερόβιας χώνευσης

Η αναερόβια χώνευση είναι μία αρκετά ευαίσθητη διεργασία και η αποδοτικότητα της εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από σειρά παραμέτρων κρίσιμης σημασίας, οι οποίες αφορούν τις συνθήκες που είναι κατάλληλες για την ανάπτυξη των αναερόβιων μικροοργανισμών.

#### Θερμοκρασία

Κατάλληλα για την αναερόβια χώνευση θεωρούνται τρία διαφορετικά θερμοκρασιακά εύρη, από τα οποία προκύπτει και ο ελάχιστος χρόνος παραμονής της διεργασίας (Πίνακας 2-3).

Πίνακας 2-3 Θερμικά εύρη και χαρακτηριστικοί χρόνοι παραμονής

Θερμικό Στάδιο	Θερμοκρασίες Διεργασίας	Ελάχιστος Χρόνος Παραμονής
Ψυχρόφιλο	<20°C	70-80 ημέρες
Μεσόφιλο	30-42°C	30-40 ημέρες
Θερμόφιλο	43-55°C	15-20 ημέρες

Αν και οι θερμόφιλες διεργασίες προσφέρουν αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των άλλων, όπως:

- Αποτελεσματική καταστροφή παθογόνων μικροοργανισμών
- Υψηλότερο ποσοστό αύξησης μεθανογενών βακτηρίων
- Μειωμένος χρόνος παραμονής
- Βελτιωμένη ικανότητα χώνευσης
- Καλύτερη διάσπαση στερεών υποστρωμάτων και καλύτερη χρήση των υποστρωμάτων
- Καλύτερη δυνατότητα διαχωρισμού των υγρών και στερεών κλασμάτων

Τα μειονεκτήματα της θερμόφιλης διεργασίας είναι τόσο σημαντικά ώστε συχνά να προτιμάται η μεσόφιλη:

- Σημαντικός βαθμός αστάθειας
- Αυξημένη απαίτηση ενέργειας
- Υψηλότερος κίνδυνος παρεμπόδισης της αμμωνίας (αύξηση τοξικότητας της αμμωνίας μέσω της αύξησης της θερμοκρασίας)

#### pH

Η ρύθμιση του pH σε ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης, εφόσον από αυτό επηρεάζεται η ανάπτυξη των μεθανογόνων μικροοργανισμών και μπορεί να έχει επιπτώσεις στο διαχωρισμό μερικών ενώσεων που είναι ιδιαίτερα σημαντικές για τη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης (αμμωνία, σουλφίδια, οργανικά οξέα). Συγκεκριμένα, ο σχηματισμός του μεθανίου πραγματοποιείται μέσα σε ένα σχετικά μικρό εύρος τιμών, μεταξύ 5,5 και 8,5 (βέλτιστο εύρος είναι το 7-8) για τους περισσότερους μεθανογόνους οργανισμούς. Από αυτό συμπεραίνουμε ότι οι μεθανογόνοι μικροοργανισμοί είναι αρκετά ευαίσθητοι ως προς την οξύτητα του περιβάλλοντος τους. Όσον αφορά τη μεσόφιλη αναερόβια χώνευση, που όπως αναφέρθηκε προτιμάται συνήθως, το βέλτιστο εύρος pH είναι μεταξύ 6,5 και 8 και η διεργασία παρεμποδίζεται σημαντικά σε τιμές πέραν του 6 και του 8,3.

Η τιμή του pH μπορεί να αυξηθεί στη διάρκεια της διεργασίας εξαιτίας της αμμωνίας που παράγεται κατά τη διάσπαση των πρωτεϊνών, ή από την παρουσία αμμωνίας στο ίδιο το ρεύμα της τροφοδοσίας, ενώ η συσσώρευση πτητικών λιπαρών οξέων (VFAs) μειώνει την τιμή του pH. Ως εκ τούτου είναι σημαντικό να υπάρχει μέθοδος ελέγχου της τιμής του pH στους αναερόβιους αντιδραστήρες. Αυτό συμβαίνει κυρίως μέσω του συστήματος ανάσχεσης διττανθρακικών αλάτων. Επομένως, η τιμή του pH των χωνευτών βιοαερίου εξαρτάται από τη μερική πίεση του CO<sub>2</sub> και τη συγκέντρωση αλκαλικών και όξινων συστατικών στην υγρή φάση. Εάν συσσωρεύονται βάσεις ή οξέα, η ικανότητα ανάσχεσης ισοσταθμίζει τις αλλαγές στο pH μέχρι ένα ορισμένο επίπεδο. Όταν ξεπερνιέται η ικανότητα ανάσχεσης του συστήματος, εμφανίζονται δραστικές αλλαγές στις τιμές του pH, παρεμποδίζοντας συνολικά τη διεργασία. Για το λόγο αυτό δεν μπορεί να προταθεί μια τιμή του pH ως αυτόνομη παράμετρος ελέγχου της διεργασίας.

### **Πτητικά λιπαρά οξέα (VFAs)**

Η ευστάθεια της διεργασίας της ΑΧ επηρεάζεται από τη συγκέντρωση των ενδιάμεσων προϊόντων όπως είναι τα πτητικά λιπαρά οξέα (VFAs). Τα VFAs είναι ενδιάμεσες ενώσεις (οξικά, προπιονικά, βουτυρικά, οξέα), που παράγονται κατά τη διάρκεια της οξικογένεσης, με μια αλυσίδα άνθρακα από έξι ή λιγότερα άτομα. Στις περισσότερες περιπτώσεις, αστάθεια στη διεργασία θα οδηγήσει στη συσσώρευση VFAs μέσα στο χωνευτή, και αυτό μπορεί να οδηγήσει σε πτώση της τιμής του pH. Η συσσώρευση VFAs, εντούτοις, δεν εκφράζεται πάντοτε ως πτώση του pH, λόγω της ικανότητας ανάσχεσης μερικών τύπων βιομάζας. Για παράδειγμα η ζωική στερεή κοπριά έχει ένα πλεόνασμα αλκαλικότητας, το οποίο σημαίνει ότι η συσσώρευση VFAs πρέπει να υπερβεί ένα ορισμένο επίπεδο προτού να μπορέσει να ανιχνευθεί λόγω της σημαντικής μείωσης της τιμής του pH. Σε ένα τέτοιο σημείο, η συγκέντρωση οξέων στο χωνευτή θα είναι τόσο υψηλή ώστε η διεργασία της ΑΧ θα έχει ήδη εμποδιστεί σημαντικά.

Η εμπειρία δείχνει ότι δύο διαφορετικοί χωνευτήρες μπορεί να συμπεριφέρονται τελείως διαφορετικά ως προς την ίδια συγκέντρωση VFAs, με την έννοια ότι η συγκεκριμένη συγκέντρωση VFAs μπορεί να είναι βέλτιστη για μία δεξαμενή χώνευσης, αλλά ανασταλτική για μία άλλη. Μια από τις πιθανές εξηγήσεις είναι το γεγονός ότι η σύνθεση των πληθυσμών μικροοργανισμών ποικίλλει ανάλογα με το υπόστρωμα και τη διαμόρφωση των λειτουργικών χαρακτηριστικών της διεργασίας. Για το λόγο αυτό, όπως και στην περίπτωση του pH, η συγκέντρωση των VFAs δεν μπορεί να προταθεί ως μια αυτόνομη παράμετρος ελέγχου της διεργασίας.

### **Αμμωνία**

Η αμμωνία (NH<sub>3</sub>) είναι μια σημαντική ένωση, με ιδιαίτερη λειτουργία στη διεργασία της ΑΧ. Είναι μια σημαντική θρεπτική ουσία που χρησιμεύει ως προδρομικό υλικό των τροφίμων και των λιπασμάτων και κανονικά συναντάται ως αέριο, με τη χαρακτηριστική έντονη οσμή. Οι πρωτεΐνες είναι η κύρια πηγή αμμωνίας στη διεργασία της ΑΧ.

Η πολύ υψηλή συγκέντρωση αμμωνίας μέσα στο χωνευτή, ειδικότερα η ελεύθερη αμμωνία (στη μη ιονισμένη μορφή της), είναι υπεύθυνη για την παρεμπόδιση της διεργασίας. Το γεγονός αυτό είναι σύνηθες στην αναερόβια χώνευση της ζωικής στερεής κοπριάς, λόγω της υψηλής συγκέντρωσης αμμωνίας που προέρχεται από την ουρία. Γι' αυτό το λόγο, η συγκέντρωση της αμμωνίας πρέπει να διατηρείται κάτω από 80 mg/l. Τα μεθανογόνα βακτήρια είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στην παρεμπόδιση από την αμμωνία. Η συγκέντρωση της ελεύθερης αμμωνίας είναι ευθέως ανάλογη προς τη θερμοκρασία, οπότε υφίσταται αυξημένος κίνδυνος παρεμπόδισης λόγω της αμμωνίας των διεργασιών ΑΧ που λαμβάνουν χώρα στις θερμοφίλες θερμοκρασίες, σε σύγκριση με τις μεσόφιλες. Η συγκέντρωση ελεύθερης αμμωνίας υπολογίζεται από τη σχέση:



$$[NH_3] = \frac{[T - NH_3]}{\left(1 + \frac{H^+}{K_a}\right)}$$

όπου  $[NH_3]$  και  $[T-NH_3]$  είναι οι συγκεντρώσεις της ελεύθερης και της συνολικής αμμωνίας, αντίστοιχα, και  $K_a$  είναι η σταθερά διαχωρισμού, με τιμές που αυξάνονται με τη θερμοκρασία. Αυτό σημαίνει ότι το αυξανόμενο pH και η αυξανόμενη θερμοκρασία θα οδηγήσουν σε αυξανόμενη παρεμπόδιση, δεδομένου ότι οι παράγοντες αυτοί αυξάνουν το ποσοστό της ελεύθερης αμμωνίας. Όταν μια διεργασία παρεμποδίζεται από την αμμωνία, μια αύξηση στη συγκέντρωση των VFA θα οδηγήσει σε μείωση του pH. Αυτό αναιρεί εν μέρει την επίδραση της αμμωνίας, λόγω της μείωσης στη συγκέντρωση της ελεύθερης αμμωνίας.

### Ιχνοστοιχεία, θρεπτικές ουσίες και τοξικές ενώσεις

Τα ιχνοστοιχεία όπως ο σίδηρος, το νικέλιο, το κοβάλτιο, το σελήνιο, το μολυβδαίνιο ή το βολφράμιο είναι εξίσου σημαντικά για την αύξηση και την επιβίωση των μικροοργανισμών της αναερόβιας χώνευσης. Η βέλτιστη αναλογία των θρεπτικών στοιχείων άνθρακα, αζώτου, φωσφόρου, και θείου (C:N:P:S) είναι 600:15:5:1. Η ανεπαρκής παροχή θρεπτικών ουσιών και ιχνοστοιχείων, καθώς επίσης και η πάρα πολύ υψηλή δυνατότητα χώνευσης του υποστρώματος μπορούν να προκαλέσουν παρεμπόδιση και διαταραχές στη διεργασία της ΑΧ.

Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει τη δραστηριότητα των αναερόβιων μικροοργανισμών είναι η παρουσία τοξικών ενώσεων. Αυτές μπορούν να μεταφερθούν στο σύστημα ΑΧ μαζί με την πρώτη ύλη, αλλά μπορούν επίσης να παραχθούν κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Είναι δύσκολη η εφαρμογή κατώτατων οριακών τιμών για τις τοξικές ουσίες, αφενός μεν επειδή αυτές μπορούν συχνά να δεσμευθούν με χημικές διεργασίες και αφετέρου επειδή οι αναερόβιοι μικροοργανισμοί είναι σε θέση να προσαρμοστούν, εντός ορισμένων ορίων, στις περιβαλλοντικές συνθήκες, στην προκειμένη περίπτωση στην παρουσία τοξικών ενώσεων.

## 2.3.1.8 Παράμετροι Λειτουργίας αναερόβιας χώνευσης

### Οργανικό φορτίο

Η κατασκευή των μονάδων βιοαερίου απαιτεί ένα συνδυασμό οικονομικών και τεχνικών εκτιμήσεων. Η μέγιστη παραγωγή βιοαερίου που λαμβάνεται από την πλήρη χώνευση του υποστρώματος θα απαιτούσε ένα μεγάλο υδραυλικό χρόνο παραμονής (ΥΧΠ) και ένα αντίστοιχο μέγεθος χωνευτή. Στην πράξη, η επιλογή του συστήματος (π.χ. το μέγεθος και ο τύπος του χωνευτή) βασίζεται σε έναν συμβιβασμό μεταξύ της μέγιστης παραγωγής βιοαερίου και της οικονομικής βιωσιμότητας της μονάδας. Από αυτή την άποψη, το οργανικό φορτίο είναι μια σημαντική παράμετρος λειτουργίας, η οποία δείχνει πόση οργανική ξηρή ουσία μπορεί να τροφοδοτηθεί στον χωνευτή, ανά  $m^3$  όγκου και μονάδα χρόνου, σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$B_r = \frac{m * c}{V_r}$$

Όπου:

$B_r$ : οργανικό φορτίο ( $kg/d * m^3$ )

$m$ : μάζα τροφοδοτούμενου υποστρώματος ανά μονάδα χρόνου ( $kg/d$ )

$c$ : συγκέντρωση οργανικής ουσίας (%)

$V_r$ : όγκος αναερόβιου χωνευτή

### **Υδραυλικός χρόνος παραμονής (HRT, hydraulic retention time)**

Η πιο σημαντική παράμετρος για τη διαστασιολόγηση του χωνευτή είναι ο υδραυλικός χρόνος παραμονής, μία παράμετρος δηλαδή η οποία αφορά στο μέσο χρονικό διάστημα κατά το οποίο διατηρείται το υπόστρωμα μέσα στη δεξαμενή του χωνευτή. Ο HRT σχετίζεται με τον όγκο του αναερόβιου χωνευτή ( $V_R$ ) και τον όγκο του υποστρώματος που τροφοδοτείται στη μονάδα του χρόνου, σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$HRT = \frac{V_R}{V}$$

Όπου,

$V_R$ : ο όγκος του χωνευτή ( $m^3$ )

$V$ : ο όγκος του υποστρώματος που τροφοδοτείται στη μονάδα του χρόνου ( $m^3/d$ )

Σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση, όσο αυξάνεται η ογκομετρική παροχή θα μειώνεται το HRT. Για συνεχώς αναδευόμενους αντιδραστήρες ο υδραυλικός χρόνος παραμονής ισούται με τον χρόνο παραμονής των βιοστερεών και πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος για να εξασφαλιστεί ότι η ποσότητα των βακτηρίων που αφαιρείται με το χωνεμένο υπόλειμμα δεν θα είναι υψηλότερη από την ποσότητα των αναπαραγόμενων βακτηρίων. Παράλληλα, ο HRT πρέπει να ρυθμίζεται με τρόπο ώστε να οδηγεί σε ικανοποιητική παραγωγικότητα βιοαερίου, η οποία μειώνεται όσο αυξάνεται ο HRT.

### **2.3.1.9 Συστήματα αναερόβιας χώνευσης**

#### **Κριτήρια ενός αποδοτικού συστήματος αναερόβιας χώνευσης**

Από τους σημαντικότερους παράγοντες για την αποτελεσματική λειτουργία της αναερόβιας χώνευσης, είναι η επιλογή του κατάλληλου συστήματος που θα χρησιμοποιηθεί.

Κριτήρια για την επιλογή του κατάλληλου συστήματος είναι το τεchnοοικονομικό κόστος και τα φυσικά, χημικά, βιολογικά χαρακτηριστικά του προς επεξεργασία αποβλήτου.

Ένα αποδοτικό αναερόβιο σύστημα πρέπει να έχει τα εξής τεχνικά χαρακτηριστικά [69], [73]:

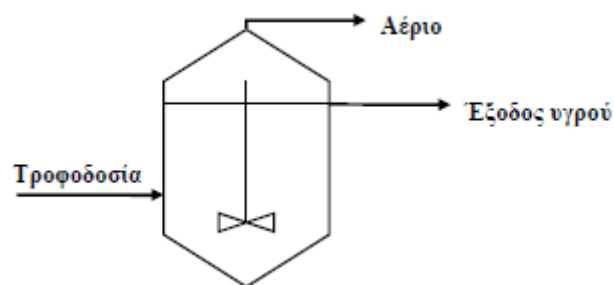
- Υψηλή κατακράτηση της ενεργής βιομάζας στον αντιδραστήρα, κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του.
- Επαρκής επαφή μεταξύ της βιομάζας και του διαθέσιμου προς χώνευση απόβλητου.
- Υψηλούς ρυθμούς αντιδράσεων και απουσία περιορισμών από φαινόμενα μεταφοράς.
- Ικανότητα προσαρμογής της βιομάζας σε διαφορετικούς τύπους αποβλήτων.
- Επικράτηση ευνοϊκών περιβαλλοντικών συνθηκών για όλα τα είδη των μικροοργανισμών, στις επιβαλλόμενες λειτουργικές συνθήκες.

#### **Συμβατικά συστήματα**

Η συγκεκριμένη κατηγορία συστημάτων βασίζεται στην ανάπτυξη αιωρούμενων μικροοργανισμών σε υγρό μέσο και υπάρχουν δύο βασικοί τύποι που ανήκουν στην κατηγορία αυτή.

*Συμβατική αναερόβια χώνευση ενός σταδίου – Αντιδραστήρας πλήρους ανάμιξης (Continuous Stirred Tank Reactor, CSTR)*

Η ιστορία εξέλιξης των αναερόβιων χωνευτήρων είναι στενά συνδεδεμένη με την προσπάθεια συσσώρευσης όσο το δυνατόν υψηλότερων συγκεντρώσεων ενεργής αναερόβιας βακτηριακής μάζας μέσα στον χωνευτήρα, έτσι ώστε ο ρυθμός αποδόμησης των οργανικών υποστρωμάτων να μεγιστοποιηθεί και συνεπώς να ελαχιστοποιηθεί το κόστος εφαρμογής της αναερόβιας χώνευσης. Στόχος ήταν να σχεδιαστούν αντιδραστήρες όπου ο χρόνος παραμονής της βιομάζας να μην ελέγχεται από το υδραυλικό χρόνο παραμονής του αποβλήτου [74], [75]. Χρονολογικά, αρχικά αναπτύχθηκαν αναερόβιες δεξαμενές πλήρους ανάδευσης οι οποίες μπορούν να επεξεργαστούν απόβλητα με υψηλές συγκεντρώσεις στερεών, αλλά απαιτούσαν μεγάλους χρόνους παραμονής, κα άρα δεν μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε απόβλητα με χαμηλό ρυπαντικό φορτίο [74]–[76].

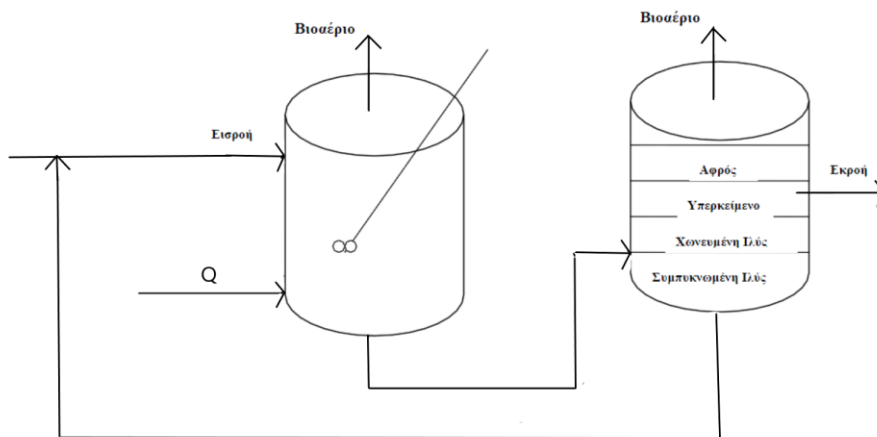


**Διάγραμμα 2-6:** Αναερόβιος χωνευτήρας πλήρους ανάμιξης

Για να αυξηθεί ο χρόνος παραμονής των στερεών ανεξάρτητα από τον υδραυλικό χρόνο παραμονής, οι πλήρους ανάδευσης αντιδραστήρες εξελίχθηκαν σε αντιδραστήρες πλήρους ανάδευσης με ανακυκλοφορία διαχωρισμένων βιοστερεών. Το κύριο πρόβλημα της εφαρμογής αυτής είναι ο δύσκολος διαχωρισμός των βιοστερεών από το επεξεργασμένο απόβλητο. Παρόλα αυτά παραμένει μια ικανοποιητική λύση για απόβλητα που περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις αιωρούμενων στερεών ή/και λιπών. [74], [75]

#### *Συμβατική αναερόβια χώνευση δύο σταδίων*

Στη συμβατική αναερόβια χώνευση δύο σταδίων, η διάταξη περιλαμβάνει δύο κυλινδρικές δεξαμενές. Στην πρώτη δεξαμενή, η οποία θερμαίνεται, πραγματοποιείται το κύριο μέρος της βιολογικής επεξεργασίας. Στη δεύτερη δεξαμενή, η οποία δεν θερμαίνεται, διαχωρίζονται η βιομάζα και τα αιωρούμενα στερεά που δεν υδρολύθηκαν στην πρώτη δεξαμενή, από την υγρή φάση της διεργασίας. Επίσης, επιτυγχάνεται μεγαλύτερη συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών και μεθανογόνων βακτηρίων, εφαρμόζοντας ανακυκλοφορία των βιοστερεών που συλλέγονται από την εκροή της δεύτερης δεξαμενής, πίσω στην πρώτη. Το εν λόγω σύστημα φαίνεται στο Διάγραμμα 2-7.



**Διάγραμμα 2-7: Συμβατική αναερόβια χώνευση δύο σταδίων**

Η συμβατική αναερόβια χώνευση δύο σταδίων παρέχει τα ίδια πλεονεκτήματα με αυτή του ενός σταδίου, έχοντας όμως τη δυνατότητα να επιτύχει υψηλότερη απόδοση μετατροπής της οργανικής ύλης σε βιοαέριο. Παρόλα αυτά, το σύστημα αυτό δεν είναι κατάλληλο για χώνευση αποβλήτων με υψηλή συγκέντρωση στερεών αφού τα χαρακτηριστικά καθίζησης επηρεάζουν την απόδοση της διεργασίας. Επίσης, πιθανώς χρειάζεται προεπεξεργασία του υποστρώματος προκειμένου να βελτιωθούν τα χαρακτηριστικά αυτά.

### **Ταχύρρυθμα συστήματα**

Αυτή η κατηγορία συστημάτων αναερόβιας χώνευσης βασίζεται στη δημιουργία ενός βιολογικού στρώματος (φιλμ) από την προσκόλληση των αναπτυσσόμενων μικροοργανισμών σε κάποιο στερεό πληρωτικό υλικό είτε στην δημιουργία συσσωματωμάτων από τη μεταξύ τους προσκόλληση. Έχουν αναπτυχθεί, κατά καιρούς, πολλά ταχύρρυθμα συστήματα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα σημαντικότερα από αυτά τα συστήματα.

#### *Αναερόβιο φίλτρο – στήλη με πληρωτικό υλικό (Anaerobic Filter - Packed Bed)*

Το σύστημα αυτό αποτελείται από μια στήλη η οποία περιέχει αδρανές πληρωτικό υλικό όπως άμμο, γυάλινες χάντρες ή χαλαζία. Οι διάφοροι μικροοργανισμοί της αναερόβιας διεργασίας προσκολλώνται στα σωματίδια του πληρωτικού αυτού υλικού. Έτσι, καθώς εισάγεται η τροφοδοσία, το οργανικό τους φορτίο έρχεται σε επαφή με τους προσκολλημένους στο πληρωτικό υλικό μικροοργανισμούς και αποδομείται, παράγοντας βιοαέριο, το οποίο συλλέγεται από την κορυφή της στήλης. Από τον πυθμένα της στήλης εξέρχεται το μειωμένης οργανικής φόρτισης υπόλειμμα. Η τροφοδοσία μπορεί να εισέλθει είτε από κάτω προς τα πάνω είτε αντίστροφα.

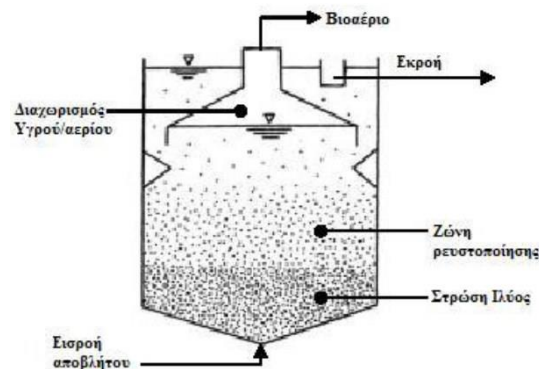
#### *Αντιδραστήρας ρευστοστερεάς κλίνης (Fluidized Bed Reactor, FBR)*

Ο αντιδραστήρας ρευστοστερεάς κλίνης αποτελεί και αυτός μια στήλη με πληρωτικό υλικό που όμως εισάγοντας το προς χώνευση απόβλητο (ή οποιοδήποτε υγρό ή και αέριο ανάλογα με την εφαρμογή) με την κατάλληλη ταχύτητα από κάτω, πραγματοποιείται ρευστοποίηση των

σωματιδίων. Ουσιαστικά, οι δυνάμεις τριβής μεταξύ σωματιδίων και διερχόμενου ρευστού, εν προκειμένω του προς χώνευση αποβλήτου, εξισώνεται με τη δύναμη της βαρύτητας και έτσι τα σωματίδια παραμένουν αιωρούμενα. Φυσικά, θα πρέπει η ταχύτητα του εισερχόμενου ρευστού να είναι μεν μεγαλύτερη από την ταχύτητα όπου ξεκινούν οι συνθήκες ρευστοποίησης, όμως να μην ξεπερνάει την οριακή ταχύτητα πέρα από την οποία τα σωματίδια παρασύρονται εκτός της στήλης. Το μέσο που λειτουργεί ως πληρωτικό υλικό έχει μικρή διάμετρο για να αυξάνεται η επιφάνεια προσκόλλησης της βιομάζας και να επιτυγχάνεται ικανοποιητική επαφή με το υπόστρωμα με το οποίο τροφοδοτείται η στήλη. Επίσης, η ροή του ρευστού είναι απαραίτητως ανοδική (από τον πυθμένα προς την κορυφή της στήλης) προκειμένου να επιτευχθεί η ρευστοποίηση των σωματιδίων του πληρωτικού υλικού. Τέλος, ο όγκος της κλίνης μεταβάλλεται ανάλογα με την ταχύτητα του ρευστού, δημιουργώντας, έτσι, τις λεγόμενες διαστελλόμενες κλίνες (expanded bed) όπου μεταβάλλεται ο όγκος τους, προσαρμοζόμενος στις απαιτήσεις της εκάστοτε διεργασίας.

*Αντιδραστήρας ανοδικής ροής διαμέσου στρώματος ιλύος (Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor, UASB)*

Στην δεκαετία του 1970, στην Ολλανδία, ο Lettinga και οι συνεργάτες του ανέπτυξαν ένα ταχύρρυθμο αντιδραστήρα που ονομάζεται UASB. Ο αντιδραστήρας UASB είναι ένας αναερόβιος αντιδραστήρας που τροφοδοτείται από τον πυθμένα. Μπορεί να διαιρεθεί σε τέσσερα μέρη (από τον πυθμένα προς την κορυφή): το στρώμα ιλύος, τη ζώνη ρευστοποίησης (fluidized zone), τον διαχωριστή υγρής/ αέριας απορροής και τη ζώνη κατακάθισης (Σχήμα 2.1.5). Στο διαμέρισμα του στρώματος ιλύος, λαμβάνει χώρα το στάδιο της υδρόλυσης. Ο UASB είναι μακράν ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος ταχύρρυθμος αναερόβιος αντιδραστήρας για την επεξεργασία αστικών και βιομηχανικών λυμάτων.



### **Διάγραμμα 2-8: Ο αντιδραστήρας UASB και τα διάφορα μέρη του**

Ο UASB αντιδραστήρας βασίζεται στο ότι η αναερόβια ιλύς έχει εγγενώς καλές ιδιότητες καθίζησης, εφόσον η ιλύς δεν έχει υποστεί υψηλή μηχανική ανάδευση. Η ίση κατανομή της ροής ιλύος και η επαρκώς υψηλή ταχύτητα ανόδου (upflow velocity) παρέχουν επαρκή ανάδευση στο σύστημα, σε συνδυασμό με την ανάδευση που προκαλεί η ανοδική πορεία του βιοαερίου που παράγεται. Η βιομάζα διατηρείται ως στρώμα ιλύος ή ως μήτρα κροκίδων (granule matrix), και διατηρείται σε αιώρηση (suspension) με τον έλεγχο της ταχύτητας ανόδου.

Οι αντιδραστήρες UASB παρουσιάζουν τα παρακάτω πλεονεκτήματα [69], [77]:

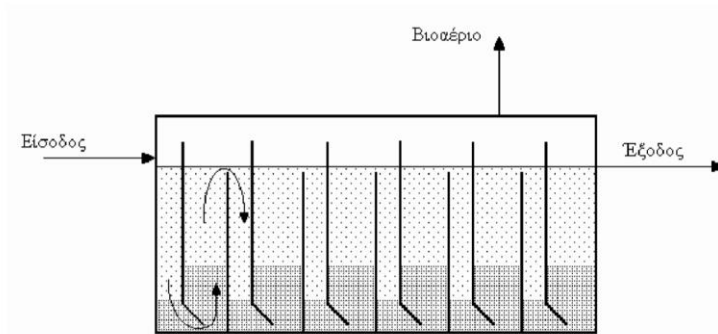
- Λειτουργούν σε υψηλή συγκέντρωση βιομάζας και μεγάλους χρόνους παραμονής στερεών
- Ο σχεδιασμός τους είναι σχετικά απλός
- Δημιουργούνται ευνοϊκές συνθήκες για μεταφορά μάζας
- Απαιτείται μικρός όγκος χωνευτήρων
- Είναι εφικτή υψηλή απόδοση αφαίρεσης οργανικού φορτίου
- Παρουσιάζουν σταθερότητα σε διακυμάνσεις τροφοδοσίας, λόγω αυξημένης συγκέντρωσης βιομάζας
- Η έκλυση βιοαερίου εξασφαλίζει ομοιόμορφες συνθήκες λειτουργίας στο εσωτερικό του αντιδραστήρα
- Ευνοείται ο σχηματισμός συμπαγών κόκκων βιομάζας.

Τα μειονεκτήματα των UASB είναι τα εξής:

- Τα χαρακτηριστικά καθίζησης επηρεάζουν την απόδοση της διεργασίας
- Δεν είναι κατάλληλοι για απόβλητα με υψηλή συγκέντρωση στερεών
- Ο σχηματισμός συμπαγών κόκκων βιομάζας απαιτεί τον έλεγχο και τη ρύθμιση πολλών λειτουργικών παραμέτρων.

#### *Αναερόβιος αντιδραστήρας με ανακλαστήρες (Anaerobic Baffled Reactor, ABR)*

Ο αναερόβιος αντιδραστήρας με ανακλαστήρες (ABR) αποτελεί ένα από τα αποδοτικότερα ταχύρρυθμα συστήματα αναερόβιας χώνευσης [78]. Πρόκειται, ουσιαστικά, για έναν αντιδραστήρα που αποτελείται από διαδοχικά διαμερίσματα με κατακόρυφους ανακλαστήρες που κατευθύνουν την τροφοδοσία των αποβλήτων πρώτα καθοδικά και ύστερα ανοδικά σε κάθε διαμέρισμα. Η βιομάζα των αναερόβιων μικροοργανισμών κατά κύριο λόγο καθιζάνει στον πυθμένα κάθε διαμερίσματος, όμως μέρος αυτής ανεβαίνει και κατεβαίνει διαδοχικά τα διαμερίσματα του αντιδραστήρα. Έτσι, καθώς το προς χώνευση απόβλητο ανεβοκατεβαίνει στα διαμερίσματα έρχεται σε επαφή με μεγάλη ποσότητα βιομάζας επιτυγχάνοντας υψηλή αποικοδόμηση του οργανικού του φορτίου. Μάλιστα, ο τρόπος ροής του αποβλήτου εξασφαλίζει πως το μέρος της βιομάζας που ακολουθεί τον ίδιο τρόπο κυκλοφορίας τελικά δεν εξέρχεται του αντιδραστήρα, αποφεύγοντας την έκπλυση των αναερόβιων μικροοργανισμών. Έτσι, το κάθε διαμέρισμα έχει διακριτή και διαδοχική λειτουργία με τα πρώτα στάδια της αναερόβιας χώνευσης, την υδρόλυση και την οξεογένεση, να πραγματοποιούνται στα πρώτα διαμερίσματα του αντιδραστήρα και την οξικογένεση και τη μεθανογένεση να πραγματοποιούνται στα επόμενα διαμερίσματα κατά μήκος αυτού. Σχηματικά, ο αντιδραστήρας αυτός παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 2-9. Το σκιαγραφημένο μέρος αποτελεί τη βιομάζα που, όπως αναφέρθηκε, κατά κύριο λόγο κατακάθεται στον πυθμένα των διαμερισμάτων,



**Διάγραμμα 2-9: Αντιδραστήρας ABR**

Το σύστημα αυτό είναι οικονομικό, χωρίς κάποιο δαπανηρό μηχανικό τμήμα και παράλληλα απλό στο σχεδιασμό του. Επίσης, η εναλλασσόμενη ανοδική και καθοδική ροή εξασφαλίζει τόσο έναν ικανοποιητικό χρόνο παραμονής των αναερόβιων μικροοργανισμών, όσο και ικανοποιητική επαφή της προς χώνευση τροφοδοσίας με τη βιομάζα αυτή. Άλλο ένα πλεονέκτημα του συστήματος, είναι πως παρουσιάζει μεγάλη σταθερότητα σε τυχόν διαταραχές του υδραυλικού χρόνου παραμονής ή της οργανικής φόρτισης. Παρόλα αυτά, όπως και στα προηγούμενα ταχύρρυθμα συστήματα, η απόδοση εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά καθίζησης και παρουσιάζει δυσκολίες στην αποικοδόμηση αποβλήτων με μεγάλη συγκέντρωση στερεών. Τέλος, η λειτουργία του ακόμη περιορίζεται ως επί το πλείστον σε εργαστηριακή κλίμακα, αφήνοντας αρκετά ερωτηματικά για τη συμπεριφορά του κατά την αποκλιμάκωσή του σε βιομηχανικό επίπεδο.

*Περιοδικός αναερόβιος αντιδραστήρας με ανακλαστήρες (Periodic Anaerobic Baffled Reactor, PABR)*

Στο εργαστήριο Βιοχημικής Μηχανικής και Τεχνολογίας Περιβάλλοντος του τμήματος Χημικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών, αναπτύχθηκε από τον καθηγητή κ. Λυμπεράτο Γεράσιμο και τον κ. Σκιαδά Ιωάννη ένας καινοτόμος αντιδραστήρας, ο περιοδικός αναερόβιος αντιδραστήρας με ανακλαστήρες (PABR) [79]. Πρόκειται για ένα ταχύρρυθμο σύστημα που αποτελείται από δύο ομόκεντρους κυλίνδρους. Μέσα στον εσωτερικό κύλινδρο μπορεί να υπάρξει λουτρό το οποίο διατηρεί τον αντιδραστήρα στην επιθυμητή θερμοκρασία. Ο ενδιάμεσος χώρος των κυλίνδρων αυτών χωρίζεται σε επιμέρους διαμερίσματα, και κάθε διαμέρισμα χωρίζεται με κατακόρυφους ανακλαστήρες σε δύο τμήματα, το καθοδικό και το ανοδικό, όπου το προς χώνευση απόβλητο ακολουθεί την αντίστοιχη ροή μέσα σε αυτό. Το απόβλητο, δηλαδή, διέρχεται κυκλικά από τα διαμερίσματα του αντιδραστήρα ρέοντας είτε με την φορά του ρολογιού είτε αντίθετα. Στο επόμενο κεφάλαιο θα αναλυθεί επακριβώς ο τρόπος με τον οποίο το προς χώνευση απόβλητο διέρχεται μέσα από τα διαμερίσματα του αντιδραστήρα. Η βιομάζα των αναερόβιων μικροοργανισμών ακολουθεί την πορεία που ακολουθεί και στον αντιδραστήρα ABR, δηλαδή κατά κύριο λόγο κατακάθεται στον πυθμένα του αντιδραστήρα και των διαμερισμάτων του με ένα μικρό ποσοστό του να αιωρείται μέσα σε αυτά.

Το ιδιαίτερο και καινοτόμο του αντιδραστήρα αυτού είναι η περιοδικότητα των διαμερισμάτων τροφοδοσίας και εκροής. Συγκεκριμένα, μέσω ενός συστήματος ηλεκτροβανών ρυθμίζεται το σύστημα με τέτοιο τρόπο ούτως ώστε να εναλλάσσονται κυκλικά το διαμέρισμα στο οποίο εισέρχεται η τροφοδοσία και το διαμέρισμα από το οποίο εξέρχεται το υπόλειμμα της διεργασίας. Η εναλλαγή αυτή μπορεί να είναι σύμφωνα με τη φορά του ρολογιού είτε αντίθετη. Το χρονικό διάστημα όπου πραγματοποιείται ένας πλήρης κύκλος και το διαμέρισμα

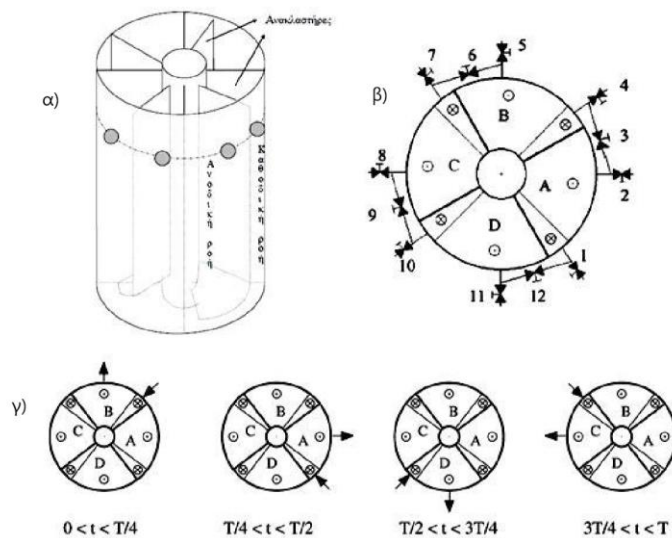
τροφοδοσίας και εκροής γίνονται ξανά αυτά που ήταν στην αρχή του κύκλου ονομάζεται περίοδος εναλλαγής. Με την εναλλαγή αυτή, τα διαμερίσματα παύουν πλέον να έχουν τη διακριτή και διαδοχική λειτουργία που έχουν στον αντιδραστήρα ABR, και στον αντιδραστήρα μέσα δημιουργείται ένα στρώμα βιομάζας από το οποίο διέρχεται από όλες τις πλευρές η τροφοδοσία προσεγγίζοντας έτσι τη λειτουργία του αντιδραστήρα UASB για μικρές περιόδους εναλλαγής.

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα του συστήματος αυτού είναι η υβριδικότητα που προσφέρει ο καινοτόμος σχεδιασμός του. Πιο συγκεκριμένα, όταν η συχνότητα εναλλαγής των διαμερισμάτων τροφοδοσίας και εκροής είναι σχεδόν μηδενικός, δηλαδή η περίοδος εναλλαγής τείνει στο άπειρο, ουσιαστικά λειτουργεί ως αντιδραστήρας ABR, ενώ όταν η συχνότητα εναλλαγής είναι μεγάλη, οπότε και η περίοδος εναλλαγής είναι μικρή, λειτουργεί ως αντιδραστήρας UASB [80]. Σε ενδιάμεσες περιόδους εναλλαγής επικρατεί μια υβριδική λειτουργία που συνδυάζει χαρακτηριστικά τόσο του ABR όσο και του UASB παρουσιάζοντας τα πλεονεκτήματα και των δύο αντιδραστήρων που αναφέρθηκαν στην ανάλυση τους. Μάλιστα, όταν τα προς χώνευση απόβλητα είναι υψηλής οργανικής φόρτισης, προτιμάται μικρή περίοδος εναλλαγής και συνθήκες που προσεγγίζουν τον αντιδραστήρα UASB, ενώ όταν χωνεύονται απόβλητα χαμηλής οργανικής φόρτισης, προτιμάται μεγάλη περίοδος εναλλαγής και προσέγγιση του αντιδραστήρα ABR. Επιπροσθέτως, λόγω του κυλινδρικού του σχήματος, το σύστημα αυτό παρουσιάζει ελάχιστες θερμικές απώλειες παρέχοντας την ελάχιστη επιφάνεια ανά μονάδα όγκου σε σχέση με τους ορθογωνικούς αντιδραστήρες αναερόβιας χώνευσης τύπου ABR, ενώ, όπως αναφέρθηκε, ο εσωτερικός κύλινδρος μπορεί να λειτουργήσει ως εναλλάκτης θερμότητας και έτσι με τις ελάχιστες απώλειες ο αντιδραστήρας μπορεί να διατηρηθεί στην επιθυμητή θερμοκρασία. Από την άλλη πλευρά, το μεγαλύτερο μειονέκτημα του αντιδραστήρα είναι το αυξημένο κόστος που παρουσιάζει για τη λειτουργία των ηλεκτροβανών καθώς και η έλλειψη, ακόμα, κλιμάκωσης του αντιδραστήρα σε βιομηχανικό επίπεδο.

Στη συνέχεια ακολουθούν ορισμένες εικόνες που βοηθούν την κατανόηση της καινοτόμου λειτουργίας του αντιδραστήρα αυτού, Αρχικά, στην Εικόνα 2-1 (α), απεικονίζεται τρισδιάστατα το εσωτερικό του αντιδραστήρα με τα τέσσερα διαμερίσματα έχοντας έτσι μια καλύτερη χωροταξική εικόνα του. Στη συνέχεια, στην ίδια εικόνα, απεικονίζεται η κάτοψη του αντιδραστήρα με τις επιμέρους βάνες. Κοιτάζοντας την εικόνα αυτή γίνεται πιο κατανοητή η ροή του υποστρώματος μέσα στον αντιδραστήρα. Όπως αναφέρθηκε, υπάρχει ένα διαμέρισμα τροφοδοσίας στο οποίο το καθοδικό τμήμα εισέρχεται το προς χώνευση απόβλητο. Αφού κατέλθει από το τμήμα αυτό, διέρχεται από το ανοδικό τμήμα του διαμερίσματος τροφοδοσίας. Ανερχόμενο από το τμήμα αυτό περνά μέσα από τις εξωτερικές σωληνώσεις του αντιδραστήρα και εισέρχεται στο καθοδικό τμήμα του επόμενου διαμερίσματος. Τότε η τροφοδοσία ακολουθεί την αντίστοιχη διαδρομή μέχρι να εισέλθει και στο τέταρτο διαμέρισμα. Το τέταρτο κατά σειρά διαμέρισμα από το οποίο διέρχεται αποτελεί το διαμέρισμα εκροής. Αυτό σημαίνει πως, αφού κατέλθει από το καθοδικό και ανέλθει από το ανοδικό τμήμα του διαμερίσματος αυτού, οδηγείται, μέσω των εξωτερικών σωληνώσεων, εκτός του αντιδραστήρα και όχι εκ νέου στο διαμέρισμα από όπου ξεκίνησε. Για να πραγματοποιηθεί από το εισελθέν υπόστρωμα αυτή η διαδρομή, πρέπει να έχουν ρυθμιστεί οι βάνες του αντιδραστήρα με τέτοιο τρόπο που να εξασφαλίζεται πως η τροφοδοσία θα εισέρχεται σε συγκεκριμένο διαμέρισμα, ότι από αυτό και από τα επόμενα δύο η τροφοδοσία δε θα εξέρχεται του αντιδραστήρα αλλά θα περνά διαδοχικά μέσα από αυτά και τέλος από το διαμέρισμα εκροής, το αποικοδομημένο, πλέον, υπόστρωμα θα εξέρχεται του αντιδραστήρα και δε θα εισέρχεται πάλι στο διαμέρισμα τροφοδοσίας. Για



παράδειγμα ως υποθεθεί πως το διαμέρισμα τροφοδοσίας είναι το διαμέρισμα Α. Αφού η ροή του αποβλήτου στον αντιδραστήρα είναι σύμφωνη με τη φορά του ρολογιού θα περάσει διαδοχικά με τη σειρά τα διαμερίσματα Α, D, C, Β και μετά το διαμέρισμα Β, που αποτελεί το διαμέρισμα εκροής, θα εξέλθει από τον αντιδραστήρα. Με τη βοήθεια της Εικόνα 2-1 (γ) παρατηρείται πως κατά τη διάρκεια αυτή παραμένουν ανοικτές οι βάνες 3,4,5,9 και 12 ενώ οι βάνες 1,2,6,7,8,10 και 11 παραμένουν κλειστές. Τέλος, διακρίνεται η κυκλική εναλλαγή των διαμερισμάτων τροφοδοσίας και εκροής σύμφωνα με την προκαθορισμένη περίοδο εναλλαγής T.



**Εικόνα 2-1:** (α) τρισδιάστατη απεικόνιση εσωτερικού του PABR, (β) κάτοψη διαμερισμάτων και βανών του PABR, (γ) κυκλική εναλλαγή διαμερισμάτων τροφοδοσίας και εκροής

#### Διβάθμιο σύστημα αναερόβιας χώνευσης

Οι συμβατικές εφαρμογές αναερόβιας χώνευσης διέθεταν έναν αντιδραστήρα τόσο για τους μικροοργανισμούς που σχηματίζουν οξύ όσο και για τους μικροοργανισμούς που σχηματίζουν μεθάνιο, με αποτέλεσμα η ισορροπία μεταξύ αυτών των δύο τύπων μικροοργανισμών να είναι αρκετά ευαίσθητη, αφού τα δύο αυτά είδη διαφέρουν όσον αφορά τη φυσιολογία τους, τις ανάγκες τους σε θρεπτικά συστατικά, το ρυθμό ανάπτυξης και την ευαισθησία τους στις περιβαλλοντικές συνθήκες [81]. Τα προβλήματα λοιπόν που προέκυψαν στην σταθερότητα και τον έλεγχο στις συμβατικές αυτές εφαρμογές οδήγησαν τους ερευνητές στην αναζήτηση νέων λύσεων. Έτσι, από μία ομάδα ερευνητών προτάθηκε η ανάπτυξη των δύο τύπων μικροοργανισμών σε δύο χωριστούς αντιδραστήρες με στόχο την παροχή των βέλτιστων περιβαλλοντικών συνθηκών για κάθε ομάδα μικροοργανισμών προκειμένου να ενισχυθεί η συνολική σταθερότητα και ο έλεγχος της διεργασίας [81].

Στην Ευρώπη υπάρχουν 17,000 μονάδες βιομηχανικής κλίμακας, εκ των οποίων οι 10,000 βρίσκονται στη Γερμανία με συνολική παραγωγή 8,293 MWeI [82]. Ωστόσο λιγότερο του 1% αυτών αποτελούνται από σύστημα αναερόβιας χώνευσης, δύο σταδίων, κάτι που οφείλεται στο υψηλότερο κόστος κεφαλαίου του βιοαντιδραστήρα του διβάθμιου συστήματος [83]. Το

σύστημα δύο σταδίων βασίζεται στο φυσικό διαχωρισμό των σταδίων (α) της υδρόλυσης και της οξεογένεσης (ή ζύμωση) και (β) της οξικογένεσης και μεθανογένεσης. Στο πρώτο στάδιο παράγεται βιοαέριο πλούσιο σε υδρογόνο, ενώ στο δεύτερο παράγεται βιοαέριο πλούσιο σε μεθάνιο. Ο λόγος λοιπόν που οδήγησε στο διαχωρισμό αυτών των δύο σταδίων είναι τα διαφορετικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν και αναλύονται παρακάτω. Αρχικά, οι δύο αυτές φάσεις αποτελούνται από διαφορετικούς τύπους μικροοργανισμών που απαιτούν συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας για να δράσουν. Η παραγωγή υδρογόνου στο στάδιο της ζύμωσης πραγματοποιείται με τη βοήθεια αναερόβιων μικροοργανισμών (κυρίως *Clostridium* spp., *Thermoanaerobacterium* spp., *Enterobacter* and *Bacillus*) σε ευνοϊκές για αυτούς συνθήκες θερμοκρασίας και pH [41]. Κατά τη μεθανογένεση οι μικροοργανισμοί είναι πιο ευαίσθητοι και χαρακτηρίζονται από πιο λεπτή κυτταρική μεμβράνη. Έτσι, απαιτούνται πιο σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας και pH και πολύ μικρή ανάδευση [43]. Έπειτα, τα δύο στάδια της αναερόβιας χώνευσης διαφέρουν ως προς το ρυθμό ανάπτυξης των μικροοργανισμών. Ειδικότερα, τα ακετοκλαστικά (acetoclastic) μεθανογόνα βακτήρια αναπτύσσονται με ρυθμό 4 με 5 φορές μικρότερο σε σχέση με τους οξικογενείς μικροοργανισμούς, με αποτέλεσμα η μεθανογένεση συνήθως να αποτελεί το περιοριστικό στάδιο της αναερόβιας χώνευσης, αν και συχνά μπορεί να είναι η υδρόλυση [44].

Η εφαρμογή διβάθμιου συστήματος αναερόβιας χώνευσης πέραν της αυξημένης σταθερότητας προσφέρει και τη δυνατότητα παραγωγής δύο ξεχωριστών ρευμάτων βιοαερίου: ενός πλούσιου σε υδρογόνο και ενός πλούσιου σε μεθάνιο. Η ανάμιξη των δύο ρευμάτων οδηγεί στην παραγωγή ενός καινοτόμου καυσίμου το οποίο καλείται υθάνιο (hydrothane). Το υθάνιο αποτελεί ένα αέριο βιοκαύσιμο με αποδεδειγμένα πλεονεκτήματα σε σχέση με το μεθάνιο, ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιείται ως καύσιμο κίνησης. Συγκεκριμένα, σχετικές μελέτες έχουν δείξει ότι η υποκατάσταση του πετρελαίου κίνησης από υθάνιο έχει σημαντικά μειώσει τις εκπομπές καπνού (σε ποσοστό έως και 95%), ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται και η απόδοση της καύσης και συνολικά της λειτουργίας του οχήματος (π.χ. αυξημένη απόδοση φρεναρίσματος). Από την άλλη, η χρήση υθανίου δεν φαίνεται να οδηγεί σε σημαντική μείωση των εκπομπών νιτρωδών και μονοξειδίου του άνθρακα [30], [84], [85].

## 2.3.2 Κομποστοποίηση

### 2.3.2.1 Εισαγωγή

Κομποστοποίηση (composting<sup>1</sup>) είναι η βιολογική αποικοδόμηση και σταθεροποίηση οργανικών υποστρωμάτων, υπό συνθήκες που επιτρέπουν την ανάπτυξη θερμοφιλικών θερμοκρασιών ως αποτέλεσμα της βιολογικά παραγόμενης θερμότητας, προς παραγωγή κομπόστ (compost), ενός τελικού προϊόντος σταθερού και απαλλαγμένου από παθογόνους μικροοργανισμούς και σπόρους φυτών, κατάλληλου για χρήση ως εδαφοβελτιωτικού [86].

Παρότι υπάρχουν δύο μέθοδοι κομποστοποίησης, η αερόβια και η αναερόβια, ο όρος κομποστοποίηση ταυτίζεται παγκοσμίως με την αερόβια κομποστοποίηση [86].

Από την οπτική γωνία της χημικής μηχανικής, η (αερόβια) κομποστοποίηση είναι η διεργασία της διάσπασης της οργανικής ύλης υπό αερόβιες συνθήκες [87]. Μία τυπική διεργασία κομποστοποίησης περιλαμβάνει μια σειρά σταδίων που περιλαμβάνουν ταχεία αύξηση της

---

<sup>1</sup> Από τη λατινική λέξη *compositum* που σημαίνει επισυνάπτω, συνθέτω, συσσωρεύω

θερμοκρασίας (άνω των 45°C), διατήρηση της θερμοκρασίας στη θερμόφιλη περιοχή για κάποιες ημέρες και στη συνέχεια σταδιακή επαναφορά της θερμοκρασίας του υποστρώματος σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος [88]. Κατά τη διάρκεια της διεργασίας, βακτήρια, μύκητες και άλλοι μικροοργανισμοί μετατρέπουν την οργανική ύλη σε ένα χρήσιμο προϊόν που ονομάζεται κομπόστ (compost). Οι βιοαποικοικοδομήσιμες οργανικές ενώσεις που περιέχονται στο υπόστρωμα διασπώνται, ενώ ένα τμήμα της υπολειπόμενης οργανικής ύλης μετατρέπεται σε χουμικές ενώσεις [87]. Τα κύρια προϊόντα του βιολογικού μεταβολισμού κατά την αερόβια κομποστοποίηση είναι το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ), το νερό ( $\text{H}_2\text{O}$ ) και η θερμότητα [86].



**Εικόνα 2-2: Η διεργασία της αερόβιας κομποστοποίησης [89]**

Πρώτες ύλες για την παραγωγή κομπόστ (compost) είναι κυρίως γεωργικά απόβλητα, απόβλητα του βιομηχανικού τομέα γεωργικών ειδών, καθώς και οργανικά υπολείμματα ζυμώσιμων αποβλήτων [90], [91]. Η κομποστοποίηση είναι μια μορφή σταθεροποίησης των αποβλήτων, μια διαδικασία όμως που απαιτεί ελεγχόμενες συνθήκες αερισμού και υγρασίας για την επίτευξη θερμοφιλικών θερμοκρασιών.

Τα κύρια πλεονεκτήματα της κομποστοποίησης και της διάθεσης του κομπόστ στο έδαφος, όπως περιγράφονται από την Αμερικανική Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος (US EPA) [92] είναι τα εξής:

- Ο εμπλουτισμός του εδάφους
- Η βελτίωση της δυνατότητας συγκράτησης της υγρασίας από το έδαφος
- Η καταστολή των ασθενειών των φυτών και η αντιμετώπιση των παρασίτων
- Η μείωση της ανάγκης σε χημικά λιπάσματα
- Η παραγωγή ευεργετικών βακτηρίων και μυκήτων που διασπούν την οργανική ύλη προς παραγωγή χουμικών ενώσεων πλούσιων σε θρεπτικά συστατικά
- Η μείωση της παραγωγής μεθανίου από τα ΧΥΤΑ με αποτέλεσμα τη βελτίωση του αποτυπώματος άνθρακα.

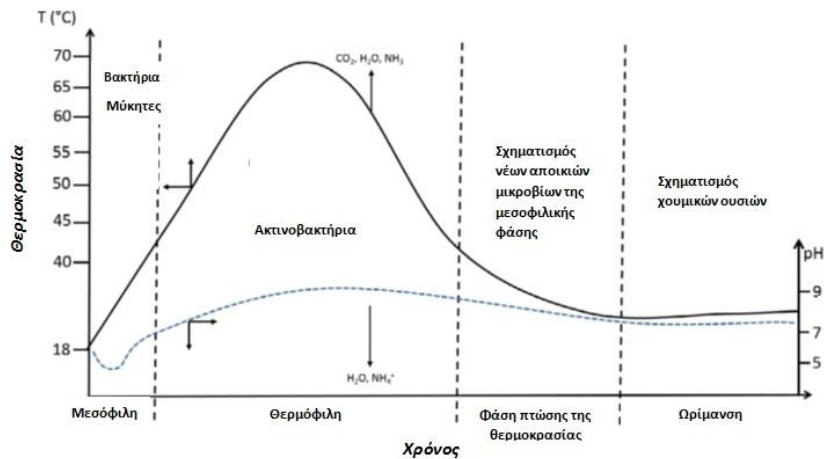
### 2.3.2.2 Η διαδικασία της κομποστοποίησης

Είναι γενικώς αποδεκτό ότι η κομποστοποίηση είναι μια διαδικασία τεσσάρων διακριτών φάσεων, με βάση το θερμοκρασιακό εύρος του υποστρώματος σε κάθε φάση [93].

Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 2-10 οι τέσσερις φάσεις της κομποστοποίησης (η μεσόφιλη, η θερμόφιλη, η φάση πτώσης της θερμοκρασίας και η φάση ωρίμανσης) δεν χαρακτηρίζονται μόνο από διαφορετικά θερμοκρασιακά εύρη αλλά και από την ανάπτυξη διαφορετικών μικροοργανισμών [90].

Οι μικροοργανισμοί που απαιτούνται για την κομποστοποίηση βρίσκονται παντού στο φυσικό περιβάλλον και είναι στην πλειονότητά τους αερόβιοι [89]. Τόσο ο σχεδιασμός όσο και η σωστή λειτουργία ενός συστήματος κομποστοποίησης συνδέονται άρρηκτα με την κατάλληλη εναλλαγή των μικτών μικροβιακών πληθυσμών που αναπτύσσονται κατά τις διαφορετικές φάσεις της κομποστοποίησης [89].

Το επίπεδο κατανόησής μας σε σχέση με τη μικροβιολογία της κάθε φάσης στηρίζεται μέχρι σήμερα κυρίως σε μελέτες που έχουν γίνει με χρήση παραδοσιακών μεθόδων όπως η απομόνωση και η ταυτοποίηση των βακτηρίων, συμπεριλαμβανομένων ακτινοβακτηρίων και μυκήτων σύμφωνα με τον Miller (1996) όπως αναφέρεται από τον Ryckeboer [94], [95].



**Διάγραμμα 2-10: Οι φάσεις της κομποστοποίησης και οι κυριότερες ομάδες μικροοργανισμών σε κάθε φάση [90]**

Κατά τη μεσόφιλη φάση αρχίζει η αποσύνθεση του οργανικού φορτίου στην οποία τη μεγαλύτερη επίδραση έχουν τα βακτήρια και οι μύκητες που αναπτύσσονται κατά τη φάση αυτή με σκοπό την υδρόλυση των εύκολα βιοαποικοδομήσιμων θρεπτικών συστατικών. Συγκεκριμένα, τα μεσόφιλα βακτήρια αναλαμβάνουν την υδρόλυση των σακχάρων, των αμινοξέων και των λιπιδίων [90], [96], [97]. Ενδεικτικά, στις θερμοκρασίες της μεσόφιλης φάσης μεταξύ 15 °C και 35 °C αναπτύσσονται κυρίως τα μεσόφιλα βακτήρια των οικογενειών *Pseudomonaceae*, *Erythrobacteraceae*, *Comamonadaceae*, *Enterobacteriaceae*, *Streptomycetaceae*, και *Caulobacteraceae*.

Η μεταβολική δραστηριότητα των μικροοργανισμών της μεσόφιλης φάσης συμβάλλει στη ραγδαία αύξηση της θερμοκρασίας και οδηγεί στη μετάβαση στη θερμόφιλη φάση και την σταδιακή αντικατάσταση των μεσόφιλων μικροοργανισμών από τους θερμόφιλους, αφού οι πρώτοι είναι λιγότερο ανταγωνιστικοί στις υψηλές θερμοκρασίες [90], [93]. Ενώ κατά την πρώτη φάση λαμβάνει χώρα η αποδόμηση απλών συστατικών όπως σάκχαρα, πρωτεΐνες και λίπη, κατά τη θερμόφιλη φάση η ανάπτυξη των ακτινοβακτηρίων (ή ακτινομυκήτων) καθιστά εφικτή την αποδόμηση των πιο σύνθετων οργανικών συστατικών όπως η κυτταρίνη, ημικυτταρίνη και λιγνίνη. Πέραν της αποσύνθεσης σύνθετων κυττάρων λόγω των ειδικών ενζύμων τους, τα ακτινοβακτήρια – και η υψηλή θερμοκρασία- συμβάλλουν επιπλέον παράλληλα και στην εξουδετέρωση των παθογόνων μικροοργανισμών που υπάρχουν στα αρχικά υποστρώματα, μέσω της αντιβιοτικής δράσης τους [93], [96], [98], [99]. Οι ακτινομύκητες που αναπτύσσονται κατά τη θερμόφιλη φάση της κομποστοποίησης ανήκουν κυρίως στα γένη *Thermoactinomycetacea*, *Thermomonosporaceae*, and *Pseudonocardaceae* [90], [93], [96].

Η μεγάλης διάρκειας δεύτερη φάση της κομποστοποίησης (θερμόφιλη φάση) ακολουθείται από τη φάση πτώσης της θερμοκρασίας που αναφέρεται και ως 2η μεσόφιλη φάση, κατά την οποία δημιουργούνται εκ νέου αποικίες μεσόφιλων μικροοργανισμών [88]. Η σταδιακή εξάντληση των υποστρωμάτων κατά την έντονη μεταβολική δραστηριότητα της θερμόφιλης φάσης οδηγεί στη μείωση της δραστηριότητας των θερμόφιλων οργανισμών και στην επανεμφάνιση των μεσόφιλων μικροοργανισμών. Οι αποικίες των μεσόφιλων οργανισμών αυτής της φάσης προέρχονται είτε από επιβιώσαντα σπόρια είτε από περιοχές του κομπόστ που παρέμειναν προστατευμένες από τις υψηλές θερμοκρασίες της θερμόφιλης φάσης είτε, τέλος, από εξωτερικό εμβολιασμό [88].

Η εξέλιξη του μικροβιακού πληθυσμού που χαρακτηρίζει τη διαδικασία της κομποστοποίησης ολοκληρώνεται στην τέταρτη και τελική φάση της ωρίμανσης του κομπόστ. Κατά τη διάρκεια της φάσης ωρίμανσης σύμφωνα με τον Insam, η ποιότητα του υποστρώματος υποβαθμίζεται και η σύνθεση του μικροβιακού πληθυσμού μεταβάλλεται στο σύνολό της [93]. Συνήθως, η αναλογία των μυκήτων αυξάνεται, ενώ των βακτηρίων μειώνεται και παράλληλα σχηματίζονται και επικρατούν τελικά τα συστατικά που δεν είναι πλέον βιοαποικοδομήσιμα (όπως τα μόρια λιγνίνης). Η παρουσία σημαντικού αριθμού βακτηρίων του γένους *Arthrobacter* αποτελεί μικροβιολογική παράμετρο αξιολόγησης της ωριμότητας του κομπόστ [100]. Η διάρκεια της φάσης ωρίμανσης είναι συνήθως μεγάλη και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη φύση του υποστρώματος [101]. Σε συστήματα κλειστού τύπου όπου η διεργασία πραγματοποιείται μέσα σε αντιδραστήρες, κατά τη φάση της ωρίμανσης το υπόστρωμα μεταφέρεται συνήθως έξω από τον αντιδραστήρα και η παρακολούθηση των φυσικοχημικών παραμέτρων πραγματοποιείται με μικρότερη συχνότητα σε σχέση με τις προηγούμενες φάσεις. Κατά τη φάση αυτή, είναι απαραίτητη η διασφάλιση κατάλληλων συνθηκών υγρασίας και αερισμού ώστε να λαμβάνει χώρα η αργή μεταβολική δραστηριότητα που χαρακτηρίζει αυτή τη φάση [102].

### **2.3.2.3 Επίδραση φυσικών και χημικών παραμέτρων στη διαδικασία της κομποστοποίησης**

Η διάρκεια των φάσεων της κομποστοποίησης που περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα εξαρτάται από τη φύση του οργανικού υλικού που κομποστοποιείται και από την απόδοση της διεργασίας η οποία καθορίζεται από πολλές διαφορετικές φυσικοχημικές παραμέτρους [95].

Συνοπτικά, οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διαδικασία της κομποστοποίησης είναι η συγκέντρωση θρεπτικών και η αναλογία C/N στα υποστρώματα και οι περιβαλλοντικές παράμετροι (θερμοκρασία, pH, αερισμός, υγρασία) [103].

#### ***Υποστρώματα (συγκέντρωση θρεπτικών συστατικών και αναλογία C/N)***

Η διαθεσιμότητα θρεπτικών συστατικών σε κατάλληλη συγκέντρωση και αναλογία είναι απαραίτητη στο μίγμα που πρόκειται να κομποστοποιηθεί. Ωστόσο, σύμφωνα με τους L.F. Diaz και G.M. Savage, σημαντική είναι όχι μόνο η παρουσία ικανοποιητικών ποσοτήτων θρεπτικών συστατικών αλλά και η διαθεσιμότητά τους σε τέτοια μορφή που να μπορεί να αφομοιωθεί από το μικροβιακό πληθυσμό. Η ικανότητα αφομοίωσης των θρεπτικών συστατικών εξαρτάται από τα ένζυμα του κάθε μικροοργανισμού [103]. Η διαδικασία της κομποστοποίησης είναι το αποτέλεσμα της δυναμικής διαδοχής διαφορετικών ομάδων μικροοργανισμών, όπου η μια ομάδα ετοιμάζει τα θρεπτικά συστατικά που είναι κατάλληλα να αφομοιωθούν από την επόμενη ομάδα. Στα θρεπτικά συστατικά που είναι απαραίτητα για την διαδικασία της κομποστοποίησης ανήκουν ο άνθρακας (C), το άζωτο (N), ο φώσφορος (P) και το Κάλιο (K) ενώ απαραίτητα είναι και ιχνοστοιχεία όπως το κοβάλτιο (Co), το μαγγάνιο (Mn), το μαγνήσιο (Mg), ο χαλκός (Cu), και άλλα. Το ασβέστιο (Ca) δεν είναι ανήκει ούτε στα θρεπτικά συστατικά αμιγώς ούτε και στα ιχνοστοιχεία.

Λειτουργεί ως ενδιάμεσο ρυθμιστικό συστατικό απέναντι σε διάφορες αλλαγές όπως πχ η αλλαγή στα επίπεδα του pH [103].

Η αναλογία οργανικού άνθρακα σε σχέση με το συνολικό άζωτο είναι μια από τις πιο σημαντικές παραμέτρους της συνολικής ισορροπίας των θρεπτικών συστατικών, ενώ για τα υπόλοιπα θρεπτικά συστατικά η εμπειρία έχει καταδείξει ότι συνήθως υπάρχουν διαθέσιμα σε οποιοδήποτε τυπικό οργανικό απόβλητο σε επαρκείς ποσότητες και αναλογίες. Η αναλογία C/N είναι ένας λόγος (αδιάστατο μέγεθος) που επηρεάζει σημαντικά την ταχύτητα της βιοαποικοδόμησης και η ιδανική αναλογία C/N στο αρχικό μίγμα είναι περίπου 25–30 [103]. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της κομποστοποίησης, ο λόγος αυτός μειώνεται σημαντικά καθώς μέρος του οργανικού άνθρακα δεσμεύεται στο CO<sub>2</sub> που εκλύεται κατά τη μικροβιακή εξάτμιση, ενώ το άζωτο ανακυκλώνεται [95], [100].

Τόσο ο άνθρακας όσο και το άζωτο αποτελούν πηγές ενέργειας για τη διατήρηση και την ανάπτυξη των μικροβίων. Αν κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της κομποστοποίησης περιοριστεί η πηγή αζώτου, τότε ο ρυθμός αποσύνθεσης θα επιβραδυνθεί. Αν η παροχή αζώτου είναι σε περίσσεια, τότε μπορεί να διαφύγει στην ατμόσφαιρα υπό μορφή αμμωνίας ή να εκπλυθεί στο έδαφος ως νιτρικό αμμώνιο [100].

### **Περιβαλλοντικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη διεργασία της κομποστοποίησης**

#### *Θερμοκρασία*

Όπως έχει αναφερθεί εκτενώς στην προηγούμενη ενότητα, η θερμοκρασία είναι ένας από τους πιο σημαντικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες που επηρεάζουν τη διαδικασία της κομποστοποίησης και συμβάλλει καθοριστικά στην ανάπτυξη της κατάλληλης μικροβιολογίας που είναι απαραίτητη για την παραγωγή του κομποστού.

Το θερμοκρασιακό εύρος κάθε φάσης ποικίλλει στη βιβλιογραφία ως εξής:

1. Η μεσόφιλη φάση χαρακτηρίζεται από ραγδαία αύξηση της θερμοκρασίας και κυμαίνεται μεταξύ 10- 42°C κατά τους Bonito *et al.*, 25–40°C κατά τον Insam και 15-35°C κατά τον Sánchez [90], [97], [104]
2. Η θερμόφιλη φάση, κατά την οποία αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες εκτεταμένης διάρκειας κυμαίνεται μεταξύ 45°C –70°C κατά τους Bonito *et al*, 35–65°C κατά τον Insam [93]
3. Η φάση πτώσης της θερμοκρασίας ή μέση μεσόφιλη φάση είναι η φάση κατά την οποία η θερμοκρασία του μίγματος προσεγγίζει σταδιακά τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος
4. Η φάση ωρίμανσης είναι η φάση κατά την οποία το υπόστρωμα σταθεροποιείται σε τιμές κοντά στη θερμοκρασία περιβάλλοντος και ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του υποστρώματος μπορεί να διαρκέσει για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Το θερμοκρασιακό προφίλ της διεργασίας της κομποστοποίησης είναι μια από τις πιο καθοριστικές παραμέτρους για την απομάκρυνση των παθογόνων μικροοργανισμών όσο και για την ποιότητα του παραγόμενου κομποστού. Για το λόγο αυτό, η βελτιστοποίηση του θερμοκρασιακού προφίλ της κομποστοποίησης δύο διαφορετικών ειδών αποβλήτων (οικιακά, κτηνοτροφικά) αποτέλεσε το κυρίαρχο ζητούμενο μιας σειράς πειραμάτων.

#### *pH*

Σύμφωνα με τους de Bertoldi *et al* (1983), είναι δυνατό να κομποστοποιηθεί οργανική ύλη σε μεγάλο εύρος pH (από 3 μέχρι 11), ωστόσο το βέλτιστο εύρος που ενδείκνυται για

κομποστοποίηση είναι μεταξύ 5.5 και 8.0. Ενώ το σχετικά ουδέτερο pH είναι προτιμητέο για την ανάπτυξη των βακτηρίων, οι μύκητες ωστόσο αναπτύσσονται καλύτερα σε σχετικά όξινο pH [103], [105].

Κατά την έναρξη της διεργασίας, το pH μπορεί να μειωθεί λόγω της δράσης των βακτηρίων της μεσόφιλης φάσης που διασπούν τους διαλύτες και τις εύκολα αποδομήσιμες ουσίες ενώ όταν η φάση της οξίνισης ολοκληρωθεί το pH τείνει να αυξηθεί μέχρι την περιοχή 8-8.5.

Ενώ στην περίπτωση της αναερόβιας χώνευσης τα επίπεδα pH που είναι κρίσιμα έχουν μικρό εύρος (6.5–7.5), το εύρος της επιτρεπόμενης διακύμανσης του pH στην περίπτωση της κομποστοποίησης είναι πολύ ευρύ και επομένως σπάνια έχουν προκύψει δυσκολίες εξαιτίας πολύ υψηλών ή αντίθετα πολύ χαμηλών επιπέδων pH [103]. Άλλωστε, όπως έχει καταγραφεί και από τους Khan et al (2009), παρότι το pH είναι σημαντική παράμετρος για την εξέλιξη των βιολογικών συστημάτων φαίνεται να μην επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τα συστήματα κομποστοποίησης [89], [106].

#### *Αερισμός*

Η παροχή κατάλληλης ποσότητας οξυγόνου είναι πολύ σημαντική κατά τη διαδικασία της κομποστοποίησης που δεν είναι παρά μια διαδικασία βιολογικής οξειδωσης. Επιπλέον όμως της αναγκαιότητας του οξυγόνου για την αποσύνθεση των οργανικών ενώσεων από τους αερόβιους μικροοργανισμούς, ο κατάλληλος αερισμός είναι πολύ σημαντικός και για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας του κομποστ ενώ επιδρά επίσης και στην υγρασία.

Η απουσία κατάλληλου αερισμού είναι ικανή να οδηγήσει σε συνολική αποτυχία του συστήματος και για αυτό το λόγο υπάρχουν διαθέσιμες τεχνολογίες που εξασφαλίζουν την κατάλληλη παροχή οξυγόνου στη μάζα του κομποστ και έχουν σχεδιαστεί για το σκοπό αυτό ειδικά συστήματα.

#### *Υγρασία*

Το ποσοστό υγρασίας μέσα στο υλικό που κομποστοποιείται είναι από τις σημαντικότερες και πιο ευαίσθητες παραμέτρους της διεργασίας. Οι μικροοργανισμοί δρουν πάνω σε λεπτές υγρές στιβάδες που βρίσκονται στο περίβλημα της επιφάνειας των σωματιδίων. Από την άλλη, αν το ποσοστό υγρασίας είναι πολύ ψηλό είναι πιθανό να επηρεαστεί η επάρκεια του αερισμού του μίγματος. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό το ποσοστό υγρασίας να είναι τέτοιο ώστε να ικανοποιεί και τις δύο ανάγκες του συστήματος. Τέτοιο θεωρείται ένα ποσοστό μεταξύ 45-60% [86], [107], [108].

Στην περίπτωση που το ποσοστό υγρασίας είναι υψηλότερο από 60%, επηρεάζεται η δομή του υλικού, καθώς οι πόροι μεταξύ των σωματιδίων πληρώνονται με νερό, και άρα εμποδίζεται ο αερισμός του υλικού. Αποτέλεσμα αυτού είναι η δημιουργία αναερόβιων συνθηκών που οδηγεί σε μείωση του ρυθμού αποδόμησης της οργανικής ύλης και έκλυση δυσάρεστων οσμών. Από την άλλη, αν το ποσοστό υγρασία είναι χαμηλότερα του 45%, το υλικό ξηραίνεται και έτσι μπλοκάρεται η μικροβιακή δράση, οδηγώντας σε τελικό προϊόν χαμηλής ποιότητας.

Βασικός παράγοντας που επηρεάζει το ποσοστό υγρασίας της διεργασίας είναι η ίδια η θερμότητα που εκλύεται από την μικροβιακή δραστηριότητα που λαμβάνει χώρα. Η θερμότητα αυτή οδηγεί στην εξάτμιση ποσοτήτων νερού και άρα τη μείωση της περιεχόμενης υγρασίας. Έτσι, από αρχικό ποσοστό 40-60%, μπορεί η υγρασία στο τέλος της διεργασίας να πέσει στο 35-40%.

### 2.3.2.4 Συστήματα κομποστοποίησης

Η μεγάλη πλειονότητα των συστημάτων κομποστοποίησης μπορεί να ενταχθεί σε δύο ευρείες κατηγορίες [86]:

1. Ανοιχτού τύπου - Συστήματα σειραδίων
2. Κλειστού τύπου (σε δοχείο, "in-vessel")

Η βασική διαφορά μεταξύ των δύο τύπων είναι ότι στην περίπτωση των σειραδίων το υπόστρωμα τοποθετείται σε μεγάλους σωρούς (συνήθως ύψους μεταξύ 1,5 και 2,5 μέτρων), ενώ στην περίπτωση του κλειστού τύπου η διεργασία πραγματοποιείται μέσα σε κλειστό αντιδραστήρα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι και στις δύο κατηγορίες αντιδραστήρων, εξαιρετικής σημασίας παράμετρος λειτουργίας είναι ο αερισμός, καθώς αποτελεί ίσως την σημαντικότερη παράμετρο όσον αφορά την ίδια τη διεργασία της κομποστοποίησης. Επίσης, κατά το σχεδιασμό και τη συντήρηση ενός συστήματος βιοσταθεροποίησης οργανικών αποβλήτων, λαμβάνονται υπόψη οι παρακάτω σημαντικοί παράγοντες [89]:

- Όσο το δυνατόν ελαχιστοποίηση του βάρους και του όγκου των αρχικών υλικών
- Έλεγχος παραμέτρων λειτουργίας (θερμοκρασία, υγρασία κλπ)
- Εξουδετέρωση παθογόνων μικροοργανισμών
- Ελαχιστοποίηση οχλήσεων (εκπομπές αερίων, οσμές, αιωρούμενα σωματίδια)

#### **Ανοιχτά συστήματα κομποστοποίησης**

Σύμφωνα με την Εταιρεία Προστασίας του Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής στα ανοιχτά συστήματα η κομποστοποίηση μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο μεθόδους [109].

##### *Σύστημα Κομποστοποίησης Περιστρεφόμενων Σειραδίων*

Η USEPA σημειώνει ότι η συγκεκριμένη μέθοδος προτιμάται σε περιπτώσεις όπου μεγάλες ποσότητες οργανικών αποβλήτων (όπως κλαδέματα, υγρά και ζωικά παραπροϊόντα) χρήζουν διαχείρισης (π.χ. μεγάλες κοινότητες ή εργοστάσια επεξεργασίας τροφίμων). Μέσω της κομποστοποίησης περιστρεφόμενων σειραδίων είναι δυνατόν να παραχθούν μεγάλες ποσότητες εδαφοβελτιωτικού υλικού (κομπόστ).

Η διαδικασία κομποστοποίησης μέσω αυτής της τεχνικής περιλαμβάνει τη δημιουργία μεγάλων σωρών, οι οποίες ονομάζονται σειράδια, και τον περιοδικό αερισμό τους μέσω είτε χειροκίνητης είτε μηχανικής περιστροφής των σωρών. Όπως αναφέρθηκε, το ύψος των σειραδίων πρέπει να είναι μεταξύ 1,5 και 2,5 μέτρων, ώστε να μπορούν να εκλύουν ικανοποιητική ποσότητα θερμότητας και άρα να διατηρούν τη θερμοκρασία στα απαραίτητα για τη διεργασία επίπεδα, ενώ ταυτόχρονα να μην είναι τόσο μεγάλα ώστε να εμποδίζουν τον ικανοποιητικό αερισμό του υλικού [89].





**Εικόνα 2-3: Σύστημα μηχανικής ανάδευσης σειραδίων [110]**

Η επιτυχής κομποστοποίηση μέσω της συγκεκριμένης μεθόδου απαιτεί την υπέρβαση μίας σειράς προκλήσεων [109]:

- Αναγκαία είναι η διάθεση συχνά μεγάλης έκτασης για την τοποθέτηση των σειραδίων
- Κατά τη διάρκεια βροχερών περιόδων, το σχήμα των σειραδίων πρέπει να τροποποιείται κατάλληλα ώστε να παροχετεύεται το νερό εκτός του υλικού και όχι να διεισδύει στο εσωτερικό των σειραδίων
- Ως μεγάλης κλίμακας διεργασία, η συγκεκριμένη μέθοδος υπόκειται σε μία σειρά νομικών κανονισμών λειτουργίας, ενώ και το παραγόμενο εδαφοβελτιωτικό υλικό (κομπόστ) υπόκειται σε συγκεκριμένα πρότυπα σχετικά με τη συγκέντρωση βακτηρίων και βαρέων μετάλλων
- Η έκλυση αερίων και οσμών πρέπει να ελέγχεται, ενώ οι περίοικοι πρέπει να ενημερώνονται σχετικά με τη διεργασία, τα οφέλη της, καθώς και τους κανονισμούς υγιεινής και ασφάλειας που ακολουθούνται

#### *Σύστημα κομποστοποίησης αεριζόμενων στατικών σωρών*

Η τεχνοτροπία κομποστοποίησης στατικών σωρών αντικαθιστά την περιστροφή των σωρών με τον μηχανικό αερισμό αυτών [111]. Σύμφωνα με την USEPA (2014), η μέθοδος των αεριζόμενων στατικών σωρών είναι ικανή να παραγάγει εδαφοβελτιωτικό υλικό σχετικά γρήγορα (εντός τριών με έξι μηνών) και θεωρείται περισσότερο κατάλληλη για ομοιογενή μίγματα οργανικών αποβλήτων όπως είναι τα κλαδέματα και τα Αστικά Στερεά Απόβλητα (υπολείμματα τροφών, χαρτιά κλπ). Ωστόσο η συγκεκριμένη μέθοδος δεν θεωρείται κατάλληλη για ζωικά παραπροϊόντα και υπολείμματα βιομηχανικών τροφίμων.

Για την επίτευξη ικανοποιητικού αερισμού γίνεται χρήση διογκωτικού υλικού (όπως πριονίδια και τεμαχισμένες εφημερίδες) ώστε να καθίσταται δυνατή η κίνηση του αέρα μέσα στον όγκο των αποβλήτων. Στο τέλος της διεργασίας, το διογκωτικό υλικό αφαιρείται μέσω εσχαρισμού. Γενικά, οι στατικοί σωροί έχουν σχήμα πυραμίδας με ύψος έως 3 μέτρα, ενώ οι διαστάσεις της βάσης κυμαίνονται μεταξύ των 12 και 15 μέτρων. Η εξωτερική επιφάνεια του σωρού καλύπτεται με έτοιμο κομποστοποιημένο υλικό, που δρα ως θερμομονωτικό καθώς και ως μονωτικό των οσμών.



**Εικόνα 2-4 Σύστημα αεριζόμενων στατικών σωρών**

Η απουσία περιστροφής των σωρών καθιστά αναγκαία την καταγραφή και τον έλεγχο των λειτουργικών παραμέτρων, ώστε να μην αστοχήσει η διεργασία. Επιπλέον, ο ελεγχόμενος αερισμός των σωρών καθιστά δυνατή την αύξηση του ύψους των σωρών, κάτι που μειώνει τις ανάγκες σε εκτάσεις γης, σε σχέση με την μέθοδο των περιστρεφόμενων σωρών. Από την άλλη πλευρά, οι ανάγκες σε εξοπλισμό και προσωπικό αυξάνουν σημαντικά το κόστος της διεργασίας.

### ***Κλειστά συστήματα κομποστοποίησης***

Τα κλειστά συστήματα κομποστοποίησης αποτελούνται από κυλινδρικούς (και σπανίως ορθογώνιους) πύργους, όγκου από 400m<sup>3</sup> έως 1800m<sup>3</sup>. Μερικές φορές οι κομποστοποιητές κλειστού τύπου αποτελούνται από πολυώροφους πύργους, ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη ανάμιξη του υλικού. Ειδικός εξοπλισμός χρησιμοποιείται για την τροφοδότηση του αντιδραστήρα από την κορυφή του και στη συνέχεια το μίγμα τροφοδοσίας κινείται λόγω βαρύτητας προς τον πυθμένα του πύργου. Για τον αερισμό του αντιδραστήρα εμφυσείται αέρας κατ' αντιρροή προς το υλικό που τροφοδοτείται. Επιπλέον, το υλικό που βρίσκεται μέσα στον αντιδραστήρα υπόκειται σε διαρκή ή περιοδική μηχανική ανάδευση ώστε να αερίζεται επαρκώς στο σύνολο του όγκου του [89].

Στα πλεονεκτήματα των κλειστών συστημάτων κομποστοποίησης συγκαταλέγονται η δυνατότητα τους να επεξεργαστούν μεγάλες ποσότητες οργανικού αποβλήτου χωρίς να απαιτούν μεγάλο όγκο, καθώς και η δυνατότητα τους να επεξεργαστούν σχεδόν όλους τους τύπους οργανικής ύλης (κρέας, κτηνοτροφικά απόβλητα κλπ). Επίσης στα κλειστά συστήματα κομποστοποίησης ο απαιτούμενος χρόνος επεξεργασίας είναι σημαντικά μικρότερος, καθώς απαιτούνται μόλις μερικές εβδομάδες για την ολοκλήρωση της διεργασίας [109]

Τα κλειστά συστήματα κομποστοποίησης, λόγω των μικρών αναγκών σε χώρο συχνά θεωρούνται ιδανικά για επιχειρήσεις, σχολεία κοκ που επιθυμούν να επεξεργαστούν τα οργανικά απόβλητα που παράγουν επί τόπου. Να σημειωθεί επίσης ότι λόγω της μηδενικής εκπομπής οσμών τα συστήματα αυτά θεωρούνται ιδανικά για κομποστοποίηση αποβλήτων σε μέρη που βρίσκονται πολλοί άνθρωποι. Το σημαντικότερο μειονέκτημά τους είναι το υψηλότερο κόστος.

Τα κλειστά συστήματα κομποστοποίησης χωρίζονται γενικά σε δύο κατηγορίες [89]:

#### *Οριζόντιοι κλειστοί κομποστοποιητές*

Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει τόσο στατικούς όσο και αναδεδυόμενους κομποστοποιητές σε ένα μεγάλο εύρος διαστάσεων. Συνήθως τοποθετούνται με τρόπο ώστε να εμφανίζουν μικρή κλίση ως προς το έδαφος, κάτι που αποσκοπεί στην διευκόλυνση της κίνησης του υλικού στο εσωτερικό των αντιδραστήρων.

Τέτοιου τύπου συστήματα χρησιμοποιούνται για την κομποστοποίηση πολλών διαφορετικών υποστρωμάτων (π.χ αστικά στερεά απορρίμματα, λυματολάσπη, υπολείμματα επεξεργασίας κρεάτων κοκ). Ο χρόνος παραμονής μπορεί να είναι από 1 έως 7 εβδομάδες και η διεργασία ακολουθείται συνήθως από ένα στάδιο ωρίμανσης του τελικού προϊόντος.

