



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΡΓΑΝΙΚΗΣ ΧΗΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**Ανάλυση κύκλου ζωής εναλλακτικού τρόπου διαχείρισης  
αστικών υγρών και στερεών αποβλήτων**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Αικατερίνη Μαργέτη**

**Επιβλέπων:**

**Γεράσιμος Λυμπεράτος**

**Καθηγητής ΕΜΠ**

**Αθήνα, 2023**

## **Ευχαριστίες**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας κ. Γεράσιμο Λυμπεράτο, που μου προσέφερε την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον και συνεχώς αναπτυσσόμενο αντικείμενο όπως είναι η ολοκλήρωση και η αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της ανάλυσης κύκλου ζωής των αστικών υγρών και στερεών αποβλήτων. Την Δρ. Κωνσταντίνα Παπαδοπούλου, μέλος ΕΔΙΠ, η βοήθεια της οποίας αποτέλεσε καταλυτικό παράγοντα επιτυχούς ολοκλήρωσης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καθώς και τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Ανέστη Βλυσίδη και την κα Τασία Γκίκα, καθώς και τα μέλη του εργαστηρίου Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας, της Σχολής Χημικών Μηχανικών, Αχιλλέα Ζαρκαλίου και Γεράσιμο Κανέλλο για την άψογη συνεργασία και τη πολύτιμη συμβολή τους στην απόκτηση των κατάλληλων πειραματικών δεδομένων.

## Περίληψη

Η σημερινή κατάσταση στην διαχείριση των αστικών αποβλήτων βασίζεται στην ξεχωριστή συλλογή και επεξεργασία τους ανάλογα με την φυσική κατάσταση στην οποία αυτά βρίσκονται. Με τον όρο στερεά αστικά απόβλητα περιγράφονται κυρίως τα οικιακά απορρίμματα. Αυτά χωρίζονται σε ανακυκλώσιμα, ζυμώσιμα και τον υπόλοιπο όγκο των απορριμμάτων που δεν υπάγονται στις συγκεκριμένες κατηγορίες και χρήζουν ειδικής επεξεργασίας. Ξεχωριστή συλλογή και επεξεργασία υφίστανται κυρίως τα ανακυκλώσιμα υλικά τα οποία οδηγούνται σε Κέντρα Διαλογής Ανακυκλώσιμων Υλικών, ενώ τα ζυμώσιμα οικιακά απορρίμματα τα οποία είναι κατά βάση τροφικά υπολείμματα οδηγούνται με τον υπόλοιπο όγκο των απορριμμάτων ως σύμμεικτα σε χώρους υγειονομικής ταφής (ΧΥΤΑ) ή σε μονάδες καύσης. Η συγκεκριμένη προσέγγιση στην διαχείριση των στερεών αποβλήτων έχει περιβαλλοντικές επιπτώσεις με τις σημαντικότερες να εντοπίζονται στην εκπομπή βιοαερίου στην ατμόσφαιρα από τους ΧΥΤΑ.

Στον αντίποδα τα υγρά αστικά απόβλητα που απαρτίζονται κυρίως από τα αστικά λύματα συλλέγονται μέσω του αποχετευτικού δικτύου των πόλεων και οδηγούνται σε Κέντρα Επεξεργασίας Λυμάτων (ΚΕΛ). Τα στάδια τα οποία ακολουθεί ένα υγρό απόβλητο για την σταθεροποίηση του είναι η πρωτογενής επεξεργασία που αφορά σε φυσικές μεθόδους διαχωρισμού των λυμάτων από τον μεγαλύτερο όγκο στερεών που βρίσκονται σε αυτά, η δευτερογενής επεξεργασία η οποία αποσκοπεί στην απομάκρυνση του ρυπογόνου φορτίου τους (Οργανικός άνθρακας, Άζωτο και Φώσφορος) με τη χρήση βιολογικών διεργασιών και η τριτογενής επεξεργασία η οποία αφορά σε φυσικοχημικές μεθόδους απολύμανσης αυτών. Η δευτερογενής επεξεργασία κατά κύριο λόγο βασίζεται στην απομάκρυνση του οργανικού φορτίου των αστικών λυμάτων μέσω βιολογικών διεργασιών. Η συγκεκριμένη διαχειριστική πρακτική βασίζεται κατά κύριο λόγο στην διεργασία της ενεργού ιλύος, όπου επέρχεται βιολογική οξείδωση του οργανικού φορτίου από ετερότροφους μικροοργανισμούς με χρήση μηχανικού αερισμού ως πηγή οξυγόνου. Η δευτερογενής επεξεργασία όμως παρά την λειτουργικότητα της εμφανίζει μειονεκτήματα όπως το μεγάλος κόστος ενέργειας για την λειτουργία του μηχανικού αερισμού, και την παραγωγή περίσσειας ιλύος που χρήζει επιπλέον επεξεργασίας.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας που αποτελεί μέρος του ερευνητικού προγράμματος DENOMINATE (ΕΛΙΔΕΚ ΔΕΠ) είναι η δημιουργία ενός καινοτόμου πλάνου διαχείρισης και ανάλυσης κύκλου ζωής της διεργασίας των δύο αυτών αποβλήτων εκμεταλλευόμενο την χημική τους συγγένεια. Τόσο τα τροφικά απόβλητα όσο και τα αστικά λύματα αποτελούνται κατά κύριο λόγο από οργανικές ενώσεις. Επίσης παρά την στερεή τους φάση τα τροφικά απόβλητα περιέχουν σημαντικές ποσότητες υγρασίας και αντίστοιχα τα υγρά αστικά λύματα παρουσιάζουν συγκέντρωση βιοδιασπώμενων στερεών. Μελετήθηκαν πιθανά σενάρια συν διαχείρισης του υγρού κλάσματος των τροφικών υπολειμμάτων που διαχωρίζεται μέσω της ξήρανσης (FMSW condensate) και των υγρών αστικών λυμάτων. Η διεργασία στην οποία στηρίζεται το νέο διαχειριστικό πλάνο είναι η αναερόβια χώνευση. Πλεονέκτημα της συγκεκριμένης διεργασίας έναντι της επικρατούσας βιολογικής οξείδωσης είναι τόσο οι χαμηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις όσο και η δυνατότητα ανάκτησης ενέργειας μέσω του παραγόμενου βιο-μεθανίου.

**Λέξεις κλειδιά:** SimaPro, Ανάλυση κύκλου ζωής, Τροφικά υπολείμματα, Βιοαέριο

## **Abstract**

The current situation in municipal waste management is based on their separate collection and processing depending on the physical state in which they are found. The term municipal solid waste mainly describes household waste. These are divided into recyclables, fermentable waste and the rest of the volume of waste that does not fall under the specific categories and needs special treatment. There is mainly a separate collection and processing of recyclable materials which are sent to Recyclable Materials Sorting Centers, while fermentable household waste which is based on food residues is sent with the rest of the volume of waste as a mixture to landfills or to incineration plants. The specific approach to solid waste management has environmental effects, the most important of which are found in the emission of biogas into the atmosphere from landfills.

On the other hand, municipal wastewater, which mainly consists of urban sewage, is collected through the city's sewage network and sent to Wastewater Treatment Centers (WTPs). The stages followed by a liquid waste for its stabilization are the primary treatment which refers to natural methods of separating the wastewater from the larger volume of solids found in it, the secondary treatment which aims to remove their polluting load (Organic carbon, Nitrogen and Phosphorus) with the use of biological processes and the tertiary treatment which refers to physicochemical methods of disinfecting them. Secondary treatment is primarily based on the removal of the organic load of municipal wastewater through biological processes. This specific management practice is primarily based on the activated sludge process, where biological oxidation of the organic load occurs by heterotrophic microorganisms using mechanical aeration as an oxygen source. However, despite its functionality, secondary treatment has disadvantages such as the high cost of energy for the operation of mechanical ventilation, and the production of excess sludge that needs additional treatment.

The aim of this undergraduate thesis, which is part of the DENOMINATE (ELIDEK) research program, is to create an innovative management plan and life cycle analysis of the process of these two wastes exploiting their chemical affinity. Both food waste and municipal wastewater are mainly composed of organic compounds. Also, despite their solid phase, food waste contains significant amounts of moisture and, correspondingly, wet municipal wastewater presents a concentration of biodegradable solids. Possible scenarios were studied plus management of the liquid fraction of food residues separated through drying (FMSW condensate) and wet municipal wastewater. The process on which the new management plan is based is anaerobic digestion. The advantage of this process over the prevailing biological oxidation is both the lower energy requirements and the possibility of energy recovery through the produced bio-methane.

**Key words:** SimaPro, Life cycle analysis, Food waste, Biogas

## Περιεχόμενα

|  |    |
|--|----|
| 1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....  | 10 |
| 1.1 Αστικά Απόβλητα .....  | 10 |
| 1.2 Νομοθετικό πλαίσιο .....   | 11 |
| 1.3 Πρόγραμμα Waste4think .....  | 11 |
| 1.4 Πρόγραμμα DENOMINATE .....   | 12 |
| 2. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ .....  | 13 |
| 2.1 Αστικά Στερεά Απόβλητα – ΑΣΑ (Municipal Solid Waste MSW) .....             | 14 |
| 2.1.1 Διαχείριση ΑΣΑ .....   | 15 |
| 2.1.2 Αστικά ζυμώσιμα απόβλητα (Fermentable Municipal Solid Waste, FMSW) ..... | 17 |
| 2.2 Αστικά Υγρά Απόβλητα – ΑΥΑ (Municipal Wastewater, MWW).....                | 18 |
| 2.2.1 Χαρακτηριστικά ΑΥΑ .....   | 18 |
| 2.2.2 Επεξεργασία Αστικών Υγρών Αποβλήτων .....                                | 19 |
| 3. ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ .....   | 21 |
| 3.1 Γενικά.....  | 21 |
| 3.2 Στάδια.....  | 22 |
| 3.2.1 Διαλυτοποίηση .....  | 23 |
| 3.2.2 Υδρόλυση.....  | 23 |
| 3.2.3 Οξεογένεση .....   | 23 |
| 3.2.4 Οξικογένεση .....  | 23 |
| 3.2.5 Μεθανογένεση .....   | 24 |
| 3.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την διεργασία .....                              | 24 |
| 3.4 Σχεδιαστικές παράμετροι.....   | 24 |
| 3.4.1 Χρόνος Παραμονής .....   | 24 |
| 3.4.2 Οργανικό Φορτίο.....   | 25 |
| 3.5 Συστήματα Αναερόβια Χώνευσης.....  | 25 |
| 3.5.1 Αντιδραστήρας συνεχούς – CSTR.....                                       | 25 |
| 3.5.2 Αντιδραστήρας ανοδικής ροής διαμέσου στρώσης ιλύος - UASBR.....          | 26 |
| 3.5.3 Αντιδραστήρας ρευστοποιημένης και εκτεταμένης κλίνης - FBR και AF.....   | 26 |
| 3.5.4 Αντιδραστήρας σταθερής κλίνης - AF .....                                 | 27 |
| 4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ.....  | 27 |
| 4.1 Γενικά.....  | 27 |
| 4.2 Στάδια μεθοδολογίας ΑΚΖ.....   | 28 |
| 4.2.1 Καθορισμός στόχου και οριοθέτηση του πεδίου εφαρμογής.....               | 29 |
| 4.2.2 Καταγραφή δεδομένων κύκλου ζωής .....                                    | 30 |
| 4.2.3 Εκτίμηση επιπτώσεων του κύκλου ζωής.....                                 | 31 |

|   |    |
|---|----|
| 4.2.4 Ερμηνεία των αποτελεσμάτων.....   | 31 |
| 5. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ SimaPro .....  | 32 |
| 5.1 Εισαγωγή – Λογισμικό SimaPro 7.....   | 32 |
| 5.2 Βιβλιοθήκες και βάσεις δεδομένων.....   | 32 |
| 5.3 Προσεγγίσεις μεθόδων αξιολόγησης.....   | 33 |
| 5.4 Καταγραφή δεδομένων.....  | 33 |
| 6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....   | 33 |
| 6.1 Πειραματικά δεδομένα .....  | 35 |
| 6.1.1 Χαρακτηρισμός Συμπυκνώματος (FMSW condensate) .....   | 35 |
| 6.1.2 Χαρακτηρισμός Συνθετικού Αστικού Λύματος (synthetic Municipal Wastewater – sMWW).....   | 39 |
| 6.1.3 Χαρακτηρισμός ενεργού ιλύος (WAS).....  | 40 |
| 6.2 Πειραματική διαδικασία .....  | 41 |
| 6.2.1 Συνδιαχείριση FMSW condensate και MWW σε έναν ταχύρρυθμο αντιδραστήρα με ανακλαστήρες τύπου PABR (Periodic Anaerobic Baffled Reactor) ..... | 41 |
| 6.2.2 Συνδιαχείριση FMSW condensate και WAS σε έναν αντιδραστήρα συνεχούς λειτουργίας και πλήρους ανάδευσης (CSTR) .....                          | 43 |
| 7. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΑΣΑ ΚΑΙ ΑΥΑ .....  | 45 |
| 7.1 Εισαγωγή .....  | 45 |
| 7.2 Προτεινόμενα Διαχειριστικά Σενάρια .....  | 46 |
| 7.2.1 Σενάριο υπ’ αριθμόν 1 : .....   | 48 |
| Αναερόβια Συγχώνευση Αστικών Λυμάτων και FMSW condensate .....  | 48 |
| 7.2.2 Σενάριο υπ’ αριθμόν 2 : .....   | 51 |
| Αναερόβια Συγχώνευση FMSW condensate και περίσσειας ενεργού ιλύος .....   | 51 |
| 7.3 Συμπεράσματα .....  | 52 |
| 8. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ – ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ SimaPro .....  | 53 |
| 8.1 Εισαγωγή Λογισμικού SimaPro .....   | 53 |
| 8.2 Βιβλιοθήκες και Βάσεις δεδομένων.....   | 53 |
| 8.2.1 Ecoinvent .....   | 53 |
| 8.2.2 ELCD.....   | 54 |
| 8.3 Μέθοδος Αξιολόγησης .....   | 54 |
| 8.3.1 ReCiPe 2016 Midpoint (E).....   | 54 |
| 9. ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....   | 57 |
| 9.1 Οριοθέτηση Διαχειριστικών σεναρίων .....  | 57 |
| 9.1.1 Στόχος και πεδίο εφαρμογής .....  | 57 |
| 9.1.2 Λειτουργική Μονάδα .....  | 57 |

|   |    |
|---|----|
| 9.1.3 Όρια Συστήματος.....  | 57 |
| 9.2 Συλλογή δεδομένων LCI – AKZ Σεναρίου 1 .....  | 58 |
| 9.2.1 LCI του FMSW condensate .....   | 58 |
| 9.2.2 LCI του MWW (Municipal wastewater).....   | 59 |
| 9.2.3 LCI του effluent (PABR).....  | 61 |
| 9.2.4 LCI του Σεναρίου 1.....   | 62 |
| 9.3 Συλλογή δεδομένων LCI – Σεναρίου 2 .....  | 63 |
| 9.3.1 LCI του FMSW condensate .....   | 63 |
| 9.3.2 LCI του WAS.....  | 65 |
| 9.3.3 LCI του effluent (CSTR) .....   | 66 |
| 9.3.4 LCI του Σεναρίου 2.....   | 67 |
| 10. ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ SimaPro - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....                                      | 69 |
| 10.1 Ανάλυση Σεναρίου 1: Αναερόβια Συγχώνευση Αστικών Λυμάτων και FMSW<br>condensate .....          | 69 |
| 10.1.1 Δέντρο Διεργασιών Σεναρίου 1.....  | 69 |
| 10.1.2 Αξιολόγηση επιπτώσεων Σεναρίου 1 .....   | 70 |
| 10.2 Ανάλυση Σεναρίου 2: Αναερόβια συγχώνευση Περίσσειας Ενεργού Ιλύος και FMSW<br>condensate ..... | 73 |
| 10.2.1 Δέντρο Διεργασιών Σεναρίου 2.....  | 73 |
| 10.2.2 Αξιολόγηση επιπτώσεων Σεναρίου 2 .....   | 74 |
| 11. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....  | 76 |
| 11.1 Συμπεράσματα Σεναρίου 1 .....  | 77 |
| 11.2 Συμπεράσματα Σεναρίου 2 .....  | 77 |
| 11.3 Προτάσεις βελτίωσης αποδοτικότητας.....  | 77 |
| 12. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....  | 78 |
| 13. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ .....   | 82 |
| Παράρτημα Α: Characterization - Human carcinogenic toxicity – Σενάριο 1 .....                       | 82 |
| Παράρτημα Β: Characterization – Freshwater ecotoxicity - Σενάριο 1.....                             | 82 |
| Παράρτημα Γ: Characterization – Freshwater eutrophication -Σενάριο 1 .....                          | 82 |
| Παράρτημα Δ: Characterization – Marine ecotoxicity - Σενάριο 1 .....                                | 82 |
| Παράρτημα Ε: Characterization – Human non-carcinogenic toxicity - Σενάριο 1 .....                   | 83 |
| Παράρτημα Ζ: Characterization – Terrestrial ecotoxicity – Σενάριο 1.....                            | 83 |
| Παράρτημα Η: Characterization - Human carcinogenic toxicity - Σενάριο 2 .....                       | 83 |
| Παράρτημα Θ: Characterization – Freshwater ecotoxicity - Σενάριο 2 .....                            | 84 |
| Παράρτημα Ι: Characterization – Marine ecotoxicity - Σενάριο 2 .....                                | 84 |
| Παράρτημα Κ: Characterization – Human non-carcinogenic toxicity - Σενάριο 2 .....                   | 84 |

Παράρτημα Λ: Characterization – Terrestrial ecotoxicity – Σενάριο 2 ..... 84



## Περιεχόμενα Εικόνων

|   |    |
|---|----|
| Εικόνα 1: Περιοδικός Αναερόβιος Αντιδραστήρας με Ανακλαστήρες (PABR) .....  | 42 |
| Εικόνα 2: Ο βιοαντιδραστήρας πιλοτικής κλίμακας που χρησιμοποιήθηκε για την αναερόβια συν-χώνευση του μίγματος FMSW condensate/WAS..... | 44 |

## Περιεχόμενα Διαγραμμάτων

|   |    |
|---|----|
| Διάγραμμα 1: Μέση ωριαία απώλεια μάζας τροφικών αποβλήτων κατά την διάρκεια της ξήρανσης ανά περίοδο συλλογής ..... | 36 |
| Διάγραμμα 2: Μέση συγκέντρωση ολικού οργανικού φορτίου FMSW condensate ανά ώρα ξήρανσης. ....                       | 37 |
| Διάγραμμα 3: Characterization - Αποτελέσματα της LCIA για το Σενάριο 1 .....  | 71 |
| Διάγραμμα 4: Normalization - Αποτελέσματα της LCIA για το Σενάριο 1.....  | 71 |
| Διάγραμμα 5: Characterization - Αποτελέσματα της LCIA για το Σενάριο 2 .....  | 74 |
| Διάγραμμα 6: Normalization - Αποτελέσματα της LCIA για το Σενάριο 2.....  | 75 |

## Περιεχόμενα Σχημάτων

|   |    |
|---|----|
| Σχήμα 1: Πηγές συνεισφοράς αποβλήτων στη σύσταση των αστικών αποβλήτων .....  | 10 |
| Σχήμα 2: Κατηγορίες αστικών αποβλήτων και ανάλυση τους .....  | 11 |
| Σχήμα 3: Διαχείριση Αστικών Αποβλήτων στην Ελλάδα, υπάρχουσα κατάσταση .....  | 12 |
| Σχήμα 4: Προτεινόμενο σύστημα συνδυασμένης διαχείρισης.....   | 13 |
| Σχήμα 5: Συμβατική διεργασία σταθεροποίησης αστικών λυμάτων .....   | 14 |
| Σχήμα 6: Τρόποι διαχείρισης αστικών αποβλήτων ανά κατηγορία αποβλήτου.....  | 14 |
| Σχήμα 7: Βήματα διαχείρισης αστικών στερεών αποβλήτων .....   | 15 |
| Σχήμα 8: Σχηματική απεικόνιση των σταδίων της αναερόβια χώνευσης.....   | 22 |
| Σχήμα 9: Σχηματική αναπαράσταση αντιδραστήρα CSTR .....   | 26 |
| Σχήμα 10: Σχηματική αναπαράσταση αντιδραστήρα UASBR .....   | 26 |
| Σχήμα 11: Σχηματική αναπαράσταση αντιδραστήρα AF .....  | 27 |
| Σχήμα 12: Σχηματική αναπαράσταση αντιδραστήρα FBR .....   | 27 |
| Σχήμα 13: Στάδια AKZ [Τροποποίηση από ISO 14044, 2006] .....  | 29 |
| Σχήμα 14: Διάγραμμα ροής τροφικών αποβλήτων κατά την εφαρμογή του διαχειριστικού πλάνου Waste4Think.....  | 34 |
| Σχήμα 16: Η περιγραφή της διεργασίας του εναλλακτικού σεναρίου της αναερόβιας συν-χώνευσης ενεργού ιλύος με το συμπυκνώματος που προκύπτει από την ξήρανση των απορριμμάτων τροφίμων..... | 43 |
| Σχήμα 18: Σχηματική απεικόνιση του διαγράμματος ροής του βιοαντιδραστήρα και του εξοπλισμού .....   | 45 |
| Σχήμα 19: Υπάρχον Διαχειριστικό Πλάνο. *Κ.Ε.Λ. (Κέντρο Επεξεργασίας Λυμάτων), *Κ.Δ.Α.Υ (Κέντρο Διαλογής Ανακυκλώσιμων Υλικών), *Χ.Υ.Τ.Α. (Χώροι Υγειονομικής Ταφής).....                  | 48 |
| Σχήμα 20: Διάγραμμα ροής προτεινόμενου σεναρίου με χρήση PABR (1ο σενάριο) .....  | 49 |
| Σχήμα 21: Διάγραμμα ροής εναλλακτικού Σεναρίου 2 .....  | 51 |
| Σχήμα 22: Απεικόνιση σχέσεων μεταξύ κατηγοριών επιπτώσεων στο μέσο επίπεδο .....  | 56 |
| Σχήμα 23: Δέντρο διεργασιών SimaPro Σεναρίου 1.....   | 69 |
| Σχήμα 24: Δέντρο διεργασιών SimaPro Σεναρίου 2.....   | 73 |

## ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

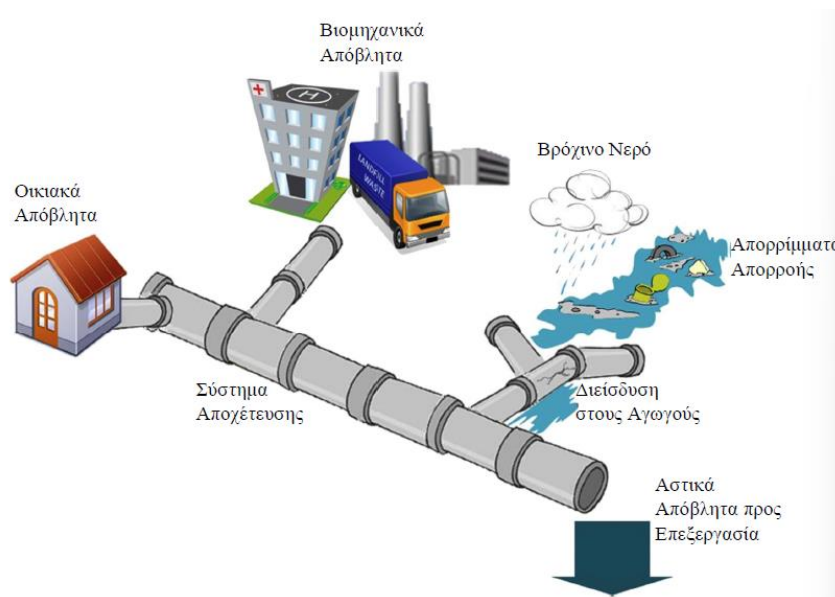
### 1.1 Αστικά Απόβλητα

Οι ανθρώπινες κοινότητες παράγουν τόσο υγρά όσο και στερεά απόβλητα λόγω των δραστηριοτήτων τους, οι οποίες χρησιμοποιούν πρώτες ύλες και παράγουν προϊόντα ωφέλιμα για τον άνθρωπο και το περιβάλλον. Τα λύματα, στα οποία περιλαμβάνονται τα οικιακά λύματα και τα αστικά λύματα, είναι ένας τύπος αποβλήτων που περιλαμβάνει σημαντικές ποσότητες υγρών βιομηχανικών αποβλήτων. Τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά των αστικών λυμάτων είναι σε μεγάλο βαθμό προβλέψιμα από τον πληθυσμό και τον αριθμό των υπηρεσιών μιας κοινότητας.

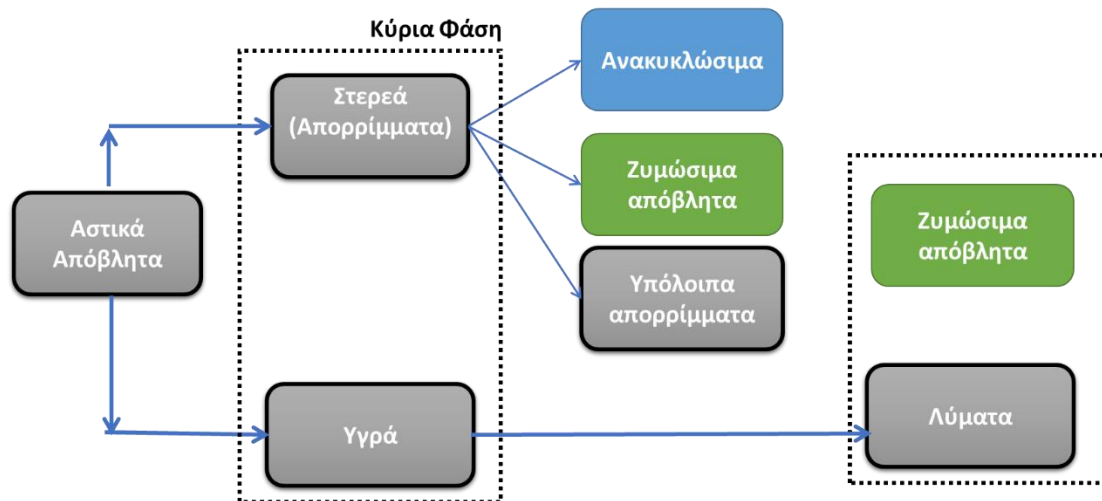
Η ποσότητα και η ποιότητα των αποβλήτων που παράγονται στα νοικοκυριά εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες, όπως η συμπεριφορά των κατοίκων, ο τύπος και η ποσότητα των παραγόμενων αποβλήτων, ο τρόπος ζωής και οι υποδομές που χρησιμοποιούνται για την υποστήριξη του τρόπου ζωής. Κατά συνέπεια, η παραγωγή αποβλήτων από τις ανθρώπινες δραστηριότητες είναι αναπόφευκτη, αλλά η ποσότητα και η ποιότητά τους ποικίλλουν ανάλογα με διάφορους παράγοντες. Ως εκ τούτου, είναι ζωτικής σημασίας η ανακύκλωση και η ορθή διάθεση των αποβλήτων.

Τα κοινοτικά απόβλητα περιλαμβάνουν τα οικιακά απόβλητα, τα απόβλητα από τα πανεπιστήμια και τα ερευνητικά κέντρα, τα βιομηχανικά απόβλητα, τα απόβλητα από διήθηση λυμάτων, βρόχινο νερό, λύματα και απόβλητα σηπτικών δεξαμενών. Επιπλέον, διάφοροι τύποι αποβλήτων παράγονται εντός των εγκαταστάσεων επεξεργασίας, όπως το νερό που χρησιμοποιείται για τον καθαρισμό του εξοπλισμού και το υπολειμματικό νερό από την αφυδάτωση της ιλύος. Αυτά τα απόβλητα συμβάλλουν στη συνολική περιβαλλοντική επίπτωση (Drexler et al., 2014; Παραδόσεων, 2016).

Στα παρακάτω Σχήματα 1 και 2 παρουσιάζονται συνοπτικά τις πηγές συνεισφοράς για την δημιουργία των αστικών αποβλήτων καθώς και τις κατηγορίες αυτών.



Σχήμα 1: Πηγές συνεισφοράς αποβλήτων στη σύσταση των αστικών αποβλήτων



Σχήμα 2: Κατηγορίες αστικών αποβλήτων και ανάλυση τους

## 1.2 Νομοθετικό πλαίσιο

Οι κανονισμοί της ΕΕ κινούνται στην κατεύθυνση της ορθολογικής διαχείρισης των ΑΣΑ, η οποία περιλαμβάνει (α) τη διαλογή στην πηγή και ξεχωριστή συλλογή των ανακυκλώσιμων, καθώς και (β) ανάκτηση ενέργειας από τα βιοαποικοδομήσιμα απόβλητα μέσω τεχνολογιών όπως η αποτέφρωση και η αναερόβια χώνευση. Οι πιο σημαντικοί κανονισμοί και στόχοι της ΕΕ σχετικά με τον τομέα της διαχείρισης των Αστικών Αποβλήτων είναι οι στόχοι περί εκτροπής των βιοαποβλήτων από τους χώρους υγειονομικής ταφής και η οδηγία για τις συσκευασίες και τα απορρίμματα συσκευασίας (European Environment Agency., n.d.; Managing Municipal Solid Waste - a Review of Achievements in 32 European Countries, n.d.).

Η διαλογή στην πηγή των υπολειμμάτων τροφών, αφενός οδηγεί στη δημιουργία ενός χωριστού ρεύματος αποβλήτων, κατάλληλου για παραγωγή ενέργειας και άλλων υψηλής προστιθέμενης αξίας προϊόντων και αφετέρου ευνοεί την αύξηση της καθαρότητας των ανακυκλώσιμων (Tai et al., 2011).

## 1.3 Πρόγραμμα Waste4think

Στα πλαίσια ενός τρέχοντος προγράμματος Horizon 2020 (Waste4think) εφαρμοσμένο σε πιλοτική κλίμακα παρουσιάστηκε σχέδιο διαλογής στην πηγή και ξεχωριστής συλλογής υπολειμμάτων τροφίμων σε ένα δείγμα 1000 καλώς ενημερωμένων πολιτών. Τα υπολείμματα τροφών, στη συνέχεια, οδηγούνται σε μονάδα ξήρανσης και τεμαχισμού προς παραγωγή ενός προϊόντος βιομάζας το οποίου αποκαλούμε FORBI (food residue biomass).

Το συγκεκριμένο προϊόν μπορεί να χρησιμοποιηθεί (α) για την παραγωγή αερίων βιοκαυσίμων όπως είναι το μεθάνιο, το υδρογόνο καθώς και μίγμα των δύο (hythane) (β) για παραγωγή βιοαιθανόλης (γ) για παραγωγή πέλλετ (δ) για παραγωγή ζωοτροφών (ε) για παραγωγή εδαφοβελτιωτικού υλικού (κόμποστ) (στ) για παραγωγή ενεργού άνθρακα και (ζ) ως εναλλακτικό καύσιμο για την τσιμεντοβιομηχανία (Waste4Think, 2015). Ως εκ τούτου μέσω του Waste4think αναπτύσσεται μέθοδος για την αποτελεσματική αξιοποίηση του οργανικού κλάσματος των στερεών αποβλήτων, κάτι το οποίο έως και σήμερα δεν γίνεται με συστηματικό τρόπο. Τα μέχρι στιγμής αποτελέσματα έχουν δείξει ότι η διαδικασία ξήρανσης και τεμαχισμού των υπολειμμάτων τροφίμων απαιτεί μόνο τη μισή ποσότητα ενέργειας σε σύγκριση με αυτή που μπορεί να ανακτηθεί από το FORBI. Επιπλέον, το τελικό προϊόν

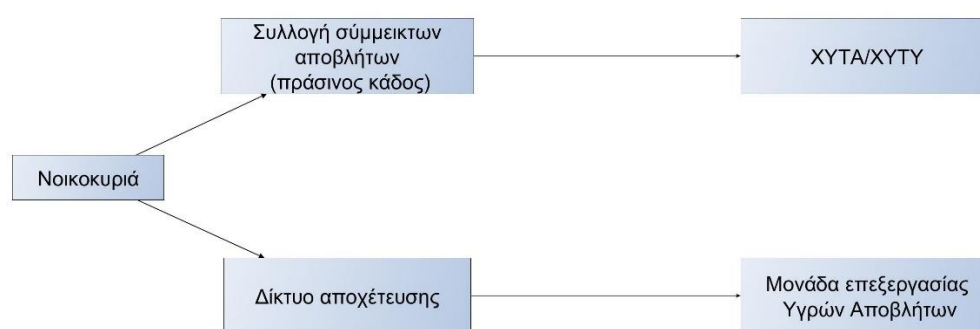
βιομάζας αποτελεί το 25% περίπου του αρχικού αποβλήτου (κατά μάζα) ενώ το υπόλοιπο ανακτάται υπό τη μορφή υγρού ρεύματος (συμπυκνώματος). Τέλος, το FORBI, σε αντίθεση με το αρχικό μίγμα υπολειμμάτων τροφών, είναι απαλλαγμένο από οσμές, είναι ομογενοποιημένο και μπορεί να αποθηκευθεί για μεγάλες χρονικές περιόδους χωρίς να αλλοιωθούν τα χαρακτηριστικά του.

Οι εναλλακτικές χρήσεις του FORBI θα συγκριθούν από οικονομική και περιβαλλοντική σκοπιά ώστε να αναπτυχθεί η βέλτιστη μέθοδος αξιοποίησης του. Η συγκεκριμένη προσέγγιση έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική και μπορεί να οδηγήσει τη μετατροπή ενός Δήμου από παραγωγό αποβλήτων σε παραγωγό προϊόντων. Ως εκ τούτου, στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος Waste4think αναπτύσσεται μία μέθοδος για την διαχείριση και αξιοποίηση του στερεού κλάσματος των βιοαποικοδομήσιμων στερεών αποβλήτων.

#### 1.4 Πρόγραμμα DENOMINATE

Στόχος του προγράμματος **DENOMINATE** θα είναι η ανάπτυξη συστηματικής μεθόδου για την διαχείριση και αξιοποίηση του υγρού υπολείμματος του βιοαποικοδομήσιμου κλάσματος των ΑΣΑ.

Το υγρό αυτό συμπύκνωμα, ανάλογα με τις συνθήκες ξήρανσης, μπορεί να περιέχει (όπως έχει διαπιστωθεί κατόπιν εργαστηριακών αναλύσεων) σημαντικό ποσό οργανικού φορτίου. Ως εκ τούτου, προτείνεται η ανάμιξη του συμπυκνώματος με το ρεύμα των Αστικών Υγρών Αποβλήτων και η ανάπτυξη βέλτιστης μεθόδου αξιοποίησης/επεξεργασίας αυτού του νέου τύπου Υγρού Αποβλήτου. Ο σκοπός του προγράμματος **DENOMINATE**, επομένως, είναι ο σχεδιασμός ενός ενεργειακά βιώσιμου συστήματος επεξεργασίας του μίγματος των Υγρών Αποβλήτων και του υγρού συμπυκνώματος των βιοαποικοδομήσιμων στερεών αποβλήτων. Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται συνοπτικά η υπάρχουσα κατάσταση στην επεξεργασία των Αστικών Αποβλήτων στην Ελλάδα. Το προτεινόμενο σύστημα συνδυασμένης διαχείρισης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.



Σχήμα 3: Διαχείριση Αστικών Αποβλήτων στην Ελλάδα, υπάρχουσα κατάσταση



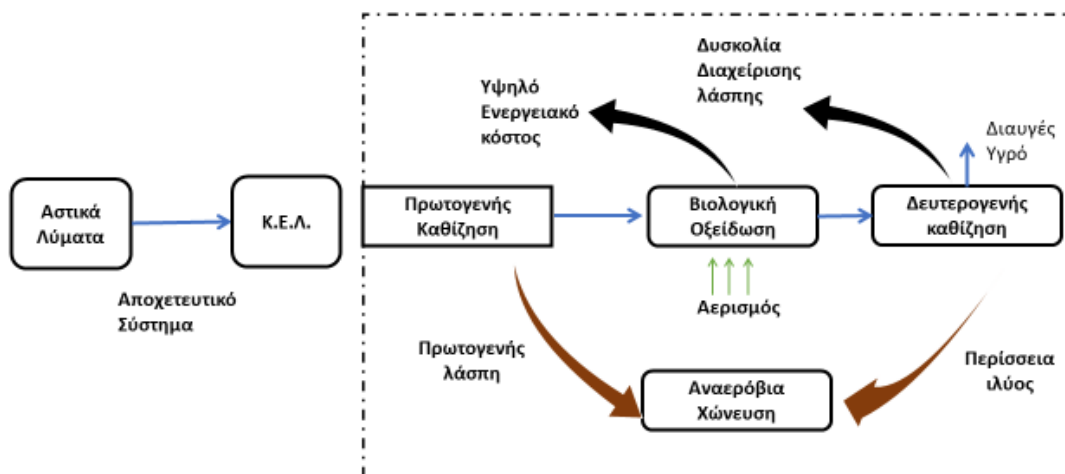
Σχήμα 4: Προτεινόμενο σύστημα συνδυασμένης διαχείρισης

## ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Διαχρονικά, η διαχείριση των στερεών και υγρών αστικών αποβλήτων έχει εξελιχθεί σε δύο ξεχωριστά ρεύματα, με βάση τη κύρια φάση του κάθε ρεύματος: υγρή και στερεή. Φυσικά, τα αστικά υγρά απόβλητα περιλαμβάνουν σημαντικές ποσότητες αιωρούμενων στερεών (Chan, Chong, Law, & Hassell, 2009), ενώ και τα ΑΣΑ, και ειδικότερα τα υπολείμματα τροφών, χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά υψηλό ποσοστό υγρασίας (70-80%) (R. Zhang et al., 2007). Στην προτεινόμενη ερευνητική εργασία, θα μελετηθεί η δυνατότητα ανάπτυξης μίας σημαντικά πιο βιώσιμης προσέγγισης.

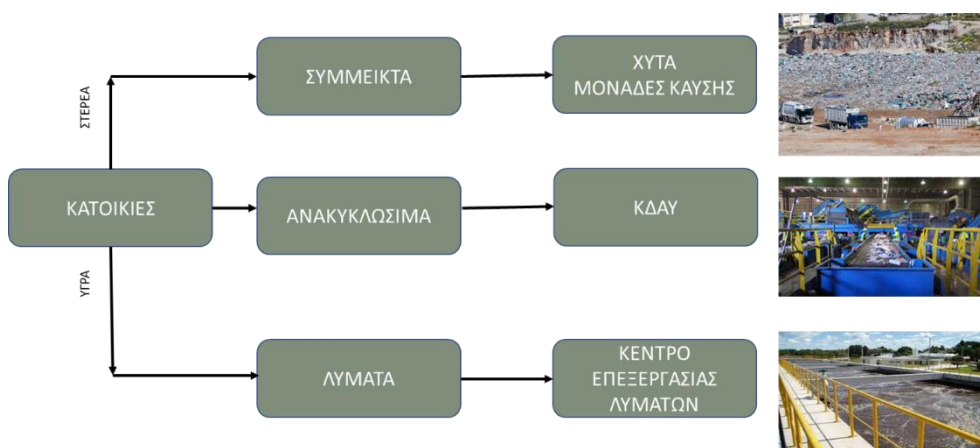
Η υφιστάμενη διαχείριση των Αστικών Υγρών Αποβλήτων αποτελείται από τη συλλογή τους, την επεξεργασία τους σε κατάλληλη μονάδα με σκοπό την απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών μέσω πρωτοβάθμιας καθίζησης, τη βιολογική οξείδωση της οργανικής ύλης, την απομάκρυνση των βιολογικών θρεπτικών συστατικών (αζώτου και φωσφόρου) και την τελική διάθεση της εκροής κατόπιν απολύμανσης μέσω χλωρίωσης. Η συγκεκριμένη διαδικασία οδηγεί στην παραγωγή ενός μίγματος πρωτοβάθμιας και περίσσειας δευτεροβάθμιας ιλύος το οποίο βιοσταθεροποιείται και στη συνέχεια οδηγείται σε αφυδάτωση και τελικά σε διάθεση (Chan et al., 2009b). Το σημαντικότερο λειτουργικό κόστος προκύπτει από τις απαιτήσεις σε αερισμό καθώς και από τη διαχείριση της ιλύος (Mohan et al., 2008).

Τα τελευταία χρόνια έχουν προταθεί μία σειρά από προσεγγίσεις, οι οποίες θα μπορούσαν να μειώσουν τις ενεργειακές απαιτήσεις της διαχείρισης των Αστικών Υγρών Αποβλήτων. Δυνατή θεωρείται η ανάκτηση ενέργειας από το διαλυτό οργανικό φορτίο που βρίσκεται σε ικανοποιητικές συγκεντρώσεις στα Αστικά Υγρά Απόβλητα, αντί για κατανάλωση ενέργειας για αερισμό, ακολουθούμενης από μερική ενεργειακή ανάκτηση υπό την μορφή βιοαερίου μέσω αναερόβιας χώνευσης των βιοστερεών. Μεταξύ των εναλλακτικών επιλογών που έχουν μελετηθεί υπάρχει και η αναερόβια χώνευση Αστικών Υγρών Αποβλήτων (Sosnowski et al., 2003). Η συγκεκριμένη προσέγγιση, ωστόσο, έχει αποδειχθεί βιώσιμη μόνο για περιοχές με πολύ θερμό κλίμα, με το σημαντικότερο πρόβλημα να εντοπίζεται στην χαμηλή συγκέντρωση του οργανικού φορτίου που περιέχεται στα Αστικά Υγρά Απόβλητα. Μία άλλη ενδιαφέρουσα εναλλακτική είναι η παραγωγή ηλεκτρισμού μέσω της τεχνολογίας των μικροβιακών κυψελίδων καυσίμου (G. Liu et al., 2013).



Σχήμα 5: Συμβατική διεργασία σταθεροποίησης αστικών λυμάτων

Όσον αφορά στη διαχείριση των ΑΣΑ, για πολλά χρόνια η συλλογή του βιοαποικοδομήσιμου οργανικού ρεύματος, κυρίως δηλαδή τα υπολείμματα τροφών, πραγματοποιούνταν μαζί με αυτή των ανακυκλώσιμων (πλαστικά, χαρτιά/χαρτόνια, γυαλί και μέταλλα) σε πράσινους κάδους με απευθείας διάθεση σε ΧΥΤΑ. Ο συγκεκριμένος τύπος διαχείρισης, που αντιστοιχεί σε 86% του συνόλου των ΑΣΑ στην Ελλάδα, έχει ως αποτέλεσμα (α) την απώλεια ανακυκλώσιμων υλικών, που συνεπάγεται ελλειμματική διαχείριση πόρων και (β) την παραγωγή και έκλυση βιοαερίου (κυρίως δηλαδή μεθανίου και διοξειδίου του άνθρακα) που συμβάλλουν στην ένταση του φαινομένου του θερμοκηπίου.



Σχήμα 6: Τρόποι διαχείρισης αστικών αποβλήτων ανά κατηγορία αποβλήτου

## 2.1 Αστικά Στερεά Απόβλητα – ΑΣΑ (Municipal Solid Waste MSW)

Τα αστικά στερεά απόβλητα ορίζονται ως ένα ακανόνιστο ανομοιογενές συνονθύλευμα υλικών που προκύπτουν από την καθημερινή ζωή και τις καθημερινές δραστηριότητες και τα οποία είναι ανεπιθύμητα για τον κάτοχό τους ο οποίος επιθυμεί να τα απορρίψει.

Τα ΑΣΑ χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

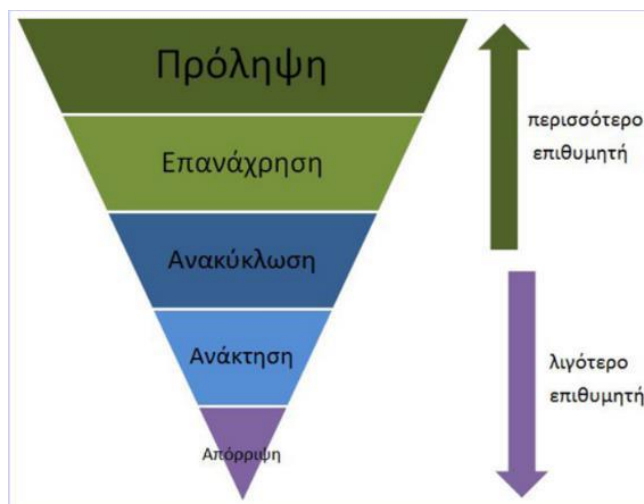
- Ανακυκλώσιμα:  
Χαρτί/χαρτόνι (απορρίμματα χαρτιού, χαρτόνι, περιοδικά, εφημερίδες, χάρτινες σακούλες, χάρτινες συσκευασίες),  
Πλαστικό (μπουκάλια, συσκευασίες, δοχεία, σακούλες, καπάκια, κύπελλα)  
Γυαλί (γυάλινα μπουκάλια, σπασμένα γυαλιά, χρωματισμένο γυαλί)  
Μέταλλα (αλουμινένια κύπελλα, μεταλλικά δοχεία κ.λ.π.)
- Ζυμώσιμα:  
Κυρίως τα βιολογικά απορρίμματα τροφίμων, απόβλητα κήπων
- Υπόλοιπος όγκος:  
Αδρανή υλικά

Η μέση παραγωγή ΑΣΑ στην Ευρωπαϊκή Ένωση για το 2021 ήταν 527kg/άτομο με την Ελλάδα να βρίσκεται σε φυσιολογικό επίπεδο από τον ευρωπαϊκό μέσο όρο με τιμή 524kg/άτομο (Municipal Waste Statistics - Statistics Explained, n.d.).

### 2.1.2 Διαχείριση ΑΣΑ

Η διαχείριση των αποβλήτων έχει ως κύριο στόχο την μείωση έως την ελαχιστοποίηση των ΑΣΑ που διατίθενται και στηρίζεται στο μοντέλο της κυκλικής οικονομίας. Η αιεφορική διαχείριση των ΑΣΑ στηρίζεται σύμφωνα με την διάταξη 4042/2012 για την θεματική στρατηγική της ΕΕ για πρόληψη και ανακύκλωση των αποβλήτων στην:

- Πρόληψη-ελαχιστοποίηση
- Επαναχρησιμοποίηση
- Ανακύκλωση
- Ανάκτηση ενέργειας
- Τελική διάθεση



Σχήμα 7: Βήματα διαχείρισης αστικών στερεών αποβλήτων

### 2.1.2.1 Ανακύκλωση

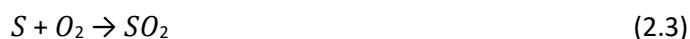
Η ανακύκλωση είναι η επανεπεξεργασία ήδη επεξεργασμένων υλικών που έχουν απορριφθεί και έχει πραγματοποιηθεί μετατροπή τους σε πρώτες ύλες με σκοπό την δημιουργία νέων προϊόντων. Η ανακύκλωση συντελεί στην εξοικονόμηση υλικών και ενέργειας, στην μείωση της ρύπανσης και στην μείωση της ποσότητας ΑΣΑ που προορίζονται για τελική διάθεση σε χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (ΧΥΤΑ). Τα βασικά ανακυκλώσιμα πρωτογενή υλικά είναι το χαρτί/χαρτόνι, το πλαστικό, το αλουμίνιο και το γυαλί.

### 2.1.2.2 Θερμική επεξεργασία απορριμμάτων

Οι θερμικές μέθοδοι επεξεργασίας ΑΣΑ αποτελούν μεθόδους κατά τις οποίες χρησιμοποιείται θερμότητα για την διάσπαση των απορριμμάτων με ταυτόχρονη παραγωγή ενέργειας, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εναλλακτικό καύσιμο σε μεγάλο πλήθος βιομηχανικών καυστήρων.

Η κυριότερη μέθοδος θερμικής επεξεργασίας των αστικών στερεών απορριμμάτων είναι η καύση (incineration). Η καύση αποτελεί την θερμική οξείδωση παρουσία περίσσειας οξυγόνου και πραγματοποιείται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από 850°C. Τα τελικά προϊόντα αποτελούνται από καυσαέρια των αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>) και στάχτη η οποία αποτελείται από τα μη εύφλεκτα ΑΣΑ, κυρίως γυαλί και μέταλλο. Τα κυριότερα πλεονεκτήματά της είναι ότι μπορεί να μειώσει τον όγκο των απορριμμάτων κατά 85-95% με ταυτόχρονη παραγωγή ενέργειας. Το σημαντικότερο πρόβλημα που παρουσιάζεται είναι η ατμοσφαιρική ρύπανση που προκαλείται από τα παραγόμενα καυσαέρια.

Οι αντιπροσωπευτικές εξισώσεις είναι οι εξής:

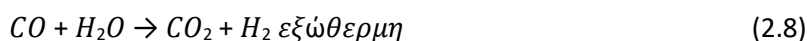
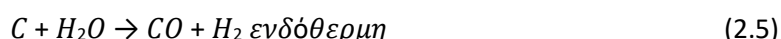


Η πυρόλυση αποτελεί την θερμική διάσπαση μιας οργανικής ουσίας σε συνθήκες απουσίας οξυγόνου (O<sub>2</sub>). Απαιτείται μια εξωτερική πηγή θερμότητας, ώστε να διατηρείται η θερμοκρασία στα επιθυμητά επίπεδα, δηλαδή 300-850°C, ανάλογα με την σύνθεση των ΑΣΑ. Κατά την διεργασία της πυρόλυσης παράγονται προϊόντα αέριας, υγρής ή στερεής φάσης. Η στερεή φάση αποτελείται από άνθρακα και αδρανή υλικά που περιέχονταν στο αρχικό ρεύμα ΑΣΑ. Το αέριο ρεύμα περιέχει συνθετικό αέριο, κυρίως υδρογόνο, μεθάνιο, μονοξείδιο του άνθρακα και διοξείδιο του άνθρακα. Το αέριο ρεύμα μπορεί να συμπυκνωθεί για την παραγωγή συνθετικού καυσίμου λαδιού, κεριού και πίσσας. Η πυρόλυση δεν χρησιμοποιείται ευρέως για την επεξεργασία ΑΣΑ, εξαιτίας της μεγάλης ανομοιογένειας που εμφανίζεται στο κλάσμα των αποβλήτων και της ανάγκης για προεπεξεργασία με σκοπό την απομάκρυνση υλικών όπως το γυαλί και τα μέταλλα.

Η τελευταία θερμική μέθοδος επεξεργασίας είναι η αεριοποίηση. Η αεριοποίηση είναι μερική οξείδωση ΑΣΑ, μέσα από την οποία παράγεται μείγμα αέριων καυσίμων που αποτελείται από μονοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο και υδρογόνο. Αντίστοιχα με την διεργασία της πυρόλυσης απαιτείται απομάκρυνση υλικών από το κλάσμα των ΑΣΑ. Η διεργασία της αεριοποίησης πραγματοποιείται σε υψηλή θερμοκρασία, συνήθως μεγαλύτερη από 650°C. Η διεργασία είναι κυρίως εξώθερμη, όμως απαιτείται ποσότητα θερμότητας για την αρχή της διεργασίας (Defra, 2013; Παραδόσεων, 2016).



Κατά την διαδικασία της αεριοποίησης λαμβάνουν χώρα πέντε βασικές αντιδράσεις:



#### 2.1.2.3 Διάθεση σε Χώρους Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων-ΧΥΤΑ

Η υγειονομική ταφή είναι η ελεγχόμενη και οργανωμένη ταφή των αποβλήτων με ελάχιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Καθώς η διάθεση αυξάνεται, είναι απαραίτητο να εισαχθούν διατάξεις για την προστασία του περιβάλλοντος και να δημιουργηθούν ελεγχόμενοι χώροι. Κάθε ημερήσιο φορτίο συμπιέζεται, καλύπτεται με χώμα και συλλέγεται μέσω αεραγωγών. Κατά τη διάρκεια της υγειονομικής επεξεργασίας, δημιουργούνται αποχετεύσεις από την αρχική υγρασία και τη διείσδυση του νερού της βροχής. Αυτό εξασφαλίζει μια βιώσιμη και φιλική προς το περιβάλλον διαδικασία διάθεσης αποβλήτων. Οι αποχετεύσεις περιέχουν τοξικές ουσίες που μπορούν να μολύνουν το νερό, καθιστώντας αναγκαία την ελεγχόμενη απομάκρυνσή τους. Η αναερόβια χώνευση αποσυνθέτει την οργανική ύλη των αποβλήτων, παράγοντας βιοαέριο (μεθάνιο, διοξείδιο του άνθρακα, άζωτο, οξυγόνο, αμμωνία και πτητικές οργανικές ουσίες). Αυτό το βιοαέριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εναλλακτικό καύσιμο, ενώ στην Ελλάδα η διαχείρισή του γίνεται κυρίως με καύση για τη μετατροπή του  $CH_4$  σε  $CO_2$  και τη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

#### 2.1.3 Αστικά ζυμώσιμα απόβλητα (Fermentable Municipal Solid Waste, FMSW)

Τα ζυμώσιμα στερεά αστικά απόβλητα ανήκουν στη κατηγορία των βιοαποικοδομήσιμων αποβλήτων. Βιοαποικοδομήσιμα υλικά είναι τα τροφικά, ζωικά απόβλητα και άλλα απόβλητα πλούσια σε οργανικά συστατικά. Τα ζυμώσιμα στερεά απόβλητα είναι ένας σημαντικός πόρος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υπόστρωμα αναερόβιας χώνευσης με υψηλές δυνατότητες ανάκτησης ενέργειας. Κατά αυτή τη διεργασία διασπάται η οργανική ύλη μέσω αναερόβιων μικροοργανισμών απουσία οξυγόνου, με ταυτόχρονη έκλυση βιοαερίου πλούσιο σε μεθάνιο. Τα ζυμώσιμα απόβλητα, επίσης, κομποστοποιούνται μέσω φυσικών διεργασιών με χρήση βακτηρίων, μυκήτων και σκουληκιών για την αποσύνθεση της οργανικής ύλης παράγοντας εδαφοβελτιωτικό χρήσιμο για τη γεωργία και τη κηπουρική. Μία κατηγορία ζυμώσιμων αποβλήτων που απασχολεί έντονα τη παγκόσμια κοινότητα τα τελευταία χρόνια αποτελούν τα τροφικά υπολείμματα. Οι αυξανόμενες απαιτήσεις σε τρόφιμα έχει ως αποτέλεσμα την ολοένα και αυξανόμενη δημιουργία τροφικών αποβλήτων. Τα τροφικά απόβλητα έχουν σημαντικό αντίκτυπο για το περιβάλλον και την δημόσια υγεία, διότι όταν τα τρόφιμα απορρίπτονται σε χωματερές, αποσυντίθενται και κάτω από αναερόβιες συνθήκες παράγουν μεθάνιο, το οποίο ενισχύει το φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Τα αστικά στερεά απόβλητα, κυρίως οργανικά απόβλητα κουζίνας και κήπου, αντιπροσωπεύουν το 30-50% της συνολικής ποσότητας, με τα απόβλητα τροφίμων να αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό. Η κύρια μέθοδος διαχείρισης είναι η αποτέφρωση και η διάθεση σε χώρους υγειονομικής ταφής, που αντιστοιχούν στο 95% των αποβλήτων. Ωστόσο, οι χώροι υγειονομικής ταφής δεν είναι φιλικό προς το περιβάλλον λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε υγρασία και της χαμηλής ενεργειακής απόδοσης. Τα απόβλητα

τροφίμων, πλούσια σε άνθρακα και άζωτο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πρώτη ύλη για βιοπροϊόντα όπως βιοκαύσιμα, προβιοτικά και βιοδιασπώμενα πλαστικά (Lytras et al., 2020).