#### *Αντιδραστήρες περιστρεφόμενου τυμπάνου:*

Οι αντιδραστήρες αυτού του τύπου συχνά αναφέρονται ως χωνευτήρες και η κομποστοποίηση των οργανικών αποβλήτων όταν πραγματοποιείται σε αυτούς είναι μια δυναμική διεργασία. Ο όγκος των αντιδραστήρων αυτών μπορεί να φτάσει και τα 500m<sup>3</sup>. Το κυλινδρικό σχήμα των αντιδραστήρων ευνοεί την περιστροφική κίνηση τους, η οποία ενισχύει την ομογενοποίηση και κατάτμηση του οργανικού υλικού που κομποστοποιείται. Η ταχύτητα και η συχνότητα της περιστροφής-ανάδευσης εξαρτάται από τις απαιτήσεις του προς κομποστοποίηση μίγματος. Για παράδειγμα, στην περίπτωση κομποστοποίησης υδαρών υλικών, η υψηλή ταχύτητα περιστροφής ευνοεί την συμπίεση τους. Ως εκ τούτου το προϊόν είναι, μετά το τέλος της διεργασίας, καλύτερα ομογενοποιημένο και περισσότερο ξηρό, διευκολύνοντας έτσι την απομάκρυνση αδρανών και άλλων ανεπιθύμητων υλικών.



**Εικόνα 2-5 Κομποστοποιητής περιστρεφόμενου τυμπάνου**

Το μεγαλύτερο ίσως πλεονέκτημα των αντιδραστήρων αυτού του τύπου είναι ο σημαντικά μικρότερος απαιτούμενος χρόνος παραμονής που μπορεί να διαρκεί από λίγες ώρες έως μερικές μέρες. Ωστόσο, όπως είναι αναμενόμενο σε τόσο μικρό χρόνο παραμονής δεν προλαβαίνει να ολοκληρωθεί η μικροβιακή δράση και επομένως, για την πλήρη αποδόμηση της οργανικής ύλης, απαιτείται η περαιτέρω βιοσταθεροποίηση του μίγματος σε κάποιο άλλο σύστημα.

## 2.3.3 Παραγωγή βιοαιθανόλης

### 2.3.3.1 Γενικά

Η βιομηχανική αιθανόλη παράγεται κυρίως πετροχημικά μέσω της καταλυόμενης με οξύ ενυδάτωσης αιθυλενίου. Η αιθανόλη που χρησιμοποιείται σε αλκοολούχα ποτά αλλά και αυτή που αξιοποιείται ως βιοκαύσιμο παράγεται μέσω ζύμωσης κατά την οποία συγκεκριμένα είδη ζυμομυκήτων (π.χ. *Saccharomyces cerevisiae*) ή βακτηρίων (π.χ. *Zygomonas mobilis*) μεταβολίζουν τα σάκχαρα του υποστρώματος προς παραγωγή αιθανόλης και διοξειδίου του άνθρακα[112].

Η αιθανόλη που παράγεται από φυτικές πηγές σακχάρων (π.χ.ζαχαροκάλαμο) δηλαδή από εξειδικευμένες ενεργειακές καλλιέργειες καλείται βιοαιθανόλη πρώτης γενιάς. Δεύτερης γενιάς καλείται η βιοαιθανόλη που παράγεται από οργανικά απόβλητα. Τέλος, τρίτης γενιάς είναι η βιοαιθανόλη που παράγεται μέσω αξιοποίησης μικροφυκών [113].

### 2.3.3.2 Προκατεργασία και υδρόλυση λιγνοκυτταρινούχου βιομάζας

Η παραγωγή βιοαιθανόλης μέσω λιγνοκυτταρινούχου βιομάζας μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:

- i. Υδρόλυση λιγνοκυτταρινούχου βιομάζας και βιομετατροπή της σε αιθανόλη;
- ii. Θερμοχημική κατεργασία

Κατά την πειραματική επεξεργασία του FORBI προς παραγωγή βιοαιθανόλης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της όξινης υδρόλυσης, η οποία μπορεί να επιτευχθεί με τις κάτωθι μεθόδους[114]–[117]:

- **Με χρήση αραιού οξέος**

Η χρήση αραιού οξέος για τη μετατροπή της βιομάζας σε βιοαιθανόλη αποτελεί την παλαιότερη σχετική μέθοδο προεπεξεργασίας. Η πρώτη απόπειρα εμπορευματοποίησης της παραγωγής βιοαιθανόλης από ξυλεία έγινε στη Γερμανία το 1898 και περιελάμβανε τη χρήση αραιού οξέος για την υδρόλυση της κυτταρίνης σε γλυκόζη. Μέσω της συγκεκριμένης διεργασίας επιτεύχθηκε παραγωγή 7.6 λίτρων από 100 κιλά ξύλου. Η χρήση χαμηλών συγκεντρώσεων οξέων (<1%) απαιτεί τη διεργασία υπό υψηλή θερμοκρασία (180-230 °C) και πίεση για ένα σύντομο χρονικό διάστημα ορισμένων δευτερολέπτων έως λίγων λεπτών, γεγονός που επιτρέπει τη συνεχή λειτουργία της διεργασίας. Το οξύ που συνήθως χρησιμοποιείται είναι το θειικό, λόγω του χαμηλότερου κόστους και των λιγότερο έντονων προβλημάτων διάβρωσης που προκαλεί, συγκρινόμενο με άλλα οξέα όπως το υδροχλωρικό.

Το σημαντικότερο ίσως μειονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ότι λόγω της υψηλής θερμοκρασίας καταστρέφεται το μεγαλύτερο μέρος των πεντοζών που προέρχονται από την ημικυτταρίνη καθώς και ενός μέρους των εξοζών που προέρχονται από την κυτταρίνη. Επίσης, κατά τη συγκεκριμένη διεργασία παράγονται παρεμποδιστές που αναστέλλουν τη μικροβιακή ανάπτυξη των ζυμωτικών μικροοργανισμών καθώς και τη δράση των ενζύμων της προκατεργασίας. Λύση στα συγκεκριμένα προβλήματα δίνει η εφαρμογή διεργασίας δύο σταδίων. Κατά το πρώτο στάδιο η ημικυτταρίνη διαλυτοποιείται σε ηπιότερες συνθήκες, σε θερμοκρασία 170-190 °C και συγκέντρωση οξέος 0.5-1.2% κ.β. Κατά το δεύτερο στάδιο το στερεό που έχει απομείνει και αποτελείται κυρίως από κυτταρίνη, υδρολύεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες 200-230 °C και συγκέντρωση οξέος έως 2.5% κ.β. Μέσω της παραπάνω διεργασίας δύο σταδίων επιτυγχάνονται αποδόσεις ανάκτησης γλυκόζης έως 50-60% και σακχάρων που προέρχονται από ημικυτταρίνη (ξυλόζη, αραβινόζη, μαννόζη, γαλακτόζη) έως 90%.

- **Με τη χρήση πυκνού οξέος**

Κατά τη διάρκεια του 2<sup>ου</sup> Παγκοσμίου Πολέμου στη Γερμανία εφαρμόστηκε για πρώτη φορά η μέθοδος υδρόλυσης της κυτταρίνης με χρήση πυκνού οξέος και συγκεκριμένα με υδροχλωρικό οξύ 41% κ.β. Σήμερα, η πλέον διαδεδομένη προσέγγιση περιλαμβάνει τη χρήση θειικού οξέος 30-40% κ.β. και εφαρμογή ήπιων θερμοκρασιών, 30-35°C, και κανονικών πιέσεων για μερικές ώρες. Μέσω της διεργασίας αυτής επιτυγχάνεται ανάκτηση 85-90% του συνόλου των πεντοζών και εξοζών και ταυτόχρονη παραγωγή ελάχιστων παρεμποδιστών. Το μεγάλο μειονέκτημα αυτής της διεργασίας αποτελεί το γεγονός ότι για να θεωρηθεί οικονομικά βιώσιμη πρέπει να ανακυκλωθεί το μεγαλύτερο μέρος του χρησιμοποιούμενου οξέος. Επίσης, απαιτείται κατάλληλος υψηλός κόστους εξοπλισμός για την αποφυγή της διάβρωσης που προκαλείται από τη χρησιμοποίηση τόσο υψηλών συγκεντρώσεων οξέων.

### **Ενζυμική υδρόλυση της λιγνοκυτταρινούχου βιομάζας**

Για την εφαρμογή της ενζυμικής υδρόλυσης της λιγνοκυτταρινούχου βιομάζας, δηλαδή της χρήσης ενζύμων για τη σακχαροποίηση της κυτταρίνης, είναι απαραίτητη η εφαρμογή σταδίου φυσικής ή/και χημικής προκατεργασίας που θα αποσκοπεί στην αύξηση της επιδεκτικότητας του υποστρώματος (δηλαδή του πολυσακχαρίτη) στις διάφορες ενζυμικές δράσεις, απομακρύνοντας ταυτόχρονα την ημικυτταρίνη και τη λιγνίνη που αποτελούν τα φυσικά εμπόδια της αποικοδόμησης της κυτταρίνης. Επίσης, με την προκατεργασία ελαττώνεται ο δείκτης κρυσταλλικότητας της κυτταρίνης με αποτέλεσμα την περαιτέρω διευκόλυνση της υδρόλυσής της.

Η προκατεργασία οδηγεί στην παραγωγή δύο ρευμάτων, ενός στερεού και ενός υγρού. Το υγρό ρεύμα περιέχει τη διαλυτοποιημένη ημικυτταρίνη η οποία έχει υδρολυθεί, σε μίγμα αποτελούμενο από ολιγοσακχαρίτες και μονοσακχαρίτες (ξυλόζη, μαννόζη, αραβινόζη, γαλακτόζη) καθώς και ένα μικρό ποσοστό κυτταρίνης που υδρολύεται επίσης σε γλυκόζη. Το στερεό ρεύμα περιέχει τη λιγνίνη και τη μη υδρολυμένη κυτταρίνη. Το υγρό ρεύμα φιλτράρεται και χρησιμοποιείται σα ζωοτροφή ή προωθείται για ζύμωση για την παραγωγή αιθανόλης. Το στερεό ρεύμα προωθείται για ενζυμική υδρόλυση και μετατρέπεται σε γλυκόζη.

### **Διεργασίες παραγωγής αιθανόλης από λιγνοκυτταρινούχα υλικά**

Ανάλογα με το τρόπο αλληλοσύνδεσης υδρόλυσης και ζύμωσης διακρίνονται οι παρακάτω τεχνολογίες:

- Διακριτή Υδρόλυση και Ζύμωση, SHF

Κατά τη διεργασία SHF, η ενζυμική υδρόλυση εκτελείται χωριστά από το στάδιο ζύμωσης. Η υδρόλυση και η ζύμωση λαμβάνουν χώρα σε διακριτούς αντιδραστήρες, και για αυτό το λόγο πραγματοποιούνται σε βέλτιστες συνθήκες. Συγκεκριμένα, επιτυγχάνεται βέλτιστη ενζυμική δραστηριότητα, παράγοντας μεγαλύτερες ποσότητες υποστρώματος της ζύμωσης. Ωστόσο, η συσσώρευση προϊόντων υδρόλυσης οδηγεί σε ένα από τα μειονεκτήματα της διεργασίας SHF: Η γλυκόζη και η κελλοβιόζη αποτελούν αναστολές της δράσης των κυτταρινολυτικών ενζύμων [118].

- Ταυτόχρονη Σακχαροποίηση και Ζύμωση, SSF

Κατά τη διεργασία SSF, η ενζυμική υδρόλυση και η ζύμωση διεξάγονται στον ίδιο αντιδραστήρα. Σε αντίθεση με την SHF, η παρεμπόδιση από τη γλυκόζη και τη κελλοβιόζη δεν υφίσταται λόγω της ταυτόχρονης ζύμωσης. Ως εκ τούτου, επιτυγχάνεται υψηλότερη απόδοση στην παραγωγή βιοαιθανόλης με χαμηλότερες απαιτήσεις ενζύμων [119]. Το κρίσιμο ζήτημα για τη βελτιστοποίηση της συγκεκριμένης διεργασίας είναι η θερμοκρασία λειτουργίας του αντιδραστήρα, εφόσον η βέλτιστη θερμοκρασία λειτουργίας των ενζύμων διαφέρει από αυτήν των μικροοργανισμών.

- Ταυτόχρονη Σακχαροποίηση και Συμμεταβολισμός Εξοζών και Πεντοζών, SSCF-SHCF

Οι συνήθεις μικροοργανισμοί για την παραγωγή βιοαιθανόλης δεν έχουν τη δυνατότητα ζύμωσης του συνόλου των σακχάρων που προέρχονται από την υδρόλυση. Για παράδειγμα, το φυσικό στέλεχος του *S. cerevisiae* δεν έχει τη δυνατότητα μεταβολισμού πεντοζών, οι οποίες συναντώνται στη βιομάζα. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, εισάγονται ανασυνδυασμένα μίγματα ζυμομυκήτων ή κυτταρινικών ενζύμων κατά τη διάρκεια της ζύμωσης ώστε να επιτυγχάνεται ζύμωση ενός ευρέος φάσματος πεντοζών και εξοζών. Κατά τη διεργασία SSCF, η υδρόλυση και η ζύμωση πραγματοποιούνται ταυτόχρονα σε έναν αντιδραστήρα, ώστε να διασφαλίζονται τα πλεονεκτήματα της διεργασίας SSF (χαμηλό κόστος, μικρός χρόνος επεξεργασίας, μειωμένος κίνδυνος μόλυνσης και ελάχιστος δυνατός ανασταλτικός χαρακτήρας), ωστόσο προστίθενται μίγματα μικροοργανισμών και ενζύμων με βάση την παραπάνω λογική.

- Άμεση Μικροβιακή Μετατροπή, CBP

Η διεργασία CBP συνδυάζει ταυτόχρονα υδρόλυση βιομάζας, χρησιμοποίηση απελευθερωμένων σακχάρων και ζύμωση σε ένα βιοαντιδραστήρα [120]. Θεωρητικά, η CBP αποτελεί την πιο ενεργειακά και οικονομικά αποδοτική λόγω της μείωσης του αριθμού των διεργασιών. Ωστόσο, το κρίσιμο πρόβλημα είναι η ανάπτυξη ενός μικροοργανισμού που να συνδυάζει ξεχωριστά όλα τα χαρακτηριστικά κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Μεταξύ όλων των πιθανών μικροβίων CBP, θερμόφιλων βακτηρίων, όπως το *Clostridium thermocellum*, πιστεύεται ότι είναι εφικτό να χρησιμοποιηθούν για την υδρόλυση και τη ζύμωση. Ένζυμα που περιέχονται στο θερμόφιλο μικροοργανισμό είναι υπεύθυνα για την αποικοδόμηση της κυτταρίνης και την απελευθέρωση των σακχάρων.

### **Ενζυμική παραγωγή βιοαιθανόλης από FORBI**

Στα πλαίσια του ερευνητικού έργου Waste4think, στο Εργαστήριο Βιοτεχνολογίας της Σχολής Χημικών Μηχανικών μελετήθηκε η δυνατότητα παραγωγής FORBI μέσω της διεργασίας της Μη ισόθερμης ταυτόχρονης σακχαροποίησης και ζύμωσης (non-isothermal simultaneous saccharification and fermentation, NSSF). Η NSSF αποτελεί παραλλαγή της SSF. Στον ίδιο αντιδραστήρα λαμβάνει χώρα τόσο η ενζυμική υδρόλυση όσο και η ζύμωση, σε διακριτά στάδια διαφορετικών θερμοκρασιών, ώστε να επιτυγχάνονται σε κάθε στάδιο της διεργασίας η βέλτιστες θερμοκρασιακές συνθήκες.

## **2.4 Αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων αξιοποίησης Βιοαποικοδομήσιμων Αστικών Απορριμμάτων**

### **2.4.1 Ανάλυση Κύκλου Ζωής**

Η ιδέα της μελέτης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκύπτουν από την κατασκευή, κατανάλωση/χρήση και διαχείριση στο τέλος του κύκλου ζωής των καταναλωτικών προϊόντων

πρωτοσυναντάται κατά τα μέσα της δεκαετίας του 1960. Συγκεκριμένα, η ανάγκη συγκριτικής αξιολόγησης μεταξύ διαφορετικών προϊόντων όσον αφορά στο χρόνο ζωής τους αλλά και την κατανάλωση ενέργειας αποτέλεσε την αφορμή για τη μελέτη και επινόηση μεθόδων εκτίμησης του περιβαλλοντικού τους αποτυπώματος. Σταδιακά, αναγνωρίστηκε ότι για την πλειονότητα των προϊόντων το μεγαλύτερο μέρος της προκαλούμενης περιβαλλοντικής επιβάρυνσης δεν οφείλεται τόσο στη χρήση του προϊόντος, αλλά στην εξόρυξη και επεξεργασία των πρώτων υλών, στην παραγωγή, τη μεταφορά και εν τέλει την απόρριψή του. Η σημασία του καθορισμού του κύκλου ζωής ενός προϊόντος ή πολλών εναλλακτικών προϊόντων αποτέλεσε ιδιαίτερα ελκυστικό ζήτημα υπό μελέτη κατά τις δεκαετίες 1980 και 1990. Στη βάση των μελετών που υλοποιήθηκαν τότε αναπτύχθηκε η ιδέα της ανάλυσης του κύκλου ζωής, η οποία περιλαμβάνει τη συλλογή και αξιολόγηση των εισαγόμενων και εξαγόμενων δεδομένων και την αποτίμηση των αναμενόμενων περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός συστήματος παραγωγής κάποιου προϊόντος κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του [121].

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής αποτελεί ένα χρήσιμο διαχειριστικό εργαλείο, χάρη στο οποίο δίνεται η δυνατότητα αποτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (δηλαδή του περιβαλλοντικού αποτυπώματος) από την παραγωγή και χρήση ενός προϊόντος ή από την ανάπτυξη μιας διεργασίας ή δραστηριότητας. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό υπολογίζονται και ποσοτικοποιούνται η ενέργεια και τα υλικά που χρησιμοποιούνται στο σύστημα καθώς και τα απόβλητα που δημιουργούνται, εκτιμώντας τί επίπτωση έχουν τα στοιχεία αυτά για το περιβάλλον. Ο τελικός στόχος της ανάλυσης αυτής είναι ο υπολογισμός των δυσμενέστερων περιπτώσεων περιβαλλοντικής επιβάρυνσης, η σύγκριση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος μεταξύ διαφορετικών εναλλακτικών σεναρίων, καθώς και η αποτίμηση των προοπτικών για εφαρμογή βελτιώσεων στα υπάρχοντα σενάρια και συστήματα [122].



**Εικόνα 2-6: Σχηματική απεικόνιση του κύκλου ζωής ενός προϊόντος**

Πρόκειται για ένα εργαλείο αξιολόγησης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος προϊόντων, διεργασιών και βιομηχανικών συστημάτων που περιλαμβάνει όλα τα στάδια «από τη γέννηση έως το θάνατο» (from cradle to grave). Για την εφαρμογή της μεθόδου περιλαμβάνονται και αναλύονται όλα τα στάδια της ζωής ενός προϊόντος από τη συλλογή των πρώτων υλών που χρειάζονται για την παραγωγή του και μέχρι το σημείο που όλα τα υλικά επιστρέφουν πάλι πίσω

στο περιβάλλον είτε μέσω ταφής είτε μέσω κάποιας εναλλακτικής οδού διαχείρισης. Συγκεκριμένα, η ανάλυση περιλαμβάνει την εξαγωγή/συλλογή και επεξεργασία πρώτων υλών, την παραγωγή και συσκευασία, την μεταφορά και διανομή, τη χρήση και επαναχρησιμοποίηση, την συντήρηση, την ανακύκλωση και εντέλει την τελική απόρριψη, όπως σχηματικά παρουσιάζεται στην Εικόνα 2-6.

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής είναι μια μέθοδος η οποία εφαρμόζεται σε όλο τον κόσμο και η οποία έχει αποτελέσει ένα βασικό στοιχείο στην περιβαλλοντική πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης, των ΗΠΑ, της Ιαπωνίας της Κορέας καθώς και ακμαζόντων οικονομιών, όπως αυτή της Ινδίας και σχετικά πρόσφατα της Κίνας. Η μέθοδος αυτή με την πάροδο των χρόνων έχει εξελιχθεί, έτσι ώστε σήμερα να βρίσκει εφαρμογές σε πληθώρα κλάδων όπως η διαχείριση των αποβλήτων, ο κατασκευαστικός κλάδος, η αμυντική βιομηχανία και ο τουρισμός. Επιπρόσθετα, ενώ οι πρώιμες μελέτες περιορίζονταν ως προς το πλήθος των κατηγοριών των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (όπως η αθροιστική κατανάλωση ενέργειας και τα στερεά απόβλητα), πλέον παρατηρείται η διεύρυνση σε πιο εξειδικευμένες κατηγορίες επίδρασης όπως αυτή της βιοποικιλότητας και της επιβάρυνσης ως προς την κλιματική αλλαγή. Ταυτόχρονα παρατηρείται και η επέκταση της ανάλυσης σε οικονομικό και κοινωνικό επίπεδο, λαμβάνοντας υπόψη το κόστος του κύκλου ζωής ενός προϊόντος ή μιας διεργασίας καθώς και τον κοινωνικό αντίκτυπο που αυτό θα έχει [123], [124].

#### **2.4.1.1 Οι απαρχές της μεθόδου ως τη σημερινή της μορφή**

Οι πρώτες μελέτες που σήμερα αναγνωρίζονται ως οι πρώτες απόπειρες αποτύπωσης και περιβαλλοντικής αξιολόγησης του κύκλου ζωής χρονολογούνται στα τέλη της δεκαετίας του 1960 και στις αρχές του 1970, μια περίοδο στην οποία περιβαλλοντικά θέματα όπως η αποδοτικότητα πόρων και ενέργειας και ο έλεγχος της ρύπανσης και των στερεών αποβλήτων απέκτησαν ένα έντονο δημόσιο ενδιαφέρον και κινητοποίησαν ιδιαίτερα τις κυβερνήσεις και ευρύτερα τους φορείς χάραξης πολιτικής, τους κοινωνικούς φορείς αλλά και την κοινωνία στο σύνολό της.

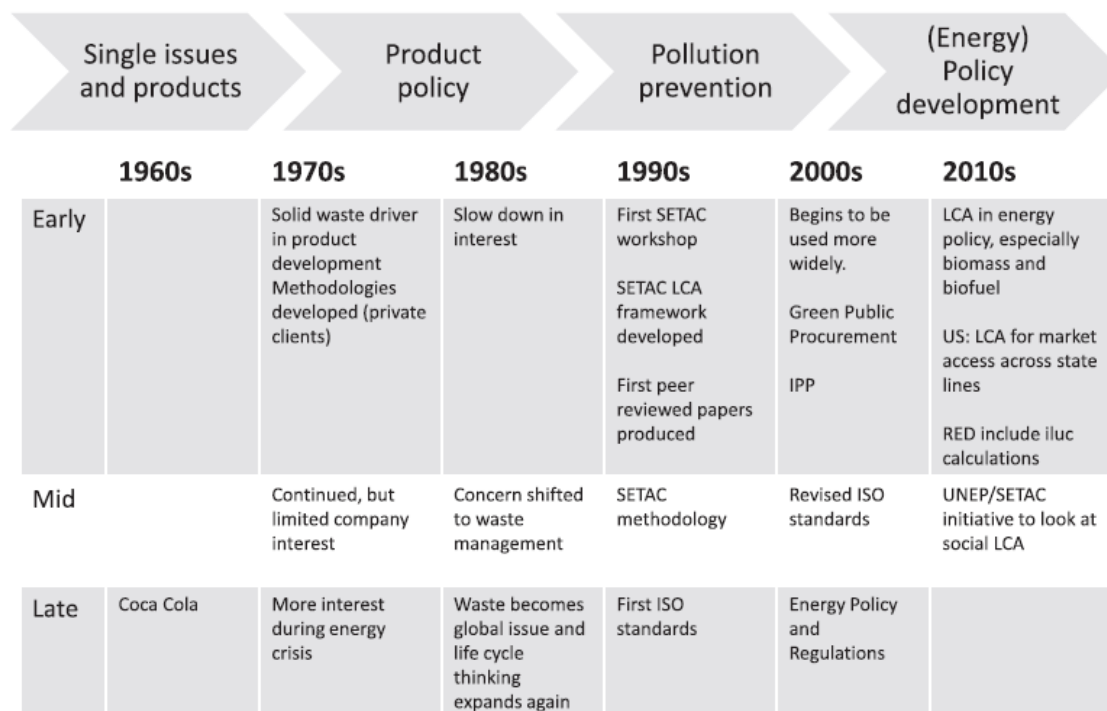
Το μοντέλο ενώ αρχικά για αρκετά χρόνια αφορούσε μόνο την ανάλυση σε επίπεδο κατανάλωσης ενέργειας για την παραγωγή ενός προϊόντος, διευρύνθηκε προκειμένου να συμπεριλάβει απαιτήσεις σε πρώτες ύλες, φορτίο εκπομπών ανά μονάδα προϊόντος που παράγεται, καθώς και ποσότητες παραγόμενων αποβλήτων. Μία από τις πρώτες αναλύσεις, στην οποία συμπεριλήφθηκε η ποσοτικοποίηση των απαιτήσεων σε πρώτες ύλες, των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου καθώς και των ροών αποβλήτων αφορούσε τον τομέα των αναψυκτικών και διεξήχθη το 1969 από το MidWest Research Institute (MRI) για λογαριασμό της εταιρίας Coca Cola. Η δεύτερη επίσημη ανάλυση πραγματοποιήθηκε από το ίδιο ινστιτούτο το 1974 για την υπηρεσία προστασίας του περιβάλλοντος των Ηνωμένων Πολιτειών ενώ την ακολούθησε από την Ευρώπη και συγκεκριμένα την Ελβετία η εταιρεία Basler and Hofman θέτοντας τη βάση για να αναπτυχθεί η Ανάλυση Κύκλου Ζωής στη σημερινή της μορφή. Το 1984, πάλι από την Ελβετία, δημοσιεύθηκε ένα άρθρο με αναλυτική περιγραφή των απαραίτητων δεδομένων για την διεξαγωγή ανάλυσης κύκλου ζωής, ενώ προτάθηκε για πρώτη φορά η μέθοδος αξιολόγησης των επιπτώσεων [123].

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1990 παρουσιάστηκε μια μεγάλη βελτίωση στη διεξαγωγή των μεθόδων ανάλυσης αλλά και στο συντονισμό των ερευνητών και των επιστημόνων. Ηγετικό και συντονιστικό ρόλο σε αυτή την προσπάθεια ανέλαβε το SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) ενώ ο Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης (ISO) αναμείχθηκε το 1994. Ενώ το SETAC ανέλαβε την ανάπτυξη και εναρμόνιση των μεθόδων, ο Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης εξέδωσε δύο ξεχωριστά πρότυπα για την εφαρμογή της μεθόδου [125]:



- ISO 14040 (2006E): ‘Environmental management – Life cycle assessment - Principles and framework’
- ISO 14044 (2006E): ‘Environmental management - Lifecycle assessment - Requirements and guidelines’

Παράλληλα, κατά τα τέλη της δεκαετίας του 1980 και κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1990, ήρθαν στο προσκήνιο θέματα που συγκέντρωναν παγκόσμιο ενδιαφέρον, όπως η εξάντληση του στρατοσφαιρικού όζοντος και η κλιματική αλλαγή, ξεπερνώντας τα όρια της εκάστοτε χώρας.



**Εικόνα 2-7: Εξέλιξη της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής[123]**

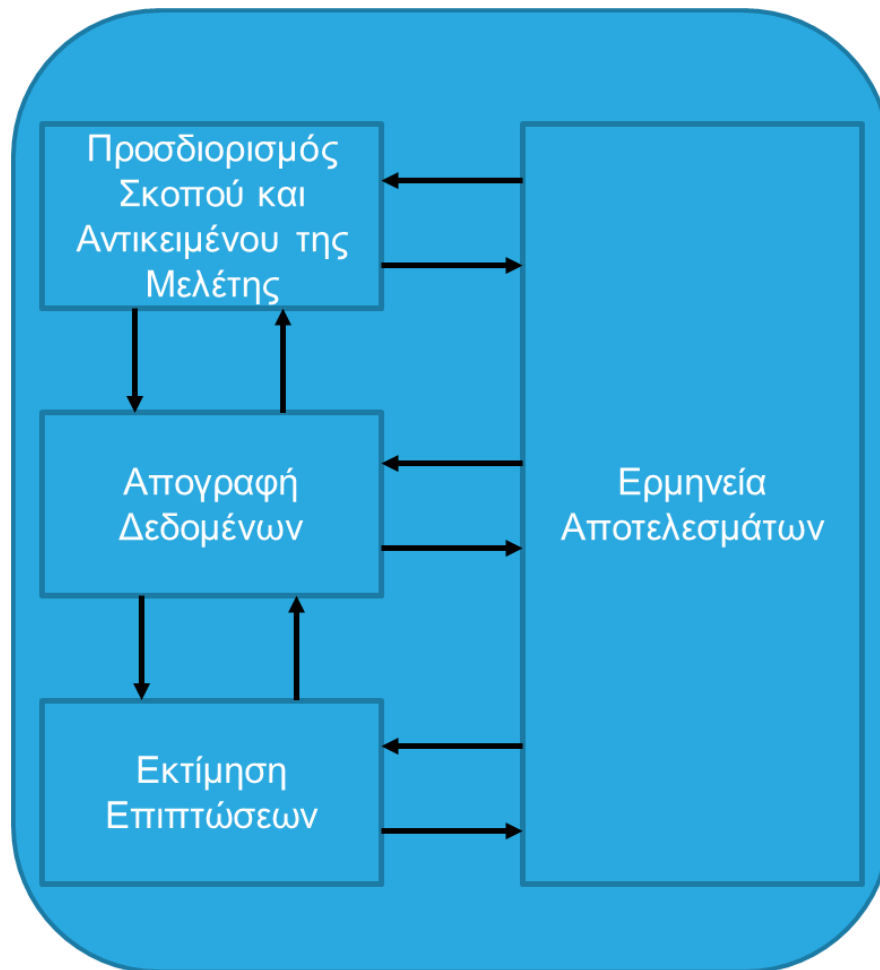
Κατά τη διάρκεια της πρώτης δεκαετίας του 21<sup>ου</sup> αιώνα, παρατηρήθηκε μεγάλη αύξηση στο ενδιαφέρον γύρω από το LCA. Κατά το διάστημα αυτό, η ανάλυση του κύκλου ζωής άρχισε να εντάσσεται και να εδραιώνεται ως εργαλείο χάραξης πολιτικής, τόσο των κρατών όσο και των διεθνών οργανισμών γενικότερα. Το 2005 συστάθηκε η Ευρωπαϊκή πλατφόρμα αξιολόγησης κύκλου ζωής (European Life Cycle Database – ELCD), η οποία εξασφαλίζει την διαθεσιμότητα και τη χρήση ποιοτικά διασφαλισμένων δεδομένων, μεθόδων και μελετών σχετικά με την ανάλυση του κύκλου ζωής, με σκοπό την υποστήριξη στη λήψη αποφάσεων για την Ευρωπαϊκή Ένωση σε θέματα δημόσιας πολιτικής και παραγωγής. Ταυτόχρονα, η ανάλυση του κύκλου ζωής εντάσσεται όλο και περισσότερο στην περιβαλλοντική πολιτική διεθνώς, καθώς θεσπίζονται πολλά πρότυπα σχετικά με το αποτύπωμα άνθρακα κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής διαφόρων διεργασιών.

Σήμερα, η ανάλυση του κύκλου ζωής έχει στρέψει το ενδιαφέρον και εφαρμόζεται κυρίως σε θέματα ενεργειακής πολιτικής και κυρίως σε θέματα βιομάζας και βιοκαυσίμων. Πλέον, η μέθοδος μέτρησης των εκπομπών έχει μεταβληθεί και προσαρμοστεί, ώστε πλέον να μετρούνται οι εκπομπές σε αέρια του θερμοκηπίου αντί για εκπομπές στο έδαφος, το νερό και τον αέρα. Ταυτόχρονα υπάρχει πλέον επέκταση της ανάλυσης σε επίπεδο οικονομικό και κοινωνικό με την εισαγωγή των μεθόδων Life Cycle Costing (LCC) και Social-LCA [14], [126], [127].

### 2.4.1.2 Στάδια της μεθόδου

Μια τυπική ανάλυση κύκλου ζωής μπορεί να χωριστεί σε τέσσερα βασικά στάδια:

1. Καθορισμός σκοπού και πλαισίου, αρχές και οριοθέτηση του συστήματος (Goal & Scope Definition)
2. Απογραφή και ανάλυση δεδομένων (Life Cycle Inventory - LCI)
3. Ανάλυση και αποτίμηση των επιπτώσεων κύκλου ζωής (Life Cycle Impact Assessment – LCIA)
4. Ερμηνεία αποτελεσμάτων (Interpretation)



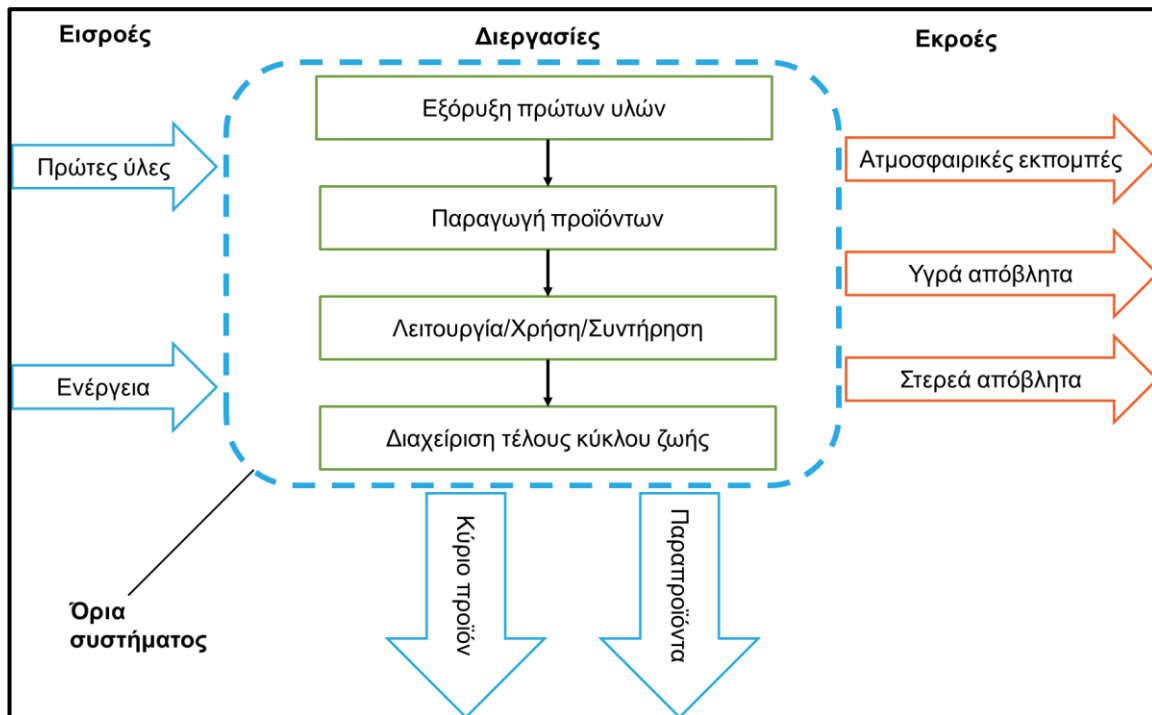
**Εικόνα 2-8: Μέθοδος υλοποίησης Ανάλυσης Κύκλου Ζωής**

*Καθορισμός σκοπού και πλαισίου, αρχές και οριοθέτηση του συστήματος*

Όπως έχει αναφερθεί ήδη, κατά την ανάλυση κύκλου ζωής υπολογίζεται το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της διαδικασίας παραγωγής ενός προϊόντος, μιας διεργασίας ή ενός συστήματος. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να τονιστεί ότι ένα μοντέλο αποτελεί απεικόνιση μιας πολύ σύνθετης πραγματικής διαδικασίας και δεδομένου αυτού είναι φυσικό επόμενο να περιλαμβάνει αρκετές παραδοχές και απλουστεύσεις. Η πρόκληση έγκειται στην ικανότητα της ανάπτυξης του μοντέλου, έτσι ώστε οι παραδοχές να έχουν τη μικρότερη δυνατή επίδραση στην εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, είναι απαραίτητο να γίνει ακριβής καθορισμός του σκοπού για τον οποίο διεξάγεται η ανάλυση [128], [129].

Μαζί με την διασαφήνιση του σκοπού της ανάλυσης κύκλου ζωής, πρωταρχικό μέλημα αποτελεί και ο ορισμός της λειτουργικής μονάδας της μελέτης. Η λειτουργική μονάδα είναι άμεσα συνδεδεμένη με τον καθορισμό του στόχου της ανάλυσης κύκλου ζωής και είναι ο παράγοντας που τη διαφοροποιεί από τις άλλες προσεγγίσεις περιβαλλοντικής αξιολόγησης. Πρόκειται για μία ποσοτικοποιημένη περιγραφή της απόδοσης του συστήματος που μελετάται και καθορίζεται με βάση την υπηρεσία που παρέχεται από αυτό [128].

Βάσει της επιλεγμένης λειτουργικής μονάδας της μελέτης, γίνεται και ο καθορισμός των ορίων του υπό μελέτη συστήματος. Η υπό εξέταση διεργασία αποτελεί ένα ενιαίο σύστημα που περιλαμβάνει επιμέρους διεργασίες. Οι επιμέρους αυτές διεργασίες συνδέονται μεταξύ τους και έχουν απαίτηση σε ύλη και ενέργεια. Οτιδήποτε δεν ανήκει στα όρια της ενιαίας διεργασίας καλείται περιβάλλον του συστήματος και τοποθετείται εκτός των ορίων του και άρα δεν συμπεριλαμβάνεται στη μελέτη. Επίσης, απαραίτητη είναι η αποτύπωση των εισροών και εκροών του συστήματος, καθώς και αναλυτική -ποιοτική και ποσοτική- περιγραφή των επιμέρους σταδίων του. Ιδιαίτερα σημαντικό για την οριοθέτηση του συστήματος είναι επίσης ο καθορισμός των γεωγραφικών και χρονικών ορίων του, π.χ. αποστάσεις μεταφοράς πρώτων υλών και προϊόντων.



**Εικόνα 2-9: Οριοθέτηση υπό μελέτη συστήματος και διάγραμμα εισροών/εκροών**

Όσον αφορά τα δεδομένα τα οποία χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση της ανάλυσης, θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πλήρη και αξιόπιστα, ώστε να εξασφαλιστεί η εγκυρότητα και η ακρίβεια των αποτελεσμάτων που θα εξαχθούν. Η πηγή των δεδομένων μπορεί να είναι είτε πρωτογενής, όταν πρόκειται για αποτελέσματα μετρήσεων και πειραματικών δεδομένων, είτε δευτερογενής όταν πρόκειται για τεχνικές αναφορές, δημοσιεύσεις ή δεδομένα παρεμφερών μελετών [44], [130].

#### *Απογραφή και ανάλυση δεδομένων (LCI)*

Στο στάδιο αυτό προσδιορίζονται και ποσοτικοποιούνται οι ροές από και προς το περιβάλλον για το υπό εξέταση σύστημα. Στις εισροές περιλαμβάνονται οι πρώτες και βοηθητικές ύλες καθώς

και το χρησιμοποιούμενο νερό και η ενέργεια, ενώ στις εκροές οι εκπομπές διαφόρων αερίων, τα απόβλητα (στερεά και υγρά) και τα προϊόντα και παραπροϊόντα της διεργασίας. Ιδιαίτερα σημαντικός σε αυτό το στάδιο είναι ο υπολογισμός των ισοζυγίων μάζας και ενέργειας μεταξύ των εσωτερικών διεργασιών του συστήματος. Ένα τυπικό διάγραμμα ροών για την ανάλυση του κύκλου ζωής απεικονίζεται στην Εικόνα 2-9.

#### *Ανάλυση και αποτίμηση των επιπτώσεων κύκλου ζωής*

Η αξιολόγηση των επιπτώσεων της ανάλυσης κύκλου ζωής οδηγεί στην εξαγωγή συμπερασμάτων για το σύστημα που μελετάται και συμβάλλει στην λήψη αποφάσεων. Αρχικά οι επιπτώσεις μπορούν να χωριστούν σε τρεις διαφορετικές κατηγορίες, ανάλογα με τον αποδέκτη στον οποίο επιδρούν. Πρόκειται για επιπτώσεις στα οικοσυστήματα, στην ανθρώπινη υγεία και στην εξάντληση των φυσικών πόρων.

Όσον αφορά την πρώτη κατηγορία, αυτή περιλαμβάνει φαινόμενα που έχουν άμεση σχέση με την χλωρίδα και την πανίδα, όπως το φαινόμενο της όξινης βροχής, ο ευτροφισμός, και η οικοτοξικότητα (αναφέρεται σε απώλεια ειδών σε μια περιοχή για συγκεκριμένη χρονική περίοδο).

Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τις επιπτώσεις του εξεταζόμενου συστήματος στον άνθρωπο και την υγεία του. Σε αυτές συμπεριλαμβάνεται η υπερθέρμανση του πλανήτη, το φαινόμενο του θερμοκηπίου, το φωτοχημικό νέφος, η μείωση της στιβάδας του όζοντος, η αιθαλομίχλη, η ιονίζουσα ακτινοβολία και οι διάφοροι τοξικοί εισπνεόμενοι παράγοντες.

Τέλος, η τρίτη κατηγορία αφορά την εξάντληση των φυσικών πόρων και περιλαμβάνει την εξόρυξη μεταλλευμάτων, καθώς και ορυκτών καυσίμων που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενέργειας [131].

Ο υπολογισμός των επιπτώσεων μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας κατάλληλα υπολογιστικά λογισμικά μοντελοποίησης του κύκλου ζωής του συστήματος. Τέτοια λογισμικά είναι το SimaPro, το Gabi και το Easetech το οποίο χρησιμοποιήθηκε και στην παρούσα μελέτη [132]. Το συγκεκριμένο μοντέλο επιτρέπει να εξεταστεί το πόσο συμβάλλει κάθε διεργασία του συστήματος αλλά και πιο συγκεκριμένα κάθε παράμετρος των διεργασιών στις διάφορες κατηγορίες των επιπτώσεων.

#### *Ερμηνεία αποτελεσμάτων*

Μετά την αποτίμηση των επιπτώσεων, ακολουθεί η ερμηνεία των εξαχθέντων αποτελεσμάτων. Στην ερμηνεία περιλαμβάνεται η αξιολόγηση των πιο σημαντικών επιπτώσεων που προέκυψαν με βάση τις φάσεις των LCI και LCIA. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό τα αποτελέσματα να αξιολογούνται έχοντας ως γνώμονα το σκοπό για τον οποίο πραγματοποιήθηκε εξ αρχής η ανάλυση του κύκλου ζωής (όπως για παράδειγμα σύγκριση μεταξύ εναλλακτικών σεναρίων, αξιολόγηση περιβαλλοντικού αποτυπώματος παραγωγής ενός προϊόντος, βελτίωση παραγωγικής διαδικασίας κ.ο.κ.). Τελικός στόχος είναι είτε η επιλογή του βέλτιστου σεναρίου είτε η ανάδειξη πιθανών βελτιώσεων και αναβάθμισης του συστήματος, μέσω της αναγνώρισης των πλέον επιβαρυντικών σημείων του (environmental hotspots).

Ιδιαίτερα σημαντική για την εξαγωγή και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων είναι η εγκυρότητα των δεδομένων που εισάγονται στο σύστημα. Για το λόγο αυτό, προκειμένου να αξιολογηθεί η εγκυρότητά τους και το μέγεθος της αβεβαιότητας που κάθε δεδομένο φέρει, συνήθίζεται να διεξάγεται στο τέλος της μελέτης ανάλυση ευαισθησίας, η οποία εμφανίζει την ελαστικότητα του τελικού αποτελέσματος στην αλλαγή τιμών των δεδομένων και ανάλυση αβεβαιότητας για να αξιολογηθεί ο βαθμός της αβεβαιότητας που φέρουν τα αποτελέσματα [44], [130], [133].

### 2.4.1.3 Περιορισμοί στην ανάλυση του κύκλου ζωής

Όπως με όλα τα σύνθετα εργαλεία αξιολόγησης, η μεθοδολογία ανάλυσης κύκλου ζωής εμφανίζει κάποιες ιδιαιτερότητες και περιορισμούς στην εφαρμογή της. Παρόλο που τα πρότυπα ISO παρέχουν ένα γενικό πλαίσιο για τη διεξαγωγή της ανάλυσης, εντούτοις αφήνουν πολλά περιθώρια ερμηνείας της μεθόδου και παραλλαγών στην εφαρμογή της. Ως αποτέλεσμα, οι μελέτες LCA έχουν δεχτεί κριτική σχετικά με την απόδοση διαφορετικών αποτελεσμάτων για αναλύσεις που αφορούν την ίδια διεργασία.

Ένας βασικός περιορισμός που εμφανίζεται στην διεξαγωγή του LCA αφορά τη συλλογή και χρήση των δεδομένων. Παρόλο που τα σχετικά λογισμικά και οι βάσεις δεδομένων είναι ευρέως διαθέσιμα τα τελευταία χρόνια, η έλλειψη αξιόπιστων διαθέσιμων δεδομένων παραμένει ένα εμπόδιο. Για αυτό το λόγο είναι ιδιαίτερα σημαντικό να εξετάζεται η εγκυρότητα των δεδομένων αυτών και να λαμβάνονται από όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστες πηγές και σχετικές με το αντικείμενο που μελετάται. Παράλληλα, μια καλή λύση για την λήψη δεδομένων αποτελεί η χρήση δημόσιων διαθέσιμων βάσεων δεδομένων (π.χ. US EPA's Toxic Release Inventory, Australia's National Pollutant Inventory, European Life Cycle Database). Οι βάσεις αυτές είναι εύκολα προσβάσιμες και διατίθενται δωρεάν. Ωστόσο, επειδή τα δεδομένα αυτά είναι αρκετά εξειδικευμένα για συγκεκριμένα μέρη και εγκαταστάσεις και προκειμένου να προσαρμοστούν σε άλλες μελέτες, πρέπει να υιοθετηθούν διάφορες υποθέσεις. Αντίστοιχες βάσεις δεδομένων υπάρχουν και για την Ευρώπη (Ecoinvent, European Commission's Platform on LCA).

Ένας άλλος περιορισμός που έχει άμεση σχέση με τη συλλογή των δεδομένων είναι η αβεβαιότητα που αυτά εμφανίζουν. Ενώ η αστάθεια των δεδομένων έχει μεγάλο αντίκτυπο στο πώς τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται για την λήψη αποφάσεων, η πραγματική επίδραση της αβεβαιότητας δεν έχει μελετηθεί επαρκώς. Επιπρόσθετα, πολλές μελέτες LCA διεξάγονται χωρίς καν να λαμβάνουν υπόψη την αβεβαιότητα των δεδομένων του συστήματος. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο να εφαρμόζεται ανάλυση αβεβαιότητας για τα δεδομένα που εισάγονται στο σύστημα, ώστε να αποτυπώνεται η διακύμανση των αποτελεσμάτων και να αξιολογείται αναλόγως. Παράλληλα οι προσπάθειες των ερευνητών πρέπει να επικεντρωθούν στην καθιέρωση συνιστομένων πρακτικών για την αξιολόγηση της αβεβαιότητας και την καθοδήγηση των αναλυτών στο πώς να την υπολογίσουν, διαχειριστούν και αξιολογήσουν, τόσο στο στάδιο της απογραφής και ανάλυσης δεδομένων, όσο και στην αποτίμηση των επιπτώσεων και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Ένας ακόμη περιορισμός, ο οποίος υπάρχει στο LCA, αφορά την εκτίμηση του κινδύνου. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να γίνει κατανοητή η διαφορά μεταξύ της ανάλυσης των επιπτώσεων του κύκλου ζωής και της παραδοσιακής μεθόδου ανάλυσης κινδύνου. Η κλασική προσέγγιση της αξιολόγησης κινδύνου είναι μια πολύ σύνθετη διαδικασία, η οποία περιλαμβάνει την ενσωμάτωση ενός εύρους πληροφοριών και δεδομένων σχετικά με τον χαρακτηρισμό της πηγής, τη μεταφορά και την έκθεση στον κίνδυνο, καθώς και την εξέταση της αντίδρασης στην έκθεση. Αντίθετα, στην ανάλυση των επιπτώσεων του κύκλου ζωής μελετάται η σύνδεση μεταξύ μιας διεργασίας ή ενός συνδυασμού διεργασιών και των πιθανών επιπτώσεων τους, χωρίς να επιχειρείται να ποσοτικοποιηθούν πραγματικές επιπτώσεις για συγκεκριμένη περιοχή και χρονικό ορίζοντα. Έτσι, η μοντελοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε ένα σύστημα ανάλυσης κύκλου ζωής αποτελεί έναν απλοποιημένο δείκτη επιπτώσεων για ένα πολύ σύνθετο σύστημα που ωστόσο αποτελεί ποιοτική αναπαράσταση του πραγματικού κινδύνου. Αν και δεν είναι άκρως αποτελεσματικό εργαλείο για την απόλυτη πρόβλεψη κινδύνου, το μοντέλο ανάλυσης επιπτώσεων και τα αποτελέσματα της ανάλυσης κύκλου ζωής είναι ιδανικά για την πραγματοποίηση σχετικών συγκρίσεων μεταξύ σεναρίων και τη λήψη σχετικών διαχειριστικών αποφάσεων.

Τέλος, όσον αφορά τη λήψη αποφάσεων, τα αποτελέσματα της ανάλυσης κύκλου ζωής θα πρέπει να συνοδεύονται από τη χρήση και άλλων υπολογιστικών ή αναλυτικών εργαλείων. Ενώ μια μελέτη LCA εξάγει πολύ χρήσιμες πληροφορίες, τα αποτελέσματα θα πρέπει να αντιμετωπίζονται ως ένας μόνο παράγοντας στην διαδικασία της λήψης απόφασης. Συνήθως, προκειμένου να καταλήξει κάποιος φορέας λήψης αποφάσεων στην τελική απόφαση, πρέπει να λάβει υπόψη του και άλλους παράγοντες όπως η εκτίμηση του κινδύνου καθώς και η ανάλυση του κόστους. Στη διαδικασία αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντικό να εκτιμηθεί το πώς τα εργαλεία αυτά θα χρησιμοποιηθούν προκειμένου να λειτουργήσουν συμπληρωματικά και να επεκτείνουν τα ευρήματα που προκύπτουν από την ανάλυση του κύκλου ζωής [126], [134].

## **2.4.2 Ανάλυση κύκλου ζωής σε συστήματα διαχείρισης απορριμμάτων**

Ο στόχος ενός περιβαλλοντικά βιώσιμου και ορθολογικού συστήματος διαχείρισης ΑΣΑ είναι να καταφέρει να χειριστεί τα παραγόμενα απορρίμματα με ένα τρόπο, ο οποίος να είναι κατά το δυνατόν φιλικός προς το περιβάλλον, οικονομικά βιώσιμος αλλά και αποδεκτός από το σύνολο της κοινωνίας. Στα πλαίσια αυτά, η μέθοδος της ανάλυσης κύκλου ζωής αποτελεί ένα εργαλείο το οποίο εφαρμόζεται επιτυχώς για το σχεδιασμό, την παρακολούθηση και τη βελτιστοποίηση των συστημάτων διαχείρισης ΑΣΑ. Στη μέθοδο αυτή περιλαμβάνονται όλες οι διαδικασίες του κύκλου ζωής των αποβλήτων, αρχής γενομένης από την παραγωγή τους μέχρι και την τελική διάθεση.

### **2.4.2.1 Προκλήσεις στην ανάπτυξη των συστημάτων διαχείρισης ΑΣΑ**

Παρόλο που αποτελεί ένα εξαιρετικό εργαλείο μοντελοποίησης για την αξιολόγηση των σεναρίων διαχείρισης των ΑΣΑ, η εφαρμογή της μεθόδου ανάλυσης κύκλου ζωής σε αυτά τα συστήματα είναι ιδιαίτερη απαιτητική, κυρίως όσον αφορά στη συλλογή των απαιτούμενων δεδομένων.

Η διαχείριση των ΑΣΑ στις διάφορες κατάλληλες εγκαταστάσεις έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή χρήσιμων προϊόντων. Για παράδειγμα στα κέντρα διαλογής και ανάκτησης υλικών (Material Recovery Facilities, MRFs) εξάγονται διάφορων ειδών υλικά όπως χαρτί, χαρτόνι, γυαλί και πλαστικό. Σε μια εγκατάσταση μηχανικής βιολογικής επεξεργασίας παράγεται RDF (Refuse Derived Fuel), το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως στερεό καύσιμο στην τσιμεντοβιομηχανία προς αντικατάσταση των συμβατικών στερεών καυσίμων. Στις εγκαταστάσεις θερμικής επεξεργασίας πραγματοποιείται χρήση των αποβλήτων για παραγωγή ενέργειας, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρισμού και θέρμανσης. Έτσι οι εγκαταστάσεις αξιολογούνται όσον αφορά τα οφέλη από την παραγωγή των προϊόντων αυτών συγκριτικά αλλά και σε σχέση με το περιβαλλοντικό φορτίο που προκαλούν.

Παράλληλα, μια μεγάλη πρόκληση που πρέπει να αντιμετωπίσει κάποιος που επιχειρεί την ανάλυση του κύκλου ζωής μιας διεργασίας είναι η αβεβαιότητα που υπεισέρχεται σε πολλά δεδομένα. Ειδικά για τη διαχείριση των στερεών απορριμμάτων, συναντάται μεγάλη αβεβαιότητα στις βασικές μεθόδους επεξεργασίας των αποβλήτων αυτών, όπως στην ταφή τους σε ΧΥΤΑ. Η έλλειψη ποιοτικών και αντιπροσωπευτικών δεδομένων είναι ένα σύνηθες πρόβλημα στην ανάλυση του κύκλου ζωής. Το ζήτημα της συλλογής αξιόπιστων δεδομένων αποτελεί κομβικό σημείο της ανάλυσης στα συστήματα διαχείρισης ΑΣΑ, προκειμένου να ληφθούν αποτελέσματα τα οποία προσομοιάζουν και προσεγγίζουν όσο το δυνατόν καλύτερα την πραγματικότητα [135]–[137].

Αλλα τεχνικά ζητήματα που αφορούν την ανάλυση κύκλου ζωής στα συστήματα διαχείρισης ΑΣΑ περιλαμβάνουν τον ορισμό της λειτουργικής μονάδας, την ταξινόμηση των απορριμμάτων,

καθώς και αλλαγές στη σύσταση και την ποσότητα των παραγόμενων αστικών απορριμμάτων, την απαιτούμενη ενέργεια για την επεξεργασία τους, τα ισοζύγια μάζας άνθρακα μεταξύ των διεργασιών, τις βασικές παραμέτρους που επηρεάζουν τα τελικά αποτελέσματα με τη βοήθεια ανάλυσης ευαισθησίας καθώς και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Η λειτουργική μονάδα είναι η βάση με την οποία καθορίζεται η απόδοση του υπό μελέτη συστήματος και πρέπει να είναι σαφώς ορισμένη και μετρήσιμη. Προκειμένου να οριστεί ο σκοπός της μεθόδου ανάλυσης, πρέπει να καθοριστούν οι προδιαγραφές των λειτουργιών του συστήματος. Η λειτουργική μονάδα καθορίζει την ποσοτικοποίηση αυτών των καθορισμένων λειτουργιών. Σε ένα σύστημα διαχείρισης απορριμμάτων η λειτουργική μονάδα μπορεί να είναι μία συγκεκριμένη ποσότητα αποβλήτων, για παράδειγμα 100,000 τόνοι που παράγεται για ένα συγκεκριμένο χρόνο ή μπορεί να οριστεί βάσει γεωγραφικών ή χρονικών χαρακτηριστικών (π.χ. η διαχείριση της ετήσιας παραγωγής ΑΣΑ του Δήμου Χαλανδρίου). Στην περίπτωση των ΑΣΑ η αντίστοιχη ποσότητα θα αφορούσε τον πληθυσμό της συνοικίας, της περιοχής ή του δήμου που εξετάζεται.

Σε μια μελέτη διαχείρισης αποβλήτων, η λειτουργική μονάδα είναι στενά συνδεδεμένη με τη σύσταση των υλικών που αποτελούν το αντικείμενο της μελέτης. Προκειμένου η μελέτη να είναι αποτελεσματική και να αποδώσει ουσιαστικά ευρήματα κάθε ανάλυση του κύκλου ζωής θα πρέπει να περιλαμβάνει:

- τα συστατικά που βρίσκονται στο σύνολο των αποβλήτων καθώς και την αναλογία τους
- γνώση σχετικά με τη μικρο- και μακρο-σύσταση των συστατικών των ρευμάτων που μελετώνται
- τον τρόπο με τον οποίο αυτά τα συστατικά αλληλεπιδρούν με τις διεργασίες επεξεργασίας τους και τι παράγεται ως αποτέλεσμα της εφαρμογής των διεργασιών αυτών

Όσον αφορά την σύσταση των αποβλήτων, είναι συνηθισμένο να πραγματοποιείται ανάλυση των διαφόρων υλικών που τα αποτελούν. Κάθε ένα από αυτά παρουσιάζει διαφορετικές προοπτικές διαχείρισης και συνεισφέρει σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό στις διάφορες κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Ταυτόχρονα, υπάρχουν και διαφορετικές επιλογές για τη διαχείριση του ίδιου συστατικού. Για παράδειγμα οι επιλογές για την διαχείριση του χαρτιού περιλαμβάνουν την ανακύκλωση, τη χώνευση, τη διάθεση στους χώρους υγειονομικής ταφής καθώς και την καύση του. Κάθε μέθοδος επεξεργασίας ενός συγκεκριμένου υλικού εμπεριέχει οφέλη αλλά και συνεπάγεται κάποια επιβάρυνση είτε οικονομική είτε περιβαλλοντική. Η ανάλυση του κύκλου ζωής ως εργαλείο παρέχει τη δυνατότητα αξιολόγησης των διαφορετικών αυτών μεθόδων, ωστόσο θα πρέπει να συνυπολογιστούν στην μοντελοποίηση, παράμετροι που σχετίζονται με την ποσότητα και τη σύσταση κάθε υλικού των απορριμμάτων.

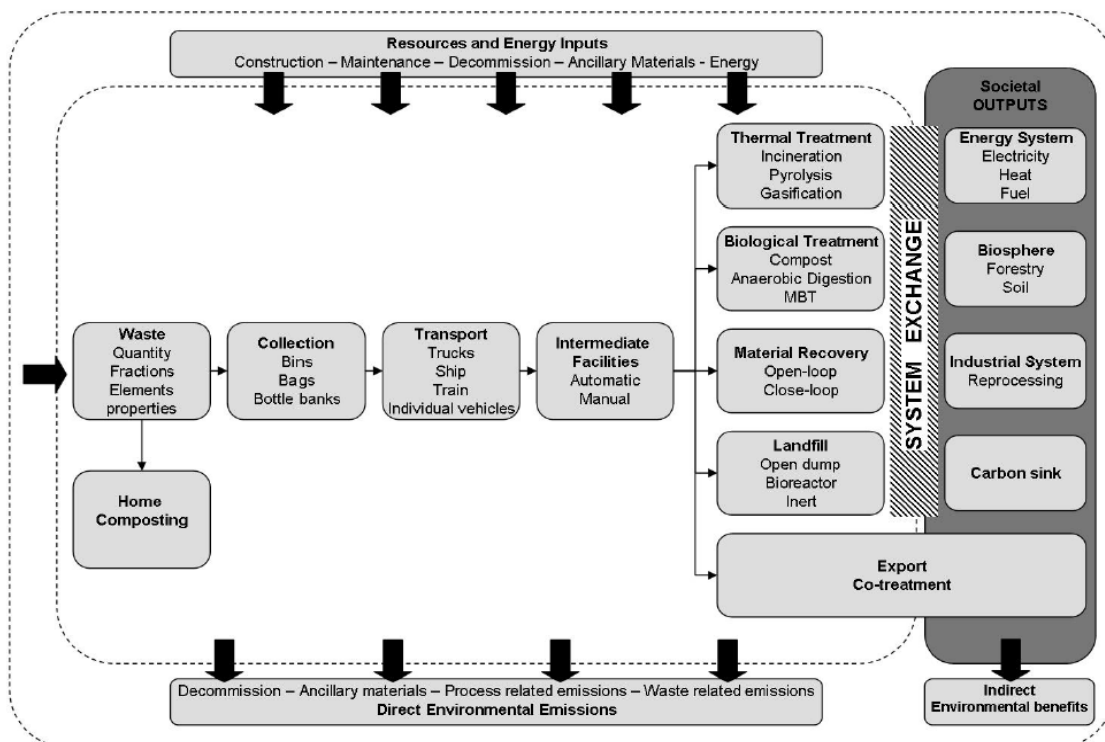
Παράλληλα, όταν αξιολογούνται οι επιπτώσεις του κύκλου ζωής πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τόσο η μακρο- όσο και η μικρο-σύσταση των συστατικών αυτών. Η μακρο-σύσταση περιλαμβάνει όλα εκείνα τα στοιχεία τα οποία αποτελούν τη βάση για το σχηματισμό του συστατικού και χάρη στα οποία μπορεί κάποιος να το αναγνωρίσει (πχ ο άνθρακας, το οξυγόνο και το υδρογόνο για το χαρτί). Κάποιες ουσίες ωστόσο μπορεί να συναντώνται σε πολύ μικρές ποσότητες και παρόλα αυτά να είναι καθοριστικής σημασίας για την έκβαση των αποτελεσμάτων και τις επιλογές του τρόπου διαχείρισης των αποβλήτων. Αυτές οι ουσίες συνήθως υπόκεινται σε συγκεκριμένα όρια εκπομπών λόγω της υψηλής τους τοξικότητας (κυρίως για τον άνθρωπο). Τέτοιες ουσίες είναι το κάδμιο, το χρώμιο, διοξίνες και ο υδράργυρος.

Επιπρόσθετα, ιδιαίτερα σημαντική για τον καθορισμό της φύσης των διαφορετικών ουσιών που παράγονται αλλά και για την ποσοτικοποίηση αυτών, είναι η επίδραση της κάθε διεργασίας στη

σύσταση των αποβλήτων. Για παράδειγμα, ένα ποσοστό του βιοαποικοδομήσιμου άνθρακα που περιέχεται στο χαρτί, θα αποδομηθεί στις αναερόβιες συνθήκες ενός χώρου υγειονομικής ταφής, παράγοντας μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα. Κάποιο μέρος του άνθρακα θα είναι στη μορφή «ξυλώδους» υλικού (πχ λιγνίτης) και θα παραμείνει στο έδαφος ως στερεό. Αντίθετα, αν το χαρτί αυτό καταλήξει σε έναν αποτεφρωτή, θα παραγάγει μόνο διοξείδιο του άνθρακα και ένα μικρό ποσοστό στερεάς μορφής άνθρακα. Τέτοιες αναλύσεις πρέπει να πραγματοποιηθούν και εντέλει να μοντελοποιηθούν για όλα τα συστατικά και τις ενδεχόμενες διεργασίες επεξεργασίας αποβλήτων.

### 2.4.2.2 Ολοκληρωμένα συστήματα διαχείρισης αποβλήτων

Τα συστήματα διαχείρισης αποβλήτων περιλαμβάνουν ένα πλήθος διαφορετικών δραστηριοτήτων οι οποίες κατηγοριοποιούνται σε τρεις φάσεις την συλλογή και μεταφορά, την επεξεργασία και την τελική διάθεση. Ένα τυπικό διάγραμμα ροής ενός συστήματος διαχείρισης απορριμμάτων αποτυπώνεται στην Εικόνα 2-10 [138].



Εικόνα 2-10: Διαγραμματική απεικόνιση τυπικού συστήματος διαχείρισης ΑΣΑ

Το εξωτερικό περίγραμμα, αντιπροσωπεύει την κοινωνία ευρύτερα (βιόσφαιρα και τεχνόσφαιρα). Το εσωτερικό περίγραμμα αντίστοιχα αντιπροσωπεύει τα συστήματα διαχείρισης αποβλήτων αποτελούμενο από διάφορες τεχνολογίες διαχείρισης (σκιασμένα τμήματα με ανοιχτό γκρι). Το τμήμα που είναι σκιασμένο με σκούρο γκρι περιγράφει τα έμμεσα περιβαλλοντικά οφέλη που προκύπτουν από την υποκατάσταση υλικών και ενέργειας από τη χρήση προϊόντων που παράγονται από την διαχείριση των απορριμμάτων.

Το αρχικό σημείο σε ένα σύστημα διαχείρισης αποβλήτων είναι αυτό της παραγωγής τους. Σε αυτό το σημείο, τα απόβλητα μπορεί είτε να έχουν υποστεί διαχωρισμό από τον παραγωγό τους με βάση την προκαθορισμένη ποιότητά τους ή να στέλνονται κατευθείαν για επεξεργασία. Ακολουθεί η συλλογή τους και η μεταφορά στους χώρους επεξεργασίας. Η πλειονότητα των



συλλεγόμενων απορριμμάτων θα κατευθυνθούν πρώτα σε ένα ενδιάμεσο χώρο επεξεργασίας (όπως τα κέντρα ανάκτησης υλικών, εγκατάσταση κομποστοποίησης, εγκατάσταση αναερόβιας χώνευσης) από όπου θα πάνε εντέλει στα τελικά σημεία επεξεργασίας ή διάθεσης (μονάδα ανακύκλωσης, ΧΥΤΑ).

Κατά τη διάρκεια κάθε σταδίου του συστήματος, παρουσιάζεται ένας αριθμός άμεσων και έμμεσων επιπτώσεων. Συγκεκριμένα πραγματοποιούνται εκπομπές ουσιών στο περιβάλλον λόγω της ίδιας της διαδικασίας επεξεργασίας (πχ εκπομπή μεθανίου από ΧΥΤΑ) αλλά και εξαιτίας της χρήσης βοηθητικών υλικών και ενέργειας. Επιπλέον, πολύ συχνά, προϊόν της διαδικασίας επεξεργασίας απορριμμάτων είναι η παραγωγή ενέργειας (π.χ. κατά την καύση του χαρτιού σε αποτεφρωτή). Αυτό έχει ως έμμεσο αποτέλεσμα να επηρεαστεί το σύστημα, υποκαθιστώντας την ενέργεια που μπορεί να χρειαζόταν σε κάποια άλλη διεργασία και προερχόταν από την καύση ορυκτών καυσίμων. Τέλος, υλικά από το ρεύμα των αποβλήτων μπορούν να ανακυκλωθούν και να μετατραπούν σε νέα, αντικαθιστώντας την ανάγκη για πρωτογενή παραγωγή του ίδιου υλικού.

Στις επόμενες παραγράφους θα περιγραφούν εν συντομία οι βασικές διεργασίες που συναντώνται στα συστήματα διαχείρισης και επεξεργασίας των αστικών στερεών απορριμμάτων.

#### *Παραγωγή απορριμμάτων και διαλογή στην πηγή*

Το πρώτο στάδιο μετά την παραγωγή των αστικών απορριμμάτων από το εκάστοτε νοικοκυριό αποτελεί η διαλογή τους στην πηγή. Η διαλογή στην πηγή είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την αποτελεσματική και φιλική προς το περιβάλλον διαχείριση του συνόλου των αστικών απορριμμάτων. Πρόκειται για την διάκριση των απορριμμάτων σε διαφορετικές κατηγορίες στην πηγή παραγωγής τους και βασίζεται στα διαφορετικά χαρακτηριστικά του κάθε υλικού. Η διαλογή αυτή είναι πολύ σημαντική για την βελτιστοποίηση της συλλογής των απορριμμάτων και έχει αποδειχθεί να είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική για τη μείωση του κόστους, τόσο στα συστήματα διαχωρισμού των ανακυκλώσιμων υλικών όσο και σε αυτά των οργανικών αποβλήτων. Η διαλογή στην πηγή περιλαμβάνει την κατηγοριοποίηση των απορριμμάτων σε γυαλί, πλαστικό, μέταλλα και χαρτί/χαρτόνια τα οποία είναι τα ανακυκλώσιμα υλικά, σε τροφικά υπολείμματα και τα κλαδέματα κήπων τα οποία επεξεργάζονται για την παραγωγή χρήσιμων προϊόντων (βιοαέριο, κομπόστ) και στα υπολείμματα τα οποία καταλήγουν στους χώρους υγειονομικής ταφής [139], [140].

#### *Συλλογή και μεταφορά*

Η συλλογή και μεταφορά των αστικών απορριμμάτων συμβαίνει μετά την διαλογή τους και περιλαμβάνει την προσωρινή αποθήκευση των αποβλήτων είτε στους χώρους παραγωγής τους, είτε σε ειδικά σημεία συλλογής (κάδοι απορριμμάτων), την συλλογή από τα απορριμματοφόρα τα οποία εκτελούν συγκεκριμένο δρομολόγιο και την μεταφορά τους από τα απορριμματοφόρα στους χώρους προσωρινής αποθήκευσης, επεξεργασίας ή τελικής διάθεσης στην περίπτωση των υπολειμμάτων. Γενικά συναντώνται δύο μέθοδοι συλλογής απορριμμάτων. Η πρώτη μέθοδος είναι η συλλογή πόρτα-πόρτα. Στην τεχνική αυτή οι κάτοικοι τοποθετούν τα προς ανάκτηση υλικά έξω από το σπίτι τους προκαθορισμένες μέρες, έτσι ώστε να συλλεχθούν από το προσωπικό του αρμόδιου φορέα. Εφαρμόζεται κυρίως για τα ανακυκλώσιμα υλικά όπως χαρτί και χαρτόνι, πλαστικές και γυάλινες φιάλες και μεταλλικά κουτιά. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου, τα υλικά πρέπει να είναι διαχωρισμένα (πχ μπουκάλια καθαρισμένα και κουτιά συμπιεσμένα). Η άλλη μέθοδος είναι η βασική μέθοδος συλλογής των απορριμμάτων στην Ελλάδα και περιλαμβάνει την προσωρινή αποθήκευσή τους σε κάδους. Υπάρχουν διαφορετικοί κάδοι για κάθε είδος απορριμματος. Ο όγκος τους κυμαίνεται από 0,5-5 m<sup>3</sup> και συνήθως έχουν ιδιαίτερη διαμόρφωση ανάλογα με το υλικό. Η συχνότητα συλλογής τους εξαρτάται από τη ποσότητα και τον όγκο των υλικών, καθώς επίσης και από τη θέση και τον αριθμό των κάδων. Η μέθοδος αυτή είναι

προτιμότερη στις πυκνοδομημένες περιοχές. Η συλλογή και η μεταφορά των απορριμμάτων στους αντίστοιχους χώρους πραγματοποιείται με ειδικά οχήματα του δήμου.

#### *Ανάκτηση υλικών και αποστολή στους τελικούς αποδέκτες ανακύκλωσης*

Το ανακυκλώσιμο μέρος των αστικών απορριμμάτων έχει συλλεχθεί ξεχωριστά από τα υπόλοιπα απορρίμματα και οδηγείται αρχικά στα Κέντρα Διαλογής Ανακυκλώσιμων Υλικών (ΚΔΑΥ). Στα ΚΔΑΥ πραγματοποιείται διαλογή των υλικών αυτών, προκειμένου να είναι στην απαραίτητη κατάσταση ώστε να ανακυκλωθούν στους τελικούς αποδέκτες. Ο διαχωρισμός των υλικών πραγματοποιείται είτε μηχανικά είτε χειρωνακτικά. Έτσι τα απορρίμματα διαχωρίζονται ανά υλικό σε χαρτί, χαρτόνι, γυαλί, αλουμίνιο, μέταλλα και διάφορα πλαστικά. Στη συνέχεια δεματοποιούνται και αποστέλλονται στις κατάλληλες βιομηχανίες για την τελική επεξεργασία και την παραγωγή νέων προϊόντων.

#### *Αναερόβια χώνευση*

Η αναερόβια χώνευση αποτελεί διεργασία κατά την οποία το οργανικό κλάσμα των απορριμμάτων μετατρέπεται σε βιοαέριο (μίγμα κυρίως μεθανίου και διοξειδίου του άνθρακα) ενώ παράγεται και υγρό παραπροϊόν πλούσιο σε θρεπτικά και οργανικά συστατικά. Κατά τη διάρκεια της χώνευσης, πραγματοποιείται βιοαποικοδόμηση των οργανικών ουσιών απουσία οξυγόνου μέσα σε κλειστό σύστημα. Τα κύρια βήματα της διεργασίας είναι η προεπεξεργασία, το στάδιο της αναερόβιας χώνευσης και η τελική επεξεργασία για αναβάθμισή του βιοαερίου.

#### *Κομποστοποίηση*

Πρόκειται για μια διαδικασία ρυθμιζόμενης αποσύνθεσης του οργανικού φορτίου για την παραγωγή ενός τελικού προϊόντος που ονομάζεται κομπόστ. Η διαδικασία της κομποστοποίησης περιλαμβάνει την διαχείριση και επιτάχυνση της βιολογικής και αερόβιας αποδόμησης του αποβλήτου. Εξελίσσεται από ένα αρχικό στάδιο που χαρακτηρίζεται από υψηλούς ρυθμούς οξυγόνωσης, θερμοφίλες συνθήκες και υψηλό ρυθμό μείωσης των βιοαποικοδομήσιμων πτητικών στερεών προς ένα στάδιο με χαμηλότερες θερμοκρασίες και μειωμένους ρυθμούς οξυγόνωσης και παραγωγής οσμών. Περιλαμβάνει τη χρήση κατάλληλων πληθυσμών μικροοργανισμών και οδηγεί στην παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα, νερού και ενός σταθεροποιημένου οργανικού υλικού (Compost) κατάλληλο για τη χρήση ως εδαφοβελτιωτικού [26], [141], [142].

#### *Υγειονομική ταφή*

Η διάθεση των απορριμμάτων στους χώρους υγειονομικής ταφής αποτέλεσε για αρκετές δεκαετίες την πιο συνηθισμένη μέθοδο διαχείρισης των ΑΣΑ. Με τον όρο υγειονομική ταφή περιγράφεται η διαδικασία ταφής των στερεών απορριμμάτων με την οποία ελαχιστοποιούνται οι επιπτώσεις στο περιβάλλον και στη δημόσια υγεία, μέσω κατάλληλων έργων υποδομής και συγκεκριμένες διαδικασίες λειτουργίας και ελέγχου. Βασική προϋπόθεση προκειμένου να λειτουργεί αποτελεσματικά ένας χώρος υγειονομικής ταφής είναι η καταλληλότητα του επιλεγμένου χώρου αλλά και της εφαρμοσμένης τεχνολογίας.

Κατά την ταφή των απορριμμάτων στους ΧΥΤΑ λαμβάνει χώρα αποδόμηση του οργανικού τους φορτίου, παρουσία μικροοργανισμών. Αρχικά τα βιοαποδομήσιμα οργανικά υλικά διασπώνται από αερόβιους οργανισμούς, οι οποίοι χρησιμοποιούν το εγκλωβισμένο στη μάζα των απορριμμάτων οξυγόνο. Στη συνέχεια, όταν το οξυγόνο καταναλωθεί πλήρως, πραγματοποιείται το επόμενο στάδιο της αποδόμησης από αναερόβιους και επαμφοτερίζοντες μικροοργανισμούς. Στο στάδιο αυτό της οξεογένεσης, παράγεται διοξείδιο του άνθρακα, και απλά οργανικά οξέα και αλκοόλες. Τέλος, ακολουθεί το στάδιο της μεθανογένεσης κατά το οποίο άλλες κατηγορίες

βακτηρίων αποδομούν τα ενδιάμεσα οργανικά παράγωγα υπό αυστηρά αναερόβιες συνθήκες προς σχηματισμό μεθανίου και διοξειδίου του άνθρακα (landfill gas).

Απαραίτητη μέριμνα πρέπει να δίνεται στην όσο το δυνατό μειωμένη παραγωγή στραγγισμάτων καθώς και στον αποτελεσματικό έλεγχο αυτών, έτσι ώστε να περιορίζονται οι επιπτώσεις για το περιβάλλον. Τα στραγγίσματα είναι υδατικά διαλύματα στους ΧΥΤΑ προερχόμενα από την αποδόμηση των αποβλήτων, είτε από τη βροχή και τα οποία επιμολύνονται από ουσίες που υπάρχουν αρχικά στο έδαφος και στα απορρίμματα, είτε παράγονται κατά την αποδόμηση αυτών. Περιέχουν πολλές ρυπαντικές ουσίες και, διαφεύγοντας από το χώρο διάθεσης, προκαλούν σημαντικά προβλήματα μόλυνσης του υδροφόρου ορίζοντα [133], [143], [144].

#### *Θερμική επεξεργασία*

Στις μεθόδους επεξεργασίας των απορριμμάτων περιλαμβάνεται και η θερμική επεξεργασία. Η μέθοδος αυτή αφορά τη μετατροπή των στερεών αποβλήτων σε αέρια, υγρά και στερεά προϊόντα και συνοδεύεται από την αποδέσμευση θερμικής ενέργειας. Η θερμική επεξεργασία μπορεί να γίνει με διαφορετικές διεργασίες [145]–[147]. Οι διεργασίες αυτές είναι:

- Αποτέφρωση, δηλαδή η καύση με στοιχειομετρική ποσότητα ή περίσσεια οξυγόνου προς ολική οξείδωση του άνθρακα των οργανικών συστατικών προς διοξείδιο του άνθρακα.
- πυρόλυση, στην οποία πραγματοποιείται θερμική διάσπαση των οργανικών στερεών αποβλήτων απουσία οξυγόνου.
- αεριοποίηση, η οποία είναι ατελής καύση με συγκεκριμένη αναλογία οξυγόνου/οργανικού άνθρακα ώστε να παραχθεί αέριο αποτελούμενο κυρίως από μονοξείδιο του άνθρακα, υδρογόνο, και αέριους υδρογονάνθρακες.
- τεχνική πλάσματος, στην οποία το οργανικό κλάσμα αεριοποιείται σχηματίζοντας αέριο σύνθεσης (μονοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο) και απαέρια υπό την επίδραση πολύ υψηλών θερμοκρασιών, ενώ το ανόργανο τμήμα υαλοποιείται.

### **2.4.2.3 Προσέγγιση μηδενικού φορτίου**

Κατά την ανάλυση του κύκλου ζωής ενός προϊόντος, στο στάδιο της απογραφής και ανάλυσης δεδομένων, τα εισερχόμενα και εξερχόμενα δεδομένα τα οποία καθορίζουν τα όρια του συστήματος περιλαμβάνονται ροές οι οποίες προέρχονται από το περιβάλλον ή αντίστοιχα που καταλήγουν σε αυτό (στοιχειώδεις ροές). Ωστόσο, στα συστήματα διαχείρισης απορριμμάτων οι ροές εισόδου είναι κοινές για όλα τα συστήματα προϊόντων και για αυτό το λόγο μπορούν να παραβλεφθούν, ξεκινώντας την ανάλυση από το σημείο μετατροπής των προϊόντων σε απόβλητα.

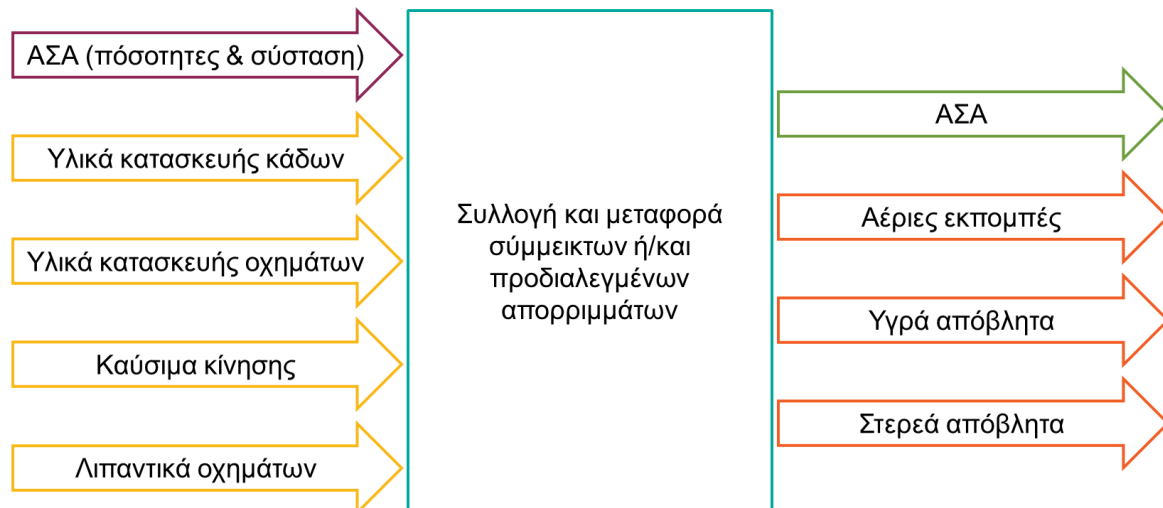
Σύμφωνα με τη προσέγγιση μηδενικού φορτίου (Zero Burden Approach), για τα συστήματα διαχείρισης απορριμμάτων, τα απόβλητα λαμβάνονται από το σύστημα ως δεδομένα, χωρίς να αποδίδεται σε αυτά κάποιο περιβαλλοντικό φορτίο με βάση το πώς παρήχθησαν, τί θερμογόνο δύναμη έχουν, είτε ακόμη λόγω της χημικής τους σύστασης. Επίσης δεν περιλαμβάνεται στο σύστημα κανένα φορτίο το οποίο να σχετίζεται με την προηγούμενη χρήση των προϊόντων ή των υλικών από τα οποία προέρχονται τα συγκεκριμένα απόβλητα. Συνεπώς με βάση την προσέγγιση αυτή, το όριο του υπό μελέτη συστήματος καθορίζεται ως το σημείο παραγωγής των απορριμμάτων, μη λαμβάνοντας υπόψη οποιαδήποτε επίπτωση σημειώθηκε πριν από το στάδιο αυτό [148].

## 2.4.2.4 Ανάλυση δεδομένων στα συστήματα διαχείρισης ΑΣΑ

Όπως έχει τονιστεί, η ανάλυση κύκλου ζωής αξιολογεί την αποτελεσματική χρήση πόρων καθώς και την ελευθέρωση εκπομπών στην ατμόσφαιρα και την παραγωγή χρήσιμων προϊόντων. Η εισαγωγή ροών (υλικοί και ενεργειακοί πόροι), καθώς και η εξαγωγή τους μετά την επεξεργασία (εκπομπές και παραγόμενα προϊόντα), πρέπει να προσδιοριστούν και να ποσοτικοποιηθούν κατά τη διάρκεια της φάσης απογραφής και ανάλυσης δεδομένων (LCI). Στις επόμενες παραγράφους θα αναλυθούν τα στοιχεία της φάσης απογραφής και ανάλυσης δεδομένων για τα βασικά στάδια του συστήματος επεξεργασίας των ΑΣΑ.

Ξεκινώντας από την παραγωγή των απορριμμάτων και το κομμάτι της διαλογής στην πηγή, εισάγεται στο μοντέλο η ποσότητα των παραγόμενων αποβλήτων καθώς και η σύστασή τους. Έπειτα, καθώς τα απορρίμματα χωρίζονται προκειμένου να κατανεμηθούν ανά υλικό, αναλύεται το ποσοστό των διαφόρων υλικών κάθε ρεύματος.

Στη συνέχεια ακολουθεί η συλλογή τους. Η ξεχωριστή συλλογή των απορριμμάτων από διαφορετικούς κάδους είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την αποτελεσματική ανάκτηση υλικών. Στην εικόνα 2-11 παρουσιάζονται τα κύρια δεδομένα που πρέπει να εισαχθούν κατά την μοντελοποίηση της διεργασίας συλλογής και μεταφοράς, καθώς και τα στοιχεία που εξάγονται από τη διεργασία αυτή.