## 2.2 Αστικά Υγρά Απόβλητα – ΑΥΑ (Municipal Wastewater, MWW)

Τα μη στερεά απόβλητα από κατοικίες και εμπορικές εγκαταστάσεις σε αστικό περιβάλλον αναφέρονται ως αστικά λύματα. Τα αστικά λύματα προέρχονται από το νερό που χρησιμοποιείται για τον καθαρισμό, το μαγείρεμα και το καζανάκι της τουαλέτας. Στα αστικά λύματα υπάρχουν βακτήρια, ιοί, προϊόντα καθαρισμού και υπολείμματα τροφίμων. Διαχωρίζονται τα φυσικά, χημικά και βιολογικά χαρακτηριστικά των αστικών λυμάτων. Οι μεγάλες πόλεις διαθέτουν συστήματα αποχέτευσης που συλλέγουν τα λύματα, τα μεταφέρουν μέσω εγκαταστάσεων επεξεργασίας για την απομάκρυνση των επιβλαβών ενώσεων και στη συνέχεια τα απορρίπτουν με ασφάλεια στο περιβάλλον. Οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας βιομηχανικών λυμάτων μπορούν είτε να επεξεργάζονται τα υγρά απόβλητα πριν από την απόρριψή τους απευθείας στον ορίζοντα είτε να τα δέχονται για επεξεργασία μέσω των συστημάτων αποχέτευσης (Lyberatos & Vagenas, 2016).

### 2.2.1 Χαρακτηριστικά ΑΥΑ

Τα χαρακτηριστικά των αστικών λυμάτων διακρίνονται σε 3 κατηγορίες:

- Φυσικά χαρακτηριστικά
- Χημικά χαρακτηριστικά
- Βιολογικά χαρακτηριστικά

#### 2.2.1.1 Φυσικά χαρακτηριστικά

Αν και σε σύγκριση με τις χημικές και βιολογικές ιδιότητες, τα φυσικά χαρακτηριστικά αποτελούν τη μικρότερη απειλή για το περιβάλλον και τη δημόσια υγεία, εξακολουθούν να προκαλούν άμεση αντίδραση από το γενικό πληθυσμό.

Τα πέντε στοιχεία των φυσικών χαρακτηριστικών είναι: η θερμοκρασία, το χρώμα, η οσμή, η πυκνότητα και η στερεή μορφή.

Η οσμή στα υγρά απόβλητα προκαλείται από αέρια που απελευθερώνονται κατά την αποσύνθεση της οργανικής ύλης, με κύριες ενώσεις τις αμίνες, την αμμωνία, τις διαμίνες, το υδρόθειο, τις μερκαπτάνες και τα οργανικά σουλφίδια. Η μέση θερμοκρασία των λυμάτων είναι υψηλότερη κατά τους περισσότερους μήνες από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, κυρίως λόγω του ζεστού νερού που χρησιμοποιείται στις οικιακές και βιομηχανικές δραστηριότητες. Τα φρέσκα λύματα έχουν γκριζο χρώμα, αλλά γίνονται μαύρα όταν εκτίθενται στον αέρα. Η πυκνότητα των λυμάτων, κυρίως των οικιακών αποβλήτων, είναι ίση με την πυκνότητα του νερού, γεγονός που καθορίζει την ικανότητά τους να σχηματίζουν ιζήματα στις δεξαμενές καθίζησης.

#### 2.2.1.2 Χημικά χαρακτηριστικά

Τα χημικά χαρακτηριστικά διακρίνονται σε οργανικά και ανόργανα συστατικά, με τις οργανικές ενώσεις να αποτελούνται από πρωτεΐνες, υδατάνθρακες, λίπη και έλαια και ουρία. Η ανθρώπινη δραστηριότητα συμβάλλει επίσης σε οργανικές ουσίες όπως τα απορρυπαντικά και οι φαινόλες. Τα ανόργανα χαρακτηριστικά συνοψίζονται ως:

- Το pH που συνήθως έχει ουδέτερη τιμή, κατά προσέγγιση, στο 7
- Τα χλωρίδια που προέρχονται από ανθρώπινες δραστηριότητες
- Την αλκαλικότητα που εκφράζεται ως το αποτέλεσμα της παρουσίας υδροξειδίων, ανθρακικών και διττανθρακικών στοιχείων.
- Το ανόργανο άζωτο που βρίσκεται στα λύματα κυρίως υπό την μορφή αμμωνίας και σε μικρότερη ποσότητα σε νιτρώδη και νιτρικά
- Ο φώσφορος σε μορφή ορθοφωσφορικών και πολυφωσφορικών
- Το θείο που βρίσκεται στα λύματα υπό την μορφή θεικών
- Ιόντα βαρέων μετάλλων που εξαιτίας της υψηλής τοξικότητάς τους χρήζουν ιδιαίτερης σημασίας όσο αφορά την επεξεργασία τους

### 2.2.1.3 Βιολογικά χαρακτηριστικά

Τα λύματα περιέχουν μικροοργανισμούς, συμπεριλαμβανομένων των παθογόνων κολοβακτηριδίων, που μπορεί να υποδηλώνουν ανθρώπινη ρύπανση. Τα βακτήρια αυτά μπορεί να σχετίζονται με παθογόνους μικροοργανισμούς, αλλά δεν θεωρούνται τοξικά. Για τη διάθεση των υγρών αποβλήτων στο περιβάλλον πρέπει να τηρούνται ορισμένα όρια και να πραγματοποιούνται διάφορες διεργασίες για την επεξεργασία αυτών των μικροοργανισμών. Ως εκ τούτου, τα κολοβακτηρίδια αποτελούν κοινό δείκτη της ανθρώπινης ρύπανσης.

### 2.2.2 Επεξεργασία Αστικών Υγρών Αποβλήτων

Η διαχείριση των υγρών αποβλήτων χωρίζεται σε τρεις βασικές διεργασίες (Lyberatos & Vagenas, 2016; Παραδόσεων, 2016):

- Την προεπεξεργασία
- Την πρωτοβάθμια επεξεργασία
- Την δευτερογενή επεξεργασία
- Την τριτογενή επεξεργασία

#### 2.2.2.1 Προεπεξεργασία

Η προεπεξεργασία είναι το πρώτο στάδιο αφού τα αστικά υγρά απόβλητα εισέρχονται στην εγκατάσταση επεξεργασίας. Προετοιμάζει τα απόβλητα για τις κύριες διεργασίες, απομακρύνοντας συστατικά τα οποία πρόκειται να δημιουργήσουν πρόβλημα στην συνέχεια της διεργασίας.

Η προεπεξεργασία χωρίζεται σε τέσσερα στάδια:

- Τον εσχαρισμό
- Την εξάμμωση
- Την λιποσυλλογή
- Την εξισορρόπηση παροχής-συγκέντρωσης

Η εσχарισμός είναι η πρώτη διεργασία σε μια μονάδα επεξεργασίας για την απομάκρυνση των ογκωδών στερεών από τα απόβλητα, τα οποία μπορούν να προκαλέσουν βλάβη στις αντλίες. Περιλαμβάνει το διαχωρισμό των στερεών με τη χρήση σχαρών που χωρίζονται σε χοντρό και λεπτό κόσκινο. Ακολουθεί η εξάμμωση, η οποία απομακρύνει στερεά σωματίδια με διάμετρο 200 μm ή μεγαλύτερη. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει καταβύθιση διακριτών σωματιδίων (τύπου 1) χωρίς αλληλεπίδραση με ταχύτητα ανεξάρτητη από τη συγκέντρωση των στερεών. Εάν τα υγρά απόβλητα περιέχουν σημαντικές ποσότητες ελαίων, απαιτείται συλλογή λίπους σε λιποσυλλέκτη, η οποία διαρκεί 3-5 λεπτά. Η εξισορρόπηση παροχής-συγκέντρωσης αποτελεί το τελικό στάδιο της προεπεξεργασίας, εξομαλύνοντας τις ημερήσιες διακυμάνσεις και παρέχοντας σταθερή παροχή για τα επόμενα στάδια.

#### *2.2.2.2 Πρωτοβάθμια επεξεργασία*

Η πρωτοβάθμια επεξεργασία είναι μια διαδικασία που απομακρύνει τα αιωρούμενα στερεά πριν από τη βιολογική επεξεργασία των αποβλήτων, μειώνοντας το οργανικό φορτίο. Περιλαμβάνει φυσικό διαχωρισμό μέσω καθίζησης ή επίπλευσης. Η πρωτογενής καθίζηση είναι τύπου 2 και απομακρύνει στερεά που κυμαίνονται από 0,1 έως 0,001 mm, απομακρύνοντας το 50-70% των συνολικών αιωρούμενων στερεών. Σχηματίζονται συσσωματώματα, αυξάνοντας το ρυθμό καθίζησης, καθώς τα σωματίδια κατευθύνονται προς τον πυθμένα της δεξαμενής. Ο διαχωρισμός με επίπλευση περιλαμβάνει την προσκόλληση των αιωρούμενων στερεών σε φυσαλίδες αερίου, μειώνοντας την πυκνότητά τους σε μικρότερη από την πυκνότητα του νερού, με αποτέλεσμα την επίπλευση. Η επίπλευση έχει σημαντικό πλεονέκτημα έναντι της καθίζησης, καθώς η άνωση επιτρέπει την ταχύτερη απομάκρυνση ελαφρύτερων σωματιδίων και στερεών.

#### *2.2.2.3 Δευτερογενής επεξεργασία*

Η δευτεροβάθμια επεξεργασία απομακρύνει το 85% της οργανικής ύλης μέσω βιολογικών διεργασιών που ονομάζονται διεργασίες ενεργού ιλύος. Οι διεργασίες αυτές περιλαμβάνουν την ανάπτυξη αερόβιων μικροοργανισμών σε ελεγχόμενο περιβάλλον, με αποτέλεσμα την οξείδωση των οργανικών λυμάτων. Οι διεργασίες ενεργού ιλύος περιλαμβάνουν αερισμό και δευτερογενή καθίζηση. Τα οργανικά λύματα εισέρχονται στη δεξαμενή αερισμού (ΔΑ), όπου οι μικροοργανισμοί τα οξειδώνουν, χρησιμοποιώντας τους ρύπους των αποβλήτων ως υποστρώματα για την ανάπτυξή τους και παράγοντας μεταβολικά προϊόντα όπως CO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> και SO<sub>4</sub><sup>-</sup>. Η ενεργός ιλύς αποτελείται από βιολογικά κροκιδωτικά, τα οποία απορροφούν αιωρούμενα σωματίδια και διαλυμένα στερεά και τα οξειδώνουν. Τα βιολογικά κροκιδωτικά καθιζάνουν στη δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης (ΔΔΚ), ενώ κάποια από αυτά ανακυκλώνονται στην ΔΑ, ενώ η υπόλοιπη ιλύς απομακρύνεται (περίσσεια ιλύος).

#### *2.2.2.4 Τριτοβάθμια επεξεργασία*

Τα υγρά απόβλητα της ΔΔΚ ενδέχεται να απαιτούν πρόσθετη επεξεργασία πριν από την απελευθέρωση στο υδάτινο περιβάλλον, εάν δεν πληρούν τις νομικές απαιτήσεις ή εάν το νερό προορίζεται για βιομηχανικούς ή αρδευτικούς σκοπούς. Η τριτοβάθμια επεξεργασία απομακρύνει το οργανικό φορτίο και αδρανοποιεί τους παθογόνους μικροοργανισμούς στα λύματα.

Οι τεχνικές που εφαρμόζονται στην τριτοβάθμια επεξεργασία αποτελούνται από:

- Απολύμανση με χημικά μέσα, κυρίως χλώριο και όζον, με φυσικά μέσα, όπως υπεριώδης ακτινοβολία
- Δύλιση
- Φιλτράρισμα

#### 2.2.2.5 Διαχείριση περίσσειας ενεργού ιλύος

Η πλεονάζουσα ενεργός ιλύς, η οποία δεν ανακυκλώνεται κατά τη δευτεροβάθμια επεξεργασία, απαιτεί πρόσθετη επεξεργασία πριν από τη διάθεση. Στις χώρες της ΕΕ παράγονται 8-10 εκατομμύρια τόνοι ιλύος ετησίως. Η ιλύς συνήθως διατίθεται μέσω χωματερών, χώρων υγειονομικής ταφής ή αποτέφρωσης. Ωστόσο, απαιτείται κατάλληλη επεξεργασία για τη μείωση του όγκου της ιλύος, του οργανικού φορτίου, των παθογόνων μικροοργανισμών και των τοξικών στοιχείων, όπως τα βαρέα μέταλλα. Η αναερόβια χώνευση προτείνεται ως μέθοδος, καθώς παράγει βιοαέριο από την αποσύνθεση του οργανικού φορτίου, το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας για τη διαδικασία επεξεργασίας.

## ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ

### 3.1 Γενικά

Η αναερόβια χώνευση στην διαχείριση των αστικών στερεών και στην επεξεργασία αστικών υγρών αποβλήτων είναι μια από τις πιο επιτυχημένες και καινοτόμες τεχνολογικές εξελίξεις των τελευταίων δεκαετιών. Είναι μια πλήρως αποδεκτή μέθοδος η οποία προτιμάται για την εντατική βιοαποικοδόμηση των οργανικών κλασμάτων που προέρχονται από τα αστικά απόβλητα.

Η αναερόβια χώνευση αποτελεί μια βιοχημική διεργασία, κατά την οποία οργανική ύλη, σε συνθήκες απουσίας οξυγόνου, διασπάται από μικροοργανισμούς και μετατρέπεται σε αέριο μείγμα μεθανίου και διοξειδίου του άνθρακα, δηλαδή βιοαέριο. Ένας λόγος για την διαδεδομένη χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου είναι το γεγονός ότι ταυτόχρονα με την μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των λυμάτων που παράγονται από ανθρώπινες δραστηριότητες συμβάλει και στην παραγωγή ενέργειας .

Η αναερόβια χώνευση, μια τεχνική που παράγει αέριο από τη διάσπαση οργανικών υλικών από τον 17<sup>ο</sup> αιώνα, ανακαλύφθηκε για πρώτη φορά το 1776. Το αέριο, που αποτελείται από μεθάνιο, ανακαλύφθηκε από τους John Dalton και Humphrey Davy στις αρχές του 19<sup>ου</sup> αιώνα. Η αναερόβια χώνευση χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στα τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα για την επεξεργασία αστικών λυμάτων και το 1895, το Exeter της Αγγλίας χρησιμοποίησε την ενέργεια για τον φωτισμό των δρόμων. Οι εξελίξεις στη μικροβιολογία τη δεκαετία του 1980 οδήγησαν στη βελτίωση της αποτελεσματικότητας της παραγωγής βιοαερίου (Stamatelatou et al., 2011).

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου:

- Η χαμηλή ενεργειακή απαίτηση, συγκριτικά με την επεξεργασία υπό αερόβιες συνθήκες
- Η δυνατότητα ανάκτησης βιοαερίου, ταυτόχρονα με την επεξεργασία αποβλήτων
- Η απομάκρυνση του οργανικού φορτίου των αποβλήτων (COD) σε μεγάλο βαθμό

- Η μικρότερη παραγωγή λάσπης, συγκριτικά με την αερόβια διεργασία
- Σε θερμόφιλες συνθήκες παρατηρείται σταθεροποίηση του αποβλήτου σε μεγάλο βαθμό και μικρότερη απαίτηση για παραπάνω επεξεργασία

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου:

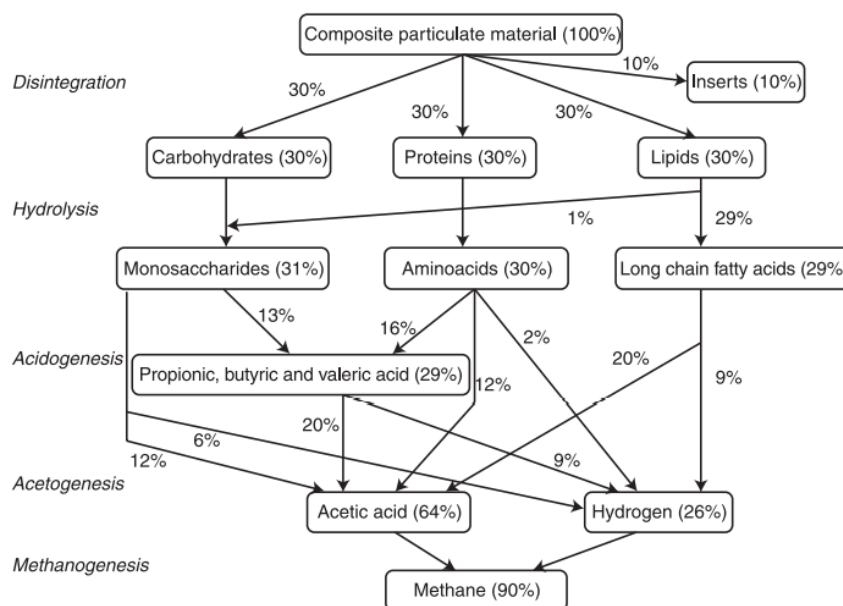
- Η απαίτηση περαιτέρω επεξεργασίας του αποβλήτου κατά την εκροή του από τον αντιδραστήρα για την απελευθέρωσή του στο περιβάλλον
- Η σημαντική επιρροή της μέτρησης από τις συνθήκες που επικρατούν στο εσωτερικό του αντιδραστήρα, όπως η θερμοκρασία και το pH.
- Είναι ευαίσθητη σε τοξικά
- Αποτελεί μία αργή διεργασία που απαιτεί σημαντικό χρονικό διάστημα για τον εγκλιματισμό των μικροοργανισμών και την εκκίνηση της διεργασίας

### 3.2 Στάδια

Η αναερόβια χώνευση περιλαμβάνει πέντε στάδια διάσπασης της οργανικής ύλης σε απλούστερα συστατικά και παραγωγής βιοαερίου, σε καθένα από τα οποία εμπλέκονται διαφορετικές ομάδες μικροοργανισμών που λειτουργούν υπό διαφορετικές συνθήκες (Stamatelatos et al., 2011).

Τα στάδια που λαμβάνουν χώρα είναι:

- Διαλυτοποίηση
- Υδρόλυση
- Οξεογένεση
- Οξικογένεση
- Μεθανογένεση



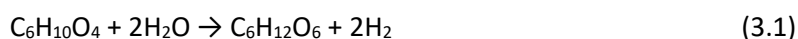
Σχήμα 8: Σχηματική απεικόνιση των σταδίων της αναερόβια χώνευσης

### 3.2.1 Διαλυτοποίηση

Τα σύνθετα σωματίδια της τροφής διασπώνται σε απλούστερα πολυμερή όπως υδατάνθρακες, πρωτεΐνες και λιπίδια κατά το στάδιο της διαλυτοποίησης. Αυτό το στάδιο είναι το πρώτο που λαμβάνει χώρα κατά την αναερόβια χώνευση και συμβαίνει ταυτόχρονα με το στάδιο της υδρόλυσης. Περιλαμβάνει τη διαμόρφωση και τη διαστασιολόγηση της οργανικής ύλης στον κατάλληλο βαθμό προκειμένου να αυξηθεί η διαπερατότητά της μέσω του βακτηριακού κυτταρικού τοιχώματος και να διευκολυνθούν οι επακόλουθες διεργασίες.

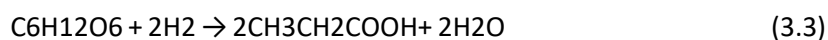
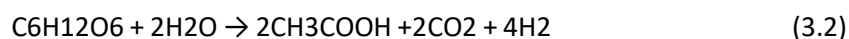
### 3.2.2 Υδρόλυση

Τα οργανικά πολυμερή που δημιουργούνται κατά τη διάσπαση της οργανικής ύλης υδρολύονται στα αντίστοιχα μονομερή. Την υδρόλυση πραγματοποιούν εξωκυτταρικά υδρολυτικά ένζυμα που απελευθερώνονται από ορισμένα υδρολυτικά βακτήρια. Τα μονομερή που δημιουργούνται αποτελούνται από λιπαρά οξέα, αμινοξέα και υδατάνθρακες. Το οργανικό υλικό έχει το κατάλληλο μέγεθος και σχήμα ώστε να επιτρέπει τη διαπερατότητα από το κυτταρικό τοίχωμα των βακτηρίων που χρησιμοποιούνται στα επόμενα στάδια μετά τις διαδικασίες διαλυτοποίησης και υδρόλυσης. Προκειμένου να βελτιωθεί η διαδικασία υδρόλυσης και να διευκολυνθεί η διάσπαση ορισμένων ουσιών με περίπλοκες δομές σε μονομερή, συμπεριλαμβανομένης της λιγνίνης και της κυτταρίνης, είναι απαραίτητη η προεπεξεργασία (Meegoda et al., 2018).



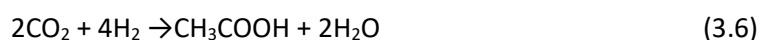
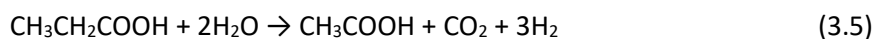
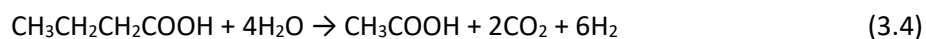
### 3.2.3 Οξεογένεση

Η οξεογένεση μετατρέπει μονομερή σε πτητικά λιπαρά οξέα (VFAs), αλκοόλες και απλούστερα οργανικά μόρια. Το στάδιο αυτό είναι γρήγορο και συμβάλλει σημαντικά στη μεθανογένεση. Ωστόσο, εάν τα VFAs συσσωρεύονται ταχύτερα από την αποσύνθεση, η συσσώρευσή τους μπορεί να προκαλέσει πτώση του pH του συστήματος και αποτυχία της διεργασίας. Η φάση της οξεογένεσης δεν προκαλεί σταθεροποίηση στο σύστημα σε μεγάλο βαθμό (δηλαδή μείωση του συνολικού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου COD), αλλά συμβάλλει στη διάσπαση των οργανικών ουσιών. Σε αυτό το στάδιο, παράγονται μεγάλες ποσότητες πτητικών λιπαρών οξέων παράλληλα με τα πτητικά λιπαρά οξέα διοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο.



### 3.2.4 Οξικογένεση

Η οξικογένεση παράγει οξικό οξύ, το οποίο μετατρέπεται από τα οξικογόνα βακτήρια σε πτητικά λιπαρά οξέα και υδρογόνο, τα οποία μπορούν να δηλητηριάσουν τα μεθανογόνα βακτήρια και να καταναλωθούν από τα ομοοξικογόνα βακτήρια.



### 3.2.5 Μεθανογένεση

Το τελικό στάδιο σταθεροποιεί την οργανική ύλη και παράγει μεθάνιο. Δύο τύποι βακτηρίων, τα ακετοκλαστικά μεθανογόνα και τα υδρογονοτροφικά μεθανογόνα βακτήρια, μετατρέπουν το οξικό οξύ σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα, αντιπροσωπεύοντας το 70% και 80% της παραγωγής μεθανίου, αντίστοιχα.



### 3.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την διεργασία

Οι ομάδες βακτηρίων που είναι υπεύθυνες για τα διάφορα στάδια της αναερόβιας χώνευσης συνυπάρχουν με συμπληρωματικό τρόπο, οπότε αν μία από αυτές εμφανίσει αναστολή ανάπτυξης, επηρεάζει τον ρυθμό ανάπτυξης των άλλων, γεγονός που μειώνει ή και σταματά την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας. Ως αποτέλεσμα της ευαισθησίας των μικροοργανισμών στο περιβάλλον του αντιδραστήρα και άλλων παραγόντων, η λειτουργία και η αποτελεσματικότητα του χωνευτήρα επηρεάζονται σοβαρά (Stamatelatou et al., 2011; Varjani et al., 2018; Παραδόσεων, 2016).

Οι παράγοντες αυτοί είναι οι εξής:

- Η θερμοκρασία
- Το pH
- Τα χαρακτηριστικά της τροφοδοσίας
- Οι τοξικές και ανασταλτικές ουσίες
- Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής
- Το οργανικό φορτίο

### 3.4 Σχεδιαστικές παράμετροι

Για την αναερόβια χώνευση είναι δύο βασικές σχεδιαστικές παράμετροι:

- Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής
- Το οργανικό φορτίο

Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής και το οργανικό φορτίο έχουν άμεση συσχέτιση μεταξύ τους. Ο αποδοτικότερος συνδυασμός των δύο παραμέτρων σε σχέση με την παραγωγή μεθανίου, αλλά και για τεchnοοικονομικούς λόγους έχει προκύψει ότι είναι λειτουργία με υψηλό χρόνο παραμονής και χαμηλό οργανικό φορτίο.

#### 3.4.1 Χρόνος Παραμονής

Ο χρόνος παραμονής είναι μία πολύ σημαντική παράμετρος για τον σχεδιασμό του αντιδραστήρα, καθώς χαρακτηρίζει τον χρόνο που απαιτείται για την διάσπαση της οργανικής ύλης και την μετατροπή της σε βιοαέριο. Ο χρόνος παραμονής των βιολογικών στερεών (SRT) ορίζεται ως ο χρόνος που παραμένουν τα στερεά στον αντιδραστήρα. Στους συμβατικούς αντιδραστήρες ο HRT ταυτίζεται με τον SRT. Για μεσόφιλες συνθήκες ο βέλτιστος υδραυλικός χρόνος παραμονής είναι 15-30 μέρες, όμως ο ορισμός του εξαρτάται



άμεσα από το οργανικό φορτίο και την σύνθεση του υποστρώματος. Ο μειωμένος χρόνος παραμονής μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την συσσώρευση VFAs στο σύστημα, καθώς τα οξικογενή βακτήρια που διασπούν τα πτητικά οξέα απαιτούν περισσότερο χρόνο για να δράσουν. Αντίστοιχα με αύξηση του HRT το υπόστρωμα του αντιδραστήρα δεν επαρκεί για την παραγωγή μεθανίου.

### 3.4.2 Οργανικό Φορτίο

Το οργανικό φορτίο (Organic loading rate-OLR) περιγράφει την ποσότητα πτητικών στερεών που τροφοδοτούνται καθημερινά στον αντιδραστήρα. Με αύξηση του οργανικού φορτίου αυξάνεται και η παραγόμενη ποσότητα μεθανίου, όμως η υπερβολική αύξηση μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία του αντιδραστήρα, καθώς ευνοείται το στάδιο της υδρόλυσης και της οξεογένεσης με αποτέλεσμα να συσσωρεύονται πτητικά λιπαρά οξέα.

## 3.5 Συστήματα Αναερόβια Χώνευσης

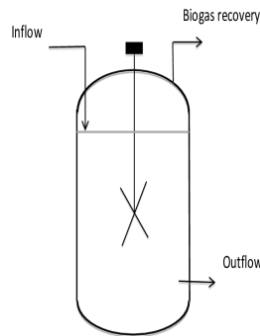
Για την αναερόβια χώνευση μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι τύποι αντιδραστήρων. Η επιλογή του καταλληλότερου αντιδραστήρα εξαρτάται από διάφορες μεταβλητές, όπως η ποσότητα των σωματιδίων στην τροφοδοσία, η θερμοκρασία στην οποία λαμβάνει χώρα η ζύμωση, ο τύπος της ροής της διεργασίας, ο τύπος της ροής, το είδος της διεργασίας και η κλίμακα της διεργασίας (Ersahin et al., 2011; Stamatelatou et al., 2011).

Οι βασικότεροι τύποι αντιδραστήρων είναι:

- Αντιδραστήρας συνεχούς ανάδευσης (Continuous stirred tank reactor-CSTR)
- Αντιδραστήρας ανοδικής ροής διαμέσου στρώσης ιλύος (Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor-UASBR)
- Αντιδραστήρας ρευστοποιημένης και εκτεταμένης κλίνης (Fluidized and expanded bed reactor - FBR)
- Αντιδραστήρας σταθερής κλίνης (Fixed bed anaerobic reactor-FBR)- Αναερόβια φίλτρα (Anaerobic filter-AF)

### 3.5.1 Αντιδραστήρας συνεχούς – CSTR

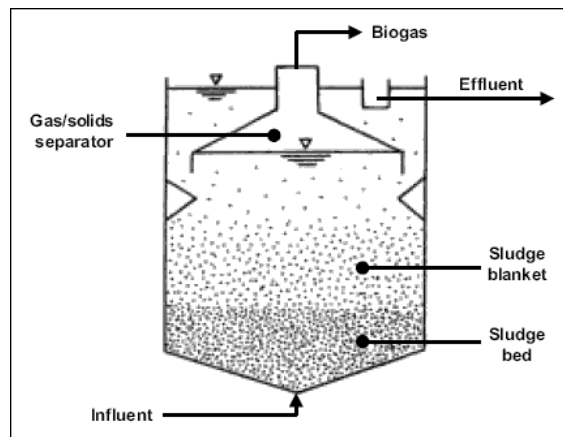
Το απλούστερο είδος αντιδραστήρα είναι ο αντιδραστήρας δεξαμενής συνεχούς ανάδευσης. Τα κύρια αίτια των πλεονεκτημάτων του, τα οποία εξηγούν γιατί είναι τόσο δημοφιλής στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων, είναι ο απλός σχεδιασμός και η ευκολία χρήσης του. Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής (HRT) και ο χρόνος παραμονής στερεών (SRT) είναι ταυτόχρονοι κατά τη λειτουργία. Δεδομένου ότι ένα μέρος της ενεργού βιομάζας του αντιδραστήρα απομακρύνεται συνεχώς, για τη λειτουργία απαιτείται υψηλός HRT, ο οποίος απαιτεί μεγάλο όγκο αντιδραστήρα, αυξάνοντας τα λειτουργικά έξοδα. Με τη βελτίωση των συνθηκών λειτουργίας και τη δημιουργία μιας ατμόσφαιρας που ευνοεί τη δράση των μικροοργανισμών, το συγκεκριμένο ζήτημα μπορεί να επιλυθεί.



Σχήμα 9: Σχηματική αναπαράσταση αντιδραστήρα CSTR

### 3.5.2 Αντιδραστήρας ανοδικής ροής διαμέσου στρώσης ιλύος - UASBR

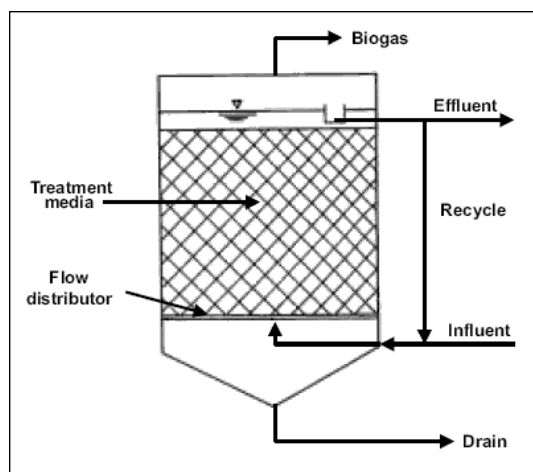
Το UASBR, που επινόησε η Lettinga, είναι ένα αξιοσημείωτο σύστημα αναερόβιας χώνευσης που χρησιμοποιείται στην επεξεργασία λυμάτων σε πάνω από 900 εγκαταστάσεις παγκοσμίως. Λειτουργεί μετακινώντας τη βιομάζα μέσω μιας ανοδικής ροής, δημιουργώντας ένα στρώμα λάσπης και παράγοντας βιοαέριο. Το βιοαέριο μπορεί να παγιδευτεί μέσα στους μικροοργανισμούς, προκαλώντας την ανοδική τους τροχιά. Ένας τριφασικός διαχωριστής διαχωρίζει το βιοαέριο από τους κόκκους των μικροοργανισμών και τα επεξεργασμένα λύματα. Ο αντιδραστήρας έχει χαμηλό κόστος κατασκευής, χαμηλή συντήρηση και μπορεί να χειριστεί διάφορους τύπους υγρών αποβλήτων με χαμηλή περιεκτικότητα σε στερεά.



Σχήμα 10: Σχηματική αναπαράσταση αντιδραστήρα UASBR

### 3.5.3 Αντιδραστήρας ρευστοποιημένης και εκτεταμένης κλίνης - FBR και AF

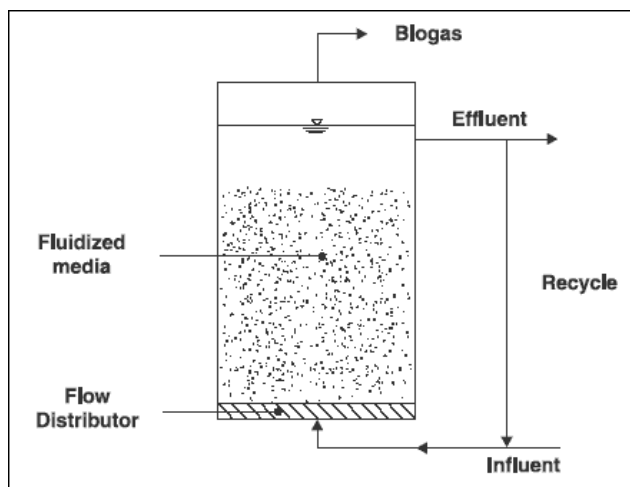
Ο αντιδραστήρας σταθερής κλίνης χρησιμοποιεί μια στήλη γεμάτη με αδρανή υλικά όπως πέτρες, χαλίκια και τέφρα για τη δημιουργία ενός βιοϋμενίου, το οποίο συχνά μπλοκάρεται από στερεά. Για να αποφευχθεί αυτό, η εφαρμογή πρέπει να πραγματοποιείται σε υπόστρωμα με χαμηλό ή μέτριο οργανικό φορτίο 8-12 g/l, το οποίο διατηρείται με ανακυκλοφορία στην είσοδο του αντιδραστήρα.



Σχήμα 11: Σχηματική αναπαράσταση αντιδραστήρα AF

### 3.5.4 Αντιδραστήρας σταθερής κλίνης - AF

Ο αναερόβιος αντιδραστήρας ρευστοποιημένης κλίνης χρησιμοποιεί μια ανοδική ροή σωματιδίων άμμου και ενεργού άνθρακα για να δημιουργήσει ένα βιοφίλμ, προσελκύνοντας βακτήρια. Αυτή η υψηλή ταχύτητα διευκολύνει τη μεταφορά μάζας μεταξύ της υγρής φάσης και των σωματιδίων βιοϋμενίου. Η αποτελεσματικότητα αυτού του αντιδραστήρα οφείλεται στα μεγάλα κενά που δημιουργούνται από τη διόγκωση της κλίνης, καθιστώντας δύσκολη την απόφραξη. Ωστόσο, ο αντιδραστήρας είναι ενεργοβόρος λόγω της υψηλής ταχύτητας ροής που επιτυγχάνεται μέσω της ανακυκλοφορίας των λυμάτων.



Σχήμα 12: Σχηματική αναπαράσταση αντιδραστήρα FBR

## ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφονται τα πλεονεκτήματα και τα οφέλη όπως προκύπτουν από τη χρήση της, ο τρόπος λειτουργίας της και οι διάφορες επιπτώσεις εφαρμογής της.

### 4.1 Γενικά

Η μέθοδος Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) ορίζεται από τον οργανισμό United States Environmental Protection Agency (US EPA), ως μέθοδος αξιολόγησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκύπτουν κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος. Ο όρος

«προϊόν» περιλαμβάνει τόσο φυσικά αγαθά, διεργασίες όσο και υπηρεσίες σε λειτουργικό και στρατηγικό επίπεδο. Το εργαλείο αυτό δεν έχει ως στόχο τη σύγκριση των προϊόντων, αλλά τη παρεχόμενη λειτουργία αυτών. Η ολιστική προσέγγιση του κύκλου ζωής περιλαμβάνει τα προϊόντα και τις επιμέρους διαδικασίες από την εξόρυξη των πρώτων υλών έως και τη τελική τους διάθεση. Με αυτόν τον τρόπο, υπάρχει η δυνατότητα ποιοτικού και ποσοτικού εντοπισμού των ευκαιριών και κινδύνων - ρυπογόνων και ενεργοβόρων – σε κάθε στάδιο και τη πιθανή μελλοντική βελτίωσή τους.

Σύμφωνα με τους (Heijungs et al., 2010) πρόκειται για μία ευέλικτη τεχνική ποσοτικοποίησης των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων ενός προϊόντος. Στόχος είναι η επιλογή του καλύτερου προϊόντος όσον αφορά τις επιπτώσεις τόσο στο περιβάλλον όσο και στον άνθρωπο, σε συνάρτηση με το δυναμικό παραγωγής ενέργειας. Επιπρόσθετα, συμβάλλει στην ανάπτυξη νέων καινοτόμων προϊόντων ή διεργασιών, όπου παρατηρείται επιπρόσθετη μείωση των πρώτων υλών και των εκπομπών.

Η προσέγγιση κύκλου ζωής καθίσταται απαραίτητη στη μελέτη της βιωσιμότητας πολιτικών και βιομηχανικών αποφάσεων σύμφωνα με τη Αξιολόγηση Βιωσιμότητας των Τεχνολογιών (Sustainability Assessment of Technologies, SAT), ιδιαίτερα αναδυόμενων τεχνολογιών.

#### 4.2 Στάδια μεθοδολογίας AKZ

Το μεθοδολογικό πλαίσιο μίας ανάλυσης AKZ αναλύεται στις επόμενες παραγράφους. Η AKZ περιγράφεται από τέσσερα στάδια σύμφωνα με πρότυπο ISO 14044, όπως φαίνεται στο Σχήμα 13. Τα διπλά βέλη οφείλονται στην αλληλεπιδραστική φύση της μεθόδου.

Τα τέσσερα βασικά στάδια:

##### I. Καθορισμός στόχου και οριοθέτηση του πεδίου εφαρμογής

Καθορισμός και περιγραφή του προϊόντος, της διαδικασίας ή της δραστηριότητας, δημιουργία του πλαισίου στο οποίο θα πραγματοποιηθεί η αξιολόγηση και προσδιορισμός των ορίων και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που θα συμπεριληφθούν στην αξιολόγηση.

##### II. Απογραφή, καταγραφή δεδομένων κύκλου ζωής (Life Cycle Inventory, LCI)

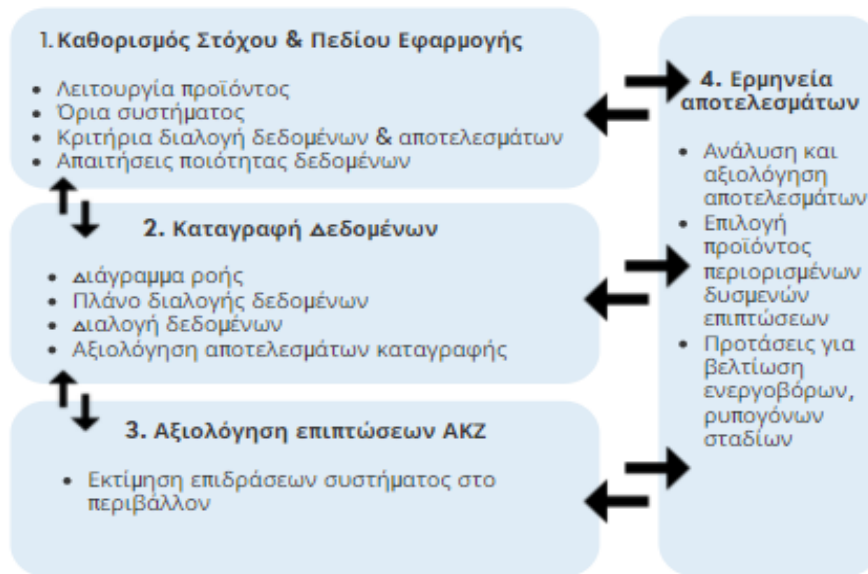
Προσδιορισμός και ποσοτικοποίηση ενέργειας, νερού και κατανάλωσης πρώτων υλών, καθώς και εκλύσεων στο περιβάλλον όπως εκπομπές αερίων, στερεά απόβλητα και λύματα.

##### III. Αξιολόγηση επιπτώσεων κύκλου ζωής (Life Cycle Impact Assessment, LCIA)

Εκτίμηση των επιδράσεων του συστήματος, όπως αυτά έχουν προσδιοριστεί στο προηγούμενο βήμα, στο περιβάλλον.

##### IV. Ερμηνεία αποτελεσμάτων

Ανάλυση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων με στόχο την επιλογή του προϊόντος, της διαδικασίας ή της υπηρεσίας που θα οδηγήσει σε περιορισμό των επιδράσεων του συστήματος στο περιβάλλον, λαμβάνοντας υπόψη την αβεβαιότητα και τις παραδοχές που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των αποτελεσμάτων (ISO 14040-44).



Σχήμα 13: Στάδια ΑΚΖ [Τροποποίηση από ISO 14044, 2006]

#### 4.2.1 Καθορισμός στόχου και οριοθέτηση του πεδίου εφαρμογής

Το πρώτο στάδιο μίας ΑΚΖ περιλαμβάνει τον καθορισμό του σκοπού και του πεδίου εφαρμογής. Ο σκοπός και το πεδίο εφαρμογής της ΑΚΖ δεν αποτελούν στατικά δεδομένα. Υπάρχει η δυνατότητα τροποποίησης τους σε περίπτωση που αποδειχθεί ότι τα αρχικά δεδομένα δεν είναι βέλτιστα για συγκεκριμένο σενάριο.

Πιο αναλυτικά στην αρχή της LCA πρέπει να λαμβάνονται οι παρακάτω αποφάσεις:

- Στόχος μελέτης
- Πλαίσιο εφαρμογής (ερωτήματα που θα απαντηθούν, κοινό στο οποίο απευθύνεται)
- Τύπος & ακρίβεια πληροφοριών που απαιτείται για τη διευκόλυνση λήψης αποφάσεων (ποιότητα, ποσότητα, ακρίβεια)
- Όρια συστήματος
- Κανόνες για την εκτέλεση της μελέτης (υποθέσεις, περιορισμοί)
- Τρόπος οργάνωσης των δεδομένων και εμφάνισης των αποτελεσμάτων

#### Στόχος LCA

Ανάλυση των παραπάνω, η διερεύνηση του φάσματος περιβαλλοντικών επιπτώσεων & νέα προϊόντα/τεχνολογίες με μείωση των απαιτούμενων πόρων και ρύπων προς το περιβάλλον

#### Πλαίσιο Εφαρμογής

Το πλαίσιο εφαρμογής περιλαμβάνει τις σημαντικότερες μεθοδολογικές επιλογές, περιορισμούς και υποθέσεις που αφορούν τα ακόλουθα:

- Λειτουργία, λειτουργική μονάδα και ροή αναφοράς

Η λειτουργία των προϊόντων προς μελέτη είναι πολλές φορές δύσκολο να οριοθετηθεί. Επιπλέον, η σύγκριση προϊόντων με διαφορετικά λειτουργικά χαρακτηριστικά αποδεικνύεται αβάσιμη. Για το λόγο αυτό, ορίζεται η λειτουργική μονάδα ως η κοινή βάση αναφοράς (functional unit) για τη σύγκριση συστημάτων και εναλλακτικών λύσεων προς την επιτυχή

μελέτη τους. Στον ορισμό της λαμβάνονται υπόψη η ωφέλιμη διάρκεια ζωής, το πρότυπο επίδοσης ποιότητας (performance quality standard) και η αποδοτικότητα του προϊόντος.

- Όρια συστήματος

Ο πλήρης και ακριβής καθορισμός των εισροών και εκροών ενός συστήματος είναι αδύνατος. Επομένως, τίθενται όρια συστήματος κατάλληλα για την εκάστοτε μελέτη, προσδιορίζοντας ορισμένα στάδια, διαδικασίες και αντίστοιχες ροές, όπως:

- απόκτηση πρώτων υλών
- ηλεκτρική ενέργεια, καύσιμα και θερμότητα προς χρήση
- μεταφορά
- τελική διάθεση αποβλήτων
- ανάκτηση χρησιμοποιημένων προϊόντων

Σημαντικό είναι να αναφερθεί η πιθανότητα στρέβλωσης των αποτελεσμάτων λόγω ανεπαρκούς οριοθέτησης.

- Κριτήρια διαλογής δεδομένων και αποτελεσμάτων

Κατόπιν επιλογής ορίων συστήματος, απαιτείται η επιλογή τέτοιων δεδομένων εισόδου και εξόδου συστήματος, χρήσιμα για τη μελέτη.

Τα παραπάνω δεδομένα πρέπει να είναι συγκεκριμένου τύπου, πληρότητας, συνοχής και επαναληψιμότητας. Η ποιότητα τους θα αντικατοπτρίζεται στα τελικά αποτελέσματα της ΑΚΖ. Συνεπώς, η ποιότητα τους οφείλει να χαρακτηρίζεται τόσο από ποσοτικές και ποιοτικές παραμέτρους, όσο και από μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν για τη συλλογή και την ενσωμάτωση αυτών των δεδομένων (ISO 14044).

#### 4.2.2 Καταγραφή δεδομένων κύκλου ζωής

Το δεύτερο στάδιο περιλαμβάνει τη καταγραφή δεδομένων του κύκλου ζωής ενός προϊόντος και συντελείται σε τέσσερα επιμέρους βήματα. Η διαδικασία καταγραφής είναι επαναληπτική. Όσο συλλέγονται νέα, πιο έγκυρα δεδομένα για το σύστημα, υπάρχει η δυνατότητα αναγνώρισης νέων απαιτήσεων ή περιορισμών που απαιτούν επαναξιολόγηση των ορίων του συστήματος ή των στόχων που έχουν τεθεί.

Η καταγραφή των δεδομένων εισόδου και εξόδου του συστήματος παρουσιάζονται ως διάγραμμα ροής, συνδυάζοντας τις απαραίτητες ενδιάμεσες διεργασίες προς ολοκληρωμένη απεικόνιση του κύκλου ζωής.

Πολλές φορές τα πολύπλοκα συστήματα καθίστανται δύσκολα στην απεικόνιση και στη διαλογή των δεδομένων. Αποδίδουν, βέβαια, πιο ακριβή και χρηστικά αποτελέσματα χάρη στη λεπτομερή ανάλυση τους. Τα πολύπλοκα συστήματα θα πρέπει να αναλύονται σε μία σειρά υποσυστημάτων, το κάθε υποσύστημα σύμφωνα με την ΕΡΑ, είναι «ένα μοναδικό βήμα ή μία διαδικασία που αποτελεί μέρος του συστήματος που έχει ήδη οριστεί» (Curran, 2006; Εργασία et al., 2013)

Για κάθε υποσύστημα πρέπει να καθορίζονται οι εισροές πρώτων υλών και ενέργειας, οι εκροές προϊόντων, ατμοσφαιρικών ρύπων, υγρών και στερεών αποβλήτων καθώς και οποιοσδήποτε άλλες εκροές.

Η ΑΚΖ ως εργαλείο ανάλυσης βρίσκεται ακόμα σε στάδιο εξέλιξης και οι κανόνες της μεθοδολογίας δεν είναι αυστηρά καθορισμένοι. Για το λόγο αυτό, κρίνεται αναγκαίος ο ορισμός περιορισμών και παραδοχών κατά τη διεξαγωγή της μελέτης.

#### 4.2.3 Εκτίμηση επιπτώσεων του κύκλου ζωής

Η αξιολόγηση των επιπτώσεων του κύκλου ζωής (Life Cycle Impact Assessment, LCIA) συμπεριλαμβάνεται στην LCA. Είναι το στάδιο στο οποίο γίνεται η εκτίμηση των πιθανών επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, δηλαδή των διαφόρων εκπομπών και της εξάντλησης των πόρων. Δημιουργεί μια σύνδεση μεταξύ του προϊόντος ή της διαδικασίας και των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Το τρίτο στάδιο πρόκειται μία ποσοτική ή/και ποιοτική διαδικασία, σύμφωνα με την οποία χαρακτηρίζονται και ερμηνεύονται οι δυσμενείς συνέπειες των περιβαλλοντικών επιπτώσεων όπως αυτές υπολογίστηκαν στο στάδιο της καταγραφής (Russell, 2005). Υλοποιείται με τα εξής βήματα:

- Προσδιορισμός επιπτώσεων – Προσδιορισμός των σχετικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων του προς μελέτη προϊόντος και κατηγοριοποίηση τους (π.χ. υπερθέρμανση πλανήτη, τοξικότητα)
- Κατηγοριοποίηση – Διαχωρισμός των αποτελεσμάτων στις διάφορες κατηγορίες (π.χ. την ταξινόμηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στην υπερθέρμανση του πλανήτη)
- Χαρακτηρισμός – Μοντελοποίηση των επιπτώσεων στις κατηγορίες επιπτώσεων με χρήση της επιστήμης με βάση συντελεστές μετατροπής (π.χ. μοντελοποίηση των πιθανών επιπτώσεων του διοξειδίου του άνθρακα και μεθανίου στην υπερθέρμανση του πλανήτη).
- Στάθμιση – Έμφαση στις σημαντικές πιθανές επιπτώσεις.
- Αξιολόγηση και υποβολή εκθέσεων αποτελεσμάτων LCA - Για τη καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων LCA περιλαμβάνονται εκθέσεις και παρουσιάσεις των αποτελεσμάτων σε μορφή πίνακα ή γραφικά.

#### 4.2.4 Ερμηνεία των αποτελεσμάτων

Κατά το τελευταίο στάδιο της AKZ, τα αποτελέσματα που λαμβάνονται ερμηνεύονται κατάλληλα και χρησιμοποιούνται για τη λήψη αποφάσεων. Αυτά περιλαμβάνουν δεδομένα για τον εντοπισμό, τον έλεγχο τήρησης των προϋποθέσεων και την αξιολόγηση των συμπερασμάτων, σύμφωνα με το δεδομένα που περιγράφονται στο στόχο και το πεδίο εφαρμογής της μελέτης.

Ο συνδυασμός της αναλυτικής καταγραφής δεδομένων κατά το δεύτερο στάδιο με την ορθή εκτίμηση των επιπτώσεων στο τρίτο, δίνει τη δυνατότητα σφαιρικής οπτικής του προϊόντος. Είναι φανερά τα σημεία που επιδέχονται βελτιώσεις, και πως μπορούν αυτές να εφαρμοστούν.

Όπως έχει προαναφερθεί, η AKZ αποτελεί μία επαναληπτική διαδικασία. Η ερμηνεία αποτελεσμάτων αφορά δεδομένα και υποθέσεις ενός σεναρίου. Το εξεταζόμενο σύστημα μπορεί να μεταβληθεί ανάλογα με τα αποτελέσματα, για την πιο ορθή ερμηνεία του.

Η αξιοπιστία της εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό α) από τον τρόπο μοντελοποίησης, β) τις υποθέσεις και απλοποιήσεις που χρησιμοποιούνται σε κάθε βήμα της ανάλυσης και γ) την διαθεσιμότητα αξιόπιστων δεδομένων.

## ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ SimaPro

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η λειτουργία του λογισμικού Αναλύσεων Κύκλου Ζωής, SimaPro, όπως και η διαδικασία καταγραφής και απογραφής δεδομένων για τη πραγματοποίηση της μελέτης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

### 5.1 Εισαγωγή – Λογισμικό SimaPro 7

Στη παρούσα εργασία, χρησιμοποιείται το ευρέως χρησιμοποιούμενο λογισμικό SimaPro για την αξιολόγηση των σεναρίων συνδιαχείρισης των υγρών και στερεών αποβλήτων. Το SimaPro δίνει τη δυνατότητα μοντελοποίησης του κύκλου ζωής ενός προϊόντος βασισμένη στο ISO 14040-44.

Πρόκειται για ένα εύχρηστο εργαλείο μοντελοποίησης και αξιολόγησης των αποτελεσμάτων ως προς το περιβαλλοντικό τους αντίκτυπο. Η επιλογή των βάσεων δεδομένων και των μεθοδολογιών βασίζονται σε συγκεκριμένες κατηγορίες επίδρασης και αναλύονται στις επόμενες παραγράφους.

### 5.2 Βιβλιοθήκες και βάσεις δεδομένων

Η εφαρμογή μεθοδολογιών εκτίμησης επιπτώσεων του κύκλου ζωής βασίζεται στη χρήση βάσεων δεδομένων, οι οποίες παρέχουν τα απαραίτητα δεδομένα απογραφής για τα στάδια των LCI και LCIA. Υπάρχουν διαθέσιμες πολλές τέτοιες βάσεις στο SimaPro, οι ευρέως χρησιμοποιούμενες είναι: Ecoinvent, US LSI, ELCD, US Input Output, Swiss Input Output, LCA Food, Industry Data.

Στην εργασία μια από τις βάσεις δεδομένων που χρησιμοποιείται ήταν η διεθνής βάση δεδομένων Ecoinvent, της οποίας η τελευταία έκδοση εμπεριέχει πάνω από 10.000 διαδικασίες, έχει περίπου 4500 χρήστες σε πάνω από 40 χώρες παγκοσμίως (<https://ecoinvent.org/>). Η βάση δεδομένων προέκυψε από τη συνεργασία με ελβετικούς φορείς με στόχο την επικαιροποίηση και ενσωμάτωση διαφόρων βάσεων δεδομένων απογραφής κύκλου ζωής. Αφορά κυρίως τους τομείς της παροχής ενέργειας (θερμότητα, συμβατικές και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας), μεταφορών (αυτοκίνητο, πλοίο, σιδηρόδρομος, αερομεταφορές, σωληνώσεις κ.α.), υλικών (πλαστικά, χημικά, μέταλλα, υλικά δόμησης) και επεξεργασίας αποβλήτων (υγειονομική ταφή, αποτέφρωση και ανακύκλωση) (Huijbregts et al., 2008).

Τα κύρια χαρακτηριστικά της Ecoinvent είναι:

- i. Ευρύ φάσμα δεδομένων σε πολλαπλούς τομείς
- ii. Ικανοποιούνται οι απαιτήσεις σε ποιότητα και ακρίβεια πληροφοριών ως λογαριθμική κατανομή με τυπική απόκλιση
- iii. Ενημέρωση δεδομένων ανά τακτά χρονικά διαστήματα
- iv. Συνεπής εφαρμογής ορίων συστήματος και κατανομής
- v. Ύπαρξη κεφαλαιουχικών αγαθών ως προεπιλογή, για τα συστήματα ενέργειας και μεταφοράς
- vi. Επιμέρους κατηγοριοποίηση των εκπομπών για ορθότερη ανάλυση
- vii. Τακτική ενημέρωση από το Κέντρο Ecoinvent (Ecoinvent Center)



Όλες οι διαδικασίες έχουν τη δυνατότητα να παρουσιαστούν σε δύο μορφές: ως μοναδιαίες διαδικασίες ή ως συστήματα διαδικασιών. Η πρώτη εκδοχή παρουσιάζει μόνο τις εισροές πόρων και τις εκπομπές από μία διαδικασία. Η επιλογή της κατά τη μοντελοποίηση ισοδυναμεί με αυτόματη ενσωμάτωση όλων των εκπομπών των ανάντη διαδικασιών. Η δεύτερη μορφή λειτουργεί σαν ένα «μαύρο κουτί», συμπεριλαμβάνοντας όλες τις εκπομπές σαν σύνολο και όχι σαν μεμονωμένες διεργασίες (*ILCD-Handbook-General-Guide-for-LCA-DETAILED-GUIDANCE-12March2010-ISBN-Fin-v1.0-EN*, n.d.).