**Εικόνα 2-11: Απαιτούμενα δεδομένα για τη μοντελοποίηση του σταδίου συλλογής και μεταφοράς**

Τα στοιχεία που εισάγονται είναι η ποσότητα και η σύσταση των ΑΣΑ και τα υλικά και η ενέργεια που απαιτούνται για τις απαραίτητες υποδομές (κάδοι προσωρινής αποθήκευσης απορριμμάτων και απορριμματοφόρα οχήματα). Στην έξοδο της διεργασίας λαμβάνονται πάλι τα ΑΣΑ με αλλαγμένες φυσικές ιδιότητες όπως η πυκνότητα καθώς και εκπομπές που πραγματοποιούνται κατά την μεταφορά. Οι παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη για το στάδιο της συλλογής και μεταφοράς είναι:

- Επιλογή συστήματος συλλογής
- Μέγεθος κάδων και υλικά κατασκευής
- Πληρότητα κάδων
- Συχνότητα συλλογής
- Απόσταση ανά γύρο συλλογής
- Είδος απορριμματοφόρου και καύσιμο οχήματος
- Πυκνότητα των απορριμμάτων στους κάδους και στα απορριμματοφόρα

Έπειτα, ακολουθούν οι διαδικασίες επεξεργασίας και διάθεσης των απορριμμάτων. Σχετικά με το ανακυκλώσιμο μέρος των αστικών απορριμμάτων αρχικά αφού συλλεχθούν οδηγούνται σε ΚΔΑΥ, όπου υφίσταται η διαλογή τους ανά είδος υλικού. Τα απαραίτητα δεδομένα για την μοντελοποίηση της διεργασίας αυτής είναι η ποσότητα και η σύσταση των απορριμμάτων που φτάνουν στο κέντρο διαλογής, καθώς και οι λειτουργικές παράμετροί του, όπως η καταναλωνόμενη ηλεκτρική και θερμική ενέργεια. Μετά τη διαλογή και τη δεματοποίηση των υλικών, αυτά αποστέλλονται στους τελικούς αποδέκτες ανακύκλωσης. Τα δεδομένα που χρειάζονται για τη μοντελοποίηση της μεταφοράς στους τελικούς αποδέκτες πάλι περιλαμβάνουν την ποσότητα των ανακυκλώσιμων υλικών που πάνε σε κάθε αποδέκτη καθώς και την ποσότητα καυσίμου που θα καταναλωθεί για τη μεταφορά σε αυτούς.

Όσον αφορά τη βιολογική επεξεργασία του βιοαποικοδομήσιμου κλάσματος των ΑΣΑ περιλαμβάνονται η διαδικασία της κομποστοποίησης και της αναερόβιας χώνευσης.

Τα δεδομένα που απαιτούνται για την μοντελοποίηση της κομποστοποίησης είναι η ποσότητα και η σύσταση της τροφοδοσίας των ΑΣΑ, η κατανάλωση ενέργειας και καυσίμων για τη διεργασία, καθώς και ο βαθμός αποδόμησης των πτητικών στερεών, του άνθρακα και του αζώτου. Στην έξοδο της κομποστοποίησης λαμβάνεται ως προϊόν το κομπόστ καθώς και υπολείμματα της διεργασίας που οδηγούνται στους ΧΥΤΑ.

Για την μοντελοποίηση της αναερόβιας χώνευσης τα δεδομένα που εισάγονται είναι η ποσότητα και η σύσταση των ΑΣΑ, ποσότητα νερού, απαραίτητο ρεύμα για τις ανάγκες της εγκατάστασης, ενέργεια για θέρμανση του νερού και των στερεών. Στην έξοδο της διεργασίας λαμβάνεται το βιοαέριο και στερεά προϊόντα της χώνευσης που θα οδηγηθούν για παραγωγή κομπόστ. Όσον αφορά τις εκπομπές έχουμε διαρροή μικρής ποσότητας μεθανίου από το σύστημα συλλογής.

Για τους χώρους υγειονομικής ταφής οι τύποι των εγκαταστάσεων διαφέρουν πολύ σε τεχνολογία, ξεκινώντας από τις ανεξέλεγκτες χωματερές μέχρι και τους υψηλής τεχνολογίας ΧΥΤΑ. Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, το μεγαλύτερο μέρος του μετατρεπόμενου οργανικού άνθρακα ελευθερώνεται ως αέριο χωματερής, ενώ το υπόλοιπο ποσοστό παραμένει στα στραγγίσματα. Έτσι τα εξαγόμενα στοιχεία της διεργασίας αυτής είναι το αέριο χωματερής το οποίο εάν συλλεχθεί μπορεί να καεί για την παραγωγή ενέργειας, και τα στραγγίσματα τα οποία παραμένουν στο έδαφος. Αντίστοιχα τα στοιχεία που εισάγονται στην ανάλυση περιλαμβάνουν τη σύσταση και την ποσότητα των ΑΣΑ, τα υλικά κατασκευής του, τις ενεργειακές απαιτήσεις σε καύσιμα και ηλεκτρισμό καθώς και χαρακτηριστικά σχετικά με τις ιδιότητες του ΧΥΤΑ, όπως η διάρκεια ζωής, το ύψος του στρώματος, η φαινόμενη πυκνότητα.

Τέλος τα απαραίτητα δεδομένα που πρέπει να ληφθούν υπόψη όσον αφορά τη θερμική επεξεργασία είναι τα αστικά στερεά απορρίμματα που οδηγούνται προς καύση, η απαιτούμενη ποσότητα ηλεκτρισμού, καύσιμα για τις λειτουργίες της μονάδας, (ντίζελ, φυσικό αέριο ή ακόμη και άνθρακας), νερό, και ενεργός άνθρακας για τον έλεγχο της ενδεχόμενης αέριας ρύπανσης. Κατά την έξοδο της διεργασίας παράγονται απαέρια (HCl, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, διοξίνες, CO, PM10, HF) και στάχτη λόγω της καύσης.

#### **2.4.2.5 Κατηγορίες επιπτώσεων**

Οι κατηγορίες επιπτώσεων συσχετίζουν τις διάφορες εκπομπές με μία συγκεκριμένη επίδραση στο περιβάλλον. Οι εκπομπές αυτές είναι πολύ διαφορετικές μεταξύ τους. Προκειμένου να υπάρχει ένα μέτρο συσχετισμού των εκπομπών μεταξύ τους, κατά το στάδιο της αξιολόγησης των επιπτώσεων μετατρέπονται σε μία κοινή μονάδα η οποία αντιστοιχεί σε μία κατηγορία επιπτώσεων [131]. Οι βασικές κατηγορίες επιπτώσεων είναι οι ακόλουθες:

- Κλιματική αλλαγή: Πρόκειται για το δείκτη της υπερθέρμανσης του πλανήτη εξαιτίας των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου στον αέρα. Μετριέται σε kg CO<sub>2</sub>-eq.
- Εξάντληση του όζοντος: Δείκτης των εκπομπών στον αέρα που προκαλούν την καταστροφή της στοιβάδας του όζοντος στην στρατόσφαιρα. Μετριέται σε kg CFC-11 eq.
- Τοξικότητα για τον άνθρωπο: Αφορά τις τοξικές ουσίες που εκπέμπονται στο περιβάλλον. Χωρίζονται σε καρκινογόνες και μη. Η μονάδα μέτρησης είναι CTUh.
- Αιωρούμενα σωματίδια: Πρόκειται για μικροσκοπικά σωματίδια με αρνητικές επιπτώσεις για την υγεία του ανθρώπου. Μετριούνται σε kg PM<sub>2,5</sub>-eq.
- Ιονίζουσα ακτινοβολία: Πρόκειται για ενέργεια που προέρχεται από ηλεκτρομαγνητικά κύματα και επιδρά στην ανθρώπινη υγεία. Μονάδα μέτρησης είναι τα kBq U235 eq.
- Φωτοχημικό νέφος: Δείκτης εκπομπών αερίων που ενισχύουν το σχηματισμό φωτοχημικού νέφους στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Μονάδα μέτρησης είναι τα kg NMVOC.
- Οξίνιση του εδάφους: Αφορά τους παράγοντες που προκαλούν την όξυνση του εδάφους επιδρώντας αρνητικά στο οικοσύστημα. Μονάδα μέτρησης είναι τα mol H<sup>+</sup> eq.
- Ευτροφισμός: Αποτελεί δείκτη του εμπλουτισμού του οικοσυστήματος (υδατικού και χερσαίου) με θρεπτικά συστατικά, λόγω εκπομπών συμπλόκων που περιέχουν άζωτο και φώσφορο. Μονάδα μέτρησης είναι mol N eq. για το έδαφος, kg N eq. για θαλάσσιο οικοσύστημα και kg P eq. για οικοσυστήματα γλυκού νερού.
- Οικοτοξικότητα γλυκού νερού: Πρόκειται για δείκτη της επίδρασης τοξικών ουσιών που εκπέμπονται στο περιβάλλον στους οργανισμούς του γλυκού νερού. Μονάδα μέτρησης είναι τα CTUe.
- Εξάντληση των αβιοτικών πόρων: Είναι ο δείκτης που σχετίζεται με την εξάντληση των φυσικών πόρων. Διακρίνεται στους πόρους ορυκτών καυσίμων (μονάδα μέτρησης MJ) και στα μη ορυκτά (μονάδα μέτρησης τα kg antimony-eq).

### 2.4.3 Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής - LCC

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η μέθοδος της ανάλυσης κύκλου ζωής αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την αξιολόγηση σεναρίων. Ωστόσο περιορίζεται στην αποτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης κύκλου ζωής δεν είναι πάντα ικανά και πλήρη για να καθοδηγήσουν έναν αναλυτή στη λήψη αποφάσεων. Συνεπώς, για να είναι η αξιολόγηση όσο το δυνατόν πιο ολοκληρωμένη, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν το συνολικό σύστημα, όπως το κόστος. Σε αυτό το κομμάτι υπεισέρχεται η ανάλυση του κόστους του κύκλου ζωής ενός συστήματος (Life Cycle Costing). Η έννοια της ανάλυσης του κόστους κύκλου ζωής είναι αρκετά όμοια με αυτή του LCA. Όπως ακριβώς η ανάλυση του κύκλου ζωής λαμβάνει υπόψη και αποτιμά τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο ενός προϊόντος, μιας διεργασίας ή γενικότερα ενός συστήματος διεργασιών καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του, έτσι και η ανάλυση του κόστους κύκλου ζωής υπολογίζει όλα τα κόστη που σχετίζονται με το προϊόν, τη διεργασία ή το σύνολο των διεργασιών αυτών. Τα κόστη που περιλαμβάνονται στην ανάλυση του κόστους κύκλου ζωής είναι:

- Τιμή αγοράς κάποιου προϊόντος ή υπηρεσίας και όλα τα συνοδευόμενα κόστη (αποστολή, εγκατάσταση, ασφάλεια κτλ)
- Λειτουργικά κόστη, συμπεριλαμβανομένου και κόστους ενέργειας, υλικών, καυσίμων, κατανάλωσης νερού, συντήρησης κ.ο.κ.
- Κόστη παροχής υπηρεσιών
- Κόστη τέλους ζωής, όπως κόστος διάθεσης ή κόστη υπολειμματικής αξίας (έσοδα από πώληση ενός προϊόντος)

- Κόστη που σχετίζονται με εκπομπές στο περιβάλλον ή με κοινωνικές επιβαρύνσεις (cost of externalities)
- Κόστη που σχετίζονται με φόρους και κόμιστρα (πχ φόρους διάθεσης απορριμμάτων στους χώρους υγειονομικής ταφής)

Συνολικά η ανάλυση του κόστους του κύκλου ζωής είναι ένα οικονομικό εργαλείο το οποίο ενσωματώνει την περιβαλλοντική έννοια του κόστους στον κύκλο ζωής και το οποίο λειτουργεί συμπληρωματικά για την λήψη αποφάσεων μεταξύ διαφορετικών πιθανών σεναρίων [127], [149], [150].

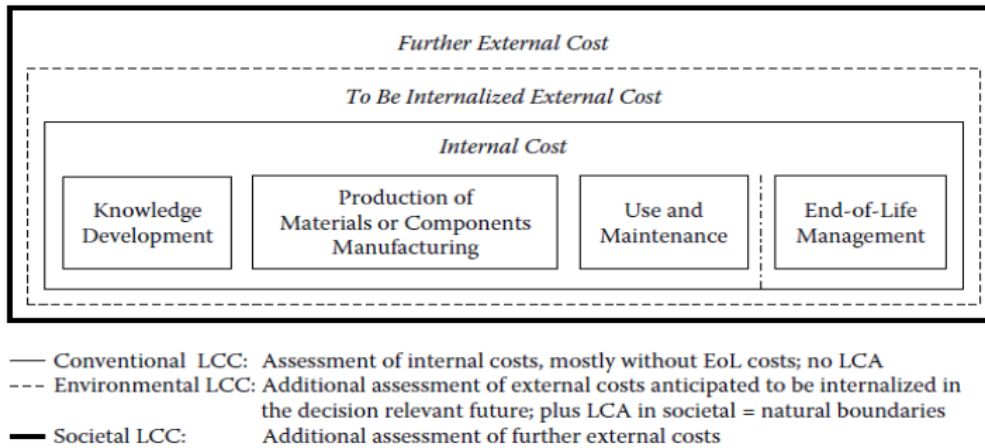
### 2.4.3.1 Κατηγορίες LCC

Η ανάλυση του κόστους κύκλου ζωής αποτελείται από τρεις τύπους οικονομικής αξιολόγησης, τον συμβατικό (Conventional LCC), τον περιβαλλοντικό (Environmental LCC) και τον κοινωνικό (Social LCC) [124].

Η συμβατική ανάλυση κόστους κύκλου ζωής είναι η πλέον διαδεδομένη και βασίζεται σε μία καθαρά οικονομική αξιολόγηση, λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο των σταδίων του κύκλου ζωής. Περιλαμβάνει κόστη που σχετίζονται με ένα προϊόν ή μια διεργασία και συνήθως αφορά μόνο τη σκοπιά του παραγωγού ή του καταναλωτή. Είθισται να χρησιμοποιείται από ιδιωτικές εταιρείες οι οποίες επικεντρώνονται στο δικό τους κόστος. Συνήθως, κόστη τα οποία δεν είναι άμεσα απτά για την εταιρεία ή που αναμένεται να παρουσιαστούν στο μέλλον μπορούν να παραμεληθούν, ενώ στις μελέτες δεν περιλαμβάνονται απαραίτητα όλα τα στάδια του κύκλου ζωής, αρκεί να ορίζονται σαφώς τα όρια του συστήματος που μελετάται.

Η περιβαλλοντική ανάλυση κόστους κύκλου ζωής χρησιμοποιεί όρια συστήματος και λειτουργική μονάδα ανάλογα με αυτά του LCA ενώ βασίζεται στο ίδιο μοντέλο, περιλαμβάνοντας ολόκληρο τον κύκλο ζωής. Ουσιαστικά επεκτείνει την συμβατική μέθοδο έτσι ώστε να είναι συνεπής με τα όρια του συστήματος της ανάλυσης κύκλου ζωής. Οι δύο αναλύσεις (LCA και LCC) λειτουργούν συμπληρωματικά. Η περιβαλλοντική ανάλυση κόστους, εκτός από τα κόστη της συμβατικής ανάλυσης, μπορεί να περιλαμβάνει και κόστη από εξωγενείς παράγοντες που ενδέχεται πιθανώς να εσωτερικευτούν στο σύστημα (π.χ. φόρους για εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα). Για αυτό το λόγο πρέπει να διεξάγεται συμπληρωματικά με την ανάλυση κύκλου ζωής. Κάποια αποτελέσματα του LCA που αποτελούν εξωγενείς παράγοντες μπορούν να συμπεριληφθούν στο κόστος μέσω της μετάφρασής τους σε οικονομικούς όρους (monetization). Με τον όρο «εξωγενείς παράγοντες» περιγράφονται οι περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις που δεν σχετίζονται απευθείας με κάποιον από τους συμμετέχοντες στον κύκλο ζωής.

Η κοινωνική ανάλυση κόστους συμπεριλαμβάνει όλα τα περιβαλλοντικά και κοινωνικά κόστη προσδίδοντάς τους νομισματική αξία. Μια σημαντική διαφορά μεταξύ της κοινωνικής ανάλυσης κόστους και των άλλων δύο είναι ότι περιλαμβάνει κόστη που σχετίζονται με όλα τα ενδιαφερόμενα μέρη, είτε αυτά είναι άμεσα είτε έμμεσα. Στους έμμεσα ενδιαφερόμενους ανήκουν οι κυβερνήσεις και άλλα δημόσια σώματα και συνεπώς οι φόροι και οι επιχορηγήσεις δεν περιλαμβάνονται στην ανάλυση καθώς πλέον πρόκειται για εσωτερικούς παράγοντες του συστήματος. Πρακτικά στη μέθοδο αυτή, εκτός από τα κόστη της συμβατικής και της περιβαλλοντικής ανάλυσης, πρόσθετοι κοινωνικοί και περιβαλλοντικοί εξωγενείς παράγοντες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, και να μετατρέπονται σε νομισματικούς όρους. Έτσι η κοινωνική ανάλυση κόστους στοχεύει στο να αποτελεί μια ανεξάρτητη μέθοδο με την προϋπόθεση ότι όλοι οι εξωγενείς παράγοντες έχουν αποκτήσει νομισματική αξία και οι πληρωμές μεταβίβασης (φόροι και επιδοτήσεις) αφαιρούνται.



Εικόνα 2-12: Οι τρεις τύποι ανάλυσης κόστους κύκλου ζωής[127]

#### 2.4.4 Ανάλυση κόστους κύκλου ζωής σε συστήματα διαχείρισης απορριμμάτων

Ενώ η μέθοδος ανάλυσης κύκλου ζωής παρέχει ένα συστηματικό πλαίσιο για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με την διαχείριση των αποβλήτων, οι περισσότερες αποφάσεις που σχετίζονται με την ρεαλιστική εφαρμογή των τεχνολογιών αυτών στις σύγχρονες κοινωνίες επηρεάζονται από οικονομικούς περιορισμούς. Για τους αναλυτές που καλούνται να επιλέξουν ανάμεσα σε εναλλακτικά σενάρια, η έλλειψη μιας ισορροπημένης οικονομικής αξιολόγησης παράλληλα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης κύκλου ζωής περιορίζει την αξία της ίδιας της ανάλυσης, καθώς το ένα είναι άρρηκτα συνδεδεμένα με το άλλο.

Παρόλο που έχει γίνει πληθώρα μελετών σχετικά με τα οικονομικά των συστημάτων διαχείρισης απορριμμάτων, εντούτοις πολύ λίγες εξ αυτών περιλαμβάνουν με λεπτομέρειες τις βασικές αρχές υπολογισμού του κόστους για τις εμπλεκόμενες τεχνολογίες διαχείρισης. Παράλληλα υπάρχει ασάφεια γύρω από τα όρια του συστήματος και τις βασικές παραδοχές που χρησιμοποιούνται. Το γεγονός αυτό όχι μόνο περιορίζει την εγκυρότητα των μελετών αυτών και την υιοθέτηση των αποτελεσμάτων της, αλλά ταυτόχρονα δείχνει ότι ο τομέας της οικονομικής αξιολόγησης των συστημάτων διαχείρισης αποβλήτων χρήζει πολλών βελτιώσεων.

Η οικονομική αξιολόγηση των συστημάτων διαχείρισης αποβλήτων περιλαμβάνει τρεις άξονες συζήτησης:

- Ποιοι τύποι κόστους πρέπει να αξιολογηθούν (για παράδειγμα ιδιωτικά ή κοινωνικά κόστη)
- Για ποιους πρέπει να γίνει αυτή η αξιολόγηση (για παράδειγμα υπεύθυνοι εγκαταστάσεων, παραγωγοί απορριμμάτων, δημόσιες υπηρεσίες)
- Ποιες αρχές υπολογισμού κόστους πρέπει να εφαρμοστούν για τις ξεχωριστές τεχνολογίες διαχείρισης απορριμμάτων του συστήματος

Τα συστήματα διαχείρισης αστικών απορριμμάτων εμπλέκουν πολλά ενδιαφερόμενα μέρη, των οποίων τα συμφέροντα είναι τελείως διαφορετικά. Σε αυτούς συμπεριλαμβάνονται οι παραγωγοί των απορριμμάτων που στην περίπτωση των ΑΣΑ είναι κατά κύριο λόγο οι δημότες, οι υπεύθυνοι των εγκαταστάσεων διαχείρισης, καθώς και οι αρμόδιες αρχές. Τα οικονομικά κόστη για τη διαχείριση των αποβλήτων συνήθως επιβαρύνουν τα νοικοκυριά υπό μορφή τελών, ενώ οι λειτουργοί των εγκαταστάσεων εμπλέκονται μόνο σε συγκεκριμένα κομμάτια της αλυσίδας διαχείρισης και είναι υπεύθυνοι μόνο για τα κόστη λειτουργίας της εγκατάστασής τους.



Παράλληλα οι αρμόδιες αρχές ενδιαφέρονται κυρίως για τις κοινωνικο-οικονομικές επιδράσεις του συστήματος διαχείρισης και τον αντίκτυπο που αυτές έχουν για την κοινωνία. Παρόλο που πολλές διαφορετικές προσεγγίσεις έχουν επιχειρήσει να αξιολογήσουν τα συνολικά κόστη των συστημάτων διαχείρισης απορριμμάτων, εντούτοις δεν κατάφεραν να συνδυάσουν την αποτίμηση του κόστους για όλα τα εμπλεκόμενα μέρη και να τα προσαρμόσουν στα πλαίσια των αποτελεσμάτων της ανάλυσης του κύκλου ζωής. Η ανάλυση του κόστους του κύκλου ζωής προτείνεται ως μια συνεπής μέθοδος κατάλληλη για τα συγκεκριμένα συστήματα, αναπτύσσοντας μοντέλα κόστους για όλες τις κύριες δραστηριότητες που σχετίζονται με τη διαχείριση των απορριμμάτων και λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους που αφορούν όλα τα εμπλεκόμενα μέρη.

#### 2.4.4.1 Αντικείμενα κόστους

Τα κόστη μπορεί να χωριστούν σε τρεις διαφορετικούς τύπους. Πρόκειται για τα κόστη προϋπολογισμού, τα κόστη μεταβιβάσεων, και τα κόστη εξωτερικότητας (externalities). Τα κόστη προϋπολογισμού συναντώνται και στις τρεις κατηγορίες ανάλυσης κόστους κύκλου ζωής, τα κόστη μεταβιβάσεων εμφανίζονται στην συμβατική και την περιβαλλοντική ανάλυση ενώ τα κόστη εξωγενών παραγόντων μόνο στην κοινωνική. Μια χαρακτηριστική σύνοψη των διαφόρων τύπων κόστους σε ένα σύστημα διαχείρισης απορριμμάτων αποτυπώνεται στην Εικόνα 2-13. [124].

Το κόστος προϋπολογισμού προκύπτει από τη δράση των νοικοκυριών που παράγουν τα απορρίμματα αλλά και από τους λειτουργούς των εγκαταστάσεων διαχείρισης και επεξεργασίας. Μπορεί να είναι είτε εφάπαξ (π.χ. κεφαλαιακή επένδυση για το στήσιμο μιας εγκατάστασης αναερόβιας χώνευσης) ή επαναλαμβανόμενο όπως είναι τα λειτουργικά κόστη.

Τα κόστη μεταβίβασης περιγράφουν χρηματοροές, οι οποίες οδηγούν σε αναδιανομή εισοδήματος μεταξύ εμπλεκόμενων μερών, ενώ δεν περιλαμβάνουν κάποια αναδιανομή πόρων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι περιβαλλοντικοί φόροι.

Τέλος, τα κόστη εξωτερικότητας αντιπροσωπεύουν επιπτώσεις στην ευημερία των ατόμων η οποία προκαλούνται από δραστηριότητες οι οποίες δεν σχετίζονται άμεσα με τα εμπλεκόμενα μέρη. Τέτοια κόστη σχετικά με τα συστήματα διαχείρισης αποβλήτων είναι οι εκπομπές στον αέρα, το νερό και το έδαφος, οι οποίες επηρεάζουν την ανθρώπινη υγεία, επιδρούν στο φυσικό περιβάλλον και ευθύνονται για κλιματικά προβλήματα.

	Internal costs	External costs	Social costs
Incurring by	Waste agents (e.g. waste generator and operators)	All the members of society	Society
Budget cost	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bags</li> <li>- Bins</li> <li>- Capital goods</li> <li>- Materials and energy consumption</li> <li>- Labour costs</li> <li>- Material and energy sales</li> </ul>		
Externalities cost		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Time consumption to source separate</li> <li>- Health issues</li> <li>- Disamenities</li> <li>- Working environment issues</li> </ul>	Sum of internal costs (excluding transfers) and external costs for society (i.e. waste generator, waste operator and other agents)
Transfers	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fees</li> <li>- Taxes</li> <li>- Pecuniary externalities<sup>4</sup></li> </ul>		Not applicable

Εικόνα 2-13: Ταξινόμηση αντικειμένων κόστους σε συστήματα διαχείρισης απορριμμάτων

#### 2.4.4.2 Δομή μοντέλου κοστολόγησης

Το μοντέλο που εφαρμόζεται περιλαμβάνει τη διάκριση του συστήματος στα διάφορα στάδια (διαχωρισμό στην πηγή, συλλογή και μεταφορά, επεξεργασία και διάθεση) και τον διαχωρισμό τους σε επιμέρους κόστη όπως εξοπλισμός, μισθοί, καύσιμα, κόστη συντήρησης κ.ο.κ. . Για κάθε

ένα από αυτά τα μεγέθη που σχετίζονται με μια δραστηριότητα (π.χ. κατανάλωση ντίζελ κατά την συλλογή) πρέπει να καθοριστούν δύο χαρακτηριστικές παράμετροι. Η μια παράμετρος είναι φυσική και περιγράφει την ποσότητα που απαιτείται από το κάθε μέγεθος για τη συλλογή/επεξεργασία/διάθεση ενός τόνου αποβλήτων (για παράδειγμα 1 λίτρο πετρελαίου κίνησης για τη συλλογή ενός τόνου απορριμμάτων), ενώ η άλλη παράμετρος είναι οικονομική και αντιπροσωπεύει τη μονάδα κόστους του μεγέθους αυτού (πχ 0.9 €/ l diesel). Το κόστος της συνολικής ποσότητας κάθε μεγέθους προκύπτει ως το γινόμενο των δύο αυτών παραμέτρων. Η ανάλυση του κόστους κύκλου ζωής του συστήματος διαχείρισης αποβλήτων εντέλει υπολογίζεται αθροίζοντας τα κόστη όλων των δραστηριοτήτων που περιλαμβάνονται στο σενάριο.

Η συμβατική ανάλυση κόστους αποτελείται από όλα τα κόστη προϋπολογισμού και τα κόστη μεταβίβασης για τις δραστηριότητες του σεναρίου. Το άθροισμα του κόστους κεφαλαίου (Unit Budget Cost) με αυτό του κόστους μεταβίβασης (Unit Transfer) πολλαπλασιασμένο με το ποσό των αποβλήτων κάθε δραστηριότητας ( $W_i$ ) δίνουν το συνολικό συμβατικό κόστος του κύκλου ζωής.

$$\text{Συμβατική ανάλυση κόστους κύκλου ζωής} = \sum_i^n [W_i * (UBC_i + UT_i)] \quad (1)$$

Ο ίδιος τύπος επεκτείνεται και για την περιβαλλοντική ανάλυση κόστους, προσθέτοντας τα κόστη μεταβιβάσεων που αναμένεται να πραγματοποιηθούν στο κοντινό μέλλον (πχ εξωγενείς παράγοντες που αναμένεται να εσωτερικευτούν αποδίδοντάς τους νομισματική αξία).

$$\text{Περιβαλλοντική ανάλυση κόστους κύκλου ζωής} = \sum_i^n [W_i * (UBC_i + UT_i + UAT_i)] \quad (2)$$

Τέλος, η κοινωνική ανάλυση περιλαμβάνει τα κόστη προϋπολογισμού και κόστη εξωγενών παραγόντων και είναι υπολογισμένα με βάση αριθμητικές τιμές (“shadow prices”) οι οποίες είναι υποκειμενικές και εκφράζουν την προθυμία κάποιου να πληρώσει για ένα αγαθό ή μια υπηρεσία. Προκειμένου οι τιμές του κόστους κεφαλαίου να μετατραπούν σε αριθμητικές τιμές, υπάρχουν διάφορες μέθοδοι, όπως η χρήση συντελεστή διόρθωσης (Net tax factor). Συνολικά το κοινωνικό κόστος κύκλου ζωής δίνεται από τον τύπο:

$$\text{Κοινωνική ανάλυση κόστους κύκλου ζωής} = \sum_i^n [W_i * (UBC_i * NTF + UEC_i)] \quad (3)$$

#### 2.4.4.3 Υπολογισμός για τα επιμέρους κόστη των διεργασιών

##### Κόστος προϋπολογισμού

Το συγκεκριμένο αντικείμενο κόστους στην ανάλυση κόστους κύκλου ζωής μπορεί να είναι είτε κάποιο εφάπαξ ποσό όπως η αγορά εξοπλισμού εγκατάστασης, είτε να αναφέρεται σε λειτουργικά έξοδα και κόστη συντήρησης. Στην πρώτη περίπτωση το ποσό κατανέμεται ισόποσα μεταξύ των τόνων των απορριμμάτων που καταλήγουν στη συγκεκριμένη μονάδα κατά τη διάρκεια του χρόνου ζωής του εξοπλισμού. Αυτό επιτυγχάνεται μετατρέποντας το εφάπαξ κόστος σε ετήσια πρόσοδο σύμφωνα με τον τύπο:

$$A = \frac{P}{\left[ \frac{(1 + ir)^n - 1}{ir(1 + ir)^n} \right]} \quad (4)$$

Όπου, P = κόστος εξοπλισμού

$n$  = ο χρόνος ζωής του εξοπλισμού

$ir$  = το επιτόκιο προεξόφλησης

Κατόπιν το ποσό αυτό διαιρείται με τον ετήσιο ρυθμό χρήσης του εξοπλισμού. Το μέγεθος αυτό μπορεί να είναι ίσο είτε με την χωρητικότητα της εγκατάστασης αυτής, είτε ένα κλάσμα αυτής, εφόσον η εγκατάσταση λειτουργεί σε συνθήκες χαμηλότερες από τη σχεδιαστική της χωρητικότητα. Για παράδειγμα η θερμική χωρητικότητα ενός αποτεφρωτή περιορίζει την ποσότητα αποβλήτων που μπορεί να επεξεργαστεί. Έτσι, ο ετήσιος ρυθμός χρήσης (σε τόνους/έτος) σε ένα συγκεκριμένο σενάριο διαχείρισης απορριμμάτων, είναι αντιστρόφως ανάλογος με τη θερμική αξία του αποβλήτου. Αυτό σημαίνει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η θερμογόνο δύναμη των απορριμμάτων, τόσο λιγότερη ποσότητα μπορεί να καεί από την εγκατάσταση. Προκειμένου να υπολογιστεί ο ρυθμός αυτός, η ετήσια χωρητικότητα μάζας πολλαπλασιάζεται με την σχεδιαστική θερμική τιμή της εγκατάστασης και διαιρείται με την κατώτερη θερμογόνο δύναμη ενός τόνου αποβλήτου.

Όσον αφορά τα λειτουργικά κόστη και τα κόστη συντήρησης, αυτά μπορούν να είναι είτε σταθερά, όπως για παράδειγμα το κόστος εργασίας και ασφάλισης, είτε μεταβλητά, όπως η κατανάλωση ρεύματος. Στην περίπτωση των σταθερών εξόδων, το ετήσιο κόστος διαιρείται με τον ρυθμό χρήσης της εγκατάστασης (t/year) προκειμένου να υπολογιστεί το σταθερό κόστος για τη διαχείριση ενός τόνου αποβλήτων (€/t). Για τα μεταβλητά κόστη, οι φυσικές παράμετροι οι οποίες εκφράζουν την ποσότητα κάθε μεγέθους που απαιτείται για την επεξεργασία ενός τόνου αποβλήτου (kg ή MJ/ t) πολλαπλασιάζονται με την τιμή του μεγέθους αυτού (€/ kg ή MJ). Έτσι προκύπτουν:

$$\text{Σταθερό κόστος ανά μέγεθος} = \frac{\text{Ετήσιο κόστος}}{\text{Ετήσιος ρυθμός χρήσης}} \quad (5)$$

*Μεταβλητό κόστος ανά μέγεθος*

$$= \text{Τιμή μονάδας μεγέθους} * \text{Μέγεθος ανά τόνο αποβλήτου} \quad (6)$$

### Κόστος μεταβίβασης

Τα κόστη μεταβίβασης διαφέρουν σημαντικά, ανάλογα με τη νομοθεσία του κάθε κράτους αλλά και με την τεχνολογία επεξεργασίας, βασίζονται ωστόσο συνήθως σε μετρήσιμα μεγέθη, όπως για παράδειγμα κόστος ανά ποσότητα αποβλήτων (τέλη ταφής στους ΧΥΤΑ), ή ανά άμεσες εκπομπές στο περιβάλλον (ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα). Το μετρήσιμο μέγεθος ανά τόνο απορρίμματος αντιπροσωπεύει τη φυσική παράμετρο, ενώ η οικονομική επιβάρυνση ανά μέγεθος είναι η οικονομική παράμετρος. Πολλαπλασιάζοντας αυτά τα δύο μεγέθη, προκύπτει το συνολικό κόστος μεταβίβασης ανά τόνο αποβλήτων.

$$\text{Κόστος μεταβίβασης} = \text{Μέγεθος ανά τόνο αποβλήτου} * \text{Μεταβίβαση ανά τεμάχιο} \quad (7)$$

### Κόστος εξωτερικότητων

Αντίστοιχα τα κόστη από εξωγενείς παράγοντες αποτελούνται και αυτά από δύο παραμέτρους. Η μία παράμετρος είναι η οικονομική και πρόκειται για την αριθμητική τιμή ανά μονάδα περιβαλλοντικής επιβάρυνσης και η άλλη είναι η φυσική και αντιπροσωπεύει την μονάδα αυτή (π.χ. ποσότητα εκπομπών ανά τόνο αποβλήτων). Ενώ αυτές οι αριθμητικές τιμές των περιβαλλοντικών εκπομπών πρέπει ιδανικά να ανταποκρίνονται στην προθυμία της κοινωνίας να πληρώσει προκειμένου να αποφευχθούν οι εκπομπές αυτές και άλλες σχετιζόμενες επιπτώσεις, μπορεί επίσης να αντιπροσωπεύουν το κόστος του περιθωρίου μείωσης της ευημερίας ώστε να αποφευχθούν οι συνέπειες αυτές [124].

## 2.4.5 Έλεγχος αξιοπιστίας και εγκυρότητας δεδομένων και αποτελεσμάτων

Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση προέρχονται είτε από πειραματικές μετρήσεις άμεσα συνδεδεμένες με το σύστημα που μελετάται, είτε από βιβλιογραφικές πηγές οι οποίες είναι σχετικές με αυτό, είτε ακόμη με βάση την γνώμη ειδικών επιστημόνων που ασχολούνται με το συγκεκριμένο θέμα. Με βάση αυτό και δεδομένου ότι η μοντελοποίηση του κύκλου ζωής ενός συστήματος είναι παρά μια προσεγγιστική ανάλυση ενός συστήματος διεργασιών, γίνεται φανερό πως τα δεδομένα της θα εμφανίζουν -σε διαφορετικό βαθμό το καθένα ανάλογα με την προέλευσή του- ένα βαθμό αβεβαιότητας ως προς την εγκυρότητα και την ακρίβειά τους. Η αβεβαιότητα αυτή, όπως είναι λογικό, επεκτείνεται και στα αποτελέσματα της ανάλυσης, επηρεάζοντας εντέλει τα τελικά συμπεράσματα. Ιδιαίτερα σημαντικό για την εξαγωγή όσο το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτικών και έγκυρων αποτελεσμάτων είναι η ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας που εμφανίζεται σε κάθε διεργασία του συστήματος, ώστε αυτή να ενσωματωθεί και στα τελικά αποτελέσματα και να καταστήσει την ερμηνεία των αποτελεσμάτων ακριβέστερη και εγκυρότερη. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, αρχικά πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας, έτσι ώστε να εξεταστεί η ευαισθησία των αποτελεσμάτων του μοντέλου στις διάφορες παραμέτρους εισόδου. Κατόπιν, με την ανάλυση αβεβαιότητας, αξιολογείται το ποσό της αβεβαιότητας που φέρει κάθε παράμετρος ξεχωριστά στο τελικό αποτέλεσμα, αλλά και η συνολική αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων.

### 2.4.5.1 Ανάλυση ευαισθησίας

Η ανάλυση ευαισθησίας αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι στις μεθόδους προσδιορισμού της αβεβαιότητας. Η ανάλυση αυτή προσδιορίζει το βαθμό μεταβολής των αποτελεσμάτων της ανάλυσης ως συνέπεια μια αλλαγής στην τιμή των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στην μοντελοποίηση του συστήματος. Με βάση την ανάλυση αυτή μπορεί να εκτιμηθεί η σημαντικότητα όλων των παραμέτρων που εισάγονται στο σύστημα, σε σχέση με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση του κύκλου ζωής. Αποτελείται από την

ανάλυση συνεισφοράς (contribution analysis) στην οποία τα αποτελέσματα αποσυντίθεται στις επιμέρους διεργασίες προκειμένου να αποτυπωθεί η συνεισφορά της καθεμίας, την ανάλυση διαταραχής (perturbation analysis), στην οποία μεταβάλλεται η τιμή κάθε παραμέτρου ξεχωριστά (π.χ. κατά 10%) διατηρώντας όλες τις υπόλοιπες στις τιμές αναφοράς τους, και τέλος τον υπολογισμό του συντελεστή ευαισθησίας και του λόγου ευαισθησίας που σχετίζεται με κάθε παράμετρο.

Ο συντελεστής ευαισθησίας (sensitivity coefficient, SC) είναι ο λόγος μεταξύ των απόλυτων διαφορών του αποτελέσματος και της κάθε παραμέτρου. Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό και την κατάταξη της συνεισφοράς κάθε παραμέτρου στη συνολική διακύμανση (στην αναλυτική μέθοδο ανάλυσης αβεβαιότητας), και ως εκ τούτου αξιολογεί την σημαντικότητα των παραμέτρων σε σχέση με τα αποτελέσματα καθορίζοντας τις πιο κρίσιμες εξ αυτών.

$$SC_i^j = \frac{(\text{Αποτέλεσμα})_j}{(\text{Παράμετρος})_i} \approx \frac{\theta z_j}{\theta x_i}$$

Ο λόγος ευαισθησίας (sensitivity ratio, SR) ορίζεται ως ο λόγος των σχετικών διαφορών του αποτελέσματος και της κάθε παραμέτρου. Παρέχει πληροφορίες σχετικά με την ευαισθησία του μοντέλου σε κάθε παράμετρο.

$$SR_i^j = \frac{\left( \frac{\text{Αποτέλεσμα}}{\text{αρχικό αποτέλεσμα}} \right)_j}{\left( \frac{\text{Παράμετρος}}{\text{αρχική τιμή παραμέτρου}} \right)_i} \approx \frac{\theta z_j * x_i}{\theta x_i * z_j}$$

Ο συντελεστής  $i$  παίρνει τιμές από 1 έως  $n$  και αντιπροσωπεύει τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο ενώ ο συντελεστής  $j$  παίρνει τιμές από 1 έως  $m$  και σχετίζεται με τις κατηγορίες επιπτώσεων του εξεταζόμενου συστήματος. Σημειώνεται ότι για κάθε κατηγορία επιπτώσεων στην ΑΚΖ του συστήματος διαχείρισης απορριμμάτων αντιστοιχεί μια διαφορετική τιμή SR και SC για κάθε παράμετρο [44], [151].

#### 2.4.5.2 Αξιολόγηση ποιότητας δεδομένων - Pedigree Matrix

Το πρώτο βήμα για τον έλεγχο της ακρίβειας των δεδομένων εισαγωγής και συνεπώς των εξαγόμενων αποτελεσμάτων της ανάλυσης κύκλου ζωής είναι η αξιολόγηση της ποιότητας των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στη μοντελοποίηση του συστήματος. Η αξιολόγηση αυτή γίνεται μέσω της χρήσης του Pedigree Matrix. Πρόκειται για ένα 'ημι-ποσοτικό εργαλείο' το οποίο δίνει την δυνατότητα ποιοτικής αξιολόγησης των δεδομένων του συστήματος βάση κάποιων συγκεκριμένων δεικτών που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά τους. Το σύνολο των δεικτών αυτών εξετάζονται για κάθε παράμετρο αποδίδοντάς τους μία τιμή από το 1 μέχρι το 5 (όπου 1 θεωρείται το βέλτιστο).

Οι βασικοί δείκτες που χρησιμοποιούνται είναι η αξιοπιστία και η πληρότητα των δεδομένων, η χρονική και γεωγραφική συσχέτιση καθώς και η περαιτέρω τεχνολογική συσχέτιση Εικόνα 2-14.

Indicator score	1	2	3	4	5 (default)
<b>Reliability</b>	Verified <sup>3</sup> data based on measurements <sup>4</sup>	Verified data partly based on assumptions <b>or</b> non-verified data based on measurements	Non-verified data partly based on qualified estimates	Qualified estimate (e.g. by industrial expert)	Non-qualified estimate
<b>Completeness</b>	Representative data from all sites relevant for the market considered, over an adequate period to even out normal fluctuations	Representative data from >50% of the sites relevant for the market considered, over an adequate period to even out normal fluctuations	Representative data from only some sites (<<50%) relevant for the market considered <b>or</b> >50% of sites but from shorter periods	Representative data from only one site relevant for the market considered <b>or</b> some sites but from shorter periods	Representativeness unknown or data from a small number of sites <b>and</b> from shorter periods
<b>Temporal correlation</b>	Less than 3 years of difference to the time period of the dataset	Less than 6 years of difference to the time period of the dataset	Less than 10 years of difference to the time period of the dataset	Less than 15 years of difference to the time period of the dataset	Age of data unknown or more than 15 years of difference to the time period of the dataset
<b>Geographical correlation</b>	Data from area under study	Average data from larger area in which the area under study is included	Data from area with similar production conditions	Data from area with slightly similar production conditions	Data from unknown <b>or</b> distinctly different area (North America instead of Middle East, OECD-Europe instead of Russia)
<b>Further technological correlation</b>	Data from enterprises, processes and materials under study	Data from processes and materials under study (i.e. identical technology) but from different enterprises	Data from processes and materials under study but from different technology	Data on related processes or materials	Data on related processes on laboratory scale <b>or</b> from different technology

Εικόνα 2-14: Pedigree matrix<sup>2</sup>

Ο 'δείκτης αξιοπιστίας' σχετίζεται με την πηγή των δεδομένων, τις μεθόδους απόκτησής τους και τις διαδικασίες εξακρίβωσής τους. Ο 'δείκτης πληρότητας' σχετίζεται με το πόσο αντιπροσωπευτικό είναι το δείγμα, εάν περιλαμβάνει ικανοποιητικό αριθμό δεδομένων και αν η χρονική περίοδος λήψης είναι επαρκής ώστε να εξισορροπήσει τις φυσιολογικές διακυμάνσεις. Ο χρονικός δείκτης, αντιπροσωπεύει τη χρονική συσχέτιση μεταξύ του χρόνου της πραγματοποιούμενης μελέτης και του χρόνου αναφοράς των δεδομένων που χρησιμοποιούνται. Αντίστοιχα, ο δείκτης γεωγραφικής συσχέτισης αποτυπώνει την σχέση μεταξύ του τόπου διεξαγωγής της ανάλυσης και του τόπου προέλευσης των δεδομένων. Τέλος, ο τελευταίος δείκτης αφορά οποιαδήποτε συσχέτιση εκτός από γεωγραφική και χρονική (πχ διαφορετική εταιρεία, διεργασία, υλικά σε σχέση με αυτά της μελέτης).

<sup>2</sup> <https://pre-sustainability.com/articles/improved-pedigree-matrix-approach-for-ecoinvent/>

Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να τονιστεί ότι κάθε δείκτης θα πρέπει να αντιμετωπίζεται ξεχωριστά και να μην σχετίζονται μεταξύ τους. Κάθε δείκτης αντιπροσωπεύει ένα ανεξάρτητο κομμάτι αξιολόγησης της ποιότητας των δεδομένων.

### 2.4.5.3 Ανάλυση αβεβαιότητας

Όσον αφορά την ανάλυση αβεβαιότητας, υπάρχουν κατά κύριο λόγο δύο προσεγγίσεις, οι οποίες εφαρμόζονται για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας των αποτελεσμάτων ενός συστήματος. Η πρώτη προσέγγιση είναι η αναλυτική, η οποία στηρίζεται στη θεωρία της διάδοσης σφαλμάτων και αποτυπώνει με διαφορικό λογισμό τον τρόπο με τον οποίο η αβεβαιότητα των δεδομένων εισαγωγής μεταφέρεται στην αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων.

Η δεύτερη προσέγγιση, η οποία και εφαρμόζεται στην παρούσα μελέτη, βασίζεται σε μέθοδο δειγματοληψίας όπου υπολογίζεται η αβεβαιότητα χρησιμοποιώντας τυχαία δεδομένα από μια συγκεκριμένη κατανομή πιθανοτήτων. Τα περισσότερα λογισμικά μοντελοποίησης ανάλυσης κύκλου ζωής δίνουν τη δυνατότητα υπολογισμού της αβεβαιότητας με τη μέθοδο δειγματοληψίας, κατά βάση μέσω προσομοιώσεων Monte Carlo.

Ιδανικά, η αβεβαιότητα των εισαγόμενων δεδομένων θα πρέπει να βασίζεται σε στοιχεία μετρήσεων με βάση τα οποία θα κατασκευάζεται μια συγκεκριμένη κατανομή πιθανότητας. Η κατανομή αυτή έχει τη μορφή κανονικής κατανομής και για να οριστεί απαιτείται ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση.

Εντούτοις, λόγω της πολυπλοκότητας της ανάλυσης κύκλου ζωής και της πληθώρας των παραμέτρων του συστήματος, είναι σύνηθες για πολλές παραμέτρους να μην υπάρχει ικανοποιητικός αριθμός μετρήσεων, είτε ακόμη να υπάρχει μόνο μια τιμή. Στην περίπτωση αυτή συνηθίζεται να αποδίδεται η αβεβαιότητα της παραμέτρου με βάση συγκεκριμένους παράγοντες αβεβαιότητας, και η κατανομή που χρησιμοποιείται έχει τη μορφή λογαριθμικής [130]. Η λογαριθμική κατανομή αντιπροσωπεύεται από δύο μεγέθη, το γεωμετρικό μέσο όρο ( $\mu_g$ ) και τη γεωμετρική τυπική απόκλιση (GSD).

Στην περίπτωση χρήσης της λογαριθμικής κατανομής λαμβάνονται υπόψη δύο είδη αβεβαιότητας. Το πρώτο είναι η βασική αβεβαιότητα, η οποία πρόκειται για εγγενή μεταβλητότητα των παραμέτρων που μπορεί να οφείλεται σε αβεβαιότητα των μετρήσεων, μεταβλητότητα σχετική με την συγκεκριμένη δραστηριότητα ή και χρονική μεταβλητότητα [152]. Για παράδειγμα, θεωρείται ότι οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα εμφανίζουν αρκετά μεγαλύτερη ακρίβεια συγκριτικά με τις εκπομπές μονοξειδίου. Προκειμένου να υπολογιστεί η αβεβαιότητα αυτή χρησιμοποιείται ένας πίνακας παραγόντων οι οποίοι είναι διαφορετικοί για κάθε δραστηριότητα και ουσία. Οι παράγοντες αυτοί χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες ανάλογα με το είδος των εκπομπών. Πρόκειται για εκπομπές λόγω καύσης, εκπομπές διεργασιών και εκπομπές από γεωργικές δραστηριότητες (Πίνακας 2-4) [153].

Το άλλο είδος είναι η πρόσθετη αβεβαιότητα, η οποία έχει να κάνει με την ατέλεια των δεδομένων π.χ. δεδομένων από υποθέσεις, με ελλιπή εξακρίβωση, ή δεδομένων που αποκτήθηκαν από διαφορετικές χρονικές, γεωγραφικές ή τεχνολογικές συνθήκες συγκριτικά με το εξεταζόμενο σύστημα. Προκειμένου να υπολογιστεί η αβεβαιότητα αυτή για κάθε παράμετρο, χρησιμοποιείται το Pedigree Matrix που έχει κατασκευαστεί. Έτσι, κάθε τιμή του Pedigree Matrix αντιστοιχίζεται σε ένα παράγοντα πρόσθετης αβεβαιότητας σύμφωνα με τον Πίνακα 2-5. Για παράδειγμα μια παράμετρος με τιμή στο δείκτη αξιοπιστίας ίση με 5 αντιστοιχεί σε παράγοντα πρόσθετης αβεβαιότητας ίσο με 0,04.

**Πίνακας 2-4: Παράγοντες υπολογισμού βασικής αβεβαιότητας**

input / output group	c	p	a	input / output group	c	p	a
<b>demand of:</b>				<b>pollutants emitted to air:</b>			
thermal energy, electricity, semi-finished products, working material, waste treatment services	0.0006	0.0006	0.0006	CO <sub>2</sub>	0.0006	0.0006	
transport services (tkm)	0.12	0.12	0.12	SO <sub>2</sub>	0.0006		
Infrastructure	0.3	0.3	0.3	NMVOG total	0.04		
<b>resources:</b>				NO <sub>x</sub> , N <sub>2</sub> O	0.04		0.03
Primary energy carriers, metals, salts	0.0006	0.0006	0.0006	CH <sub>4</sub> , NH <sub>3</sub>	0.04		0.008
Land use, occupation	0.04	0.04	0.002	Individual hydrocarbons	0.04	0.12	
Land use, transformation	0.12	0.12	0.008	PM>10	0.04	0.04	
<b>pollutants emitted to water:</b>				PM10	0.12	0.12	
BOD, COD, DOC, TOC, inorganic compounds (NH <sub>4</sub> , PO <sub>4</sub> , NO <sub>3</sub> , Cl, Na etc.)		0.04		PM2.5	0.3	0.3	
Individual hydrocarbons, PAH		0.3		Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH)	0.3		
Heavy metals		0.65	0.09	CO, heavy metals	0.65		
Pesticides			0.04	Inorganic emissions, others		0.04	
NO <sub>3</sub> , PO <sub>4</sub>			0.04	Radionuclides (e.g., Radon-222)		0.3	
<b>pollutants emitted to soil:</b>							
Oil, hydrocarbon total		0.04					
Heavy metals		0.04	0.04				
Pesticides			0.033				

**Πίνακας 2-5: Παράγοντες υπολογισμού πρόσθετης αβεβαιότητας**

Indicator score	1	2	3	4	5
<b>Reliability</b>	0.000	0.0006	0.002	0.008	0.04
<b>Completeness</b>	0.000	0.0001	0.0006	0.002	0.008
<b>Temporal correlation</b>	0.000	0.0002	0.002	0.008	0.04
<b>Geographical correlation</b>	0.000	2.5e-5	0.0001	0.0006	0.002
<b>Further technological correlation</b>	0.000	0.0006	0.008	0.04	0.12

Όσον αφορά τον ορισμό της λογαριθμικής κατανομής, ο γεωμετρικός μέσος όρος αντιστοιχεί στην τιμή αναφοράς της κάθε παραμέτρου (εισάγεται ως ο φυσικός λογάριθμος της τιμής κάθε παραμέτρου) ενώ η γεωμετρική τυπική απόκλιση υπολογίζεται με βάση την βασική και πρόσθετη αβεβαιότητα σύμφωνα με τον τύπο:

$$GSD = \exp\left(\left(U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5 + U_\beta\right)^{\frac{1}{2}}\right) \quad (10)$$

Όπου,

U<sub>1</sub>= παράγοντας αβεβαιότητας ακρίβειας

U<sub>2</sub>= παράγοντας αβεβαιότητας πληρότητας

U<sub>3</sub>= παράγοντας αβεβαιότητας χρονικής συσχέτισης

U<sub>4</sub>= παράγοντας αβεβαιότητας γεωγραφικής συσχέτισης

U<sub>5</sub>= παράγοντας αβεβαιότητας περαιτέρω τεχνολογικής συσχέτισης

U<sub>β</sub>= παράγοντας βασικής αβεβαιότητας



## 3.0 Ανάλυση σύστασης Αστικών Στερεών Αποβλήτων

### 3.1 Γενικές αρχές ανάλυσης

Βάση για την ανάπτυξη οποιουδήποτε αποτελεσματικού και φιλικού προς το περιβάλλον σχεδίου διαχείρισης ΑΣΑ αποτελεί η ακριβής και εις βάθος γνώση της σύστασης των διαφόρων ρευμάτων αποβλήτων. Ωστόσο, λόγω της πολυπλοκότητας ανάπτυξης και εφαρμογής κάποιας μεθοδολογίας ανάλυσης της σύστασης των αποβλήτων, αλλά και των ιδιαίτερων κοινωνικοοικονομικών συνθηκών της εκάστοτε περιοχής δεν υπάρχει κάποια πρότυπη κοινώς αποδεκτή μεθοδολογία που να επιτυγχάνει αυτό το σκοπό, αν και πληθώρα προτάσεων υπάρχει στη σχετική βιβλιογραφία.

Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής σχεδιάστηκε και εφαρμόστηκε μία μέθοδος ανάλυσης της σύστασης των ΑΣΑ του Δήμου Χαλανδρίου με κριτήριο την εύκολη και χαμηλού κόστους εφαρμογή της αλλά και την εφαρμοσιμότητά της σε άλλους Δήμους στην Ελλάδα και το εξωτερικό με παρόμοια χαρακτηριστικά.

### 3.2 Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία που σχεδιάστηκε εφαρμόστηκε στην περιοχή της Αγίας Βαρβάρας Χαλανδρίου, η οποία καλύπτει περίπου το 10% του συνολικού πληθυσμού της πόλης (δηλαδή περίπου 8000 κατοίκους). Η συγκεκριμένη περιοχή επελέγη, καθώς αποτελούσε την πρώτη περιοχή του Δήμου στην οποία επεκτάθηκε στο γενικό πληθυσμό η διαλογή στην πηγή των Τροφικών Υπολειμμάτων (βάσει των συμπερασμάτων του Waste4think). Έτσι, η ίδια μεθοδολογία εφαρμόστηκε πριν την εφαρμογή της διαλογής στην πηγή των Τροφικών Υπολειμμάτων (ώστε να καταγραφεί η προϋπάρχουσα κατάσταση) και επαναλήφθηκε 4 και 7 μήνες μετά την εφαρμογή του συστήματος διαλογής στην πηγή των Τροφικών Υπολειμμάτων, ώστε να αξιολογηθεί το εγχείρημα αυτό αλλά και να μελετηθεί η επίδρασή του στα υπόλοιπα ρεύματα αποβλήτων. Τέλος, η ίδια μεθοδολογία εφαρμόστηκε στο σύνολο του Δήμου ώστε να αξιολογηθεί η ακρίβεια της μεθόδου και η επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων.

Σε κάθε επανάληψη της ανάλυσης ακολουθήθηκαν τα εξής βήματα:

1. Δειγματοληψία και μεταφορά των δειγμάτων στο ΚΔΑΥ Ασπροπύργου.
2. Διαχωρισμός αποβλήτων με την υποστήριξη του προσωπικού του ΚΔΑΥ Ασπροπύργου.
3. Στατιστική επεξεργασία και ερμηνεία αποτελεσμάτων.

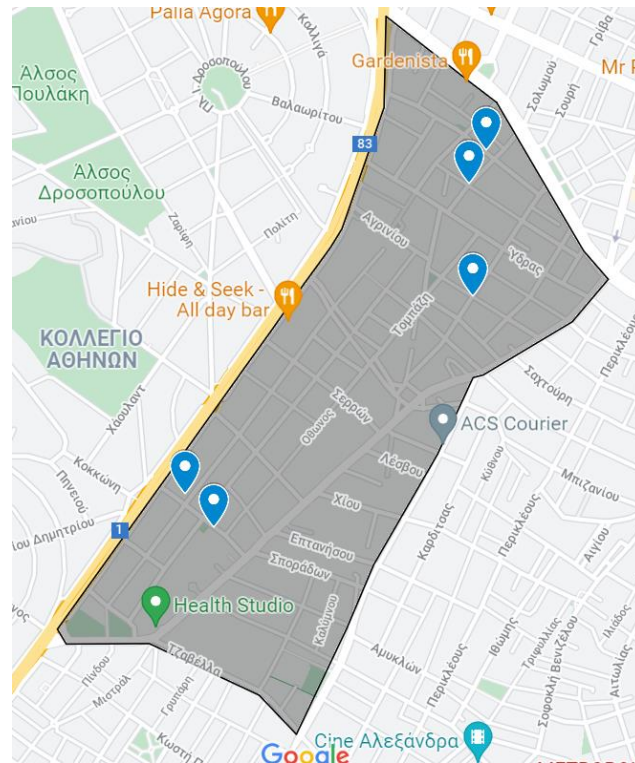
Το σύστημα διαχείρισης των ΑΣΑ του Δήμου Χαλανδρίου κατά την περίοδο διεξαγωγής της πρώτης δειγματοληψίας αποτελούταν από τρία ρεύματα αποβλήτων:

- i. Ανακυκλώσιμα (πλαστικό, μέταλλα, αλουμίνια, γυαλί, συσκευασίες) – Μπλε κάδος
- ii. Χαρτί & Χαρτόνι – Κίτρινος κάδος
- iii. Υπολείμματα – Πράσινος κάδος

Ως εκ τούτου, τα τρία αυτά ρεύματα αποβλήτων συμπεριλήφθηκαν στην πρώτη δειγματοληψία.

Πέντε σημεία δειγματοληψίας επιλέχθηκαν με βάση τα εξής κριτήρια: (i) σε κάθε σημείο δειγματοληψίας πρέπει να υπάρχει ακριβώς ένας κάδος κάθε χρώματος, (ii) δεν πρέπει να υπάρχουν εμπορικά καταστήματα και υπηρεσίες (σχολεία, δημόσια κτίρια, καταστήματα εστίασης κ.λπ.) πέριξ του σημείου δειγματοληψίας, παρά μόνο κατοικίες, ώστε τα αποτελέσματα της μελέτης να αντικατοπτρίζουν με ακρίβεια τα οικιακά απορρίμματα που παράγονται στο Δήμο,

και (iii) τα σημεία να καλύπτουν κατά το δυνατό το σύνολο της περιοχής της Αγίας Βαρβάρας, ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή αντιπροσωπευτικότητα. Βάσει αυτών των κριτηρίων επιλέχθηκαν τα σημεία που φαίνονται στην Εικόνα 3-1.



**Εικόνα 3-1: Ανάλυση σύστασης ΑΣΑ Δήμου Χαλανδρίου, Σημεία δειγματοληψίας**

Το πρωί της ημέρας 0, οι κάδοι που βρίσκονται στα σημεία δειγματοληψίας αδειάστηκαν. Στη συνέχεια, για 7 συνεχόμενες ημέρες, κατά τις πρωινές ώρες το περιεχόμενο των κάδων συλλεγόταν και μεταφερόταν στο ΚΔΑΥ Ασπροπύργου, όπου και πραγματοποιούνταν οι αναλύσεις. Εκεί, κάθε ρεύμα αποβλήτων χωριζόταν στις 8 κατηγορίες και 33 υπο-κατηγορίες που είχαν επιλεγεί με βάση το πρωτόκολλο που είχε αναπτυχθεί στα πλαίσια του Waste4think (Πίνακας 3-2). Επιπλέον, οι κατηγορίες αποβλήτων ομαδοποιήθηκαν περαιτέρω ώστε να ανταποκρίνονται στις ανάγκες διαμόρφωσης ενός σχεδίου διαχείρισης για τον Δήμο Χαλανδρίου. Η κατηγοριοποίηση αυτή καθώς και οι συντομογραφίες των κατηγοριών παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-1.

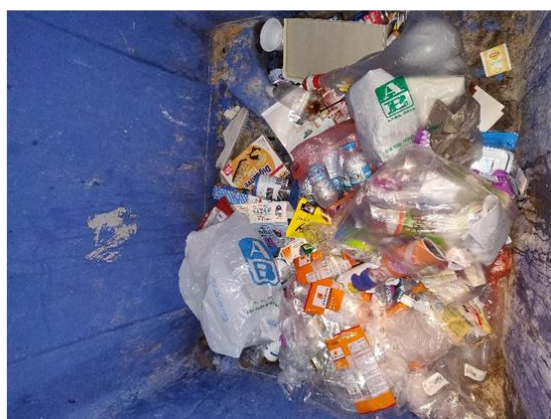
Κατά τη διάρκεια του δεύτερου και τρίτου γύρου δειγματοληψιών, είχε εφαρμοστεί το σύστημα διαλογής στην πηγή των τροφικών υπολειμμάτων. Ως εκ τούτου, το συγκεκριμένο ρεύμα συμπεριλήφθηκε επίσης στην ανάλυση. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση των δειγμάτων, ωστόσο μείωνε σημαντικά τις ποσότητες των σύμμεικτων αποβλήτων και άρα την πολυπλοκότητα της ανάλυσης. Τέλος, ο τέταρτος κύκλος δειγματοληψιών κάλυπτε το σύνολο του Δήμου (με εξαίρεση αυτή τη φορά την περιοχή της Αγίας Βαρβάρας) με σκοπό την επαλήθευση των προηγούμενων αναλύσεων.

**Πίνακας 3-1: Κατηγοριοποίηση ΑΣΑ και συντομογραφίες**

Κατηγορία αποβλήτων	Συντομογραφία
Βιοαποικοδομήσιμα	B
Χαρτί & Χαρτόνι	X
Γυαλί	Γ
Πλαστικό	Π
Μέταλλο	M
Ξύλο	Ξ
Σύνθετες συσκευασίες	Συνθ. Συσκ
Χαρτί υγείας	XY
Άλλα	A

Σε καθημερινή βάση, το συνολικό περιεχόμενο κάθε κάδου, καθώς και οι διαχωρισμένες ανά κατηγορία και υπο-κατηγορία ποσότητες αποβλήτων ζυγίζονταν. Η διαδικασία της δειγματοληψίας και της ανάλυσης παρουσιάζεται παρακάτω.

Ιδιαίτερη σημασία δόθηκε στον ενδεδειγμένο καθαρισμό του ειδικά διαμορφωμένου χώρου διαχωρισμού των αποβλήτων, ώστε να αποφευχθούν εξωγενείς επιμολύνσεις.



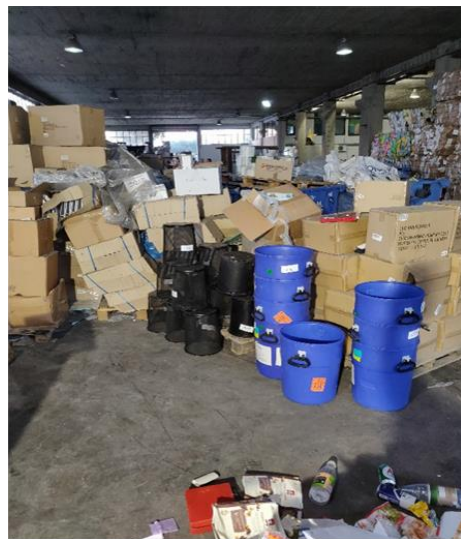
**Βήμα 1<sup>ο</sup>:** Για 7 συνεχόμενες ημέρες συλλεγόταν το περιεχόμενο των τριών κάδων (υπολείμματα, ανακυκλώσιμα, χαρτί & χαρτόνι) από τα 5 σημεία δειγματοληψίας.



**Βήμα 2°:** Η συνολική συλλεχθείσα ποσότητα κάθε κάδου τοποθετούταν σε big bags και μεταφερόταν στο ΚΔΑΥ Ασπροπύργου.



**Βήμα 3°:** Καθημερινά, το δείγμα αδειάζονταν στον ειδικά διαμορφωμένο χώρο όπου επρόκειτο να πραγματοποιηθεί η ανάλυση. Εκεί, το προσωπικό του ΚΔΑΥ πραγματοποιούσε το διαχωρισμό στις διάφορες κατηγορίες και υπο-κατηγορίες ΑΣΑ.



**Βήμα 4°:** Για τη ζύγιση των δειγμάτων χρησιμοποιήθηκαν ειδικοί κάδοι και ζυγοί ακριβείας.

**Πίνακας 3-2: Κατηγοριοποίηση ΑΣΑ κατά Waste4think**

Πρωτογενής κατηγοριοποίηση	Δευτερογενής κατηγοριοποίηση	Παραδείγματα
Βιοαποικοδομήσιμα	Υπολείμματα τροφών (αποτρέψιμα)	τρόφιμα που είναι ακόμα συσκευασμένα και ημερομηνία λήξης τους δεν έχει παρέλθει
	Υπολείμματα τροφών (μη αποτρέψιμα)	τρόφιμα που είτε δεν είναι συσκευασμένα είτε η ημερομηνία λήξης τους έχει παρέλθει
	Μικρού μεγέθους απόβλητα κήπου Κλαδέματα	λουλούδια, φρούτα και λαχανικά, γρασίδι, φύλα κλπ κλαδιά
	Άλλα βιοαποικοδομήσιμα	ζωικά υπολείμματα, βιοαποικοδομήσιμες σακούλες, πριονίδια, φελλοί, κόκκαλα (όχι από υπολείμματα τροφών), περιττώματα, βιοαποικοδομήσιμα από μικρού όγκου (fines)
Χαρτί & Χαρτόνι	Χαρτί συσκευασίας Χαρτόνια συσκευασίας	χάρτινες σακούλες, περιτυλίγματα, κουτιά χαρτομάντιλων κουτιά δημητριακών, πακέτα καθαριστικών προϊόντων, χαρτόνια αυγών, κουτιά παιχνιδιών και άλλων συσκευών, κουτιά απορρυπαντικών
	Χαρτί/Χαρτόνι εκτός συσκευασίας	εφημερίδες, βιβλία, φύλλα χαρτιού, χαρτί τουαλέτας, χαρτομάντιλα
Γυαλί	Συσκευασίας εκτός συσκευασίας	μπουκάλια, δοχεία γυαλιά που δεν χρησιμοποιούνται για αποθήκευση (πυρέξ, ποτήρια, τζάμια, καθρέφτες)
Πλαστικό	Άκαμπτο πλαστικό συσκευασίας	άχρωμα και έγχρωμα μπουκάλια, δοχεία και άλλα (συσκευασίες: αλκοόλ, καθαριστικά, σαπούνια, γάλα, λάδι, ξύδια νερό κλπ)
	Πλαστικές μεμβράνες συσκευασίας	περιτυλίγματα μπισκότων, σακούλες κατάψυξης τροφίμων κλπ
	Πλαστικές μεμβράνες εκτός συσκευασίας και σακούλες σκουπιδιών Πλαστικό εκτός συσκευασίας	κολλητική ταινία, σακούλες σκουπιδιών κλπ πιστωτικές κάρτες, κουμπιά, κασέτες, εργαλεία, παιχνίδια, γόμες, παπούτσια κλπ
Μέταλλα	Σιδηρούχα συσκευασίας	δοχεία τροφίμων, ποτών και άλλων: ανθρακούχα ποτά, ζωοτροφές, srgay, κονσέρβες
	Μη σιδηρούχα συσκευασίας	δοχεία τροφίμων, ποτών και άλλων: ανθρακούχα ποτά, ζωοτροφές, srgay, κονσέρβες
	Σιδηρούχα εκτός συσκευασίας	κομμάτια ποδηλάτων/αυτοκινήτων, προϊόντα οικοδομής, κλειδιά, ράφια, δαχτυλίδια, εργαλεία, βίδες, καρφίτσες κλπ
	Μη σιδηρούχα εκτός συσκευασίας	κομμάτια ποδηλάτων/αυτοκινήτων, προϊόντα οικοδομής, κλειδιά, ράφια, δαχτυλίδια, εργαλεία, βίδες, καρφίτσες κλπ
Σύνθετα συσκευασίας	Σύνθετες συσκευασίες	πακέτα συσκευασίας από χαρτόνια καλυμμένα από φύλλο αλουμινίου, συνδυασμοί χαρτονιού, πλαστικού και αλουμινίου
Ξύλο	Άλλα σύνθετα συσκευασίας	κάψουλες καφέ
	Ξύλο συσκευασίας	ξύλινα κουτιά
Διάφορα	Άλλα ξύλα	άλλα ξύλα
	Υφάσματα	φυσικά ή συνθετικά ρουχισμού και άλλα υφάσματα ή έπιπλα
	Παπούτσια και αξεσουάρ	δερμάτινα (παπούτσια, σανδάλια, ζώνες), τσάντες, βραχιόλια
Επικίνδυνα απόβλητα	Υφάσματα - προϊόντα υγιεινής	προϊόντα υγιεινής πλην πανών και χαρτιού υγείας
	Χαρτί υγείας	
	Πάνες	
	Μπαταρίες/συσσωρευτές	οικιακής χρήσης ή αυτοκινήτων, επαναφορτιζόμενες ή μη οποιουδήποτε τύπου επικίνδυνα απόβλητα
	Άλλα επικίνδυνα	μικρές και μεγάλες ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές
ΑΗΗΕ	Ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές	διαστάσεων μεγαλύτερων των 50 εκατοστών ή 25 L.
Ογκώδη	Ογκώδη	
Αδρανή	Χώμα, σκόνη και διάφορα αδρανή	
Μικρού όγκου (Fines)	Κοσκινισμένα στα 10 mm	υλικά κοκκομετρίας <10mm
Άλλα	Άλλα	

Οι ποσότητες αποβλήτων που συλλέχθηκαν σε κάθε γύρο δειγματοληψίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-3.

**Πίνακας 3-3: Ανάλυση Σύστασης ΑΣΑ Δήμου Χαλανδρίου, Στοιχεία κύκλων δειγματοληψίας**

Γύρος δειγματοληψίας	Γενικά Στοιχεία		Πλήθος σημείων δειγματοληψίας	Ποσότητες Δειγμάτων (kg)				Σύνολο
	Ημερομηνίες	Περιοχή		Σύμμεικτα Απόβλητα	Ανακυκλώσιμα	Χαρτί & Χαρτόνι	Τροφικά Υπολείμματα	
1ος	13-19/09/2018	Αγία Βαρβάρα	5	394	151	40	-	585
2ος	22-29/06/2019	Αγία Βαρβάρα	5	553	182	25	-	115 875
3ος	22-29/09/2019	Αγία Βαρβάρα	5	385	266	202	-	107 960
4ος	14-20/12/2019	Σύνολο Δήμου	8	1370	452	346	-	2168

### 3.3 Μέθοδος στατιστικής επεξεργασίας πρωτογενών αποτελεσμάτων

Το λογισμικό MS Excel και το περιβάλλον γλώσσας προγραμματισμού R χρησιμοποιήθηκαν για τη στατιστική επεξεργασία και γραφική απεικόνιση των πρωτογενών αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις δειγματοληψίες.

Η R είναι μία γλώσσα προγραμματισμού συνοδευόμενη από το αντίστοιχο Γραφικό Περιβάλλον Χρήστη, η οποία θεωρείται ευρέως κατάλληλη για προβλήματα χειρισμού δεδομένων, υπολογισμούς και γραφική απεικόνιση [154]. Τα συγκεκριμένα “πακέτα” που χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες της παρούσας ανάλυσης ήταν τα: dplyr, zCompositions, ggPlot και magrittr.

Για την ανάλυση και ερμηνεία των πρωτογενών αποτελεσμάτων των αναλύσεων χρησιμοποιήθηκε περιγραφική στατιστική. Συγκεκριμένα, για την ανάλυση της σύστασης των ΑΣΑ υπολογίστηκαν: διάμεσοι (median), διατεταρτημόρια (inter-quartile), εύρος τιμών (range), άνω τεταρτημόρια (upper quartile), κάτω τεταρτημόρια (lower quartile), ακρότατες τιμές (outliers) και απεικονίστηκαν σε αντίστοιχα διαγράμματα. Για την καλύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων οι κύκλοι δειγματοληψίας χωρίστηκαν σε δύο ομάδες:

1. Οι κύκλοι δειγματοληψίας που αφορούσαν συγκεκριμένα την Αγία Βαρβάρα, αλλά λήφθηκε υπόψη η χρονική διακύμανση των αποτελεσμάτων.
2. Ο τέταρτος κύκλος δειγματοληψίας που αφορούσε το σύνολο του Δήμου, αλλά λήφθηκε υπόψη η γεωγραφική διακύμανση των αποτελεσμάτων.

Επιπροσθέτως, για κάθε κύκλο δειγματοληψιών υπολογίστηκε το ποσοστό αστοχίας σε κάθε ρεύμα αποβλήτων, δηλαδή το ποσοστό υλικών που είχε καταλήξει σε ένα συγκεκριμένο ρεύμα ενώ θα έπρεπε (βάσει των οδηγιών του συστήματος διαχείρισης ΑΣΑ του Δήμου Χαλανδρίου) να έχει καταλήξει σε διαφορετικό.

Τέλος, ο βαθμός διαλογής στην πηγή για κάθε ένα από τα παρακάτω ρεύματα αποβλήτων υπολογίστηκε:

1. Τροφικά υπολείμματα
2. Πλαστικά
3. Χαρτί & Χαρτόνι
4. Γυαλί
5. Μέταλλα

Ο υπολογισμός του βαθμού διαλογής στην πηγή έγινε βάσει της παρακάτω εξίσωσης:

$$\% \text{διαλογή στην πηγή} = \frac{\text{kg αποβλήτων ρεύματος σε κάδο διαλογής στην πηγή}}{\text{συνολικά kg αποβλήτων σε όλους τους κάδους}} \times 100\%$$

### 3.4 Αποτελέσματα ανάλυσης

Τα αποτελέσματα του πρώτου κύκλου δειγματοληψίας, ο οποίος υλοποιήθηκε το Σεπτέμβριο του 2018, αποτέλεσαν τη βάση για την εκτίμηση της απόδοσης της εφαρμογής του συστήματος διαλογής στην πηγή των τροφικών υπολειμμάτων. Τα πρωτογενή αποτελέσματα τόσο του πρώτου όσο και των υπολοίπων κύκλων δειγματοληψίας παρατίθενται στο Παράρτημα 1.

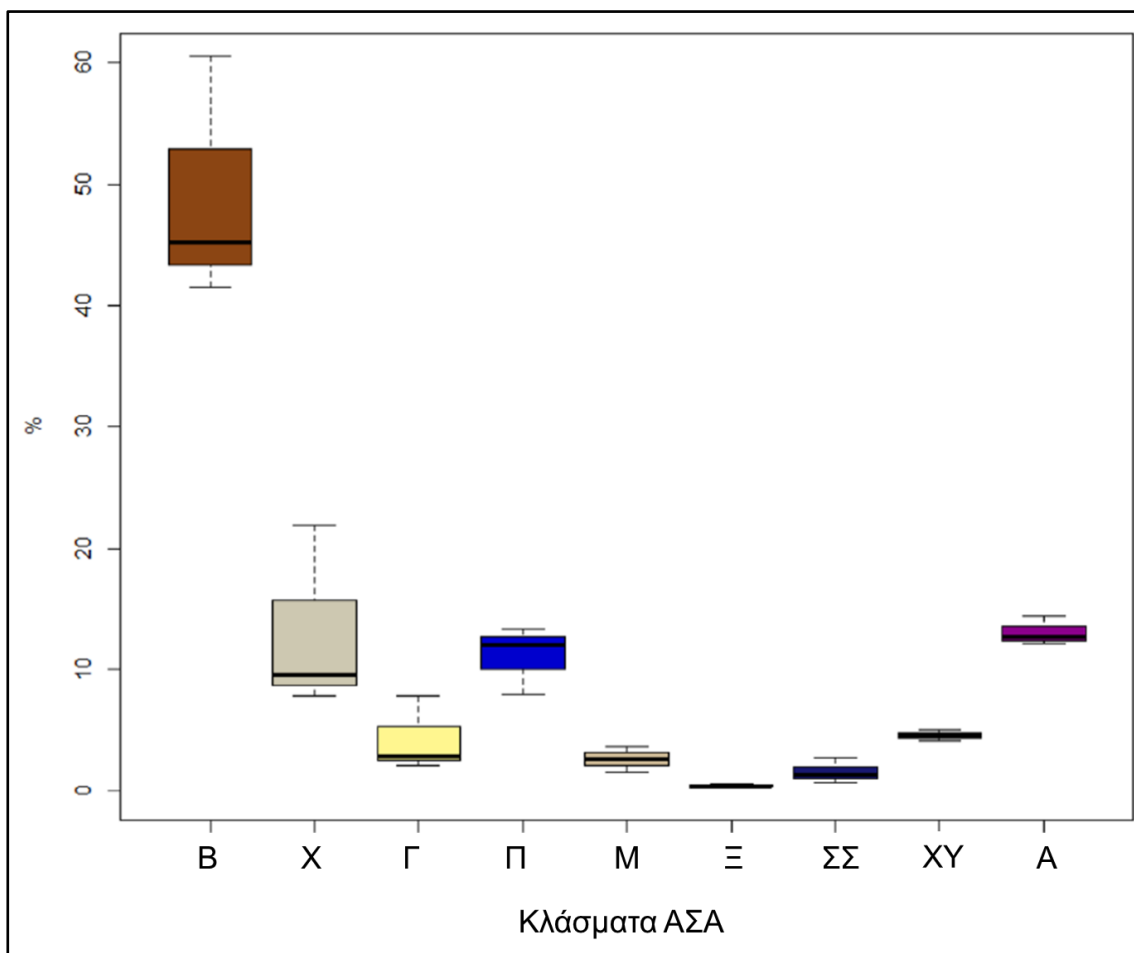
Τα εξαχθέντα αποτελέσματα είναι συγκρίσιμα ως επί το πλείστον με τα εθνικά στατιστικά στοιχεία για τη σύσταση των ΑΣΑ. Η συνέπεια μεταξύ των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την παρούσα μελέτη και των εθνικών αποτελεσμάτων αποτελεί μία πρώτη ένδειξη για την ακρίβεια της μεθόδου που εφαρμόστηκε. Σημαντικό ρόλο για την επίτευξη ακριβών αποτελεσμάτων διαδραμάτισε η επιλογή συνεργασίας με το ΚΔΑΥ Ασπροπύργου, καθώς το εξειδικευμένο προσωπικό του που συμμετείχε στην ανάλυση και ιδιαίτερα στο διαχωρισμό των υλικών στις διάφορες κατηγορίες προσέδωσε ακρίβεια και ταχύτητα στη διαδικασία.

Σε σχέση με το βασικό στόχο της ανάλυσης, που ήταν η εκτίμηση του ποσοστού των βιοαποικοδομήσιμων ΑΣΑ του Δήμου Χαλανδρίου (ώστε να σχεδιαστεί και υλοποιηθεί με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια το σύστημα διαλογής στην πηγή των τροφικών υπολειμμάτων) υπολογίστηκε ότι το συγκεκριμένο ρεύμα ΑΣΑ αποτελεί το 47% του συνόλου των ΑΣΑ. Η συγκεκριμένη εκτίμηση συνάδει απολύτως με τη σχετική διεθνή βιβλιογραφία. Επιπλέον, το ύψος των ποσοτήτων που αντιστοιχούν στα βιοαποικοδομήσιμα υπογραμμίζει ακόμα περισσότερο την ανάγκη εφαρμογής συστήματος διαλογής στην πηγή για τα τροφικά υπολείμματα, τόσο στο Χαλάνδρι όσο και στο σύνολο των Ελληνικών δήμων.

Τέσσερις μήνες μετά την εφαρμογή του συστήματος διαλογής στην πηγή των τροφικών υπολειμμάτων, υλοποιήθηκε ο 2<sup>ος</sup> κύκλος δειγματοληψίας, συμπεριλαμβάνοντας αυτή τη φορά και το νέο αυτό ρεύμα (καφέ κάδος). Το ποσοστό των βιοαποικοδομήσιμων αποβλήτων ήταν αυτή τη φορά σημαντικά υψηλότερο φτάνοντας στο 57%. Αντίστοιχα, οι κατηγορίες "Χαρτί & Χαρτόνι" και "Άλλα" κυρίως, αλλά και οι κατηγορίες "Πλαστικά" και "Γυαλί" παρουσίασαν ανάλογη μείωση. Η διαφοροποίηση αυτή ενδεχομένως να οφείλεται στην ευχερέστερη διαλογή της σημαντικότερης υπο-κατηγορίας των βιοαποικοδομήσιμων, δηλαδή των τροφικών υπολειμμάτων. Συγκεκριμένα, κατά τον πρώτο κύκλο δειγματοληψίας οι επιμολύνσεις των υπολοίπων κατηγοριών στο ρεύμα των συμμίκτων από τροφικά υπολείμματα (λόγω και των φυσικών χαρακτηριστικών των τροφικών υπολειμμάτων) κατέστησε δυσχερή το διαχωρισμό τους. Αντίθετα, με την εκτροπή των τροφικών υπολειμμάτων από τον πράσινο κάδο, κατέστη ευχερέστερος ο ακριβής διαχωρισμός τους από τις υπόλοιπες κατηγορίες.

Στη συνέχεια, το Σεπτέμβριο του 2019 παρατηρήθηκε σημαντική μείωση στο ποσοστό των βιοαποικοδομήσιμων αποβλήτων, κυρίως λόγω της αναμενόμενης εποχικά μείωσης της παραγωγής κλαδεμάτων.

Ο συνδυασμός των αποτελεσμάτων των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν για την Αγία Βαρβάρα χρησιμοποιήθηκαν ως βάση για την πραγματοποίηση στατιστικής επεξεργασίας.



**Διάγραμμα 3-1: Στατιστική ανάλυση εποχική διακύμανσης σύστασης ΑΣΑ, Αγία Βαρβάρα, Δήμος Χαλανδρίου**

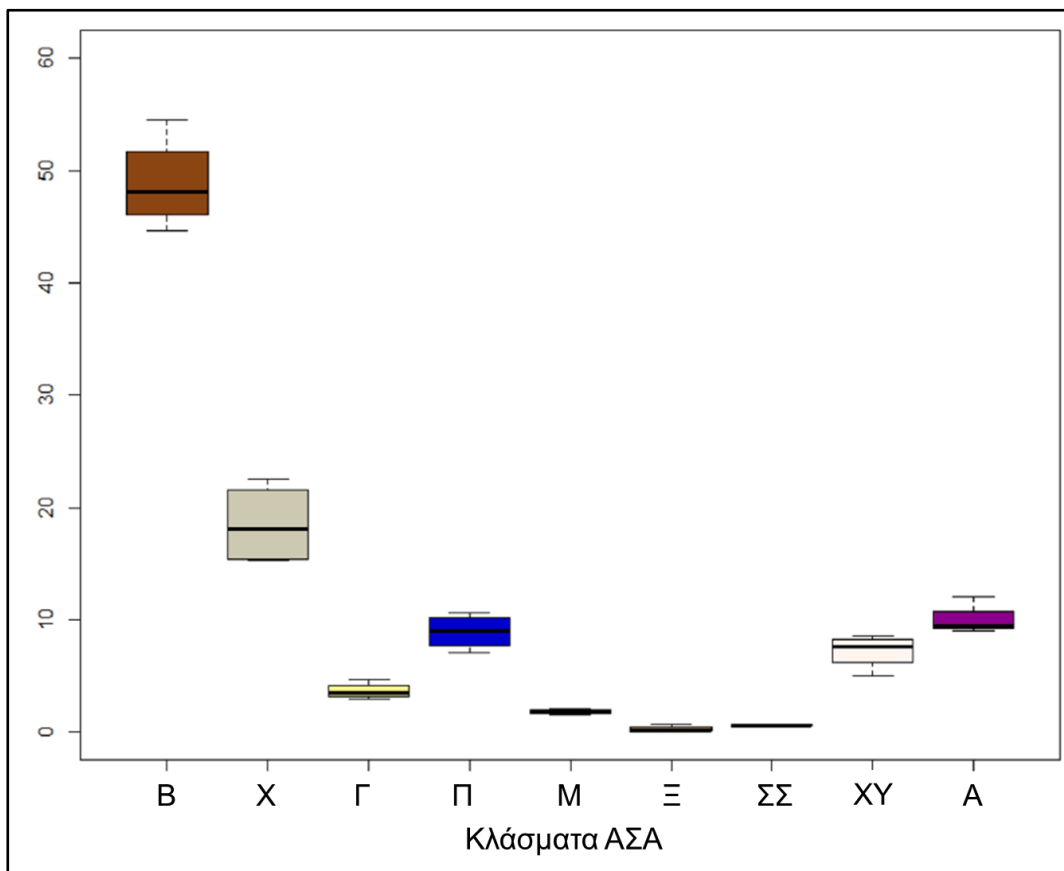
Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα το κλάσμα των Βιοαποικοδομήσιμων έχει εύρος τιμών 42%-52% με το διάμεσο να είναι στο 44%. Ωστόσο, το εύρος των τιμών των βιοαποικοδομήσιμων είναι σημαντικά μεγαλύτερο από των υπολοίπων ρευμάτων, γεγονός που καταδεικνύει την υψηλή μεταβλητότητα του ρεύματος. Επιπλέον, ενδιαφέρον παρουσιάζει το κλάσμα "Χαρτί Υγείας" καθώς εμφανίζει ιδιαίτερα χαμηλή μεταβλητότητα σε υψηλή σχετικά συγκέντρωση 7-8%.

Γενικά, το μικρό εύρος των τιμών για όλα τα ρεύματα, πλην των Βιοαποικοδομήσιμων, εξαρτάται από την ακρίβεια της μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε, αλλά και την εποχική διακύμανση της σύστασης των ΑΣΑ, η οποία όπως είναι αναμενόμενη για μία περιοχή μη-τουριστική και χωρίς μεγάλες ροές εξωτερικού πληθυσμού (π.χ. από την ύπαρξη πολλών εταιρειών σε μία περιοχή), όπως η Αγία Βαρβάρα. Οι τιμές που παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 3-1 είναι σε συμφωνία με τα εθνικά δεδομένα για τα ΑΣΑ. Η μόνη σημαντική διαφοροποίηση εμφανίζεται στο κλάσμα των Βιοαποικοδομήσιμων και πιθανότατα οφείλεται στα ιδιαίτερα καταναλωτικά χαρακτηριστικά του Δήμου Χαλανδρίου αλλά και στην παλαιότητα των εθνικών δεδομένων.

Ο τελευταίος κύκλος δειγματοληψιών πραγματοποιήθηκε όπως αναφέρθηκε και παραπάνω για το σύνολο του Δήμου. Στην τέταρτη ανάλυση ο στόχος δεν ήταν η κατανόηση της σύστασης των αποβλήτων σε μία συγκεκριμένη περιοχή με βάση την εποχική της διακύμανση, αλλά η ανάλυση



του συνόλου του Δήμου για μία δεδομένη χρονική στιγμή. Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης ανάλυσης παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 3-2.



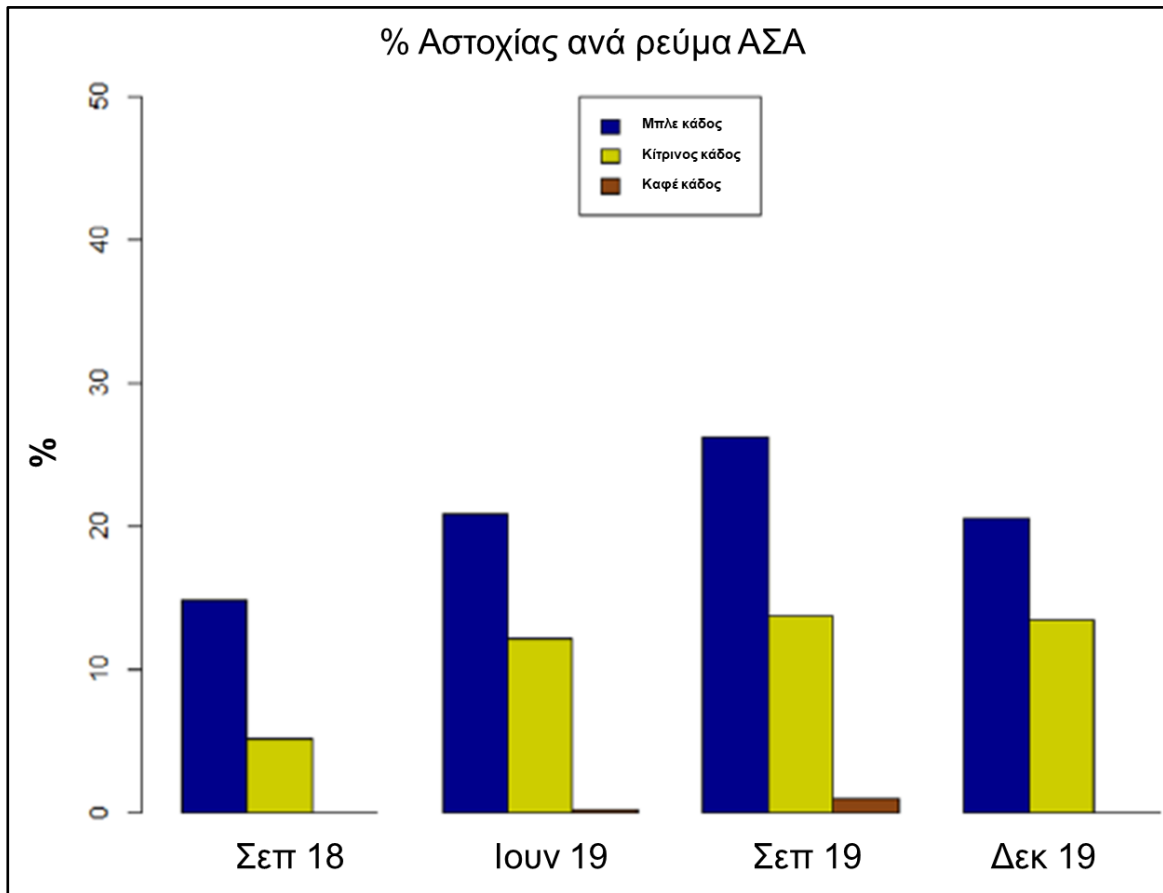
**Διάγραμμα 3-2: Στατιστική ανάλυση γεωγραφικής διακύμανσης σύστασης ΑΣΑ, Δήμος Χαλανδρίου**

Φαίνεται ότι οι καταναλωτικές συνήθειες του συνόλου των κατοίκων του Δήμου είναι παρεμφερείς, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο, καθώς δεν υπάρχουν σημαντικές διαφοροποιήσεις στο βιοτικό επίπεδο μεταξύ των γειτονιών του Δήμου.

Σημαντική διαφοροποίηση κατά των τέταρτο κύκλο δειγματοληψίας αποτέλεσαν οι καιρικές συνθήκες, καθώς ο καιρός κατά τις ημέρες δειγματοληψίας ήταν βροχερός και ως εκ τούτου το κλάσμα “Χαρτί & Χαρτόνι” επηρεάστηκε σημαντικά λόγω μεγάλης αύξησης της περιεχόμενης υγρασίας, η οποία οδήγησε σε αντίστοιχη αύξηση του συνολικού βάρους του κλάσματος. Για την εξάλειψη αυτής της εξωγενούς απόκλισης, το ποσοστό του βάρους που αντιστοιχούσε στην υγρασία του δείγματος (υπολογισμένο βάσει της υγρασίας κορεσμού του υλικού) αφαιρέθηκε.

Σε σχέση με τη λήψη αποφάσεων και την κατάρτιση πολιτικών σχετικών με τη διαχείριση των ΑΣΑ, ύψιστης σημασίας αποτελεί το ζήτημα του υπολογισμού της καθαρότητας των ρευμάτων. Συγκεκριμένα, τα ΚΔΑΥ υπολογίζουν τις επιδόσεις των Δήμων σε σχέση με την ανακύκλωση βάσει των εθνικών μέσων όρων αστοχίας, οι οποίοι είναι κοντά στο 50% κ.β. Βάσει αυτού οι Δήμοι χρεώνονται για την τελική διάθεση των υπολειμμάτων των ΚΔΑΥ. Βάσει της ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε αποδεικνύεται ότι το αντίστοιχο ποσοστό για το Δήμο Χαλανδρίου δεν υπερβαίνει σε καμία περίπτωση το 25% κ.β. με τη μέση τιμή να βρίσκεται στο 19%. Βάσει της μεθόδου που χρησιμοποιείται από το ΚΔΑΥ (της χρήσης δηλαδή των εθνικών μέσων όρων) δεν

ενθαρρύνονται οι Δήμοι να ενισχύσουν τις προσπάθειές τους να βελτιώσουν τα συστήματα διαλογής στην πηγή που λειτουργούν.

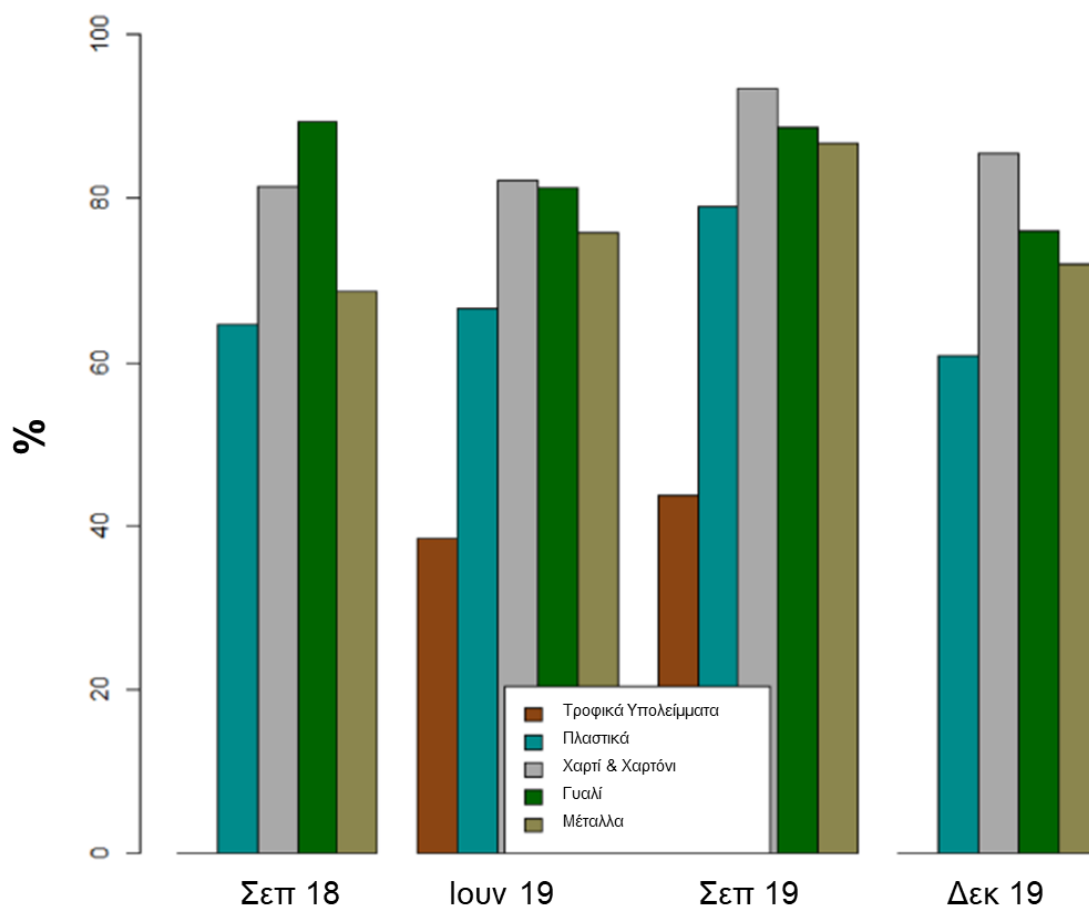


**Διάγραμμα 3-3: Ύψος αστοχίας ανά ρεύμα ΑΣΑ**

Το νέο ρεύμα διαλογής στην πηγή των Τροφικών Υπολειμμάτων φαίνεται να έχει σχεδόν μηδενικό ποσοστό αστοχίας. Αυτό πιθανόν οφείλεται στις δράσεις ευαισθητοποίησης και ενημέρωσης που έλαβαν χώρα πριν την εφαρμογή του συστήματος διαλογής, αλλά και στην εγκατάσταση κλειδωμένων κάδων (με τους πολίτες να λαμβάνουν κλειδί μόνο κατόπιν ενημέρωσης), πρακτική η οποία αποδείχτηκε ορθή και ευνόησε την επίτευξη υψηλής καθαρότητας του ρεύματος. Συγκεκριμένα, και στους δύο κύκλους δειγματοληψίας, στους οποίους υπήρχε ρεύμα Τροφικών Υπολειμμάτων, το ποσοστό αστοχίας ήταν λιγότερο του 1%.

Τέλος, η ανάλυση της σύστασης των ΑΣΑ παρείχε τη δυνατότητα υπολογισμού του βαθμού διαλογής στην πηγή ανά ρεύμα ΑΣΑ, ο οποίος επιτυγχάνεται στο Δήμο.

### Βαθμός διαλογής στην πηγή ανά ρεύμα αποβλήτων



**Διάγραμμα 3-4: Βαθμός διαλογής στην πηγή για τα διάφορα ρεύματα ΣΑ**

Σημαντικό να αναφερθεί είναι ότι μόνο κατά το δεύτερο και τρίτο κύκλο δειγματοληψίας υπήρχε ξεχωριστό ρεύμα διαλογής στην πηγή. Επιπλέον, φαίνεται ότι το κλάσμα “Χαρτί & Χαρτόνι”, το οποίο και αποτελεί το μεγαλύτερο κατά βάρος κλάσμα ανακυκλώσιμων ΑΣΑ διαχωρίζεται στην πηγή σε ποσοστό μεγαλύτερο του 80% (σε όλους του κύκλους δειγματοληψιών) με το μέσο όρο να βρίσκεται κοντά στο 85%. Επιπροσθέτως, εξίσου υψηλά ποσοστά διαλογής στην πηγή επιτυγχάνονται και για το “Γυαλί”, ενώ ελαφρώς χαμηλότερα είναι τα ποσοστά που επιτυγχάνονται για τα “Πλαστικά” και τα “Μέταλλα” με το μέσο όρο να βρίσκεται στο 70%.

Τα ποσοστά που υπολογίστηκαν για το Δήμο Χαλανδρίου είναι σημαντικά διαφορετικά από τα αντίστοιχα αναφερόμενα από τη Eurostat, τα οποία, με έτος αναφοράς το 2018, αναφέρουν ποσοστό ανακύκλωσης 18.9%, για το σύνολο όμως της Ελλάδας [155]. Η σημαντική αυτή διαφορά μπορεί να αποδοθεί σε δύο βασικούς παράγοντες:

- i. Οι δειγματοληψίες που εφαρμόστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής, επικεντρώθηκαν στα οικιακά απόβλητα, εξαιρώντας άλλους τύπους ΑΣΑ (π.χ. εμπορικά κ.λπ), τα οποία όμως λαμβάνονται υπόψη για τον υπολογισμό των εθνικών στοιχείων.
- ii. Ο Δήμος Χαλανδρίου έχει εφαρμόσει ένα συνολικό πρόγραμμα ενημέρωσης και ευαισθητοποίησης των πολιτών κατά τα τελευταία έτη, το οποίο και φαίνεται να έχει αποδώσει σημαντικά αποτελέσματα.

Όσον αφορά το κλάσμα των “Βιοαποικοδομήσιμων” επιτυγχάνεται βαθμός διαλογής στην πηγή ύψους 38% μόνο 4 μήνες μετά την εφαρμογή της χωριστής συλλογής τους, ενώ 3 μήνες αργότερα το ποσοστό αυτό αυξάνεται περαιτέρω φτάνοντας στο 44%. Η συνολική επίδοση του Δήμου Χαλανδρίου, όσον αφορά τη διαλογή στην πηγή των οικιακών ΑΣΑ, ξεπερνά κατά πολύ τις μέσες εθνικές εκτιμήσεις, αγγίζοντας το 79%.

## 4.0 Πειραματική μελέτη τεχνολογιών αξιοποίησης Τροφικών Υπολειμμάτων

### 4.1 Ξήρανση/Τεμαχισμός

#### 4.1.1 Πειραματική Διαδικασία

Η διεργασία της ξήρανσης/τεμαχισμού την οποία υφίστανται αρχικά τα οικιακά ζυμώσιμα απορρίμματα αποτελεί το στάδιο της προεπεξεργασίας των τροφικών υπολειμμάτων, ώστε να καταστούν κατάλληλο υπόστρωμα για τις διεργασίες που αποτελούν την περαιτέρω επεξεργασία του.

Για την πραγματοποίηση της διεργασίας χρησιμοποιήθηκε η συσκευή GAIA GC-300 (Εικόνα 4-1), η οποία είχε εγκατασταθεί σε ειδικά διαμορφωμένο χώρο 24m<sup>2</sup> στο Δήμο Χαλανδρίου.

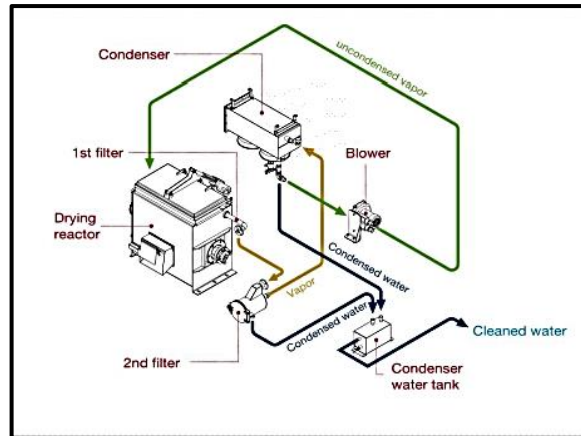


Εικόνα 4-1: Ξηραντήρας/τεμαχιστής GAIA GC-300

Η διεργασία της ξήρανσης/τεμαχισμού διαρκεί 9 ώρες κατά τις οποίες το συλλεγμένο υλικό θερμαίνεται σε θερμοκρασία 92-98 °C και τεμαχίζεται. Ακολουθούν δύο ώρες ψύξης με την μέγιστη κατανάλωση ενέργειας να φτάνει τα 23.8kW. Πολλές φορές η ακριβής διάρκεια της επεξεργασίας και άρα η ακριβής κατανάλωση της ενέργειας μπορεί να διαφοροποιείται ανάλογα -κυρίως- με την υγρασία του υλικού που έχει συλλεχθεί. Στον Πίνακα 4-1 παρουσιάζονται οι εργοστασιακές προδιαγραφές ενώ στην Εικόνα 4-2 παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας τους ξηραντήρα.

Πίνακας 4-1: Εργοστασιακές προδιαγραφές ξηραντήρα/τεμαχιστής GAIA GC-300

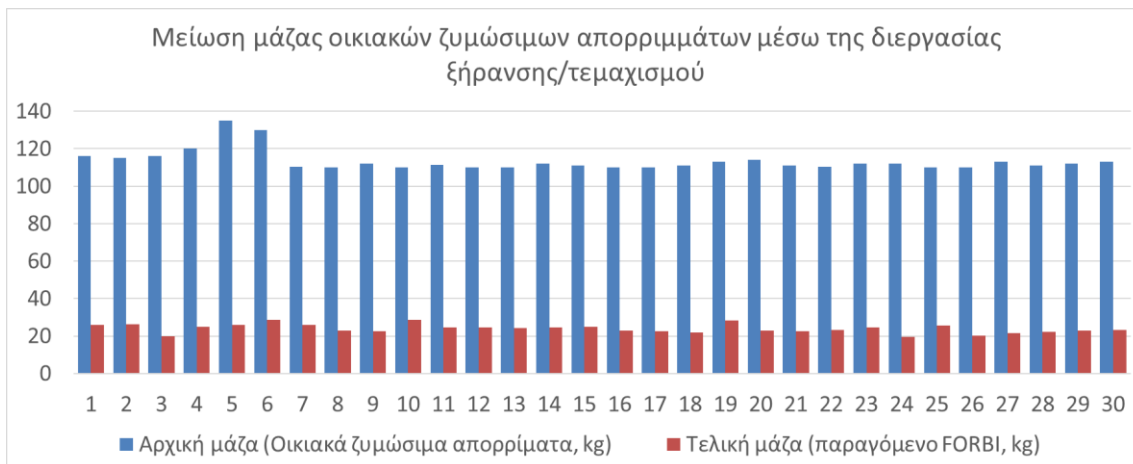
Τάση (V)	Διαστάσεις (m)	Ισχύς	RPM	Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (kWh)	Ικανότητα επεξεργασίας (kg/d)
380	1.8*1.2*1.6	22.5kW	8	240	300 σε δύο κύκλους λειτουργίας



Εικόνα 4-2: Αρχή λειτουργίας ξηραντήρα

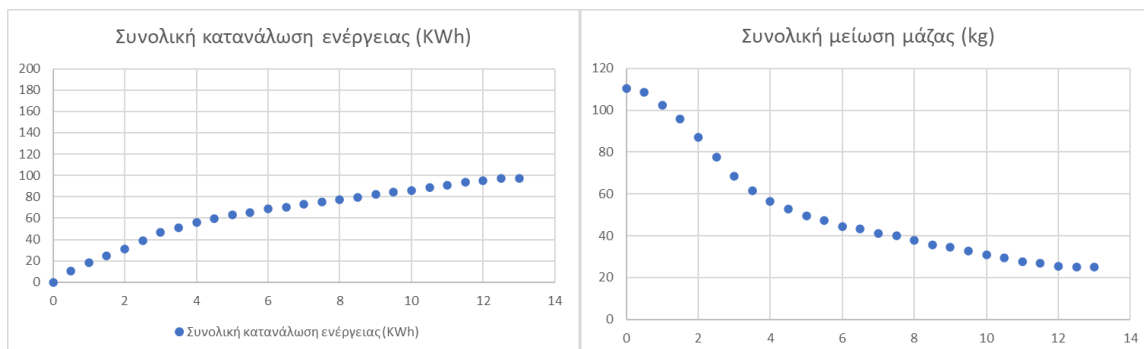
### 4.1.2 Απόδοση Συστήματος

Η διαδικασία της ξήρανσης/τεμαχισμού οδηγεί στη μείωση έως και κατά 80% της υγρασίας του υλικού καθώς και στην ομογενοποίησή του. Η μείωση του βάρους του υλικού μέσω της διεργασίας ξήρανσης/τεμαχισμού παρατίθεται ενδεικτικά για 30 ημέρες λειτουργίας του ξηραντήρα στο Διάγραμμα 4-1, ενώ η μορφή του παραγόμενου υλικού (FORBI, Food Residue Biomass) παρουσιάζεται στην Εικόνα 4-3. Συνολικά, για παραπάνω από 600 κύκλους λειτουργίας του ξηραντήρα η απόδοσή του ως προς τη μείωση της μάζας του εισερχόμενου ρεύματος υπολογίστηκε στο  $80.8 \pm 2.7\%$ .



Διάγραμμα 4-1: Απόδοση ξηραντήρα ως προς τη μείωση της μάζας του εισερχόμενου ρεύματος οικιακών ζυμώσιμων απορριμμάτων.

Η μελέτη της διεργασίας ξήρανσης/τεμαχισμού μελετήθηκε περαιτέρω ως προς την ενεργειακή της απόδοση, το ρυθμό δηλαδή κατανάλωσης ενέργειας αλλά και το ρυθμό μείωσης της συνολικής μάζας του εισερχόμενου ρεύματος. Από το Διάγραμμα 4-2 προκύπτει ότι η κατανάλωση ενέργειας ακολουθεί ένα σχετικά σταθερό ρυθμό, με εξαίρεση τις δύο πρώτες ώρες, όπου και είναι ελαφρώς αυξημένος. Από την άλλη, ο ρυθμός μείωσης της μάζας είναι σημαντικά μεγαλύτερος κατά τις 4 πρώτες ώρες της διεργασίας και στη συνέχεια τείνει σταδιακά προς το μηδενισμό. Μάλιστα, κατά τις 5 πρώτες ώρες της διεργασίας έχει επιτευχθεί το 72% σχεδόν της συνολικής μείωσης της μάζας που επιτυγχάνεται.



**Διάγραμμα 4-2: Μείωση μάζας και κατανάλωση ενέργειας κατά τη διάρκεια ενός κύκλου ξήρανσης/τεμαχισμού τροφικών υπολειμμάτων**

Το FORBI ως υλικό εμφανίζει μία σειρά πλεονεκτημάτων:

- i. Έχει σημαντική μείωση όγκου και μάζας σε σχέση με το αρχικό ρεύμα αποβλήτου, γεγονός που το καθιστά καταλληλότερο για τις περιπτώσεις που απαιτείται η αποθήκευση ή/και μεταφορά του, καθώς μειώνονται δραστικά τα αντίστοιχα κόστη.
- ii. Είναι εντελώς άοσμο, επομένως μια μονάδα παραγωγής του μπορεί να λειτουργεί και εντός αστικών κέντρων χωρίς να προκαλεί προβλήματα στους περιοίκους.
- iii. Είναι ομοιογενές και άρα καταλληλότερο για κάθε μορφή φυσικής, χημικής ή βιολογικής επεξεργασίας αξιοποίησής του.
- iv. Διατηρείται αναλλοίωτο για μεγάλες περιόδους, χωρίς ιδιαίτερες ανάγκες στην αποθήκευσή του.



**Εικόνα 4-3: FORBI, το ομογενοποιημένο προϊόν της διεργασίας ξήρανσης/τεμαχισμού των τροφικών υπολειμμάτων**

Το FORBI μελετήθηκε ως υπόστρωμα για μία σειρά από διεργασίες αξιοποίησης με τα αποτελέσματα των πειραμάτων να παρουσιάζονται στις επόμενες ενότητες.

## 4.2 Αναερόβια Χώνευση

### 4.2.1 Αναλυτικές Μέθοδοι

Προκειμένου να χαρακτηριστούν τα ρεύματα εισόδου και εξόδου και να αξιολογηθεί η πορεία της διεργασίας σε κάθε τύπο αναερόβιας χώνευσης που εφαρμόστηκε χρησιμοποιήθηκαν αναλυτικές τεχνικές που είναι απαραίτητες για τον προσδιορισμό των παρακάτω μεγεθών.

## 4.2.2 pH

Το pH ή αλλιώς ενεργός οξύτητα αποτελεί έναν τρόπο έκφρασης της συγκέντρωσης κατιόντων υδρογόνου ή υδροξονίων ( $H_3O^+$ ) σε ένα υδατικό διάλυμα. Μαθηματικά εκφράζεται με τη χρήση του αρνητικού δεκαδικού λογαρίθμου:

$$pH = -\log [H_3O^+]$$

Για τις μετρήσεις της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε βαθμονομημένο, φορητό, ηλεκτρονικό pH-μετρο (inoLab WTW series pH-S-3D), το ηλεκτρόδιο του οποίου εμβαπτίζεται σε 10 mL δείγματος αμέσως μετά τη δειγματοληψία. Προτιμάται να γίνεται πρώτα αυτή η μέτρηση, καθώς η επαφή του δείγματος με τον ατμοσφαιρικό αέρα μπορεί να αλλοιώσει το pH.

## 4.2.3 Αλκαλικότητα

Ως αλκαλικότητα ορίζεται η ικανότητα ενός διαλύματος να εξουδετερώνει τα οξέα. Οφείλεται, κυρίως, στην παρουσία όξινων ανθρακικών ( $HCO_3^-$ ) ιόντων, ανθρακικών ( $CO_3^{2-}$ ) ιόντων, και ιόντων υδροξυλίου ( $OH^-$ ). Επιπλέον, βορικά, φωσφορικά και πυριτικά άλατα μπορούν αυξήσουν την αλκαλικότητα ενός διαλύματος.

Η μέτρηση της αλκαλικότητας γίνεται με βάση την μέθοδο που περιγράφεται στο βιβλίο Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater[156].

Σε ποτήρι ζέσεως τοποθετούνται 10 mL δείγματος υπό σταθερή ανάδευση και προστίθεται, στάγδην, με χρήση προχοϊδας διάλυμα  $H_2SO_4$  κανονικότητας 0.1 N έως ότου το pH φτάσει το 4.5, δηλαδή μέχρι το λεγόμενο ισοδύναμο σημείο.

Η τιμή της αλκαλικότητας, σε mg  $CaCO_3/L$ , δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$TA = \left(\frac{a}{V}\right) * N * 50000$$

Όπου TA η ολική αλκαλικότητα, α ο όγκος του οξέος που καταναλώθηκε κατά την τιτλοδότηση σε mL, V ο όγκος του δείγματος σε mL και N η κανονικότητα του οξέος, που χρησιμοποιείται για την τιτλοδότηση.

## 4.2.4 Ολικά και πτητικά αιωρούμενα στερεά (TSS - VSS)

Ως ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS) ορίζονται αυτά που δε διηθούνται, ενώ ως πτητικά αιωρούμενα στερεά (VSS) ορίζεται το κλάσμα των ολικών αιωρούμενων στερεών που εξαερώνεται στους 550 °C.

Ο προσδιορισμός τους γίνεται με βάση τη μέθοδο που περιγράφεται στο Standard Methods for the examination of water and wastewater και, σύμφωνα με αυτή, ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία:

- Φίλτρα τύπου Glass Fiber Filter τοποθετούνται για 20 λεπτά στους 550 °C και ύστερα για 10 λεπτά σε ξηραντήρα.
- Στη συνέχεια τα φίλτρα ζυγίζονται σε ζυγό ακριβείας (βάρους A).
- Ακολουθεί διήθηση υπό κενό 10 mL δείγματος.
- Το στερεό υπόλειμμα παραμένει στους 105 °C για 24 ώρες.
- Το ξηρό στερεό υπόλειμμα ζυγίζεται (βάρους B) και τα TSS υπολογίζονται ως εξής:

$$\frac{B - A}{0.01} \text{ g/l}$$

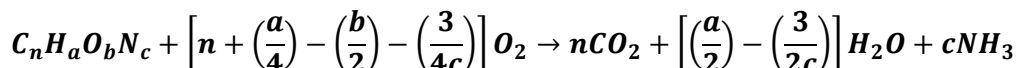


- Το φίλτρο εισάγεται στους 550 °C για 20 λεπτά και στη συνέχεια σε ξηραντήρα για 10 λεπτά.
- Ζυγίζεται (βάρος Γ) και υπολογίζονται τα VSS:

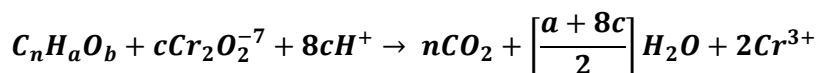
$$\frac{B - \Gamma}{0.01} \text{ g/L}$$

#### 4.2.5 Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (COD)

Το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (Chemical Oxygen Demand, COD) είναι η ποσότητα του οξυγόνου που απαιτείται για την πλήρη οξείδωση του άνθρακα σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό, σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση:

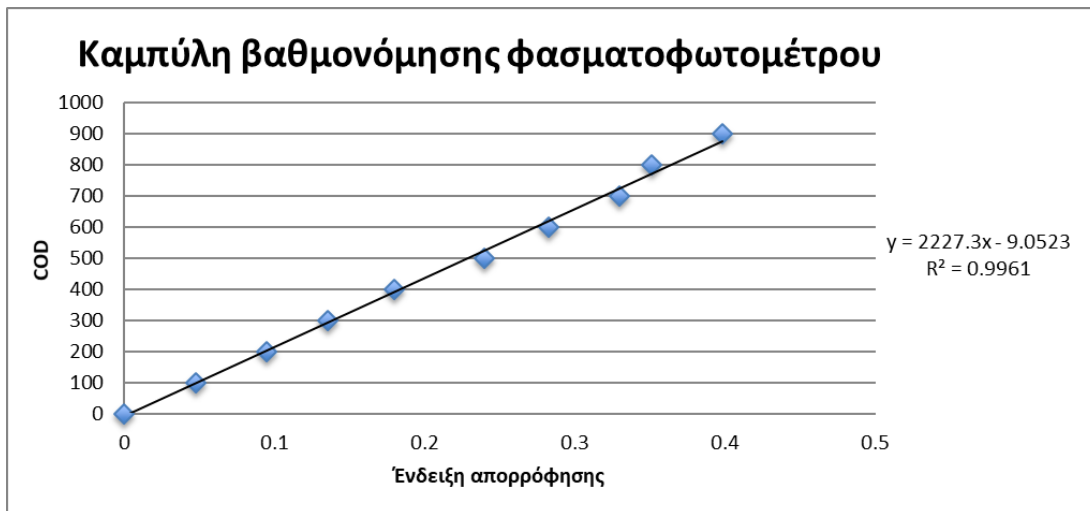


Ο προσδιορισμός του είναι σημαντικός καθώς αποτελεί ένα δείκτη για τον προσδιορισμό του οργανικού φορτίου ενός αποβλήτου. Ο προσδιορισμός του βασίζεται στο ότι το σύνολο των οργανικών ενώσεων εκτός από κάποιων εξαιρέσεων οξειδώνονται παρουσία ενός ισχυρού οξειδωτικού μέσου σε όξινο περιβάλλον. Συνήθως, το οξειδωτικό αυτό μέσο αποτελεί το διχρωμικό κάλιο ( $K_2Cr_2O_7$ ). Η οξείδωση του οργανικού φορτίου ενός διαλύματος πραγματοποιείται με περίσσεια διχρωμικού καλίου, με θέρμανση στους 141-143 °C (σε ειδικό φούρνο μάρκας HACH) και σε ισχυρά όξινη συνθήκες. Ο καταλύτης που χρησιμοποιείται για την οξείδωση των πτητικών αλειφατικών ενώσεων είναι ο θειικός άργυρος ( $AgSO_4$ ). Συγκεκριμένα, η αντίδραση οξείδωσης των οργανικών ενώσεων από τα διχρωμικά ιόντα δίνεται παρακάτω:



$$\text{όπου } c = \frac{2}{3}n + \frac{1}{6}n - \frac{1}{3}b$$

Ο προσδιορισμός τόσο του διαλυτού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (Soluble Chemical Oxygen Demand, sCOD) όσο και του ολικού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (Total Chemical Oxygen Demand, tCOD) γίνεται με φασματοφωτομετρική μέθοδο όπως περιγράφεται στο Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο γίνεται φωτομέτρηση στα 600 nm σε ηλεκτρονικό φωτόμετρο (χρησιμοποιήθηκε μοντέλο Hach DR/2010). Αξίζει να σημειωθεί ότι η επαναρροή είναι απαραίτητη λόγω της παρουσίας πτητικών οργανικών ενώσεων οι οποίες με τη θέρμανση μπορούν να διαφύγουν. Η μέθοδος βασίζεται στη φωτομέτρηση των ιόντων  $Cr^{3+}$ , τα οποία προκύπτουν από την οξείδωση των οργανικών ενώσεων από το  $K_2Cr_2O_7$ . Συνεπώς, όσο περισσότερο διχρωμικό κάλιο έχει αντιδράσει τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η απορρόφηση κατά τη φωτομέτρηση. Για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης COD μέσω της απορρόφησης ιόντων  $Cr^{3+}$  γίνεται με τη βοήθεια πρότυπης καμπύλης βαθμονόμησης. Η καμπύλη βαθμονόμησης προκύπτει από τη φωτομέτρηση πρότυπων δειγμάτων με γνωστή συγκέντρωση COD. Παρακάτω απεικονίζεται ενδεικτικά μία τέτοια πρότυπη καμπύλη που προέκυψε από βαθμονόμηση του φασματοφωτομέτρου:



**Διάγραμμα 4-3: Ενδεικτική καμπύλη βαθμονόμησης φασματοφωτομέτρου για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης COD**

Αναλυτικά, η διαδικασία που ακολουθείται για τον προσδιορισμό του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου είναι η εξής:

Για το ολικό COD:

1 mL δείγματος αραιώνεται σε αναλογία 1/40 με απιονισμένο νερό.

Για το διαλυτό COD:

1 mL διηθήματος αραιώνεται σε αναλογία 1/20 με απιονισμένο νερό.

Το kit για το COD παρασκευάζεται με τον εξής τρόπο:

Προστίθενται 2.8 mL πυκνού διαλύματος  $H_2SO_4$  και 1.2 mL διαλύματος  $K_2Cr_2O_7$ .

Στη συνέχεια, προστίθενται 2 mL του αραιωμένου διαλύματος.

Τα kits εισάγονται στο φούρνο στους 140 °C για 2 ώρες και αφού έρθουν σε θερμοκρασία δωματίου μετράται η απορρόφησή τους σε φωτόμετρο στα 600 nm.

#### 4.2.6 Πτητικά Λιπαρά Οξέα (VFA)

Τα πτητικά λιπαρά οξέα (οξικά, προπιονικά, βαλερικά, βουτυρικά κλπ.) είναι ενδιάμεσες ενώσεις που παράγονται κατά τη διάρκεια της οξεογένεσης με μια αλυσίδα άνθρακα από έξι ή λιγότερα άτομα άνθρακα. Η συγκέντρωση των VFAs αποτελεί δείκτη της ευστάθειας της διεργασίας, αφού συσσώρευση των ενώσεων αυτών μέσα στον αντιδραστήρα καταδεικνύει κινητικό περιορισμό και μπορεί να οδηγήσει σε δραστική μείωση της τιμής του pH και αστοχία της διεργασίας.

Η μέτρηση των πτητικών λιπαρών οξέων (Volatile Fatty Acids) πραγματοποιείται σε αέριο χρωματογράφο της εταιρείας Shimadzu (GC-2010). Η στήλη διαχωρισμού είναι τριχοειδής (Hewlett Packard FFAP, μήκους 30 m, εσωτερικής διαμέτρου 0.53 mm και φιλμ 1  $\mu$ m) και ο ανιχνευτής είναι φλόγας ιονισμού. Το φέρον αέριο είναι ήλιον υψηλής καθαρότητας.

Από το διήθημα του εκάστοτε δείγματος λαμβάνεται 1ml στο οποίο προστίθενται 30μl  $H_2SO_4$  20% v/v. Στη συνέχεια πραγματοποιείται ανάδευση για να διαχωριστούν τα σχηματιζόμενα θειικά ιζήματα και το μίγμα εγχύεται με μικροσύριγγα σε ειδικό φιαλίδιο (septum vials) το οποίο τοποθετείται στην υποδοχή του χρωματογράφου. Ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης των οξέων γίνεται με την χρήση πρότυπων καμπυλών οι οποίες προκύπτουν από μετρήσεις σε πρότυπα διαλύματα οξέων υψηλής καθαρότητας για διάφορες αραιώσεις.

#### 4.2.7 Προσδιορισμός σύστασης βιοαερίου

Το ποσοστό του μεθανίου και υδρογόνου αντίστοιχα που περιέχεται στο βιοαέριο μετράται με εισαγωγή δείγματος με ένεση σε αέριο χρωματογράφο Shimadzu (GC-2014). Η χρωματογραφική στήλη Carboxen 1000 είναι μήκους 5 m και εσωτερικής διαμέτρου 2,1mm. Για τον προσδιορισμό του ποσοστού μεθανίου χρησιμοποιείται θερμοκρασιακό πρόγραμμα, στο οποίο αρχικά η θερμοκρασία της στήλης είναι στους 40 °C, αυξάνεται σταδιακά με ρυθμό 10 °C ανά λεπτό μέχρι τους 185 °C και στη συνέχεια παραμένει σταθερή για 5 λεπτά. Αντίστοιχο θερμοκρασιακό πρόγραμμα εφαρμόζεται και για τον προσδιορισμό της σύστασης υδρογόνου. Ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης των αερίων γίνεται με την βοήθεια “πρότυπων καμπυλών”, που έχουν προκύψει από μετρήσεις σε πρότυπα διαλύματα αερίων με διαφορετικές συγκεντρώσεις.

#### 4.2.8 Συμβατικό σύστημα αναερόβιας χώνευσης

Για τη μελέτη του FORBI ως υποστρώματος διεργασίας αναερόβιας χώνευσης χρησιμοποιήθηκε ένας πιλοτικής κλίμακας συμβατικός αντιδραστήρας τύπου πλήρους ανάμιξης συνεχούς έργου (CSTR), όγκου 125 λίτρων. Αξίζει να αναφερθεί ότι, επειδή, ο CSTR είναι ένας ιδανικός αντιδραστήρας και στην εν προκειμένω εργασία ο αντιδραστήρας τείνει να προσεγγίσει έναν τύπου CSTR, στη συνέχεια ο τελευταίος θα αναφέρεται απλώς ως CSTR.

Πιο συγκεκριμένα, η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από τα εξής στοιχεία:

- 1 αντιδραστήρα CSTR πιλοτικής κλίμακας με διπλό εξωτερικό τοίχωμα μέσα από το οποίο κυκλοφορεί θερμαινόμενο νερό για την διατήρηση της θερμοκρασίας του αντιδραστήρα,
- 1 λουτρό (bath) το οποίο τροφοδοτεί τον αντιδραστήρα με νερό στην επιθυμητή για την επίτευξη μεσόφιλων συνθηκών θερμοκρασία (~35 °C),
- 1 παγολεκάνη με σύστημα ανάδευσης στην οποία αποθηκεύεται προσωρινά το τροφοδοτούμενο υπόστρωμα (αιώρημα FORBI) διατηρούμενο σε χαμηλή θερμοκρασία (5-6 °C), ώστε να παραμένει κατά το δυνατόν αναλλοίωτο,
- 1 περισταλτική αντλία,
- 1 κλικογράφος (διάταξη ογκομέτρησης παραγόμενου βιοαερίου),
- σωληνώσεις, ταυ, βίδες κλπ.,
- 1 συσκευή ανάδευσης του αντιδραστήρα,
- 1 δοχείο συλλογής της εκροής και διαχωρισμού του υγρού και του αερίου κλάσματός της.

Συγκεκριμένα, ο αντιδραστήρας, κατασκευασμένος από ανοξείδωτο χάλυβα, είχε συνολικό όγκο 125 L, και ενεργό 103 L. Τα υπόλοιπα 22 L αποτελούν τον όγκο της αέριας φάσης. Καθ' ύψος του αντιδραστήρα ανά ίσα διαστήματα υπήρχαν 4 βάνες από τις οποίες η μία αποτελούσε την έξοδο του αντιδραστήρα, η δεύτερη τη βάνα δειγματοληψίας, ενώ οι υπόλοιπες δύο παρέμειναν κλειστές. Στο κέντρο ήταν τοποθετημένο τάρακτρο του οποίου το μοτέρ είχε εγκατασταθεί στο καπάκι. Τέλος, στο επάνω μέρος του CSTR υπήρχαν δύο οπές οι οποίες ήταν συνδεδεμένες με σωληνώσεις με την τροφοδοσία και τον κλικογράφο αντίστοιχα.



**Εικόνα 4-4: Συμβατικό σύστημα αναερόβιας χώνευσης, τύπου CSTR**

Η παροχή της τροφοδοσίας γινόταν με περισταλτική αντλία η βαθμονόμηση της οποίας μεταβαλλόταν ανάλογα με τον επιθυμητό υδραυλικό χρόνο παραμονής. Η διεργασία της αναερόβιας χώνευσης πραγματοποιήθηκε σε μεσόφιλες συνθήκες (35 °C) τις οποίες εξασφάλιζε το λουτρό που παρείχε νερό στο εξωτερικό τοίχωμα του αντιδραστήρα.



**Εικόνα 4-5: Λουτρό παροχής θερμού νερού για τη διατήρηση μεσόφιλων συνθηκών**

Η ποσότητα του συνεχώς παραγόμενου βιοαερίου καταγραφόταν μέσω ενός συστήματος ογκομέτρησής του, τον κλικογράφο, του οποίου η λειτουργία θα περιγραφεί αναλυτικά παρακάτω.



**Εικόνα 4-6: Παγολεκάνη συντήρησης υποστρώματος τροφοδοσίας αναερόβιας χώνευσης**

Η χρήση της παγολεκάνης εξυπηρετεί αφενός τη διατήρηση της τροφοδοσίας στους 4 °C με στόχο τον περιορισμό της αποδόμησης του οργανικού φορτίου, και αφετέρου, τη συνεχή ανάδευσή της προκειμένου να αποφεύγεται η καθίζηση των αιωρούμενων στερεών που θα μπορούσε να διακόψει την ομαλή τροφοδότηση του αντιδραστήρα και να οδηγήσει τη διεργασία σε αστοχία.

#### **4.2.9 Πειραματική Διαδικασία**

Ο CSTR τοποθετήθηκε σε ειδικά διαμορφωμένο χώρο του ημιβιομηχανικού εργαστηρίου της σχολής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ. Σε κοντινή απόσταση βρίσκονταν και τα υπόλοιπα στοιχεία της πειραματικής διάταξης.

Αφού ολοκληρώθηκε η εγκατάσταση του αντιδραστήρα, πραγματοποιήθηκε έλεγχος για τυχόν διαρροές. Στο επάνω μέρος, περιμετρικά, τοποθετήθηκε σαπούνι για να διαπιστωθεί η ύπαρξη πιθανών φυσαλίδων.

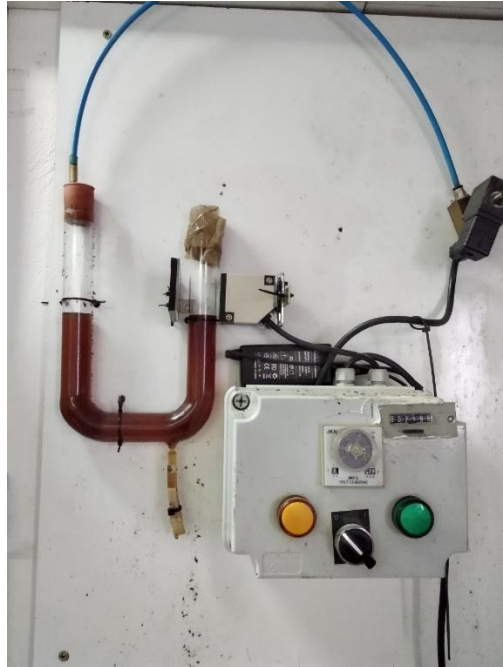
#### **Κλικογράφος**

Αποτελεί το όργανο με το οποίο μετράται το παραγόμενο βιοαέριο και περιλαμβάνει ένα σωλήνα U-Tyπε διατομής 3.5 cm και συνολικού (εξωτερικού) μήκους 44 cm, και ένα φωτοκύτταρο το οποίο είναι συνδεδεμένο με πίνακα ελέγχου στον οποίο απεικονίζεται ο αριθμός των κλικ (ηλεκτρικά σήματα). Το άκρο του σωλήνα το οποίο επικοινωνεί με τον αντιδραστήρα είναι μονωμένο, έτσι ώστε η πίεση να ταυτίζεται με αυτήν του αερίου μέσα στον αντιδραστήρα.

Η λειτουργία του κλικογράφου βασίζεται στην αποστολή ηλεκτρικού σήματος στον πίνακα ελέγχου όταν, ποσότητα ορυκτελαίου που έχει προηγουμένως βαθμονομηθεί, συμπιεστεί από αντίστοιχη ποσότητα βιοαερίου, και η πρώτη ξεπεράσει το σημείο στο οποίο βρίσκεται τοποθετημένο το φωτοκύτταρο. Ο προκαθορισμένος αυτός όγκος βιοαερίου αντιστοιχεί σε ένα ηλεκτρικό σήμα ή, αλλιώς, κλικ. Η βαθμονόμηση του κλικογράφου θα περιγραφεί αναλυτικά σε επόμενη υποενότητα.

Στο επάνω μέρος του CSTR βρίσκεται οπή η οποία επικοινωνεί με σωλήνωση με το μονωμένο άκρο του U-Tyπε σωλήνα. Το αέριο καθώς συμπιέζεται αρχίζει να εκτοπίζει το ορυκτέλαιο του U-

Τυρε σωλήνα προς την άλλη πλευρά. Όταν η στάθμη του ορυκτελαίου ξεπεράσει το ύψος που βρίσκεται το φωτοκύτταρο, ο κλικογράφος δίνει ηλεκτρικό σήμα στον πίνακα ελέγχου, όπου καταγράφεται το κλικ και, συγχρόνως, ανοίγει η βαλβίδα εκτόνωσης που είναι συνδεδεμένη με τον αγωγό του βιοαερίου ακριβώς πριν από το U-Τυρε. Έτσι, το σύστημα αποσυμπιέζεται και επιτρέπει στο αέριο να εξέλθει από το U-Τυρε. Η βαλβίδα παραμένει ανοιχτή για 2 περίπου δευτερόλεπτα και ξανακλείνει για να συνεχιστεί η καταγραφή των κλικ.



**Εικόνα 4-7: Κλικογράφος, σύστημα μέτρησης παραγόμενης ποσότητας βιοαερίου**

### ***Βαθμονόμηση Κλικογράφου***

Η βαθμονόμηση του οργάνου πραγματοποιήθηκε, σε τακτά χρονικά διαστήματα, με τον εξής τρόπο:

Στο άκρο της σωλήνωσης που συνδέεται με την οπή στο επάνω μέρος του αντιδραστήρα, προσαρτάται σύριγγα των 50 mL και εισάγεται αέρας έως ότου καταγραφεί ένα κλικ. Το ποσό του αέρα που εισήχθη αντιστοιχεί στην ποσότητα βιοαερίου που παράγεται σε ένα κλικ.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η βαθμονόμηση του κλικογράφου επαναλαμβάνονταν σε τακτά χρονικά διαστήματα κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του αντιδραστήρα, έτσι ώστε να διασφαλιστεί ότι η παραγόμενη ποσότητα του βιοαερίου είναι κάθε χρονική στιγμή όσο το δυνατόν ακριβέστερη.

### ***Στόχος πειραματικής διαδικασίας***

Στόχος της πειραματικής διαδικασίας ήταν η μελέτη της συμπεριφοράς της λειτουργίας του πιλοτικής κλίμακας CSTR υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες λειτουργίας και με χρήση αιωρήματος FORBI, ως υποστρώματος της διεργασίας. Συγκεκριμένα, εξετάστηκε η συμπεριφορά του συστήματος όταν μεταβληθεί το υδραυλικός χρόνος παραμονής, HRT.

Ακόμη, εξετάστηκε η ικανότητα του συστήματος να προσεγγίσει τον ελάχιστο, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, χρόνο παραμονής των 10 ημερών.

Με βάση αυτά, η πειραματική διαδικασία διακρίνεται σε φάσεις που αφορούν τη σταδιακή μείωση του υδραυλικού χρόνου παραμονής και οι οποίες περιγράφονται στη συνέχεια.

## **Εκκίνηση Αντιδραστήρα**

Η εκκίνηση (start-up) του CSTR πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια. Αρχικά, η ενεργός ιλύς παρέμεινε για 72 ώρες σε συνθήκες διαλείποντος έργου, προκειμένου να εγκλιματιστεί η καλλιέργεια και, στη συνέχεια, ξεκίνησε η συνεχής τροφοδότησή του με το αιώρημα FORBI.

### **Ενεργός ιλύς**

Η αναερόβια λάσπη συνελέγη από το Κέντρο Επεξεργασίας Λυμάτων Μεταμόρφωσης (ΚΕΛΜ). Συνολικά, συνελέγησαν 80 L λάσπης καταναμεμημένα σε τέσσερα δοχεία των 20 L. Το σημείο από το οποίο έγινε η συλλογή ήταν η εκροή της μονάδας επεξεργασίας προκειμένου η αναερόβια εκροή να είναι όσο το δυνατόν πιο ομοιογενής. Τα χαρακτηριστικά της ενεργού ιλύος παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-2.

<b>Δείκτης</b>	<b>pH</b>	<b>Αλκαλικότητα (mg CaCO<sub>3</sub>/L)</b>	<b>TSS (g/L)</b>	<b>VSS (g/L)</b>	<b>tCOD (g/L)</b>	<b>sCOD (g/L)</b>
<b>Τιμή</b>	7.5	3750.0	20.2	11.3	2.1	4.5

**Πίνακας 4-2: Χαρακτηρισμός αναερόβιας εκροής, η οποία χρησιμοποιήθηκε ως καλλιέργεια για την εκκίνηση του συμβατικού συστήματος αναερόβιας χώνευσης**

### **Προετοιμασία τροφοδοσίας**

Την τροφοδοσία της διεργασίας αποτελούσε το αιώρημα FORBI. Η συγκέντρωση του αιωρήματος ήταν 15 g/L και διατηρήθηκε σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Η παγολεκάνη μέσω της οποίας διατηρούταν η τροφοδοσία σταθερά στους 4 °C είχε χωρητικότητα 125 L. Εκεί, γινόταν προσθήκη νερού χρησιμοποιώντας δοχεία χωρητικότητας 10 L και, κατόπιν, της αντίστοιχης ποσότητας FORBI, ώστε να επιτυγχάνεται η ζητούμενη συγκέντρωση στερεών. Με τη βοήθεια του αναδευτήρα της παγολεκάνης η καθίζηση του αιωρήματος αποτρεπόταν σε μεγάλο βαθμό.

Η παραλαβή του FORBI γινόταν από το δήμο Χαλανδρίου. Ωστόσο, πριν την αιώρηση και τη χρήση ως υποστρώματος απαιτούνταν μία απλή διαδικασία προεπεξεργασίας, η οποία αποσκοπούσε στην προστασία του συστήματος από εμφράξεις. Για το σκοπό αυτό το FORBI κοσκινιζόταν με χρήση ειδικά διαμορφωμένου κοσκίνου με διάμετρο πόρων 5 mm. Η επεξεργασία αυτή ήταν απαραίτητη καθώς το FORBI περιείχε αντικείμενα, όπως κουκούτσια ή κόκκαλα, τα οποία μπορούσαν να φράξουν τις σωληνώσεις και να οδηγήσουν τη διεργασία σε αστοχία. Ακόμη, με αυτόν τον τρόπο επιτυγχανόταν σε μεγάλο βαθμό η ομογενοποίησή του, και κατ' επέκταση της τροφοδοσίας, με αποτέλεσμα να μην παρουσιάζονται σημαντικές διακυμάνσεις στις εργαστηριακές μετρήσεις.

### **Τροφοδότηση του αντιδραστήρα**

Η εισαγωγή της τροφοδοσίας στον αντιδραστήρα γινόταν με τη βοήθεια περισταλτικής αντλίας η οποία καθορίζει την ογκομετρική παροχή. Γνωρίζοντας την ογκομετρική παροχή και τον όγκο του αντιδραστήρα υπολογίζουμε τον χρόνο παραμονής του αποβλήτου στον CSTR ( $\tau=V/Q$ ). Συνεπώς, για τη μεταβολή του χρόνου παραμονής αρκεί να βαθμονομηθεί εκ νέου η αντλία.

Αρχικά, ο αντιδραστήρας είχε χρόνο παραμονής 50 ημέρες. Η αντλία λειτουργούσε σε δύο στάδια, το ένα όταν είναι εντός λειτουργίας (on) και το άλλο όταν είναι εκτός (off). Για τη διευκόλυνση των υπολογισμών, η περίοδος λειτουργίας της αντλίας ήταν 5 λεπτά. Στο χρόνο αυτό υπήρχε ένα διάστημα στο οποίο η αντλία τροφοδοτούσε ενώ το υπόλοιπο διάστημα παρέμενε κλειστή. Για τον υπολογισμό του διαστήματος τροφοδοσίας αρχικά υπολογίστηκαν πόσα 5λεπτα

περιλαμβάνει 1 ημέρα. Στη συνέχεια, διαιρώντας τα λίτρα που τροφοδοτούνται σε μια ημέρα με τον αριθμό που υπολογίστηκε, βρίσκεται η ποσότητα που τροφοδοτείται σε διάστημα 5 λεπτών. Γνωρίζοντας, συγχρόνως, το ποσό που τροφοδοτεί η αντλία σε συγκεκριμένο χρόνο (ογκομετρώντας με χρήση ογκομετρικού σωλήνα για διάστημα 30 δευτερολέπτων), υπολογίζονται τα δευτερόλεπτα στα οποία η αντλία είναι on-time. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνονταν κάθε φορά που μεταβαλλόταν ο χρόνος παραμονής.

### **Φάσεις πειραματικής διαδικασίας**

Μετά την εκκίνηση του αντιδραστήρα ακολούθησαν 3 μέρες στις οποίες λειτούργησε σε συνθήκες διαλείποντος έργου. Τη φάση αυτή τη θεωρούμε ως μηδενική φάση. Σκοπός της φάσης 0 ήταν ο κατάλληλος εγκλιματισμός της καλλιέργειας στις νέες συνθήκες και το νέο τροφοδοτούμενο υπόστρωμα.

Στη συνέχεια, ο χρόνος παραμονής ξεκίνησε από 50 μέρες όπου διατηρήθηκε για 4 ημέρες, έπειτα, μειώθηκε στις 30 για 8 ημέρες και, τέλος, στις 25 για 7 ημέρες. Το παραπάνω στάδιο έγινε προκειμένου να φτάσει ομαλά, αποτρέποντας έτσι την πιθανότητα αστοχίας της διεργασίας, ο χρόνος παραμονής στις 20 μέρες, όπου ξεκινάει και η πρώτη ουσιαστική φάση της διεργασίας. Με αυτό το χρόνο παραμονής ο CSTR λειτούργησε για 117 ημέρες και, ακολούθως, ο χρόνος παραμονής μειώθηκε στις 15 όπου και παρέμεινε για 51 μέρες. Σε τελική φάση, έγινε απόπειρα να προσεγγιστεί ο ελάχιστος, θεωρητικά, χρόνος παραμονής που αντιστοιχεί σε 10 μέρες. Το τελικό αυτό στάδιο διήρκεσε 13 μέρες, μετά το πέρας των οποίων η πειραματική διαδικασία έλαβε τέλος. Συνοπτικά, οι φάσεις της διεργασίας και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά κάθε φάσης φαίνονται στον :

**Πίνακας 4-3: Κατανομή και χαρακτηριστικά πειραματικών φάσεων της συμβατικής διεργασίας αναερόβιας χώνευσης αιωρήματος FORBI**

Ημέρες	Υδραυλικός Χρόνος Παραμονής (d)	Πειραματική Φάση	Συγκέντρωση στερεών (g/L)
0-2	batch	0	15
3-6	50	Ενδιάμεσο στάδιο	
7-13	30		
14-20	25		
21-137	20	1 <sup>η</sup>	
138-188	15	2 <sup>η</sup>	
189-204	10	3 <sup>η</sup>	

### **4.2.10 Απόδοση Συστήματος**

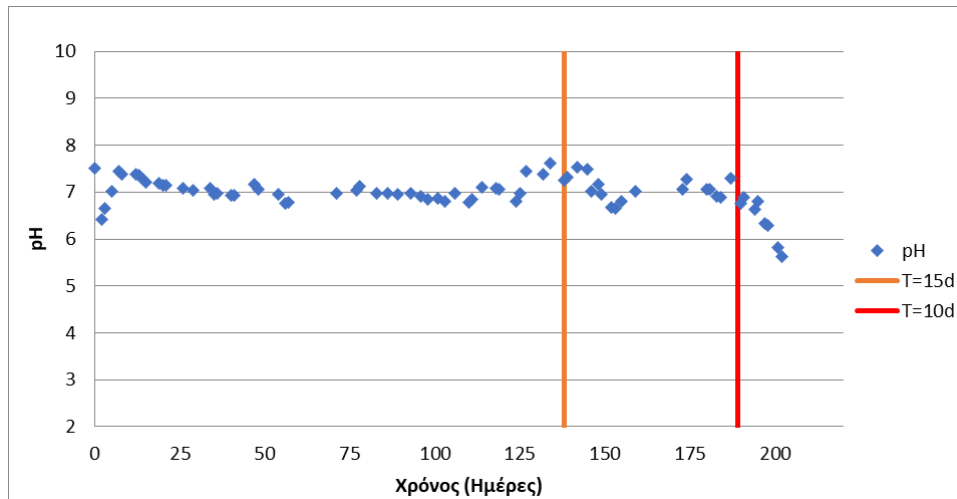
Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται και συζητούνται αναλυτικά τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας που προέκυψαν καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του αντιδραστήρα. Αυτά θα αξιολογηθούν με βάση τις μεταβολές στις λειτουργικές παραμέτρους και σύμφωνα με τα θεωρητικά αναμενόμενα αποτελέσματα.



Αξίζει να σημειωθεί ότι, τα δείγματα που λαμβάνονταν καθημερινά αντιστοιχούν, το ένα στην είσοδο (τροφοδοσία του αντιδραστήρα) και το άλλο στην έξοδο (εκροή του αντιδραστήρα). Επειδή πρόκειται για αντιδραστήρα CSTR, τα χαρακτηριστικά του ρεύματος εξόδου συμπίπτουν με αυτά στο εσωτερικό του.

## **pH**

Η σπουδαιότητα του pH για την παρακολούθηση της πορείας της αναερόβιας διεργασίας είναι καθοριστικής σημασίας, αφού τα μεθανογόνα βακτήρια είναι πολύ ευαίσθητα στις μεταβολές του. Έτσι, για την παραγωγή βιοαερίου με αναερόβια χώνευση οι βέλτιστες τιμές του pH είναι μεταξύ 6.7 και 7.4, ενώ για την ολική αλκαλικότητα από 2.500 έως 10.000 mg/L. Η διακύμανση του pH κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 4-4.



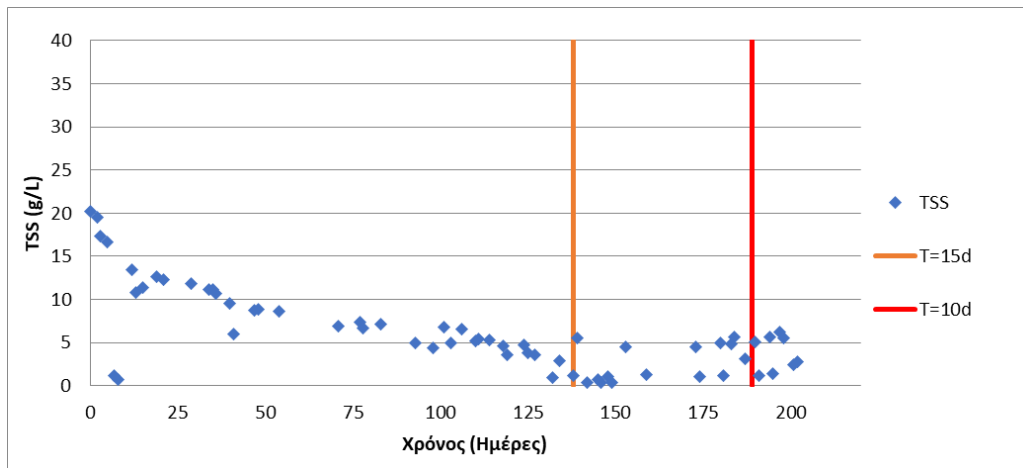
**Διάγραμμα 4-4: Συμβατικό σύστημα αναερόβιας χώνευσης, pH εκροής κατά το σύνολο της πειραματικής διαδικασίας**

Όπως παρατηρείται, οι τιμές διατηρήθηκαν στα προβλεπόμενα επίπεδα κατά τη διάρκεια των δύο πρώτων πειραματικών φάσεων με υδραυλικούς χρόνους παραμονής των 20 και 15 ημερών αντίστοιχα. Κατά την 3<sup>η</sup> φάση λειτουργίας του αντιδραστήρα, παρατηρείται απότομη πτώση, η οποία αποδίδεται στην οριακή κατάσταση λειτουργίας του. Η απότομη αυτή πτώση του pH υποδεικνύει ότι η μείωση του υδραυλικού χρόνου παραμονής από τις 15 στις 10 ημέρες οδήγησε τη διεργασία σε αστοχία. Τα αποτελέσματα των λοιπών αναλύσεων που θα παρουσιαστούν παρακάτω οδηγούν στο ίδιο ακριβώς συμπέρασμα.

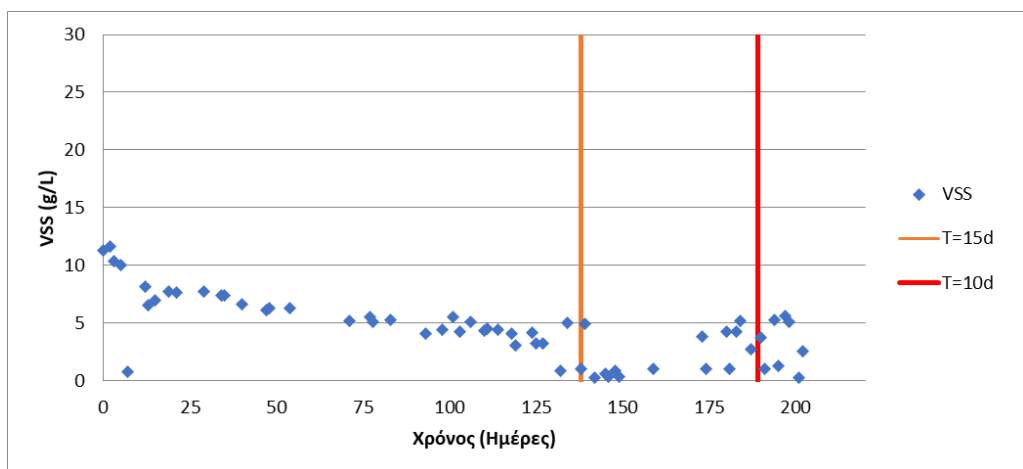
Η μέτρηση της ολικής αλκαλικότητας κινήθηκε εντός των προβλεπόμενων θεωρητικών ορίων. Ωστόσο, η μέτρησή της χρησιμοποιήθηκε απλώς ως δείκτης πρόβλεψης του pH και ως εκ τούτου δεν κρίνεται σκόπιμη η παρουσίασή της σε μορφή διαγράμματος.

## **Ολικά και Πτητικά Αιωρούμενα Στερεά (TSS, VSS)**

Μια εξίσου σημαντική παράμετρος, η οποία παρακολουθείται καθ' όλη τη διάρκεια του πειραματικού κύκλου, είναι τα ολικά και πτητικά αιωρούμενα στερεά (TSS, VSS) του αντιδραστήρα (ρεύμα εξόδου). Η πορεία τους απεικονίζεται στο Διάγραμμα 4-5 και στο Διάγραμμα 4-6.



**Διάγραμμα 4-5: Συμβατικό σύστημα αναερόβιας χώνευσης, συγκέντρωση ολικών αιωρούμενων στερεών (TSS) στην εκροή**

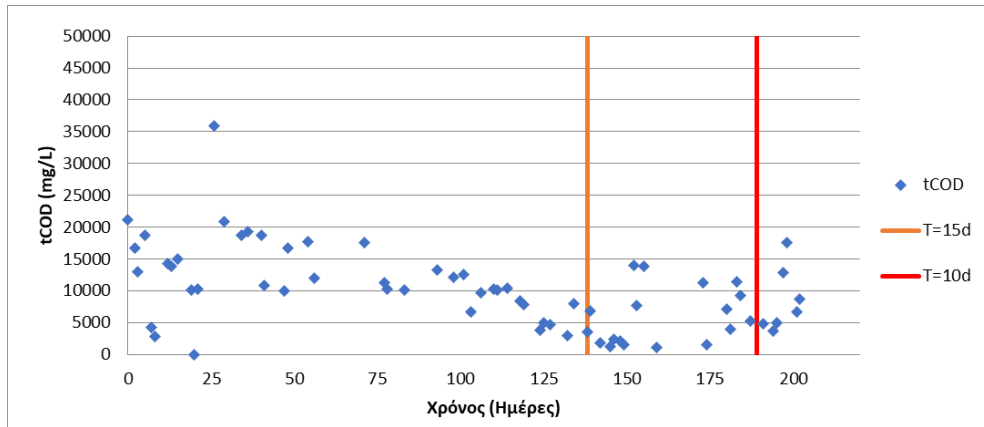


**Διάγραμμα 4-6: Συμβατικό σύστημα αναερόβιας χώνευσης, συγκέντρωση πτητικών αιωρούμενων στερεών (VSS) στην εκροή**

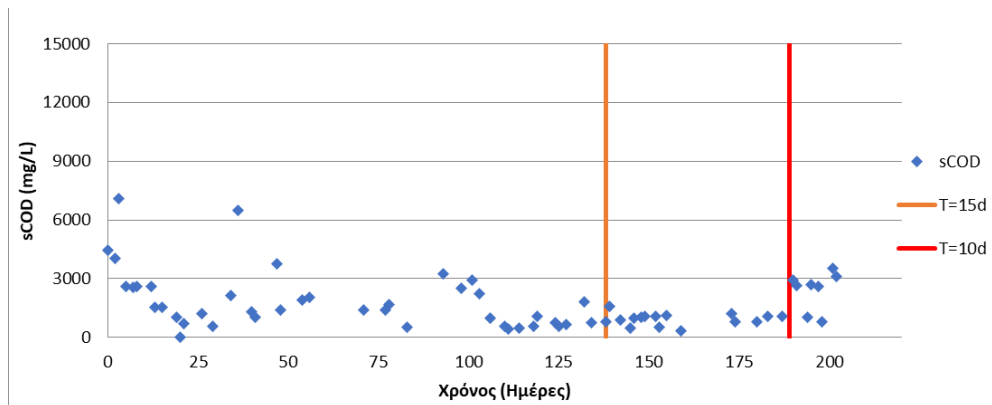
Αρχικά, μπορεί να διαπιστωθεί η ομοιομορφία των παραπάνω διαγραμμάτων, γεγονός που είναι λογικό αφού τα πτητικά αιωρούμενα στερεά αποτελούν μέρος των ολικών. Το δεύτερο που παρατηρείται είναι η καθοδική πορεία κατά την πρώτη φάση της διεργασίας που αποδίδεται στην απομάκρυνση τόσο της υπάρχουσας όσο και της νεοσυσταθείσας βιομάζας. Μετά τις 50 μέρες λειτουργίας, τα TSS και τα VSS σταθεροποιήθηκαν γύρω στα 5 g/L. Στη δεύτερη φάση με HRT 15 μέρες, τα TSS και VSS παρουσίασαν μία αιφνίδια μείωση για την οποία, πιθανώς, ευθύνεται η μεταβολή του χρόνου παραμονής η οποία οδήγησε σε αποδοτικότερη υδρόλυση του οργανικού φορτίου στον αντιδραστήρα, καθώς αυξήθηκε η βιομάζα και κατ' επέκταση η υδρολυτική της ικανότητα. Στη συνέχεια, όμως, σταθεροποιήθηκαν γύρω στα 2.5 g/L. Κατά την τρίτη φάση λειτουργίας οι τιμές των δύο δεικτών φαίνεται να μην παρουσιάζουν κάποια σταθερή πορεία, ωστόσο, παρατηρούμε ότι οι τιμές τους είναι σχετικά υψηλότερες, γύρω στα 3 g/L, σε σύγκριση με τη δεύτερη φάση λειτουργίας, γεγονός που οφείλεται στη σταδιακή συσσώρευση στερεών λόγω αστοχίας της υδρολυτικής φάσης αλλά και συνολικά της διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης.

## Ολικό και Διαλυτό Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (tCOD, sCOD)

Διάγραμμα 4-7 στα διαγράμματα (Διάγραμμα 4-7 και Διάγραμμα 4-8 παρατίθεται η διακύμανση στο ολικό (tCOD) και το διαλυτό (sCOD) χημικά απαιτούμενο οξυγόνο του ρεύματος εξόδου σε όλες τις φάσεις της πειραματικής διαδικασίας.



**Διάγραμμα 4-7:** Συμβατικό σύστημα αναερόβιας χώνευσης, συγκέντρωση ολικού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (tCOD) στην εκροή.



**Διάγραμμα 4-8:** Συμβατικό σύστημα αναερόβιας χώνευσης, συγκέντρωση διαλυτού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (sCOD) στην εκροή.

Όσον αφορά το tCOD, κατά την πρώτη φάση λειτουργίας με χρόνο παραμονής 20 μέρες, φαίνεται να ακολουθείται μια καθοδική πορεία, η οποία παρουσιάζει διακυμάνσεις. Οι διακυμάνσεις αυτές οφείλονται ως επί το πλείστον στον τυχαίο παράγοντα της δειγματοληψίας, που προκαλείται από την απομάκρυνση από συνθήκες πλήρους ανάδευσης στην περιοχή γύρω από τη βάνα δειγματοληψίας. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι τη στιγμή της δειγματοληψίας είναι πιθανό να εκρεύσει κάποιο συσσωμάτωμα οργανικού φορτίου, το οποίο επηρεάζει σημαντικά τη μέτρηση του tCOD. Ωστόσο, η καθοδική πορεία συμβαδίζει με τη θεωρητική απαίτηση που θέλει το οργανικό φορτίο να αποδομείται με το πέρασμα του χρόνου. Κατά τη 2<sup>η</sup> φάση λειτουργίας το tCOD εμφανίζει μία ελαφρά μείωση περίπου στα 7.5 g/L. Η διακύμανση που παρουσιάζουν οι μετρήσεις οφείλονται πιθανότατα, επίσης, σε σφάλματα της δειγματοληψίας. Κατά την τρίτη φάση λειτουργίας, το tCOD παρουσιάζει μία τάση απότομης αύξησης, η οποία οφείλεται στην αστοχία της διεργασίας και τη συσσώρευση μη υδρολυμένων στερεών. Όσο αφορά στο διαλυτό COD (sCOD), στην πρώτη φάση παρατηρήθηκε σε γενικές γραμμές μια μείωση του sCOD μέχρι τις 50 ημέρες, καθώς από αυτό το σημείο και μετά προσέγγισε την τιμή των 1.5 g/L, όπου και σταθεροποιήθηκε. Στη δεύτερη φάση διατηρείται σχετικά σταθερό σε χαμηλότερα επίπεδα,

περίπου στο 1 g/L. Στην τρίτη φάση φαίνεται, σε γενικές γραμμές, ότι παρουσιάζει μια αύξηση αν και αυτή γίνεται με σχετικά ασταθή τρόπο.

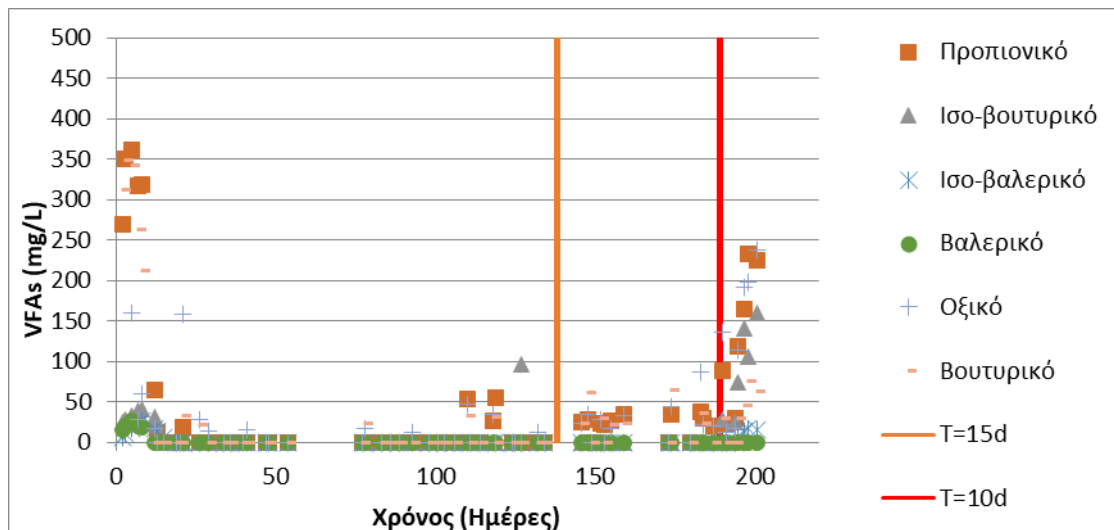
Ομοίως, μετρήσεις του tCOD και του sCOD πραγματοποιήθηκαν και για το ρεύμα εισόδου του CSTR. Σκόπιμο κρίνεται να πραγματοποιηθεί σύγκριση των δύο ρευμάτων και να εξαχθούν συμπεράσματα για το ποσοστό απομάκρυνσης του διαλυτού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (sCOD), προκειμένου να αξιολογηθεί ο βαθμός αποδόμησης - οξείδωσης του οργανικού φορτίου της τροφοδοσίας από τους μικροοργανισμούς. Συγκεκριμένα, καθ' όλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας η συγκέντρωση εισερχόμενου sCOD ήταν  $4.2 \pm 1.3$  g/L. Επομένως, στον Πίνακα 4-4 παρουσιάζεται η μέση ποσοστιαία μείωση sCOD ανά φάση λειτουργίας.

**Πίνακας 4-4: Συμβατικό σύστημα αναερόβιας χώνευσης, ποσοστιαία μείωση sCOD ανά φάση λειτουργίας**

Φάση Λειτουργίας	1 <sup>η</sup>	2 <sup>η</sup>	3 <sup>η</sup>
Μέση % μείωση sCOD	64.3	75.2	39.7

### Πτητικά Λιπαρά Οξέα (VFAs)

Καθ' όλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας πραγματοποιούνταν αναλύσεις υπολογισμού των VFAs, οι οποίες παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 4-9.

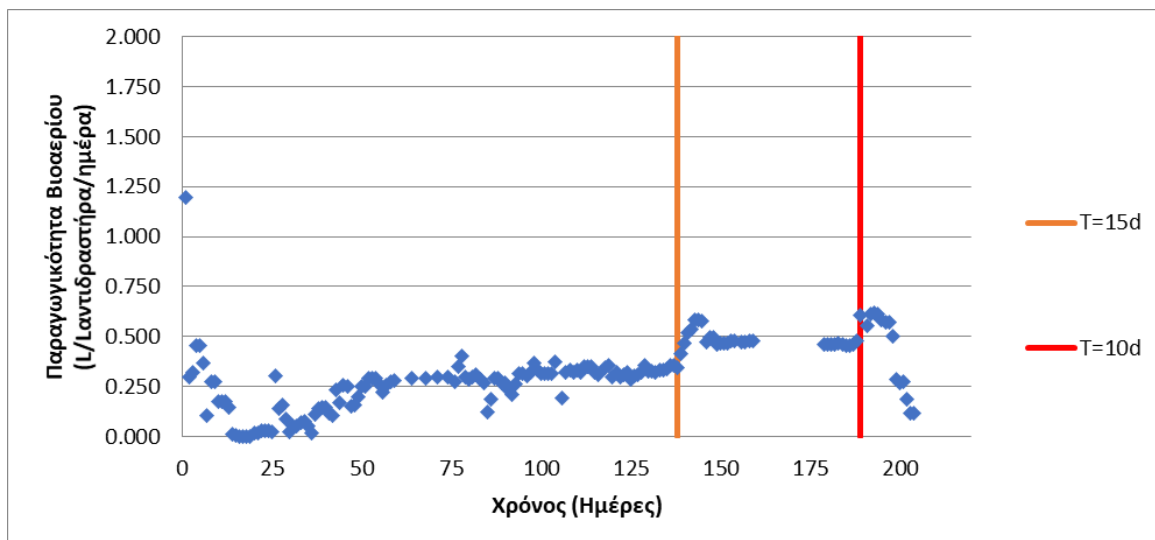


**Διάγραμμα 4-9: Πτητικά λιπαρά οξέα (VFA) στην εκροή.**

Κατά τις πρώτες μέρες λειτουργίας του CSTR, τα VFAs εμφανίζουν αυξημένες συγκεντρώσεις. Αυτό συμβαίνει, διότι, η αναερόβια λάσπη με την οποία τροφοδοτήθηκε ο αντιδραστήρας περιέχει VFAs. Με το πέρασμα του χρόνου κατά την πρώτη φάση, τα VFA μειώνονται, θεωρώντας πρακτικά την τιμή τους ως μηδενική. Στην 3<sup>η</sup> φάση του πειραματικού κύκλου, τα VFAs παρουσιάζουν σταδιακή αύξηση. Αυτό συμβαίνει διότι, μειώνοντας στις 10 μέρες τον υδραυλικό χρόνο παραμονής, η ογκομετρική παροχή του αποβλήτου είναι σαφώς μεγαλύτερη, ξεπερνώντας τα όρια αντοχής του συστήματος αναερόβιας χώνευσης.

### Παραγωγικότητα και σύσταση βιοαερίου

Παρακάτω παρατίθεται το διάγραμμα της παραγωγικότητας του βιοαερίου στις 3 φάσεις της αναερόβιας διεργασίας (Διάγραμμα 4-10).



**Διάγραμμα 4-10: Συμβατικό σύστημα αναερόβιας χώνευσης, Παραγωγικότητα βιοαερίου.**

Κατά τις πρώτες μέρες λειτουργίας του αντιδραστήρα παρατηρήθηκε ένα μέγιστο στην παραγωγικότητα βιοαερίου, όμως άμεσα ακολούθησε μείωση οφειλόμενη στις μη μόνιμες συνθήκες που επικρατούσαν κατά τις πρώτες μέρες λειτουργίας του αντιδραστήρα. Έπειτα, διαπιστώθηκε μια σχετικά σταθερή αύξηση έως περίπου την 50<sup>η</sup> ημέρα λειτουργίας όπου και η παραγωγικότητα του βιοαερίου σταθεροποιήθηκε στα 0.3 L/L<sub>αντιδραστήρα</sub>/ημέρα περίπου. Κατά τη διάρκεια της 1<sup>ης</sup> φάσης λειτουργίας, όπου η παραγωγικότητα του βιοαερίου είχε σταθεροποιηθεί (ημέρες 50-138), το μετρούμενο ποσοστό μεθανίου στο βιοαέριο ήταν κατά μέσο όρο 64.3%, χωρίς να παρουσιάζει ιδιαίτερη διακύμανση από μέρα σε μέρα. Κατά τη 2<sup>η</sup> φάση λειτουργίας, μετά από μερικές ημέρες που απαιτήθηκαν για να έρθει ο αντιδραστήρας σε μόνιμη κατάσταση, η παραγωγικότητα του βιοαερίου σταθεροποιήθηκε σε μία τιμή περίπου 0.5 L/L<sub>αντιδραστήρα</sub>/ημέρα. Κατά τη 2<sup>η</sup> φάση λειτουργίας το μετρούμενο ποσοστό μεθανίου στο βιοαέριο ήταν κατά μέσο όρο 62.8%. Στην τελική φάση, η παραγωγικότητα διαρκώς μειωνόταν, ως αποτέλεσμα της αστοχίας της διεργασίας, έως ότου μηδενιστεί.

#### **4.2.11 Ταχύρρυθμο σύστημα αναερόβιας χώνευσης (Περιοδικός Αναερόβιος Αντιδραστήρας με Ανακλαστήρες, PABR)**

#### **4.2.12 Πειραματική Διαδικασία**

Στο πλαίσιο της μελέτης εναλλακτικών τεχνολογιών αξιοποίησης των τροφικών υπολειμμάτων, αξιοποιήθηκε ο πιλοτικής κλίμακας PABR που είναι εγκατεστημένος στο ημιβιομηχανικό εργαστήριο της σχολής Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ.

##### **Πειραματική Διάταξη**

Ο αντιδραστήρας που χρησιμοποιείται είναι ένας πιλοτικής κλίμακας περιοδικός αναερόβιος αντιδραστήρας με ανακλαστήρες (PABR). Το κύριο σώμα του αντιδραστήρα αποτελείται από δύο ομόκεντρους κύλινδρους. Μέσα στον εσωτερικό κύλινδρο περιέχεται λουτρό, έτσι ώστε να διατηρείται η θερμοκρασία του αντιδραστήρα στους 35 °C στη βέλτιστη, δηλαδή, θερμοκρασία για την επίτευξη μεσόφιλων συνθηκών αναερόβιας χώνευσης. Ο εξωτερικός κύλινδρος αποτελείται από τέσσερα διαμερίσματα, καθένα από τα οποία χωρίζεται από τους κατακόρυφους ανακλαστήρες σε δύο τμήματα, το ανοδικής ροής και το καθοδικής ροής. Στο

μέσον κάθε διαμερίσματος υπάρχει μια χειροκίνητη βάννα, από όπου γίνεται και η δειγματοληψία για την εργαστηριακή ανάλυση του περιεχομένου του αντιδραστήρα.

Ο αντιδραστήρας είναι κατασκευασμένος από ανοξείδωτο χάλυβα. Ο ωφέλιμος όγκος του αντιδραστήρα είναι 77 L. Για τη μετακίνηση του ρευστού από διαμέρισμα σε διαμέρισμα αξιοποιούνται, πέρα από το σύστημα ηλεκτροβανών που θα αναλυθεί στη συνέχεια, εξωτερικές σωληνώσεις που είναι κατασκευασμένες από σκληρό πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC). Σημειώνεται πως τόσο η ροή της τροφοδοσίας μέσα στον αντιδραστήρα όσο και η εναλλαγή των διαμερισμάτων τροφοδοσίας και εκροής είναι σύμφωνες με τη φορά του ρολογιού. Στην Εικόνα 4-8 απεικονίζεται ο πιλοτικής κλίμακας PABR, που εγκαταστάθηκε στο ημιβιομηχανικό εργαστήριο της Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.



**Εικόνα 4-8: Αντιδραστήρας PABR πιλοτικής κλίμακας, Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ**

Το προς χώνευση απόβλητο αφού αιωρηθεί σε νερό, διατηρείται σε χαμηλή θερμοκρασία (> 10 °C). Το ψυγείο είναι απαραίτητο διότι διατηρώντας χαμηλή τη θερμοκρασία αποτρέπεται η ανάπτυξη κυτταρική βιομάζας στο δοχείο τροφοδοσίας και επομένως η αποδόμηση του οργανικού υλικού της τροφοδοσίας προτού αυτή εισέλθει στον αντιδραστήρα.

Για τη διατήρηση της τροφοδοσίας στην επιθυμητή θερμοκρασία των 5-6 °C, αξιοποιείται ψυχόμενο δοχείο τροφοδοσίας. Επίσης, μέσα στο ψυγείο υπάρχει αναδευτήρας για τη μηχανική ανάδευση της τροφοδοσίας ώστε να αποφεύγεται η καθίζηση των αιωρούμενων στερεών, η οποία θα εμπόδιζε την ομαλή τροφοδοσία του υποστρώματος. Σε μια τέτοια περίπτωση, ο υδραυλικός χρόνος παραμονής δεν θα είναι ούτε προκαθορισμένος ούτε υπολογίσιμος αφού

ανάλογα με την καθίζηση θα μεταβάλλεται η ποσότητα του υποστρώματος που θα εισέρχεται στον αντιδραστήρα. Επίσης, με την πάροδο του χρόνου τα στερεά πιθανώς θα έφραζαν τις σωληνώσεις, σταματώντας την τροφοδοσία του αντιδραστήρα.