### 5.3 Προσεγγίσεις μεθόδων αξιολόγησης

Η μέθοδος αξιολόγησης (αλγόριθμος) συνδυάζει τις προσεγγίσεις ενδιάμεσης (Midpoint) και τελικής βλάβης (Damage). Αρχικά, τα αποτελέσματα του αποθέματος LCI μεταφράζονται σε ενδιάμεσες κατηγορίες αντίκτυπου με παρόμοιες επιπτώσεις. Στη συνέχεια, οι ενδιάμεσες κατηγορίες ομαδοποιούνται σε κατηγορίες βλαβών μέσω ενδιάμεσων κατηγοριών. Ο αριθμός των ενδιάμεσων κατηγοριών αντίκτυπου και βλαβών διαφέρει ανάλογα με την μέθοδο αξιολόγησης που έχει επιλεγεί.

Οι δείκτες κατηγοριοποιούνται βάση του επιπέδου στο οποίο ανήκουν, στους «ενδιάμεσους» (midpoint) και «τελικούς» (endpoint). Ένας «ενδιάμεσος δείκτης» χαρακτηρίζει τις βασικές ροές του συστήματος και περιβαλλοντικές παρεμβάσεις που συμβάλλουν στην ίδια τελική επίδραση. Ο χαρακτηρισμός αυτός οφείλεται στην ενδιάμεση σχέση της επίδρασης στην αλυσίδα αίτιου-αποτελέσματος. Με αυτή την ομαδοποίηση, ελαχιστοποιείται η πολυπλοκότητα της μοντελοποίησης της AKZ.

### 5.4 Καταγραφή δεδομένων

Στην ενότητα παρουσιάζονται τα εισαγόμενα δεδομένα για την ορθή καταγραφή των σεναρίων στο πρόγραμμα όπως και οι υποθέσεις ή οι περιορισμοί που τέθηκαν. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα δέντρα διεργασιών κάθε περίπτωσης, όπου απεικονίζεται σχηματικά η σύνδεση μεταξύ των διαφόρων διεργασιών ολόκληρου του κύκλου ζωής των σεναρίων.

Σημαντικό είναι να αναφερθεί, πως λόγω της καθολικής χρήσης της αγγλικής γλώσσας από το πρόγραμμα, τα διαγράμματα ροής και τα δέντρα δικτύου είναι κατασκευασμένα στη γλώσσα αυτή.

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

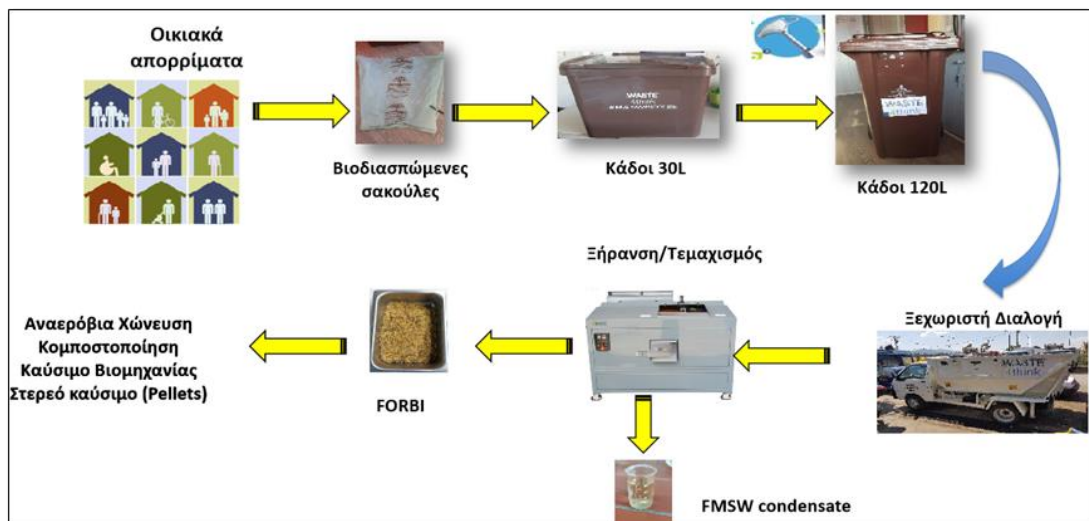
### Waste4think

Μια πρώτη ερευνητική προσπάθεια αξιοποίησης του ρεύματος των οικιακών τροφικών υπολειμμάτων επιτεύχθηκε μέσω του προγράμματος Waste4Think. Στα πλαίσια του Waste4think με την συνδρομή κατοίκων και των δομών καθαριότητας του Δήμου Χαλανδρίου, οργανώθηκε από το Εργαστήριο Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ ένα πλάνο ξεχωριστής συλλογής και διαχείρισης των τροφικών υπολειμμάτων. Το προτεινόμενο διαχειριστικό πλάνο είχε ως αφετηρία την ξεχωριστή συλλογή στην πηγή των τροφικών υπολειμμάτων με την χρήση οικιακών καφέ κάδων χωρητικότητας 30 L. Στην συνέχεια οι οικιακοί καφέ κάδοι μεταφέρονταν από τους συμμετέχοντες στο πρόγραμμα σε αντίστοιχους καφέ κάδους σε συγκεκριμένα σημεία του Δήμου Χαλανδρίου όπου απορρίπτονταν τα τροφικά υπολείμματα. Οι δημοτικοί καφέ κάδοι έχουν χωρητικότητα 120 L και η δυνατότητα απόρριψης αποβλήτων σε αυτούς παρέχεται με την χρήση ειδικού κλειδιού, ώστε να μην

υπάρχουν επιμολύνσεις από άλλου είδους απόβλητα. Για τον ίδιο λόγο η διαλογή τους από την Υπηρεσία Καθαριότητας του δήμου διεξάγεται από συγκεκριμένο απορριμματοφόρο το οποίο δεν συλλέγει άλλους τύπους αποβλήτων.

Αφού συλλεχθούν τα τροφικά υπολείμματα μεταφέρονται σε έναν ειδικά διαμορφωμένο χώρο όπου υπόκεινται σε ταυτόχρονη ξήρανση και τεμαχισμού. Μέσω της συγκεκριμένης διεργασίας παράγεται ένα προϊόν το οποίο ονομάζεται Food Residue Biomass (FORBI). Η μετατροπή τους σε FORBI, αντί της απευθείας χρήσης τους σε βιολογικές διεργασίες αυξάνει σημαντικά της δυνατότητες αξιοποίησης των τροφικών υπολειμμάτων. Αρχικά μέσω της ξήρανσης επιτυγχάνεται απομάκρυνση της υγρασίας η οποία συνεπάγεται μείωση του βάρους τους κατά 80% διατηρώντας παράλληλα το ενεργειακό τους περιεχόμενο. Επιπλέον μέσω της απομάκρυνσης της υγρασίας αυξάνεται η διάρκεια συντήρησης τους καθώς δεν υφίστανται πλέον μικροβιακές διεργασίες αποσύνθεσης. Γίνεται λοιπόν κατανοητό πως μέσω της ξήρανσης χρησιμοποιώντας ως πρώτη ύλη ένα απόβλητο, παράγεται ένα προϊόν που παρουσιάζει ευκολία συντήρησης και μεταφοράς και ένα εύρη φάσμα δυνατοτήτων αξιοποίησης. Το FORBI έχει αξιοποιηθεί ως υπόστρωμα αναερόβιας χώνευσης για την παραγωγή ενέργειας υπό μορφή φυσικού αερίου κίνησης, ως πρώτη ύλη για την παραγωγή εδαφοβελτιωτικού και ως καύσιμο για βιομηχανικές διεργασίες. Στο Σχήμα 14 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής που ακολουθούν τα τροφικά απόβλητα κατά την εφαρμογή του πλάνου που πρότείνει το ερευνητικό πρόγραμμα Waste4Think.

Ωστόσο παράλληλα με την παραγωγή του FORBI κατά την ξήρανση των τροφικών αποβλήτων παράγεται ως προϊόν και το Fermentable Municipal Solid Waste condensate (FMSW condensate), το οποίο αποτελείται από την περιεχόμενη υγρασίας και τις πτητικές ενώσεις των τροφικών υπολειμμάτων που συμπυκνώνονται στην έξοδο του ξηραντήρα. Τα βασικά χαρακτηριστικά του FMSW condensate είναι η υψηλή συγκέντρωση σε οργανικό φορτίο προερχόμενη από πτητικά λιπαρά οξέα και αιθανόλη, η όξινη φάση και η δυσάρεστη οσμή. Είναι κατανοητό πως το FMSW condensate αποτελεί ένα επικίνδυνο περιβαλλοντικά απόβλητο το οποίο χρήζει άμεσης επεξεργασίας πριν την απόρριψη του στο περιβάλλον.



Σχήμα 14: Διάγραμμα ροής τροφικών αποβλήτων κατά την εφαρμογή του διαχειριστικού πλάνου Waste4Think

## **DENOMINATE**

Σε συνέχεια του ερευνητικού προγράμματος Waste4Think ακολούθησε το ερευνητικό πρόγραμμα DENOMINATE με στόχο τον σχεδιασμό ενός καινοτόμου διαχειριστικού πλάνου επεξεργασίας, το οποίο βασιζόμενο στα ευρήματα του ερευνητικού προγράμματος Waste4Think θα θέσει τις βάσεις για την συν-διαχείριση υγρών αστικών λυμάτων και FMSW condensate. Η διεργασία που θα στηριχθεί το νέο μοντέλο διαχείρισης είναι η απευθείας αναερόβια χώνευση των αστικών λυμάτων μετά από ανάμιξη με το συμπύκνωμα της ξήρανσης των τροφικών αποβλήτων. Σκοπός του προτεινόμενου διαχειριστικού πλάνου είναι η μεταβολή των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών των αστικών λυμάτων μέσω της ανάμιξης τους με ρεύμα του FMSW condensate, ώστε το νέο αυτό απόβλητο να αποτελεί ευνοϊκότερο υπόστρωμα για την διεργασία της αναερόβιας χώνευσης.

Ο σχεδιασμός του νέου διαχειριστικού πλάνου περιλαμβάνει αρχικά τον χαρακτηρισμό των δύο ρευμάτων, FMSW condensate και υγρά αστικά λύματα, την επιλογή των παραμέτρων λειτουργίας των διεργασιών σε πιλοτικό επίπεδο. Στην συνέχεια πραγματοποιείται η απαραίτητη Τεχνοοικονομική Μελέτη με σκοπό την εφαρμογή του διαχειριστικού πλάνου σε περιοχή με πληθυσμιακό ισοδύναμο 100000 κατοίκων καθώς και ανάλυση του κύκλου ζωής του.

### 6.1 Πειραματικά δεδομένα

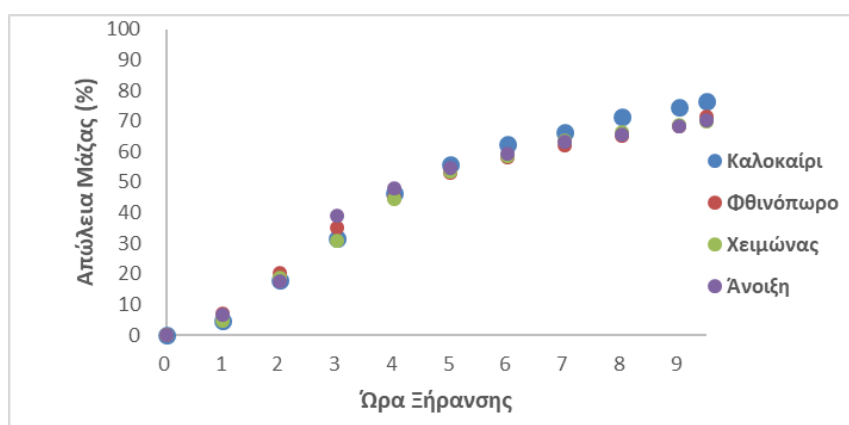
Για τον προσδιορισμό του τελικού μίγματος που θα αποτελέσει το υπόστρωμα της αναερόβιας χώνευσης στον PABR, πραγματοποιήθηκε πλήρης φυσικοχημικός χαρακτηρισμός του FMSW condensate. Αντικείμενο έρευνας αποτέλεσε επίσης η ύπαρξη εποχιακής διακύμανσης των χαρακτηριστικών του FMSW condensate και η επίδραση αυτής στα χαρακτηριστικά του τελικού μίγματος τροφοδοσίας.

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε αντί πραγματικού αστικού λύματος ένα συνθετικό μίγμα η συνταγή του οποίου αντλήθηκε βιβλιογραφικά ώστε να προσομοιάζει τα χαρακτηριστικά των πραγματικών αστικών λυμάτων. Η συγκεκριμένη επιλογή έγινε για λόγους υγειονομικής διαχείρισης καθώς και για να έχει το απόβλητο σταθερά φυσικοχημικά χαρακτηριστικά κατά την διάρκεια της μελέτης.

#### 6.1.1 Χαρακτηρισμός Συμπυκνώματος (FMSW condensate)

Για διάστημα ενός έτους πραγματοποιήθηκαν μηνιαίες συλλογές ζυμώσιμων οικιακών αποβλήτων τα οποία στην συντριπτική πλειοψηφία τους απαρτίζονταν από τροφικά υπολείμματα. Κατά την διάρκεια της διεργασίας η υγρασία των αποβλήτων απομακρύνονταν από τον ξηραντήρα με την μορφή υδρατμών οι οποίοι στην συνέχεια συμπυκνώνονταν. Καθ' όλη την διάρκεια του κύκλου ξήρανσης συλλέγονταν ωριαία δείγματα από το συμπύκνωμα. Μέσω της συγκεκριμένης διεργασίας επιτεύχθηκε ο χημικός χαρακτηρισμός του συμπυκνώματος καθώς και η μελέτη της εποχιακής διακύμανσης των χαρακτηριστικών του. Στον παρακάτω Πίνακα 1 παρουσιάζεται η μέση ωριαία απώλεια μάζας των τροφικών αποβλήτων για κάθε περίοδο συλλογής. Στο Διάγραμμα 1 παρουσιάζεται η μέση απώλεια βάρους του αποβλήτου για κάθε περίοδο συλλογής κατά την διάρκεια της ξήρανσης. Η Πίνακας 1 παρουσιάζει ξεκάθαρα ότι το μοτίβο απομάκρυνσης της υγρασίας των αποβλήτων και κατά συνέπεια παραγωγής του FMSW condensate κατά την διάρκεια της ξήρανσης δεν παρουσιάζει εποχιακή διακύμανση. Καθ' όλη την διάρκεια των πειραμάτων παρουσιάζεται ταχεία μείωση της μάζας των αποβλήτων κατά τις πρώτες πέντε ώρες τις ξήρανσης και στην συνέχεια παρατηρείται μείωση του ρυθμού απομάκρυνσης της υγρασίας με τάση σταθεροποίησης προς το τέλος της ξήρανσης. Όσον αφορά το συνολικό ποσοστό

περιεχόμενης υγρασίας στα τροφικά απόβλητα, παρουσιάζεται μια αύξηση τους καλοκαιρινούς μήνες γεγονός που οφείλετε στην μεγαλύτερη παραγωγή, διάθεση και κατά συνέπεια απόρριψη υπολειμμάτων φρούτων και λαχανικών.



Διάγραμμα 1: Μέση ωριαία απώλεια μάζας τροφικών αποβλήτων κατά την διάρκεια της ξήρανσης ανά περίοδο συλλογής

Πίνακας 1: Μέση ωριαία απώλεια μάζας και τυπική απόκλιση των τροφικών αποβλήτων για κάθε περίοδο συλλογής

| Ώρα Ξήρανσης | Καλοκαίρι              |                     | Φθινόπωρο              |                     | Χειμώνας               |                     | Άνοιξη                 |                     |
|--------------|------------------------|---------------------|------------------------|---------------------|------------------------|---------------------|------------------------|---------------------|
|              | Μέση Απώλεια Μάζας (%) | Τυπική απόκλιση (%) | Μέση Απώλεια Μάζας (%) | Τυπική απόκλιση (%) | Μέση Απώλεια Μάζας (%) | Τυπική απόκλιση (%) | Μέση Απώλεια Μάζας (%) | Τυπική απόκλιση (%) |
| 0            | 0,0                    | 0,0                 | 0,0                    | 0,0                 | 0,0                    | 0,0                 | 0,0                    | 0,0                 |
| 1            | 4,7                    | 0,8                 | 7,0                    | 5,9                 | 4,6                    | 1,3                 | 6,6                    | 5,0                 |
| 2            | 17,9                   | 0,6                 | 20,1                   | 2,8                 | 18,6                   | 1,3                 | 17,5                   | 4,1                 |
| 3            | 31,8                   | 2,3                 | 35,0                   | 3,4                 | 30,8                   | 0,2                 | 39,0                   | 9,8                 |
| 4            | 46,4                   | 2,2                 | 45,0                   | 4,2                 | 44,6                   | 2,9                 | 47,9                   | 3,5                 |
| 5            | 55,7                   | 1,0                 | 53,2                   | 4,9                 | 53,3                   | 2,5                 | 54,5                   | 2,7                 |
| 6            | 62,6                   | 0,9                 | 58,0                   | 5,3                 | 58,5                   | 1,4                 | 59,4                   | 0,6                 |
| 7            | 66,4                   | 0,6                 | 61,9                   | 5,3                 | 63,5                   | 1,3                 | 63,4                   | 0,6                 |
| 8            | 71,5                   | 1,5                 | 65,1                   | 5,2                 | 66,3                   | 1,1                 | 65,6                   | 0,5                 |
| 9            | 74,4                   | 1,0                 | 68,4                   | 4,6                 | 68,8                   | 0,5                 | 68,4                   | 0,6                 |
| 9,5          | 76,4                   | 1,4                 | 71,4                   | 4,1                 | 70,0                   | 0,3                 | 70,2                   | 0,4                 |

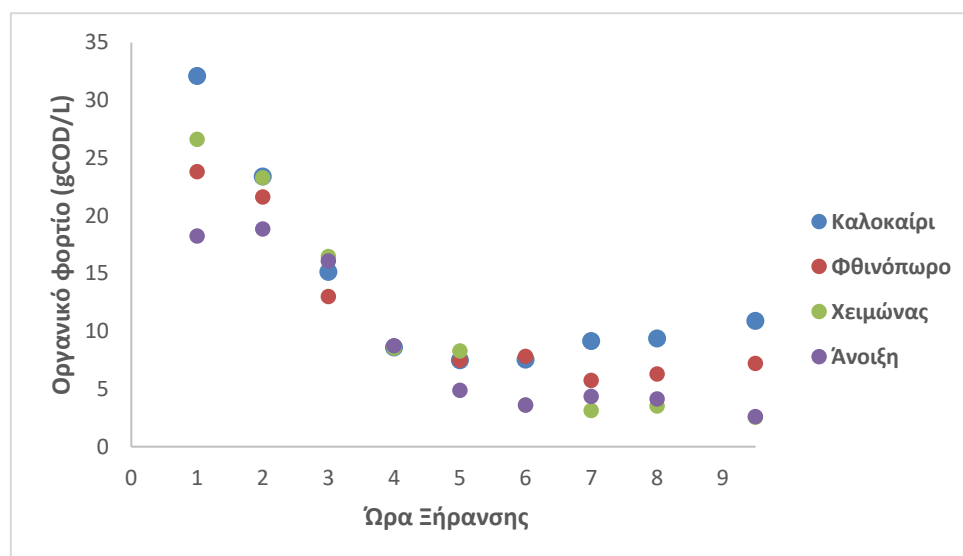
Τα παραπάνω πειραματικά δεδομένα βρίσκονται σε συμφωνία με παρόμοια αποτελέσματα από μελέτες στον Ελληνικό χώρο και στο εξωτερικό όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 2. Η απόπειρα χαρακτηρισμού ενός αποβλήτου εξαρτάται σημαντικά από το πληθυσμιακό δυναμικό από το οποίο παράγεται. Συγκεκριμένα, όσον αφορά τα τροφικά υπολείμματα αυτά προκύπτουν από τις διατροφικές συνήθειες κάθε ατόμου γεγονός που οδηγεί σε

διακυμάνσεις τόσο στην ποσότητα παραγωγής τους όσο και στα ποιοτικά χαρακτηριστικά τους. Για την παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν τροφικά υπολείμματα που συλλέχθηκαν από 1000 οικίες που βρίσκονται στον Δήμο Χαλανδρίου. Το γεγονός αυτό δίνει την δυνατότητα τα δεδομένα που αντλούνται από τις αναλύσεις του συλλεγόμενου δείγματος να μπορούν να θεωρηθούν ασφαλή.

Πίνακας 2: Μέσα ποσοστά υγρασίας τροφικών αποβλήτων

| Χώρα     | Υγρασία % w/w | Πηγή                        |
|----------|---------------|-----------------------------|
| Ελλάδα   | 81,5          | (Vavouraki et al., 2013)    |
| Ιρλανδία | 70,6          | (Allen et al., 2013)        |
| Κίνα     | 81,3          | (Tang et al., 2008)         |
| Κορέα    | 85,7          | (L. Zhang et al., 2011)     |
| Κολομβία | 69,4          | (Solarte Toro et al., 2017) |

Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η σύσταση του συμπυκνώματος που παράγεται ανά ώρα σε οργανικό φορτίο. Όπως παρατηρείται στο Διάγραμμα 2 το συμπύκνωμα που παράγεται κατά τις αρχικές ώρες της ξήρανσης εμφανίζει αρκετά υψηλότερες τιμές οργανικού φορτίου σε σχέση με το condensate που παράγεται στην συνέχεια. Εάν γίνει συσχέτιση με το διάγραμμα απώλειας μάζας ανά ώρα ξήρανσης γίνεται αντιληπτό ότι αρχικά απομακρύνονται από τα τροφικά απόβλητα οι πτητικές ουσίες (Πτητικά Λιπαρά Οξέα, Αιθανόλη) και στην συνέχεια καθώς τα απόβλητα παραμένουν στο θάλαμο ξήρανσης απομακρύνεται η μεγαλύτερη ποσότητα νερού. Υψηλότερες κατά κανόνα τιμές σε οργανικό φορτίο παρουσιάζονται κατά την καλοκαιρινή περίοδο. Οι αντίστοιχες τιμές παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.



Διάγραμμα 2: Μέση συγκέντρωση ολικού οργανικού φορτίου FMSW condensate ανά ώρα ξήρανσης.

Πίνακας 3: Μέση συγκέντρωση ολικού οργανικού φορτίου και τυπική απόκλιση FMSW condensate ανά ώρα ξήρανσης

| Ώρα Ξήρανσης | Καλοκαίρι           |                       | Φθινόπωρο           |                       | Χειμώνας            |                       | Άνοιξη              |                       |
|--------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|
|              | Μέση τιμή COD (g/L) | Τυπική Απόκλιση (g/L) | Μέση τιμή COD (g/L) | Τυπική Απόκλιση (g/L) | Μέση τιμή COD (g/L) | Τυπική Απόκλιση (g/L) | Μέση τιμή COD (g/L) | Τυπική Απόκλιση (g/L) |
| 1            | 32,1                | 7,0                   | 23,8                | 3,5                   | 22,8                | 0,4                   | 18,3                | 1,9                   |
| 2            | 23,4                | 5,6                   | 21,6                | 2,3                   | 27,1                | 2,1                   | 18,9                | 0,92                  |
| 3            | 15,1                | 3,5                   | 13,0                | 1,1                   | 16,5                | 2,1                   | 16,1                | 0,71                  |
| 4            | 8,6                 | 2,1                   | 8,7                 | 1,8                   | 8,5                 | 2,8                   | 8,8                 | 0,64                  |
| 5            | 7,5                 | 1,1                   | 7,5                 | 1,9                   | 8,3                 | 6,8                   | 4,9                 | 0,14                  |
| 6            | 7,5                 | 1,1                   | 7,8                 | 1,4                   | 3,6                 | 1,7                   | 3,6                 | 0,42                  |
| 7            | 9,2                 | 1,2                   | 5,8                 | 1,7                   | 3,1                 | 1,3                   | 4,4                 | 0,21                  |
| 8            | 9,4                 | 2,3                   | 6,3                 | 0,9                   | 3,5                 | 1,5                   | 4,2                 | 0,07                  |
| 9.5          | 10,9                | 1,2                   | 7,2                 | 1,1                   | 2,6                 | 1,5                   | 2,6                 | 0,14                  |

Συμπερασματικά για κάθε ώρα ξήρανσης το FMSW condensate που παράγεται την καλοκαιρινή περίοδο τείνει να έχει υψηλότερη συγκέντρωση οργανικού φορτίου, ενώ χαμηλότερες συγκεντρώσεις παρουσιάζονται την άνοιξη. Δεν παρουσιάζεται μεγάλη διακύμανση ανάμεσα στην χειμερινή και φθινοπωρινή περίοδο. Όσον αφορά τον χαρακτηρισμό του συνόλου του FMSW condensate τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4: Φυσικοχημικός χαρακτηρισμός FMSW condensate

|  | Καλοκαίρι        |                 | Φθινόπωρο        |                 | Χειμώνας         |                 | Άνοιξη           |                 |
|--|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|
|  | Μέση Τιμή (mg/L) | Τυπική Απόκλιση | Μέση Τιμή (mg/L) | Τυπική Απόκλιση | Μέση Τιμή (mg/L) | Τυπική Απόκλιση | Μέση Τιμή (mg/L) | Τυπική Απόκλιση |
| pH   | 3,09             | 0,04            | 3,29             | 0,09            | 3,24             | 0,07            | 3,47             | 0,04            |
| Ολικό COD  | 15860            | 1992,76         | 10733            | 1270            | 13073,33         | 1106,77         | 11643,10         | 456,94          |
| Διαλυτό COD  | 14780            | 2305,91         | 9010             | 115,3           | 11879,07         | 1735,47         | 10704,84         | 176,56          |
| Διαλυτό TOC  | 4188             | 230,66          | 3399             | 221,5           | 4075,33          | 273,91          | 3573,20          | 730,87          |
| Διαλυτό TN   | 10,16            | 5,58            | 15,40            | 8,19            | 16,93            | 4,97            | 12,62            | 0,85            |
| <b>Πτητικά Λιπαρά Οξέα – Αιθανόλη – Γαλακτικό οξύ (mg/L)</b> |                  |                 |                  |                 |                  |                 |                  |                 |
| Οξικό  | 1568             | 363,51          | 1447             | 333,5           | 282,25           | 204,74          | 1198,27          | 33,04           |
| Προπιονικό   | 738,1            | 10,53           | 338,7            | 373,2           | 19,38            | 5,31            | 69,43            | 13,84           |
| Ισο-βουτυρικό  | 79,82            | 23,49           | 57,30            | 13,99           | 32,17            | 16,80           | 77,40            | 17,08           |
| Βουτυρικό οξύ  | 37,06            | 11,89           | 208,5            | 99,60           | 37,13            | 33,54           | 13,91            | 1,91            |

|               |       |        |       |       |         |        |         |       |
|---------------|-------|--------|-------|-------|---------|--------|---------|-------|
| Ισο-βαλερικό  | 11,19 | 3,99   | 56,36 | 59,18 | 16,46   | 15,32  | 11,29   | 0,08  |
| Βαλερικό οξύ  | 12,32 | 0,89   | 40,51 | 56,09 | 8,96    | 2,53   | 15,00   | 6,71  |
| Γαλακτικό οξύ | 35,66 | 14,24  | 85,25 | 9,38  | 63,87   | 4,68   | 26,73   | 2,09  |
| Αιθανόλη      | 3600  | 327,87 | 3434  | 411,1 | 5503,00 | 859,92 | 3489,25 | 83,79 |

Με βάση τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4 διακρίνεται η όξινη φύση του συμπυκνώματος των τροφικών αποβλήτων καθώς και η υψηλή περιεκτικότητα του σε οργανικό φορτίο. Η συγκέντρωση σε άζωτο είναι ισχνή συγκρινόμενη με το οργανικό φορτίο γεγονός που οφείλετε στον θερμικό διαχωρισμό του συμπυκνώματος από την στερεή φάση των αποβλήτων. Ουσιαστικά το σύνολο του πρωτεϊνικού περιεχομένου των τροφικών αποβλήτων παραμένει στην στερεή φάση. Παρατηρούνται επίσης σταθερά υψηλές ποσότητες αιθανόλης και πτητικών λιπαρών οξέων με κύριο το οξικό οξύ. Με βάση τα αποτελέσματα του Πίνακα 4 δεν παρατηρείται σημαντική εποχιακή διακύμανση στο συμπύκνωμα των τροφικών αποβλήτων. Σημαντικό χαρακτηριστικό του FMSW condensate το οποίο επηρεάζει την ικανότητα του να αποτελέσει υπόστρωμα αναερόβιας χώνευσης είναι ο λόγος C/N. Η συγκεκριμένη παράμετρος αποκλίνει σημαντικά από την προτεινόμενη εύρος τιμών (Algarani et al., 2018). Επίσης το χαμηλό pH που παρουσιάζει λειτουργεί παρεμποδιστικά για την διεργασία της αναερόβιας χώνευσης (Speece, 1971). Η λύση που προτείνεται λοιπόν είναι η αναερόβια συν-χώνευση του condensate με Υγρά Αστικά Λύματα. Η ανάμιξη των δυο αυτών αποβλήτων θα δημιουργήσει ένα μίγμα με κατάλληλο pH και λόγο C/N. Ωστόσο στην παρούσα μελέτη για λόγους διαχείρισης και σταθερότητας των χαρακτηριστικών της τροφοδοσίας χρησιμοποιήθηκε ένα συνθετικό μίγμα που προσομοιάζει τα χαρακτηριστικά των αστικών λυμάτων, αντί για το πραγματικό απόβλητο.