Από το ψυγείο η τροφοδοσία εισάγεται στον αντιδραστήρα με τη βοήθεια περισταλτικής αντλίας. Η αντλία βαθμονομείται καθορίζοντας άμεσα την ογκομετρική παροχή του αποβλήτου. Έτσι, με δεδομένο και τον όγκο του αντιδραστήρα, καθορίζεται ο υδραυλικός χρόνος παραμονής ( $\tau=V/Q$ ). Η λειτουργία της αντλίας διακρίνεται σε δύο διαστήματα. Το διάστημα που η αντλία είναι σε λειτουργία και εισάγει τροφοδοσία στον αντιδραστήρα (on διάστημα) και το διάστημα που παραμένει κλειστή και δεν εισάγεται τροφοδοσία στον αντιδραστήρα (off διάστημα). Το διάστημα όπου η αντλία βρισκόταν σε λειτουργία παρέμενε σταθερό σε όλες τις περιόδους λειτουργίας και συγκεκριμένα στα 48 δευτερόλεπτα. Έτσι, η παροχή της αντλίας καθοριζόταν από τη διάρκεια του off-time διαστήματος που παρεμβαλλόταν ανάμεσα στα on διαστήματά της. Στην Εικόνα 4-9, εικονίζονται τόσο το ψυγείο μέσα στο οποίο διατηρούταν η τροφοδοσία όσο και η περισταλτική αντλία με την οποία εισαγόταν η τροφοδοσία από το ψυγείο στον αντιδραστήρα.



**Εικόνα 4-9: Ταχύρρυθμο σύστημα αναερόβιας χώνευσης PABR, ψυγείο αποθήκευσης τροφοδοσίας και περισταλτική αντλία**

Για την ορθή κίνηση του αποβλήτου μέσα και έξω από τον αντιδραστήρα όσο και από διαμέρισμα σε διαμέρισμα, ώστε αυτό να διαγράφει πλήρη πορεία μεταξύ των διαμερισμάτων του αντιδραστήρα, έπρεπε να είναι ανοικτές και κλειστές συγκεκριμένες βάνες σε κάθε κύκλο. Μάλιστα, σε σταθερά χρονικά διαστήματα, ανάλογα με την περίοδο εναλλαγής του διαμερίσματος τροφοδοσίας (T), εναλλάσσονταν οι βάνες που ήταν ανοικτές και κλειστές, ώστε

να αλλάζει το διαμέρισμα τροφοδοσίας και εκροής και ο κύκλος του υποστρώματος να ξεκινά και να τελειώνει από τα επόμενα, κάθε φορά, κατά σειρά διαμερίσματα. Η λειτουργία του συστήματος ηλεκτροβανών προγραμματίζεται μέσα από έναν πίνακα ελέγχου PLC (Programmable Logic Controller). Στον πίνακα PLC συνδέονται με ειδικές καλωδιώσεις, όχι μόνο οι ηλεκτροβάνες, αλλά και ένας αισθητήρας θερμοκρασίας και το όργανο μέτρησης της παραγωγής βιοαερίου. Στην Εικόνα 4-10 παρουσιάζεται η εξωτερική μορφή του πίνακα ελέγχου PLC.



**Εικόνα 4-10: Πίνακας ελέγχου (PLC) ταχύρρυθμου συστήματος αναερόβιας χώνευσης PABR**

Σε κάθε ένα από τα τέσσερα διαμερίσματα του αντιδραστήρα αντιστοιχεί, και υπάρχει εξωτερικά αυτού, μια τριάδα ηλεκτροβανών. Μία που είναι ανοικτή όταν η τροφοδοσία εισέρχεται σε αυτό, μία που είναι ανοικτή όταν η εκροή εξέρχεται από αυτό και μία που είναι ανοικτή όταν το διαμέρισμα αυτό δεν αποτελεί ούτε διαμέρισμα τροφοδοσίας ούτε διαμέρισμα εκροής και υγρό οδηγείται μέσω αυτής στο επόμενο διαμέρισμα.

Τελευταίο τμήμα της πειραματικής διάταξης αποτελεί το μετρητικό όργανο της παραγωγής βιοαερίου. Χρησιμοποιήθηκε διάταξη (κλικογράφος) όμοιος με αυτόν που περιγράφηκε στην παράγραφο 4.2.8.

### ***Αναερόβια εκροή***

Ο αντιδραστήρας πληρώθηκε αρχικά με αναερόβια λάσπη που συλλέχθηκε από το Κέντρο Επεξεργασίας Λυμάτων Μεταμόρφωσης. Η συλλογή έγινε στην εκροή της μονάδας επεξεργασίας με στόχο τη μέγιστη δυνατή ομοιογένεια. Ο εγκλιματισμός της προϋπάρχουσας λάσπης στην τροφοδότηση με προξηραμένα και τεμαχισμένα υπολείμματα τροφής (FORBI) ήταν άμεσος και με απουσία εμφάνισης λειτουργικών προβλημάτων.

### ***Τροφοδοσία***

Η τροφοδοσία που χρησιμοποιήθηκε ήταν αιώρημα FORBI (Food Residue Biomass) όπως περιγράφηκε στην παράγραφο ...



### 4.2.13 Απόδοση Συστήματος PABR

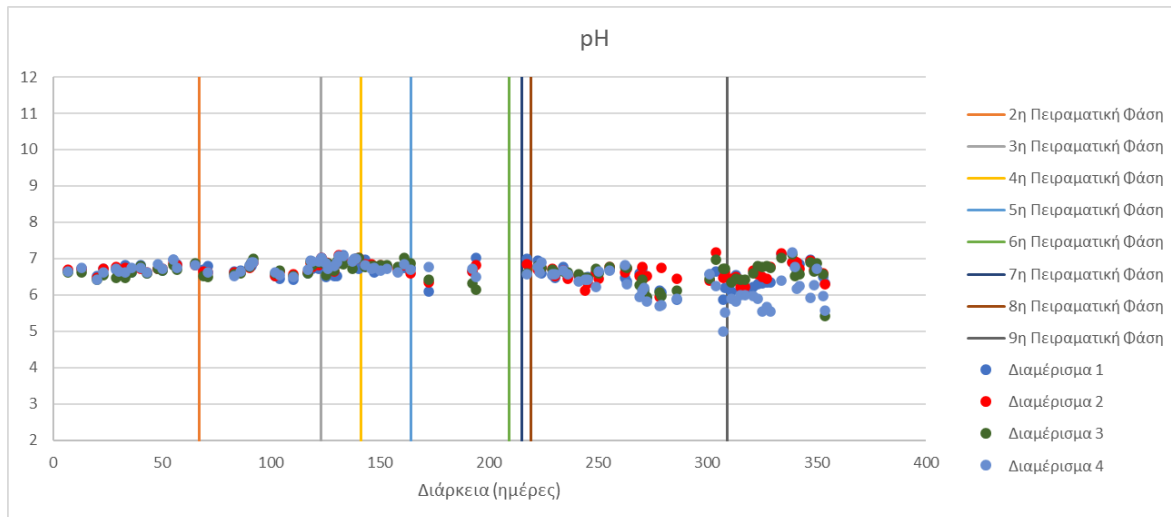
Στόχος της πειραματικής διαδικασίας ήταν να μελετηθεί η συμπεριφορά του αντιδραστήρα σε μεταβολές των λειτουργικών συνθηκών, όπως ο υδραυλικός χρόνος παραμονής και η συγκέντρωση στερεών στο αιώρημα της τροφοδοσία. Στον Πίνακα 4-5 παρουσιάζονται οι συνθήκες λειτουργίας, οι οποίες διακρίνονται σε 9 διαδοχικές φάσεις.

Πίνακας 4-5: Κατανομή και χαρακτηριστικά πειραματικών φάσεων του ταχύρρυθμου συστήματος αναερόβιας χώνευσης αιωρήματος FORBI

Πειραματική φάση	1 <sup>η</sup>	2 <sup>η</sup>	3 <sup>η</sup>	4 <sup>η</sup>	5 <sup>η</sup>	6 <sup>η</sup>	7 <sup>η</sup>	8 <sup>η</sup>	9 <sup>η</sup>
Διάρκεια (ημέρες)	67	56	18	23	45	6	4	75	15
HRT (ημέρες)	8.7	5	5	5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
T (ημέρες)	2	2	2	1	2	2	1	1	1
TS <sub>in</sub> (g/L)	10	10	20	20	10	15	15	10	15
tCOD <sub>in</sub> (g/L)	10.83	10.7	22.6	22.6	12.9	20.2	19.8	14.1	19.5
OLR (g <sub>cod</sub> /L*d)	1.24	2.14	4.53	4.53	5.16	8.08	7.92	5.64	7.80

#### pH

Στο Διάγραμμα 4-11 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων της τιμής του pH στα τέσσερα διαμερίσματα του αντιδραστήρα καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργίας αυτού ως περιοδικός αναερόβιος αντιδραστήρας με ανακλαστήρες (PABR).



Διάγραμμα 4-11: Ταχύρρυθμο σύστημα αναερόβιας χώνευσης, pH διαμερισμάτων αντιδραστήρα κατά το σύνολο της πειραματικής διαδικασίας

Αρχικά, παρατηρείται πως κατά τις πέντε πρώτες περιόδους λειτουργίας, οι τιμές pH των τεσσάρων διαμερισμάτων παρουσιάζουν επιθυμητές τιμές οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ του διαστήματος 6,5–7. Κατά την 6<sup>η</sup> περίοδο με την αύξηση της συγκέντρωσης του FORBI στην τροφοδοσία, το pH των διαμερισμάτων παρουσίασε άμεση μείωση και ειδικά στο πρώτο και το τέταρτο διαμέρισμα έπεσε κάτω από 6,3. Κατά την 7<sup>η</sup> περίοδο λειτουργίας, το pH στα

διαμερίσματα του αντιδραστήρα παρά τη μερική του αποφόρτιση με τη μείωση της περιόδου εναλλαγής, έπεσε κάτω από το 6 στα τρία από τα τέσσερα διαμερίσματα του αντιδραστήρα (εκτός του δεύτερου διαμερίσματος). Αυτό, αποτελεί επαρκή ένδειξη πως το σύστημα έφτασε στα όρια του και έπρεπε να μεταβληθούν οι συνθήκες, ώστε να μην οδηγηθεί σε αστοχία. Φυσικά, αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς αυξήθηκε απότομα η οργανική φόρτιση του αντιδραστήρα.

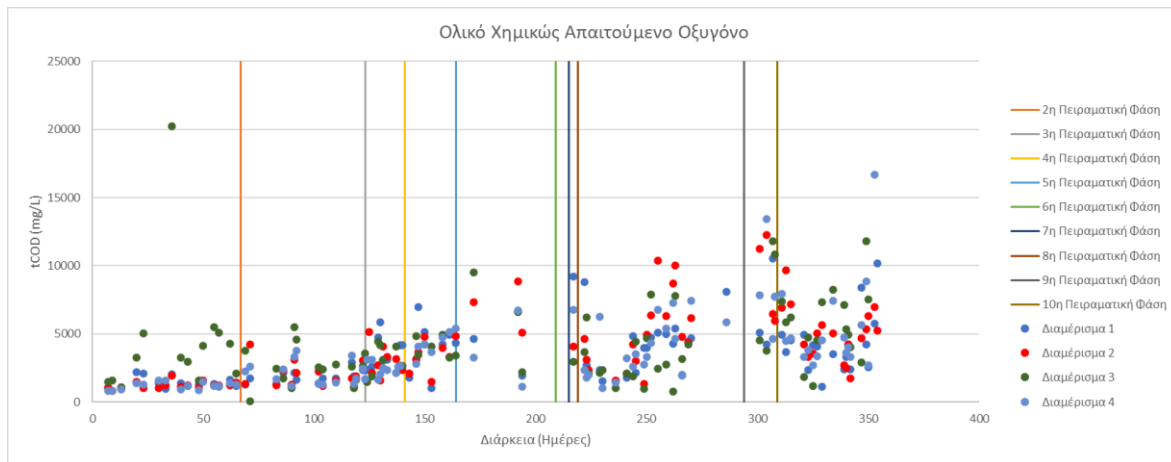
Έτσι, στη συνέχεια η συγκέντρωση της τροφοδοσίας επαναφέρθηκε στα  $10g_{FORBI}/L_{VEPOU}$  και ξεκίνησε η 8<sup>η</sup> περίοδος λειτουργίας του αντιδραστήρα. Σταδιακά το pH επανήλθε σε φυσιολογικά επίπεδα λόγω της οργανικής αποφόρτισης. Τα τρία πρώτα διαμερίσματα ανταποκρίθηκαν πιο γρήγορα και η τιμή του pH σε αυτή την περίοδο κυμάνθηκε στο διάστημα 6,1-6,4 για το πρώτο διαμέρισμα και στο διάστημα 6,4-6,7 για το δεύτερο και το τρίτο διαμέρισμα. Παρόλα αυτά, το τέταρτο διαμέρισμα παρουσίασε μεγαλύτερη αδράνεια και η τιμή του pH στο μεγαλύτερο μέρος της περιόδου αυτής κυμάνθηκε μεταξύ 5,5-5,8. Αυτό συνέβη γιατί στο διαμέρισμα αυτό παρατηρήθηκε μεγαλύτερη συσσώρευση στερεών. Η οργανική φόρτιση της περιόδου αυτής ήταν πιο χαμηλή, ακόμη και από αυτή της 1<sup>ης</sup> περιόδου και αυτό έγινε εμφανές ιδίως μετά την 220<sup>η</sup> ημέρα όπου το σύστημα είχε αποφορτιστεί πλήρως από τις έντονες συνθήκες της 2<sup>ης</sup> και της 3<sup>ης</sup> περιόδου λειτουργίας και το pH κυμάνθηκε στο διάστημα 6,8-7,1 σε όλα τα διαμερίσματα.

Τέλος, την 173<sup>η</sup> ημέρα των πειραμάτων η σύσταση της τροφοδοσίας επέστρεψε στα  $15g_{FORBI}/L_{VEPOU}$ . Όπως ήταν αναμενόμενο οι τιμές του pH παρουσίασαν εκ νέου πτωτική πορεία. Παρόλο που οι συνθήκες είναι οι ίδιες με αυτές της 6<sup>ης</sup> περιόδου, το σύστημα ήταν πιο ανθεκτικό, γιατί πριν την περίοδο αυτή το σύστημα λειτουργούσε για ένα μεγάλο χρονικό σύστημα, συνόλου 66 ημερών, με χαμηλή οργανική φόρτιση. Αντίθετα, πριν τη 6<sup>η</sup> περίοδο λειτουργίας η πυκνότητα τροφοδοσίας ήταν  $15g_{FORBI}/L_{VEPOU}$  και η περίοδος εναλλαγής 2 ημέρες, δηλαδή η οργανική φόρτιση ήταν κατά πολύ υψηλότερη.

### ***Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (Chemical Oxygen Demand, COD)***

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου. Όπως διαχωρίστηκε και κατά την περιγραφή των αναλυτικών μετρήσεων, έτσι και στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται αρχικά οι μετρήσεις του ολικού και στη συνέχεια του διαλυτού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου.

Στο Διάγραμμα 4-12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων του ολικού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου.

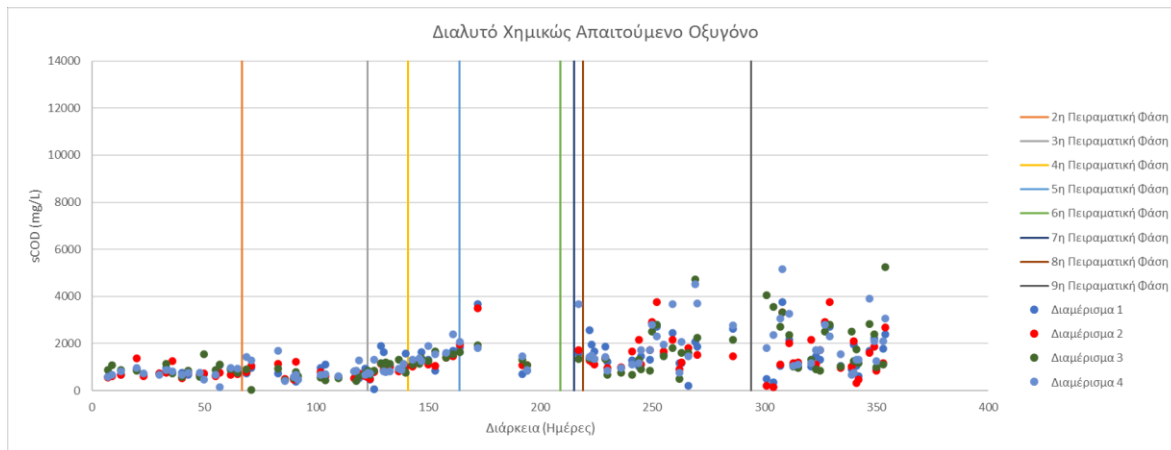


**Διάγραμμα 4-12: Ταχύρρυθμο σύστημα αναερόβιας χώνευσης, ολικό Χημικώς Απαιτούμενο Οξυγόνο διαμερισμάτων αντιδραστήρα κατά το σύνολο της πειραματικής διαδικασίας**

Γενικά, όπως έχει προαναφερθεί το tCOD δεν αποτελεί ιδιαίτερα ασφαλή μέτρηση. Η έντονη διακύμανση που παρατηρείται (και δεν είναι αντίστοιχη στο sCOD), οφείλεται στην μεγάλη ευαισθησία που παρουσιάζει το tCOD σε σχέση με τη μέθοδο δειγματοληψίας.

Παρατηρούμε πως κατά τις τέσσερις πρώτες περιόδους λειτουργίας του αντιδραστήρα το ολικό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο και για τα τέσσερα διαμερίσματα του PABR κυμάνθηκε κάτω από τα 5000 mg/L. Κατά τη 5<sup>η</sup> περίοδο λειτουργίας, το tCOD παρουσίασε αύξηση αλλά και έντονη διακύμανση από 2000 έως 10000 mg/L. Κατά την 6<sup>η</sup> και 7<sup>η</sup> περίοδο λειτουργίας, εξακολούθησε η σταδιακή αύξηση και παρατηρήθηκαν τιμές που ξεπέρασαν τα 8000-10000 mg/L. Από την 5<sup>η</sup> φάση λειτουργίας και μέχρι το τέλος της πειραματικής διαδικασίας παρατηρήθηκε έντονη έλλειψη επαναληψιμότητας στις υπολογιζόμενες τιμές του tCOD, οι οποίες πιθανότατα οφείλονται σε υδραυλική δυσλειτουργία του συστήματος και συσσώρευση στερεών στα τμήματα από όπου πραγματοποιούταν η δειγματοληψία. Αν και οι μετρούμενες τιμές του tCOD για τις συγκεκριμένες φάσεις λειτουργίας δεν μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστες παρατηρείται διαρκής αύξηση και ιδιαίτερα έντονη διακύμανση ακόμα και σε περιόδους όπου οι λειτουργικές συνθήκες παρέμεναν αμετάβλητες.

Η διακύμανση του διαλυτού Χημικώς Απαιτούμενου Οξυγόνου παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 4-13.

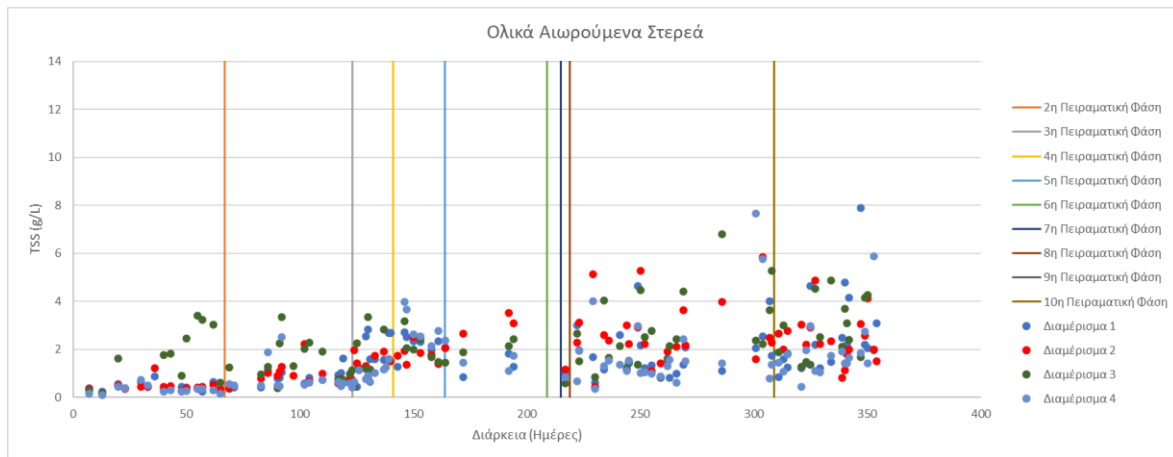


**Διάγραμμα 4-13: Ταχύρρυθμο σύστημα αναερόβιας χώνευσης, διαλυτό Χημικώς Απαιτούμενο Οξυγόνο διαμερισμάτων αντιδραστήρα κατά το σύνολο της πειραματικής διαδικασίας**

Κατά τις δύο πρώτες περιόδους λειτουργίας του αντιδραστήρα το διαλυτό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο κυμαίνεται στις τιμές 1300-1800 mg/L. Στη συνέχεια, κατά την τρίτη φάση λειτουργίας ο μέσος όρος του sCOD στο εσωτερικό του αντιδραστήρα κυμάνθηκε στο διάστημα 1500-2000 mg/L, δηλαδή με την αύξηση της οργανικής φόρτισης του αντιδραστήρα (μέσω διπλασιασμού της συγκέντρωσης στερεών στο αιώρημα της τροφοδοσίας) η συγκέντρωση sCOD παρουσίασε ελαφρά αύξηση. Κατά την 4<sup>η</sup> περίοδο λειτουργίας, όπου και επιβλήθηκε μείωση του χρόνου εναλλαγής του διαμερίσματος τροφοδοσίας από 2 ημέρες σε 1, εξακολούθησε να αυξάνεται η ποσότητα της βιομάζας μέσα στον αντιδραστήρα και έτσι οι τιμές του διαλυτού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου κυμάνθηκα στο διάστημα 1800-2200 mg/L. Κατά την 5<sup>η</sup> περίοδο λειτουργίας με την μείωση της πυκνότητας τροφοδοσίας αλλά και του HRT, το sCOD παρουσιάστηκε μείωση στο διάστημα 1200-1800 mg/L. Στη συνέχεια, με τις αλληπάλληλες μεταβολές που επιβλήθηκαν στο σύστημα ώστε να αποφορτιστεί και να αποφευχθεί η αστοχία κατά την 8<sup>η</sup> περίοδο λειτουργίας η συγκέντρωση του sCOD κυμάνθηκε σε υψηλότερα επίπεδα, μεταξύ 1500 και 2500 mg/L και διατηρήθηκε σε αυτά τα επίπεδα και κατά την 9<sup>η</sup> φάση λειτουργίας.

#### **Ολικά και Πτητικά Αιωρούμενα στερεά (TSS, VSS)**

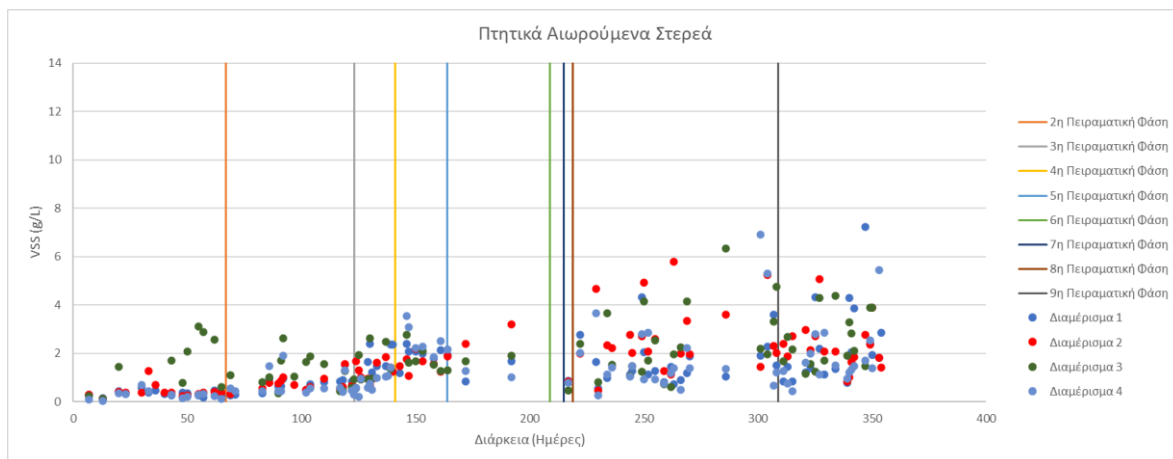
Τα αποτελέσματα των μετρήσεων των ολικών αιωρούμενων στερεών των δειγμάτων του αντιδραστήρα παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 4-14.



**Διάγραμμα 4-14: Ταχύρρυθμο σύστημα αναερόβιας χώνευσης, Ολικά Αιωρούμενα Στερεά διαμερισμάτων αντιδραστήρα κατά το σύνολο της πειραματικής διαδικασίας**

Κατά την 1<sup>η</sup> περίοδο λειτουργίας τα ολικά αιωρούμενα στερεά μέσα στον αντιδραστήρα ήταν σε συγκέντρωση 0,3-0,5 g/L, με εξαίρεση το Διαμέρισμα 3 όπου και παρατηρήθηκε σημαντική συσσώρευση στερεών για αρκετές ημέρες (30-50), η οποία και στη συνέχεια διορθώθηκε χωρίς κάποια εξωτερική παρέμβαση. Κατά τη 2<sup>η</sup> περίοδο λειτουργίας, τα ολικά αιωρούμενα στερεά παρέμειναν στα ίδια επίπεδα εμφανίζοντας μια ελαφρώς αυξητική τάση, κυμαινόμενα μεταξύ 0,5-0,7 g/L. Κατά τις 3<sup>η</sup>, 4<sup>η</sup> και 5<sup>η</sup> περιόδους λειτουργίας, οι τιμές αυξήθηκαν κυμαινόμενες μεταξύ 1,5 και 2,5 g/L. Στη συνέχεια, με την προσαρμογή του συστήματος σε ηπιότερες συνθήκες λειτουργίας, με την αραίωση της τροφοδοσίας στα 10g FORBI/Lνερού, τα ολικά αιωρούμενα στερεά άρχισαν να επιστρέφουν σε φυσιολογικά επίπεδα και στο διάστημα 1-2 g/L. Κατά τις δύο τελευταίες περιόδους λειτουργίας του αντιδραστήρα, τα TSS άρχισαν και πάλι να αυξάνονται και να κυμαίνονται στο διάστημα 2-4 g/L. Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα, τις τελευταίες μέρες ο αντιδραστήρας εμφάνιζε κυρίως στο τρίτο και το τέταρτο διαμέρισμα ακραίες τιμές. Αυτό δείχνει πως άρχισαν να συσσωρεύονται στερεά στον αντιδραστήρα ο οποίος έφτασε στα όρια της λειτουργίας του και περαιτέρω λειτουργία θα οδηγούσε πιθανότατα σε αστοχία.

Όσο αφορά τα πτητικά αιωρούμενα στερεά, αυτά παρουσιάζονται στο διάγραμμα 4-15.



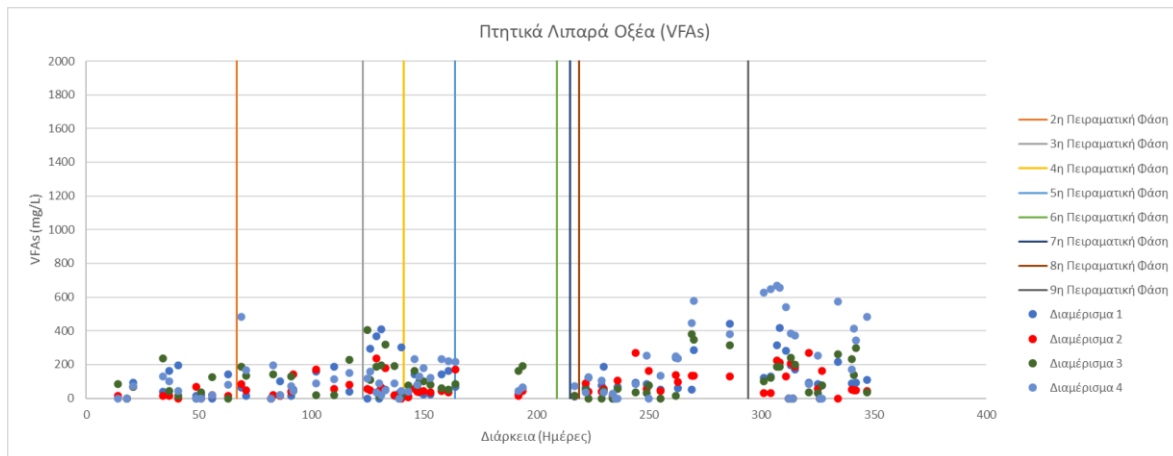
**Διάγραμμα 4-15: Ταχύρρυθμο σύστημα αναερόβιας χώνευσης, Πτητικά Αιωρούμενα Στερεά διαμερισμάτων αντιδραστήρα κατά το σύνολο της πειραματικής διαδικασίας**

Συνολικά τα Πτητικά Αιωρούμενα Στερεά ακολούθησαν όμοια τάση με τα Ολικά Αιωρούμενα Στερεά αλλά με σημαντικά μικρότερη διακύμανση, ως αποτέλεσμα της μεγαλύτερης αξιοπιστίας και ακρίβειας τους. Κατά την 1<sup>η</sup> περίοδο λειτουργίας τα πτητικά αιωρούμενα στερεά που

περιέχονταν στον αντιδραστήρα βρίσκονται στο διάστημα 0,2-0,7 g/L, με μία μικρής διάρκειας υψηλότερη διακύμανση, η οποία όπως και στα Ολικά Αιωρούμενα Στερεά παρουσιάστηκε στο Διαμέρισμα 3. Κατά τη 2<sup>η</sup> περίοδο λειτουργίας, τα VSS παρέμειναν στα ίδια επίπεδα παρουσιάζοντας ελαφρά αυξητική τάση, κυμαινόμενα μεταξύ 0,7-1,1 g/L. Κατά την 3<sup>η</sup> περίοδο λειτουργίας, τα VSS συνέχισαν να αυξάνονται φτάνοντας τιμές μεταξύ 0,8 και 1,3 g/L, ως επακόλουθο της αύξησης της οργανικής φόρτισης του αντιδραστήρα. Μέχρι και την 7<sup>η</sup> φάση λειτουργίας δεν παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση των συγκεντρώσεων των Πτητικών Αιωρούμενων Στερεών, ως αποτέλεσμα και της προσαρμογής στις λειτουργικές συνθήκες του αντιδραστήρα. Κατά τις δύο τελευταίες φάσεις λειτουργίας του αντιδραστήρα όπου και είχε αυξηθεί σημαντικά η επιβαλλόμενη οργανική φόρτιση, παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση των Πτητικών Αιωρούμενων Στερεών και διακύμανση μεταξύ 2 και 4 g/L.

### Πτητικά Λιπαρά Οξέα (VFAs)

Στο Διάγραμμα 4-16 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των Πτητικών Λιπαρών Οξέων (αθροιστικά για Οξικό, Προπιονικό, Ισοβουτυρικό, Βουτυρικό, Ισοβαλερικό και Βαλερικό Οξύ) καθ' όλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας.



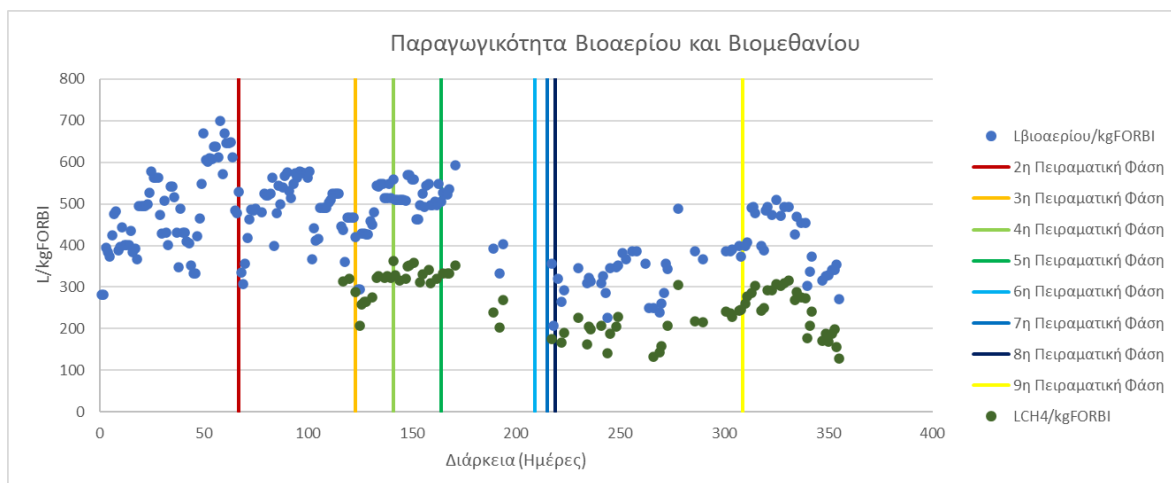
**Διάγραμμα 4-16: Ταχύρρυθμο σύστημα αναερόβιας χώνευσης, Πτητικά Λιπαρά Οξέα διαμερισμάτων αντιδραστήρα κατά το σύνολο της πειραματικής διαδικασίας**

Παρατηρείται πως σε όλες τις περιόδους λειτουργίας του αντιδραστήρα ως PABR η συγκέντρωση των Πτητικών Λιπαρών Οξέων ήταν ιδιαίτερως χαμηλή. Εξαιρέση αποτελεί η τελευταία πειραματική φάση κατά την οποία παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης των Πτητικών Λιπαρών Οξέων, ειδικά στο Διαμέρισμα 4, γεγονός που αναδεικνύει ότι είχαν επιβληθεί οριακές συνθήκες λειτουργίας.

### Παραγωγικότητα και σύσταση βιοαερίου

Στο Διάγραμμα 4-17 παρουσιάζονται η παραγωγικότητα βιοαερίου και βιομεθανίου ανά μονάδα μάζας τροφοδοτούμενου FORBI για κάθε φάση λειτουργίας του συστήματος. Κατά τις δύο πρώτες φάσεις λειτουργίας, η συγκέντρωση μεθανίου στο βιοαέριο δεν μετριοταν. Όπως είναι εμφανές, η μέγιστη παραγωγικότητα βιοαερίου επετεύχθη κατά την 3<sup>η</sup> φάση λειτουργίας με 531 λίτρα/kg<sub>FORBI</sub> και 4<sup>η</sup> με 517 λίτρα/kg<sub>FORBI</sub> με την αντίστοιχη παραγωγικότητα βιομεθανίου να είναι 333 και 325 λίτρα/kg<sub>FORBI</sub>.

Κατά την 5<sup>η</sup> φάση λειτουργίας, ο HRT μειώθηκε περαιτέρω στις 2.5 ημέρες, οδηγώντας σε σημαντική μείωση του παραγόμενου βιοαερίου και βιομεθανίου.



**Διάγραμμα 4-17: Ταχύρρυθμο σύστημα αναερόβιας χώνευσης, Παραγωγικότητα βιοαερίου και βιομεθανίου**

Στον Πίνακα 4-6 παρουσιάζονται τα λειτουργικά χαρακτηριστικά αλλά και η απόδοση λειτουργίας του ταχύρρυθμου συστήματος αναερόβιας χώνευσης κατά τις εννέα πειραματικές φάσεις. Είναι εμφανές ότι η μείωση του HRT από τις 5 στις 2.5 ημέρες επηρέασε σημαντικά την ειδική παραγωγικότητα βιοαερίου και βιομεθανίου ανά τροφοδοτούμενο FORBI. Από την άλλη, οι μέγιστες παραγωγικότητες επιτεύχθηκαν κατά τις φάσεις 1-4, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Συγκεκριμένα, με αύξηση του Ρυθμού Οργανικής Φόρτισης κατά 14% (από 4,53  $g_{COD}/L*d$  σε 5,16  $g_{COD}/L*d$ ) επιτεύχθηκε αύξηση της παραγωγικότητα βιομεθανίου κατά 37%.

**Πίνακας 4-6: Απόδοση ταχύρρυθμου συστήματος αναερόβιας χώνευσης, PABR, κατά τις 9 πειραματικές φάσεις**

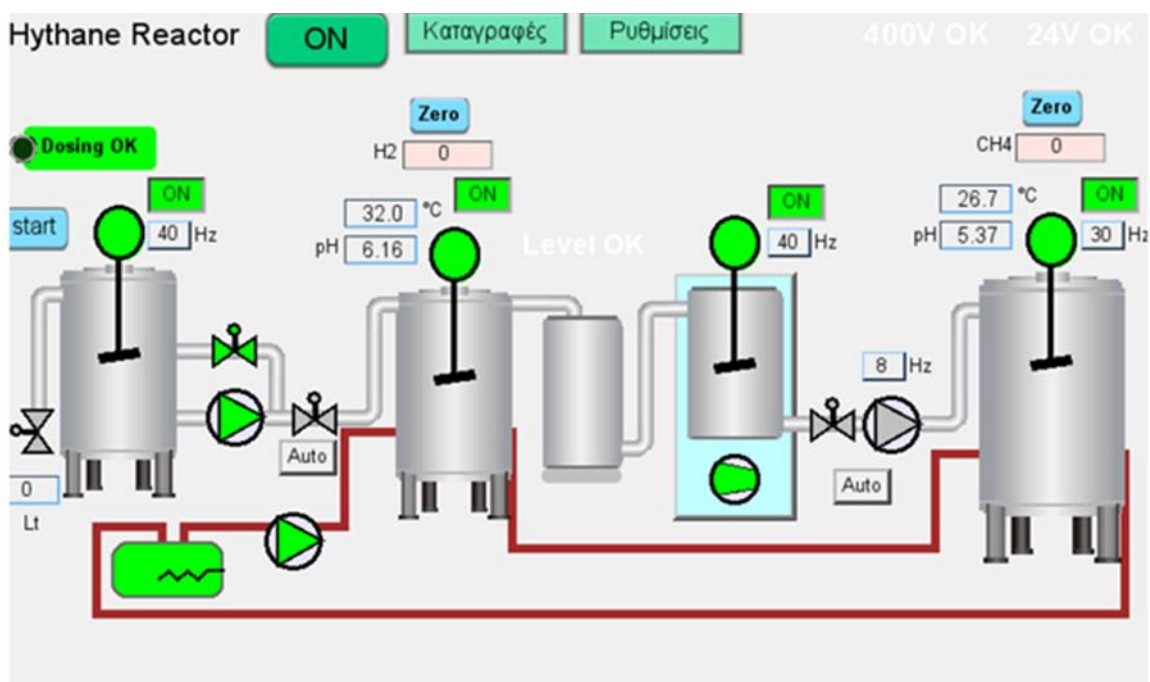
Πειραματική Φάση	1 <sup>η</sup>	2 <sup>η</sup>	3 <sup>η</sup>	4 <sup>η</sup>	5 <sup>η</sup>	6 <sup>η</sup>	7 <sup>η</sup>	8 <sup>η</sup>	9 <sup>η</sup>
Ρυθμός Οργανικής Φόρτισης ( $g_{COD}/L*d$ )	1.24	2.14	4.53	4.53	5.16	8.08	7.92	5.64	7.80
Μέσω tCOD εκροής (g/L)	1.86	2.03	3.44	5.43	3.01	3.8	3.9	3.4	4.6
Ποσοστό απομάκρυνσης tCOD (%)	86.4	80.5	85.6	74.3	76.7	81.2	80.3	75.9	76.4
Παραγωγικότητα βιοαερίου ( $L_{βιοαερίου}/L_{αντιδραστήρα}/d$ )	0.56	0.98	2.09	2.07	1.32	1.46	1.55	1.75	0.9
Παραγωγικότητα βιοαερίου ( $L/kg_{FORBI}$ )	484	500	531	517	330	243	258	438	150
%CH <sub>4</sub>	0.68	0.7	0.63	0.63	0.62	0.54	0.55	0.62	0.58
Παραγωγικότητα μεθανίου ( $L/kg_{FORBI}$ )	327	348	333	325	205	131	142	271	86
CH <sub>4</sub> yield ( $L/kg_{VS}$ )	403	429	411	401	253	162	175	335	106

#### 4.2.14 Εργαστηριακής κλίμακας διβάθμιο σύστημα αναερόβιας χώνευσης

Η μελέτη της απόδοσης της αναερόβιας χώνευσης του FORBI σε διβάθμιο σύστημα αναερόβιας χώνευσης για την παραγωγή υθανίου υλοποιήθηκε σε τρεις διαφορετικούς πειραματικούς κύκλους, κατά τους οποίους διαφοροποιούνταν τόσο τα χαρακτηριστικά της πειραματικής διάταξης όσο και οι συνθήκες της διεργασίας.

#### 4.2.15 Πειραματική διαδικασία

Στο εργαστήριο Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας εγκαταστάθηκε αυτοματοποιημένο και τηλεχειριζόμενο διβάθμιο σύστημα αναερόβιας χώνευσης. Το σύστημα αυτό αποτελείται στη σειρά από έναν αντιδραστήρα τύπου συνεχούς λειτουργίας και πλήρους ανάμιξης (CSTR) με χωρητικότητα 4 L για την παραγωγή υδρογόνου μέσω σκοτεινής ζύμωσης και από έναν αντιδραστήρα τύπου CSTR με χωρητικότητα 500 L για την παραγωγή μεθανίου μέσω αναερόβιας χώνευσης. Η πειραματική διάταξη παρουσιάζεται στην Εικόνα 4-11.



Εικόνα 4-11: Διάγραμμα ροής. Εργαστηριακής κλίμακας διβάθμιο σύστημα αναερόβιας χώνευσης

Στο δοχείο τροφοδοσίας που εντοπίζεται πρώτο στο διάγραμμα ροής από αριστερά προς τα δεξιά, εισάγεται FORBI μέσω αυτόματου ζυγιστικού συστήματος καθώς και νερό για τη δημιουργία του αιωρήματος τροφοδοσίας του συστήματος. Οι ποσότητες νερού και FORBI είναι προκαθορισμένες μέσω του συστήματος ελέγχου PLC, ώστε να επιτυγχάνεται η δημιουργία μίγματος τροφοδοσίας συγκεκριμένης συγκέντρωσης στερεών 15 g/L. Στη συνέχεια μέσω βαθμονομημένης περισταλτικής αντλίας το αιώρημα τροφοδοτείται στον υδρογονοπαραγωγό αντιδραστήρα. Η αντλία τροφοδοσίας βαθμονομείται κάθε φορά κατάλληλα έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ο επιθυμητός υδραυλικός χρόνος παραμονής. Όταν ο αντιδραστήρας πληρωθεί, μέρος του περιεχομένου μεταφέρεται μέσω υπερχειλίσσης σε δοχείο διαχωρισμού. Στο δοχείο διαχωρισμού διαχωρίζεται το υγρό κλάσμα από το αέριο που έχει παραχθεί. Το αέριο διοχετεύεται στον κλικογράφο και καταγράφεται με συνεχή τρόπο η παραγόμενη ποσότητα βιοαερίου. Η υγρή εκροή αντίστοιχα μεταφέρεται στο αμέσως επόμενο στη σειρά δοχείο το οποίο



αποτελεί το δοχείο τροφοδοσίας του μεθανοπαραγωγού αντιδραστήρα. Ομοίως, η τροφοδοσία του μεθανοπαραγωγού αντιδραστήρα επιτυγχάνεται μέσω περισταλτικής αντλίας. Η αντλία αυτή ρυθμίζεται έτσι ώστε στο μεθανοπαραγωγό να επιτυγχάνεται ο επιθυμητός υδραυλικός χρόνος παραμονής. Τέλος, στον μεθανοπαραγωγό αντιδραστήρα το αέριο που παράγεται διοχετεύεται σε ειδικό ροόμετρο και καταγράφεται η μέτρηση και το υγρό υπόλοιπο λαμβάνεται ως εκροή. Οι αντιδραστήρες και τα δοχεία τροφοδοσίας βρίσκονται υπό συνεχή μηχανική ανάδευση ώστε να επιτυγχάνεται πλήρης ανάμιξη.

Το σύστημα είναι συνδεδεμένο με ηλεκτρονικό πίνακα ελέγχου PLC μέσω το οποίου παρέχεται η δυνατότητα αυτοματισμού και απομακρυσμένου ελέγχου και ρύθμισης της διεργασίας. Το PLC του συστήματος εμφανίζεται στην Εικόνα 4-12, ενώ το γραφικό περιβάλλον διεπαφής του χρήστη (Graphical User Interface - GUI) παρουσιάζεται στην Εικόνα 4-11.



**Εικόνα 4-12: Πίνακας ελέγχου (PLC) πειραματικής κλίμακας διβάθμιου συστήματος συστήματος αναερόβιας χώνευσης**

Σκοπό της πειραματικής διαδικασίας αποτελεί η μελέτη της διεργασίας διβάθμιου συστήματος αναερόβιας χώνευσης προς παραγωγή υδρογόνου και μεθανίου με στόχο τη δημιουργία αερίου βιοκαυσίμου μίγματος των δύο, υθανίου.

Κατά την εκκίνηση των αντιδραστήρων ο υδρογονοπαραγωγός τροφοδοτήθηκε με αερόβια ιλύ η οποία πρώτα υπέστη βρασμό για 20 λεπτά σε θερμοκρασία 90 °C. Η συγκεκριμένη προκατεργασία ευνοεί την ανάπτυξη μικτής καλλιέργειας οξεογόνων μικροοργανισμών. Ο μεθανοπαραγωγός αντίστοιχα τροφοδοτείται με αναερόβια λάσπη σε συνθήκες διαλείποντος έργου. Η φόρτιση ρυθμίστηκε σταδιακά σε υδραυλικό χρόνο παραμονής των 20 ημερών ώστε να γίνει ομαλά ο εγκλιματισμός. Οι ιλύες προήλθαν από το Κέντρο Επεξεργασίας Λυμάτων Μεταμόρφωσης (ΚΕΛΜ).

Το FORBI το οποίο παράχθηκε στον Δήμο Χαλανδρίου κοσκινίστηκε, έτσι ώστε να τροφοδοτηθεί στο ζυγιστικό με συγκεκριμένη κοκκομετρία (< 10 mm).

Η πειραματική διαδικασία αποτελείται από τρεις διακριτές φάσεις.

Κατά την 1<sup>η</sup> φάση η οποία διήρκεσε 77 μέρες, ο υδραυλικός χρόνος παραμονής ήταν 4 ώρες στον υδρογονοπαραγωγό και 20 μέρες στον μεθανοπαραγωγό αντιδραστήρα. Το ολικό COD της τροφοδοσίας κατά μέσο όρο στον υδρογονοπαραγωγό ήταν 21,2 g/L και στον μεθανοπαραγωγό 18,6 g/L.

Αντίστοιχα και για τις υπόλοιπες φάσεις οι συνθήκες λειτουργίας συνοψίζονται στον Πίνακα 4-7.

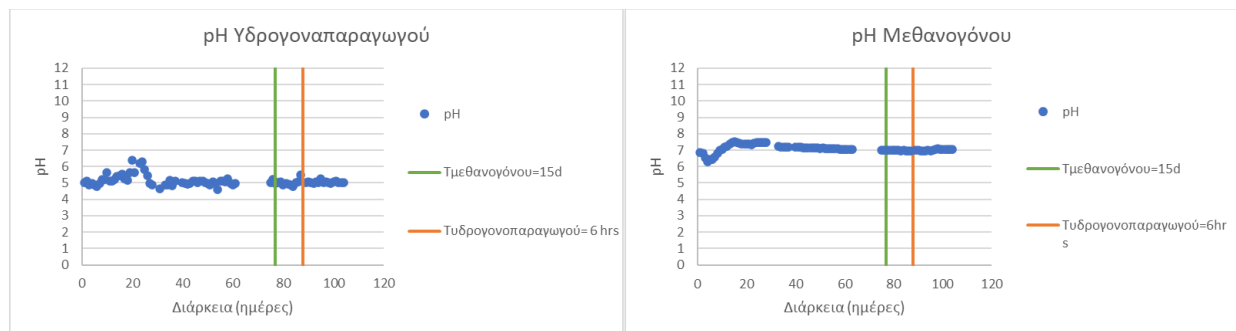
**Πίνακας 4-7: Λειτουργικές παράμετροι διεργασίας, εργαστηριακής κλίμακας διβάθμιο σύστημα αναερόβιας χώνευσης**

Πειραματική Φάση	Στάδιο Διεργασίας	Υδραυλικός Χρόνος Παραμονής	Χρόνος	Διάρκεια (Ημέρες)	Μέσο τροφοδοσίας (g/L)	tCOD
1 <sup>η</sup>	Οξεογένεση	4 ώρες		77	21.2	
	Μεθανογένεση	20 ημέρες				
2 <sup>η</sup>	Οξεογένεση	4 ώρες		11	20.5	
	Μεθανογένεση	15 ημέρες				
3 <sup>η</sup>	Οξεογένεση	6 ώρες		19	25.4	
	Μεθανογένεση	15 ημέρες				

#### 4.2.16 Απόδοση Συστήματος

##### pH

Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 4-18, το pH τόσο του υδρογονοπαραγωγού αντιδραστήρα όσο και του μεθανοπαραγωγού δεν παρουσίασαν παρά ελαφρές διακυμάνσεις σε όλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας, χωρίς, μάλιστα, την προσθήκη ρυθμιστικών διαλυμάτων. Συγκεκριμένα το pH του υδρογονοπαραγωγού στις μόνιμες συνθήκες κυμάνθηκε μεταξύ των τιμών 4.8-5.2 και του μεθανοπαραγωγού αντίστοιχα στο διάστημα 6.9-7.1. Οι μετρήσεις του pH που πραγματοποιήθηκαν με αναλυτική μέθοδο συμβάδισαν με τις αντίστοιχες που αποτυπώνονταν στον πίνακα ελέγχου PLC.

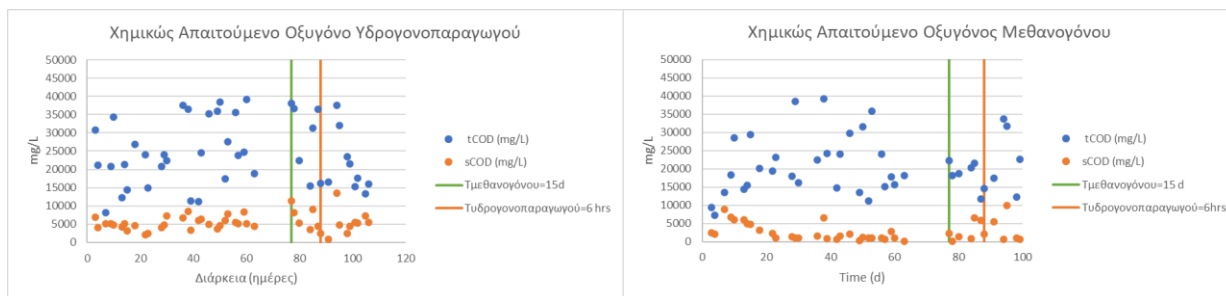


**Διάγραμμα 4-18: Εργαστηριακής κλίμακας διβάθμιο σύστημα αναερόβιας χώνευσης, pH**

##### **Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (Chemical Oxygen Demand, COD)**

Το ολικό COD και στους δύο αντιδραστήρες εμφάνισε έντονη διακύμανση κατά το σύνολο της διάρκειας των πειραματικών φάσεων (Διάγραμμα 4-19).

Το διαλυτό COD είχε χαμηλές συγκεντρώσεις ιδιαίτερα στον μεθανοπαραγωγό αντιδραστήρα, όπου και οι παρατηρούμενες τιμές είναι κάτω του 1 g/L. Αντίστοιχα, στον υδρογονοπαραγωγό αντιδραστήρα, οι συγκεντρώσεις του διαλυτού COD ήταν (όπως ήταν αναμενόμενο, λόγω της υδρόλυσης που λαμβάνει χώρα στον αντιδραστήρα) σημαντικά υψηλότερες και κυμαινόμενες μεταξύ 4.5 και 5.5. g/L.



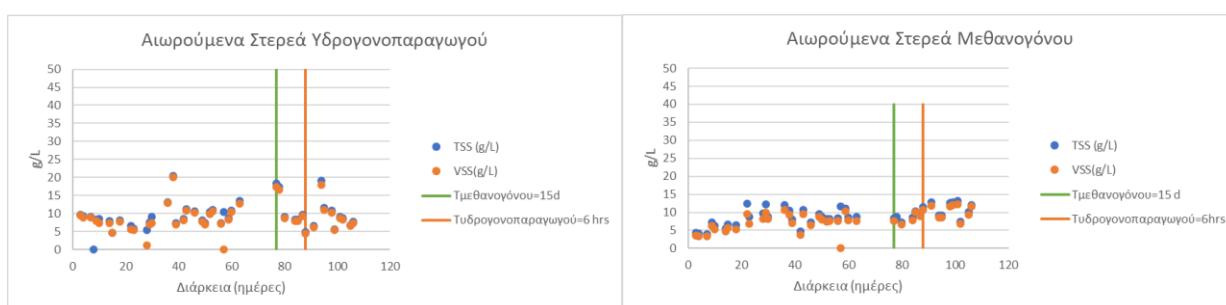
**Διάγραμμα 4-19: Εργαστηριακής κλίμακας διβάθμιο σύστημα αναερόβιας χώνευσης, tCOD & sCOD**

### **Ολικά και Πτητικά Αιωρούμενα Στερεά (TSS, VSS)**

Η διακύμανση της συγκέντρωσης των TSS ακολούθησε παρεμφερή συμπεριφορά με την συγκέντρωση των VSS τόσο στον υδρογονοπαραγωγό αντιδραστήρα όσο και στον μεθανοπαραγωγό, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 4-20. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι στο μεγαλύτερο μέρος τους τα TSS αποτελούνταν από VSS.

Στον υδρογονοπαραγωγό αντιδραστήρα κατά την 1<sup>η</sup> φάση πειραμάτων οι τιμές των TSS-VSS κυμάνθηκαν μεταξύ 5-15 g/L, στην 2<sup>η</sup> φάση παρουσιάστηκε μία μείωση της διακύμανσης περίπου στα 10 g/L και στην 3<sup>η</sup> και τελευταία περί τα 5-10 g/L.

Αντίστοιχα, στο μεθανοπαραγωγό αντιδραστήρα κατά την 1<sup>η</sup> φάση πειραμάτων οι τιμές κυμαίνθηκαν μεταξύ 5-15 g/L, στην 2<sup>η</sup> φάση γύρω στα 10 g/L και στην 3<sup>η</sup> και τελευταία παρατηρείται μια ανοδική τάση, ελαφρώς πάνω από τα 10 g/L.



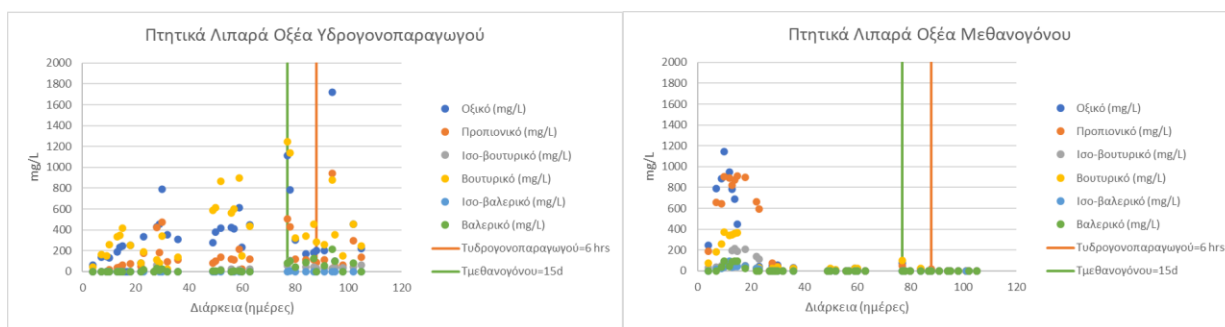
**Διάγραμμα 4-20: Εργαστηριακής κλίμακας διβάθμιο σύστημα αναερόβιας χώνευσης, TSS & VSS**

### **Πτητικά Λιπαρά Οξέα (VFAs)**

Στο Διάγραμμα 4-21 παρουσιάζονται οι μετρήσεις των Πτητικών Λιπαρών Οξέων και για τους δύο αντιδραστήρες. Όπως ήταν αναμενόμενο, οι συγκεντρώσεις των VFAs ήταν σημαντικά υψηλότερες στον υδρογονοπαραγωγό αντιδραστήρα, και μάλιστα η υψηλή συγκέντρωση οξικού οξέος (σε συγκεντρώσεις άνω των 400 mg/L) καταδεικνύει το γεγονός ότι πράγματι ο αντιδραστήρας λειτουργεί με βάση τη διεργασία της οξικογένεσης που οδηγεί στην παραγωγή υδρογόνου.

Συγκεκριμένα στην 1<sup>η</sup> φάση πειραμάτων ο μέσος όρος των VFAs κυμάνθηκε περί τα 300 mg/L, στην 2<sup>η</sup> περί τα 500 mg/L και στην 3<sup>η</sup> περί τα 400 mg/L. Παρατηρείται επίσης ότι το οξικό και το βουτυρικό οξύ εμφανίστηκαν σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις σε σχέση με τα υπόλοιπα Πτητικά Λιπαρά Οξέα.

Όσον αφορά στο μεθανοπαραγωγό αντιδραστήρα μετά από μια περίοδο προσαρμογής 20 περίπου ημερών οι συγκεντρώσεις των VFAs μηδενίστηκαν, όπως και ήταν αναμενόμενο.



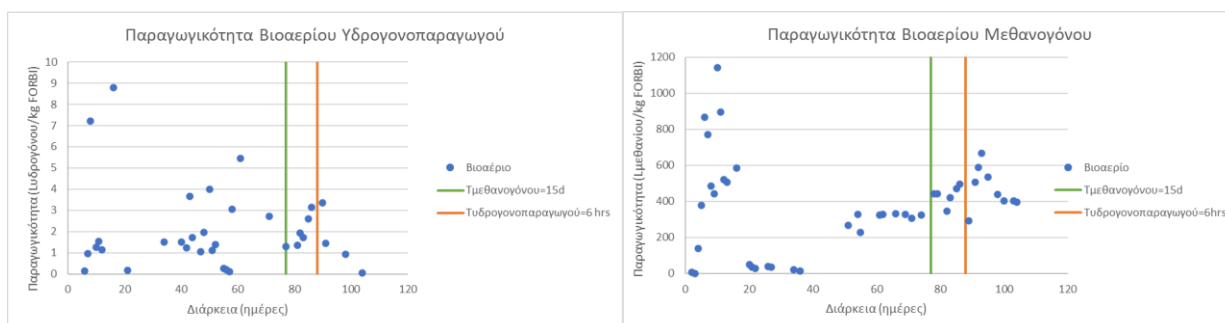
**Διάγραμμα 4-21: Εργαστηριακής κλίμακας διβάθμιο σύστημα αναερόβιας χώνευσης, VFAs**

### Παραγωγικότητα βιοαερίου

Η παραγωγικότητα βιοαερίου και για τους δύο αντιδραστήρες παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 4-22 υπό τη μορφή της ανηγμένης ανά τροφοδοτούμενη ποσότητα FORBI ποσότητας υδρογόνου και μεθανίου, αντίστοιχα για κάθε αντιδραστήρα. Για τον υπολογισμό αυτό λήφθηκαν υπόψη τόσο η παραγωγικότητα βιοαερίου, όσο και η σύσταση του εκάστοτε ρεύματος σε υδρογόνο και μεθάνιο αντίστοιχα.

Αναφορικά με τον υδρογονοπαραγωγό αντιδραστήρα, εμφανίστηκε σημαντική διακύμανση, η οποία κυρίως οφείλεται σε υδραυλικής φύσης δυσλειτουργία του συστήματος καθώς και στον ιδιαίτερα μικρό Υδραυλικό Χρόνο Παραμονής.

Από την άλλη, η παραγωγικότητα στον μεθανογόνο αντιδραστήρα, μετά από μία περίοδο εγκλιματισμού, φαίνεται να σταθεροποιήθηκε και να μεταβαλλόταν μόνο μετά την τροποποίηση των λειτουργικών παραμέτρων του αντιδραστήρα.



**Διάγραμμα 4-22: Εργαστηριακής κλίμακας διβάθμιο σύστημα αναερόβιας χώνευσης, Παραγωγικότητα βιοαερίου**

Βάσει των παραπάνω και λαμβάνοντας υπόψη την αβεβαιότητα που προκύπτει από την έντονη διακύμανση της παραγωγικότητας του υδρογονοπαραγωγού, διαμορφώνεται ο Πίνακας 4-8, στον οποία παρουσιάζεται ο υπολογισμός του δυναμικού παραγωγής υθανίου, όπως προέκυψε από την εργαστηριακής κλίμακας πειραματική διαδικασία διβάθμιας αναερόβιας χώνευσης.

**Πίνακας 4-8: Παραγωγικότητα ΗΥΤΗΑΝΕ από FORBI, εργαστηριακής κλίμακας διβάθμιο σύστημα αναερόβιας χώνευσης**

Ρεύμα Βιοαερίου (L/kgFORBI)	1 <sup>η</sup> Πειραματική Φάση	2 <sup>η</sup> Πειραματική Φάση	3 <sup>η</sup> Πειραματική Φάση
Υδρογόνο	2.48	2.07	1.55

<b>Μεθάνιο</b>	475	436.5	470
<b>HYTHANE</b>	16.5	13.8	10.3
<b>Επιπλέον ρεύμα μεθανίου</b>	451	424.7	461.3

Για την επιθυμητή σύνθεση του υθανίου, θεωρήθηκε η εξής αναλογία:

$$\frac{H_2}{CH_4} = \frac{18}{85}$$

Επομένως για την 1<sup>η</sup> πειραματική φάση θα ισχύει:

$$HYTHANE \left( \frac{L}{kg_{FORBI}} \right) = 0.15 * 16.5L H_2 + 0.85 * 16.5L CH_4$$

$$475L CH_4 - 14L \text{ (για παραγωγή HYTHANE)} = 451L$$

Το εναπομένον μεθάνιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρόσθετο ξεχωριστό ρεύμα βιοαερίου.

Ομοίως και για τις υπόλοιπες δύο πειραματικές φάσεις.

#### **4.2.17 Ημι-βιομηχανικής κλίμακας διβάθμιο σύστημα αναερόβιας χώνευσης**

#### **4.2.18 Πειραματική Διαδικασία**

Βάσει των συμπερασμάτων της λειτουργίας του εργαστηριακής κλίμακας διβάθμιου συστήματος αναερόβιας χώνευσης, ρυθμίστηκαν οι παράμετροι για τη λειτουργία του ημι-βιομηχανικής κλίμακας συστήματος, αποτελούμενου από έναν υδρογονοπαραγωγό αντιδραστήρα ενεργού όγκου 0.5 m<sup>3</sup> και ένα μεθανοπαραγωγό ενεργού όγκου 4 m<sup>3</sup>. Ο υδρογονοπαραγωγός αντιδραστήρας λειτούργησε σε θερμοφίλες συνθήκες (50 °C), ενώ ο μεθανογόνος σε μεσόφιλες (35 °C).



**Εικόνα 4-13** Ημι-βιομηχανική μονάδα διβάθμιου συστήματος αναερόβιας χώνευσης

Οι συνθήκες λειτουργίας του συστήματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-9

**Πίνακας 4-9:** Λειτουργικές παράμετροι διεργασίας, ημι-βιομηχανικής κλίμακας διβάθμιο σύστημα αναερόβιας χώνευσης

	<b>Υδρογονοπαραγωγός</b>	<b>Μεθανογόνος</b>
<b>Υδραυλικός Χρόνος Παραμονής (Ημέρες)</b>	5	27
<b>Διάρκεια (Ημέρες)</b>	170	170
<b>Συγκέντρωση Στερεών Τροφοδοσίας (g/L)</b>	38	---
<b>Μέσο tCOD τροφοδοσίας (g/L)</b>	22.5	38.3

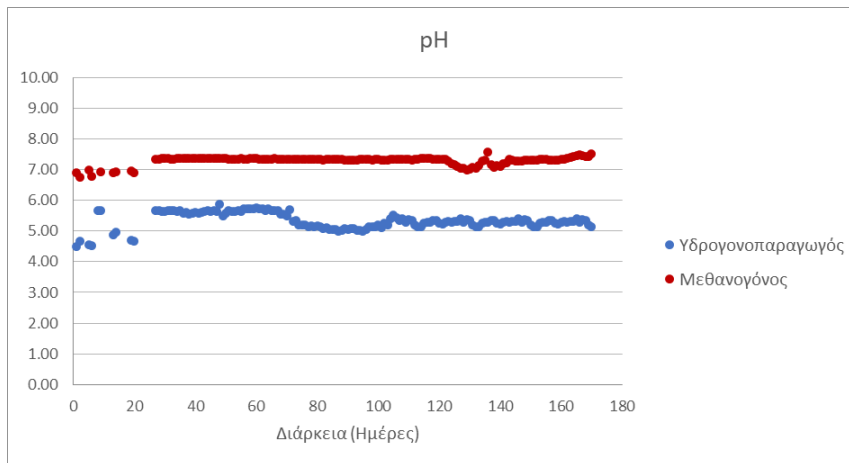
Για την εκκίνηση του συστήματος χρησιμοποιήθηκε μικροβιακή καλλιέργεια από το ήδη υπάρχον εργαστηριακής κλίμακας σύστημα. Η αρχή λειτουργίας του συστήματος ήταν όμοια με αυτή του εργαστηριακής κλίμακας, με τις απαραίτητες τροποποιήσεις που επιβάλλει η σημαντική κλιμάκωση μεγέθους.

## 4.2.19 Απόδοση Συστήματος

### pH

Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 4-23 το pH τόσο του υδρογονοπαραγωγού αντιδραστήρα όσο και του μεθανογόνου δεν παρουσίασαν σημαντικές διακυμάνσεις σε όλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας, παραμένοντας εντός των προβλεπόμενων ορίων. Συγκεκριμένα το pH του υδρογονοπαραγωγού στις μόνιμες συνθήκες κυμαίνεται σταθερά μεταξύ των τιμών 5.2-5.8 και του μεθανοπαραγωγού αντίστοιχα 7-7.3.

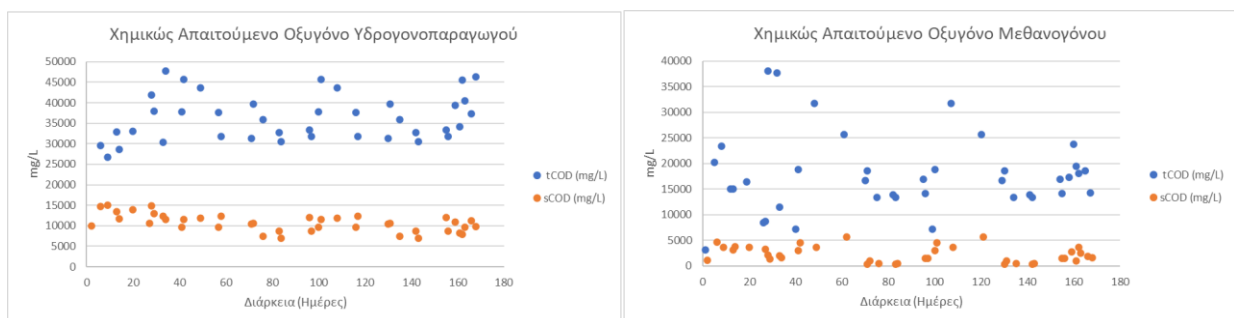
Διάγραμμα 4-23: Ημι-βιομηχανικής κλίμακας διβάθμιο σύστημα αναερόβιας χώνευσης, pH



### Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (Chemical Oxygen Demand, COD)

Το ολικό COD και στους δύο αντιδραστήρες εμφάνισε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις και με έντονη διακύμανση κατά το σύνολο της διάρκειας της πειραματικής διαδικασίας, όπως παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 4-24.

Το διαλυτό COD είχε χαμηλές συγκεντρώσεις, ιδιαίτερα στον μεθανοπαραγωγό αντιδραστήρα, όπου και οι παρατηρούμενες τιμές ήταν κάτω από 5 g/L. Αντίστοιχα, στον υδρογονοπαραγωγό αντιδραστήρα, οι συγκεντρώσεις του διαλυτού COD ήταν (όπως ήταν αναμενόμενο, λόγω της υδρόλυσης που λαμβάνει χώρα στον αντιδραστήρα) σημαντικά υψηλότερες κυμαινόμενες μεταξύ 7.5 και 12.5. g/L.



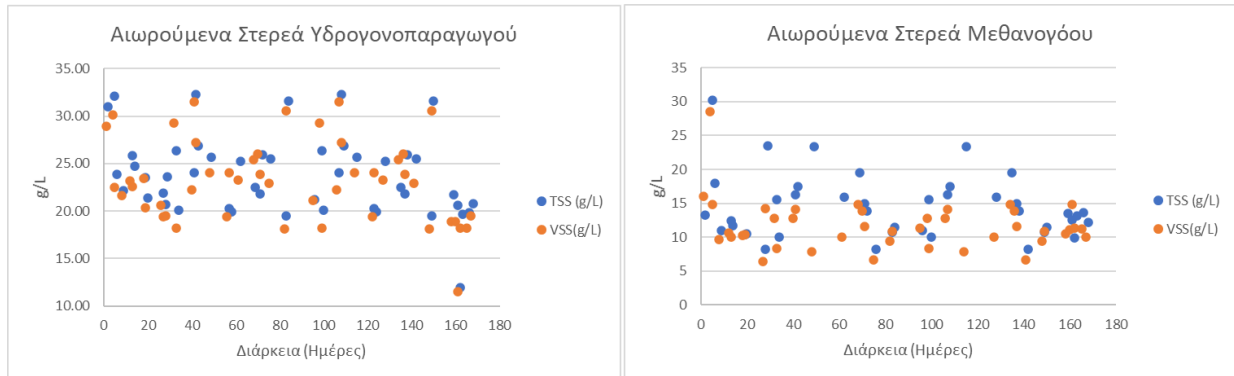
Διάγραμμα 4-24: Ημι-βιομηχανικής κλίμακας διβάθμιο σύστημα αναερόβιας χώνευσης, tCOD & sCOD

### Ολικά και Πτητικά Αιωρούμενα Στερεά (TSS, VSS)

Η διακύμανση Αιωρούμενων Στερεών παρουσίασε παρόμοια συμπεριφορά με αυτή που περιγράφηκε για την πιλοτική κλίμακας μονάδα, δηλαδή ομοιότητα στη διακύμανση μεταξύ TSS και VSS και υψηλό ποσοστό VSS/TSS (Διάγραμμα 4-25).

Όσον αφορά τον υδρογονοπαραγωγό αντιδραστήρα όπως ήταν αναμενόμενο, λόγω του μικρού Υδραυλικού Χρόνου Παραμονής και της έντονης υδρολυτικής συμπεριφοράς, οι συγκεντρώσεις των Αιωρούμενων Στερεών ήταν σημαντικά υψηλή και με έντονη διακύμανση: 25-30 g/L TSS και 22.5-27.5 g/L VSS.

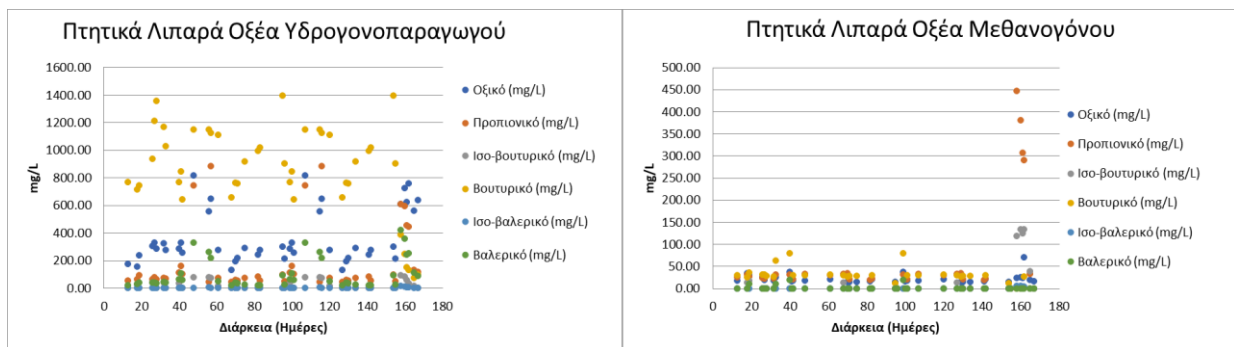
Αντίστοιχα, στο μεθανογόνο αντιδραστήρα, οι συγκεντρώσεις ήταν σημαντικά χαμηλότερες και με μικρότερες διακυμάνσεις: 12.5-17.5 g/L TSS και 10-13 g/L VSS.



**Διάγραμμα 4-25: Ημι-βιομηχανικής κλίμακας διβάθμιο σύστημα αναερόβιας χώνευσης, TSS & VSS Πτητικά Λιπαρά Οξέα (VFAs)**

Στο Διάγραμμα 4-26 παρουσιάζονται οι μετρήσεις των Πτητικών Λιπαρών Οξέων για τους δύο αντιδραστήρες. Όπως είναι αναμενόμενο, οι συγκεντρώσεις των VFAs είναι σημαντικά υψηλότερες στον υδρογονοπαραγωγό αντιδραστήρα, και μάλιστα με ιδιαίτερα υψηλές συγκεντρώσεις οξικού οξέος (περίπου 300 mg/L) και ιδιαίτερα βουτυρικού οξέος (άνω των 700 mg/L)..

Όσον αφορά στο μεθανοπαραγωγό αντιδραστήρα μετά από μια περίοδο προσαρμογής 15 περίπου ημερών οι συγκεντρώσεις των VFAs σχεδόν μηδενίζονται, όπως και είναι αναμενόμενο. Μετά την 150<sup>η</sup> ημέρα παρατηρείται απότομη αύξηση της συγκέντρωσης του προπιονικού οξέος, η οποία καταδεικνύει την ύπαρξη κινητικού περιορισμού της διεργασίας, ωστόσο πολύ γρήγορα αυτή αναστέλλεται και οι συγκεντρώσεις του προπιονικού οξέος επανέρχονται στα φυσιολογικά επίπεδα.



**Διάγραμμα 4-26: Ημι-βιομηχανικής κλίμακας διβάθμιο σύστημα αναερόβιας χώνευσης, VFAs**

Όπως και στην περίπτωση του εργαστηριακής κλίμακας συστήματος, στο Διάγραμμα 4-27 παρουσιάζονται οι παραγόμενες ποσότητες βιοαερίων (καθαρού υδρογόνου και μεθανίου) ανηγμένες ανά μάζα τροφοδοτούμενου FORBI.

Συγκεκριμένα, αναφορικά με την παραγωγικότητα υδρογόνου παρατηρήθηκε μία σχετική σταθεροποίηση μετά από περίπου 40 ημέρες λειτουργίας στα επίπεδα των κατά προσέγγιση 60

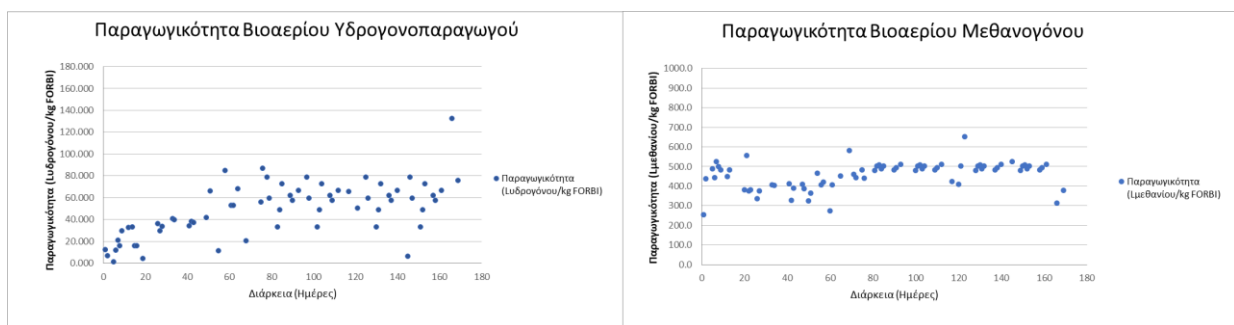


Λυδρογόνου/kg<sub>FORBI</sub>. Η σχετική διακύμανση που παρατηρήθηκε, οφείλεται στην λειτουργική αστάθεια του συστήματος, η οποία είναι αναμενόμενη λόγω του ιδιαίτερα χαμηλού Υδραυλικού Χρόνου Παραμονής υπό τον οποίο λειτούργησε το σύστημα.

Όσον αφορά την παραγωγικότητα μεθανίου, αυτή παρουσίασε σημαντικά μικρότερες διακυμάνσεις και μετά από μία περίοδο προσαρμογής διάρκειας 60 περίπου ημερών σταθεροποιήθηκε στα επίπεδα των 500 L<sub>μεθανίου</sub>/kg<sub>FORBI</sub>.

Στην περίπτωση του ημι-βιομηχανικής κλίμακας διβάθμιου συστήματος αναερόβιας χώνευσης επιλέχθηκε η ανάμιξη των ρευμάτων βιοαερίου στο σύνολο τους, χωρίς να επιχειρηθεί η επίτευξη συγκεκριμένης αναλογίας (15%, όπως στην περίπτωση του εργαστηριακής κλίμακας συστήματος). Με αυτόν τον τρόπο το τελικό ρεύμα που οδηγήθηκε προς εξευγενισμό (βλ. Ενότητα 4.2.20) αποτελούνταν κατά μέσο από υδρογόνο σε ποσοστό 12% και μεθάνιο σε ποσοστό 88%.

### Παραγωγικότητα βιοαερίου



Διάγραμμα 4-27: Ημι-βιομηχανικής κλίμακας διβάθμιο σύστημα αναερόβιας χώνευσης, Παραγωγικότητα Βιοαερίου

## 4.2.20 Εξευγενισμός Υθανίου

Σκοπό της διεργασίας εξευγενισμού του υθανίου αποτελεί η απομάκρυνση του διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) και του υδροθειού (H<sub>2</sub>S), στοχεύοντας στην παραγωγή τελικού ρεύματος βιοαερίου καθαρότητας άνω του 97%. Το σύστημα εξευγενισμού που χρησιμοποιήθηκε βασίστηκε σε προηγούμενες μελέτες που υλοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας της Σχολής Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος Waste4think.

Για τον εξευγενισμό του παραγόμενου βιοαερίου μίγματος μεθανίου και υδρογόνου (υθανίου) αξιοποιήθηκε μία ημι-βιομηχανικής κλίμακας διεργασία τεσσάρων σταδίων:

1. Κατά το πρώτο στάδιο το μίγμα των δύο ρευμάτων διέρχεται στήλης plexiglass συνολικού ύψους 3 m και διαμέτρου 12 cm πληρωμένης με πληρωτικό υλικό έως το ύψος των 2.7 m σε θερμοκρασία περίπου 30 °C, η οποία παρουσιάζεται στην Εικόνα 4-14. Η δυναμικότητα της συγκεκριμένης διάταξης ανέρχεται σε 1000 L βιοαερίου ημερησίως. Σε αντιρροή με το βιοαέριο διέρχεται της στήλης διάλυμα μονο-αιθαλοναμίνης (Monoethalonamine - MEA) αραιωμένης με νερό σε συγκέντρωση 20%. Η μονο-αιθαλοναμίνη απορροφά το περιεχόμενο διοξείδιο του άνθρακα και τα ίχνη θειούχων ενώσεων του βιοαερίου σε ποσοστό έως 99% και με περιεκτικότητα H<sub>2</sub>S < 4 ppm. Όταν ο διαλύτης (διάλυμα μεθυλαμίνης) κορεστεί, οδηγείται σε σύστημα αναγέννησης κατά το οποίο το διάλυμα υφίσταται βρασμό στους 110 °C για δύο ώρες μέσω του οποίου το προσροφημένο διοξείδιο του άνθρακα απελευθερώνεται.



**Εικόνα 4-14: Στήλη απορρόφησης διοξειδίου του άνθρακα και θειούχων ενώσεων**

2. Στη συνέχεια το ρεύμα βιοαερίου αποθηκεύεται προσωρινά σε σύστημα αποθήκευσης πλωτής οροφής (αεριοφυλάκιο) όγκου  $2 \text{ m}^3$ , το οποίο παρουσιάζεται στην Εικόνα 4-15. Για τη μόνωση του αποθηκευτικού χώρου χρησιμοποιείται νερό, επιτρέποντας στην πλωτή οροφή του να εκτοπίζεται με την αύξηση του όγκου του αερίου.



**Εικόνα 4-15: Κυλινδρικό αεριοφυλάκιο με σύστημα πλωτής οροφής, χωρητικότητας 2 m<sup>3</sup>**

3. Με σκοπό την απομάκρυνση της υγρασίας από το εξευγενισμένο βιοαέριο, χρησιμοποιήθηκε στήλη από ανοξείδωτο ατσάλι (ύψους 2m και διαμέτρου 12 cm), η οποία περιείχε silica gel (Εικόνα 4-16 (α)). Η στήλη εγκαταστάθηκε μεταξύ του αεριοφυλακίου και του συστήματος συμπίεσης του υθανίου, FMQ 2.5 Natural Gas Compressor, ο οποίος συμπιέζει το υθάνιο στα 207 bar καθιστώντας το έτοιμο για να χρήση από τα απορριμματοφόρα (Εικόνα 4-16(β)). Προτού τροφοδοτηθεί στο απορριμματοφόρο του Waste4think το αναβαθμισμένο βιοαέριο, αποθηκευόταν προσωρινά σε ενδιάμεσες φιάλες υψηλής πίεσης 200 bar (buffer tanks) μέχρι το βιοαέριο να αντληθεί από το απορριμματοφόρο (Εικόνα 4-17).



Εικόνα 4-16: (α) Στήλη αφύγρανσης του βιοαερίου και (β) συμπιεστής βιοαερίου



Εικόνα 4-17: (α) Δοχεία αποθήκευσης συμπιεσμένου υθανίου και (β) σταθμός τροφοδοσίας απορριμματοφόρων με βιοαέριο

### 4.3 Κομποστοποίηση

Στο πλαίσιο του προγράμματος Waste4think, μελετήθηκε η δυνατότητα αξιοποίησης του FORBI μέσω κομποστοποίησης, σε συνδυασμό με πράσινα απόβλητα (κλαδέματα, γρασίδι κ.λπ), τα οποία παράγονται στο Δήμο Χαλανδρίου. Στόχος της συγκεκριμένης προσέγγισης ήταν η αξιοποίηση τόσο των τροφικών υπολειμμάτων όσο και των πράσινων αποβλήτων του Δήμου

(ρεύματα τα οποία αποτελούν και το συντριπτικά μεγαλύτερο ποσοστό κατά μάζα του συνόλου των Αστικών Στερεών Απορριμμάτων) προς παραγωγή ενός χρήσιμου και υψηλής προστιθέμενης αξίας προϊόντος, του κόμποστ.

Το παραγόμενο κόμποστ μπορεί είτε να αξιοποιηθεί εμπορικά, μειώνοντας το συνολικό κόστος της διαχείρισης των Αστικών Στερεών Απορριμμάτων του Δήμου, είτε να διατεθεί στους δημότες που το επιθυμούν ως ανταποδοτικό και κίνητρο για την περαιτέρω δραστηριοποίησή τους στις διάφορες δραστηριότητες διαλογής στην πηγή που λαμβάνουν χώρα στο Δήμο.

Για τη μελέτη των δυνατοτήτων αξιοποίησης του FORBI ως υποστρώματος της διεργασίας κομποστοποίησης πραγματοποιήθηκαν δύο διακριτοί πειραματικοί κύκλοι:

- i. Εργαστηριακής κλίμακας, οικιακού τύπου κομποστοποίηση
- ii. Ημι-βιομηχανικής κλίμακας κομποστοποίηση σε σειράδια

Οι πειραματικές μέθοδοι και τα αποτελέσματα των δύο πειραματικών κύκλων παρουσιάζονται στις επόμενες ενότητες.

### 4.3.1 Εργαστηριακής κλίμακας κομποστοποίηση

Για τη διενέργεια της πειραματικής διαδικασίας εργαστηριακής κλίμακας συγκομποστοποίησης του FORBI με πράσινα απόβλητα του Δήμου Χαλανδρίου αξιοποιήθηκε κομποστοποιητής οικιακού τύπου όγκου 280 L μάρκας Garantia, ο οποίος ήταν κατασκευασμένος από 100% ανακυκλωμένο πολυπροπυλένιο (rPP) και παρουσιάζεται στην Εικόνα 4-18.



Εικόνα 4-18: Οικιακός κομποστοποιητής Garantia (280 L)

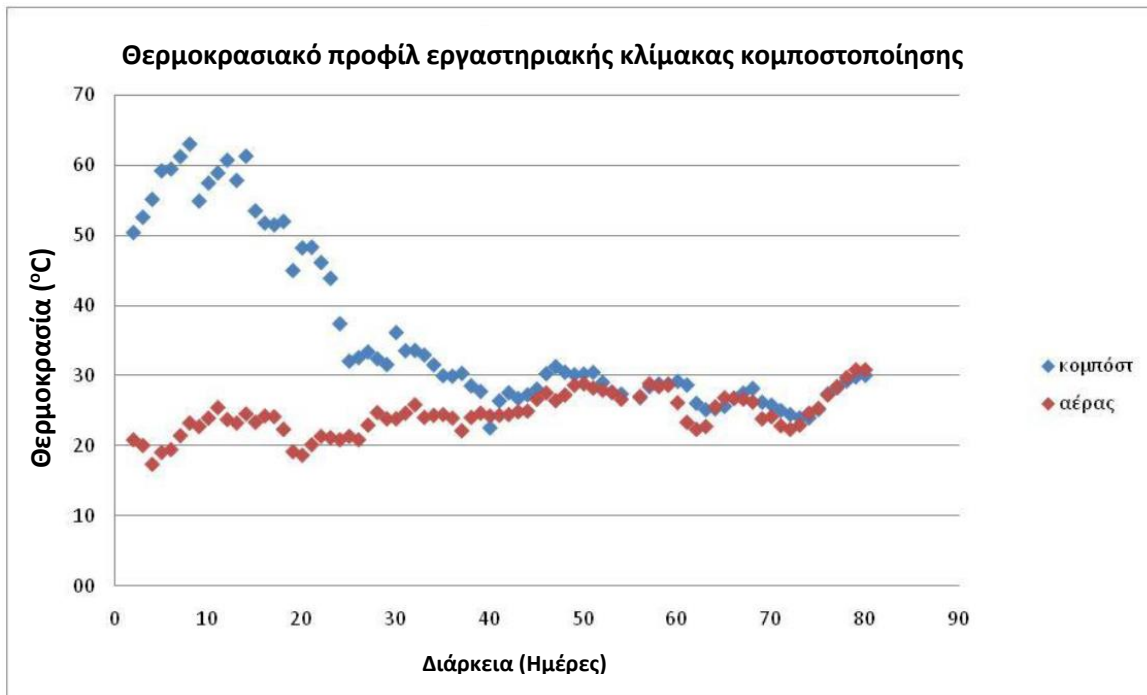
Ο κομποστοποιητής τροφοδοτήθηκε με 12.3 kg FORBI, 4.1 kg γρασίδι και 21 kg κλαδέματα (συνολική μάζα 37.5 kg), ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη θεωρητική αναλογία άνθρακα προς άζωτο (C/N) 25-30. Όσον αφορά τη δεύτερη σημαντική παράμετρο για την επιτυχία της κομποστοποίησης η τελική υγρασία του μίγματος ήταν 42%, ως εκ τούτου νερό προστέθηκε στο μίγμα ώστε να φτάσει η υγρασία στο 50%, καθώς η ιδανική υγρασία για το μίγμα της κομποστοποίησης είναι 50%-60%. Μάλιστα, προσθήκη νερού πραγματοποιούνταν ανά τακτά χρονικά διαστήματα, όποτε αυτό απαιτούταν, ώστε να διατηρείται η υγρασία εντός αυτών των ορίων.

Καθ' όλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας, επιτυγχανόταν αερισμός και ομογενοποίηση του μίγματος μέσω της μηχανικής, χειροκίνητης ανάδευσής του. Επιπλέον, εντός του σώματος του μίγματος είχαν τοποθετηθεί αισθητήρια όργανα μέτρησης της θερμοκρασίας, ώστε να καταγράφεται η εξέλιξη της θερμοκρασίας (με καταγραφές ανά 30 λεπτά), η οποία αποτελεί και

το βασικότερο μέσο παρακολούθησης της εξέλιξης της διεργασίας. Επιπλέον, πραγματοποιούνταν μετρήσεις υγρασίας, ολικών και πτητικών στερεών (TS-VS), pH, αγωγιμότητας (EC), ολικού οργανικού άνθρακα (TOC) και αζώτου (TKN) πραγματοποιούνταν καθημερινά κατά τη διάρκεια του πρώτου μήνα και στη συνέχεια τρεις φορές ανά εβδομάδα.

Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 4-28, η θερμοφιλή φάση της κομποστοποίησης ( $T > 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) διήρκησε 11 ημέρες με τη θερμοκρασία του κόμποστ να φτάνει τους  $63\text{ }^{\circ}\text{C}$  κατά την 8<sup>η</sup> ημέρα, η οποία αποτελεί και κατάλληλη τιμή θερμοκρασίας για την αποστείρωση του τελικού προϊόντος από παθογόνους μικροοργανισμούς και έντομα. Επίσης, η θερμοκρασία ήταν σταθερά άνω των  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  για 17 ημέρες. Σύμφωνα με την ΥΑ. οικ. 56366/4351/2014 για το κόμποστ τύπου Α η υγειονομική απαίτηση είναι η θερμοφιλή φάση να έχει διάρκεια τουλάχιστον δύο εβδομάδων.

Στην Εικόνα 4-19 παρουσιάζεται φωτογραφία του μίγματος κατά τη διάρκεια της θερμοφιλής φάσης, αλλά και κατά τη διάρκεια της φάσης ωρίμανσης του κόμποστ.



**Διάγραμμα 4-28:** Εργαστηριακής κλίμακας κομποστοποίηση, θερμοκρασιακό προφίλ διεργασίας



**Εικόνα 4-19:** Οπτική απεικόνιση του μίγματος κατά τη διάρκεια της θερμοφίλης φάσης (αριστερά) και κατά τη διάρκεια της φάσης ωρίμανσης του κόμπουστ (δεξιά)

Με τη λήξη της θερμοφίλης φάσης της κομποστοποίησης, το μίγμα μπήκε σε διαδικασία ωρίμανσης, όπου και διατηρήθηκε για δύο μήνες. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν δοκιμασίες φυτοτοξικότητας, ώστε να ελεγχθεί η καταλληλότητα του τελικού προϊόντος ως εδαφοβελτιωτικού. Αυτές, ωστόσο, δεν αναλύονται περαιτέρω καθώς δεν αποτελούν

αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Το τελικό προϊόν της διεργασίας παρουσιάζεται στην Εικόνα 4-20.



Εικόνα 4-20: Τελικό προϊόν διεργασίας κομποστοποίησης εργαστηριακής κλίμακας

#### 4.3.2 Ημι-βιομηχανικής κλίμακας κομποστοποίηση



Εικόνα 4-21: Κομποστοποίηση ημι-βιομηχανικής κλίμακας σε σειράδι

Για την κλιμάκωση μεγέθους της διεργασίας συγκομποστοποίησης του κόμποστ με πράσινα απόβλητα αξιοποιήθηκε στεγασμένος χώρος στον Ορχομενό Βοιωτίας, ο οποίος παραχωρήθηκε από την εταιρεία RAM Europe<sup>3</sup>.

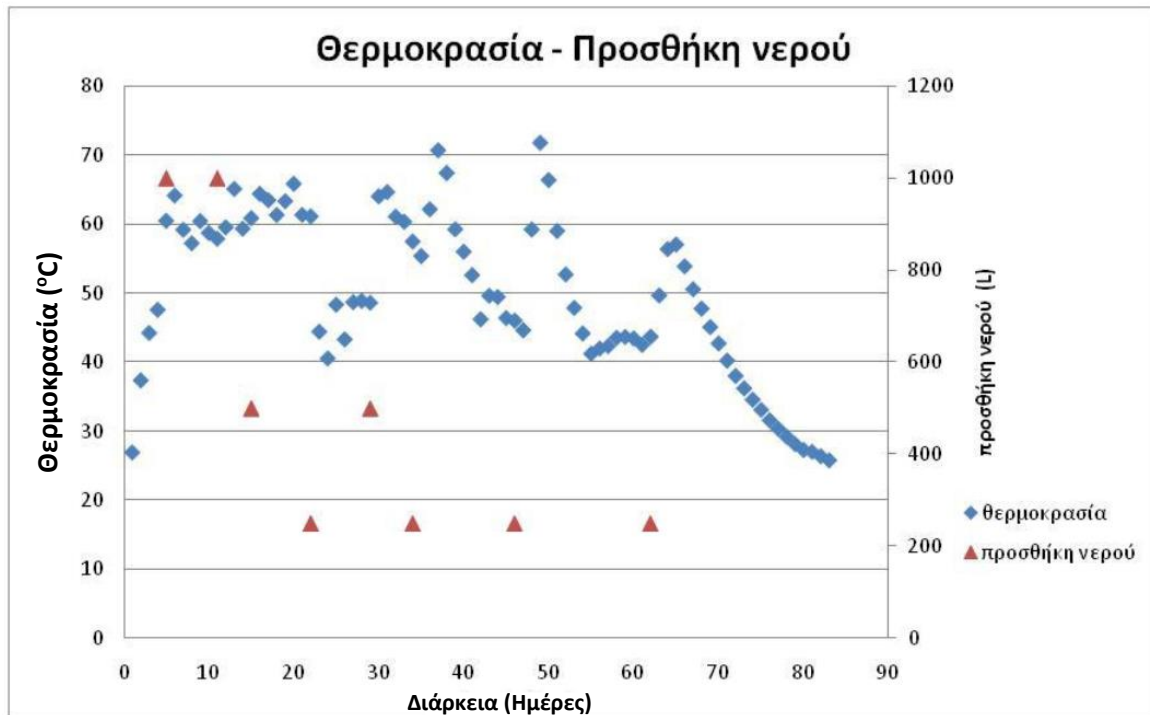
Το σειράδι είχε πλάτος 2 μέτρων και ύψος 1 μέτρου, ενώ η αναλογία FORBI με κλαδέματα ήταν 1:1 με συνολικό βάρος 4 τόνων. Επιπλέον, προστέθηκαν 2.2 τόνοι νερού, ώστε να επιτευχθεί η κατάλληλη υγρασία. Όπως και στην περίπτωση της εργαστηριακής κλίμακας διεργασίας, η θερμοκρασία καταγράφονταν κάθε 30 λεπτά και επιπλέον πραγματοποιούνταν σε εβδομαδιαία βάση μετρήσεις ολικών και πτητικών στερεών (TS-VS), pH, αγωγιμότητας, οργανικού άνθρακα (TOC) και αζώτου (TKN). Επιπλέον, κατά τα τελικά στάδια της διεργασίας πραγματοποιήθηκαν δοκιμασίες υπολογισμού φυτοτοξικότητας, ώστε να προσδιοριστεί η καταλληλότητα του τελικού

---

<sup>3</sup> <https://www.rameurope.com/>



προϊόντος ως εδαφοβελτιωτικού. Οι μετρήσεις πέραν της θερμοκρασίας, ωστόσο, δεν παρουσιάζονται στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής, δεδομένου ότι η εν λόγω διεργασία αποτελεί αντικείμενο που διεξήχθη στα πλαίσια άλλης διδακτορικής διατριβής.



**Διάγραμμα 4-29: Πιλοτικής κλίμακας κομποστοποίηση, θερμοκρασιακό προφίλ διεργασίας σε συνάρτηση με την αύξηση της υγρασίας**

Στην πιλοτικής κλίμακας κομποστοποίηση παρατηρήθηκε η ταχεία αύξηση της θερμοκρασίας, η οποία από τους 27 °C κατά την πρώτη μέρα της διεργασίας έφτασε του 60 °C την πέμπτη μέρα. Αυτή η πρώτη θερμοφιλή φάση διήρκεσε 18 ημέρες, και στη συνέχεια παρατηρήθηκε μείωση της θερμοκρασίας στους 45 °C. Ωστόσο, με την προσθήκη νερού προς αύξηση της υγρασίας παρατηρήθηκε εκ νέου αύξηση της θερμοκρασίας, με τη διεργασία να εισέρχεται σε μία δεύτερη θερμοφιλή φάση διάρκειας 12 ημερών, κατά την οποία η μέγιστη θερμοκρασία καταγράφηκε την 49<sup>η</sup> ημέρα και έφτασε στους 71.7 °C. Στη συνέχεια, παρατηρήθηκε και πάλι πτώση της θερμοκρασίας, έως ότου να προστεθεί εκ νέου νερό και να αυξηθεί και πάλι η θερμοκρασία φτάνοντας μέχρι τους 57 °C για 4 όμως μόλις ημέρες και στη συνέχεια μειώθηκε μέχρι να φτάσει στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Οι νομικές και υγειονομικές απαιτήσεις για το τελικό προϊόν υπερκαλύφθηκαν ήδη από την πρώτη θερμοφιλή φάση, καθώς η διάρκειά της καλύπτει το ελάχιστο όριο των 14 ημερών, ενώ και οι ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες που επιτυγχάνθηκαν (60-70 °C) βοηθούν την πλήρη απαλλαγή του κόμποστ από παθογόνους μικροοργανισμούς.

## 4.4 Μηχανική Πελλετοποίηση

Για την παραγωγή στερεού καυσίμου από FORBI στη μορφή Pellet χρησιμοποιήθηκε πελλετοποιητής μοντέλου MKL225, του οποίου τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-10, ενώ ο ίδιος ο πελλετοποιητής παρουσιάζεται στην Εικόνα 4-22.

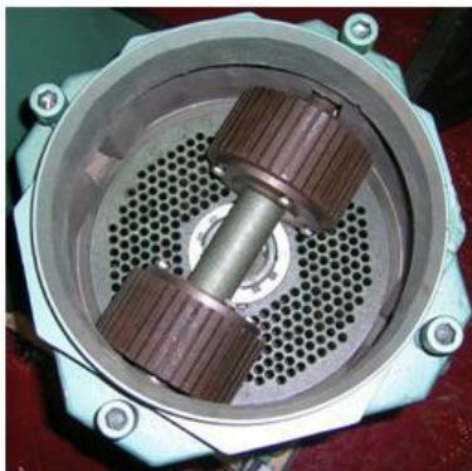
**Πίνακας 4-10: Τεχνικά χαρακτηριστικά πελλετοποιητή τύπου MKL225**

Χαρακτηριστικό	Τιμή
Ισχύς	7.5 kW
Δυναμικότητα	100-200 kg/hr
Διαστάσεις	200 cm x 46 cm x 90 cm
Καθαρό Βάρος	230 kg
Μικτό Βάρος	260 kg



**Εικόνα 4-22: Πελλετοποιητής MKL225**

Ο συγκεκριμένος πελλετοποιητής είναι τύπου πρέσας με σταθερή και επίπεδη μήτρα και περιστρεφόμενους κυλίνδρους. Καθώς οι κύλινδροι περιστρέφονται εφαρμόζουν πίεση προς το υλικό της τροφοδοσίας, ώστε να περάσει από τις εσοχές (Εικόνα 4-23). Οι πιέσεις είναι αρκετά υψηλές ώστε να αναπτύσσονται υψηλές τριβές ανάμεσα στο οργανικό υλικό και στη μήτρα και η θερμοκρασία να αυξάνεται, ώστε να πραγματοποιείται ο σχηματισμός των Pellets (Εικόνα 4-24).



**Εικόνα 4-23: Μήτρα και περιστρεφόμενοι κύλινδροι, πελλετοποιητής τύπου μήτρας**

Για τη μελέτη της περιβαλλοντικής επίδοσης του Pellet αλλά και της απόδοσής του ως καυσίμου αξιοποιήθηκε καυστήρας Pellet που είναι εγκατεστημένος στο Εργαστήριο Ατμοκινητήρων και Λεβήτων της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Το μοντέλο του καυστήρα είναι KOMBI KN/PA 15/30. Συγκεκριμένα, διεξήχθη μία δοκιμή καύσης Pellets με τα αποτελέσματα να αξιολογούνται βάσει του προτύπου EN303-5. Για τη ροή μάζας, χρησιμοποιήθηκε η συσκευή Danfoss Massflow 2100, ενώ για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του τοίχου χρησιμοποιήθηκαν θερμοστοιχεία τύπου K. Τέλος, οι εκπομπές αερίων στο ρεύμα καυσαερίων μετρήθηκαν μέσω αναλυτών τύπου Thermo 60i και 42i. Οργανικές και ανόργανες ουσίες, καθώς και η περιεκτικότητα του καυσαερίου σε ατμό μετρήθηκαν χρησιμοποιώντας ένα GASMET DX 4000 αναλυτή, ενώ η συγκέντρωση του ολικού αερίου οργανικού άνθρακα υπολογίστηκε μέσω αναλυτή FID Signal Mini. Επιπλέον, η μέτρηση των εκπομπών σκόνης πραγματοποιήθηκε βάσει του EN13284.01:2017.



**Εικόνα 4-24: Pellets από FORBI**

Το Εργαστήριο Ατμοκινητήρων και Λεβήτων λειτουργεί βάσει των προδιαγραφών του προτύπου EN ISO/IEC 17065:2012 και EN ISO/IEC 17025:2017 για τη δειγματοληψία των εκπεμπόμενων αερίων και την μέτρησή τους.

Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής διερευνήθηκαν δύο χαρακτηριστικά των Pellets, ώστε να αξιολογηθεί στη συνέχεια μέσω της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής η χρήση της πελλετοποίησης ως εναλλακτικής μεθόδου αξιοποίησης του FORBI:

- i. Η περιβαλλοντική επίδοση των Pellets, ώστε αφενός να διαπιστωθεί η κάλυψη των ελαχίστων νομοθετικών προδιαγραφών και αφετέρου να εισαχθούν τα δεδομένα καύσης του Pellet στην Ανάλυση Κύκλου Ζωής. Όπως φαίνεται, βάσει των μετρήσεων που διεξήχθησαν, η μόνη παράμετρος που φαίνεται να ξεφεύγει των ελαχίστων απαιτήσεων είναι η συγκέντρωση χλωρίου (πιθανώς λόγω της υψηλής συγκέντρωσης χλωριούχου νατρίου στα υπολείμματα τροφών), γεγονός που θα πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω και να αναζητηθούν πιθανές μέθοδοι μείωσής του.
- ii. Η θερμική απόδοση του Pellet, ώστε να υπολογιστεί η δυνατότητα υποκατάστασης, άλλων συμβατικών καυσίμων θέρμανσης. Μέσω των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν προκύπτει ότι η Κατωτέρα Θερμογόνος Δύναμη του Pellet είναι της τάξης των 4.7 kWh/kg.

## **4.5 Παραγωγή βιοαιθανόλης**

Το FORBI αποτελεί μία σύνθετη πηγή βιομάζας περιλαμβάνοντας σειρά διαφορετικών συστατικών όπως διαλυτά σάκχαρα, αμυλούχες ενώσεις, λιπίδια, πρωτεΐνες, κυτταρίνη και άλλες ενώσεις που το καθιστούν πιθανώς κατάλληλο υπόστρωμα για διεργασίες ενζυματικής ζύμωσης.

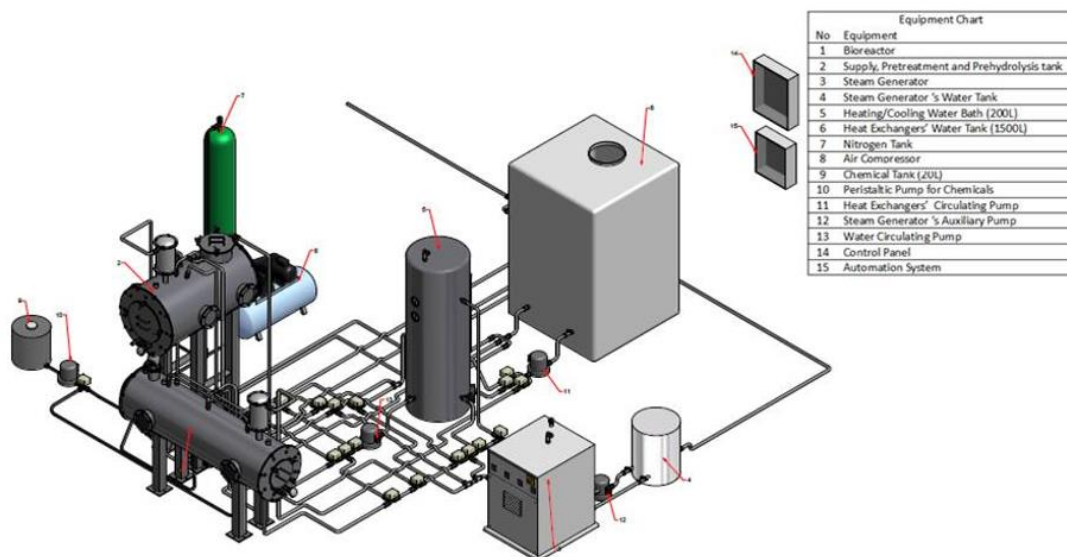
Γενικά, η παραγωγή βιοαιθανόλης από τέτοιου είδους σύνθετα υποστρώματα περιλαμβάνει ένα στάδιο προκατεργασίας, το οποίο αποσκοπεί στην αύξηση της αποικοδομησιμότητας του υλικού. Στη συνέχεια ακολουθεί η ενζυματική υδρόλυση προς απελευθέρωση των μονοσακχαριτών και η

ζύμωση των σακχάρων προς παραγωγή βιοαιθανόλης. Στη συγκεκριμένη διαδικασία, η ενζυματική υδρόλυση και ζύμωση μπορεί να πραγματοποιηθεί σε ξεχωριστά στάδια ή ταυτόχρονα.

Στη διεργασία ταυτόχρονης σακχαροποίησης και ζύμωσης (Simultaneous Saccharification and Fermentation – SSF), και τα δύο στάδια της διεργασίας πραγματοποιούνται στον ίδιο βιοαντιδραστήρα, όπου η παραγόμενη γλυκόζη μετατρέπεται άμεσα σε αιθανόλη μέσω ζύμωσης. Ωστόσο, ένα μειονέκτημα της συγκεκριμένης διεργασίας είναι η σημαντική μείωση της απόδοσης της ενζυμικής λειτουργίας. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται μέσω της μη ταυτόχρονης σακχαροποίησης και ζύμωσης (Non-isothermal Saccharification and Fermentation – NSSF), κατά την οποία το στάδιο της προκατεργασίας πραγματοποιείται υπό θερμοκρασία ιδανική για την ενζυμική λειτουργία και ακολουθείται από ζύμωση του πολτού που προκύπτει.

Είναι σημαντικό, ώστε να επιτευχθεί υψηλή τελική συγκέντρωση βιοαιθανόλης (>4% που αποτελεί το ελάχιστο ώστε να θεωρείται αποτελεσματική η διεργασία), να παρέχεται υψηλή συγκέντρωση τροφοδοτούμενου υποστρώματος και άρα υψηλή συγκέντρωση στερεών.

Για την παραγωγή βιοαιθανόλης από FORBI χρησιμοποιήθηκε ένας ανοξείδωτος οριζόντιος περιστρεφόμενος βιοαντιδραστήρας (Horizontal Rotating Bioreactor – HRR) όγκου 200 L, στον οποίο έλαβαν χώρα τα τρία στάδια της διεργασίας (προκατεργασία, σακχαροποίηση και ζύμωση) σε υψηλές συγκεντρώσεις στερεών.



**Εικόνα 4-25: Σύστημα ενζυματικής παραγωγής βιοαιθανόλης από FORBI**

Ο βιοαντιδραστήρας είναι εξοπλισμένος με σύστημα ανακίνησης, το οποίο αποτελεί παραλλαγή τύπου διπλής περρωτής ελικοειδούς κορδέλας, μέσω του οποίου επιτυγχάνεται και η εκκένωση του με το τέλος της διεργασίας. Επιπλέον, η θερμοκρασία ρυθμίζεται μέσω κυκλοφορίας θερμού νερού ή ατμού από το εξωτερικό διαμέρισμα του αντιδραστήρων. Επίσης, είναι εξοπλισμένος με θερμοστοιχεία και πεχάμετρα και υπάρχει η δυνατότητα παροχής αέρα μέσω συμπιεστή και χημικών μέσω περισταλτικών αντλιών.

Στον Πίνακα 4-11 παρουσιάζονται οι λειτουργικές συνθήκες της διεργασίας παραγωγής βιοαιθανόλης από FORBI:

Πίνακας 4-11 Παρουσίαση λειτουργικών συνθηκών διεργασίας ενζυματικής παραγωγής βιοαιθανόλης

Λειτουργικές Συνθήκες	
<b>Βάρος υποστρώματος σε ξηρή βάση (FORBI)</b>	40 kg
<b>Αναλογία Υγρού/Στερεού</b>	Περίπου 2.25/1 (v/w)
<b>Προκατεργασία</b>	3% (w/w) H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> στους 100 °C για 1 ώρα και ρύθμιση pH=5 με χρήση διαλύματος NaOH
<b>Προ-υδρολυτικό και υδρολυτικό στάδιο</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ρύθμιση θερμοκρασίας στους 65 °C και προσθήκη γλυκοαμυλάσης (Spirizyme® Fuel) με ρυθμό 60 units/g<sub>αμύλου</sub>, για 30 λεπτά.</li> <li>2. Ρύθμιση θερμοκρασίας στους 50 °C και προσθήκη κυτταρινολυτικών ενζύμων (Cellic® CTec2) με ρυθμό 40 FPU/g<sub>κυτταρίνης</sub> για 5.5 ώρες.</li> </ol>
<b>Στάδιο ζύμωσης</b>	Ρύθμιση θερμοκρασίας στους 30 °C και προσθήκη μαγιάς (15 mg/g <sub>FORBI</sub> ).

Η μέγιστη παραγωγή αιθανόλης που επιτεύχθηκε ήταν 70.5 g/L (που αντιστοιχεί σε 16 g/g<sub>dry FORBI</sub>), ενώ η διεργασία διήρκεσε συνολικά 36 ώρες.

## 5.0 Συγκριτική αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων

### 5.1 Ανάπτυξη & Καθορισμός ορίων σεναρίων

Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής πραγματοποιήθηκε ανάλυση και σύγκριση, από περιβαλλοντική και οικονομική σκοπιά εναλλακτικών συστημάτων διαχείρισης οικιακών ζυμώσιμων απορριμμάτων. Τα εναλλακτικά σενάρια που μελετήθηκαν βασίζονται στα συμπεράσματα των πειραματικών κύκλων που περιγράφηκαν παραπάνω και υλοποιήθηκαν στα πλαίσια του προγράμματος Waste4think. Συνοπτικά η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την πραγματοποίηση της μελέτης περιγράφεται από τα παρακάτω βήματα:

- (i) Συλλογή δεδομένων περιγραφής της υπάρχουσας κατάστασης: Απαραίτητη προϋπόθεση για την αξιολόγηση της επίδοσης των πιθανών εναλλακτικών σεναρίων διαχείρισης των οικιακών ζυμώσιμων απορριμμάτων αποτελεί η ανάπτυξη λεπτομερούς κατανόησης της υπάρχουσας κατάστασης και κυρίως της σύστασης των ΑΣΑ αλλά και της επιτυγχάνομενης απόδοσης, όσον αφορά τη διαλογή στην πηγή, για το Δήμο που αποτελεί το επίκεντρο της μελέτης περίπτωσης. Επιπλέον, συλλέγονται πρωτογενή και δευτερογενή δεδομένα που αφορούν στη συλλογή και μεταφορά των αποβλήτων, τα αντίστοιχα κόστη κ.λπ.
- (ii) Απόδοση διεργασιών: εργαστηριακής και πιλοτικής κλίμακας πειράματα διεξήχθησαν ώστε να εκτιμηθεί η απόδοση των διαφόρων εναλλακτικών διεργασιών αξιοποίησης των ζυμώσιμων απορριμμάτων (παραγωγικότητες, τεχνικές ρυθμίσεις μεγιστοποίησης απόδοσης, ενεργειακές απαιτήσεις κ.λπ.).
- (iii) Μοντέλα Ανάλυσης Κύκλου Ζωής και Ανάλυσης Κόστους Κύκλου Ζωής αναπτύχθηκαν βάσει των παραπάνω δεδομένων μέσω του λογισμικού EASETECH. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε ανάλυση αβεβαιότητας των αποτελεσμάτων αποσκοπώντας στην βελτίωση της ποιότητας και ακρίβειας τους.
- (iv) Ερμηνεία αποτελεσμάτων, αναγνώριση κρίσιμων παραμέτρων και διεργασιών σε κάθε εναλλακτικό σενάριο, ώστε να επιλεγεί εκείνο με τη βέλτιστη απόδοση.

Σκοπός της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής ήταν η παροχή προς τα ενδιαφέροντα μέρητων απαιτούμενων πληροφοριών, ώστε να μπορέσουν να λάβουν τις βέλτιστες αποφάσεις σε σχέση με την ανάπτυξη ενός φιλικού προς το περιβάλλον και οικονομικά βιώσιμου συστήματος διαχείρισης των οικιακών ζυμώσιμων αποβλήτων. Η λειτουργική μονάδα στην οποία βασίστηκε η μελέτη ήταν “η συλλογή, μεταφορά, επεξεργασίας και τελική διάθεση 1000 kg ΑΣΑ του Δήμου Χαλανδρίου”.

Ο σκοπός της μελέτης επιβάλλει την εφαρμογή του μεθοδολογικού προτύπου της “επέκτασης συστήματος αναφοράς”, ώστε να συμπεριλαμβάνονται οι πιθανές επιπτώσεις των αλλαγών του συστήματος διαχείρισης των οικιακών ζυμώσιμων απορριμμάτων σε άλλα τεχνοοικονομικά συστήματα (π.χ. υποκατάσταση συμβατικού καυσίμου κίνησης απορριμματοφόρων με συμπιεσμένο βιοαέριο παραγόμενο από την αναερόβια χώνευση των τροφικών υπολειμμάτων) [157], [158].

### 5.2 Κατηγορίες επιπτώσεων

Στην ενότητα 5.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων για ένα εύρος κατηγοριών επιπτώσεων. Η επιλογή αυτών έγινε βάσει των παρακάτω κριτηρίων [130], [133], [159]:

- (i) Η Κλιματική Αλλαγή (ΚΑ) αντιπροσωπεύει ένα φαινόμενο παγκόσμιου ενδιαφέροντος, με ήδη εμφανείς επιπτώσεις που προσελκύουν την προσοχή της κοινής γνώμης και η αντιμετώπιση του οποίου βρίσκεται στο επίκεντρο του διεθνούς διαλόγου.
- (ii) Η Καταστροφή του Όζοντος (ΚΟ) ακολουθεί παρόμοια τάση με τη Φωτοχημική Παραγωγή Όζοντος, τον Θαλάσσιο Ευτροφισμό και την Εξάντληση Ανόργανων Στοιχείων.
- (iii) Η Ανθρώπινη Τοξικότητα (εκτός καρκινογόνων) (ΑΤ) ακολουθεί την ίδια τάση με την Ιονίζουσα Ακτινοβολία, τον Ευτροφισμό των Υδάτων, την Οικοτοξικότητα των υδάτων και την Εξάντληση των Ορυκτών Πόρων.
- (iv) Τα Αιωρούμενα Σωματίδια (ΑΣ) ακολουθούν την ίδια τάση με την Οξίνιση των Εδαφών και των Ευτροφισμό των Εδαφών.
- (v) Τα αποτελέσματα της Ανάλυσης Κόστους Κύκλου Ζωής (Κ) παρουσιάζονται ανά σενάριο και παράλληλα με τα αποτελέσματα της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής.

Για τον υπολογισμό των επιπτώσεων ανά κατηγορία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ILCD.

### **5.3 Εναλλακτικά Σενάρια: Απογραφή και ανάλυση δεδομένων**

Η βάση για την ανάπτυξη των εναλλακτικών σεναρίων ήταν τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τα πειράματα που διεξήχθησαν στα πλαίσια του έργου Waste4think. Η βασική πρόταση του συγκεκριμένου έργου ήταν η διαλογή στην πηγή των τροφικών υπολειμμάτων και η ξήρανση και ο τεμαχισμός τους προς παραγωγή ενός προϊόντος βιομάζας, το οποίο ονομάζεται FORBI.

Η διεργασία της ξήρανσης/τεμαχισμού λάμβανε χώρα σε ειδικά διαμορφωμένο χώρο στο Δήμο Χαλανδρίου, όπως αναλύεται διεξοδικά στην Ενότητα 4.1.

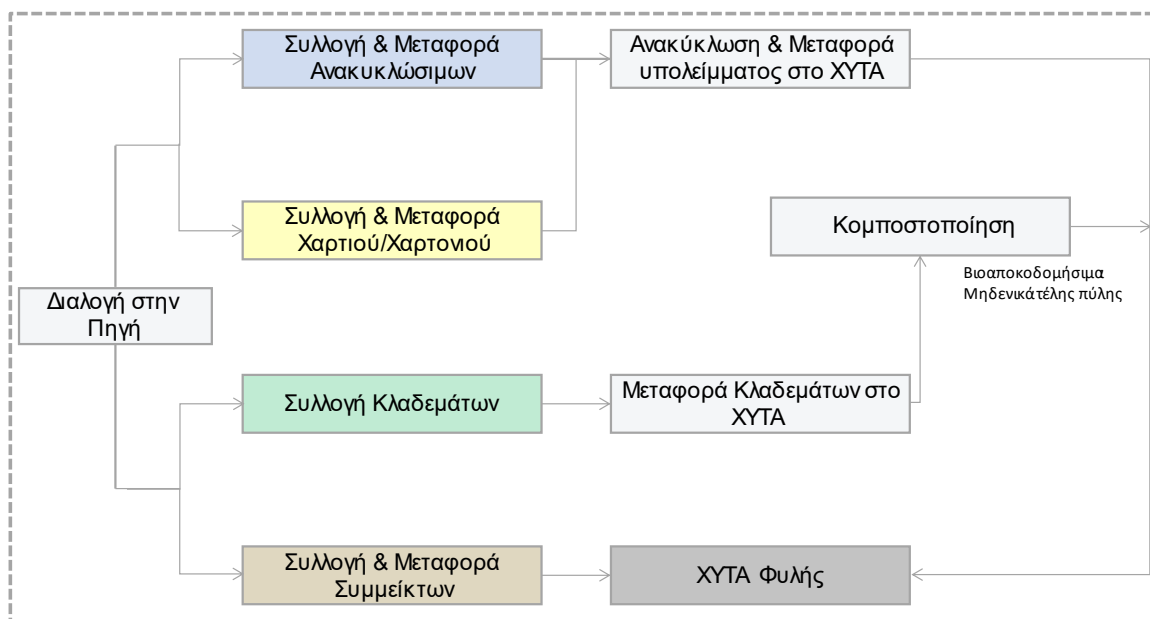
Στις επόμενες ενότητες περιγράφονται τα σενάρια που εξετάστηκαν και αναλύονται οι παράμετροί τους.

#### **5.3.1 Σενάριο 0: Υφιστάμενη κατάσταση**

Στην Εικόνα 5-1 παρουσιάζονται σχηματικά τα όρια του υπό μελέτη συστήματος για το Σενάριο 0, το οποίο περιγράφει την υφιστάμενη κατάσταση της διαχείρισης των οικιακών ζυμώσιμων απορριμμάτων του Δήμου Χαλανδρίου. Συγκεκριμένα, τα τροφικά υπολείμματα δεν εντάσσονται σε κάποιο πρόγραμμα διαλογής στην πηγή, αντίθετα συλλέγονται ως σύμμεικτα στον πράσινο κάδο και μεταφέρονται προς τελική διάθεση και ταφή στο ΧΥΤΑ Φυλής, οποίος βρίσκεται σε μία απόσταση περίπου 25 km από το Δήμο Χαλανδρίου. Η κατανάλωση καυσίμου για τη συλλογή και μεταφορά των σύμμεικτων αποβλήτων υπολογίστηκε στα 0,0024 και 0,00008  $L_{diesel}$  ανά kg αποβλήτων σε υγρή βάση, αντίστοιχα. Σε σχέση με το κόστος ταφής στο ΧΥΤΑ Φυλής αυτό ανέρχεται στα € 53/τόνο αποβλήτων.

Τα κλαδέματα, από την άλλη, εντάσσονται σε σύστημα διαλογής στην πηγή, συλλέγονται και μεταφέρονται επίσης στην περιοχή του ΧΥΤΑ, όπου και υφίστανται κομποστοποίηση, με το παραγόμενο κόμποστ να χρησιμοποιείται ως υλικό κάλυψης των κυττάρων του ΧΥΤΑ. Το συνολικό κόστος συλλογής και μεταφοράς των κλαδεμάτων ανέρχεται στα € 16 ανά τόνο αποβλήτων.





**Εικόνα 5-1: Σενάριο 0, Όρια συστήματος**

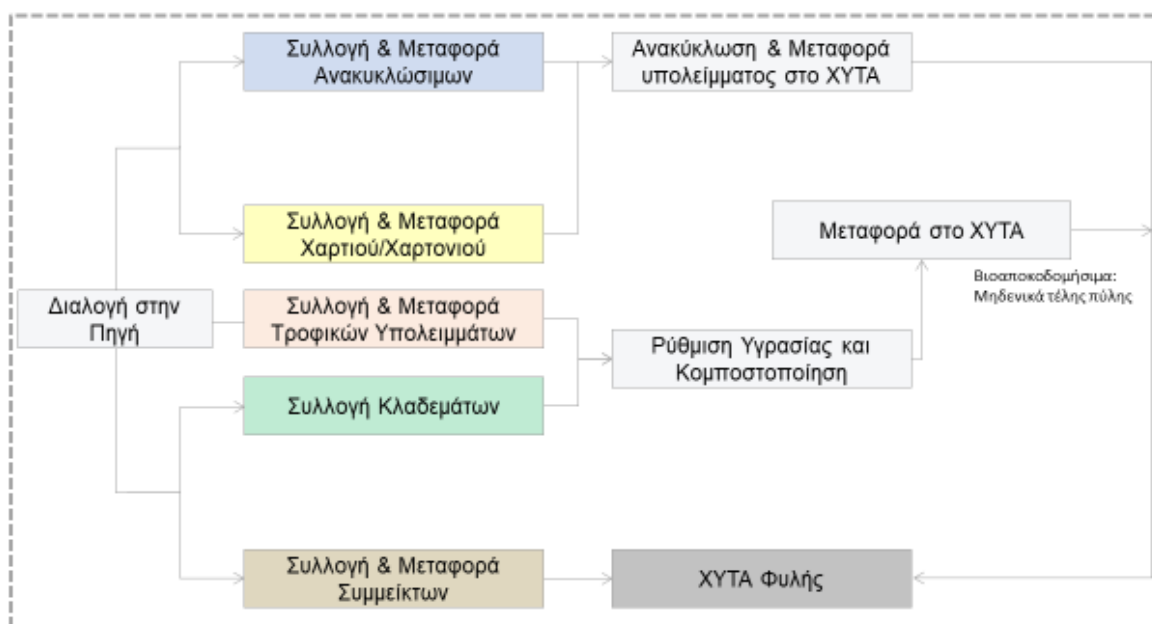
Στον Πίνακα Πίνακας 5-1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα στοιχεία των εισροών και των εκροών του για το Σενάριο 0.

**Πίνακας 5-1: Σενάριο 0, Εισροές/Εκροές συστήματος**

Εισροή/Εκροή	Τιμή
Μεταφορά απορριμμάτων προς ΧΥΤΑ (km)	25
Κατανάλωση καυσίμου για συλλογή (L/kg total wet weight)	2.4E-3
Κατανάλωση καυσίμων για μεταφορά (L/kg total wet weight)	8E-5
Τέλη πύλης ΧΥΤΑ (€/tonne)	53
Συλλογή και Μεταφορά κλαδεμάτων (€/tonne)	16

### 5.3.2 Σενάριο 0.1: Διαλογή στην πηγή τροφικών υπολειμμάτων και κομποστοποίηση

Στην Εικόνα 5-2 παρουσιάζονται σχηματικά τα όρια του υπό μελέτη συστήματος για το Σενάριο 0.1, στο οποίο εξετάζεται μία απλή εναλλακτική της υφιστάμενης κατάστασης. Συγκεκριμένα, θεωρείται η διαλογή στην πηγή των τροφικών υπολειμμάτων και η μεταφορά τους (μαζί με τα κλαδέματα) στην περιοχή του ΧΥΤΑ Φυλής, όπου και υφίστανται κομποστοποίηση.



**Εικόνα 5-2: Σενάριο 0.1, Όρια συστήματος**

Στον Πίνακα 5-2 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα στοιχεία των εισροών και των εκροών του για το Σενάριο 0.1.

**Πίνακας 5-2: Σενάριο 0.1, Εισροές/Εκροές συστήματος**

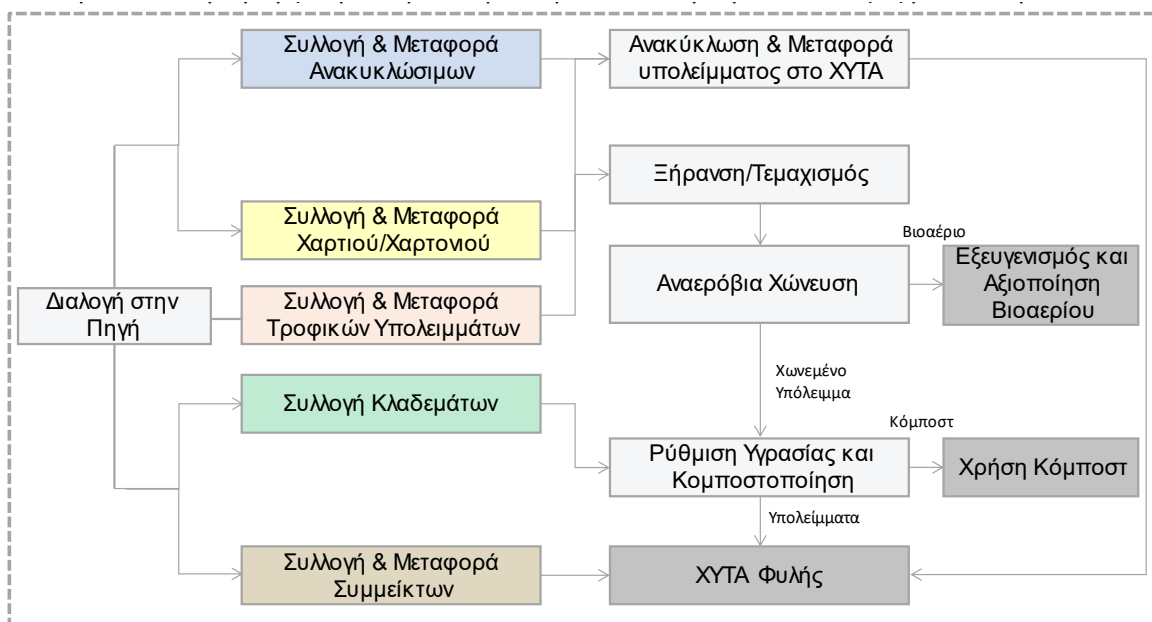
Εισροή/Εκροή	Τιμή
Μεταφορά απορριμμάτων προς ΧΥΤΑ (km)	25
Κατανάλωση καυσίμου για συλλογή (L/kg total wet weight)	2.4E-3
Κατανάλωση καυσίμων για μεταφορά (L/kg total wet weight)	8E-5
Τέλη πύλης ΧΥΤΑ (€/tonne)	53
Τέλη πύλης ΧΥΤΑ κλαδεμάτων (€/tonne)	0
Συλλογή και Μεταφορά κλαδεμάτων (€/tonne)	16

### 5.3.3 Σενάριο 1.1: Παραγωγή συμπιεσμένου βιομεθανίου και συγκομποστοποίηση αναερόβιας εκροής με κλαδέματα

Το Σενάριο 1.1 περιλαμβάνει τις ακόλουθες διεργασίες (Εικόνα 5-3):

1. Διαλογή στην πηγή τροφικών υπολειμμάτων και κλαδεμάτων του Δήμου Χαλανδρίου.
2. Μεταφορά των τροφικών υπολειμμάτων σε μονάδα εγκατεστημένη εντός του Δήμου, όπου και υφίστανται ξήρανση και τεμαχισμό προς παραγωγή FORBI.
3. Αιώρημα FORBI χρησιμοποιείται ως υπόστρωμα για την παραγωγή βιοαερίου μέσω Αναερόβιας Χώνευσης σε μονάδα εγκατεστημένη εντός των ορίων του Δήμου.

4. Εξευγενισμός βιοαερίου προς απομάκρυνση επιμολύνσεων (υγρασία, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S) κ.λπ. Ο εξευγενισμός επιτυγχάνεται μέσω στήλης μεθυλαμίνης, η οποία προσροφά το CO<sub>2</sub> και το H<sub>2</sub>S δεύτερης εν σειρά στήλης πληρωμένης με silica gel, μέσω της οποίας απομακρύνεται η περιεχόμενη στο βιοαέριο υγρασία. Στην παρούσα μελέτη έχει συμπεριληφθεί η αναγέννηση της μεθυλαμίνης μέσω βρασμού, αλλά όχι η διαχείρισή της στο τέλος του κύκλου ζωής της.
5. Συμπύεση βιοαερίου και αποθήκευσή του σε ειδικές φιάλες. Η συμπύεση επιτυγχάνεται μέσω ειδικής συσκευής (BRC FMQ 2.5 fuel-maker).
6. Αξιοποίηση συμπιεσμένου βιομεθανίου ως υποκατάστατου των συμβατικών ορυκτών καυσίμων κίνησης των απορριματοφόρων του Δήμου. Η υποκατάσταση των ορυκτών καυσίμων οδηγεί σε μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του συστήματος διαχείρισης αποβλήτων του Δήμου.
7. Το υγρό υπόλειμμα της Αναερόβιας Χώνευσης αξιοποιείται μέσω συγκομποστοποίησης με τα κλαδέματα του Δήμου (σε κατάλληλη αναλογία). Η μέθοδος αυτή αναμένεται να επιταχύνει δραστικά τη διεργασία κομποστοποίησης των κλαδεμάτων. Βάσει του Σεναρίου 1.1 η διεργασία λαμβάνει χώρα σε μονάδα εντός του Δήμου και με τη μέθοδο των σειραδίων.



**Εικόνα 5-3: Σενάριο 1.1, Όρια συστήματος**

Οι βασικότερες παραδοχές για την ανάπτυξη του μοντέλου Ανάλυσης Κύκλου Ζωής του Σεναρίου 1.1 παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 5-3:

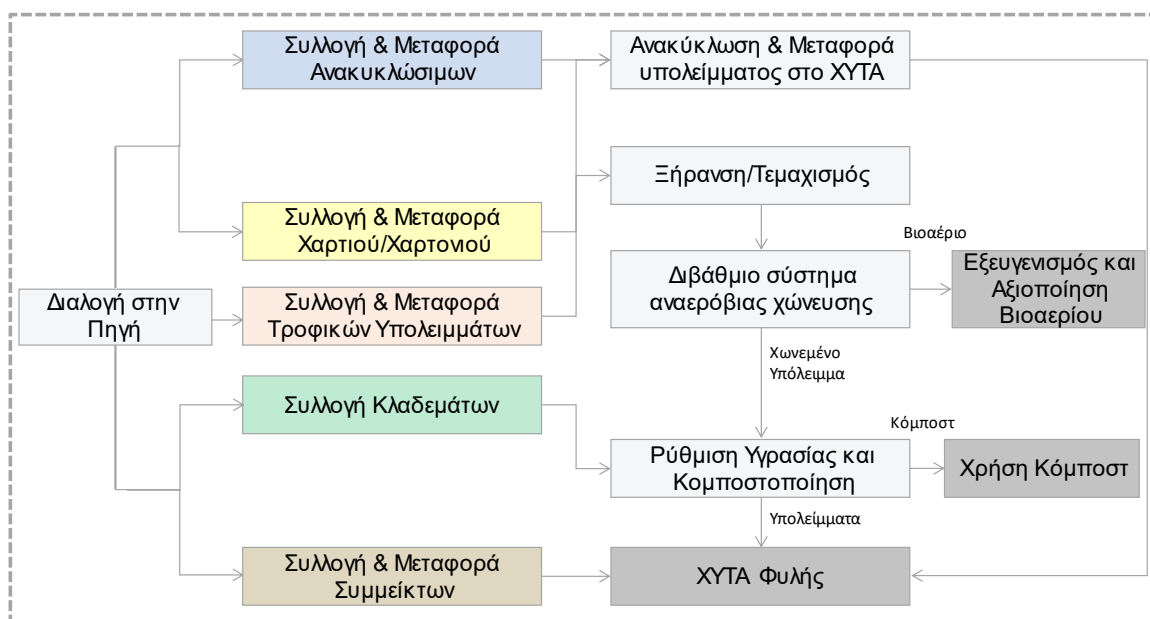
**Πίνακας 5-3: Σενάριο 1.1, Εισροές/εκροές συστήματος**

Εισροή/Εκροή	Τιμή
Μεταφορά απορριμμάτων προς ΧΥΤΑ (km)	25
Κατανάλωση καυσίμου για συλλογή (L/kg total wet weight)	2.4E-3
Κατανάλωση καυσίμων για μεταφορά (L/kg total wet weight)	8E-5

Κατανάλωση ενέργειας για κομποστοποίηση (kWh/kg)	4.36E-2
Κατανάλωση ενέργειας μηχανολογικού εξοπλισμού κομποστοποίησης (L <sub>diesel</sub> /kg <sub>feedstock</sub> )	1E-3
Τέλη πύλης ΧΥΤΑ (€/tonne)	53
Τέλη πύλης ΧΥΤΑ κλαδεμάτων (€/tonne)	0
Συλλογή και Μεταφορά κλαδεμάτων(€/tonne)	16
Κατανάλωση ενέργειας μηχανολογικού εξοπλισμού αναερόβιας χώνευσης (L <sub>diesel</sub> /kg <sub>total wet weight input</sub> )	9E-4
Ηλεκτρική ενέργεια για αντλίες και συστήματα αερισμού (kWh/kg <sub>total wet weight input</sub> )	4.9E-2
Κατανάλωση ενέργειας για τη θέρμανση του νερού στους 35 °C (MJ/kg <sub>total wet weight input</sub> )	6.78E-2
Κατανάλωση ενέργειας για τη θέρμανση των στερεών στους 35 °C (MJ/kg <sub>total wet weight input</sub> )	8.6E-3
Κατανάλωση ενέργειας για την αναγέννηση της ΜΕΑ (kWh/m <sup>3</sup> <sub>methane</sub> )	1E-1
Κατανάλωση ενέργειας για τον εξευγενισμό και τη συμπίεση του βιοαερίου (kWh/m <sup>3</sup> <sub>methane</sub> )	4.3E-1
Παραγωγικότητα FORBI(tonne/tonne <sub>FU</sub> )	0.08
Παραγωγικότητα κόμποστ (tonne <sub>compost</sub> /tonne <sub>FU</sub> )	0.5
Παραγωγικότητα βιοαερίου (m <sup>3</sup> /tonne <sub>FORBI</sub> )	543
Παραγωγικότητα Υθανίου (90% μεθάνιο - 10% υδρογόνο)(m <sup>3</sup> /tonne <sub>FORBI</sub> )	556

#### 5.3.4 Σενάριο 1.2: Παραγωγή υθανίου και συγκομποστοποίηση με κλαδέματα

Το Σενάριο 1.2 ταυτίζεται με το Σενάριο 1.1, με τη μόνη διαφορά ότι η αναερόβια χώνευση γίνεται σε δύο στάδια (μέσω διβάθμιου συστήματος αναερόβιας χώνευσης) προς παραγωγή υθανίου (δηλαδή μίγματος υδρογόνου και μεθανίου) σε αναλογία 10/90 (Εικόνα 5-4).



Εικόνα 5-4: Σενάριο 1.2, Όρια Συστήματος

Οι παράμετροι που λήφθηκαν υπόψη παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-4.

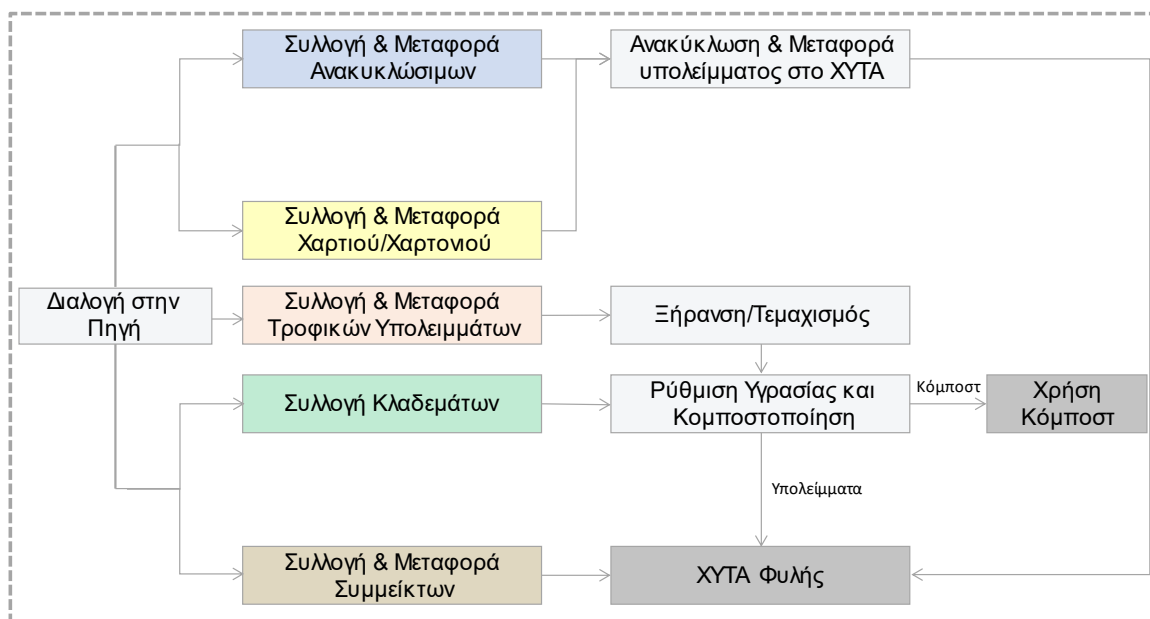
Πίνακας 5-4: Σενάριο 1.2, Εισροές/εκροές συστήματος

Εισροή/Εκροή	Τιμή
Μεταφορά απορριμμάτων προς ΧΥΤΑ (km)	25
Κατανάλωση καυσίμου για συλλογή (L/kg total wet weight)	2.4E-3
Κατανάλωση καυσίμων για μεταφορά (L/kg total wet weight)	8E-5
Κατανάλωση ενέργειας για κομποστοποίηση (kWh/kg)	4.36E-2
Κατανάλωση ενέργειας μηχανολογικού εξοπλισμού κομποστοποίησης (L <sub>diesel</sub> /kg <sub>feedstock</sub> )	1E-3
Τέλη πύλης ΧΥΤΑ (€/tonne)	53
Τέλη πύλης ΧΥΤΑ κλαδεμάτων (€/tonne)	0
Συλλογή και Μεταφορά κλαδεμάτων(€/tonne)	16
Κατανάλωση ενέργειας μηχανολογικού εξοπλισμού αναερόβιας χώνευσης (L <sub>diesel</sub> /kg <sub>total wet weight input</sub> )	9E-4

Ηλεκτρική ενέργεια για αντλίες και συστήματα αερισμού (kWh/kg <sub>total wet weight input</sub> )	4.9E-2
Κατανάλωση ενέργειας για τη θέρμανση του νερού στους 35 °C (MJ/kg <sub>total wet weight input</sub> )	6.78E-2
Κατανάλωση ενέργειας για τη θέρμανση των στερεών στους 35 °C (MJ/kg <sub>total wet weight input</sub> )	8.6E-3
Κατανάλωση ενέργειας για την αναγέννηση της ΜΕΑ (kWh/m <sup>3</sup> <sub>methane</sub> )	1E-1
Κατανάλωση ενέργειας για τον εξευγενισμό και τη συμπίεση του βιοαερίου (kWh/m <sup>3</sup> <sub>methane</sub> )	4.3E-1
Παραγωγικότητα FORBI(tonne/tonne <sub>FU</sub> )	0.08
Παραγωγικότητα κόμποστ (tonne <sub>compost</sub> /tonne <sub>FU</sub> )	0.5
Παραγωγικότητα βιοαερίου (m <sup>3</sup> /tonne <sub>FORBI</sub> )	543
Παραγωγικότητα Υθανίου (90% μεθάνιο - 10% υδρογόνο)(m <sup>3</sup> /tonne <sub>FORBI</sub> )	556

### 5.3.5 Σενάριο 2: Συγκομποστοποίηση FORBI και κλαδεμάτων

Μέσω της πιλοτικής κλίμακας πειραματικής διαδικασίας που περιγράφηκε στην Ενότητα 4.3.2 αποδείχτηκε ότι η συγκομποστοποίηση κλαδεμάτων και FORBI, αυξάνει σημαντικά την απόδοση της διεργασίας, μειώνοντας τον απαιτούμενο χρόνο κομποστοποίησης κλαδεμάτων περίπου στο μισό. Ως εκ τούτου, το Σενάριο 2 μελετά την περιβαλλοντική και οικονομική επίδοση του συστήματος διαχείρισης τροφικών υπολειμμάτων του Δήμου Χαλανδρίου που περιλαμβάνει την εγκατάσταση μονάδας κομποστοποίησης σε σειράδια εντός των ορίων του Δήμου. Βάσει του Σεναρίου 2, το σύνολο της παραγόμενης ποσότητας FORBI αξιοποιείται με τη συγκεκριμένη μέθοδο. Το παραγόμενο κόμποστ αξιοποιείται για τη λίπανση των πάρκων και κήπων του Δήμου, υποκαθιστώντας χημικά λιπάσματα και μειώνοντας έτσι το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του Δήμου (Εικόνα 5-5).



**Εικόνα 5-5: Σενάριο 2, Όρια Συστήματος**

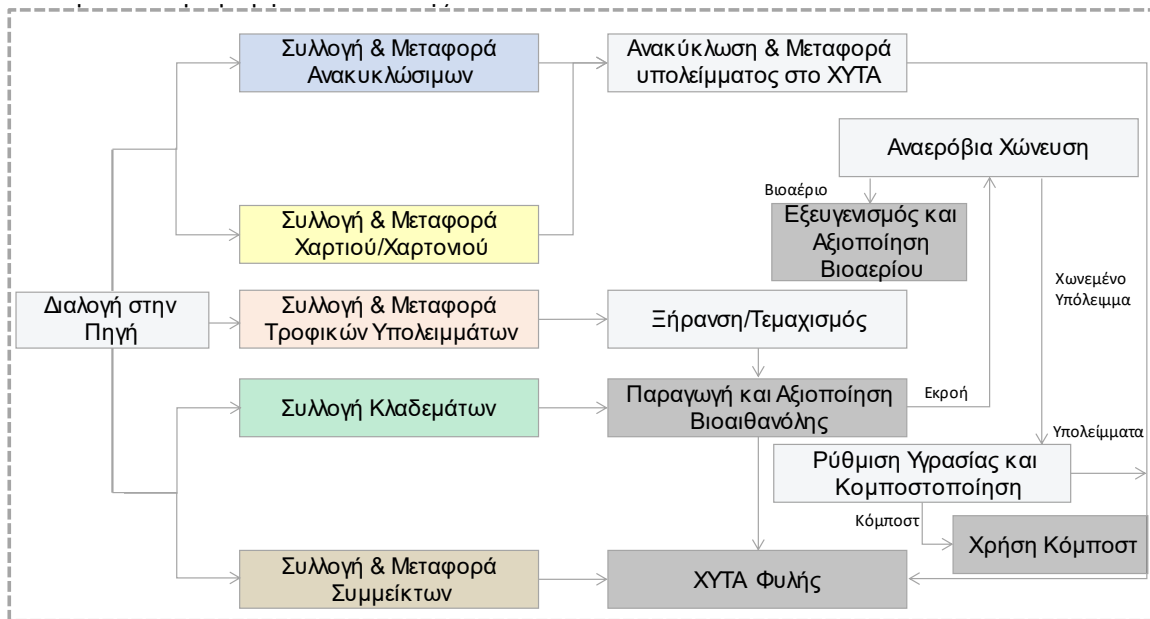
Οι βασικές παραδοχές και παράμετροι μοντελοποίησης του συστήματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-5:

**Πίνακας 5-5: Σενάριο 2, Εισροές/Εκροές Συστήματος**

Εισροή/Εκροή	Τιμή
Μεταφορά απορριμμάτων προς ΧΥΤΑ(km)	25
Κατανάλωση καυσίμου για συλλογή(L/kg total wet weight)	2.4E-3
Κατανάλωση καυσίμων για μεταφορά (L/kg total wet weight)	5E-5
Τέλη πύλης ΧΥΤΑ (€/tonne)	53
Τέλη πύλης ΧΥΤΑ κλαδεμάτων (€/tonne)	0
Συλλογή και Μεταφορά κλαδεμάτων(€/tonne)	16
Παραγωγικότητα κόμποστ (tonne/tonne <sub>FU</sub> )	0.5

### 5.3.6 Σενάριο 3: Ενζυματική υδρόλυση FORBI προς παραγωγή βιοαιθανόλης

Στο Σενάριο 3 διερευνάται η περιβαλλοντική και οικονομική επίδοση της μερικής υποκατάστασης συμβατικών ορυκτών καυσίμων από βιοαιθανόλη. Επιπλέον, το υπόλειμμα της διεργασίας υπόκειται σε περαιτέρω αξιοποίηση μέσω αναερόβιας χώνευσης και κομποστοποίησης του χωνεμένου υπολείμματος (Εικόνα 5-6).



**Εικόνα 5-6: Σενάριο 3, Όρια Συστήματος**

Για την υλοποίηση της διεργασίας της ενζυμικής υδρόλυσης χρησιμοποιείται θειικό οξύ σε ποσότητα 0.02 κιλά ανά κίλο τροφοδοτούμενου FORBI καθώς και μίγμα κατάλληλων ενζύμων (0.009 κιλά). Παρακάτω, παρουσιάζονται αναλυτικά οι παράμετροι μοντελοποίησης του Σεναρίου 3 (Πίνακας 5-6).

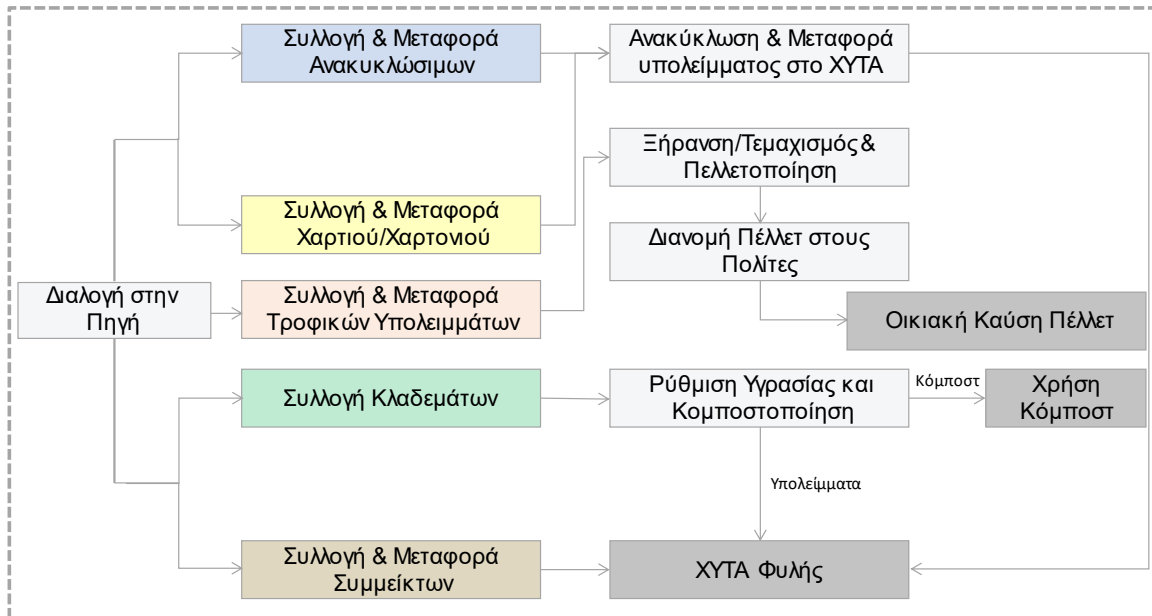
**Πίνακας 5-6: Σενάριο 3, Εισροές/Εκροές Συστήματος**

Εισροή/Εκροή	Τιμή
Μεταφορά απορριμμάτων προς ΧΥΤΑ(km)	25
Κατανάλωση καυσίμου για συλλογή(L/kg total wet weight)	2.4E-3
Κατανάλωση καυσίμων για μεταφορά (L/kg total wet weight)	8E-5
Τέλη πύλης ΧΥΤΑ (€/tonne)	53
Συλλογή και Μεταφορά κλαδεμάτων(€/tonne)	16
Παραγωγικότητα FORBI(tonne/tonne <sub>FU</sub> )	0.08
Θειικό Οξύ για ενζυματική υδρόλυση(tonne/tonne <sub>FORBI</sub> )	2E-2
Ένζυμα για ενζυματική υδρόλυση (tonne/tonne <sub>FORBI</sub> )	9E-3
Θερμότητα για ενζυματική υδρόλυση (MJ/kg <sub>input</sub> )	4.1
Ηλεκτρική ενέργεια για ενζυματική υδρόλυση (kWh/kg <sub>input</sub> )	4.5E-1



### 5.3.7 Σενάριο 4: Μηχανική Πελλετοποίηση FORBI

Η μηχανική πελλετοποίηση του FORBI αποτελεί τη βάση του Σεναρίου 4. Το παραγόμενο βιο-pellet αξιοποιείται ως στερεό καύσιμο θέρμανσης σε οικιακές συσκευές καύσης. Βάσει του σεναρίου θεωρείται ότι μοιράζεται δωρεάν από το Δήμο προς τους πολίτες (Εικόνα 5-7).



Εικόνα 5-7: Σενάριο 4, Όρια Συστήματος

Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για την πελλετοποίηση ισούται με 0,020 kWh ανά κιλό FORBI, ενώ ο βαθμός υποκατάστασης (υπολογισμένος βάσει της κατωτέρας θερμογόνου δύναμης) είναι -0.77 MJ φυσικού αερίου ανά MJ πέλλετ.

Πίνακας 5-7: Σενάριο 4, Εισροές/Εκροές Συστήματος

Εισροή/Εκροή	Τιμή
Μεταφορά απορριμμάτων προς ΧΥΤΑ(km)	25
Κατανάλωση καυσίμου για συλλογή(L/kg total wet weight)	2.4E-3
Κατανάλωση καυσίμων για μεταφορά (L/kg total wet weight)	8E-5
Τέλη πύλης ΧΥΤΑ (€/tonne)	53
Συλλογή και Μεταφορά κλαδεμάτων(€/tonne)	16
Παραγωγικότητα FORBI(tonne/tonne <sub>FU</sub> )	8E-2
Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για πελλετοποίηση (kWh/kg <sub>FORBI</sub> )	2.02E-2

## 5.4 Ανάλυση Αβεβαιότητας

Η ακριβής και συνεπής ερμηνεία των αποτελεσμάτων της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής και της Ανάλυσης Κόστους Κύκλου Ζωής προϋποθέτει την υλοποίηση ανάλυσης αβεβαιότητας [130].

Για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας των τιμών εισόδου των μοντέλων, δημιουργήθηκε πίνακας τύπου “pedigree matrix” μέσω του οποίου υπολογίστηκε η λογαριθμική κατανομή κάθε μίας εκ των τιμών εισόδου του μοντέλου [160]. Η μέθοδος που προτείνεται από την Ecoinvent αξιολογεί δύο τύπους αβεβαιοτήτων:

- i. Βασική αβεβαιότητα, η οποία εκφράζει τα στοχαστικά σφάλματα των παραμέτρων (π.χ. μεταβλητότητα τιμής λόγω εγγενών χαρακτηριστικών της διεργασίας στην οποία αναφέρεται). Η βασική αβεβαιότητα κάθε τιμής εισόδου υπολογίζεται βάση πίνακα παραγόντων, ο οποίος έχει αναπτυχθεί από την Ecoinvent, βάσει του οποίου κάθε παράμετρος διαφοροποιείται βάση του είδους της και την κατηγορία διεργασίας στην οποία ανήκει (π.χ. “κατανάλωση ενέργειας”).
- ii. Δευτερογενής αβεβαιότητα, η οποία προκύπτει από την χρήση ατελών δεδομένων. Για τον υπολογισμό της δευτερογενούς αβεβαιότητας χρησιμοποιήθηκε μία ημι-ποσοτική μέθοδος: τα αποτελέσματα (score) που προέκυψαν από το pedigree matrix για κάθε μία εκ των παραμέτρων υπολογίζεται η τιμή της αβεβαιότητας κάνοντας χρήση επιπλέον παραγόντων μετατροπής. Η γεωμετρική τυπική απόκλιση των λογαριθμικών κατανομών υπολογίστηκε βάσει αυτών των παραγόντων αβεβαιότητας. Επιπλέον, για τιμές παραμέτρων οι οποίες υπολογίστηκαν μέσω πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε η κανονική κατανομή. Ο προσδιορισμός των κανονικών κατανομών έγινε μέσω της δοκιμασίας Sapiro-Wilk η οποία εφαρμόστηκε στο περιβάλλον MS Excel.

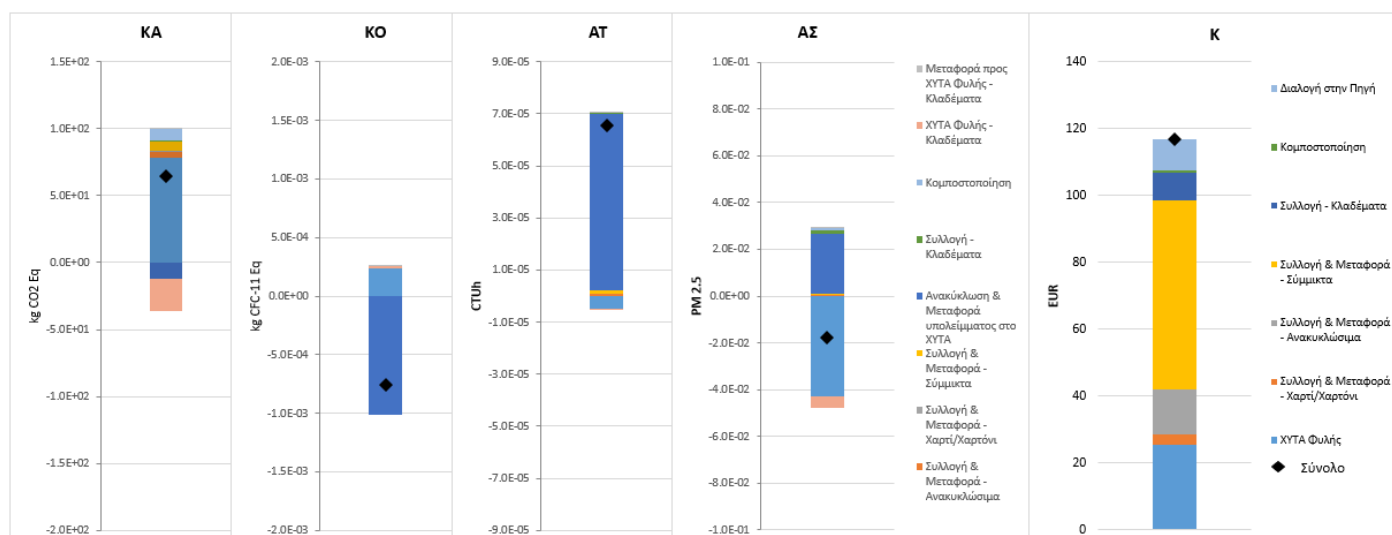
Το ειδικό εργαλείο που περιλαμβάνεται στο EASETECH χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση της ανάλυσης αβεβαιότητας μέσω ανάλυσης Monte Carlo, ενώ το πλήθος των υπολογισμών ανά σενάριο ήταν 1000.

Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι τα σενάρια που μελετώνται μοιράζονται πολλές κοινές παραμέτρους και άρα και τιμές αβεβαιότητας. Ως εκ τούτου, οι συγκρίσεις μεταξύ των συνολικών αβεβαιοτήτων κάθε σεναρίου πρέπει να αξιολογηθούν ως ενδεικτικές της ποιότητας των δεδομένων εισόδου του εκάστοτε σεναρίου.

## 5.5 Ανάλυση και αποτίμηση των επιπτώσεων του κύκλου ζωής

### 5.5.1 Σενάριο 0

Βάσει του Σεναρίου 0, στο οποίο περιγράφεται η υφιστάμενη κατάσταση, τα τροφικά υπολείμματα δεν εντάσσονται σε κάποιο σχέδιο διαλογής στην πηγή, αλλά αντίθετα συλλέγονται ως μέρος των συμμίκτων (πράσινος κάδος). Η αποτίμηση των επιπτώσεων για το Σενάριο 0 παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 5-1, ενώ ο Πίνακας 5-8 περιέχει τις αναλυτικές τιμές που προκύπτουν για κάθε κατηγορία επιπτώσεων.



**Διάγραμμα 5-1: Σενάριο 0, Αποτίμηση επιπτώσεων ΑΚΖ και ΑΚΚΖ**

Όπως φαίνεται το μεγαλύτερο μέρος της επίπτωσης για τις κατηγορίες “Κλιματική Αλλαγή” και “Καταστροφή του Όζοντος” προκύπτει από την αποδόμηση της οργανικής ύλης στο ΧΥΤΑ. Επιπλέον, σημαντικό μέρος των επιπτώσεων για τις ίδιες κατηγορίες προέρχεται από τις διάφορες διεργασίες ανακύκλωσης που λαμβάνουν χώρα στο Δήμο.

Όσον αφορά συγκεκριμένα στην κατηγορία “Κλιματικής Αλλαγής”, προκύπτει επιβάρυνση της τάξης των 65 kg CO<sub>2</sub> eq ενώ για την “Καταστροφή του Όζοντος” προκύπτει θετικό αποτύπωμα - 7,6E-04 kg CFC-11 eq.

Αντίθετα, στις κατηγορίες “Ανθρώπινη Τοξικότητα” και “Αιωρούμενα Στερεά” η εικόνα διαφοροποιείται. Συγκεκριμένα, το μεγαλύτερο μέρος της επιβάρυνσης εδώ προκύπτει από τις δραστηριότητες της ανακύκλωσης του Δήμου, ενώ από την άλλη πλευρά, η ταφή των σύμμικτων φαίνεται να έχει καθαρή θετική επίπτωση και για της δύο κατηγορίες. Η συνολική συνεισφορά του Σεναρίου 0 για τις δύο αυτές κατηγορίες είναι -4,7E-05 CTUh και -4,3 kg PM2.5 eq, αντίστοιχα.

Όσον αφορά στην οικονομική διάσταση του Σεναρίου 0, το μεγαλύτερο μέρος του κόστους προκύπτει από τη Συλλογή & Μεταφορά αλλά και την διάθεση στο ΧΥΤΑ (λόγω των τελών πύλης) των σύμμικτων απορριμμάτων. Συγκεκριμένα, από το συνολικό κόστος κύκλου ζωής που ανέρχεται για το Σενάριο 0 στα € 120 ανά τόνο, το 49% αντιστοιχεί στη Συλλογή & Μεταφορά των σύμμικτων (€ 57 ανά τόνο), ενώ άλλα € 25 ανά τόνο αντιστοιχούν στην τελική του διάθεση στο ΧΥΤΑ.

Τα παραπάνω στοιχεία καταδεικνύουν τη σημασία της εκτροπής των τροφικών υπολειμμάτων από το ΧΥΤΑ και την παράλληλη ανάπτυξη ενός τοπικού (βάση και της αρχής της εγγύτητας) δικτύου υποδομών για την διαχείριση και την αξιοποίησή τους.

Οι βασικοί παράγοντες που επιδρούν στην αύξηση τόσο της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης (ιδιαίτερα όσον αφορά την Κλιματική Αλλαγή) όσο και του κόστους είναι δύο:

1. Η απόσταση που καλύπτεται για τη μεταφορά των τροφικών υπολειμμάτων (ως τμήμα των σύμμικτων) στο ΧΥΤΑ Φυλής αυξάνει σημαντικά τόσο το ανθρακικό αποτύπωμα όσο και το διαχειριστικό κόστος του Δήμου, λόγω της αυξημένης κατανάλωσης καυσίμου.
2. Επιπλέον, τα τροφικά υπολείμματα που καταλήγουν στον ΧΥΤΑ αυξάνουν το κόστος του Δήμου για τα τέλη πύλης, αλλά και της εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου λόγω της υψηλής αποικοδομησιμότητάς τους. Λαμβάνοντας υπόψη και οι ποσότητες που

αντιστοιχούν στα τροφικά υπολείμματα (40% επί του συνόλου), προκύπτει η έκταση των επιπτώσεων.

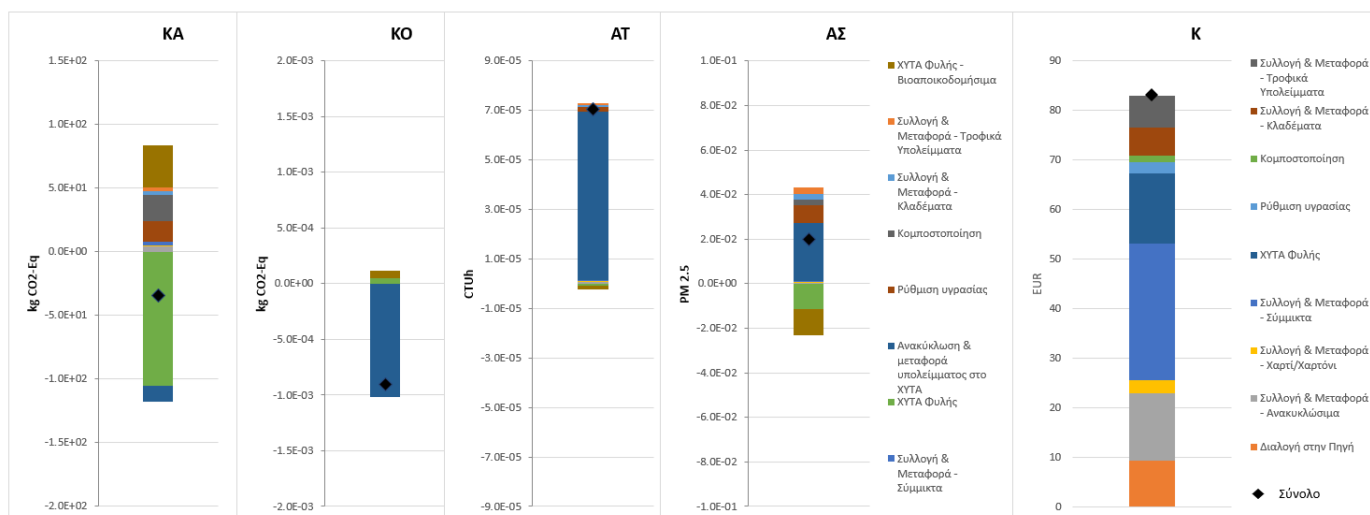
**Πίνακας 5-8: Σενάριο 0, Αποτίμηση επιπτώσεων ΑΚΖ και ΑΚΚΖ**

Κατηγορία Επιπτώσεων	ΚΑ		ΚΟ		ΑΤ		ΑΣ		Κ	
	kg CO <sub>2</sub> -Eq	Αβεβαιότητα	kg CFC-11 Eq	Αβεβαιότητα	CTUh	Αβεβαιότητα	kgPM <sub>2.5</sub> -eq	Αβεβαιότητα	EUR	Αβεβαιότητα
ΧΥΤΑ Φυλής	7.8E+01	2.2E+00	2.4E-04	1.8E-06	-4.7E-06	1.6E-07	-4.3E-02	3.3E-04	2.5E+01	1.6E-01
Συλλογή & Μεταφορά - Ανακυκλώσιμα	4.0E+00	1.0E+00	1.5E-09	3.8E-10	8.1E-07	2.1E-07	5.6E-04	1.5E-04	1.4E+01	2.8E+00
Συλλογή & Μεταφορά - Χαρτί/Χαρτόνι	1.0E+00	2.7E-01	3.8E-10	1.0E-10	2.1E-07	5.5E-08	1.4E-04	3.8E-05	2.8E+00	5.8E-01
Συλλογή & Μεταφορά - Σύμμικτα	6.8E+00	1.7E+00	2.5E-09	6.2E-10	1.4E-06	3.4E-07	9.4E-05	2.3E-04	5.7E+01	1.2E+01
Ανακύκλωση & Μεταφορά υπολείμματος στο ΧΥΤΑ	-1.2E+01	3.9E+00	-1.0E-03	2.6E-05	6.8E-05	1.4E-06	2.6E-02	2.0E-03	---	---
Συλλογή - Κλαδέματα	1.6E+00	5.7E-01	5.7E-10	2.1E-10	3.1E-07	1.1E-07	1.3E-03	4.6E-04	8.4E+00	9.8E-01
Κομποστοποίηση	7.9E+00	4.2E-01	2.2E-10	2.7E-11	1.2E-07	1.4E-08	9.9E-04	5.2E-05	6.4E-01	2.4E-01
ΧΥΤΑ Φυλής - Κλαδέματα	-2.4E+01	1.6E+00	2.1E-05	1.4E-06	-5.2E-07	5.3E-08	-5.0E-03	3.4E-04	---	---
Μεταφορά προς ΧΥΤΑ Φυλής - Κλαδέματα	1.3E+00	4.7E-01	4.7E-10	1.7E-10	2.6E-07	9.5E-08	1.8E-04	6.5E-05	---	---
Διαλογή στην Πηγή	---	---	---	---	---	---	---	---	9.3E+00	4.9E-01
<b>Σύνολο</b>	<b>6.5E+01</b>	<b>5.7E+00</b>	<b>-7.6E-04</b>	<b>2.6E-05</b>	<b>6.6E-05</b>	<b>1.5E-06</b>	<b>-1.8E-02</b>	<b>2.3E-03</b>	<b>1.2E+02</b>	<b>1.7E+01</b>

## 5.5.2 Σενάριο 0.1

Η διαλογή στην πηγή των τροφικών υπολειμμάτων και η συν-αξιοποίησή τους με τα κλαδέματα του Δήμου με στόχο την παραγωγή κόμποστ, οδηγεί σε σημαντική μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, ιδιαίτερα σε ό, τι έχει να κάνει με την “Κλιματική Αλλαγή”. Η αποτίμηση των επιπτώσεων για το Σενάριο 0.1 παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 5-2, ενώ ο Πίνακας 5-9 περιέχει τις αναλυτικές τιμές που προκύπτουν για κάθε κατηγορία επιπτώσεων.

Συγκεκριμένα, το Σενάριο 0.1 οδηγεί σε καθαρό όφελος ως προς το ανθρακικό αποτύπωμα του Δήμου κατά 34 kg CO<sub>2</sub>. Το σημαντικότερο ρόλο σε αυτό διαδραματίζει η διάθεση του βιοσταθεροποιημένου (κομποστοποιημένου) άνθρακα στο ΧΥΤΑ, διεργασία η οποία λειτουργεί ως αποθήκευση αδρανούς άνθρακα, ο οποίος δεν έχει αλληλεπιδράσεις με το περιβάλλον (π.χ. βιοαποικοδόμηση). Το όφελος από τη διεργασία αυτή αντιστοιχεί σε 110 kg CO<sub>2</sub> eq.



**Διάγραμμα 5-2: Σενάριο 0.1, Αποτίμηση επιπτώσεων ΑΚΖ και ΑΚΚΖ**

Αναφορικά με την “Καταστροφή του Όζοντος”, προκύπτει αύξηση του καθαρού οφέλους σε σύγκριση με το Σενάριο 0, η οποία οφείλεται τόσο στη μείωση των εκπομπών λόγω μειωμένης κατανάλωσης καυσίμων συλλογής και μεταφοράς όσο και στη μείωση των εκπομπών λόγω διάθεσης των τροφικών υπολειμμάτων στο ΧΥΤΑ. Το συνολικό καθαρό περιβαλλοντικό όφελος

του Σεναρίου 0.1 σε σχέση με την κατηγορία “Καταστροφή του Όζοντος” ανέρχεται στα 9E-04 kg CFC-11 eq.