#### 6.1.2 Χαρακτηρισμός Συνθετικού Αστικού Λύματος (synthetic Municipal Wastewater – sMWW)

Τα συνθετικό λύμα που χρησιμοποιήθηκε αποσκοπεί στο να προσομοιάσει τα φυσικά χαρακτηριστικά των MWW όπως το ουδέτερο pH, την χαμηλή συγκέντρωση σε στερεά καθώς και την σύσταση στους στα τρία βασικά θρεπτικά συστατικά, άνθρακα, άζωτο και φώσφορος. Ανάλογα με τις τυπικές συγκεντρώσεις στα τρία αυτά συστατικά τα αστικά λύματα χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες, τα ασθενή, τα μέσης ισχύος και τα ισχυρά, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.

Πίνακας 5: Κατηγοριοποίηση αστικών λυμάτων με βάση την συγκέντρωσή τους σε θρεπτικά

| Χαρακτηριστικά | Συγκέντρωση mg/L |        |        |
|----------------|------------------|--------|--------|
|                | Weak             | Medium | Strong |
| COD            | 350              | 720    | 1200   |
| TOC            | 80               | 160    | 290    |
| TN             | 20               | 40     | 85     |
| TSS            | 100              | 220    | 350    |
| VSS            | 80               | 165    | 275    |

|                                      |    |     |     |
|--------------------------------------|----|-----|-----|
| Alkalinity (mg CaCO <sub>3</sub> /L) | 50 | 100 | 200 |
|--------------------------------------|----|-----|-----|

Για την παρούσα μελέτη επιλέχθηκε η δημιουργία συνθετικού μίγματος που θα προσομοιάζει τα χαρακτηριστικά συνθετικού αστικού λύματος μέσης ισχύος. Το συνθετικό απόβλητο έχει την παρακάτω σύσταση : 0,7 g/L C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>, 0,191 g/L NH<sub>4</sub>Cl, 0,08 g/L CH<sub>3</sub>COONa, 0,022 g/L KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, 0,0275 g/L MgSO<sub>4</sub>\*7H<sub>2</sub>O, 0,0025 g/L CaCl<sub>2</sub>, 0,004 g/L KCl, 0,125 g/L NaHCO<sub>3</sub>, 1,875 mg/L FeCl<sub>3</sub>\*6H<sub>2</sub>O, 0,1875 mg/L H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>, 0,225 mg/L KI, 0,15 mg/L MnSO<sub>4</sub>, 0,0275 mg/L ZnSO<sub>4</sub>\*7H<sub>2</sub>O, 0,0375 mg/L CuSO<sub>4</sub>\*5H<sub>2</sub>O και 12,5 mg/L EDTA (S. Liu et al., 2020). Το μίγμα που προέκυψε είχε τα εξής φυσικοχημικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.

Πίνακας 6: Φυσικοχημικά Χαρακτηριστικά συνθετικού αστικού λύματος

| Χαρακτηριστικά                       | Συγκέντρωση |
|--------------------------------------|-------------|
| COD                                  | 695 mg/L    |
| TOC*                                 | 267 mg/L    |
| TN                                   | 47 mg/L     |
| Ph                                   | 7,14        |
| Alkalinity (mg CaCO <sub>3</sub> /L) | 100 mg/L    |

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του χαρακτηρισμού του FMSW condensate και του προσδιορισμού της συγκέντρωσης του συνθετικού αστικού λύματος μπορούν να εξαχθούν δυο βασικά συμπεράσματα. Αρχικά το συμπύκνωμα που προκύπτει από την ξήρανση των τροφικών αποβλήτων έχει υψηλή περιεκτικότητα σε οργανικό φορτίο (κυρίως αιθανόλη και πτητικά λιπαρά οξέα) αλλά ισχνή συγκέντρωση αζώτου. Αντίθετα τα αστικά λύματα και κατά συνέπεια το συνθετικό μίγμα που τα προσομοιάζει, παρά την συγκριτικά χαμηλότερη συγκέντρωση οργανικού φορτίου, παρουσιάζουν μεγαλύτερη αναλογία αζώτου/ άνθρακα.

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα υπολογίζεται η σύσταση της τροφοδοσίας του PABR στα δύο αυτά απόβλητα. Η επιλογή της αναλογίας synthetic MWW/ FMSW condensate επιλέχθηκε με κριτήριο την μεγαλύτερη δυνατή χρήση συνθετικού λύματος και την δημιουργία ενός υποστρώματος με αναλογία C/N ευνοϊκή για την διεργασία της αναερόβιας χώνευσης. Για χάρη ευκολίας των υπολογισμών ως συγκέντρωση οργανικού φορτίου για το FMSW condensate επιλέχθηκε η τιμή 10000 mg/L και η τιμή 12 mg/L για την συγκέντρωση του ολικού αζώτου. Αντίστοιχα για το συνθετικό αστικό λύμα επιλέχθηκαν οι τιμές 700 mg COD/L και 50 mg TN/L. Με βάση τις παραπάνω τιμές στον Πίνακα 6 απεικονίζεται ο λόγος άνθρακας – αζώτου συναρτήσεως του κλάσματος του FMSW condensate στο τελικό μίγμα τροφοδοσίας.

### 6.1.3 Χαρακτηρισμός ενεργού ιλύος (WAS)

Η αναερόβια λάσπη και η ενεργοποιημένη ιλύς (WAS) ελήφθησαν από τη Δημοτική Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων Λυκόβρυσης, στην Αττική, Ελλάδα. Η αναερόβια ιλύς χρησιμοποιήθηκε ως εμβόλιο για τον αντιδραστήρα AD κατά την εκκίνηση. Η εκκίνηση πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας 20% v/v αναερόβια ιλύ ως εμβόλιο και 80% v/v WAS ως τροφοδοσία. Ο Πίνακας 7 δείχνει τα χαρακτηριστικά του WAS και της αναερόβιας λάσπης που χρησιμοποιείται για την εκκίνηση του αντιδραστήρα.



Πίνακας 7: Ο φυσικο-χημικός χαρακτηρισμός της αναερόβιας λάσπης και της ενεργούς ιλύος που χρησιμοποιήθηκαν για τον εμβολιασμό και την έναρξη λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα

| Παράμετρος                                   | Αναερόβια λάσπη | WAS |
|--|-----------------|-----|
| pH   | 7,2             | 6,8 |
| Ολική αλκαλικότητα (g CaCO <sub>3</sub> / L) | 11              | 4   |
| Ολικά στερεά (TS) (g / L)                    | 48              | 14  |
| Πτητικά στερεά (VS) (g / L)                  | 23              | 10  |
| Ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS) (g / L)        | 47              | 22  |
| Πτητικά αιωρούμενα στερεά (VSS) (g / L)      | 22              | 15  |
| sCOD (g <sub>O2</sub> / L)                   | 0,2             | 1.5 |
| tCOD (g <sub>O2</sub> / L)                   | 26,4            | 32  |
| Ακετικό οξύ (mg / L)                         | 0               | 110 |
| Προπιονικό οξύ (mg / L)                      | 0               | 75  |
| Ισο-βουτυρικό οξύ (mg / L)                   | 0               | 21  |
| Βουτυρικό οξύ (mg / L)                       | 0               | 15  |
| Ισο-βαλερικό οξύ (mg / L)                    | 0               | 10  |
| Βαλερικό οξύ (mg / L)                        | 0               | 2   |
| Εθανόλη (mg / L)                             | 0               | 180 |
| Ολικό άζωτο κατά Kjeldahl (TKN) (g / L)      | 1,1             | 1,3 |
| Ολικός σωματιδιακός άνθρακας (g / L)         | 4,5             | 8,5 |

Κατά την περίοδο του εμβολιασμού, ο βιοαντιδραστήρας λειτούργησε σε συνθήκες διαλείποντος έργου, προκειμένου να δημιουργηθούν αναερόβιες συνθήκες και σταθερή λειτουργία. Μετά από 20 d λειτουργίας, η εκκίνηση θεωρήθηκε ολοκληρωμένη, καθώς το απόβλητο έφτασε σε σταθερή τιμή sCOD < 0,1 g<sub>O2</sub> / L και ο βιοαντιδραστήρας έφτασε σε ένα σταθερό ποσοστό CH<sub>4</sub> (60-65%). Μετά την περίοδο εγκλιματισμού, ο βιοαντιδραστήρας λειτούργησε σε συνεχή λειτουργία (CSTR) χρησιμοποιώντας ως τροφοδοσία το μίγμα FMSW condensate/WAS, σε διαφορετικές αναλογίες.

## 6.2 Πειραματική διαδικασία

### 6.2.1 Συνδιαχείριση FMSW condensate και MWW σε έναν ταχύρρυθμο αντιδραστήρα με ανακλαστήρες τύπου PABR (Periodic Anaerobic Baffled Reactor)

Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων της αναερόβιας χώνευσης χρησιμοποιείται ένας πιλοτικής κλίμακας αναερόβιος αντιδραστήρας με ανακλαστήρες (PABR), 77 L κατασκευασμένος από ανοξείδωτο χάλυβα. Ο αντιδραστήρας αποτελείται από δύο

ομόκεντρους κυλίνδρους, όπου στον εσωτερικό κύλινδρο περιέχεται λουτρό, το οποίο έχει ως στόχο την διατήρηση της θερμοκρασίας του αντιδραστήρα στους 35°C, έτσι ώστε αυτός να λειτουργεί στη βέλτιστη θερμοκρασία για μεσόφιλη διεργασία. Το λουτρό αυτό είναι συνδεδεμένο μέσω σωληνώσεων από πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC) με ένα θερμοσίφωνα, δημιουργώντας ένα κλειστό κύκλωμα όπου ρέει το νερό με τη βοήθεια ενός κυκλοφορητή. Η ροή του νερού και επομένως και η θερμοκρασία του ρυθμίζεται μέσω ενός αισθητήρα θερμοκρασία, ο οποίος βρίσκεται εντός του ενεργού όγκου του αντιδραστήρα.

Από την άλλη πλευρά, ο εξωτερικός κύλινδρος είναι χωρισμένος σε τέσσερα διαμερίσματα, κάθε ένα από τα οποία χωρίζεται σε ένα ανοδικό και ένα καθοδικό τμήμα με τη βοήθεια ανακλαστήρων. Για κάθε διαμέρισμα υπάρχει μία χειροκίνητη βάννα, από την οποία γίνεται η δειγματοληψία. Για τη μετακίνηση του ρευστού από το ένα διαμέρισμα στο επόμενο χρησιμοποιείται ένα σύστημα από ηλεκτροβάνες, καθώς επίσης και εξωτερικές σωληνώσεις, οι οποίες είναι κατασκευασμένες από πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC). Επίσης, η εναλλαγή των διαμερισμάτων και η ροή του υποστρώματος από την δεξαμενή τροφοδοσίας στον αντιδραστήρα γίνονται κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού. Στην παρακάτω Πίν 1 απεικονίζεται ο συγκεκριμένος αντιδραστήρας:



Εικόνα 1: Περιοδικός Αναερόβιος Αντιδραστήρας με Ανακλαστήρες (PABR)

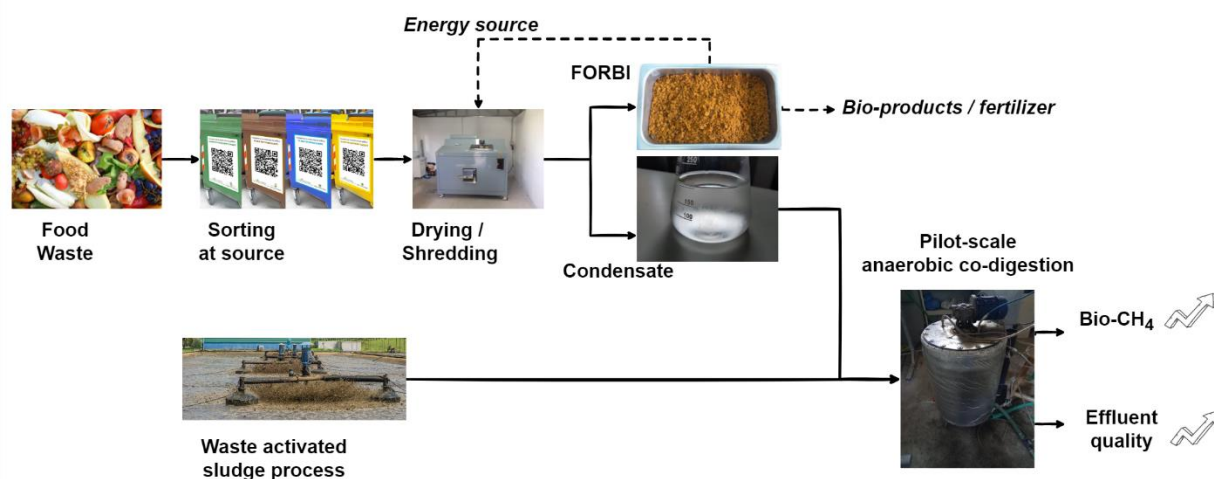
Τα αποτελέσματα που αντλήθηκαν από την πειραματική μελέτη της διεργασίας οδηγούν στο συμπέρασμα πως η διεργασία είναι κατάλληλη για την άμεση επεξεργασία του μίγματος FMSW condensate και αστικών λυμάτων. Συγκεκριμένα τόσο ως προς την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου και ως προς την παραγωγή μεθανίου το συγκεκριμένο μοντέλο διαχείρισης παρουσιάζει αισιόδοξα αποτελέσματα. Επιπλέον επιβεβαιώνεται ότι η υπάρχουσα τεχνολογία ταχύρρυθμων αναερόβιων συστημάτων είναι ικανή να αντικαταστήσει την βιολογική οξείδωση. Η διεργασία παρουσίασε σταθερότητα καθ' όλη την διάρκεια της.

Ωστόσο, η εκροή του PABR δεν αποτελεί ένα σταθεροποιημένο απόβλητο το οποίο μπορεί να απορριφθεί με ασφάλεια στο περιβάλλον. Συγκεκριμένα το ολικό άζωτο της εκροής του PABR είναι σημαντικά υψηλότερο από το επιτρεπτό περιβαλλοντικό όριο. Επίσης ο ολικός φώσφορος στην εκροή του αντιδραστήρα είναι υπερδιπλάσιος από το επιτρεπτό όριο των 2,0 mg/L για αστικές περιοχές με έως και 100000 κατοίκους.

Για την ολοκλήρωση του προτεινόμενου πλάνου συν-διαχείρισης FMSW condensate και MWW προστίθεται στην έξοδο του συστήματος αναερόβιας χώνευσης μια διεργασία ταυτόχρονης απομάκρυνσης οργανικού φορτίου, αζώτου και φωσφόρου η οποία μελετήθηκε στην συνέχεια αλλά δεν αναφέρεται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

### 6.2.2 Συνδιαχείριση FMSW condensate και WAS σε έναν αντιδραστήρα συνεχούς λειτουργίας και πλήρους ανάδευσης (CSTR)

Η παρούσα μελέτη διερεύνησε τη σκοπιμότητα της αναερόβιας συν-χώνευσης (Anaerobic co-Digestion/AcoD) του συμπυκνώματος που προκύπτει από την ξήρανση των απορριμμάτων τροφίμων (Fermentable Municipal Solids Waste condensate/FMSW condensate), με Ενεργό Ιλύ (Waste Activated Sludge/WAS) σε έναν αντιδραστήρα πιλοτικής κλίμακας (100 L), συνεχούς λειτουργίας και πλήρους ανάδευσης (CSTR). Διαφορετικές παράμετροι αξιολογήθηκαν προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση της αναερόβιας συν-χώνευσης; η ισχύς του FMSW condensate (Condensate A: 13 gCOD/L και Condensate B: 4 gCOD/L) που προέκυψε από διαφορετικές πηγές συλλογής απορριμμάτων τροφίμων; η ογκομετρική αναλογία του FMSW condensate προς WAS (0-67% v/v) και ο Υδραυλικός Χρόνος Παραμονής (Hydraulic Retention Time/HRT) (20, 15 και 12 d). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αύξηση της περιεκτικότητας σε συμπύκνωμα στην τροφοδοσία από 0 σε 67% v/v, ενισχύει την αφαίρεση οργανικού φορτίου (έως και 41% αυξημένη απομάκρυνση tCOD) και την παραγωγή βιοενέργειας (έως και 35% αυξημένη παραγωγή βιομεθανίου). Επιπλέον, στην περίπτωση του Condensate A, η μείωση HRT από 20 σε 15 d αύξησε την παραγωγή βιοενέργειας (έως και 19% αύξηση παραγωγής βιομεθανίου) ενώ η μείωση HRT από 20 σε 12 d στην περίπτωση του Condensate B δεν επηρέασε την απόδοση του αντιδραστήρα. Συνολικά, εξάγεται το συμπέρασμα ότι το FMSW condensate μπορεί να εισαχθεί με ασφάλεια σε υπάρχουσες εγκαταστάσεις για αναερόβια συν-χώνευση, διατηρώντας παράλληλα μια πιο σταθερή λειτουργία και βελτιωμένη ποιότητα λυμάτων και παραγωγή βιοενέργειας σε σύγκριση με τη συμβατική αναερόβια χώνευση ενεργού ιλύος.



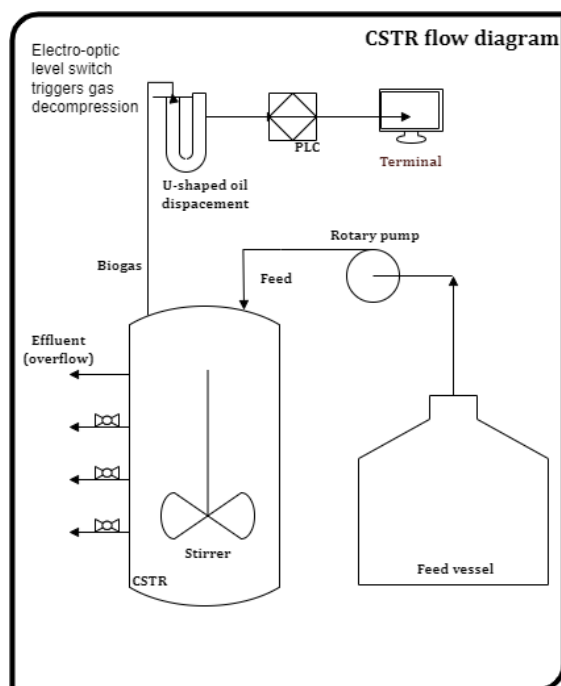
Σχήμα 15: Η περιγραφή της διεργασίας του εναλλακτικού σεναρίου της αναερόβιας συν-χώνευσης ενεργού ιλύος με το συμπυκνώματος που προκύπτει από την ξήρανση των απορριμμάτων τροφίμων

Τα πειράματα της αναερόβιας συν-χώνευσης του συμπυκνώματος με WAS διεξήχθησαν σε αναερόβιο βιοαντιδραστήρα πιλοτικής κλίμακας 100 L από ανοξείδωτο χάλυβα. Ο βιοαντιδραστήρας ήταν ένας κυλινδρικός CSTR, ο οποίος διατηρήθηκε σε σταθερή θερμοκρασία 35°C (μεσόφιλες συνθήκες), μέσω ανακυκλοφορίας νερού στο εξωτερικό στρώμα του αντιδραστήρα. Αυτός ο τύπος αντιδραστήρα επιλέχθηκε δεδομένου ότι η υπάρχουσα υποδομή στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων χρησιμοποιούν ως επί το πλείστον παρόμοια χωνευτήρια. Η τροφοδοσία του μίγματος FMSW condensate/WAS διατηρήθηκε σε δεξαμενή αποθήκευσης 100 L, σε σταθερή θερμοκρασία 4°C. Η τροφοδοσία τροφοδοτήθηκε μέσω μιας ρυθμιζόμενης περισταλτικής αντλίας (Injecta FX).



Εικόνα 2: Ο βιοαντιδραστήρας πιλοτικής κλίμακας που χρησιμοποιήθηκε για την αναερόβια συν-χώνευση του μίγματος FMSW condensate/WAS

Ο βιοαντιδραστήρας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2, ήταν εξοπλισμένος με 4 σημεία δειγματοληψίας σε ομοιόμορφες αποστάσεις από κάτω προς τα πάνω, και ως εκ τούτου τα χωνευμένα υπολείμματα απομακρύνθηκαν μέσω υπερχειλίσης από την άνω έξοδο του βιοαντιδραστήρα, ακριβώς πάνω από το σημείο όγκου των 100 L (το ανώτερο σημείο δειγματοληψίας του αντιδραστήρα). Τα απόβλητα συλλέχθηκαν σε ξεχωριστή δεξαμενή, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Λαμβάνονταν δείγματα από την εκροή σε καθημερινή βάση και αποθηκεύονταν σε σταθερή θερμοκρασία 4°C. Η δεξαμενή αποβλήτων απορρίπτονταν καθημερινά και χρησίμευε ως συλλέκτης λυμάτων για τη δειγματοληψία της επόμενης ημέρας. Το παραγόμενο βιοαέριο μετρήθηκε χρησιμοποιώντας μια τεχνική μετατόπισης λαδιού σχήματος U, εξοπλισμένη με διακόπτη ηλεκτρο-οπτικής στάθμης που ενεργοποιεί την αποσυμπίεση αερίου, που καταγράφηκε σε PLC συνδεδεμένο σε τερματικό. Το διάγραμμα ροής του CSTR φαίνεται στο Σχήμα 18.



Σχήμα 16: Σχηματική απεικόνιση του διαγράμματος ροής του βιοαντιδραστήρα και του εξοπλισμού

## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΑΣΑ ΚΑΙ ΑΥΑ

Σε αυτήν την ενότητα θα μελετηθεί ο σχεδιασμός ενός συνολικού συστήματος διαχείρισης των ΑΣΑ και των ΑΥΑ για μία μεσαίου μεγέθους πόλη (πληθυσμού περίπου 100.000 κατοίκων).

### 7.1 Εισαγωγή

Η σημερινή κατάσταση στην διαχείριση των αστικών αποβλήτων βασίζεται στην ξεχωριστή συλλογή και επεξεργασία τους ανάλογα με την φυσική κατάσταση στην οποία αυτά βρίσκονται. Με τον όρο στερεά αστικά απόβλητα περιγράφονται κυρίως τα οικιακά απορρίμματα. Αυτά χωρίζονται σε ανακυκλώσιμα, ζυμώσιμα και τον υπόλοιπο όγκο των απορριμμάτων που δεν υπάγονται στις συγκεκριμένες κατηγορίες και χρήζουν ειδικής επεξεργασίας. Ξεχωριστή συλλογή και επεξεργασία υφίστανται κυρίως τα ανακυκλώσιμα υλικά τα οποία οδηγούνται σε Κέντρα Διαλογής Ανακυκλώσιμων Υλικών, ενώ τα ζυμώσιμα οικιακά απορρίμματα τα οποία είναι κατά βάση τροφικά υπολείμματα οδηγούνται με τον υπόλοιπο όγκο των απορριμμάτων ως σύμμεκτα σε χώρους υγειονομικής ταφής (ΧΥΤΑ) ή σε μονάδες καύσης. Η συγκεκριμένη προσέγγιση στην διαχείριση των στερεών αποβλήτων έχει περιβαλλοντικές επιπτώσεις με τις σημαντικότερες να εντοπίζονται στην εκπομπή βιοαερίου στην ατμόσφαιρα από τους ΧΥΤΑ.

Μια πρώτη προσπάθεια αντιμετώπισης του συγκεκριμένου προβλήματος έρχεται να καλύψει το διαχειριστικό πλάνο που προτάθηκε μέσω του προγράμματος Waste4Think. Στόχος του ερευνητικού προγράμματος Waste4Think ήταν αποκοπή των ζυμώσιμων αποβλήτων από το κύριο ρεύμα συλλογής των στερεών οικιακών αποβλήτων και αξιοποίηση του ενεργειακού περιεχομένου τους. Συγκεκριμένα, εφαρμόστηκε πιλοτικά ξεχωριστή συλλογή των τροφικών υπολειμμάτων με τη βοήθεια 1000 εθελοντών του Δήμου Χαλανδρίου που συμμετείχαν στο πρόγραμμα. Στην συνέχεια τα τροφικά υπολείμματα

υποβάλλονταν σε μια διεργασία ταυτόχρονης ξήρανσης και τεμαχισμού. Το αποτέλεσμα της ξήρανσης των τροφικών υπολειμμάτων ήταν η παραγωγή του FORBI (Food Residue Biomass). Ουσιαστικά το FORBI αποτελεί το στερεό υπόλειμμα της ξήρανσης το οποίο περιέχει τα θρεπτικά συστατικά και το μεγαλύτερο ποσοστό της οργανικής ύλης που περιέχεται στα τροφικά υπολείμματα. Η μετατροπή του όγκου των αποβλήτων σε FORBI διευρύνει τις δυνατότητες αξιοποίησης τους καθώς έχει επιτευχθεί 80% μείωση του βάρους τους. Επιπλέον μέσω της απομάκρυνσης της υγρασίας τους παρέχεται η δυνατότητα αποθήκευσης, χωρίς την ανάπτυξη ανεπιθύμητων μικροβιακών δράσεων όπως η αλκοολική ζύμωση.

Στον αντίποδα τα υγρά αστικά απόβλητα που απαρτίζονται κυρίως από τα αστικά λύματα συλλέγονται μέσω του αποχετευτικού δικτύου των πόλεων και οδηγούνται σε Κέντρα Επεξεργασίας Λυμάτων (ΚΕΛ). Τα στάδια τα οποία ακολουθεί ένα υγρό απόβλητο για την σταθεροποίηση του είναι η πρωτογενής επεξεργασία που αφορά σε φυσικές μεθόδους διαχωρισμού των λυμάτων από τον μεγαλύτερο όγκο στερεών που βρίσκονται σε αυτά, η δευτερογενής επεξεργασία η οποία αποσκοπεί στην απομάκρυνση του ρυπογόνου φορτίου τους (Οργανικός άνθρακας, Άζωτο και Φώσφορος) με τη χρήση βιολογικών διεργασιών και η τριτογενής επεξεργασία η οποία αφορά σε φυσικοχημικές μεθόδους απολύμανσης αυτών. Η δευτερογενής επεξεργασία κατά κύριο λόγο βασίζεται στην απομάκρυνση του οργανικού φορτίου των αστικών λυμάτων μέσω βιολογικών διεργασιών. Η συγκεκριμένη διαχειριστική πρακτική βασίζεται κατά κύριο λόγο στην διεργασία της ενεργού ιλύος, όπου επέρχεται βιολογική οξείδωση του οργανικού φορτίου από ετερότροφους μικροοργανισμούς με χρήση μηχανικού αερισμού ως πηγή οξυγόνου. Η δευτερογενής επεξεργασία όμως παρά την λειτουργικότητα της εμφανίζει μειονεκτήματα όπως το μεγάλος κόστος ενέργειας για την λειτουργία του μηχανικού αερισμού, και την παραγωγή περίσσειας ιλύος που χρήζει επιπλέον επεξεργασίας.