Όσον αφορά την “Ανθρώπινη Τοξικότητα” και τα “Αιωρούμενα Σωματίδια”, παρατηρείται αύξηση των τιμών των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε σχέση με το Σενάριο 0: 7.1E-05 CTUh και 2E-02 kg PM2.5 eq, αντίστοιχα.

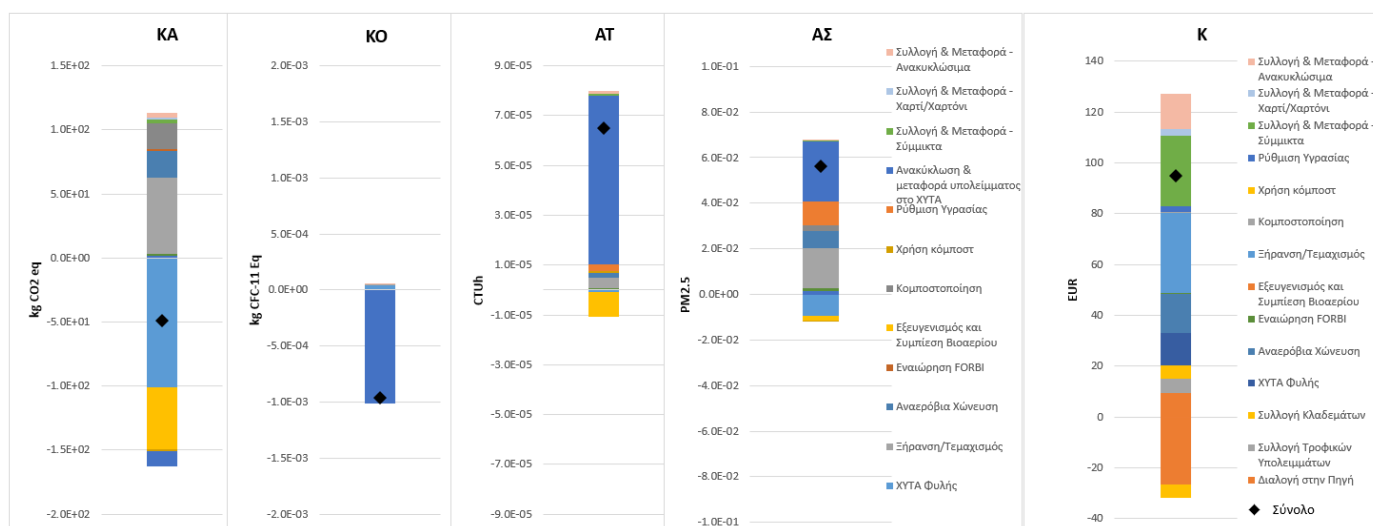
Τέλος, σε σχέση με την ΑΚΚΖ, παρατηρείται σημαντική μείωση του ύψους του διαχειριστικού κόστους σε σχέση με το Σενάριο 0, ύψους 29% (€ 83 ανά τόνο αποβλήτου). Το σημαντικότερο αντικείμενο κόστους παραμένει να είναι η “Συλλογή & Μεταφορά Σύμμικτων Απορριμμάτων”, ωστόσο το αντίστοιχο ποσό έχει μειωθεί σημαντικά φτάνοντας τα € 28 ανά τόνο, λόγω της εκτροπής των τροφικών υπολειμμάτων από το ρεύμα των σύμμικτων.

**Πίνακας 5-9: Σενάριο 0.1, Αποτίμηση επιπτώσεων ΑΚΖ και ΑΚΚΖ**

Κατηγορία Επιπτώσεων	ΚΑ		ΚΟ		ΑΤ		ΑΣ		Κ	
	kg CO2-Eq	Αβεβαιότητα	kg CFC-11 Eq	Αβεβαιότητα	CTUh	Αβεβαιότητα	kgPM2.5-eq	Αβεβαιότητα	EUR	Αβεβαιότητα
Συλλογή & Μεταφορά - Ανακυκλώσιμα	4.0E+00	1.1E+00	1.5E-09	3.9E-10	8.1E-07	2.2E-07	5.6E-04	1.5E-04	1.4E+01	2.4E+00
Συλλογή & Μεταφορά - Χαρτί/Χαρτόνι	1.1E+00	2.7E-01	3.9E-10	1.0E-10	2.1E-07	5.5E-08	1.5E-04	3.8E-05	2.8E+00	4.8E-01
Συλλογή & Μεταφορά - Σύμμικτα	3.0E+00	7.9E-01	1.1E-09	2.9E-10	6.1E-07	1.6E-07	4.2E-04	1.1E-04	2.8E+01	6.1E+00
ΧΥΤΑ Φυλής	-1.1E+02	6.3E+00	4.9E-05	7.2E-06	-8.8E-07	1.7E-07	-1.1E-02	1.3E-03	1.4E+01	5.7E-01
Ανακύκλωση & μεταφορά υπολείμματος στο ΧΥΤΑ	-1.2E+01	3.9E+00	-1.0E-03	2.5E-05	6.8E-05	1.3E-06	2.6E-02	2.0E-03	---	---
Ρύθμιση υγρασίας	1.6E+01	4.1E-01	1.4E-06	3.5E-08	2.0E-06	5.0E-08	8.2E-03	2.1E-04	2.4E+00	1.1E-01
Κομποστοποίηση	2.0E+01	1.2E+00	4.0E-10	5.0E-11	2.1E-07	2.7E-08	2.5E-03	1.5E-04	1.2E+00	4.5E-01
Συλλογή & Μεταφορά - Κλαδέματα	2.8E+00	7.2E-01	1.0E-09	2.7E-10	5.6E-07	1.5E-07	2.3E-03	5.8E-04	5.8E+00	9.4E-01
Συλλογή & Μεταφορά - Τροφικά Υπολείμματα	2.6E+00	9.0E-01	1.3E-09	3.3E-10	7.3E-07	1.8E-07	2.9E-03	7.3E-04	6.4E+00	9.7E-01
ΧΥΤΑ Φυλής - Βιοασπικοδομήσιμα	3.3E+01	7.4E+00	6.4E-05	8.4E-06	-1.5E-06	2.1E-07	-1.2E-02	1.5E-03	0.0E+00	0.0E+00
Διαλογή στην Πηγή	---	---	---	---	---	---	---	---	9.3E+00	4.8E-01
<b>Σύνολο</b>	<b>-3.4E+01</b>	<b>2.3E+01</b>	<b>-9.0E-04</b>	<b>4.1E-05</b>	<b>7.1E-05</b>	<b>2.6E-06</b>	<b>2.0E-02</b>	<b>6.7E-03</b>	<b>8.3E+01</b>	<b>1.3E+01</b>

### 5.5.3 Σενάριο 1.1

Η εφαρμογή της διεργασίας της Αναερόβιας Χώνευσης των τροφικών υπολειμμάτων και της κομποστοποίησης του χωνεμένου υπολείμματος μαζί με κλαδέματα, οι οποίες εφαρμόζονται στα πλαίσια του Σεναρίου 1.1, οδηγεί στη δραστική μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος σε σύγκριση με τα προηγούμενα Σενάρια. Η αποτίμηση των επιπτώσεων για το Σενάριο 1.1 παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 5-3/Διάγραμμα 5-1, ενώ ο Πίνακας 5-10 περιέχει τις αναλυτικές τιμές που προκύπτουν για κάθε κατηγορία επιπτώσεων.



**Διάγραμμα 5-3: Σενάριο 1.1, Αποτίμηση επιπτώσεων ΑΚΖ και ΑΚΚΖ**

Συγκεκριμένα, από την ΑΚΖ του Σεναρίου 1.1, προκύπτει καθαρό περιβαλλοντικό όφελος σε σχέση με την κατηγορία “Κλιματική Αλλαγή”, το οποίο ισοδυναμεί με 49 kg CO<sub>2</sub> eq. Το περιβαλλοντικό όφελος

παρατηρείται κυρίως λόγω της αποθήκευσης του σταθεροποιημένου άνθρακα στο ΧΥΤΑ, αλλά και λόγω της υποκατάστασης των ορυκτής προέλευσης καυσίμων κίνησης των απορριμματοφόρων από συμπιεσμένο βιομεθάνιο.

Όσον αφορά τη κατηγορία “Καταστροφή του Όζοντος”, παρατηρείται αύξηση του περιβαλλοντικού οφέλους σε σχέση με τα Σενάρια 0 και 0.1. Σημαντικό ρόλο σε αυτό παίζει η αξιοποίηση του παραγόμενου κόμποστ προς υποκατάσταση των χημικών λιπασμάτων, οδηγώντας σε συνολική συνεισφορά ύψους - 9.6E-04 kg CFC-11 eq.

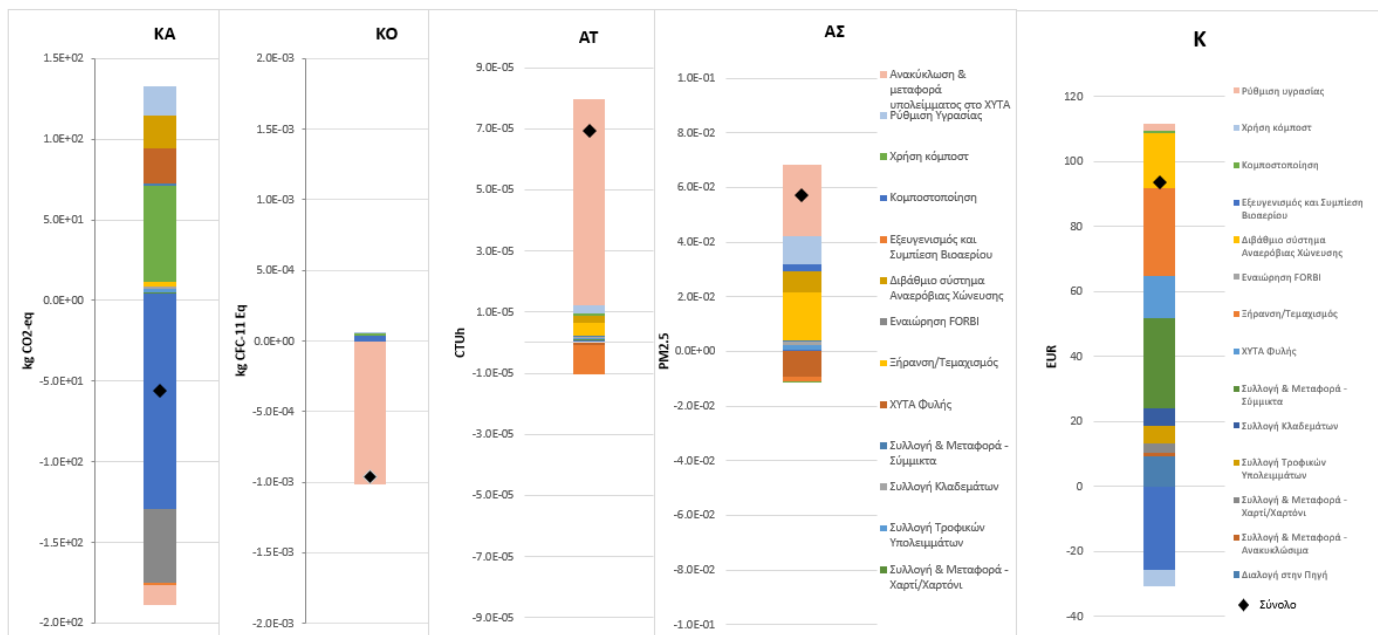
Σε σχέση με την “Ανθρώπινη Τοξικότητα” υπάρχει μεν βελτίωση σε σχέση με το Σενάριο 0.1, χωρίς ωστόσο να φτάνει την επίδοση του Σεναρίου 0 (6.9E-05 CTUh). Η μείωση στο καθαρό ύψος της επίπτωσης οφείλεται κατά κύριο λόγο στην υποκατάσταση των ορυκτών καυσίμων κίνησης των απορριμματοφόρων από συμπιεσμένο βιομεθάνιο.

**Πίνακας 5-10: Σενάριο 1.1, Αποτίμηση επιπτώσεων ΑΚΖ και ΑΚΚΖ**

Κατηγορίες Επιπτώσεων	ΚΑ		ΚΟ		ΑΤ		ΑΣ		Κ	
	kg CO2-Eq	Αβεβαιότητα	kg CFC-11 Eq	Αβεβαιότητα	CTUh	Αβεβαιότητα	kgPM2.5-eq	Αβεβαιότητα	EUR	Αβεβαιότητα
Συλλογή Τροφικών Υπολειμμάτων	2.0E+00	7.1E-01	7.3E-10	2.6E-10	4.0E-07	1.4E-07	1.6E-03	5.8E-04	5.7E+00	9.7E-01
Συλλογή Κλαδεμάτων	1.5E+00	5.5E-01	5.7E-10	2.0E-10	3.1E-07	1.1E-07	1.2E-03	4.5E-04	5.2E+00	9.2E-01
ΧΥΤΑ Φυλής	-1.0E+02	7.2E+00	4.0E-05	7.5E-06	-6.5E-07	1.8E-07	-9.3E-03	1.3E-03	1.3E+01	5.8E-01
Ξήρανση/Τεμαχισμός	6.0E+01	2.5E+00	1.1E-05	5.1E-07	4.1E-06	1.9E-07	1.7E-02	7.8E-04	3.1E+01	1.1E+01
Αναερόβια Χώνευση	2.1E+01	1.6E+00	7.6E-07	6.3E-08	2.0E-06	2.0E-07	7.6E-03	7.7E-04	1.6E+01	8.5E+00
Εναώρηση FORBI	1.4E+00	5.2E-02	1.5E-07	5.4E-10	3.3E-08	1.2E-09	2.5E-05	9.2E-06	2.2E+00	1.1E-01
Εξευγενισμός και Συμπίεση Βιοαερίου	-4.8E+01	5.6E+00	4.5E-07	5.4E-08	-1.0E-05	1.2E-06	-2.1E-03	3.2E-04	-2.7E+01	3.2E+00
Κομποστοποίηση	2.0E+01	1.2E+00	2.4E-10	3.2E-11	1.3E-07	1.7E-08	2.5E-03	1.5E-04	6.8E-01	2.5E-01
Χρήση κόμποστ	-1.3E+00	6.2E-02	-4.4E-13	2.2E-14	7.0E-07	3.4E-08	-1.4E-04	7.0E-06	-5.2E+00	7.3E-01
Ρύθμιση Υγρασίας	18,24	4.9E-01	8.3E-07	2.2E-08	2.7E-06	7.2E-08	1.1E-02	2.8E-04	2.2E-01	1.2E-02
Ανακύκλωση & μεταφορά υπολείμματος στο ΧΥΤ.	-1.2E+01	3.5E+00	-1.0E-03	1.7E-05	6.8E-05	1.4E-06	2.6E-02	1.7E-03	---	---
Συλλογή & Μεταφορά - Σύμμικτα	3.0E+00	8.1E-01	1.1E-09	3.0E-10	6.1E-07	1.6E-07	4.2E-04	1.1E-04	2.8E+01	6.3E+00
Συλλογή & Μεταφορά - Χαρτί/Χαρτόνι	1.1E+00	2.8E-01	3.8E-10	1.0E-10	2.1E-07	5.7E-08	1.5E-04	4.0E-05	2.8E+00	6.1E-01
Συλλογή & Μεταφορά - Ανακυκλώσιμα	4.0E+00	1.1E+00	1.5E-09	3.9E-10	8.1E-07	2.1E-07	5.6E-04	1.5E-04	1.4E+01	2.8E+00
Διαλογή στην Πηγή	---	---	---	---	---	---	---	---	9.3E+00	4.6E-01
<b>Σύνολο</b>	<b>-4.9E+01</b>	<b>2.6E+01</b>	<b>-9.6E-04</b>	<b>2.5E-05</b>	<b>6.9E-05</b>	<b>3.9E-06</b>	<b>5.6E-02</b>	<b>6.7E-03</b>	<b>9.5E+01</b>	<b>3.6E+01</b>

## 5.5.4 Σενάριο 1.2

Το Σενάριο 1.2 παρουσιάζει όμοιες επιδόσεις με το Σενάριο 1.2 με την εξαίρεση της κατηγορίας “Κλιματική Αλλαγή”. Η αποτίμηση των επιπτώσεων για το Σενάριο 1.1 παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 5-4/Διάγραμμα 5-1, ενώ ο Πίνακας 5-11 περιέχει τις αναλυτικές τιμές που προκύπτουν για κάθε κατηγορία επιπτώσεων.



**Διάγραμμα 5-4: Σενάριο 1.2, Αποτίμηση επιπτώσεων ΑΚΖ και ΑΚΚΖ**

Συγκεκριμένα, για την “Κλιματική Αλλαγή”, το Σενάριο 1.2 οδηγεί σε καθαρό περιβαλλοντικό όφελος ύψους 56 kg CO<sub>2</sub> eq, το οποίο αποτελεί τη δεύτερη καλύτερη επίδοση μεταξύ των σεναρίων που έχουν μελετηθεί. Αιτία του οφέλους αυτού αποτελεί κατά κύριο λόγο ο σταθεροποιημένος άνθρακας που αποθηκεύεται κατά την ταφή στο ΧΥΤΑ Φυλής, μέσω της οποίας επιτυγχάνεται όφελος ύψους 130 kg CO<sub>2</sub> eq (αύξηση 22% σε σχέση με το Σενάριο 1.1).

Από την άλλη πλευρά, η ενεργοβόρα διεργασία της ξήρανσης/τεμαχισμού των τροφικών υπολειμμάτων οδηγεί σε ανθρακική επιβάρυνση, μειώνοντας το συνολικό όφελος που θα επιτυχανόταν, ύψους 59 kg CO<sub>2</sub> eq.

Όσον αφορά τον παράγοντα του κόστους του Σεναρίου 1.2, υπολογίζεται συνολικό κόστος κύκλου ζωής € 94 ανά τόνο, που αντιστοιχεί σε μείωση σχεδόν 20% σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση. Όπως και για την κατηγορία “Κλιματική Αλλαγή” η ξήρανση των τροφικών υπολειμμάτων (λόγω των υψηλών ενεργειακών αναγκών) αποτελεί τη σημαντικότερη πηγή κόστους, ενώ η υποκατάσταση των συμβατικών καυσίμων κίνησης των απορριμματοφόρων με συμπιεσμένο βιο-υθάνιο οδηγεί σε σημαντική μείωση του κόστους της τάξης των € 26 ανά τόνο.

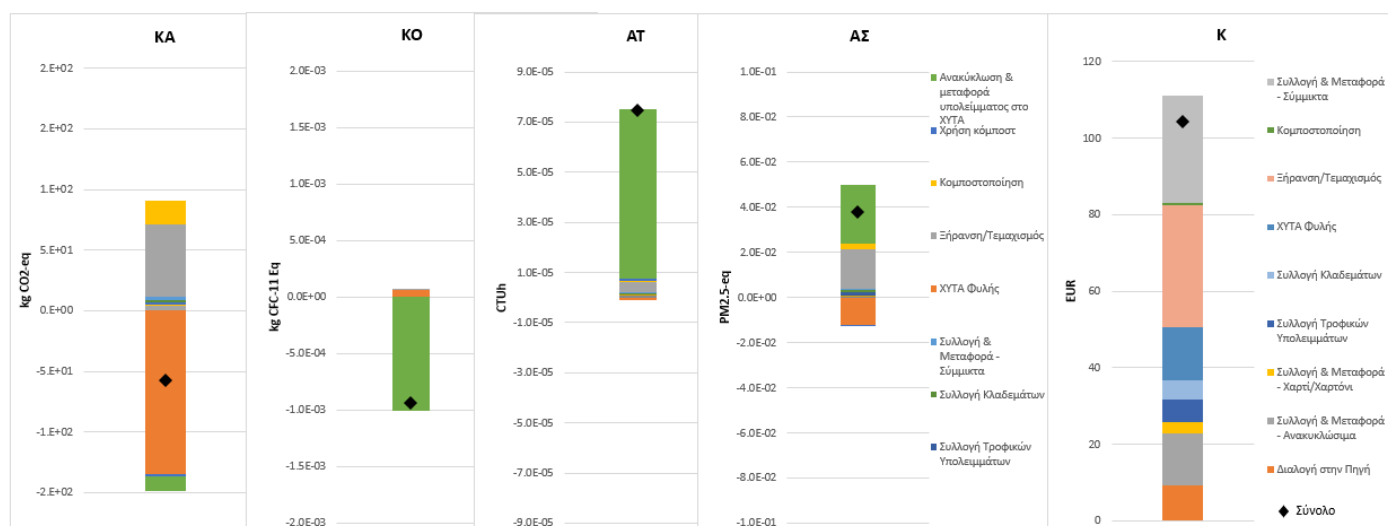
**Πίνακας 5-11: Σενάριο 1.2, Αποτίμηση επιπτώσεων ΑΚΖ και ΑΚΚΖ**

Κατηγορίες Επιπτώσεων	ΚΑ		ΚΟ		ΑΤ		ΑΣ		Κ	
	kg CO <sub>2</sub> -Eq	Αβεβαιότητα	kg CFC-11 Eq	Αβεβαιότητα	CTUh	Αβεβαιότητα	kgPM <sub>2.5</sub> -eq	Αβεβαιότητα	EUR	Αβεβαιότητα
Συλλογή & Μεταφορά - Ανακυκλώσιμα	4.0E+00	9.8E-01	1.5E-09	3.6E-10	8.0E-07	2.0E-07	5.5E-04	1.4E-04	1.4E+01	2.8E+00
Συλλογή & Μεταφορά - Χαρτί/Χαρτόνι	1.0E+00	2.8E-01	3.8E-10	1.0E-10	2.1E-07	5.6E-08	1.4E-04	3.9E-05	2.8E+00	5.6E-01
Συλλογή Τροφικών Υπολειμμάτων	2.0E+00	7.5E-01	7.4E-10	2.7E-10	4.1E-07	1.5E-07	1.6E-03	6.0E-04	5.7E+00	1.1E+00
Συλλογή Κλαδεμάτων	1.5E+00	5.3E-01	5.6E-10	1.9E-10	3.1E-07	1.1E-07	1.2E-03	4.2E-04	5.2E+00	9.3E-01
Συλλογή & Μεταφορά - Σύμμικτα	3.0E+00	7.9E-01	1.1E-09	2.9E-10	6.1E-07	1.6E-07	4.2E-04	1.1E-04	2.8E+01	6.6E+00
ΧΥΤΑ Φυλής	-1.3E+02	7.9E+00	4.1E-05	7.5E-06	-6.5E-07	1.8E-07	-9.4E-03	1.3E-03	1.3E+01	6.0E-01
Ξήρανση/Τεμαχισμός	5.9E+01	2.7E+00	1.1E-05	5.4E-07	4.1E-06	2.0E-07	1.7E-02	8.2E-04	2.7E+01	9.0E+00
Εναιώρηση FORBI	1.4E+00	5.2E-02	1.5E-07	5.4E-09	3.3E-08	1.2E-09	2.5E-04	9.1E-06	2.2E-01	1.2E-02
Διβάθμιο σύστημα Αναερόβιας Χώνευσης	2.2E+01	1.6E+00	9.1E-07	6.6E-08	2.2E-06	2.0E-07	7.8E-03	7.5E-04	1.7E+01	9.6E+00
Εξευγενισμός και Συμπίεση Βιοαερίου	-4.5E+01	4.3E+00	4.5E-07	4.6E-08	-9.7E-06	9.2E-07	-1.8E-03	2.6E-04	-2.6E+01	2.6E+00
Κομποστοποίηση	2.0E+01	1.2E+00	2.4E-10	3.0E-11	1.3E-07	1.6E-08	2.5E-03	1.5E-04	6.8E-01	2.4E-01
Χρήση κόμποστ	-1.3E+00	7.2E-02	-4.4E-13	2.5E-14	6.9E-07	3.9E-08	-1.4E-04	8.2E-06	-5.2E+00	7.5E-01
Ρύθμιση Υγρασίας	1.8E+01	4.6E-01	8.3E-07	2.1E-08	2.7E-06	6.8E-08	1.0E-02	2.7E-04	2.2E+00	1.1E-01
Ανακύκλωση & μεταφορά υπολείμματος στο ΧΥΤΑ	-1.2E+01	3.9E+00	-1.0E-03	2.5E-05	6.8E-05	1.4E-06	2.6E-02	2.1E-03	0.0E+00	0.0E+00
Διαλογή στην Πηγή	---	---	---	---	---	---	---	---	9.2E+00	4.6E-01
<b>Σύνολο</b>	<b>-5.6E+01</b>	<b>2.5E+01</b>	<b>-9.6E-04</b>	<b>3.3E-05</b>	<b>6.9E-05</b>	<b>3.7E-06</b>	<b>5.7E-02</b>	<b>7.0E-03</b>	<b>9.4E+01</b>	<b>3.5E+01</b>

## 5.5.5 Σενάριο 2

Η αποτίμηση των επιπτώσεων για το Σενάριο 2 παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 5-5, ενώ ο Πίνακας 5-12 περιέχει τις αναλυτικές τιμές που προκύπτουν για κάθε κατηγορία επιπτώσεων.

Το Σενάριο 2 παρουσιάζει το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό όφελος μεταξύ των υπό εξέταση σεναρίων όσον αφορά την κατηγορία “Κλιματική Αλλαγή”, ύψους 57 kg CO<sub>2</sub> eq ανά τόνο διαχειριζόμενων ΑΣΑ. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, η αποθήκευση σταθεροποιημένου άνθρακα είναι που προκαλεί το μεγαλύτερο ανθρακικό όφελος (-130 kg CO<sub>2</sub> eq ανά τόνο). Όσον αφορά στην “Καταστροφή του Όζοντος”, επιτυγχάνεται περιβαλλοντικό όφελος της τάξης των 9.5E-4 kg CFC-11 eq, ενώ για την “Ανθρώπινη Τοξικότητα” παρατηρείται αύξηση της τάξης του 12% σε σύγκριση με την υφιστάμενη κατάσταση (καθαρή επιβάρυνση ύψους 7.4E-05 CTUh), που οφείλεται κατά κύριο λόγο στη διεργασία της ξήρανσης. Ταυτόχρονα, τα οφέλη από την ταφή των σύμμικτων μειώνονται από -4.8E-06 CTUh σε -1E-06 CTUh. Τέλος αναφορικά με τα αιωρούμενα στερεά η συνολική επιβάρυνση είναι 3.8E-02 kg PM2.5 eq. Οι διεργασίες με τη μεγαλύτερη συνεισφορά είναι η ανακύκλωση καθώς και η ενεργοβόρα ξήρανση με 2.6E-02 kg PM2.5 και 1.7E-02 PM2.5, αντίστοιχα.



**Διάγραμμα 5-5: Σενάριο 2, Αποτίμηση επιπτώσεων ΑΚΖ και ΑΚΚΖ**

Τέλος, όσον αφορά τον παράγοντα του κόστους, υπολογίζεται συνολικό κόστος κύκλου ζωής ύψους € 105 ανά τόνο ΑΣΑ. Σε σύγκριση με το Σενάριο 0.1, παρουσιάζεται αύξηση της τάξης του 20%, η οποία οφείλεται στο κόστος ξήρανσης/τεμαχισμού. Από την άλλη, σημαντική εξοικονόμηση επιτυγχάνεται μέσω της υποκατάστασης των χημικών λιπασμάτων από το παραγόμενο κόμποστ, που όμως δεν είναι επαρκής για να υπερκαλύψει το κόστος παραγωγής του FORBI. Παρόλ' αυτά το κόστος κύκλου ζωής για το Σενάριο 2 παραμένει χαμηλότερο από το Σενάριο 0, γεγονός που οφείλεται στα μειωμένα τέλη πύλης στο ΧΥΤΑ αλλά και τη μειωμένη κατανάλωση καυσίμου για τη μεταφορά των απορριμμάτων εκεί.



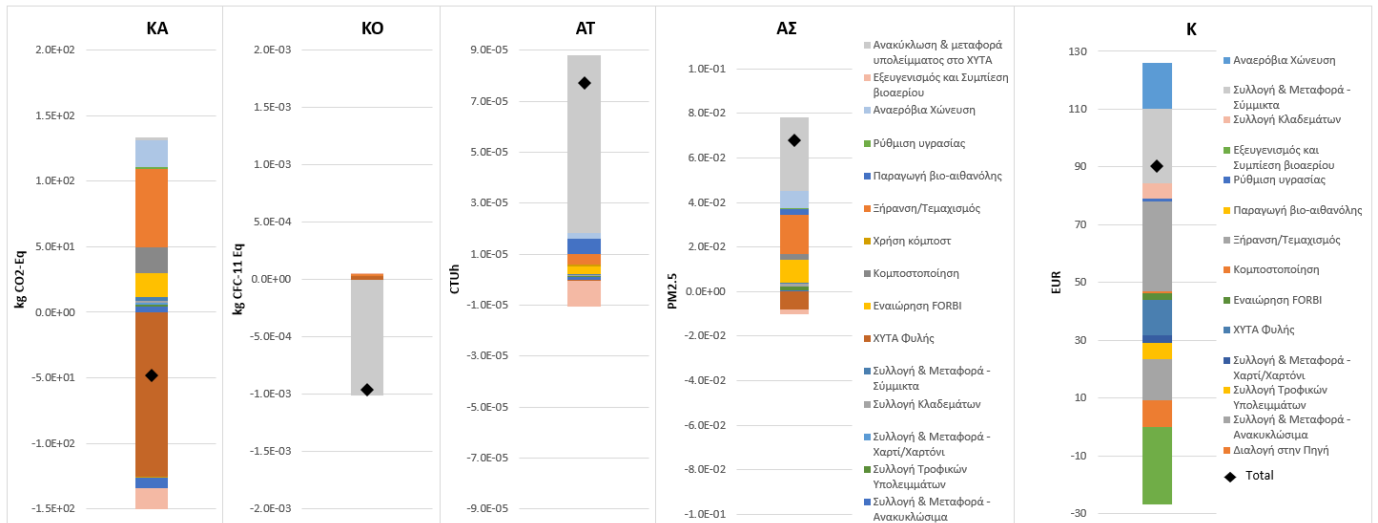
**Πίνακας 5-12: Σενάριο 2, Αποτίμηση επιπτώσεων ΑΚΖ και ΑΚΚΖ**

Κατηγορίες Επιπτώσεων	ΚΑ		ΚΟ		ΑΤ		ΑΣ		Κ	
	kg CO <sub>2</sub> -Eq	Αβεβαιότητα	kg CFC-11 Eq	Αβεβαιότητα	CTUh	Αβεβαιότητα	kgPM <sub>2.5</sub> -eq	Αβεβαιότητα	EUR	Αβεβαιότητα
Συλλογή & Μεταφορά - Ανακυκλώσιμα	4.0E+00	1.0E+00	1.5E-09	3.8E-10	8.0E-07	2.1E-07	5.5E-04	1.4E-04	1.4E+01	2.5E+00
Συλλογή & Μεταφορά - Χαρτί/Χαρτόνι	1.1E+00	2.8E-01	3.9E-09	1.0E-10	2.1E-07	5.5E-08	1.5E-04	3.8E-05	2.9E+00	5.5E-01
Συλλογή Τροφικών Υπολειμμάτων	2.0E+00	7.1E-01	7.2E-10	2.6E-10	3.9E-07	1.4E-07	1.6E-03	5.8E-04	5.8E+00	1.1E+00
Συλλογή Κλαδεμάτων	1.5E+00	5.5E-01	5.7E-10	2.0E-10	3.1E-07	1.1E-07	1.3E-03	4.5E-04	5.2E+00	9.6E-01
Συλλογή & Μεταφορά - Σύμμικτα	3.0E+00	7.8E-01	1.1E-09	2.9E-10	6.0E-07	1.6E-07	4.2E-04	1.1E-04	2.8E+01	6.3E+00
ΧΥΤΑ Φυλής	-1.3E+02	8.4E+00	5.7E-05	6.7E-06	-1.0E-06	1.7E-07	-1.2E-02	1.2E-03	1.4E+01	5.3E-01
Ξήρανση/Τεμαχισμός	6.0E+01	2.5E+00	1.1E-05	4.9E-07	4.1E-06	2.0E-07	1.7E-02	8.0E-04	3.2E+01	1.1E+01
Κομποστοποίηση	2.0E+01	1.2E+00	2.7E-10	3.4E-11	1.4E-07	1.8E-08	2.5E-03	1.5E-04	7.8E-01	2.8E-01
Χρήση κόμποστ	-1.7E+00	6.6E-02	-5.8E-13	2.3E-14	9.0E-07	3.6E-08	-1.9E-04	7.5E-06	-6.8E+00	8.0E-01
Ανακύκλωση & μεταφορά υπολειμματος στο ΧΥΤ	-1.2E+01	4.0E+00	-1.0E-03	2.6E-05	6.8E-05	1.4E-06	2.6E-02	2.1E-03	---	---
Διαλογή στην Πηγή	---	---	---	---	---	---	---	---	9.3E+00	4.6E-01
<b>Σύνολο</b>	<b>-5.7E+01</b>	<b>2.0E+01</b>	<b>-9.5E-04</b>	<b>3.3E-05</b>	<b>7.4E-05</b>	<b>2.5E-06</b>	<b>3.8E-02</b>	<b>5.5E-03</b>	<b>1.0E+02</b>	<b>2.5E+01</b>

### 5.5.6 Σενάριο 3

Η αποτίμηση των επιπτώσεων για το Σενάριο 3 παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 5-6, ενώ ο Πίνακας 5-13 περιέχει τις αναλυτικές τιμές που προκύπτουν για κάθε κατηγορία επιπτώσεων. Σε σχέση με την κατηγορία “Κλιματική Αλλαγή” παρατηρείται επίσης καθαρό περιβαλλοντικό όφελος της τάξης των 48 kg CO<sub>2</sub> eq. Όπως και στα Σενάρια 1.1 και 1.2 οι διεργασίες που συνεισφέρουν στο μεγαλύτερο βαθμό είναι η αποθήκευση του σταθεροποιημένου άνθρακα κατά την ταφή, αλλά και η υποκατάσταση των ορυκτών καυσίμων με εναλλακτικά βιογενούς προέλευσης στα απορριμματοφόρα του Δήμου, που αντιστοιχούν σε όφελος της τάξης των 130 και 47 kg CO<sub>2</sub> eq. Από την άλλη πλευρά, η ξήρανση/τεμαχισμό προκαλεί το μεγαλύτερο ανθρακικό αποτύπωμα ύψους 59 kg CO<sub>2</sub> eq.

Όσον αφορά την κατηγορία “Καταστροφή του Όζοντος” το Σενάριο 3 οδηγεί σε καθαρό όφελος της τάξης των -9.6E-04 kg CFC-11 eq, ενώ για τις κατηγορίες “Ανθρώπινη Τοξικότητα” και “Αιωρούμενα Στερεά” τα αποτελέσματα της ανάλυσης δείχνουν ότι το Σενάριο 3 πετυχαίνει τη χειρότερη επίδοση μεταξύ των σεναρίων που μελετήθηκαν. Συγκεκριμένα, η περιβαλλοντική επιβάρυνση των δύο αυτών κατηγοριών είναι 7.7E-05 CTUh και 6.8E-02 kg PM<sub>2.5</sub> αντίστοιχα.



**Διάγραμμα 5-6: Σενάριο 3, Αποτίμηση επιπτώσεων ΑΚΖ και ΑΚΚΖ**

Σε σύγκριση με τα Σενάρια 1.1 και 1.2 παρατηρείται αύξηση 11% όσον αφορά την “Ανθρώπινη Τοξικότητα” και 16% όσον αφορά τα “Αιωρούμενα Στερεά”. Η συγκεκριμένη αύξηση οφείλεται

στη διεργασία παραγωγής της βιο-αιθανόλης, κατά κύριο λόγο (CTU<sub>h</sub> και 2.8E-02 kg PM2.5 eq, αντίστοιχα).

Τέλος, όσον αφορά στην Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής, το Σενάριο 3 οδηγεί σε συνολικό κόστος € 90 ανά τόνο ΑΣΑ. Σε σύγκριση με τα Σενάρια 1.1 και 1.2 το κόστος είναι χαμηλότερο λόγω της αξιοποίησης της βιο-αιθανόλης, προς υποκατάσταση κατά 10% συμβατικών καυσίμων κίνησης. Οι δύο παράγοντες που οδηγούν στη μεγαλύτερη εξοικονόμηση είναι και σε αυτήν την περίπτωση η υποκατάσταση των συμβατικών καυσίμων στα απορριμματοφόρα του Δήμου και η υποκατάσταση των χημικών λιπασμάτων από κόμποστ (-€ 27 και -€ 8 αντίστοιχα). Από την άλλη, η ξήρανση/τεμαχισμός των τροφικών υπολειμμάτων καθώς και η συλλογή και μεταφορά στο ΧΥΤΑ των σύμμικτων αντιστοιχούν στο μεγαλύτερο μέρος του κόστους (€ 31 και € 26 αντίστοιχα).

**Πίνακας 5-13: Σενάριο 3, Αποτίμηση επιπτώσεων ΑΚΖ και ΑΚΚΖ**

Κατηγορίες Επιπτώσεων	ΚΑ		ΚΟ		ΑΤ		ΑΣ		Κ	
	kg CO <sub>2</sub> -Eq	Αβεβαιότητα	kg CFC-11 Eq	Αβεβαιότητα	CTU <sub>h</sub>	Αβεβαιότητα	kgPM <sub>2.5</sub> -eq	Αβεβαιότητα	EUR	Αβεβαιότητα
Συλλογή & Μεταφορά - Ανακυκλώσιμα	4.1E+00	1.1E+00	1.5E-09	3.9E-10	8.3E-07	2.1E-07	5.7E-04	1.5E-04	1.4E+01	2.7E+00
Συλλογή Τροφικών Υπολειμμάτων	2.0E+00	7.0E-01	7.2E-10	2.6E-10	3.9E-07	1.4E-07	1.6E-03	5.6E-04	5.7E+00	1.0E+00
Συλλογή & Μεταφορά - Χαρτί/Χαρτόνι	1.0E+00	2.6E-01	3.8E-10	9.6E-11	2.1E-07	5.3E-08	1.4E-04	3.6E-05	2.8E+00	5.4E-01
Συλλογή Κλαδεμάτων	1.5E+00	5.7E-01	5.7E-10	2.1E-10	3.1E-07	1.1E-07	1.2E-03	4.6E-04	5.2E+00	9.0E-01
Συλλογή & Μεταφορά - Σύμμικτα	2.9E+00	7.4E-01	1.0E-09	2.7E-10	5.7E-07	1.5E-07	4.0E-04	1.0E-04	2.6E+01	5.3E+00
ΧΥΤΑ Φυλής	-1.3E+02	7.4E+00	3.4E-05	7.1E-06	-5.0E-07	1.8E-07	-8.1E-03	1.3E-03	1.2E+01	5.5E-01
Εναιώρηση FORBI	1.8E+01	4.7E-01	8.3E-07	2.2E-08	2.7E-06	6.9E-08	1.1E-02	2.7E-04	2.2E+00	1.0E-01
Κομποστοποίηση	2.0E+01	1.2E+00	2.4E-10	3.2E-11	1.3E-07	1.7E-08	2.5E-03	1.5E-04	6.9E-01	2.6E-01
Χρήση κόμποστ	-1.3E+00	7.9E-02	-4.4E-13	2.7E-14	6.9E-07	4.3E-08	-1.4E-04	8.9E-06	0.0E+00	0.0E+00
Ξήρανση/Τεμαχισμός	5.9E+01	2.5E+00	1.1E-05	5.1E-07	4.1E-06	1.9E-07	1.7E-02	7.8E-04	3.1E+01	1.1E+01
Παραγωγή βιο-αιθανόλης	-8.0E+00	8.1E-01	1.9E-06	1.8E-07	6.3E-06	7.1E-07	2.8E-03	4.3E-04	-8.0E+00	1.5E+00
Ρύθμιση υγρασίας	1.4E+00	4.8E-02	1.5E-07	5.0E-09	3.3E-08	1.1E-09	2.5E-04	8.5E-06	2.2E-01	1.2E-02
Αναερόβια Χώνευση	2.1E+01	1.6E+00	7.7E-07	6.3E-08	2.0E-06	2.0E-07	7.6E-03	7.7E-04	1.6E+01	8.8E+00
Εξευγενισμός και Συμπύεση βιοαερίου	-4.7E+01	5.6E+00	4.4E-07	5.4E-08	-1.0E-05	1.2E-06	-2.1E-03	3.3E-04	-2.7E+01	3.1E+00
Ανακύκλωση & μεταφορά υπολείμματος στο ΧΥ	2.1E+00	4.0E+00	-1.0E-03	2.5E-05	7.0E-05	1.4E-06	3.3E-02	2.1E-03	---	---
Διαλογή στην Πηγή	---	---	---	---	---	---	---	---	9.2E+00	4.4E-01
<b>Σύνολο</b>	<b>-4.8E+01</b>	<b>2.7E+01</b>	<b>-9.6E-04</b>	<b>3.3E-05</b>	<b>7.7E-05</b>	<b>4.7E-06</b> ##	<b>6.8E-02</b>	<b>7.4E-03</b>	<b>9.0E+01</b>	<b>3.6E+01</b>

## 5.5.7 Σενάριο 4

Η αποτίμηση των επιπτώσεων για το Σενάριο 4 παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 5-7, ενώ ο Πίνακας 5-14 περιέχει τις αναλυτικές τιμές που προκύπτουν για κάθε κατηγορία επιπτώσεων.

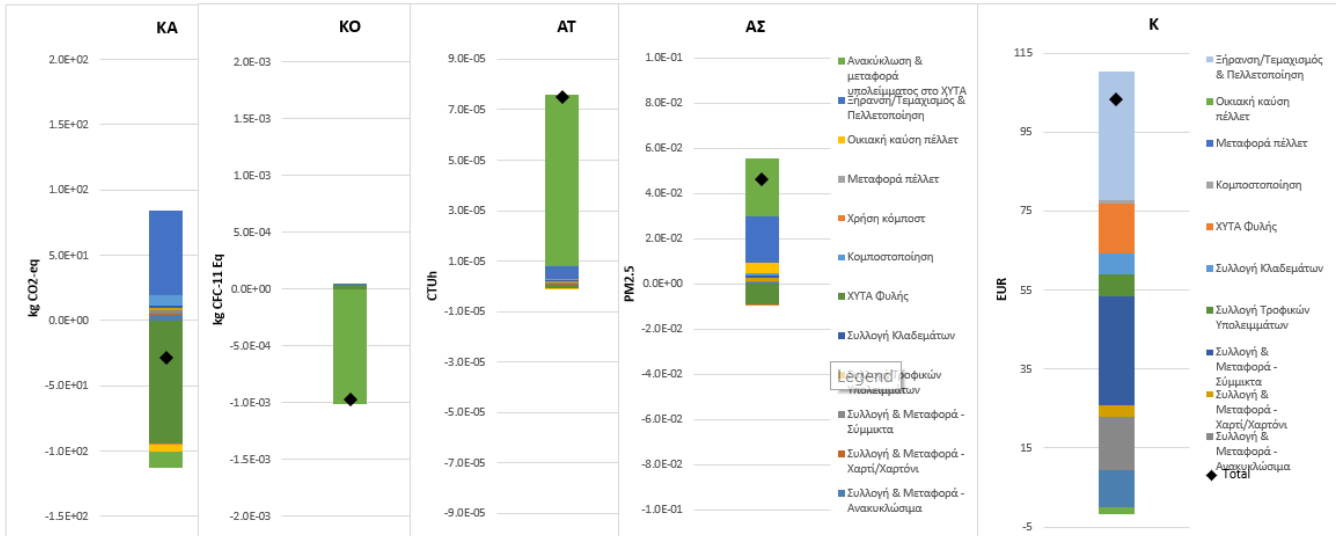
Όσον αφορά στην κατηγορία “Κλιματική Αλλαγή”, το Σενάριο 4 οδηγεί σε καθαρό περιβαλλοντικό όφελος 28 kg CO<sub>2</sub> eq, το οποίο και αποτελεί τη χειρότερη απόδοση μεταξύ των εναλλακτικών σεναρίων που εξετάστηκαν. Η διεργασία της ξήρανσης και του τεμαχισμού των τροφικών υπολειμμάτων, καθώς και η πελλετοποίηση του FORBI περιορίζει σημαντικά το ανθρακικό όφελος του Σεναρίου, μέσω της επιβάρυνσης των 65 kg CO<sub>2</sub> eq που προκαλούν. Η ταφή των ΑΣΑ αποτελεί και εδώ τη μεγαλύτερη πηγή ανθρακικού οφέλους, λόγω της αποθήκευσης σταθεροποιημένου άνθρακα, ύψους 94 kg CO<sub>2</sub> eq, ενώ και η υποκατάσταση του φυσικού αερίου από τα βιολογικά πέλλετς για την οικιακή θέρμανση οδηγεί σε όφελος της τάξης των 4.9 kg CO<sub>2</sub>.

Αναφορικά με την κατηγορία “Καταστροφή του Όζοντος”, το Σενάριο 4 επιδεικνύει το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό όφελος (μεταξύ των σεναρίων που εξετάστηκαν) ύψους 9.6E-04 kg CFC-11 eq. Σε σύγκριση με τα υπόλοιπα σεναρία, η αύξηση του οφέλους οφείλεται στην υποκατάσταση του φυσικού αερίου οικιακή θέρμανσης από τα πέλλετς (-1.8E-06 kg CFC-11 eq).

Βάσει των αποτελεσμάτων της ανάλυσης για την κατηγορία “Ανθρώπινη Τοξικότητα” η συνολική επιβάρυνση είναι 7.5E-05 CTU<sub>h</sub>. Σε σύγκριση με το Σενάριο 2, παρά το γεγονός ότι παρατηρείται περιβαλλοντικό όφελος λόγω της υποκατάστασης φυσικού αερίου από πέλλετς, αυτό το όφελος

αντισταθμίζεται λόγω των υψηλών ενεργειακών αναγκών της ξήρανσης/τεμαχισμού και της πελλετοποίησης (4.8E-06 CTUh).

Όσον αφορά στα "Αιωρούμενα Στερεά" υπάρχει καθαρή επιβάρυνση ύψους 4.7E-02 kg PM2.5 eq. Η διεργασία με τη μεγαλύτερη επιβάρυνση είναι και πάλι η ξήρανση και η πελλετοποίηση με συνολική επιβάρυνση 2E-02 kg PM2.5 eq.



**Διάγραμμα 5-7: Σενάριο 4, Αποτίμηση επιπτώσεων ΑΚΖ και ΑΚΚΖ**

Όσον αφορά την Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής του Σεναρίου 4, υπολογίζεται συνολικό κόστος € 110 ανά τόνο αποβλήτων. Η διεργασία της ξήρανσης/τεμαχισμού και η πελλετοποίηση μαζί με τη συλλογή και μεταφορά των συμμίκτων στο ΧΥΤΑ Φυλής αποτελούν τις δύο διεργασίες με το μεγαλύτερο μερίδιο κόστους ( € 32 και € 28 αντίστοιχα). Από την άλλη πλευρά, σημαντική εξοικονόμηση επιτυγχάνεται από την υποκατάσταση των χημικών λιπασμάτων και του φυσικού αερίου από κόμποστ και πέλλετες αντίστοιχα ( € 5.1 και € 1.9 αντίστοιχα).

**Πίνακας 5-14: Σενάριο 4, Αποτίμηση επιπτώσεων ΑΚΖ και ΑΚΚΖ**

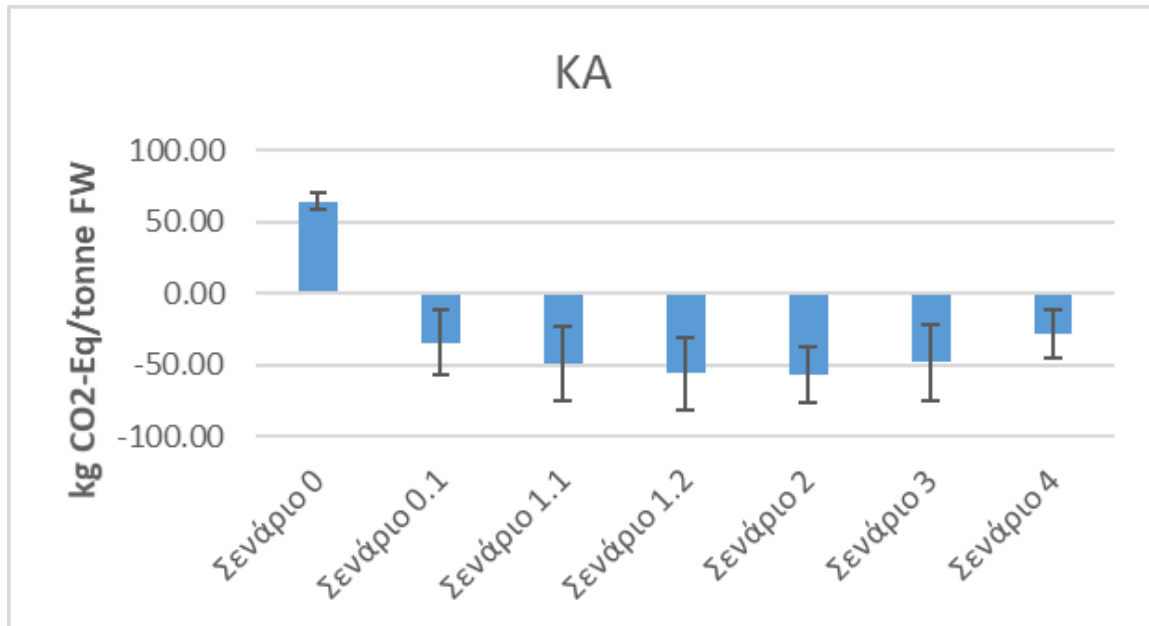
Κατηγορίες Επιπτώσεων	KA		KO		AT		AS		K	
	kg CO2-Eq	Αβεβαιότητα	kg CFC-11 Eq	Αβεβαιότητα	CTUh	Αβεβαιότητα	kgPM2.5-eq	Αβεβαιότητα	EUR	Αβεβαιότητα
Συλλογή & Μεταφορά - Ανακυκλώσιμα	4.0E+00	1.0E+00	1.5E-09	3.7E-10	8.0E-07	2.0E-07	5.5E-04	1.4E-04	1.4E+01	2.7E+00
Συλλογή & Μεταφορά - Χαρτί/Χαρτόνι	1.0E+00	2.8E-01	3.8E-10	1.0E-10	2.1E-07	5.6E-08	1.4E-04	3.8E-05	2.8E+00	5.7E-01
Συλλογή & Μεταφορά - Σύμμικτα	3.0E+00	8.4E-01	1.1E-09	3.1E-10	6.1E-07	1.7E-07	4.2E-04	1.2E-04	2.8E+01	6.1E+00
Συλλογή Τροφικών Υπολειμμάτων	2.0E+00	7.1E-01	7.2E-10	2.6E-10	4.0E-07	1.4E-07	1.6E-03	5.7E-04	5.7E+00	9.9E-01
Συλλογή Κλαδεμάτων	1.5E+00	5.3E-01	5.7E-10	2.0E-10	3.1E-07	1.1E-07	1.2E-03	4.3E-04	5.3E+00	9.4E-01
ΧΥΤΑ Φυλής	-9.4E+01	6.1E+00	3.9E-05	7.1E-06	-6.1E-07	1.7E-07	-9.1E-03	1.3E-03	1.3E+01	5.9E-01
Κομποστοποίηση	7.9E+00	5.2E-01	2.2E-10	2.8E-11	1.2E-07	1.5E-08	9.9E-04	6.4E-05	6.4E-01	2.3E-01
Χρήση κόμποστ	-1.2E+00	6.5E-02	-4.3E-13	2.3E-14	6.7E-07	3.6E-08	-1.4E-04	7.4E-06	-5.1E+00	1.2E-01
Μεταφορά πέλλετ	1.0E-01	3.8E-02	3.8E-11	1.4E-11	2.1E-08	7.7E-09	8.3E-05	3.1E-05	2.4E-01	6.0E-02
Οικιακή καύση πέλλετ	-4.9E+00	1.7E-01	-1.8E-06	6.2E-08	-5.0E-08	1.7E-09	4.3E-03	1.5E-04	-1.9E+00	1.1E-01
Εξήρανση/Τεμαχισμός & Πελλετοποίηση	6.5E+01	2.7E+00	1.1E-05	5.3E-07	4.8E-06	2.1E-07	2.0E-02	8.7E-04	3.2E+01	1.1E+01
Ανακύκλωση & μεταφορά υπολειμματος στο ΧΥΤ	-1.2E+01	3.8E+00	-1.0E-03	2.4E-05	6.8E-05	1.3E-06	2.6E-02	2.0E-03	---	---
Διαλογή στην Πηγή	---	---	---	---	---	---	---	---	9.3E+00	4.6E-01
<b>Σύνολο</b>	<b>-2.8E+01</b>	<b>1.7E+01</b>	<b>-9.6E-04</b>	<b>3.2E-05</b>	<b>7.5E-05</b>	<b>2.4E-06</b>	<b>4.7E-02</b>	<b>5.6E-03</b>	<b>1.0E+02</b>	<b>2.4E+01</b>

## 5.6 Σύγκριση Σεναρίων

Στις παρακάτω ενότητες παρουσιάζεται συνοπτικά συγκριτική μελέτη μεταξύ των υπό εξέταση σεναρίων για κάθε μία από τις κατηγορίες επιπτώσεων.

### 5.6.1 Κλιματική Αλλαγή

Βάσει των αποτελεσμάτων της ανάλυσης αβεβαιότητας που υλοποιήθηκε για την κατηγορία “Κλιματική Αλλαγή” προκύπτει ότι το σενάριο που περιγράφει την υφιστάμενη κατάσταση χαρακτηρίζεται από τη μικρότερη αβεβαιότητα, με τυπική απόκλιση 8.8%, ενώ για το Σενάριο 1.2 η τυπική απόκλιση είναι 44%, για το Σενάριο 2, 34%, για το Σενάριο 1.1, 51% και η μέγιστη τιμή παρατηρείται στο Σενάριο 0.1 με 65%. Εξετάζοντας χωριστά κάθε μία από τις διεργασίες που συμπεριλαμβάνονται στα Σενάρια η μεγαλύτερη αβεβαιότητα προκύπτει για την ταφή των συμμίκτων στο ΧΥΤΑ Φυλής και με μικρή διαφορά η διεργασία του εξευγενισμού και της συμπίεσης του βιοαερίου.

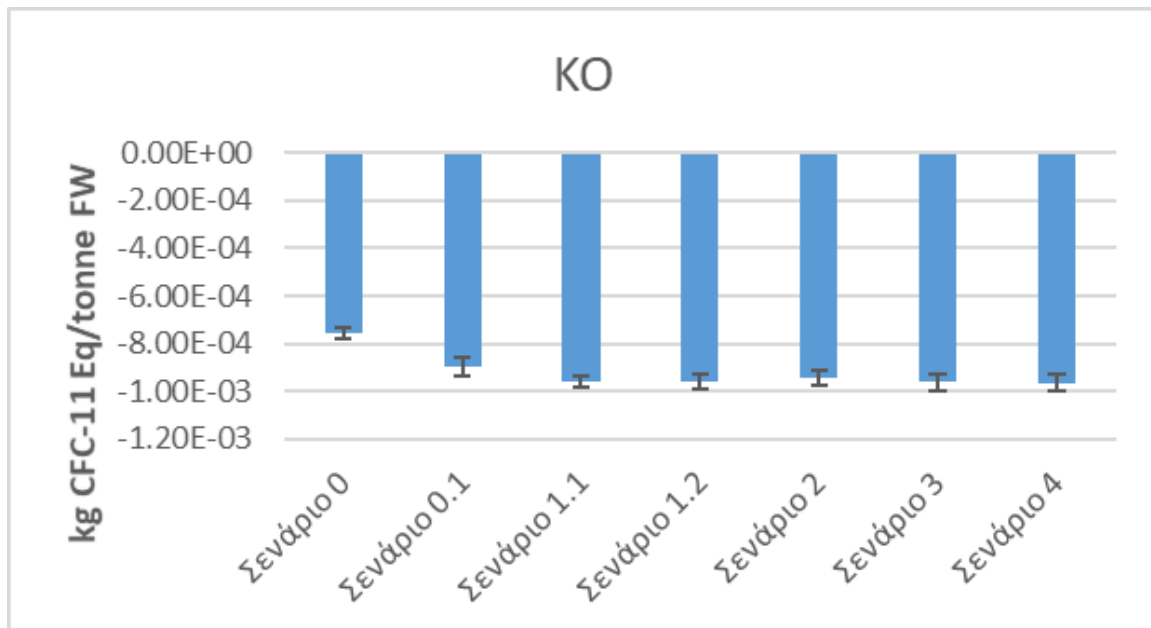


Διάγραμμα 5-8: Συγκριτική ανάλυση επιπτώσεων για την κατηγορία “Κλιματική Αλλαγή”

Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 5-8 το Σενάριο 0 οδηγεί στη μεγαλύτερη επίπτωση ως προς την “Κλιματική Αλλαγή”, ενώ είναι και το μόνο μεταξύ όσων μελετήθηκαν που οδηγεί σε καθαρή επιβάρυνση, σε αντίθεση με τα εναλλακτικά σενάρια που στο σύνολο τους οδηγούν σε καθαρό όφελος, ως προς τη συγκεκριμένη κατηγορία. Λόγω της αβεβαιότητας που χαρακτηρίζει τα αποτελέσματα της ανάλυσης για τα Σενάρια 0.1 έως 4, δεν είναι σαφές ποιο θα οδηγεί στο μεγαλύτερο όφελος και απαιτείται περαιτέρω ανάλυση με πιο ακριβή δεδομένα εισόδου.

### 5.6.2 Καταστροφή του Όζοντος

Σχετικά με την κατηγορία “Καταστροφή του Όζοντος” παρατηρείται ότι η αβεβαιότητα για όλα τα Σενάρια είναι χαμηλότερη σε σχέση με την “Κλιματική Αλλαγή”. Συγκεκριμένα, η αβεβαιότητα κυμαίνεται από 2.6% για το Σενάριο 1.1 έως 4.5% για το Σενάριο 0.1. Για όλα τα υπό εξέταση Σενάρια οι διεργασίες με τη μεγαλύτερη αβεβαιότητα είναι η ανακύκλωση και η ταφή των συμμίκτων. Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 5-9, όλα τα σενάρια (συμπεριλαμβανομένου και του Σεναρίου 0) οδηγούν σε καθαρό περιβαλλοντικό όφελος σε σχέση με την κατηγορία “Καταστροφή του Όζοντος”, ενώ η συνολική του επίδοση είναι συγκρίσιμη, καθώς μόνο το Σενάριο 0 ξεχωρίζει έχοντας αισθητά χαμηλότερη επίδοση.

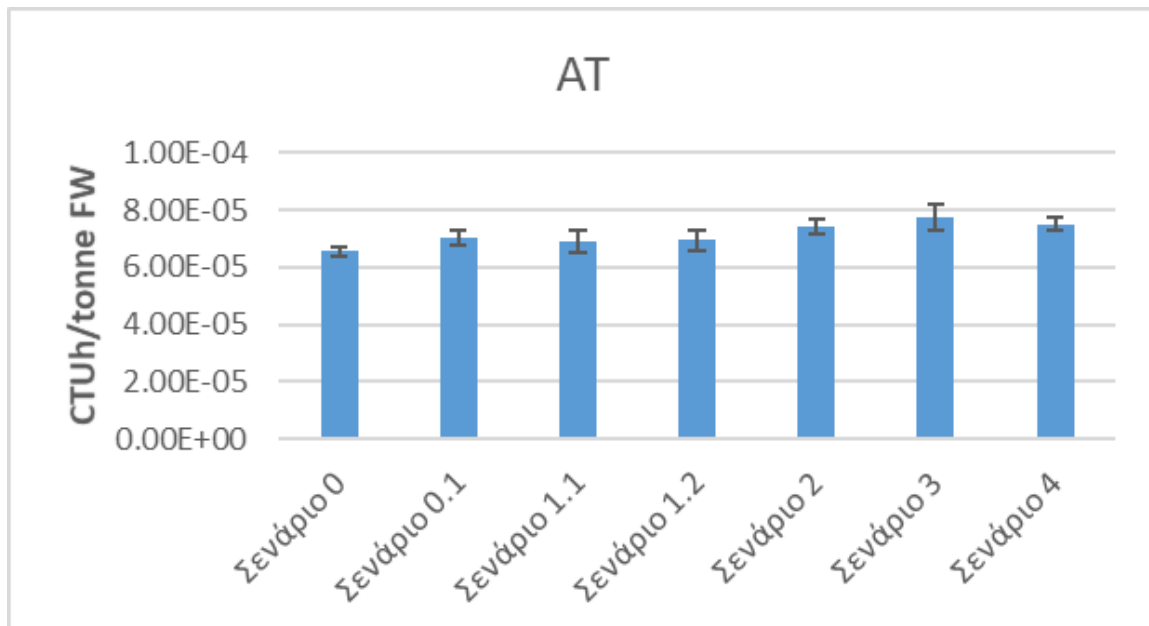


Διάγραμμα 5-9: Συγκριτική ανάλυση επιπτώσεων για την κατηγορία “Καταστροφή του Όζοντος”

### 5.6.3 Ανθρώπινη Τοξικότητα

Όπως και για την κατηγορία “Καταστροφή του Όζοντος” και στην περίπτωση της “Ανθρώπινης Τοξικότητας” τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζουν σχετικά χαμηλή αβεβαιότητα, καθιστώντας τα συμπεράσματα της ανάλυσης περισσότερο ασφαλή. Στην περίπτωση της “Ανθρώπινης Τοξικότητας” το ποσοστό της αβεβαιότητας κυμαίνεται από 2.3% έως 6.1%, με την ανακύκλωση να είναι και εδώ η διεργασία με της οποία η μοντελοποίηση προκαλεί το μεγαλύτερο μέρος της συνολικής αβεβαιότητας των αποτελεσμάτων.

Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 5-10 την καλύτερη επίδοση (με αμελητέα όμως διαφορά, η οποία υπερκαλύπτεται από την αβεβαιότητα) επιτυγχάνεται στο Σενάριο 0.

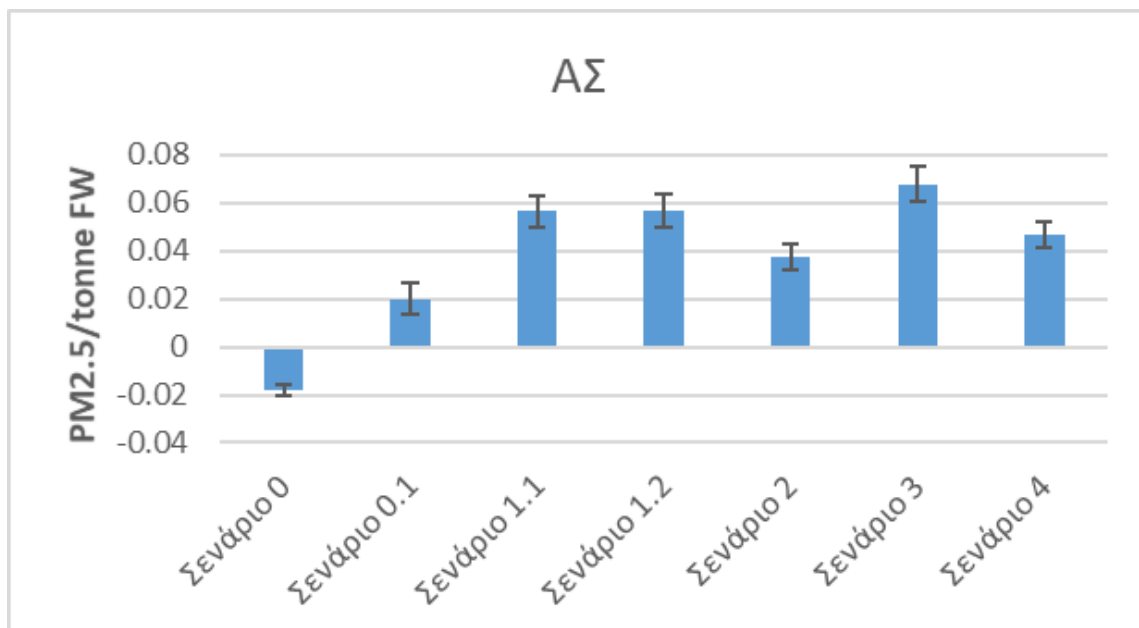


Διάγραμμα 5-10: Συγκριτική ανάλυση επιπτώσεων για την κατηγορία "Ανθρώπινη Τοξικότητα"

#### 5.6.4 Αιωρούμενα Στερεά

Η αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων για την κατηγορία "Αιωρούμενα Στερεά" είναι σημαντικά υψηλότερη σε σχέση με τις προηγούμενες και συγκρίσιμη με την αντίστοιχη της κατηγορίας "Κλιματική Αλλαγή". Συγκεκριμένα, η μεγαλύτερη αβεβαιότητα υπολογίζεται για το Σενάριο 0.1 στο 35%, ενώ από την άλλη πλευρά η μικρότερη αβεβαιότητα για το Σενάριο 3 στο 11%. Εξετάζοντας χωριστά τις διεργασίες του εκάστοτε Σεναρίου φαίνεται ότι και στην περίπτωση της κατηγορίας "Αιωρούμενα Στερεά" οι διεργασίες με το μεγαλύτερο βαθμό αβεβαιότητας των παραμέτρων εισόδου είναι η ταφή των συμμίκτων και η ανακύκλωση.

Όσον αφορά τις επιδόσεις των σεναρίων φαίνεται ότι ομοίως με την κατηγορία "Ανθρώπινη Τοξικότητα" στην περίπτωση των "Αιωρούμενων Στερεών" το Σενάριο 0 είναι αυτό με τη βέλτιστη επίδοση και μάλιστα αυτή τη φορά με σημαντική διαφορά καθώς είναι το μόνο εκ των σεναρίων που παρουσιάζει θετικό (αν και οριακά) περιβαλλοντικό αποτύπωμα ενώ τα εναλλακτικά σενάρια που μελετήθηκαν εμφανίζουν στο σύνολό τους σημαντική περιβαλλοντική επιβάρυνση, όσον αφορά στη συγκεκριμένη κατηγορία.



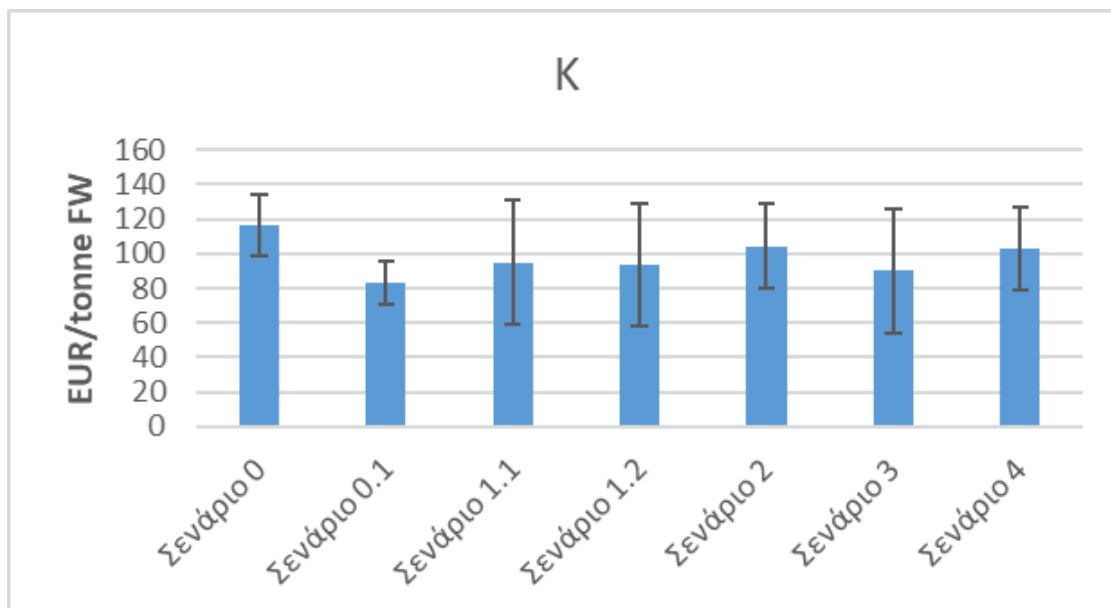
Διάγραμμα 5-11: Συγκριτική ανάλυση επιπτώσεων για την κατηγορία “Αιωρούμενα Στερεά”

### 5.6.5 Κόστος

Τέλος, όσον αφορά στην Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής, παρατηρείται ότι η μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα επιτυγχάνεται στα Σενάρια 0 και 0.1. Συγκεκριμένα, το Κόστος Κύκλου Ζωής για το Σενάριο 0 κυμαίνεται στο εύρος των € 120 ±15%, ενώ η αντίστοιχη τιμή για το Σενάριο 0.1 είναι στα € 83 ±15%.

Για τα υπόλοιπα σενάρια το ύψος της αβεβαιότητας αυξάνεται, με τα Σενάρια 2 και 4 να φτάνει το 22%, ενώ το Σενάριο 3 έχει την υψηλότερη τιμή με 40%. Όσον αφορά τη διεργασία με τη μεγαλύτερη συνεισφορά στο δείκτη της αβεβαιότητας, αυτή είναι η συλλογή και μεταφορά των απορριμμάτων στο ΧΥΤΑ Φυλής, ενώ για τα Σενάρια 1.1 έως 4 η διεργασία της ξήρασης//τεμαχισμού είναι αντίστοιχα αυτή με τη μεγαλύτερη συνεισφορά στη συνολική αβεβαιότητα των Σεναρίων.

Συνολικά, φαίνεται ότι το σύνολο των Σεναρίων οδηγούν σε μείωση του συνολικού διαχειριστικού κόστους (σε όρους κόστους κύκλου ζωής), ωστόσο ασφαλή συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν μόνο για το Σενάριο 0.1, καθώς ο υψηλός βαθμός αβεβαιότητας των υπολοίπων δεν επιτρέπει ασφαλή εξαγωγή συμπερασμάτων.



Διάγραμμα 5-12: Συγκριτική ανάλυση επιπτώσεων για το Κόστος Κύκλου Ζωής

## 5.7 Ερμηνεία Αποτελεσμάτων

Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής μελετήθηκε μία σειρά από εναλλακτικές προσεγγίσεις διαχείρισης των Οικιακών Ζυμώσιμων Απορριμμάτων, με επίκεντρο τη διαλογή στην πηγή και εφαρμογή της μεθόδου της ξήρανσης/τεμαχισμού τους προς παραγωγή ενός προϊόντος βιομάζας, του FORBI. Η εφαρμογή των εργαλείων της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής καθώς και της Ανάλυσης Κόστους Κύκλου Ζωής, οδήγησε στην εξαγωγή βασικών συμπερασμάτων που μπορούν να αποτελέσουν τις βασικές αρχές για την ανάπτυξη ενός περιβαλλοντικά ορθού και οικονομικά βιώσιμου συστήματος διαχείρισης Οικιακών Ζυμώσιμων Απορριμμάτων με δυνητική εφαρμογή σε οποιοδήποτε Δήμο/Περιφέρεια:

- i. Η αρχή της εγγύτητας: Για κάθε ένα από τα εναλλακτικά σενάρια που μελετήθηκαν (από οικονομικής και περιβαλλοντικής άποψης) ήταν προφανές ότι η μεγάλης απόστασης μεταφορά των ΑΣΑ προς διαχείριση/ταφή ήταν εκείνη που οδηγεί στη μεγαλύτερη περιβαλλοντική επιβάρυνση. Πράγματι, ελαχιστοποιώντας τις απαιτούμενες αποστάσεις μεταξύ της πηγής των απορριμμάτων και των εγκαταστάσεων διαχείρισης (όπως στα Σενάρια 1.1 έως 4) μειώνεται σημαντικά τόσο η περιβαλλοντική επιβάρυνση για όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων όσο και το συνολικό διαχειριστικό κόστος. Ως εκ τούτου, είναι ιδιαίτερα σημαντικό, οι όποιες μελλοντικές πολιτικές να στοχεύουν -μεταξύ των άλλων και- στο σχεδιασμό σεναρίων διαχείρισης ΑΣΑ που να οδηγούν στην ελαχιστοποίηση των αποστάσεων μεταφοράς.
- ii. Ομογενοποίηση και αλλοίωση τροφικών υπολειμμάτων: Τα βασικότερα, ίσως, χαρακτηριστικά των τροφικών υπολειμμάτων σε σύγκριση με τα λοιπά ρεύματα ΑΣΑ είναι η υψηλή ανομοιογένειά τους καθώς και η ταχεία αλλοίωσή τους, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε οσμές αλλά και άλλες μορφές περιβαλλοντικής επιβάρυνσης (π.χ. έκλυση αερίων θερμοκηπίου). Τα δύο αυτά χαρακτηριστικά αποτελούν σημαντικό εμπόδιο για την ασφαλή προσωρινή αποθήκευση του αποβλήτου αλλά και για τις περισσότερες εκ των επιλογών διαχείρισής του. Η ξήρανση και ο τεμαχισμός των τροφικών υπολειμμάτων αποδεικνύεται μία αποτελεσματική μέθοδος για την παραγωγή ενός ομογενοποιημένου και σταθερού προϊόντος βιομάζας, κατάλληλου για χρήση ως υποστρώματος για μία πληθώρα βιολογικών διεργασιών. Από την οπτική της χάραξης πολιτικών για τη διαχείριση των ΑΣΑ, η



συγκεκριμένη προσέγγιση παρέχει μία σημαντική ευελιξία ως προς την επιλογή των πιο κατάλληλων τεχνολογιών διαχείρισης και αξιοποίησης των τροφικών υπολειμμάτων, δίνοντας τη δυνατότητα να αξιολογούνται κατά περίπτωση τα ιδιαίτερα τοπικά χαρακτηριστικά και οι ανάγκες της τοπικής κοινωνίας, αλλά και να εξομαλύνεται πιθανή εποχική διακύμανση στην παραγωγή των τροφικών υπολειμμάτων (π.χ. σε δήμους με υψηλή τουριστική κίνηση).

- iii. Τα τροφικά υπολείμματα αποτελούν το μεγαλύτερο σε ποσότητα ρεύμα ΑΣΑ, και ταυτόχρονα το λιγότερο αξιοποιούμενο στις περισσότερες χώρες του κόσμου. Ως εκ τούτου προκύπτει σημαντικό πεδίο για την εφαρμογή συστημάτων διαχείρισης και αξιοποίησης που θα οδηγούσαν δυνητικά στην ελαχιστοποίηση των ποσοτήτων αποβλήτων που καταλήγουν στους ΧΥΤΑ -και άρα στη σημαντική μείωση των εκλυόμενων αερίων του θερμοκηπίου- αλλά και στην παραγωγή προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας αλλά και ενέργειας. Επιπροσθέτως, η διαλογή στην πηγή των τροφικών υπολειμμάτων θα οδηγούσε και στη βελτίωση της καθαρότητας των λοιπών ρευμάτων, καθώς τα τροφικά υπολείμματα φαίνονται υπεύθυνα για το μεγαλύτερο μέρος των επιμολύνσεων.

Όσον αφορά συγκεκριμένα στην περίπτωση του Δήμου Χαλανδρίου ο συνδυασμός της ανάλυσης της σύστασης των ΑΣΑ, η πειραματική διαδικασία για τη μελέτη των εναλλακτικών τεχνολογιών αξιοποίησης και τα συμπεράσματα της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής και της Ανάλυσης Κόστους Κύκλου Ζωής προκύπτει ότι η διαλογή στην πηγή των τροφικών υπολειμμάτων πρέπει να επεκταθεί -σταδιακά- στο σύνολο του Δήμου, αλλά και ότι είναι ιδιαίτερα σημαντικό ο Δήμος να επικεντρωθεί στην εφαρμογή μίας προσεκτικά σχεδιασμένης στρατηγικής επικοινωνίας και ευαισθητοποίησης, στοχεύοντας στη μεγιστοποίηση της συμμετοχής των πολιτών στα διάφορα σχήματα διαλογής στην πηγή, μεγιστοποιώντας έτσι την επίδοσή του. Ανεξαρτήτως της συγκεκριμένης τεχνολογίας αξιοποίησης των τροφικών υπολειμμάτων που θα εφαρμοστεί, η παρούσα διδακτορική διατριβή αποδεικνύει τη σημασία της εκτροπής των Τροφικών Υπολειμμάτων από τους ΧΥΤΑ τόσο από περιβαλλοντικής όσο και από οικονομικής άποψης.

Το Σενάριο 1.1 είναι εκείνο που φαίνεται το καταλληλότερο για το Δήμο, λαμβάνοντας υπόψη περιβαλλοντικούς και οικονομικούς παράγοντες αλλά και την μικρότερη πολυπλοκότητα του σε σύγκριση με τα υπόλοιπα εναλλακτικά Σενάρια. Σημαντικό στοιχείο για την περαιτέρω βελτίωση της επίδοσης των εναλλακτικών σεναρίων αποτελεί η βελτιστοποίηση της διεργασίας της ξήρανσης/τεμαχισμού με στόχο τη μείωση των περιβαλλοντικών και οικονομικών της επιπτώσεων (π.χ. μέσω της μείωσης των ενεργειακών της αναγκών ή/και τη μελέτη της χρήσης εναλλακτικών καυσίμων όπως για παράδειγμα του ίδιου του FORBI).

Η εφαρμογή της προσέγγισης της επέκτασης συστήματος, μέσω του υπολογισμού του βαθμού υποκατάστασης του περιβαλλοντικού φορτίου και βάσει της στόχευσης της ανάλυσης ήταν απαραίτητη. Ωστόσο, θα πρέπει να επισημανθεί ότι ταυτόχρονα δυνητικά οδηγεί σε αύξηση των αβεβαιοτήτων ως προς τα συμπεράσματα της ανάλυσης, καθώς βασίζεται σε παραδοχές σχετικές με τη μελλοντική κατάσταση διαφόρων αγορών, οι οποίες όμως χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό αβεβαιότητας. Για παράδειγμα, στο Σενάριο 3, προϋποτίθεται η αξιοποίηση της βιοαιθανόλης μέσω της μερικής υποκατάστασης των ορυκτών καυσίμων κίνησης, ωστόσο, αυτό αποτελεί παραδοχή η οποία προϋποθέτει την αντίστοιχη καταναλωτική διάθεση από τους παραγωγούς, διακινητές και καταναλωτές των καυσίμων. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι η προσέγγιση της επέκτασης συστήματος βασίζεται σε δεδομένα και παραδοχές που αφορούν συγκεκριμένα το Δήμο Χαλανδρίου. Επομένως, πιθανή εφαρμογή των συμπερασμάτων της παρούσας διδακτορικής διατριβής σε άλλες περιοχές θα πρέπει να γίνεται με προσοχή καθώς πληθώρα παραγόντων (οικονομικών, κοινωνικών και περιβαλλοντικών) μπορεί να διαφέρουν

σημαντικά επηρεάζοντας την περιβαλλοντική και οικονομική αποτελεσματικότητα των τεχνολογιών που προτείνονται (π.χ. απουσία αγοράς για το κόμποστ).

## 6.0 Συμπεράσματα

Η παρούσα διδακτορική διατριβή επιχειρεί μία ολοκληρωμένη προσέγγιση για την ανάπτυξη και αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων για τη διαχείριση των Οικιακών Ζυμώσιμων Απορριμμάτων του Δήμου Χαλανδρίου, με έμφαση στη δυνατότητα αναπαραγωγής των αποτελεσμάτων και σε άλλους δήμους με παρόμοια χαρακτηριστικά. Ως εκ τούτου, η διατριβή αποτελείται από τρεις κύριες ενότητες, κάθε μία εκ των οποίων είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη αποτελεσματικών πρακτικών και πολιτικών: (i) την ανάλυση της σύστασης των ΑΣΑ του Δήμου, ώστε τα δεδομένα που θα συλλεχθούν να αποτελέσουν τη βάση τόσο για την ανάπτυξη των νέων σεναρίων, όσο και για τη μελλοντική παρακολούθηση της επίδοσης του συστήματος, (ii) την πειραματική διερεύνηση της απόδοσης των διαφόρων διεργασιών αξιοποίησης που προτείνονται, ώστε να αναγνωριστούν τα σημεία που χρήζουν περαιτέρω διερεύνηση ή/και βελτιστοποίησης και (iii) η εφαρμογή εργαλείων κατάλληλων για την αξιολόγηση και σύγκριση των εναλλακτικών σεναρίων, βάσει των κριτηρίων που θεωρούνται σε κάθε περίπτωση σημαντικότερα. Στην περίπτωση της παρούσας διατριβής τα εργαλεία αυτά ήταν η Ανάλυση Κύκλου Ζωής και η Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής.

Η ανάλυση της σύστασης των οικιακών ΑΣΑ του Δήμου Χαλανδρίου που υλοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής αποσκοπούσε στην υποστήριξη της ανάπτυξης, εφαρμογής, αξιολόγησης και βελτιστοποίησης ενός καινοτόμου συστήματος διαχείρισης του βιοαποικοδομήσιμου κλάσματος των ΑΣΑ. Συγκεκριμένα, στόχος της ανάλυσης ήταν η κατανόηση της προϋπάρχουσας κατάστασης της σύστασης των οικιακών ΑΣΑ, για μία γειτονιά του Δήμου Χαλανδρίου, η οποία αντιστοιχεί στο 10% του συνολικού πληθυσμού (την Αγία Βαρβάρα) αλλά και η αξιολόγηση του συστήματος διαλογής στην πηγή των τροφικών υπολειμμάτων με την πιλοτική του εφαρμογή.

Τα ευρήματα ήταν εντυπωσιακά αποδεικνύοντας ότι μόνο 4 μήνες μετά την εφαρμογή του συστήματος ο βαθμός διαλογής στην πηγή των Τροφικών Υπολειμμάτων προσέγγιζε το 40% με το ποσοστό αστοχίας να είναι λιγότερο του 1%. Η απόδοση ήταν ακόμα υψηλότερη άλλους 3 μήνες αργότερα, ξεπερνώντας το 40% (με το βαθμό αστοχία να παραμένει κάτω του 1%).

Συνολικά, όσον αφορά τη σύσταση των οικιακών ΑΣΑ, πραγματοποιήθηκαν 3 κύκλοι δειγματοληψίας με επίκεντρο την Αγία Βαρβάρα και στη συνέχεια ένας τέταρτος κύκλος με διευρυμένο πεδίο για το σύνολο του Δήμου. Βάσει της στατιστικής ανάλυσης που εφαρμόστηκε προέκυψε σημαντικός βαθμός επαναληψιμότητας για τα περισσότερα ρεύματα αποβλήτων.

Επιπλέον, σημαντικό εύρημα αποτέλεσε ο υπολογισμός του ρεύματος των "Βιοαποικοδομήσιμων" που αντιστοιχούσαν στο 40% κατά μέσο όρο του συνόλου των οικιακών ΑΣΑ, ενώ το ρεύμα "Χαρτί & Χαρτόνι" ξεπερνούσε το σύνολο των υπολοίπων κλασμάτων ανακυκλώσιμων υλικών, αποδεικνύοντας την ορθότητα της επιλογής του Δήμου Χαλανδρίου να εφαρμόσει σύστημα ξεχωριστής συλλογής ειδικά για το συγκεκριμένο ρεύμα.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων που αφορούσαν στη σύσταση των οικιακών ΑΣΑ ήταν συγκρίσιμα με τα εθνικά και περιφερειακά δεδομένα, ωστόσο σημαντικές διαφορές παρατηρήθηκαν σε ό,τι είχε να κάνει με τον επιτυγχανόμενο βαθμό διαλογής στην πηγή. Συγκεκριμένα, προέκυψε συνολικός βαθμός διαλογής στην πηγή για το Δήμο Χαλανδρίου ύψους 75%, ο οποίος σε ορισμένες περιπτώσεις κλασμάτων αποβλήτων υπερέβαινε και το 85%. Βάσει των συγκεκριμένων αποτελεσμάτων ενισχύεται η προσπάθεια του Δήμου να επαναδιαπραγματευτεί την τιμολογιακή πολιτική των ΚΔΑΥ, η οποία βασίζεται στους εθνικούς μέσους όρους, οι οποίοι είναι σημαντικά χαμηλότεροι σε σύγκριση με το Δήμο Χαλανδρίου.

Γενικά, η μεθοδολογία που υλοποιήθηκε παρέχει σειρά πλεονεκτημάτων, με σχετικά μικρό κόστος και πολυπλοκότητα στην εφαρμογή της.