Στόχος του ερευνητικού προγράμματος DENOMINATE είναι η δημιουργία ενός καινοτόμου πλάνου διαχείρισης των δύο αυτών αποβλήτων εκμεταλλευόμενο την χημική τους συγγένεια. Τόσο τα τροφικά απόβλητα όσο και τα αστικά λύματα αποτελούνται κατά κύριο λόγο από οργανικές ενώσεις. Επίσης παρά την στερεή τους φάση τα τροφικά απόβλητα περιέχουν σημαντικές ποσότητες υγρασίας και αντίστοιχα τα υγρά αστικά λύματα παρουσιάζουν συγκέντρωση βιοδιασπώμενων στερεών. Έχοντας ως εφελτήριο την ξεχωριστή συλλογή των τροφικών αποβλήτων και την παραγωγή του FORBI μελετήθηκαν πιθανά σενάρια συν διαχείρισης του υγρού κλάσματος των τροφικών υπολειμμάτων που διαχωρίζεται μέσω της ξήρανσης (FMSW condensate) και των υγρών αστικών λυμάτων. Η διεργασία στην οποία στηρίζεται το νέο διαχειριστικό πλάνο είναι η αναερόβια χώνευση. Πλεονέκτημα της συγκεκριμένης διεργασίας έναντι της επικρατούσας βιολογικής οξείδωσης είναι τόσο οι χαμηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις όσο και η δυνατότητα ανάκτησης ενέργειας μέσω του παραγόμενου βιο-μεθανίου.

## 7.2 Προτεινόμενα Διαχειριστικά Σενάρια

Προτείνονται δύο διαχειριστικά σενάρια. Ο σχεδιασμός των συγκεκριμένων σεναρίων βασίστηκε στα αποτελέσματα που εξάχθηκαν από την πιλοτική εφαρμογή τους στο Εργαστήριο Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας της Σχολής Χημικών Μηχανικών υπό την επίβλεψη του καθηγητή Γεράσιμου Λυμπεράτου στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος DENOMINATE.

Για όλα τα σενάρια ισχύουν οι παρακάτω παραδοχές.

1. Το πληθυσμιακό ισοδύναμο της πόλης για την οποία σχεδιάστηκαν ανέρχεται σε 100.000 κατοίκους.

2. Τα αστικά λύματα παράγονται με ρυθμό 200 L ανά κάτοικο ανά ημέρα.
3. Το Fermentable Municipal Solid Waste condensate παράγεται με ρυθμό 0,2 L ανά κάτοικο ανά ημέρα.
4. Ως υφιστάμενη κατάσταση υιοθετείται η διεργασία που προτάθηκε μέσω του προγράμματος Waste4Think, η οποία απεικονίζεται στο Σχήμα 19.
5. Η ξήρανση των τροφικών υπολειμμάτων επιτελείται εκτός Κ.Ε.Λ. και το FMSW condensate μεταφέρεται στα Κ.Ε.Λ. με τη χρήση βυτιοφόρων.

#### Διαχειριστικό πλάνο 1

Κατά την διάρκεια του ερευνητικού προγράμματος DENOMINATE μελετήθηκαν πειραματικά, δύο εναλλακτικά πλάνα διαχείρισης για το FMSW condensate.

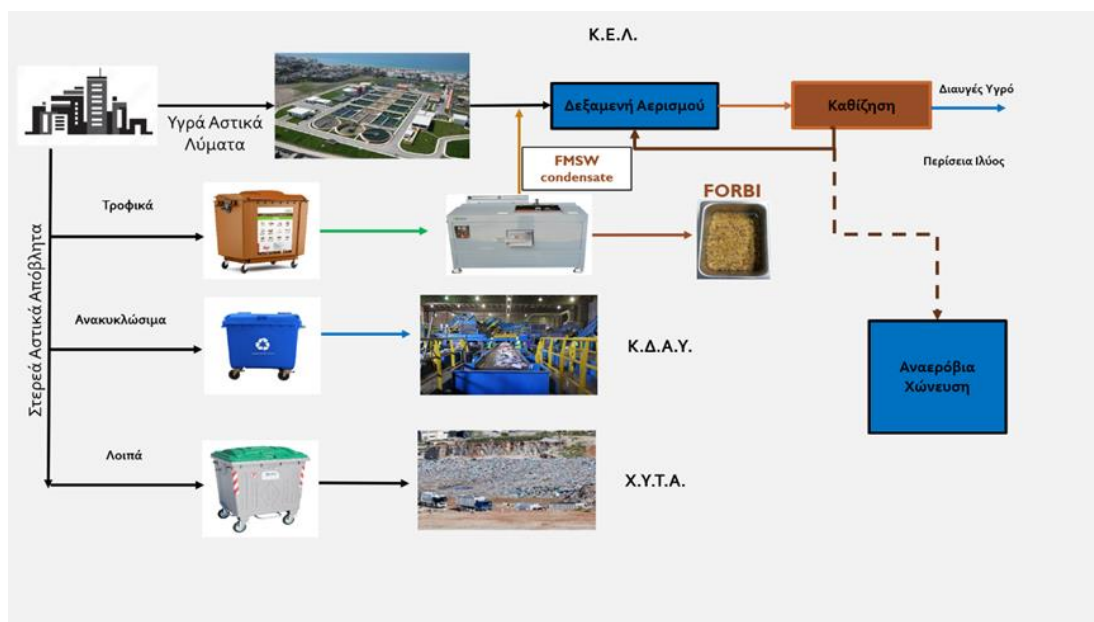
Το **πρώτο** διαχειριστικό πλάνο προτείνει την απευθείας αναερόβια συν-χώνευση FMSW condensate και Αστικών Λυμάτων σε έναν ταχύρρυθμο αντιδραστήρα με ανακλαστήρες τύπου PABR (Periodic Anaerobic Baffled Reactor). Το συγκεκριμένο διαχειριστικό σενάριο βασίζεται στην ιδέα της ενίσχυσης των αστικών λυμάτων ως προς την συγκέντρωση οργανικού φορτίου με σκοπό της δημιουργίας ενός κατάλληλου υποστρώματος για την διεργασία της αναερόβιας χώνευσης. Στην πειραματική μελέτη του συγκεκριμένου πλάνου διαχείρισης προστέθηκαν κατά την διάρκεια των πειραμάτων δύο επιπλέον διεργασίες με τελικό στόχο την περαιτέρω αξιοποίηση και επεξεργασία του χωνεμένου υπολείμματος. Αρχικά μελετήθηκε η επεξεργασία της εκροής του αναερόβιου συστήματος μέσω βιολογικής οξειδωσης σε έναν αντιδραστήρα διαλείπουσας λειτουργίας τύπου SBR (Sequence Batch Reactor). Η συγκεκριμένη διεργασία εκπονήθηκε κατά την διάρκεια του έργου DENOMINATE με σκοπό την επίτευξη των περιβαλλοντικών ορίων ασφαλούς απόρριψης στο περιβάλλον της εκροής του PABR.

Επιπλέον μελετήθηκε η δυνατότητα αξιοποίησης του χωνεμένου υπολείμματος ως υπόστρωμα σε διεργασίες μικροβιακών κυψελίδων καυσίμου τύπου MFC (Microbial Fuel Cell). Η συγκεκριμένη διεργασία αποσκοπεί στην επεξεργασία του χωνεμένου υπολείμματος με ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρισμού.

Η επιπρόσθετη επεξεργασία του χωνεμένου υπολείμματος σε αντιδραστήρα τύπου SBR δεν περιλαμβάνεται στα διαχειριστικά σενάρια που προτείνονται καθώς δεν θα είχε διαχειριστικό νόημα η εγκατάσταση ενός επιπλέον συστήματος βιολογικής οξειδωσης στο κέντρο επεξεργασίας λυμάτων. Όσον αφορά τα μικροβιολογικά κελία, δεν είναι έτοιμη η συγκεκριμένη τεχνολογία να εφαρμοστεί στη συγκεκριμένη κλίμακα (100000 κάτοικοι).

#### Διαχειριστικό πλάνο 2

Το **δεύτερο** διαχειριστικό πλάνο που προτείνεται στοχεύει στην ένταξη του FMSW condensate στο υφιστάμενο διαχειριστικό μοντέλο των αστικών λυμάτων. Στα ΚΕΛ κατά την δευτεροβάθμια επεξεργασία η εκροή της δεξαμενής αερισμού (Δεξαμενή Βιολογικά Οξειδωσης) αποτελείται από ένα μείγμα επεξεργασμένου αποβλήτου και ενεργού ιλύος λόγω της επιβαλλόμενης ανάδευσης στην δεξαμενή αερισμού. Το συγκεκριμένο ρεύμα οδηγείται στην δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης όπου επεξεργασμένο απόβλητο και βιολογική λάσπη διαχωρίζονται, με ένα ποσοστό της λάσπης να επιστρέφει στην διεργασία ως ανακυκλοφορία και το υπόλοιπο να οδεύει προς σταθεροποίηση και απόρριψη. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος επεξεργασίας της περίσσειας ιλύος είναι η αναερόβια χώνευση. Πάνω σε αυτό το πλαίσιο το δεύτερο διαχειριστικό σενάριο έρχεται να εισάγει το FMSW condensate έμμεσα στο υφιστάμενο διαχειριστικό πλάνο μέσω της συγχώνευσης του με την περίσσεια ενεργού ιλύος.



Σχήμα 17: Υπάρχον Διαχειριστικό Πλάνο. \*Κ.Ε.Λ. (Κέντρο Επεξεργασίας Λυμάτων), \*Κ.Δ.Α.Υ (Κέντρο Διαλογής Ανακυκλώσιμων Υλικών), \*Χ.Υ.Τ.Α.( Χώροι Υγειονομικής Ταφής)

Το διαχειριστικό πλάνο που απεικονίζεται στο Σχήμα 19, αποτελεί την βάση τόσο για τον σχεδιασμό, όσο και για τον υπολογισμό του επενδυτικού και λειτουργικού κόστους των προτεινόμενων δύο σεναρίων. Με βάση το υπάρχον πλαίσιο διαχείρισης παρατηρείται πως υφίσταται ξεχωριστή συλλογή των τροφικών αποβλήτων. Επιπλέον αυτά, σύμφωνα με την εφαρμογή του προγράμματος Waste4Think οδηγούνται προς ξήρανση και παραγωγή FORBI. Η απομακρυνόμενη κατά την ξήρανση υγρασία των τροφικών υπολειμμάτων που αποτελεί το FMSW condensate αναμιγνύεται με το κύριο ρεύμα των αστικών λυμάτων και οδηγείται στην δεξαμενή αερισμού. Η συγκεκριμένη ανάμιξη δεν επηρεάζει τις συνθήκες της βιολογικής οξείδωσης καθώς όπως αναφέρεται στις παραδοχές 2 και 3 η συχνότητα παραγωγής του FMSW condensate είναι χίλιες φορές μικρότερη από αυτή των αστικών λυμάτων.

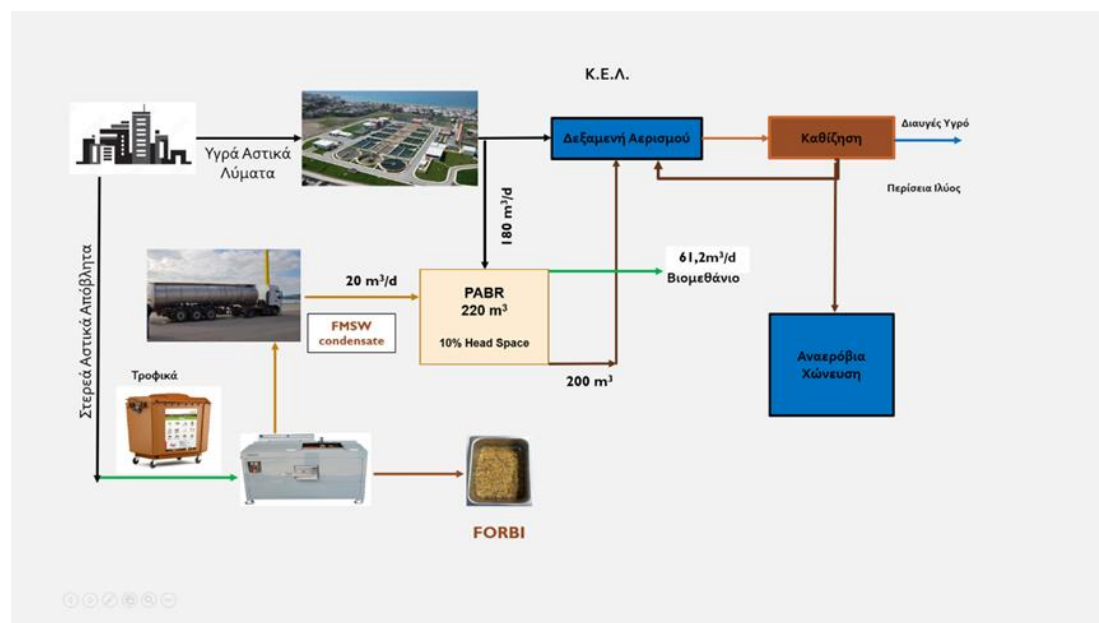
### 7.2.1 Σενάριο υπ' αριθμόν 1 :

#### Αναερόβια Συγχώνευση Αστικών Λυμάτων και FMSW condensate

Στο παρόν σενάριο προτείνεται η ανάμιξη του Fermentable Municipal Solid Waste (FMSW) condensate με ένα κλάσμα υγρών αστικών λυμάτων σε αναλογία 10% -90% αντίστοιχα. Η αναλογία αυτή επιλέχθηκε κατά την πειραματική μελέτη του σεναρίου σε πιλοτική κλίμακα. Κατά το πειραματικό σκέλος της εφαρμογής του συγκεκριμένου εναλλακτικού πλάνου διαχείρισης η αναερόβια χώνευση συνοδεύεται από βιολογική οξείδωση σε αντιδραστήρα τύπου SBR, καθώς και από διάταξη μικροβιακών κυψελίδων καυσίμου (MFC). Η μελέτη των συγκεκριμένων διεργασιών βοήθησε στην εξαγωγή σημαντικών επιστημονικών αποτελεσμάτων κυρίως ως προς το βιολογικό υπόβαθρο της διεργασίας. Ωστόσο, δεν είναι δυνατή η εφαρμογή τους σε πραγματική κλίμακα. Σύμφωνα με την παραδοχή 5 και το διάγραμμα ροής του Σχήματος 20 η διεργασία της αναερόβιας χώνευσης θα πραγματοποιηθεί στις εγκαταστάσεις του ΚΕΛ. Συνεπώς δεν κρίνεται δόκιμο να σχεδιαστεί εκ νέου μια διεργασία βιολογικής οξείδωσης καθώς η υφιστάμενη είναι αποδοτική. Συνεπώς στο συγκεκριμένο προτεινόμενο διαχειριστικό σενάριο, η εκροή του PABR οδηγείται στην



υπάρχουσα διάταξη βιολογικής οξείδωσης των ΚΕΛ (Δεξαμενή Αερισμού). Το διάγραμμα ροής του Σεναρίου 1 η Σενάριο PABR απεικονίζεται στο Σχήμα 20.



Σχήμα 18: Διάγραμμα ροής προτεινόμενου σεναρίου με χρήση PABR (1ο σενάριο)

Με βάση το διάγραμμα ροής του Σχήματος 20 εξάγεται το συμπέρασμα πώς μέσω της συγκεκριμένης διεργασίας υπάρχουν δυνατότητες ανάκτησης ενέργειας σε σύγκριση με το ήδη υπάρχον διαχειριστικό πλάνο. Ωστόσο πέραν από το επενδυτικό κόστος του σεναρίου προστίθενται επιπλέον λειτουργικά κόστη στο υπάρχον σύστημα, που αφορούν στην μεταφορά του FMSW condensate στις εγκαταστάσεις του ΚΕΛ και στην ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται τόσο για την λειτουργία του PABR. Οι διαστάσεις του αντιδραστήρα και ο ρυθμός παραγωγής του βιομεθανίου υπολογίστηκαν μέσω γραμμικής προβολής των αντίστοιχων μεγεθών κατά την πειραματική διαδικασία του ερευνητικού έργου σε πιλοτική κλίμακα. Συγκεκριμένα κατά την πειραματική μελέτη της διεργασίας, χρησιμοποιήθηκε ένας πιλοτικός αντιδραστήρας PABR όγκου 77 L και επιβλήθηκε στο σύστημα Υδραυλικός Χρόνος Παραμονής (HRT) ίσος με μία ημέρα. Κατά την συγκεκριμένη πειραματική φάση η παραγωγή του μεθανίου ανοιγμένη σε λίτρα τροφοδοσίας υπολογίσθηκε 0,306 L CH<sub>4</sub>/L τροφοδοσίας. Ακολούθως και για το Σενάριο 1 επιλέχθηκε HRT 1 d.

Με βάση την ημερήσια παροχή condensate και την αναλογία ανάμιξης του με τα Αστικά Λύματα υπολογίστηκαν ο όγκος του αντιδραστήρα, η παροχή του και η ημερήσια παραγωγή βιομεθανίου. Ο όγκος του PABR έχει αυξηθεί κατά 10% ώστε να υπάρξει επαρκής όγκος για τον διαχωρισμό παραγόμενου βιοαερίου και ανάμεικτου υγρού. Στον Πίνακα 8 παρουσιάζονται τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της διεργασίας του Σεναρίου 1.

Πίνακας 8: Λειτουργικές παράμετροι διεργασίας αναερόβιας χώνευσης μίγματος FMSW condensate και Αστικών Λυμάτων σε ταχύρρυθμο αντιδραστήρα PABR

| <b>Σενάριο 1: Παράμετροι Λειτουργίας</b>      |                    |
|---|--------------------|
| Ημερήσια Παραγωγή FMSW condensate ανά κάτοικο | 0,2 L              |
| FMSW condensate προς PABR                     | 20 m <sup>3</sup>  |
| Υγρά Αστικά Λύματα προς PABR                  | 180 m <sup>3</sup> |
| Όγκος PABR                                    | 220 m <sup>3</sup> |
| Υδραυλικός Χρόνος Παραμονής PABR              | 1 d                |
| Ημερήσια Παραγωγή Μεθανίου                    | 61,2m <sup>3</sup> |

Κίνητρο για τον σχεδιασμό ενός νέου διαχειριστικού μοντέλου είναι αρχικά η εξοικονόμηση ενέργειας μέσω της αντικατάστασης της βιολογικής οξείδωσης καθώς και η πιθανότητα ανάκτησης ενέργειας μέσω του παραγόμενου βιοαερίου. Όσον αφορά το πρώτο σκέλος, το μεγαλύτερο κόστος της βιολογικής οξείδωσης οφείλονται στις ανάγκες αερισμού οι οποίες εξαρτώνται από την συγκέντρωση οργανικού φορτίου. Υποθέτοντας λοιπόν αλληλεξάρτηση μεταξύ, της ποσότητας οργανικού (κατά του συνέπεια όγκου αστικών λυμάτων που οδηγούνται προς αερισμό) και του κόστους αερισμού, υπολογίζεται η εξοικονόμηση ενέργειας από την εκτροπή του κλάσματος των αστικών λυμάτων προς τον PABR. Με βάση την παραδοχή (1) και (2) εκτρέπεται το 0,9% της ημερήσιας παραγωγής των αστικών λυμάτων. Το μέγεθος αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα πως η εξοικονόμηση ενέργειας θα κυμαίνεται στην ίδια τάξη μεγέθους.

Όσον αφορά το μέγεθος της ανακτώμενης ενέργειας αυτή υπολογίζεται με βάση τα λίτρα μεθανίου που παράγονται ημερησίως. Συγκεκριμένα ημερησίως παράγονται 61,2 m<sup>3</sup> μεθανίου την ημέρα. Με βάση το ενεργειακό υπόβαθρο της συγκεκριμένης ένωσης η συγκεκριμένη παροχή μεταφράζεται σε 2200 MJ ανά ημέρα (*Θερμογόνος Δύναμη Μεθανίου : 36 MJ/m<sup>3</sup>*).

Για να αξιολογηθεί το προτεινόμενο εναλλακτικό σενάριο διαχείρισης αστικών αποβλήτων ως προς την αποδοτικότητα του είναι αναγκαίο να επιτελεστεί ανάλυση κύκλου ζωής καθώς και τεχνοοικονομική μελέτη.

Η τεχνοοικονομική μελέτη που εκπονήθηκε για το Σενάριο 1 εστίασε στον υπολογισμό του αρχικού επενδυτικού κόστους του Σεναρίου και στο λειτουργικό του κόστος. Τα συγκεκριμένα μεγέθη υπολογίστηκαν με τη χρήση του λογισμικού ASPEN PLUS. Όσον αφορά το επενδυτικό κόστος (Capital Cost, CC) υπολογίστηκε σε νομισματικές μονάδες, ενώ το λειτουργικό κόστος (Operational Cost, OC), υπολογίστηκε σε μονάδες ενέργειας συγκεκριμένα kWh. Οι παραδοχές που υιοθετήθηκαν για τον υπολογισμό του CC και του OC είναι οι εξής:

- i) Επενδυτικό κόστος θεωρείται η κατασκευή και η εγκατάσταση του PABR και η αγορά του μηχανισμού άντλησης του FMSW condensate και των Αστικών Λυμάτων προς των PABR.
- ii) Λειτουργικό κόστος θεωρείται η απαιτούμενη ενέργεια για την μεταφορά του condensate στις εγκαταστάσεις των ΚΕΛ, η ενέργεια για την λειτουργία των αντλητικών μηχανισμών καθώς και η απαιτούμενη ενέργεια για την θέρμανση του PABR ώστε η θερμοκρασία του να παραμένει σταθερή στους 35°C.

Στον Πίνακα 9 παρουσιάζεται το βασικό επενδυτικό κόστος της διεργασίας του Σεναρίου 1, ενώ στον Πίνακα 10 το βασικό λειτουργικό κόστος.

Πίνακας 9: Βασικό επενδυτικό κόστος Σεναρίου 1

| Σενάριο 1: Επενδυτικό Κόστος                | Euro (€) |
|---|----------|
| Αγορά & Εγκατάσταση PABR                    | 385000   |
| Αγορά & Εγκατάσταση Αντλίας FMSW condensate | 10000    |
| Αγορά & Εγκατάσταση Αντλίας Αστικών Λυμάτων | 4000     |

Πίνακας 10: Βασικό λειτουργικό κόστος Σεναρίου 1

| Σενάριο 1: Λειτουργικό Κόστος          | kW/year |
|--|---------|
| Συνολική Απαίτηση Ηλεκτρικής Ενέργειας | 60899   |
| Ηλεκτρική Ενέργεια Άντλησης            | 182,7   |
| Ηλεκτρική Ενέργεια Θέρμανση            | 60716,3 |

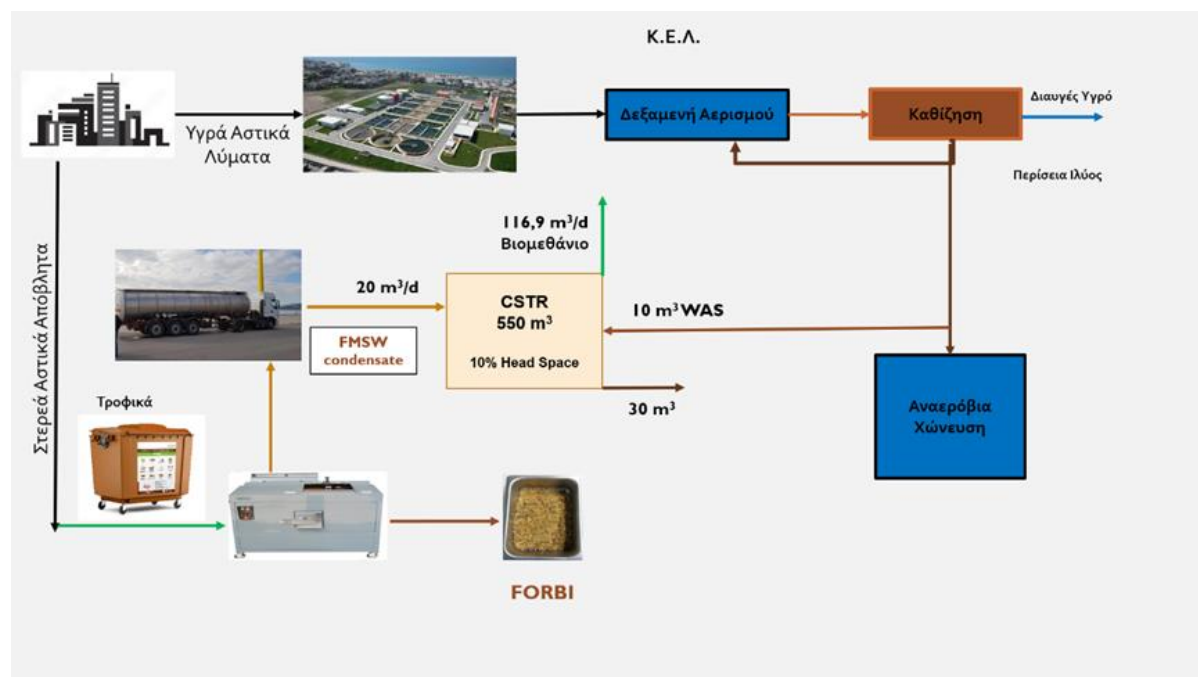
Όπως παρατηρείται από τον Πίνακα 10 είναι εμφανές πως η συντριπτική πλειοψηφία του λειτουργικού κόστους (99,7%) οφείλεται στις ανάγκες θέρμανσης του συστήματος. Το γεγονός αυτό προσφέρεται για περαιτέρω μελέτη καθώς σε εύκρατα κλίματα όπως της Ελλάδας το κόστος αυτό έχει περιθώρια βελτιστοποίησης.

Για τον υπολογισμό του λειτουργικού κόστους του Σεναρίου 1 με την βοήθεια του λογισμικού ASPEN PLUS, η διεργασία προσομοιάστηκε με ένα δοχείο ίσου όγκου και παρεμφερούς υλικού κατασκευής με τον PABR, το οποίο τροφοδοτείται με παρόμοιες με την διεργασία παροχές.

### 7.2.2 Σενάριο υπ' αριθμόν 2 :

#### Αναερόβια Συγχώνευση FMSW condensate και περίσσειας ενεργού ιλύος

Στο παρόν σενάριο προτείνεται η ανάμιξη του Fermentable Municipal Solid Waste (FMSW) condensate με περίσσεια ενεργού ιλύος (Waste Activated Sludge WAS) που παράγεται κατά την διεργασία της βιολογικής οξειδωσης. Η αναλογία ανάμιξης επιλέχθηκε με βάση τα αποτελέσματα της πειραματικής μελέτης της διεργασίας με βασικό κριτήριο την μεγιστοποίηση της παραγωγής μεθανίου. Τα δύο ρεύματα αναμιγνύονται σε αναλογία 33,3% FMSW condensate / 66,7% WAS, ή 1:2. Το διάγραμμα ροής του συγκεκριμένου Σεναρίου παρουσιάζεται στο Σχήμα 21.