Η βασική αρχή που διέπει το προτεινόμενο από την παρούσα διδακτορική διατριβή σχέδιο διαχείρισης των Οικιακών Ζυμώσιμων Απορριμμάτων είναι η εφαρμογή της διεργασίας της ξήρανσης και του τεμαχισμού με στόχο τη μείωση του όγκου και της μάζας των Τροφικών Υπολειμμάτων, η οποία επιτυγχάνεται σε ποσοστό έως και 80%. Η συγκεκριμένη προσέγγιση εμφανίζει σειρά πλεονεκτημάτων που καθιστούν το FORBI (το τελικό δηλαδή προϊόν της διεργασίας) ένα προϊόν βιομάζας υψηλής προστιθέμενης αξίας, και κατάλληλο για χρήση ως υποστρώματος σε σειρά βιολογικών διεργασιών. Επιπλέον, το γεγονός ότι είναι εντελώς άοσμο και διατηρείται αναλλοίωτο για μεγάλες περιόδους χωρίς ιδιαίτερες αποθηκευτικές απαιτήσεις καθιστά τη διεργασία της ξήρανσης/τεμαχισμού κατάλληλη για την προ-επεξεργασία των τροφικών υπολειμμάτων.

Για τη μελέτη του FORBI ως υποστρώματος για την παραγωγή βιοαερίου μελετήθηκαν τρεις διαφορετικές εναλλακτικές προσεγγίσεις: (i) ένα συμβατικό σύστημα αναερόβιας χώνευσης με αντιδραστήρα τύπου CSTR, (ii) ένα ταχύρρυθμο σύστημα αναερόβιας χώνευσης, με αντιδραστήρα PABR και (iii) ένα διβάθμιο σύστημα αναερόβιας χώνευσης για την παραγωγή μίγματος υδρογόνου-μεθανίου (υθάνιο) μέσω της σε σειρά λειτουργίας δύο αντιδραστήρων τύπου CSTR.

Κάθε ένα εκ των συστημάτων που μελετήθηκαν παρουσιάζει διαφορετικά πλεονεκτήματα και διαφορετικό επίπεδο τεχνολογικής ωριμότητας. Συγκεκριμένα, το συμβατικό σύστημα αναερόβιας χώνευσης αποτελεί την πλέον διαδεδομένη επιλογή όσον αφορά και την εμπορική του χρήση και οδηγεί σε σταθερά υψηλές αποδόσεις. Το ταχύρρυθμο σύστημα αποτελεί μία εκδοχή, η οποία δεν έχει μελετηθεί ακόμα σε κλίμακα μεγαλύτερη της ημι-βιομηχανικής και για το οποίο η περαιτέρω μελέτη και βελτιστοποίηση είναι αναγκαία. Επίσης, σημαντικό μειονέκτημα της συγκεκριμένης τεχνολογίας αποτελεί το σύνθετο σύστημα σωληνώσεων που αυξάνει τις απαιτήσεις ομοιογένειας και μικρής κοκκομετρίας του υποστρώματος. Από την άλλη πλευρά, ο ιδιαίτερα χαμηλός υδραυλικός χρόνος παραμονής, υπό τον οποίο το σύστημα μπορεί να λειτουργήσει, είναι ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα από τεchnοοικονομική άποψη. Τέλος, το διβάθμιο σύστημα αναερόβιας χώνευσης παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά την απόδοση αλλά και την ποιότητα του παραγόμενου ρεύματος βιοαερίου. Ωστόσο, σε σχέση με το συμβατικό σύστημα ενός σταδίου παρουσιάζει αυξημένη λειτουργική πολυπλοκότητα.

Η προσέγγιση της συγκομποστοποίησης του FORBI με πράσινα κλαδέματα παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον από διαχειριστικής άποψης καθώς συντελεί στη σημαντική μείωση (έως και 50%) της απαιτούμενης διάρκειας για την κομποστοποίηση των κλαδεμάτων ενώ και το τελικό προϊόν είναι πολύ καλής ποιότητας για χρήση ως εδαφοβελτιωτικό. Μάλιστα, η μελέτη της διεργασίας σε πιλοτική κλίμακα οδήγησε σε ακόμα καλύτερα αποτελέσματα με μεγαλύτερη διάρκεια της θερμόφιλης φάσης (γεγονός που οδήγησε στον να καλύπτονται και οι υγειονομικές απαιτήσεις).

Η παραγωγή στερεού καυσίμου (pellet) μέσω μηχανικής πελλετοποίησης μελετήθηκε ως εναλλακτική τεχνολογική λύση αξιοποίησης του FORBI. Μέσω των αναλύσεων στις οποίες υποβλήθηκε το τελικό προϊόν, προέκυψε ότι το παραγόμενο pellet είναι συμβατό με τις νομικές απαιτήσεις εκτός της συγκέντρωσης χλωρίου (η οποία παρουσιάζεται αυξημένη, πιθανόν λόγω της φύσης των τροφικών υπολειμμάτων και της υψηλής συγκέντρωσης μαγειρικού αλατιού), γεγονός που θα πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω με σκοπό την αναζήτηση πιθανών μεθόδων μείωσής του. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις μέτρησης της θερμικής απόδοσης του παραγόμενου pellet ώστε να υπολογιστεί ο βαθμός υποκατάστασης των συμβατικών καυσίμων θέρμανσης, παράμετρος η οποία αξιοποιήθηκε στα πλαίσια της ανάλυσης κύκλου ζωής.

Τέλος, μελετήθηκε η δυνατότητα αξιοποίησης του FORBI προς παραγωγή βιοαιθανόλης. Κριτήριο για την αξιολόγηση της διεργασίας ως αποτελεσματικής και οικονομικά συμφέρουσας αποτελεί η τελική συγκέντρωση της βιοαιθανόλης στο εξερχόμενο ρεύμα, η οποία πρέπει να είναι > 4%. Πράγματι, η μέγιστη παραγωγή αιθανόλης που επιτεύχθηκε ήταν 70.5 g/L (που αντιστοιχεί σε 16 g/g<sub>dry FORBI</sub>), δηλαδή 7,05%.

Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής αξιολογήθηκαν με τις μεθόδους της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής και της Ανάλυσης Κόστους Κύκλου Ζωής εναλλακτικά σενάρια για τη διαχείριση των ΑΣΑ με επίκεντρο τα Οικιακά Ζυμώσιμα Απορρίμματα (Τροφικά Υπολείμματα). Τα σενάρια που μελετήθηκαν -συνοπτικά- είναι τα παρακάτω:

1. Η υφιστάμενη κατάσταση στο Δήμο Χαλανδρίου (Σενάριο 0) -αλλά και στο μεγαλύτερο μέρος των ελληνικών Δήμων- βάσει της οποίας τα Τροφικά Υπολείμματα στην πλειοψηφία τους καταλήγουν -ως μέρος των συμμίκτων- στους κατά τόπους ΧΥΤΑ.
2. Ένα σενάριο που περιγράφει μία απλή εναλλακτική, η οποία να συμβαδίζει με τις απαιτήσεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την ξεχωριστή συλλογή και διαχείριση των Τροφικών Υπολειμμάτων (Σενάριο 0.1). Στο συγκεκριμένο σενάριο τα Τροφικά Υπολείμματα οδηγούνται προς κομποστοποίηση και το τελικό προϊόν αξιοποιείται για κάλυψη των κυττάρων του ΧΥΤΑ Φυλής.
3. Πέντε εναλλακτικά σενάρια (Σενάριο 1.1 έως Σενάριο 4) στα οποία ενσωματώνονται η διεργασία της ξήρανσης και του τεμαχισμού των προ-διαλεγμένων Τροφικών Υπολειμμάτων προς παραγωγή FORBI, καθώς και οι τεχνολογίες αξιοποίησης του FORBI που μελετήθηκαν πειραματικά με στόχο την παραγωγή προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας αλλά και ενέργειας. Η βασική αρχή των εναλλακτικών σεναρίων είναι ότι τα Τροφικά Υπολείμματα μπορούν να αποτελέσουν έναν ιδιαίτερα σημαντικό πόρο αντί να καταλήγουν στους ΧΥΤΑ, όπως γίνεται τώρα όπου επικρατούν αναποτελεσματικά σχέδια διαχείρισής τους.

Επιπλέον, πέραν της σύγκρισης των σεναρίων, στόχος της ανάλυσης ήταν η αναγνώριση των τεχνολογικών και συστηματικών παραμέτρων με τη σημαντικότερη συνεισφορά στην περιβαλλοντική και οικονομική απόδοση των διαφόρων σεναρίων που εξετάστηκαν.

Μέσω της εφαρμογής των εργαλείων της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής και της Ανάλυσης Κόστους Κύκλου Ζωής αποδείχτηκε ότι -γενικά- το σενάριο που περιγράφει την υφιστάμενη κατάσταση οδηγεί στη σημαντικά χειρότερη απόδοση μεταξύ των σεναρίων που μελετήθηκαν και από περιβαλλοντικής και από οικονομικής άποψης. Η απλή εναλλακτικής (Σενάριο 0.1) μειώνει δραστικά το περιβαλλοντικό αποτύπωμα και το διαχειριστικό κόστος της διαχείρισης των ΑΣΑ. Ωστόσο, είναι προφανές ότι δεν πετυχαίνει τη μεγιστοποίηση του περιβαλλοντικού και οικονομικού οφέλους που μπορεί να προκύψει από την ολοκληρωμένη διαχείριση των Τροφικών Υπολειμμάτων και την αξιοποίηση των χαρακτηριστικών τους (θρεπτικά συστατικά, οργανικό φορτίο κ.λπ.).

Αναλύοντας τις σημαντικότερες παραμέτρους που επηρεάζουν την απόδοση των σεναρίων, η μεταφορά των Τροφικών Υπολειμμάτων (ως μέρος των συμμίκτων) στο ΧΥΤΑ αυξάνει κατακόρυφα τόσο το περιβαλλοντικό αποτύπωμα (ιδιαίτερα σε ότι έχει να κάνει με την έκλυση αερίων του θερμοκηπίου, λόγω της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων από τα απορριματοφόρα) όσο και το συνολικό διαχειριστικό κόστος. Ως εκ τούτου, προκύπτει η σημασία της εκτροπής των Τροφικών Υπολειμμάτων από το ΧΥΤΑ αλλά και η εφαρμογή της αρχής της εγγύτητας κατά το σχεδιασμό του οποιουδήποτε σχεδίου διαχείρισης ΑΣΑ.

Από την άλλη, η ξήρανση/τεμαχισμός των Τροφικών Υπολειμμάτων για την παραγωγή FORBI διαφαίνεται ως μία υποσχόμενη πρακτική, ωστόσο, η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να

επικεντρωθεί στη βελτιστοποίηση της διεργασίας με σκοπό την ελαχιστοποίηση των ενεργειακών της αναγκών ή/και τη χρήση εναλλακτικών πηγών ενέργειας. Αυτό όμως δεν σημαίνει ότι παρά τον ενεργοβόρο χαρακτήρα της διεργασίας αυτής (στην οποία βασίζονται τα εναλλακτικά σενάρια που μελετήθηκαν) δεν παραμένει καλύτερη εναλλακτική από την υφιστάμενη κατάσταση.

Ένας σημαντικός περιορισμός της παρούσας μελέτης αποτελεί η εξαίρεση δεικτών επίδοσης πέραν των περιβαλλοντικών και οικονομικών. Συγκεκριμένα, δεν περιλαμβάνονται δείκτες που αφορούν στην κοινωνική υπόσταση της διαχείρισης των ΑΣΑ, όπως η τοπική υγιεινή και ασφάλεια, η κοινωνική συνοχή και η ανάπτυξη της τοπικής επιχειρηματικότητας. Μελλοντική έρευνα στο συγκεκριμένο πεδίο θα ήταν σημαντικό να επικεντρωθεί και να ενσωματώσει τέτοιου είδους ζητήματα, ώστε να οδηγήσει σε μία πιο ολοκληρωμένη και συνολική εικόνα, η οποία με τη σειρά της θα ενισχύσει την ανάπτυξη πιο στοχευμένων, ολοκληρωμένων και αποτελεσματικών πολιτικών.

Η σχετική βιβλιογραφία κατά το μεγαλύτερο της μέρος επικεντρώνεται στη μελέτη και αξιολόγηση εναλλακτικών προσεγγίσεων διαχείρισης των ΑΣΑ, επικεντρώνοντας στο σύνολο των ρευμάτων των ΑΣΑ και υιοθετώντας τις βασικότερες εκ των πρακτικών και τεχνολογιών που είναι διαθέσιμες. Αντιθέτως, η παρούσα διδακτορική διατριβή, επιχειρεί την εμβάθυνση στο ρεύμα των οικιακών ζυμώσιμων απορριμμάτων και τη σύγκριση εναλλακτικών σεναρίων θεωρώντας σταθερή επίδοση ως προς τη διαλογή στην πηγή και μελετώντας μία σειρά διαφορετικών και λιγότερο διαδεδομένων (ως προς την εφαρμογή τους στην πράξη) τεχνολογιών. Πράγματι, μέσω της ανάλυσης που γίνεται προκύπτει ότι οι εναλλακτικές, καινοτόμες τεχνολογίες είναι δυνατόν να βελτιώσουν σημαντικά την περιβαλλοντική και οικονομική επίδοση ενός συστήματος διαχείρισης των Τροφικών Υπολειμμάτων.

## 7.0 Προτάσεις για μελλοντική εργασία

Κατά τη διάρκεια της υλοποίησης της παρούσας διδακτορικής διατριβής προέκυψαν συχνά ερωτήματα σε σχέση με τα ζητήματα που την αφορούσαν, τα οποία όμως δεν βρίσκονταν εντός των στόχων της ώστε να μελετηθούν περαιτέρω. Ως εκ τούτου, βάσει των συμπερασμάτων της διατριβής, προκύπτουν τα παρακάτω ερωτήματα/προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση:

- Εφαρμογή της μεθοδολογίας ανάλυσης σύστασης των ΑΣΑ σε άλλους δήμους αλλά και σε ευρύτερο περιφερειακό και εθνικό επίπεδο, ώστε να διαπιστωθούν πιθανές αδυναμίες, να διορθωθούν και να αναπτυχθεί μία μεθοδολογία, η οποία να δύναται να αποκτήσει χαρακτηριστικά βέλτιστης πρακτικής. Ιδιαίτερα για την Ελλάδα, στην οποία τα ποσοτικά στοιχεία για την παραγωγή και διαχείριση αποβλήτων είναι εκλείπου, μία τέτοια εύκολη στην εφαρμογή, φθηνή και με ακριβή αποτελέσματα μεθοδολογία θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμη.
- Η σημαντικότερη, ίσως, ανάγκη για περαιτέρω μελέτη (βάσει των συμπερασμάτων της παρούσας διδακτορικής διατριβής) αφορά στη βελτιστοποίηση της διεργασίας της ξήρανσης/τεμαχισμού με σκοπό τη μείωση των ενεργειακών της αναγκών ή/και τη μελέτη της δυνατότητας χρήσης εναλλακτικών καυσίμων, όπως για παράδειγμα του ίδιου του FORBI. Επιπλέον, θα ήταν χρήσιμη η μελέτη κάποιων συνολικά διαφορετικών μεθόδων για την ξήρανση και τον τεμαχισμό των Τροφικών Υπολειμμάτων όπως για παράδειγμα μέσω της αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας.
- Σημαντικά περιθώρια περαιτέρω μελέτης υπάρχουν σε ό,τι αφορά τις εναλλακτικές διεργασίες αξιοποίησης του FORBI που μελετήθηκαν. Συγκεκριμένα:
  - Για το ταχύρρυθμο σύστημα αναερόβιας χώνευσης το σημαντικότερο επόμενο βήμα θα είναι η κλιμάκωση μεγέθους (βάσει και προηγούμενων μελετών που έχουν γίνει και περιγράφουν την υδραυλική συμπεριφορά του συστήματος) και αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος τόσο με υπόστρωμα από FORBI όσο και από άλλης προέλευσης βιομάζα. Επιπλέον, η απόδοση του συστήματος ως συνάρτηση των διαφόρων λειτουργικών χαρακτηριστικών (Υδραυλικός Χρόνος Παραμονής, Περίοδος Εναλλαγής Διαμερίσματος Τροφοδοσίας, Ρυθμός Οργανικής Φόρτισης κ.ο.κ.) χρήζει επίσης περαιτέρω διερεύνησης συμπεριλαμβανόμενης της μοντελοποίησης του συστήματος ώστε να καθοριστούν οι ιδανικές συνθήκες λειτουργίας.
  - Για το διβάθμιο σύστημα αναερόβιας χώνευσης η μεγιστοποίηση της παραγωγής υδρογόνου (χωρίς να επηρεάζεται η απόδοση του μεθανογόνου αντιδραστήρα) είναι ένα ιδιαίτερα σημαντικό βήμα για την επίτευξη συνολικής βελτιστοποίησης του συστήματος. Επιπλέον, η μελέτη των παραμέτρων που επηρεάζουν περισσότερο την αποτελεσματικότητα και την απόδοση της διεργασίας, θα βοηθήσει στην ίδια τη βελτιστοποίηση της διεργασίας και την ταχύτερη και ευχερέστερη εφαρμογή της σε εμπορικές συνθήκες.
  - Όσον αφορά την κομποστοποίηση προτείνεται η μελέτη διαφορετικών αναλογιών FORBI – κλαδεμάτων αλλά και η μελέτη της συγκομποστοποίησης του FORBI με άλλα υποστρώματα (όπως π.χ. φύκια ή βιομηχανικά οργανικά απόβλητα). Επίσης, περαιτέρω μελέτης χρήζουν τα χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος ώστε να διαπιστωθεί η καταλληλότητά του για διαφορετικές χρήσεις ώστε να μεγιστοποιηθεί η αξία του.
  - Αναφορικά με την πελλετοποίηση, το βασικότερο ζήτημα που πρέπει να μελετηθεί διεξοδικά αποτελεί η υψηλή περιεκτικότητα του τελικού προϊόντος σε χλώριο, αλλά και οι δυνατότητες αύξησης της θερμογόνου δύναμης.

- Τέλος, σε σχέση με την παραγωγή βιοαιθανόλης μία πιο λεπτομερής τεχνοοικονομική ανάλυση που θα αποσκοπεί στη μείωση του κόστους παραγωγής της βιο-αιθανόλης αλλά και η βελτιστοποίηση της διεργασίας προς μεγιστοποίηση της παραγωγικότητας, σίγουρα θα ευνοούσαν την προώθηση της μεθόδου ως εναλλακτικής για την αξιοποίηση των Τροφικών Υπολειμμάτων.
- Όσον αφορά στα εργαλεία της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής και Ανάλυσης Κόστους Κύκλου Ζωής προτείνεται η επέκταση των σεναρίων για γεωγραφικές περιοχές ευρύτερες του ενός Δήμου. Επίσης, από μεθοδολογική άποψη, το κατά περίπτωση υψηλό ποσοστό αβεβαιότητας των αποτελεσμάτων δείχνει την ανάγκη ανεύρεσης και χρήσης πιο αξιόπιστων τιμών για τις παραμέτρους εισόδου. Επιπλέον, προτείνεται η μελέτη της επίδρασης του ποσοστού διαλογής στην πηγή των Τροφικών Υπολειμμάτων στην απόδοση των σεναρίων καθώς και η αξιολόγηση της επίδρασης της εποχικότητας στη συνολική απόδοση του κάθε σεναρίου. Τέλος, η επέκταση της μελέτης για το σύνολο των ρευμάτων με αναλυτική περιγραφή των ισοζυγίων μάζας θα οδηγούσε στην κατάστρωση ενός συνολικού σχεδίου διαχείρισης απορριμμάτων για το Δήμο Χαλανδρίου (αλλά και ευρύτερα), το οποίο θα βασιζόταν στις δύο αρχές που βασίζεται και το προτεινόμενο από την παρούσα διδακτορική διατριβή σχέδιο διαχείρισης των ΤΥ: στη διαλογή στην πηγή και την αρχή της εγγύτητας.



## 8.0 Βιβλιογραφία

- [1] W. C. N. *et al.*, “The Anthropocene is functionally and stratigraphically distinct from the Holocene,” *Science (80-. )*, vol. 351, no. 6269, p. aad2622, Jan. 2016, doi: 10.1126/science.aad2622.
- [2] N. Castree, “The Anthropocene: a primer for geographers,” *Geography*, vol. 100, no. 2, pp. 66–75, Jul. 2015, doi: 10.1080/00167487.2015.12093958.
- [3] M. Ogden, ““The Anthropocene” viewed from Vernadsky’s Noosphere,” 2015. [Online]. Available: [https://action.larouchepac.com/\\_the\\_anthropocene](https://action.larouchepac.com/_the_anthropocene).
- [4] A. C. Revkin, “Confronting the ‘Anthropocene,’” *The New York Times*, 2011.
- [5] G. Ceballos, P. R. Ehrlich, and P. H. Raven, “Vertebrates on the brink as indicators of biological annihilation and the sixth mass extinction,” *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 117, no. 24, pp. 13596–13602, Jun. 2020, doi: 10.1073/pnas.1922686117.
- [6] G. K. M., H. C. E., C. N. H., and B. J. S., “The influence of human disturbance on wildlife nocturnality,” *Science (80-. )*, vol. 360, no. 6394, pp. 1232–1235, Jun. 2018, doi: 10.1126/science.aar7121.
- [7] F. Harvey, “Climate change driving species out of habitats much faster than expected,” *The Guardian*, 2011.
- [8] S. R. Centre, “Planetary Boundaries,” 2015. <https://www.anthropocene.info/planetary-boundaries.php> (accessed Jan. 01, 2022).
- [9] S. Will *et al.*, “Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet,” *Science (80-. )*, vol. 347, no. 6223, p. 1259855, Feb. 2015, doi: 10.1126/science.1259855.
- [10] M. L. Brusseau, M. Ramirez-Andreotta, I. L. Pepper, and J. Maximillian, “Chapter 26 - Environmental Impacts on Human Health and Well-Being,” M. L. Brusseau, I. L. Pepper, and C. P. B. T.-E. and P. S. (Third E. Gerba, Eds. Academic Press, 2019, pp. 477–499.
- [11] Γ. Α. Μ. Δ.Γ. Μαθιουδάκης, Α.Γ. Μαθιουδάκης, “Οι δυσμενείς επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην υγεία,” *Αρχαία Ελληνικής Ιατρικής*, vol. 37, no. 5, pp. 588–601, 2020.
- [12] D. C. Wilson and C. A. Velis, “Waste management - Still a global challenge in the 21st century: An evidence-based call for action,” *Waste Manag. Res.*, vol. 33, no. 12, pp. 1049–1051, 2015, doi: 10.1177/0734242X15616055.
- [13] European Commission, “Waste Framework Directive,” Brussels, 2020. [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/environment/topics/waste-and-recycling/waste-framework-directive\\_en](https://ec.europa.eu/environment/topics/waste-and-recycling/waste-framework-directive_en).
- [14] O. Eriksson *et al.*, “Municipal solid waste management from a systems perspective,” *J. Clean. Prod.*, vol. 13, no. 3, pp. 241–252, 2005, doi: 10.1016/j.jclepro.2004.02.018.
- [15] S. Klein, I. K. Dimzon, J. Eubeler, and T. P. Knepper, *Analysis, occurrence, and*

*degradation of microplastics in the aqueous environment*, vol. 58. 2018.

- [16] R. C. Thompson, C. J. Moore, F. S. V. Saal, and S. H. Swan, "Plastics, the environment and human health: Current consensus and future trends," *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.*, vol. 364, no. 1526, pp. 2153–2166, 2009, doi: 10.1098/rstb.2009.0053.
- [17] M. El-Fadel, A. N. Findikakis, and J. O. Leckie, "Environmental Impacts of Solid Waste Landfilling," *J. Environ. Manage.*, vol. 50, no. 1, pp. 1–25, 1997, doi: <https://doi.org/10.1006/jema.1995.0131>.
- [18] S. A. Q. Burton and I. A. Watson-Craik, "Ammonia and nitrogen fluxes in landfill sites: Applicability to sustainable landfilling," *Waste Manag. Res.*, vol. 16, no. 1, pp. 41–53, 1998, doi: 10.1177/0734242X9801600106.
- [19] P. Kjeldsen, M. A. Barlaz, A. P. Rooker, A. Baun, A. Ledin, and T. H. Christensen, "Present and Long-Term Composition of MSW Landfill Leachate: A Review," *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, vol. 32, no. 4, pp. 297–336, Oct. 2002, doi: 10.1080/10643380290813462.
- [20] United Nations, "2015 Transforming our World: the 2030 Agenda for Sustainable Development," New York, 2015. [Online]. Available: [https://www.un.org/ga/search/view\\_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E](https://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E).
- [21] Y. Peng, P. Wu, A. T. Schartup, and Y. Zhang, "Plastic waste release caused by COVID-19 and its fate in the global ocean," *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 118, no. 47, 2021, doi: 10.1073/pnas.2111530118.
- [22] Jenny Gustavsson, C. Cederberg, U. Sonesson, Robert van Otterdijk, and A. Meybeck, "Global food losses and food waste: extent, causes and prevention," *Save Food!*, p. 38, 2011, [Online]. Available: [http://www.fao.org/fileadmin/user\\_upload/ags/publications/GFL\\_web.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/ags/publications/GFL_web.pdf).
- [23] M. Melikoglu, C. S. K. Lin, and C. Webb, "Analysing global food waste problem: Pinpointing the facts and estimating the energy content," *Cent. Eur. J. Eng.*, vol. 3, no. 2, pp. 157–164, 2013, doi: 10.2478/s13531-012-0058-5.
- [24] G. Capson-Tojo, M. Rouez, M. Crest, J. P. Steyer, J. P. Delgenès, and R. Escudié, "Food waste valorization via anaerobic processes: a review," *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, vol. 15, no. 3, pp. 499–547, 2016, doi: 10.1007/s11157-016-9405-y.
- [25] D. San Martin, S. Ramos, and J. Zufía, "Valorisation of food waste to produce new raw materials for animal feed," *Food Chem.*, vol. 198, pp. 68–74, 2016, doi: 10.1016/j.foodchem.2015.11.035.
- [26] M. Eriksson, I. Strid, and P. A. Hansson, "Carbon footprint of food waste management options in the waste hierarchy - A Swedish case study," *J. Clean. Prod.*, vol. 93, pp. 115–125, 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.01.026.
- [27] Ellen MacArthur Foundation, "Urban biocycles," 2017.
- [28] McKinsey Global Institute, "McKinsey Global Institute McKinsey Sustainability & Resource Productivity Practice The McKinsey Global Institute," no. November, 2011, [Online]. Available: [http://www.mckinsey.com/insights/energy\\_resources\\_materials/resource\\_revolu](http://www.mckinsey.com/insights/energy_resources_materials/resource_revolu)

tion.

- [29] R. Zhang *et al.*, “Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion,” *Bioresour. Technol.*, vol. 98, no. 4, pp. 929–935, 2007, doi: 10.1016/j.biortech.2006.02.039.
- [30] D. Bolzonella *et al.*, “Recent developments in biohythane production from household food wastes: A review,” *Bioresour. Technol.*, vol. 257, no. February, pp. 311–319, 2018, doi: 10.1016/j.biortech.2018.02.092.
- [31] Z. Liu *et al.*, “Effects of operating parameters on hydrogen production from raw wet steam-exploded cornstalk and two-stage fermentation potential for biohythane production,” *Biochem. Eng. J.*, vol. 90, pp. 234–238, 2014, doi: 10.1016/j.bej.2014.06.013.
- [32] C. Zhang, H. Su, J. Baeyens, and T. Tan, “Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 38, pp. 383–392, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.05.038.
- [33] C. Mao, Y. Feng, X. Wang, and G. Ren, “Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion,” 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.02.032.
- [34] K. Papanikola *et al.*, “Food Residue Biomass Product as an Alternative Energy Source for the Cement Industry,” in *5th International Conference on Sustainable Waste Management Systems*, 2017, pp. 1–6.
- [35] I. Michalopoulos *et al.*, “Valorization of the Liquid Fraction of a Mixture of Livestock Waste and Cheese Whey for Biogas Production Through High-rate Anaerobic Co-digestion and for Electricity Production in a Microbial Fuel Cell (MFC),” *Waste and Biomass Valorization*, Jun. 2017, doi: 10.1007/s12649-017-9974-1.
- [36] I. Michalopoulos *et al.*, “Hydrogen and Methane Production from Food Residue Biomass Product (FORBI),” *Waste and Biomass Valorization*, pp. 1–9, 2019, doi: 10.1007/s12649-018-00550-4.
- [37] R. Saleemdeeb, E. K. H. J. zu Ermgassen, M. H. Kim, A. Balmford, and A. Al-Tabbaa, “Environmental and health impacts of using food waste as animal feed: a comparative analysis of food waste management options,” *J. Clean. Prod.*, vol. 140, pp. 871–880, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.05.049.
- [38] G. Moretto, I. Russo, D. Bolzonella, P. Pavan, M. Majone, and F. Valentino, “An urban biorefinery for food waste and biological sludge conversion into polyhydroxyalkanoates and biogas,” *Water Res.*, vol. 170, p. 115371, 2020, doi: 10.1016/j.watres.2019.115371.
- [39] Υπουργείο Περιβάλλοντος και Κλιματικής Αλλαγής, “Εθνικό Σχέδιο Διαχείρισης Αποβλήτων (ΕΣΔΑ),” Αθήνα, 2015.
- [40] The Ellen MacArthur Foundation, “Circular Economy Overview,” *Circular Economy*, 2016. .
- [41] Eunomia Research & Consulting, “Πρώτη Έκθεση Κυκλικής Οικονομίας,” Αθήνα, 2021. [Online]. Available: <https://sepan.gr/images/file/ekthesi-kyklickis-oikonomias-stin-ellada-epiteliki-perilipsi-n.pdf>.

- [42] A. Masullo, "Organic wastes management in a circular economy approach : Rebuilding the link between urban and rural areas," *Ecol. Eng.*, vol. 101, pp. 84–90, 2017, doi: 10.1016/j.ecoleng.2017.01.005.
- [43] WASTE4Think, "Moving towards Life cycle Thinking by integrating Advanced Waste Management Systems," 2015.
- [44] V. Bisinella, R. Götze, K. Conradsen, A. Damgaard, T. H. Christensen, and T. F. Astrup, "Importance of waste composition for Life Cycle Assessment of waste management solutions," *J. Clean. Prod.*, vol. 164, pp. 1180–1191, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.07.013.
- [45] M. E. Edjabou *et al.*, "Municipal solid waste composition: Sampling methodology, statistical analyses, and case study evaluation," *Waste Manag.*, vol. 36, pp. 12–23, 2015, doi: 10.1016/j.wasman.2014.11.009.
- [46] L. Dahlén and A. Lagerkvist, "Methods for household waste composition studies," *Waste Manag.*, vol. 28, no. 7, pp. 1100–1112, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.08.014>.
- [47] Y. Li and Y. Jin, "Effects of thermal pretreatment on acidification phase during two-phase batch anaerobic digestion of kitchen waste," *Renew. Energy*, vol. 77, pp. 550–557, 2015, doi: 10.1016/j.renene.2014.12.056.
- [48] B. Deepanraj, V. Sivasubramanian, and S. Jayaraj, "Effect of substrate pretreatment on biogas production through anaerobic digestion of food waste," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 42, pp. 26522–26528, 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.06.178.
- [49] J. Zhang *et al.*, "Integrating food waste sorting system with anaerobic digestion and gasification for hydrogen and methane co-production," *Appl. Energy*, vol. 257, no. July 2019, p. 113988, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113988.
- [50] J. Li *et al.*, "Production of lactic acid from thermal pretreated food waste through the fermentation of waste activated sludge: Effects of substrate and thermal pretreatment temperature," *Bioresour. Technol.*, vol. 247, no. August 2017, pp. 890–896, 2018, doi: 10.1016/j.biortech.2017.09.186.
- [51] V. Arelli, S. Begum, G. R. Anupaju, K. Kuruti, and S. Shailaja, "Dry anaerobic co-digestion of food waste and cattle manure: Impact of total solids, substrate ratio and thermal pre treatment on methane yield and quality of biomanure," *Bioresour. Technol.*, vol. 253, no. November 2017, pp. 273–280, 2018, doi: 10.1016/j.biortech.2018.01.050.
- [52] Y. El Gnaoui, F. Karouach, M. Bakraoui, M. Barz, and H. El Bari, "Mesophilic anaerobic digestion of food waste: Effect of thermal pretreatment on improvement of anaerobic digestion process," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 417–422, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.11.096>.
- [53] R. I. Muazu and J. A. Stegemann, "Biosolids and microalgae as alternative binders for biomass fuel briquetting," *Fuel*, vol. 194, pp. 339–347, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.01.019>.

- [54] M. Matúš, P. Križan, L. Šooš, and J. Beniak, "The effect of papermaking sludge as an additive to biomass pellets on the final quality of the fuel," *Fuel*, vol. 219, pp. 196–204, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.01.089>.
- [55] P. Pradhan, S. M. Mahajani, and A. Arora, "Production and utilization of fuel pellets from biomass: A review," *Fuel Process. Technol.*, vol. 181, pp. 215–232, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.09.021>.
- [56] W. Stelte, J. K. Holm, A. R. Sanadi, S. Barsberg, J. Ahrenfeldt, and U. B. Henriksen, "A study of bonding and failure mechanisms in fuel pellets from different biomass resources," *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, no. 2, pp. 910–918, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.11.003>.
- [57] C. Whittaker and I. Shield, "Factors affecting wood, energy grass and straw pellet durability – A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 71, pp. 1–11, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.119>.
- [58] S. H. Larsson and R. Samuelsson, "Prediction of ISO 17831-1:2015 mechanical biofuel pellet durability from single pellet characterization," *Fuel Process. Technol.*, vol. 163, pp. 8–15, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.04.004>.
- [59] U. Nicoleta, V. Valentin, V. Gheorghe, D. Mirela-Nicoleta, and Z. Bianca-Stefania, "Influence of biomass moisture content on pellet properties - Review," *Eng. Rural Dev.*, vol. 23, 2018.
- [60] C. C. Dymond and A. Kamp, "Fibre use, net calorific value, and consumption of forest-derived bioenergy in British Columbia, Canada," *Biomass and Bioenergy*, vol. 70, pp. 217–224, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.08.023>.
- [61] Χ. Κάλφας, "Παραγωγή Βιοαερίου από Αναερόβια Χώνευση Προεπεξεργασμένου και μή Ελαιοπολτού," Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, 2007.
- [62] Δ. Μαθιουδάκης, "Αναερόβια Χώνευση σε πιλοτικής κλίμακας Περιοδικό Χωνευτήρα με Ανακλαστήρες (PABR) - Μελέτη Περίπτωσης εγκατάστασης μονάδας βιοαερίου στην περιοχή του Δ. Μετσόβου," Αθήνα, 2016.
- [63] Κ. Σιούλας, *Εγχειρίδιο βιοαερίου*. Αθήνα: Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας, 2010.
- [64] E. Ryckebosch, M. Drouillon, and H. Vervaeren, "Techniques for transformation of biogas to biomethane," *Biomass and Bioenergy*. 2011, doi: [10.1016/j.biombioe.2011.02.033](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.02.033).
- [65] G. Lytras, C. Lytras, D. Mathioudakis, K. Papadopoulou, and G. Lyberatos, "Food Waste Valorization Based on Anaerobic Digestion," *Waste and Biomass Valorization*, no. 0123456789, 2020, doi: [10.1007/s12649-020-01108-z](https://doi.org/10.1007/s12649-020-01108-z).
- [66] A. Akhlar, A. Battimelli, M. Torrijos, and H. Carrere, "Comprehensive characterization of the liquid fraction of digestates from full-scale anaerobic co-digestion," *Waste Manag.*, vol. 59, pp. 118–128, 2017, doi: [10.1016/j.wasman.2016.11.005](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.11.005).
- [67] R. Delzeit and U. Kellner, "The impact of plant size and location on profitability of biogas plants in Germany under consideration of processing digestates," *Biomass*

and *Bioenergy*, vol. 52, pp. 43–53, 2013, doi: 10.1016/j.biombioe.2013.02.029.

- [68] M. Logan and C. Visvanathan, “Management strategies for anaerobic digestate of organic fraction of municipal solid waste: Current status and future prospects,” *Waste Manag. Res.*, vol. 37, no. 1\_suppl, pp. 27–39, 2019, doi: 10.1177/0734242X18816793.
- [69] Α. Κοψαχείλης, “Αναερόβια χώνευση υγρών αποβλήτων ελαιολιπιδίου σε ένα περιοδικό αναερόβιο αντιδραστήρα με ανακλαστήρες (PABR) και κλασματοποίηση των εκροών,” Πανεπιστήμιο Πατρών, 2009.
- [70] G. Bitton, *Wastewater Microbiology*, Third Edit. 2005.
- [71] Παγκόσμια Τράπεζα, “Κατανάλωση λιπασμάτων (% της παραγωγής λιπάσματος),” 2017. .
- [72] M. H. Gerardi, “Anaerobic Digesters versus Aerobic Digesters,” in *The Microbiology of Anaerobic Digesters*, John Wiley & Sons, Inc., 2003, pp. 153–159.
- [73] G. Lettinga, “Anaerobic digestion and wastewater treatment systems,” *Antonie Van Leeuwenhoek*, vol. 67, no. 1, pp. 3–28, Mar. 1995, doi: 10.1007/BF00872193.
- [74] Χ. Φεσσά, “Αναερόβια χώνευση αποβλήτων τυπογραφείου χαρτονομισμάτων,” Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2011.
- [75] M. Kleerebezem *et al.*, “Complete genome sequence of *Lactobacillus plantarum* WCFS1,” *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 100, no. 4, pp. 1990–1995, Feb. 2003, doi: 10.1073/pnas.0337704100.
- [76] G. Lettinga, A. Van Velsen, S. Hobma, W. de Zeeuw, and A. Klapwijk, “Use of the upflow sludge blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment,” *Biotechnol. Bioeng.*, vol. 22, no. 4, pp. 699–734, 1980.
- [77] E. R. Hall, “Anaerobic treatment of wastewaters in suspended growth and fixed film processes,” *Water Qual. Manag. Libr.*, 1992.
- [78] A. Grobicki and D. C. Stuckey, “Hydrodynamic characteristics of the anaerobic baffled reactor,” *Water Res.*, vol. 26, no. 3, pp. 371–378, 1992, doi: [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(92\)90034-2](https://doi.org/10.1016/0043-1354(92)90034-2).
- [79] I. V. Skiadas and G. Lyberatos, “The periodic anaerobic baffled reactor,” *Water Sci. Technology*, vol. 38, no. 8–9, pp. 401–408, 1998.
- [80] I. V. Skiadas, H. N. Gavala, and G. Lyberatos, “Modelling of the periodic anaerobic baffled reactor (PABR) based on the retaining factor concept,” *Water Res.*, vol. 34, no. 15, pp. 3725–3736, 2000, doi: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00137-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00137-8).
- [81] F. G. Pohland and S. Ghosh, “Developments in anaerobic stabilization of organic wastes - the two-phase concept,” *Environ. Lett.*, vol. 1, no. 4, pp. 255–266, 1971, doi: 10.1080/00139307109434990.
- [82] “European Biogas Report 2015,” 2015. .
- [83] S. Roy and D. Das, “Biohythane production from organic wastes: present state of

- art," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 23, no. 10, pp. 9391–9410, 2016, doi: 10.1007/s11356-015-5469-4.
- [84] D. Mathioudakis, G. M. Lytras, D. Fotiou, C. Lytras, K. Papadopoulou, and G. Lyberatos, "Valorization of a Food Residue Biomass product in a two-stage anaerobic digestion system for the production of hythane," 2018.
- [85] T. Sandalci, Ö. Işin, S. Galata, Y. Karagöz, and İ. Güler, "Effect of hythane enrichment on performance, emission and combustion characteristics of an ci engine," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 5, pp. 3208–3220, 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.12.069.
- [86] R. T. Haug, *The Practical Handbook of Compost Engineering*, First. CRC Press, 1993.
- [87] A. Vlyssides, S. Mai, and E. M. Barampouti, "An integrated mathematical model for co-composting of agricultural solid wastes with industrial wastewater," *Bioresour. Technol.*, vol. 100, no. 20, pp. 4797–4806, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.05.005>.
- [88] Β. Σκιαδά, "Μελέτη της μικροβιακής ποικιλότητας κατά την συγκομποστοποίηση στερεών και υγρών αγροτοβιομηχανικών υποπροϊόντων με τη χρήση μοριακών τεχνικών," Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 2011.
- [89] Κ. Πάκου, "Απομάκρυνση ξενοβιοτικών ουσιών κατά τη βιοσταθεροποίηση της λύσος και άλλες αερόβιες διεργασίες," Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, 2010.
- [90] Ó. J. Sánchez, D. A. Ospina, and S. Montoya, "Compost supplementation with nutrients and microorganisms in composting process," *Waste Manag.*, vol. 69, no. Supplement C, pp. 136–153, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.012>.
- [91] G. Füleky and S. Benedek, "Composting to Recycle Biowaste BT - Sociology, Organic Farming, Climate Change and Soil Science," E. Lichtfouse, Ed. Dordrecht: Springer Netherlands, 2010, pp. 319–346.
- [92] United States Environmental Protection Agency (USEPA), "Composting At Home," 2015. <https://www.epa.gov/recycle/composting-home> (accessed Nov. 16, 2017).
- [93] H. Insam and M. de Bertoldi, "Chapter 3 Microbiology of the composting process," in *Compost Science and Technology*, vol. Volume 8, M. de B. L.F. Diaz W. Bidlingmaier and E. Stentiford Ed. Elsevier, 2007, pp. 25–48.
- [94] F. C. Miller, "Composting of Municipal Solid Waste and its Components," in *Microbiology of Solid Waste*, A. C. Palmisano and M. A. Barlaz, Eds. CRC Press, 1996, pp. 116–145.
- [95] J. Ryckeboer *et al.*, "A survey of bacteria and fungi occurring during composting and self-heating processes," *Ann. Microbiol.*, vol. 53, no. 4, pp. 349–410, 2003.
- [96] M. P. Bernal, J. A. Albuquerque, and R. Moral, "Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review," *Bioresour. Technol.*, vol. 100, no. 22, pp. 5444–5453, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.027>.

- [97] H. Insam and M. de Bertoldi, "Microbiology of the composting process," *Compost Sci. Technol. Waste Manag. Ser.*, vol. 8, pp. 25–48, 2007, doi: 10.1016/S1478-7482(07)80006-6.
- [98] S. L. Crawford, G. E. Johnson, and F. E. Goetz, "The Potential for Bioremediation of Soils Containing PAHs by Composting," *Compost Sci. Util.*, vol. 1, no. 3, pp. 41–47, Jun. 1993, doi: 10.1080/1065657X.1993.10757888.
- [99] L. L. Kinkel, D. C. Schlatter, M. G. Bakker, and B. E. Arenz, "Streptomyces competition and co-evolution in relation to plant disease suppression," *Res. Microbiol.*, vol. 163, pp. 490–499, 2012.
- [100] J. Ryckeboer, J. Mergaert, J. Coosemans, K. Deprins, and J. Swings, "Microbiological aspects of biowaste during composting in a monitored compost bin," *J. Appl. Microbiol.*, vol. 94, pp. 127–137, 2003.
- [101] I. Villar, D. Alves, J. Garrido, and S. Mato, "Evolution of microbial dynamics during the maturation phase of the composting of different types of waste," *Waste Manag.*, vol. 54, pp. 83–92, 2016, doi: 10.1016/j.wasman.2016.05.011.
- [102] The Composting Council of Canada, "The Composting Process: Compost Maturity," Montreal, 2016.
- [103] L. F. Diaz and G. M. Savage, "Chapter 4 Factors that affect the process," in *Compost Science and Technology*, vol. Volume 8, M. de B. L.F. Diaz W. Bidlingmaier and E. Stentiford BT - Waste Management Series, Ed. Elsevier, 2007, pp. 49–65.
- [104] G. Bonito, O. S. Isikhuemhen, and R. Vilgalys, "Identification of fungi associated with municipal compost using DNA-based techniques," *Bioresour. Technol.*, vol. 101, no. 3, pp. 1021–1027, 2010, doi: 10.1016/j.biortech.2009.08.109.
- [105] M. de Bertoldi, G. Vallini, and A. Pera, "The biology of composting: A review," *Waste Manag. Res.*, vol. 1, no. 2, pp. 157–176, 1983, doi: 10.1016/0734-242X(83)90055-1.
- [106] K. S. Khan and R. G. Joergensen, "Changes in microbial biomass and P fractions in biogenic household waste compost amended with inorganic P fertilizers," *Bioresour. Technol.*, vol. 100, no. 1, pp. 303–309, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.06.002>.
- [107] U. Krogmann and I. Körner, "Technology and Strategies of Composting," in *Biotechnology*, Wiley-VCH Verlag GmbH, 2000, pp. 127–150.
- [108] Y. Y. Liang *et al.*, "dSmurf selectively degrades decapentaplegic-activated MAD, and its overexpression disrupts imaginal disc development.," *J. Biol. Chem.*, vol. 278, no. 29, pp. 26307–26310, 2003.
- [109] United States Environmental Protection Agency (USEPA), "Types of Composting and Understanding the Process," *Sustainable Management of Food*, 2014. .
- [110] Frontier Industrial, "Creating Value out of your waste," 2017. .
- [111] T. G. Leton and E. I. Stentiford, "Control of aeration in static pile composting," *Waste Manag. Res.*, vol. 8, no. 4, pp. 299–306, 1990, doi: 10.1016/0734-242X(90)90005-8.



- [112] S. K. Karmee and C. S. K. Lin, "Valorisation of food waste to biofuel: current trends and technological challenges," *Theor. Chem. Acc.*, vol. 2, no. 1, pp. 4–7, 2014, doi: 10.1186/s40508-014-0022-1.
- [113] A. Konti, D. Kekos, and D. Mamma, "Life cycle analysis of the bioethanol production from food waste—A review," *Energies*, vol. 13, no. 19, pp. 1–14, 2020, doi: 10.3390/en13195206.
- [114] M. Gohain *et al.*, "Bio-ethanol production: A route to sustainability of fuels using bio-based heterogeneous catalyst derived from waste," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 146, pp. 190–200, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.08.046>.
- [115] B. Wu *et al.*, "Current status and future prospective of bio-ethanol industry in China," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 145, p. 111079, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111079>.
- [116] K. Pandiyan, A. Singh, S. Singh, A. K. Saxena, and L. Nain, "Technological interventions for utilization of crop residues and weedy biomass for second generation bio-ethanol production," *Renew. Energy*, vol. 132, pp. 723–741, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.049>.
- [117] L. Yang, X. Ge, C. Wan, F. Yu, and Y. Li, "Progress and perspectives in converting biogas to transportation fuels," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 40, pp. 1133–1152, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.08.008.
- [118] M. Balat and H. Balat, "Biogas as a renewable energy source - A review," *Energy Sources*, vol. 31, no. 14, pp. 1280–1293, 2009, doi: 10.1080/15567030802089565.
- [119] Y. Lin and S. Tanaka, "Ethanol fermentation from biomass resources: current state and prospects," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 69, no. 6, pp. 627–642, 2006, doi: 10.1007/s00253-005-0229-x.
- [120] Q. Xu, A. Singh, and M. E. Himmel, "Perspectives and new directions for the production of bioethanol using consolidated bioprocessing of lignocellulose," *Curr. Opin. Biotechnol.*, vol. 20, no. 3, pp. 364–371, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2009.05.006>.
- [121] J. B. Guinée *et al.*, "Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 45, no. 1, pp. 90–96, Jan. 2011, doi: 10.1021/es101316v.
- [122] J. Clavreul, H. Baumeister, T. H. Christensen, and A. Damgaard, "An environmental assessment system for environmental technologies," *Environ. Model. Softw.*, vol. 60, pp. 18–30, 2014, doi: 10.1016/j.envsoft.2014.06.007.
- [123] M. C. McManus and C. M. Taylor, "The changing nature of life cycle assessment," *Biomass and Bioenergy*, vol. 82, pp. 13–26, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.04.024>.
- [124] V. Martinez-sanchez, D. Tonini, F. Møller, and T. F. Astrup, "Life-Cycle Costing of Food Waste Management in Denmark: Importance of Indirect Effects," *Environ. Sci. Technol.*, no. 0045, pp. 1–36, 2016, doi: 10.1021/acs.est.5b03536.
- [125] M. Z. Hauschild and M. A. J. Huijbregts, "Life Cycle Impact Assessment," *Life Cycle Impact Assess.*, pp. 1–16, 2015, doi: 10.1007/BF02978760.

- [126] A. Petit-Boix *et al.*, "Application of life cycle thinking towards sustainable cities: A review," *J. Clean. Prod.*, vol. 166, pp. 939–951, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.08.030.
- [127] F. De Menna, J. Dietershagen, M. Loubiere, and M. Vittuari, "Life cycle costing of food waste: A review of methodological approaches," *Waste Manag.*, vol. 73, pp. 1–13, 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2017.12.032.
- [128] E. C. Gentil *et al.*, "Models for waste life cycle assessment: Review of technical assumptions," *Waste Manag.*, vol. 30, no. 12, pp. 2636–2648, 2010, doi: 10.1016/j.wasman.2010.06.004.
- [129] A. Ahamed, K. Yin, B. J. H. Ng, F. Ren, V. W. C. Chang, and J. Y. Wang, "Life cycle assessment of the present and proposed food waste management technologies from environmental and economic impact perspectives," *J. Clean. Prod.*, vol. 131, pp. 607–614, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.04.127.
- [130] V. Bisinella, K. Conradsen, T. H. Christensen, and T. F. Astrup, "A global approach for sparse representation of uncertainty in Life Cycle Assessments of waste management systems," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 21, no. 3, pp. 378–394, 2016, doi: 10.1007/s11367-015-1014-4.
- [131] S. A. Bassi, "Impact categories and impact methods," no. June, 2017.
- [132] J. Clavreul, H. Baumeister, T. H. Christensen, and A. Damgaard, "An environmental assessment system for environmental technologies," *Environ. Model. Softw.*, vol. 60, pp. 18–30, 2014, doi: 10.1016/j.envsoft.2014.06.007.
- [133] D. Tonini, P. F. Albizzati, and T. F. Astrup, "Environmental impacts of food waste: Learnings and challenges from a case study on UK," *Waste Manag.*, 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2018.03.032.
- [134] D. A. Turner, I. D. William, and S. Kemp, "Tool for Solid Waste Management Decision Making."
- [135] P. D. M. Lima, D. A. Colvero, A. P. Gomes, H. Wenzel, V. Schalch, and C. Cimpan, "Environmental assessment of existing and alternative options for management of municipal solid waste in Brazil," *Waste Manag.*, vol. 78, pp. 857–870, 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2018.07.007.
- [136] J. Cleary, "Life cycle assessments of municipal solid waste management systems: A comparative analysis of selected peer-reviewed literature," *Environ. Int.*, vol. 35, no. 8, pp. 1256–1266, 2009, doi: 10.1016/j.envint.2009.07.009.
- [137] T. L. Hansen, T. H. Christensen, and S. Schmidt, "Environmental modelling of use of treated organic waste on agricultural land: a comparison of existing models for life cycle assessment of waste systems," *Waste Manag. Res.*, vol. 24, no. 2, pp. 141–152, 2006, doi: 10.1177/0734242X06062485.
- [138] A. Laurent *et al.*, "Review of LCA studies of solid waste management systems - Part II: Methodological guidance for a better practice," *Waste Management*, vol. 34, no. 3, pp. 589–606, 2014, doi: 10.1016/j.wasman.2013.12.004.
- [139] A. Bernstad and J. la Cour Jansen, "A life cycle approach to the management of

- household food waste - A Swedish full-scale case study," *Waste Manag.*, vol. 31, no. 8, pp. 1879–1896, 2011, doi: 10.1016/j.wasman.2011.02.026.
- [140] H. Chen, Y. Yang, W. Jiang, M. Song, Y. Wang, and T. Xiang, "Source separation of municipal solid waste: The effects of different separation methods and citizens' inclination—case study of Changsha, China," *J. Air Waste Manage. Assoc.*, vol. 67, no. 2, pp. 182–195, Feb. 2017, doi: 10.1080/10962247.2016.1222317.
- [141] D. Hogg *et al.*, "European Commission Publications on Biodegradable Waste," *Econ. Anal. options Manag. Biodegrad. Munic. waste Final Rep. to Eur. Comm.*, p. 190, 2002, [Online]. Available: <http://ec.europa.eu/environment/waste/compost/pubs.htm>.
- [142] M. X. Paes, G. A. de Medeiros, S. D. Mancini, A. P. Bortoleto, J. A. Puppim de Oliveira, and L. A. Kulay, "Municipal solid waste management: Integrated analysis of environmental and economic indicators based on life cycle assessment," *J. Clean. Prod.*, vol. 254, p. 119848, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119848>.
- [143] O. Hollins *et al.*, *Towards a circular economy - Waste management in the EU Study*. 2017.
- [144] E. C. Gentil *et al.*, "Models for waste life cycle assessment: Review of technical assumptions," *Waste Manag.*, vol. 30, no. 12, pp. 2636–2648, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.06.004>.
- [145] S. A. Opatokun, L. F. Yousef, and V. Strezov, "Agronomic assessment of pyrolysed food waste digestate for sandy soil management," *J. Environ. Manage.*, vol. 187, pp. 24–30, 2017, doi: 10.1016/j.jenvman.2016.11.030.
- [146] T. Wang *et al.*, "Co-hydrothermal carbonization of food waste-woody biomass blend towards biofuel pellets production," *Bioresour. Technol.*, vol. 267, no. July, pp. 371–377, 2018, doi: 10.1016/j.biortech.2018.07.059.
- [147] M. Kraussler, P. Schindler, and H. Hofbauer, "An experimental approach aiming the production of a gas mixture composed of hydrogen and methane from biomass as natural gas substitute in industrial applications," *Bioresour. Technol.*, vol. 237, pp. 39–46, 2017, doi: 10.1016/j.biortech.2017.03.040.
- [148] J. Nakatani, "Life Cycle Inventory Analysis of Recycling: Mathematical and Graphical Frameworks," *Sustainability*, vol. 6, no. 9. 2014, doi: 10.3390/su6096158.
- [149] M. C. Reich, "Economic assessment of municipal waste management systems - Case studies using a combination of life cycle assessment (LCA) and life cycle costing (LCC)," *J. Clean. Prod.*, vol. 13, no. 3, pp. 253–263, 2005, doi: 10.1016/j.jclepro.2004.02.015.
- [150] A. Massarutto, A. de Carli, and M. Graffi, "Material and energy recovery in integrated waste management systems: A life-cycle costing approach," *Waste Manag.*, vol. 31, no. 9–10, pp. 2102–2111, 2011, doi: 10.1016/j.wasman.2011.05.017.
- [151] A. Laurent *et al.*, "Review of LCA studies of solid waste management systems - Part

- II: Methodological guidance for a better practice,” *Waste Manag.*, vol. 34, no. 3, pp. 589–606, 2014, doi: 10.1016/j.wasman.2013.12.004.
- [152] S. Muller, P. Lesage, A. Ciroth, C. Mutel, B. P. Weidema, and R. Samson, “The application of the pedigree approach to the distributions foreseen in ecoinvent v3,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 21, no. 9, pp. 1327–1337, 2016, doi: 10.1007/s11367-014-0759-5.
- [153] Ecoinvent, “How to interpret the uncertainty fields in ecoinvent.” [Online]. Available: [https://www.ecoinvent.org/support/faqs/methodology-of-ecoinvent-3/how-to-interpret-the-uncertainty-fields-in-ecoinvent.html?fbclid=IwAR1RWtE89wnhaBKX9yC9lw8N9lzP-WLL79sE2DDLgK\\_zuHBafGkp-tTS5MU](https://www.ecoinvent.org/support/faqs/methodology-of-ecoinvent-3/how-to-interpret-the-uncertainty-fields-in-ecoinvent.html?fbclid=IwAR1RWtE89wnhaBKX9yC9lw8N9lzP-WLL79sE2DDLgK_zuHBafGkp-tTS5MU).
- [154] R Development Core Team, “A Language and Environment for Statistical Computing,” Vienna, Austria, 2019. [Online]. Available: <http://www.r-project.org>.
- [155] Eurostat, “Recycling rate of municipal waste,” 2018. [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/sdg\\_11\\_60/default/table?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/sdg_11_60/default/table?lang=en).
- [156] APHA, AWWA, and WEF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Washington, DC: American Public Health Association, 1995.
- [157] European Commission, “General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance, 1st edition, International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook,” Luxembourg, 2010.
- [158] European Commission, “Supporting Environmentally Sound Decisions for Waste Management. A Technical Guide to Life Cycle Thinking (LCT) and Life Cycle Assessment (LCA) for Waste Experts and LCA Practitioners,” Luxembourg, 2011.
- [159] V. Martinez-Sanchez, D. Tonini, F. Møller, and T. F. Astrup, “Life-Cycle Costing of Food Waste Management in Denmark: Importance of Indirect Effects,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 50, no. 8, pp. 4513–4523, 2016, doi: 10.1021/acs.est.5b03536.
- [160] Ecoinvent, “How to interpret the uncertainty fields in ecoinvent,” *FAQs*, 2018. <https://www.ecoinvent.org/support/faqs/methodology-of-ecoinvent-3/how-to-interpret-the-uncertainty-fields-in-ecoinvent.html?fbclid=IwAR2PLBk1EOijOREx1nKANooZOP5q0OeZH-f30Qs0yN-7Tu6PegjdXu6zB4> (accessed Jun. 30, 2020).

## 9.0 Παραρτήματα

# Παράρτημα 1: Πρωτογενή αποτελέσματα ανάλυσης σύστασης ΑΣΑ Δήμου Χαλανδρίου

Π1. 1: Ανάλυση σύστασης ΑΣΑ Δήμου Χαλανδρίου, 1<sup>ος</sup> κύκλος δειγματοληψίας, πρωτογενή δεδομένα

	Σύμμεικτα		Ανακυκλώσιμα		Χαρτί & Χαρτόνι		Σύνολο	
	Ποσότητα (kg)	Ποσοστό (%)	Ποσότητα (kg)	Ποσοστό (%)	Ποσότητα (kg)	Ποσοστό (%)	Ποσότητα (kg)	Ποσοστό (%)
<b>Σύνολο</b>	<b>394.1</b>	<b>100.00%</b>	<b>151.4</b>	<b>100.00%</b>	<b>39.9</b>	<b>100.00%</b>	<b>585.4</b>	<b>100.00%</b>
<b>Βιοαποικοδομήσιμα</b>	<b>272.1</b>	<b>69.05%</b>	<b>3.0</b>	<b>1.99%</b>	<b>0.1</b>	<b>0.35%</b>	<b>275.3</b>	<b>47.02%</b>
Υπολείμματα τροφών (αποτρέψιμα)	7.7	1.96%	0.1	0.06%	0.0	0.00%	7.8	1.33%
Υπολείμματα τροφών (μη αποτρέψιμα)	144.6	36.70%	2.9	1.88%	0.1	0.35%	147.6	25.22%
Μικρού μεγέθους απόβλητα κήπου	41.9	10.64%	0.1	0.05%	0.0	0.00%	42.0	7.17%
κλαδέματα	74.0	18.79%	0.0	0.00%	0.0	0.00%	74.0	12.65%
Άλλα βιοαποικοδομήσιμα	3.8	0.97%	0.0	0.00%	0.0	0.00%	3.8	0.65%
<b>Χαρτί &amp; Χαρτόνι</b>	<b>17.9</b>	<b>4.55%</b>	<b>41.0</b>	<b>27.04%</b>	<b>37.8</b>	<b>94.83%</b>	<b>96.7</b>	<b>16.52%</b>
Χαρτί συσκευασίας	2.1	0.53%	3.4	2.22%	1.5	3.79%	7.0	1.19%
Χαρτόνια συσκευασίας	6.4	1.63%	21.7	14.33%	16.3	40.97%	44.5	7.60%
Χαρτί-Χαρτόνι εκτός συσκευασίας	9.4	2.39%	15.9	10.49%	20.0	50.08%	45.3	7.73%
<b>Γυαλί</b>	<b>4.4</b>	<b>1.11%</b>	<b>33.3</b>	<b>21.97%</b>	<b>0.4</b>	<b>0.88%</b>	<b>38.0</b>	<b>6.49%</b>
Γυαλί συσκευασίας	3.5	0.88%	33.2	21.94%	0.4	0.88%	37.0	6.33%
Γυαλί εκτός συσκευασίας	0.9	0.23%	0.1	0.03%	0.0	0.00%	1.0	0.16%
<b>Πλαστικό</b>	<b>22.7</b>	<b>5.77%</b>	<b>41.4</b>	<b>27.35%</b>	<b>0.9</b>	<b>2.26%</b>	<b>65.1</b>	<b>11.11%</b>
Άκαμπτο πλαστικό συσκευασίας	10.3	2.62%	18.7	12.34%	0.4	1.00%	29.4	5.03%
Πλαστικές μεμβράνες συσκευασίας	4.9	1.23%	4.6	3.02%	0.2	0.48%	9.6	1.64%
Πλαστικές μεμβράνες εκτός συσκευασίας	6.5	1.64%	7.8	5.12%	0.2	0.48%	14.4	2.47%
Πλαστικό εκτός συσκευασίας	1.1	0.27%	10.4	6.85%	0.1	0.30%	11.6	1.98%
<b>Μέταλλα</b>	<b>5.5</b>	<b>1.40%</b>	<b>12.8</b>	<b>8.44%</b>	<b>0.1</b>	<b>0.21%</b>	<b>18.4</b>	<b>3.14%</b>
Σιδηρούχα συσκευασίας	1.5	0.38%	5.7	3.74%	0.0	0.00%	7.1	1.22%
Μη σιδηρούχα συσκευασίας	1.3	0.32%	3.3	2.18%	0.1	0.20%	4.7	0.79%
Σιδηρούχα εκτός συσκευασίας	1.1	0.29%	0.8	0.52%	0.0	0.00%	1.9	0.33%
Μη σιδηρούχα εκτός συσκευασίας	1.6	0.42%	3.0	2.00%	0.0	0.01%	4.7	0.80%
<b>Σύνθετα Συσκευασίας</b>	<b>7.7</b>	<b>1.95%</b>	<b>5.0</b>	<b>3.29%</b>	<b>0.4</b>	<b>0.97%</b>	<b>13.1</b>	<b>2.00%</b>
Σύνθετες συσκευασίες	5.1	1.28%	4.3	2.83%	0.4	0.94%	9.7	1.66%
Άλλα σύνθετα συσκευασίας	2.6	0.67%	0.7	0.46%	0.0	0.03%	3.3	0.57%
<b>Ξύλο</b>	<b>1.1</b>	<b>0.29%</b>	<b>0.2</b>	<b>0.14%</b>	<b>0.0</b>	<b>0.00%</b>	<b>1.3</b>	<b>0.69%</b>
Ξύλο συσκευασίας	0.0	0.00%	0.0	0.00%	0.0	0.00%	0.0	0.00%
Άλλα ξύλα	1.1	0.29%	0.2	0.14%	0.0	0.00%	1.3	0.23%
<b>Διάφορα</b>	<b>62.6</b>	<b>15.88%</b>	<b>14.8</b>	<b>9.79%</b>	<b>0.2</b>	<b>0.50%</b>	<b>77.6</b>	<b>13.00%</b>
Υφάσματα	2.9	0.73%	3.4	2.25%	0.0	0.03%	6.3	1.07%
Παπούτσια και αξεσουάρ	1.9	0.48%	0.9	0.58%	0.0	0.00%	2.8	0.47%
Προϊόντα υγιεινής - Χαρτί υγείας	27.3	6.92%	1.9	1.28%	0.0	0.03%	29.2	4.99%
Πάνες	3.3	0.84%	0.0	0.00%	0.0	0.10%	3.4	0.57%
Μπαταρίες/συσσωρευτές	0.0	0.00%	0.0	0.01%	0.0	0.00%	0.0	0.00%
Άλλα επικίνδυνα	0.9	0.23%	0.1	0.09%	0.0	0.00%	1.0	0.18%
ΑΗΗΕ	0.9	0.23%	2.1	1.38%	0.0	0.00%	3.0	0.51%
Ογκώδη	0.0	0.00%	0.0	0.00%	0.0	0.00%	0.0	0.00%
Αδρανή	14.1	3.57%	1.8	1.16%	0.0	0.00%	15.8	2.70%
Μικρού όγκου	7.4	1.88%	0.1	0.09%	0.0	0.03%	7.6	1.29%
Άλλα	4.0	1.00%	4.5	2.95%	0.1	0.33%	8.6	1.46%

**Π1. 2: Ανάλυση σύστασης ΑΣΑ Δήμου Χαλανδρίου, 2<sup>ος</sup> κύκλος δειγματοληψίας, πρωτογενή δεδομένα**

	Σύμμεκτα		Ανακυκλώσιμα		Χαρτί & Χαρτόνι		Τροφικά Υπολείμματα		Σύνολο	
	Ποσότητα (kg)	Ποσοστό (%)	Ποσότητα (kg)	Ποσοστό (%)	Ποσότητα (kg)	Ποσοστό (%)	Ποσότητα (kg)	Ποσοστό (%)	Ποσότητα (kg)	Ποσοστό (%)
<b>Σύνολο</b>	<b>553.25</b>	<b>100%</b>	<b>182.08</b>	<b>100%</b>	<b>24.59</b>	<b>100%</b>	<b>114.76</b>	<b>100%</b>	<b>874.68</b>	<b>100%</b>
<b>Βιοαποικοδομήσιμα</b>	<b>381.60</b>	<b>68.97%</b>	<b>4.24</b>	<b>2.33%</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00%</b>	<b>114.54</b>	<b>99.81%</b>	<b>500.38</b>	<b>57.21%</b>
Υπολείμματα τροφών (αποτρέψιμα)	10.50	1.90%	1.06	0.58%	0.00	0.00%	7.64	6.66%	19.20	2.20%
Υπολείμματα τροφών (μη αποτρέψιμα)	168.53	30.46%	3.18	1.75%	0.00	0.00%	106.90	93.15%	278.61	31.85%
Μικρού μεγέθους απόβλητα κήπου	155.55	28.12%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	155.55	17.78%
κλαδέματα	46.42	8.39%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	46.42	5.31%
Άλλα βιοαποικοδομήσιμα	0.60	0.11%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.60	0.07%
<b>Χαρτί &amp; Χαρτόνι</b>	<b>20.34</b>	<b>3.68%</b>	<b>71.91</b>	<b>39.49%</b>	<b>21.62</b>	<b>87.92%</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00%</b>	<b>113.87</b>	<b>13.02%</b>
Χαρτί Συσκευασίας	5.99	1.08%	8.90	4.89%	0.80	3.25%	0.00	0.00%	15.69	1.79%
Χαρτόνια συσκευασίας	10.20	1.84%	39.93	21.93%	11.71	47.62%	0.00	0.00%	61.84	7.07%
Χαρτί-Χαρτόνι εκτός συσκευασίας	4.15	0.75%	23.08	12.68%	9.11	37.05%	0.00	0.00%	36.34	4.15%
<b>Γυαλί</b>	<b>4.44</b>	<b>0.80%</b>	<b>19.09</b>	<b>10.48%</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00%</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00%</b>	<b>23.53</b>	<b>2.69%</b>
Γυαλί συσκευασίας	3.32	0.60%	17.55	9.64%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	20.87	2.39%
Γυαλί εκτός συσκευασίας	1.12	0.20%	1.54	0.85%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	2.66	0.30%
<b>Πλαστικό</b>	<b>21.73</b>	<b>3.93%</b>	<b>43.16</b>	<b>23.70%</b>	<b>0.56</b>	<b>2.28%</b>	<b>0.16</b>	<b>0.14%</b>	<b>65.61</b>	<b>7.50%</b>
Άκαμπο πλαστικό συσκευασίας	13.38	2.42%	28.96	15.91%	0.49	1.99%	0.16	0.14%	42.99	4.91%
Πλαστικές μεμβράνες συσκευασίας	0.18	0.03%	0.39	0.21%	0.03	0.12%	0.00	0.00%	0.60	0.07%
Πλαστικές μεμβράνες εκτός συσκευασίας	6.58	1.19%	12.10	6.65%	0.04	0.16%	0.00	0.00%	18.72	2.14%
Πλαστικό εκτός συσκευασίας	1.59	0.29%	1.71	0.94%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	3.30	0.38%
<b>Μέταλλα</b>	<b>3.03</b>	<b>0.55%</b>	<b>9.71</b>	<b>5.33%</b>	<b>0.08</b>	<b>0.33%</b>	<b>0.06</b>	<b>0.05%</b>	<b>12.88</b>	<b>1.47%</b>
Σιδηρούχα συσκευασίας	1.70	0.31%	6.27	3.44%	0.08	0.33%	0.00	0.00%	8.05	0.92%
Μη σιδηρούχα συσκευασίας	0.65	0.12%	1.78	0.98%	0.00	0.00%	0.06	0.05%	2.49	0.28%
Σιδηρούχα εκτός συσκευασίας	0.27	0.05%	0.93	0.51%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	1.20	0.14%
Μη σιδηρούχα εκτός συσκευασίας	0.41	0.07%	0.73	0.40%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	1.14	0.13%
<b>Σύνθετα Συσκευασίας</b>	<b>2.76</b>	<b>0.50%</b>	<b>7.47</b>	<b>4.10%</b>	<b>0.63</b>	<b>2.56%</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00%</b>	<b>10.86</b>	<b>1.24%</b>
Σύνθετες συσκευασίες	2.53	0.46%	7.21	3.96%	0.63	2.56%	0.00	0.00%	10.37	1.19%
Άλλα σύνθετα συσκευασίας	0.23	0.04%	0.26	0.14%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.49	0.06%
<b>Ξύλο</b>	<b>4.69</b>	<b>0.85%</b>	<b>0.27</b>	<b>0.15%</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00%</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00%</b>	<b>4.96</b>	<b>0.57%</b>
Ξύλο συσκευασίας	0.00	0.00%	0.27	0.15%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.27	0.03%
Άλλα ξύλα	4.69	0.85%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	4.69	0.54%
<b>Διάφορα</b>	<b>114.66</b>	<b>20.72%</b>	<b>26.23</b>	<b>14.41%</b>	<b>1.70</b>	<b>6.91%</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00%</b>	<b>142.59</b>	<b>16.30%</b>
Υφάσματα	1.04	0.19%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	1.04	0.12%
Παπούτσια και αξεσουάρ	1.15	0.21%	1.26	0.69%	0.57	2.32%	0.00	0.00%	2.98	0.34%
Προϊόντα Υγιεινής	5.36	0.97%	1.87	1.03%	0.65	2.64%	0.00	0.00%	7.88	0.90%
Χαρτί υγιείας	36.57	6.61%	1.49	0.82%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	38.06	4.35%
Πάνες	2.89	0.52%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	2.89	0.33%
Μπαταρίες/συσσωρευτές	0.05	0.01%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.05	0.01%
Άλλα επικίνδυνα	12.36	2.23%	0.89	0.49%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	13.25	1.51%
ΑΗΗΕ	1.60	0.29%	2.43	1.33%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	4.03	0.46%
Ογκώδη	3.46	0.63%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	3.46	0.40%
Αδρανή	31.70	5.73%	4.73	2.60%	0.06	0.24%	0.00	0.00%	36.49	4.17%
Μικρού όγκου	6.33	1.14%	3.64	2.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	9.97	1.14%
Άλλα	12.15	2.20%	9.92	5.45%	0.42	1.71%	0.00	0.00%	22.49	2.57%

**Π1. 3: Ανάλυση σύστασης ΑΣΑ Δήμου Χαλανδρίου, 3<sup>ος</sup> κύκλος δειγματοληψίας, πρωτογενή δεδομένα**

	Σύμμεικτα		Ανακυκλώσιμα		Χαρτί & Χαρτόνι		Τροφικά Υπολείμματα		Σύνολο	
	Ποσότητα (kg)	Ποσοστό (%)	Ποσότητα (kg)	Ποσοστό (%)	Ποσότητα (kg)	Ποσοστό (%)	Ποσότητα (kg)	Ποσοστό (%)	Ποσότητα (kg)	Ποσοστό (%)
<b>Σύνολο</b>	<b>385.19</b>	<b>100%</b>	<b>266.52</b>	<b>100%</b>	<b>201.69</b>	<b>100%</b>	<b>106.69</b>	<b>100%</b>	<b>960.09</b>	<b>100%</b>
<b>Βιοαποικοδομήσιμα</b>	<b>226.78</b>	<b>58.87%</b>	<b>26.18</b>	<b>9.82%</b>	<b>0.93</b>	<b>0.46%</b>	<b>105.66</b>	<b>99.03%</b>	<b>359.55</b>	<b>37.45%</b>
Υπολείμματα τροφών (αποτρέψιμα)	1.91	0.50%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	1.91	0.20%
Υπολείμματα τροφών (μη αποτρέψιμα)	115.03	29.86%	18.40	6.90%	0.93	0.46%	105.66	99.03%	240.02	25.00%
Μικρού μεγέθους απόβλητα κήπου κλαδέματα	81.24	21.09%	7.78	2.92%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	89.02	9.27%
28.60	7.42%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	28.60	2.98%	
Άλλα βιοαποικοδομήσιμα	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%
<b>Χαρτί &amp; Χαρτόνι</b>	<b>19.11</b>	<b>4.96%</b>	<b>91.63</b>	<b>34.38%</b>	<b>173.89</b>	<b>86.22%</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00%</b>	<b>284.63</b>	<b>29.65%</b>
Χαρτί Συσκευασίας	5.16	1.34%	16.11	6.04%	5.39	2.67%	0.00	0.00%	26.66	2.78%
Χαρτόνια συσκευασίας	11.02	2.86%	48.32	18.13%	124.92	61.94%	0.00	0.00%	184.26	19.19%
Χαρτί-Χαρτόνι εκτός συσκευασίας	2.93	0.76%	27.20	10.21%	43.58	21.61%	0.00	0.00%	73.71	7.68%
<b>Γυαλί</b>	<b>2.07</b>	<b>0.54%</b>	<b>14.99</b>	<b>5.62%</b>	<b>1.24</b>	<b>0.61%</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00%</b>	<b>18.30</b>	<b>1.91%</b>
Γυαλί συσκευασίας	1.94	0.50%	14.99	5.62%	1.24	0.61%	0.00	0.00%	18.17	1.89%
Γυαλί εκτός συσκευασίας	0.13	0.03%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.13	0.01%
<b>Πλαστικό</b>	<b>21.04</b>	<b>5.46%</b>	<b>69.57</b>	<b>26.10%</b>	<b>13.12</b>	<b>6.51%</b>	<b>1.03</b>	<b>0.97%</b>	<b>104.76</b>	<b>10.91%</b>
Άκαμπο πλαστικό συσκευασίας	15.09	3.92%	48.94	18.36%	3.91	1.94%	0.00	0.00%	67.94	7.08%
Πλαστικές μεμβράνες συσκευασίας	0.55	0.14%	1.40	0.53%	0.39	0.19%	0.00	0.00%	2.34	0.24%
Πλαστικές μεμβράνες εκτός συσκευασίας	4.55	1.18%	15.11	5.67%	2.98	1.48%	1.03	0.97%	23.67	2.47%
Πλαστικό εκτός συσκευασίας	0.85	0.22%	4.12	1.55%	5.84	2.90%	0.00	0.00%	10.81	1.13%
<b>Μέταλλα</b>	<b>3.02</b>	<b>0.78%</b>	<b>18.43</b>	<b>6.92%</b>	<b>1.25</b>	<b>0.62%</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00%</b>	<b>22.70</b>	<b>2.36%</b>
Σιδηρούχα συσκευασίας	1.27	0.33%	7.78	2.92%	1.03	0.51%	0.00	0.00%	10.08	1.05%
Μη σιδηρούχα συσκευασίας	0.91	0.24%	5.17	1.94%	0.18	0.09%	0.00	0.00%	6.26	0.65%
Σιδηρούχα εκτός συσκευασίας	0.06	0.02%	5.35	2.01%	0.04	0.02%	0.00	0.00%	5.45	0.57%
Μη σιδηρούχα εκτός συσκευασίας	0.78	0.20%	0.13	0.05%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.91	0.09%
<b>Σύνθετα Συσκευασίας</b>	<b>1.21</b>	<b>0.31%</b>	<b>4.15</b>	<b>1.56%</b>	<b>0.74</b>	<b>0.37%</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00%</b>	<b>6.10</b>	<b>0.64%</b>
Σύνθετες συσκευασίες	0.00	0.00%	0.70	0.26%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.70	0.07%
Άλλα σύνθετα συσκευασίας	1.21	0.31%	3.45	1.29%	0.74	0.37%	0.00	0.00%	5.40	0.56%
<b>Ξύλο</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00%</b>	<b>2.13</b>	<b>0.80%</b>	<b>0.94</b>	<b>0.47%</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00%</b>	<b>3.07</b>	<b>0.32%</b>
Ξύλο συσκευασίας	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%
Άλλα ξύλα	0.00	0.00%	2.13	0.80%	0.94	0.47%	0.00	0.00%	3.07	0.32%
<b>Διάφορα</b>	<b>111.96</b>	<b>29.07%</b>	<b>39.44</b>	<b>14.80%</b>	<b>9.58</b>	<b>4.75%</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00%</b>	<b>160.98</b>	<b>16.77%</b>
Υφάσματα	3.52	0.91%	3.08	1.16%	1.43	0.71%	0.00	0.00%	8.03	0.84%
Παπούτσια και αξεσουάρ	1.62	0.42%	1.54	0.58%	0.73	0.36%	0.00	0.00%	3.89	0.41%
Προϊόντα Υγιεινής	55.01	14.28%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	55.01	5.73%
Χαρτί υγείας	29.70	7.71%	5.94	2.23%	0.18	0.09%	0.00	0.00%	35.82	3.73%
Πάνες	1.23	0.32%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	1.23	0.13%
Μπαταρίες/συσσωρευτές	0.00	0.00%	2.15	0.81%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	2.15	0.22%
Άλλα επικίνδυνα	6.76	1.75%	2.66	1.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	9.42	0.98%
ΑΗΗΕ	0.07	0.02%	6.18	2.32%	0.26	0.13%	0.00	0.00%	6.51	0.68%
Ογκώδη	0.00	0.00%	1.00	0.38%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	1.00	0.10%
Αδρανή	1.99	0.52%	3.73	1.40%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	5.72	0.60%
Μικρού όγκου	4.98	1.29%	0.20	0.08%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	5.18	0.54%
Άλλα	7.08	1.84%	12.96	4.86%	6.98	3.46%	0.00	0.00%	27.02	2.81%



**Π1. 4: Ανάλυση σύστασης ΑΣΑ Δήμου Χαλανδρίου, 3<sup>ος</sup> κύκλος δειγματοληψίας, πρωτογενή δεδομένα**

	Σύμμεικτα		Ανακυκλώσιμα		Χαρτί & Χαρτόνι		Σύνολο	
	Ποσότητα (kg)	Ποσοστό (%)	Ποσότητα (kg)	Ποσοστό (%)	Ποσότητα (kg)	Ποσοστό (%)	Ποσότητα (kg)	Ποσοστό (%)
<b>Σύνολο</b>	<b>1370.23</b>	<b>100%</b>	<b>451.86</b>	<b>100%</b>	<b>346.13</b>	<b>100%</b>	<b>2168.22</b>	<b>100%</b>
<b>Βιοαποικοδομήσιμα</b>	<b>908.70</b>	<b>66.32%</b>	<b>32.85</b>	<b>7.27%</b>	<b>7.41</b>	<b>2.14%</b>	<b>948.96</b>	<b>43.77%</b>
Υπολείμματα τροφών (αποτρέψιμα)	98.47	7.19%	2.91	0.64%	0.05	0.01%	101.43	4.68%
Υπολείμματα τροφών (μη αποτρέψιμα)	712.67	52.01%	28.92	6.40%	5.31	1.53%	746.90	34.45%
Μικρού μεγέθους απόβλητα κήπου	57.75	4.21%	1.02	0.23%	2.05	0.59%	60.82	2.81%
κλαδέματα	39.81	2.91%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	39.81	1.84%
Άλλα βιοαποικοδομήσιμα	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%
<b>Χαρτί &amp; Χαρτόνι</b>	<b>84.25</b>	<b>6.15%</b>	<b>197.99</b>	<b>43.82%</b>	<b>299.55</b>	<b>86.54%</b>	<b>581.79</b>	<b>26.83%</b>
Χαρτί Συσκευασίας	3.99	0.29%	24.19	5.35%	23.94	6.92%	52.12	2.40%
Χαρτόνια συσκευασίας	44.71	3.26%	122.71	27.16%	184.26	53.23%	351.68	16.22%
Χαρτί-Χαρτόνι εκτός συσκευασίας	35.55	2.59%	51.09	11.31%	91.35	26.39%	177.99	8.21%
<b>Γυαλί</b>	<b>17.13</b>	<b>1.25%</b>	<b>51.53</b>	<b>11.40%</b>	<b>2.79</b>	<b>0.81%</b>	<b>71.45</b>	<b>3.30%</b>
Γυαλί συσκευασίας	16.35	1.19%	44.02	9.74%	2.79	0.81%	63.16	2.91%
Γυαλί εκτός συσκευασίας	0.78	0.06%	7.51	1.66%	0.00	0.00%	8.29	0.38%
<b>Πλαστικό</b>	<b>68.74</b>	<b>5.02%</b>	<b>87.04</b>	<b>19.26%</b>	<b>19.57</b>	<b>5.65%</b>	<b>175.35</b>	<b>8.09%</b>
Άκαμπτο πλαστικό συσκευασίας	33.81	2.47%	51.23	11.34%	12.25	3.54%	97.29	4.49%
Πλαστικές μεμβράνες συσκευασίας	9.83	0.72%	18.98	4.20%	3.31	0.96%	32.12	1.48%
Πλαστικές μεμβράνες εκτός συσκευασίας	18.78	1.37%	13.66	3.02%	3.38	0.98%	35.82	1.65%
Πλαστικό εκτός συσκευασίας	6.32	0.46%	3.17	0.70%	0.63	0.18%	10.12	0.47%
<b>Μέταλλα</b>	<b>9.96</b>	<b>0.73%</b>	<b>22.11</b>	<b>4.89%</b>	<b>3.69</b>	<b>1.07%</b>	<b>35.76</b>	<b>1.65%</b>
Σιδηρούχα συσκευασίας	5.00	0.36%	15.96	3.53%	1.91	0.55%	22.87	1.05%
Μη σιδηρούχα συσκευασίας	4.55	0.33%	5.86	1.30%	0.42	0.12%	10.83	0.50%
Σιδηρούχα εκτός συσκευασίας	0.11	0.01%	0.28	0.06%	0.61	0.18%	1.00	0.05%
Μη σιδηρούχα εκτός συσκευασίας	0.30	0.02%	0.01	0.00%	0.75	0.22%	1.06	0.05%
<b>Σύνθετα Συσκευασίας</b>	<b>3.43</b>	<b>0.25%</b>	<b>5.95</b>	<b>1.32%</b>	<b>3.24</b>	<b>0.94%</b>	<b>12.62</b>	<b>0.58%</b>
Σύνθετες συσκευασίες	3.43	0.25%	5.80	1.28%	3.24	0.94%	12.47	0.58%
Άλλα σύνθετα συσκευασίας	0.00	0.00%	0.15	0.03%	0.00	0.00%	0.15	0.01%
<b>Ξύλο</b>	<b>5.13</b>	<b>0.37%</b>	<b>0.57</b>	<b>0.13%</b>	<b>0.25</b>	<b>0.07%</b>	<b>5.95</b>	<b>0.27%</b>
Ξύλο συσκευασίας	0.17	0.01%	0.05	0.01%	0.07	0.02%	0.29	0.01%
Άλλα ξύλα	4.96	0.36%	0.52	0.12%	0.18	0.05%	5.66	0.26%
<b>Διάφορα</b>	<b>272.89</b>	<b>19.92%</b>	<b>53.82</b>	<b>11.91%</b>	<b>9.63</b>	<b>2.78%</b>	<b>336.34</b>	<b>15.51%</b>
Υφάσματα	17.13	1.25%	13.65	3.02%	2.71	0.78%	33.49	1.54%
Παπούτσια και αξεσουάρ	3.43	0.25%	1.88	0.42%	2.20	0.64%	7.51	0.35%
Προϊόντα Υγιεινής	1.00	0.07%	0.23	0.05%	0.01	0.00%	1.24	0.06%
Χαρτί υγείας	131.12	9.57%	9.57	2.12%	0.00	0.00%	140.69	6.49%
Πάνες	24.28	1.77%	0.13	0.03%	0.00	0.00%	24.41	1.13%
Μπαταρίες/συσσωρευτές	0.05	0.00%	0.00	0.00%	0.04	0.01%	0.09	0.00%
Άλλα επικίνδυνα	1.03	0.08%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	1.03	0.05%
ΑΗΗΕ	1.13	0.08%	5.90	1.31%	0.46	0.13%	7.49	0.35%
Ογκώδη	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%
Αδρανή	25.06	1.83%	6.11	1.35%	1.13	0.33%	32.30	1.49%
Μικρού όγκου	31.39	2.29%	2.09	0.46%	0.00	0.00%	33.48	1.54%
Άλλα	37.27	2.72%	14.26	3.16%	3.08	0.89%	54.61	2.52%