Σχήμα 19: Διάγραμμα ροής εναλλακτικού Σεναρίου 2

Με βάση το διάγραμμα ροής του Σεναρίου 2 εξάγεται το συμπέρασμα πως μέσω της συγκεκριμένης διεργασίας υπάρχουν δυνατότητες ανάκτησης ενέργειας μέσω αναερόβιας χώνευσης, ωστόσο δεν είναι δυνατόν να εκτιμηθεί εάν η εκτροπή των 10 m³ περίσσειας ενεργού ιλύος την ημέρα από την κύρια διεργασία αναερόβιας χώνευσης που κατευθύνεται αυξάνει την ημερήσια παραγωγή μεθανίου. Επιπλέον εξετάζοντας την διεργασία ως προς την επεξεργασία του FMSW condensate, παρατηρείται πως για την επεξεργασία ίδιας ποσότητας condensate απαιτείται υπερδιπλάσιος όγκος αντιδραστήρα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι ο CSTR δεν αποτελεί ταχύρρυθμο σύστημα και χρειάζεται μεγαλύτερους χρόνους παραμονής. Ο υπολογισμός των διαστάσεων του αντιδραστήρα και των απαιτούμενων ροών

πραγματοποιήθηκε με βάση τα αποτελέσματα της πειραματικής μελέτης της διεργασίας σε πιλοτική κλίμακα. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε ένας αντιδραστήρας τύπου CSTR όγκου 100L. Η βέλτιστη φάση λειτουργίας ως προς την παραγωγή μεθανίου είχε υδραυλικό χρόνο παραμονής 15 ημέρες και αναλογία FMSW condensate/ WAS 1:2. Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα υπολογίσθηκαν οι λειτουργικές παράμετροι για την διεργασία που παρουσιάζονται στον Πίνακα 11. Επισημαίνεται πως και στην συγκεκριμένη διεργασία ο όγκος του αντιδραστήρα προσαυξάνεται κατά 10%.

Πίνακας 11: Παράμετροι λειτουργίας εναλλακτικού Σεναρίου 2

| <b>Σενάριο 2: Παράμετροι Λειτουργίας</b>      |                     |
|---|---------------------|
| Ημερήσια Παραγωγή FMSW condensate ανά κάτοικο | 0,2 L               |
| FMSW condensate προς CSTR                     | 20 m <sup>3</sup>   |
| WAS προς CSTR                                 | 10 m <sup>3</sup>   |
| Όγκος CSTR                                    | 550 m <sup>3</sup>  |
| Υδραυλικός Χρόνος Παραμονής CSTR              | 15 d                |
| Ημερήσια Παραγωγή Μεθανίου                    | 116,9m <sup>3</sup> |

Όσον αφορά το μέγεθος της ανακτώμενης ενέργειας αυτή υπολογίζεται με βάση τα λίτρα μεθανίου που παράγονται ημερησίως. Συγκεκριμένα ημερησίως παράγονται 116,9 m<sup>3</sup> μεθανίου την ημέρα. Με βάση το ενεργειακό υπόβαθρο της συγκεκριμένης ένωσης η συγκεκριμένη παροχή μεταφράζεται σε 4200 MJ ανά ημέρα (Θερμογόνος Δύναμη Μεθανίου : 36 MJ/ m<sup>3</sup>).

Ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία εκπονήθηκε τεχνοοικονομική μελέτη και για το Σενάριο 2. Τα αποτελέσματα επενδυτικού και λειτουργικού κόστους παρουσιάζονται στους Πίνακες 12 και 13 αντίστοιχα.

Πίνακας 12: Βασικό επενδυτικό κόστος Σεναρίου 2

| <b>Σενάριο 2: Επενδυτικό Κόστος</b>         | <b>Euro (€)</b> |
|---|-----------------|
| Αγορά & Εγκατάσταση CSTR                    | 650000          |
| Αγορά & Εγκατάσταση Αντλίας FMSW condensate | 4000            |
| Αγορά & Εγκατάσταση Αντλίας WAS             | 4000            |

Πίνακας 13: Βασικό λειτουργικό κόστος Σεναρίου 2

| <b>Σενάριο 2: Λειτουργικό Κόστος</b>   | <b>kW/year</b> |
|--|----------------|
| Συνολική Απαίτηση Ηλεκτρικής Ενέργειας | 53998          |
| Ηλεκτρική Ενέργεια Αντλησης            | 161,994        |
| Ηλεκτρική Ενέργεια Θέρμανσης           | 53836,006      |

Στην συγκεκριμένη μελέτη η ηλεκτρική ενέργεια που προορίζεται για την θέρμανση του αντιδραστήρα παρουσιάζει μικρότερη τιμή, γεγονός που οφείλεται στην υψηλότερη θερμοκρασία της ενεργού ύλης. Επιπλέον παρατηρείται πως η ενέργεια άντλησης είναι σαφώς μικρότερη εξαιτίας του αυξημένου HRT της διεργασίας.

### 7.3 Συμπεράσματα

Όσον αφορά τα αρχικά επενδυτικά κόστη που απαιτούνται για την εφαρμογή των ανωτέρω αρχικώς προτεινόμενων διαχειριστικών σεναρίων γίνεται αντιληπτό πως είναι αρκετά υψηλά. Συγκεκριμένα το αρχικό επενδυτικό κόστος για το διαχειριστικό σενάριο 2 ανέρχεται

στα 658000 ευρώ σχεδόν διπλάσιο από το αντίστοιχο του σεναρίου 1. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην διαφορά όγκων ανάμεσα στους δύο αντιδραστήρες.

Οστόσο αξίζει να αναφερθεί πως η ανάγκη για την διερεύνηση των ανωτέρω σεναρίων προκύπτει λόγω της βιωσιμότητας και της αξιοποίησης του FORBI (στερεής βιομάζας) καθώς και του συμπυκνώματος που παράγεται μέσω της ξήρανσης των ζυμώσιμων στερεών αστικών αποβλήτων.

## ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ – ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ SimaPro

Αυτό το κεφάλαιο εξηγεί πώς λειτουργεί το λογισμικό ανάλυσης κύκλου ζωής SimaPro του συγκεκριμένου υποδείγματος διαχείρισης και σύγκρισης του με την υπάρχουσα δομή διαχείρισης. Συμπεριλαμβάνονται ο τρόπος καταγραφής και απογραφής δεδομένων για την έρευνα των δύο σεναρίων στα πλαίσια του έργου DENOMINATE.

### 8.1 Εισαγωγή Λογισμικού SimaPro

Σε αυτή τη μελέτη, αξιολογούνται τα δύο σενάρια αξιοποίησης του υγρού κλάσματος (condensate) της ξήρανσης των τροφικών υπολειμμάτων καθώς και των υγρών αποβλήτων μιας πόλης 100000 κατοίκων χρησιμοποιώντας το λογισμικό SimaPro. Το SimaPro υποστηρίζει μοντελοποίηση κύκλου ζωής προϊόντος βάση Εσωτερικού Προτύπου (ISO) 14040 και 14044 (*Life Cycle-Based Standards and Guidelines - PRé Sustainability, n.d.*).

Είναι ένα απλό στη χρήση εργαλείο για τη μοντελοποίηση και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων όσον αφορά την επιρροή τους στο περιβάλλον. Οι επόμενες παράγραφοι συζητούν τη μεθοδολογία και τις επιλογές βάσεις δεδομένων που γίνονται ανάλογα με συγκεκριμένες κατηγορίες επιπτώσεων.

### 8.2 Βιβλιοθήκες και Βάσεις δεδομένων

Οι βάσεις δεδομένων χρησιμοποιούνται κατά την εφαρμογή των προσεγγίσεων εκτίμησης των επιπτώσεων του κύκλου ζωής, επειδή παρέχουν τα δεδομένα απογραφής που απαιτούνται για τα στάδια LCI και LCIA. Οι πιο δημοφιλείς από αυτές τις βάσεις δεδομένων στο Λογισμικό SimaPro είναι οι: Ecoinvent, US LSI, ELCD, US Input Output, Swiss Input Output, LCA Food και Industry Data. Από αυτές μόνο η βάση δεδομένων Ecoinvent και η βάση δεδομένων ELCD επιλέχθηκαν για την παρούσα εργασία.

#### 8.2.1 Ecoinvent

Σχετικά με την βάση δεδομένων Ecoinvent χρησιμοποιείται περίπου από 4.500 άτομα παγκοσμίως και είναι προσβάσιμη σε περισσότερες από 40 χώρες, ενώ έχει πάνω από 10.000 διαδικασίες στην πιο πρόσφατη έκδοσή της (<https://ecoinvent.org/>). Η βάση δεδομένων δημιουργήθηκε μέσω συνεργασίας με ελβετικούς οργανισμούς με σκοπό την ενημέρωση και τη συνένωση διαφορετικών συνόλων δεδομένων απογραφής κύκλου ζωής. Αφορά κυρίως τους ακόλουθους τομείς: επεξεργασία αποβλήτων (υγειονομική ταφή, αποτέφρωση και ανακύκλωση), μεταφορές (αυτοκίνητα, πλοία, σιδηρόδρομοι, αερομεταφορές, αγωγοί κ.λπ.), υλικά και παροχή ενέργειας (θερμότητα, συμβατικές και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας) (Mark et al., 2008) ακόμα αξίζει να σημειωθεί ότι όλες οι διεργασίες έχουν τη δυνατότητα να απεικονίζονται με έναν από τους δύο τρόπους: ως συστήματα διεργασιών ή ως μοναδιαίες διεργασίες. Στην αρχική έκδοση, εμφανίζονται μόνο οι εισοδοί και οι έξοδοι

μιας διεργασίας. Όταν επιλέγεται κατά τη διάρκεια της μοντελοποίησης, περιλαμβάνονται αυτόματα όλες οι εισροές και οι εκροές της διεργασίας ή όλες οι εισροές και οι εκροές εκπομπών από διεργασίες ανάντη. Η δεύτερη παραλλαγή λειτουργεί σαν ένα "μαύρο κουτί", λαμβάνοντας υπόψη όλες τις εκπομπές ως σύνολο και όχι ως αποτέλεσμα διακριτών δραστηριοτήτων. (Εγχειρίδιο για το SimaPro) (*ILCD-Handbook-General-Guide-for-LCA-DETAILED-GUIDANCE-12March2010-ISBN-Fin-v1.0-EN*, n.d.).

## 8.2.2 ELCD

Όσον αφορά την βάση δεδομένων ELCD εκείνη περιλαμβάνει δεδομένα απογραφής κύκλου ζωής (LCI) για σημαντικά υλικά, πηγές ενέργειας, μεταφορές και διαχείριση αποβλήτων από κορυφαίες βιομηχανικές ενώσεις σε επίπεδο ΕΕ και άλλες πηγές. Αυτά τα σύνολα δεδομένων είναι αντιπροσωπευτικά για την ευρωπαϊκή αγορά, ενώ ορισμένα σύνολα δεδομένων παρέχονται ανά χώρα και για τα 27 κράτη μέλη της ΕΕ (Recchioni et al., 2012).

## 8.3 Μέθοδος Αξιολόγησης

Υπάρχουν ολοκληρωμένες διαδικασίες LCIA που μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για τις μεθόδους LCIA τελικού σημείου όσο και για τις μεθόδους LCIA μεσαίου σημείου. Όσον αφορά το ενδιάμεσο σημείο διαφοροποιείται ένας μεγάλος αριθμός κατηγοριών επιπτώσεων (περίπου 10) και τα αποτελέσματα είναι πιο ακριβή, σε σύγκριση με που τα αποτελέσματα του τελικού σημείου.

Ακολουθούν οι κατηγορίες επιπτώσεων σε επίπεδο μέσου σημείου και οι ζώνες προστασίας οι οποίες απαιτείται να ελεγχθούν προς τη συνάφεια με τη μελέτη. Έτσι προσδιορίζονται οι σχετικές μέθοδοι LCIA που θα χρησιμοποιηθούν στη φάση της εκτίμησης των επιπτώσεων του κύκλου ζωής της LCA:

- Κατηγορία επιπτώσεων:

Ανθρώπινη τοξικότητα, Αναπνευστικό ανόργανες ουσίες, Ιονίζουσα ακτινοβολία, (Επίγεια) Φωτοχημικός σχηματισμός όζοντος, Οξίνιση (έδαφος και ύδατα), Ευτροφισμός (έδαφος και ύδατα), Οικοτοξικότητα, Γη χρήση, εξάντληση πόρων (ορυκτά, ορυκτές και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, νερό).

- Περιοχές προστασίας:

Φυσικό περιβάλλον, Φυσικοί πόροι

Εξ ορισμού, όλες οι παραπάνω κατηγορίες επιπτώσεων θα πρέπει να καλύπτονται από τον συνδυασμό επιλεγμένων μεθόδων LCIA για αυτό και η επιλογή της μεθόδου ή των συνδυασμό των μεθόδων εξαρτάται από τις επιπτώσεις που η κάθε μελέτη στοχεύει και θέλει να διερευνήσει.

### 8.3.1 ReCiPe 2016 Midpoint (E)

Η μέθοδος που επιλέχθηκε για την παρούσα μελέτη είναι εκείνη της *ReCiPe 2016 Midpoint (E)*, όπου το ReCiPe 2016 είναι μια αναβαθμισμένη και διευρυμένη έκδοση του ReCiPe 2008.

Το ReCiPe 2016 προσφέρει τελικές επιπτώσεις (εστιασμένες στον άνθρωπο και το περιβάλλον) και ενδιάμεσες (προσανατολισμένες στο θέμα) κατηγορίες επιπτώσεων για κάθε μία από τις τρεις προοπτικές (ατομικιστική (I), ιεραρχική (H) και εξισωτική (E)).

Στην παρούσα μελέτη έγινε η επιλογή της *εξισωτικής (E)* μεθόδου εφόσον εξετάζονται οι μακροχρόνιες επιπτώσεις των Σεναρίων 1 και 2 τα οποία έχουνε ανάγκη από μια πιο προληπτική μέθοδο αξιολόγησης.

Το ReCiPe 2026 όπως αναφέρθηκε και παραπάνω περιλαμβάνει δύο σύνολα κατηγοριών επιπτώσεων με συναφή σύνολα παραγόντων χαρακτηρισμού, το ενδιάμεσο (Midpoint) και το τελικό (Endpoint). Σχετικά με το ενδιάμεσο επίπεδο, αντιμετωπίζονται 18 κατηγορίες επιπτώσεων με τις αντίστοιχες μονάδες μέτρησης οι οποίοι σε συνδυασμό με το Σχήμα 22 των σχέσεων μεταξύ κατηγοριών επιπτώσεων στο μέσο επίπεδο που ακολουθεί οδηγεί την μελέτη και την κατηγοριοποιεί μαζί τις μεθόδους LCIA μεσαίου σημείου (*Midpoint*) (*SimaPro Database Manual Methods Library Title: SimaPro Database Manual Methods Library, 2020*).

Πίνακας 14: Μέθοδος ReCiPe 2016, συμπεριλαμβανομένων 18 κατηγοριών επιπτώσεων μεσαίου σημείου (Midpoint)

| Κατηγορία Επιπτώσεων   | Μονάδες                           |
|--|-----------------------------------|
| Υπερθέρμανση του πλανήτη (Global warming)  | kg CO2 eq                         |
| Εξάντληση του στρατοσφαιρικού όζοντος (Stratospheric ozone depletion)                | kg CFC-11 eq                      |
| Ιονίζουσα ακτινοβολία (Ionizing radiation)   | kBq Cobalt-60 eq                  |
| Σχηματισμός όζοντος, Ανθρώπινη υγεία (Ozone formation, human health)                 | kg PM2.5 eq                       |
| Σχηματισμός λεπτών σωματιδίων (Fine particulate matter formation)                    | kg NOx eq                         |
| Σχηματισμός όζοντος, Χερσαία οικοσυστήματα (Ozone formation, terrestrial ecosystems) | kg NOx eq                         |
| Χερσαία οξίνιση (Terrestrial acidification)  | kg SO2 eq                         |
| Ευτροφισμός των γλυκών υδάτων (Freshwater eutrophication)                            | kg P to freshwater eq             |
| Θαλάσσιο ευτροφισμός (Marine eutrophication)   | kg N to marine eq                 |
| Χερσαία οικοτοξικότητα (Terrestrial ecotoxicity)                                     | kg 1,4- dichlorobenzene (1,4-DCB) |
| Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (Freshwater ecotoxicity)                                | kg 1,4- dichlorobenzene (1,4-DCB) |
| Θαλάσσια οικοτοξικότητα (Marine ecotoxicity)   | kg 1,4- dichlorobenzene (1,4-DCB) |
| Ανθρώπινη καρκινογόνος τοξικότητα (Human carcinogenic toxicity)                      | kg 1,4- dichlorobenzene (1,4-DCB) |
| Ανθρώπινη μη-καρκινογόνος τοξικότητα (Human non-carcinogenic toxicity)               | kg 1,4- dichlorobenzene (1,4-DCB) |
| Χρήση γης (Land use)   | m <sup>2</sup> *yr                |
| Σπανιότητα πόρων μεταλλευμάτων (Mineral resource scarcity)                           | kg Cu eq                          |

|  |           |
|--|-----------|
| Σπανιότητα ορυκτών πόρων<br>(Fossil resource scarcity) | kg oil eq |
| Χρήση νερού<br>(Water use)                             | m3        |

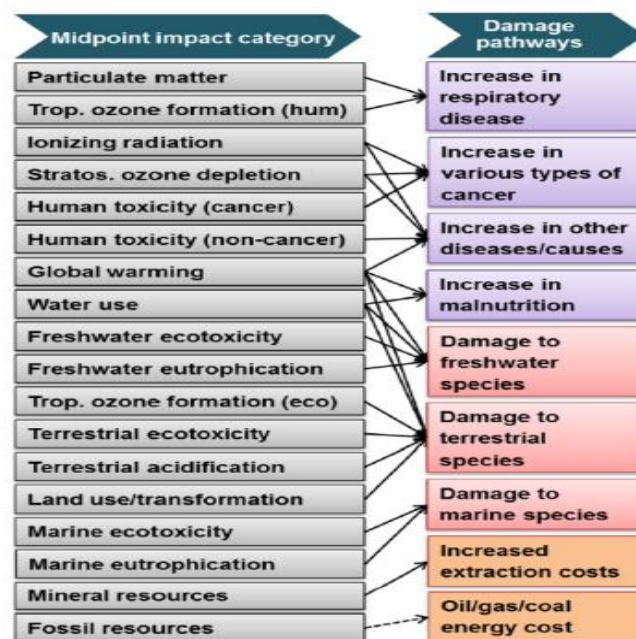
Παρακάτω αναγράφονται τα πιθανά μονοπάτια βλάβης τα οποία χωρίζονται σε 3 κατηγορίες τις αυξήσεις, τις ζημιές και τα κόστη.

- Αυξήσεις
  - Αύξηση των αναπνευστικών ασθενειών (Increase in respiratory disease)
  - Αύξηση διαφόρων τύπων καρκίνου (Increase in various types of cancer)
  - Αύξηση άλλων ασθενειών/αιτιών (Increase in other diseases/causes)
  - Αύξηση του υποσιτισμού (Increase in malnutrition)
- Ζημιές
  - Ζημία σε είδη γλυκών υδάτων (Damage to freshwater species)
  - Ζημία σε χερσαία είδη (Damage to terrestrial species)
  - Ζημία σε θαλάσσια είδη (Damage to marine species)
- Κόστος

Αύξηση του κόστους εξόρυξης (Increased extraction costs)

Κόστος πετρελαίου/αερίου/άνθρακα/ενέργειας (Oil/gas/coal/energy cost)

Ακολουθεί ενδεικτικό σχήμα όπου απεικονίζονται οι σχέσεις μεταξύ των κατηγοριών επιπτώσεων στο ενδιάμεσο επίπεδο και τα μονοπάτια βλάβης που το καθένα ακολουθεί (SimaPro Database Manual Methods Library, 2020).



Σχήμα 20: Απεικόνιση σχέσεων μεταξύ κατηγοριών επιπτώσεων στο μέσο επίπεδο



## ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Η ενότητα αυτή περιγράφει τις υποθέσεις και τους περιορισμούς που καθορίστηκαν καθώς και τα δεδομένα που εισήχθησαν για να διασφαλιστεί η σωστή καταγραφή δεδομένων του σεναρίου στο πρόγραμμα. Ακολουθεί η εισαγωγή των δέντρων και τα διαγράμματα 100% των αποτελεσμάτων της LCIA όπου οι συνδέσεις μεταξύ των διαφόρων δραστηριοτήτων παρουσιάζονται σχηματικά σε όλο τον κύκλο ζωής των σεναρίων.

Δεδομένου ότι το λογισμικό SimaPro δεν έχει τις βάσεις δεδομένων οι οποίες απαιτούνται για τον χαρακτηρισμό των Σεναρίων πραγματοποιείται συλλογή δεδομένων με σκοπό την δημιουργία νέων βιβλιοθηκών οι οποίες στην επόμενη ενότητα της Ανάλυσης των Σεναρίων θα ανακαλεστούν σαν εισροές και εκροές για την κατασκευή των Σεναρίων στο λογισμικό.

### 9.1 Οριοθέτηση Διαχειριστικών σεναρίων

#### 9.1.1 Στόχος και πεδίο εφαρμογής

Σκοπός της παρούσας διπλωματική εργασία είναι η διενέργεια μιας αρχικής εκτίμησης του κύκλου ζωής (AKZ) των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων των διεργασιών αξιοποίησης του Υγρού Κλάσματος (FMSW condensate) με απώτερο στόχο την δημιουργία ενός συμφέροντος καινοτόμου πλάνου συνδιαχείρισης χημικά συγγενικών αποβλήτων με διεργασίες χαμηλότερων ενεργειακών απαιτήσεων και δυνατότητες ανάκτησης ενέργειας μέσω του παραγόμενου βιοαερίου. Η μελέτη χρησιμοποιεί την Ανάλυση Κύκλου Ζωής (AKZ) από το στάδιο παραγωγής του condensate μέχρι το τελικό στάδιο της παραγωγής του βιοαερίου χρησιμοποιώντας μια μεθοδολογία “cradle-to-gate”.

Παράλληλα η χρησιμότητα της μελέτης κείται στην αποσαφήνιση της αποτελεσματικότητας των σεναρίων συγκριτικά με τον συμβατικό τρόπο διαχείρισης του υγρού κλάσματος ο οποίος είναι η τελική απόθεση του στο αρχικό ρεύμα των λυμάτων του Δήμου για τελική συν διαχείριση στο Κέντρο Επεξεργασίας Λυμάτων (Κ.Ε.Λ.) (Σχήμα 19 Υπάρχον Διαχειριστικό Πλάνο).

#### 9.1.2 Λειτουργική Μονάδα

Ως λειτουργική μονάδα λαμβάνεται η παραγωγή υγρού κλάσματος (condensate) της ξήρανσης/τεμαχισμού των τροφικών υπολειμμάτων η οποία είναι 0,2L ανά μέρα ανά κάτοικο. Η εφαρμογή της μελέτης έγινε για 100.000 κατοίκους η παραγωγή του υγρού κλάσματος και ανέρχεται στα 20 m<sup>3</sup> ανά μέρα ανά 100.000 κατοίκους.

#### 9.1.3 Όρια Συστήματος

Τα στάδια και οι μέθοδοι που καλύπτονται στην έρευνα της AKZ καθορίζονται από τα όρια του συστήματος, επομένως ο καθορισμός αυτών των ορίων είναι απαραίτητος.

Τα όρια του συστήματος συμβολίζουν το σύνολο των επιπτώσεων που αφορούν τη διαχείριση του condensate μέχρι και την παραγωγή του βιοαερίου, που είναι και το κύριο προϊόν. Τα στάδια της συλλογής condensate, της μεταφοράς του στην εγκατάσταση επεξεργασίας (ΚΕΛ) και της περαιτέρω επεξεργασίας του περιλαμβάνονται στην AKZ.

Ως χώρος επεξεργασίας της συνδιαχείρισης των δύο ρευμάτων λαμβάνεται το Κ.Ε.Λ. Μεταμόρφωσης, μέσης απόστασης 11χλμ. από το αμαξοστάσιο του Δήμου Χαλανδρίου (100000 κατοίκων) στο οποίο και λαμβάνει χώρα η διεργασία της ξήρανσης των ζυμώσιμων τροφικών αποβλήτων (η συνολική ανάλυση κύκλου ζωής από την συλλογή-

ξήρανση/τεμαχισμό καθώς και παραγωγή και αξιοποίηση του FORBI έχουν ολοκληρωθεί στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού Έργου Waste4think (Mathioudakis et al., 2021).

## 9.2 Συλλογή δεδομένων LCI – AKZ Σεναρίου 1

### Πειραματικά δεδομένα

Τα δεδομένα για τη σύνθεση των εισροών και των εκροών των διεργασιών του Σεναρίου 1 συγκεντρώθηκαν για την απογραφή δεδομένων (LCI) κυρίως από εργαστηριακή έρευνα που διεξήχθη στο εργαστήριο Οργανικής χημικής Τεχνολογίας στα πλαίσια το έργου DENOMINATE. Με μοναδική εξαίρεση τα δεδομένα προσομοίωσης του αστικού λύματος τα οποία αντλήθηκαν από βιβλιογραφικές πηγές (η συγκεκριμένη επιλογή έγινε για λόγους υγειονομικής διαχείρισης καθώς και για να έχει το απόβλητο σταθερά φυσικοχημικά χαρακτηριστικά κατά την διάρκεια της μελέτης).

### Από Λογισμικό SimaPro

Επιπλέον, λήφθηκε υπόψη η πιο δημοφιλής βάση δεδομένων Ecoinvent (*Ecoinvent 3-allocation, cut-off by classification-system*) του λογισμικού (<https://ecoinvent.org/>), καθώς επίσης και από βάσεις δεδομένων που εμπεριέχονται στο λογισμικό Ανάλυσης Κύκλου Ζωής SimaPro όπως την βασική βάση δεδομένων ELCD (*ELCD*). Συνεπώς, αναπτύχθηκε ένας αντιπροσωπευτικός κατάλογος δεδομένων προσαρμοσμένος για την Ελλάδα. Τέλος από τις βάσεις δεδομένων δεν παραλήφθηκε να επιλεγθεί και εκείνη η βάση δεδομένων Methods (*Methods*).

#### 9.2.1 LCI του FMSW condensate

Τα δεδομένα εισροής για την μοντελοποίηση του FMSW condensate στο λογισμικό SimaPro προήλθαν από τον χημικό χαρακτηρισμό του υγρού κλάσματος καθ' όλη την διάρκεια του κύκλου ξήρανσης, μέσω συλλογής ωριαίων δειγμάτων του συμπυκνώματος (FMSW condensate). Ακολούθησαν 4 σειρές μετρήσεων ξεχωριστά για τις 4 εποχές του χρόνου (Καλοκαίρι, Φθινόπωρο, Χειμώνα, Άνοιξη) από τις οποίες βρέθηκε ο Μέσος Όρος τους και έτσι εισήχθησαν στο λογισμικό. Παρακάτω παρατίθεται οι ποσότητες της εισροής σε mg ανά L.

Σημαντική παρατήρηση είναι πώς η εισαγωγή των δεδομένων καταγράφηκε σαν εκροή και πιο συγκεκριμένα σαν εκπομπή στο νερό. Η παρούσα διαδικασία δεν αποτελεί πρόβλημα στο σύστημα εφόσον κατά την κατασκευή της διεργασίας και τελικά προστέθηκε στο λογισμικό ως εισροή.

Παρακάτω παρατίθεται ο Πίνακας 15 των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών του FMSW condensate.

Πίνακας 15: LCI του FMSW condensate

| Εκροές                      |                    |                                 |
|-----------------------------|--------------------|---------------------------------|
| Εκπομπές στο νερό           | Συγκέντρωση (mg/L) | Συγκέντρωση ( $10^{-12}$ Henry) |
| COD, Chemical Oxygen Demand | 12827,36           |                                 |
| TOC, Total                  | 3808,88            |                                 |

|                    |         |
|--------------------|---------|
| Organic Carbon     |         |
| TN, Total Nitrogen | 13,78   |
| pH*                | 3,27    |
| Οξικό              | 1123,88 |
| Προπιονικό         | 291,40  |
| Ισο-βουτυρικό      | 61,67   |
| Βουτυρικό οξύ      | 74,15   |
| Ισο-βαλερικό       | 23,83   |
| Βαλερικό οξύ**     | 19,20   |
| Γαλακτικό οξύ      | 52,88   |
| Αιθανόλη           | 4006,56 |

Η μοντελοποίηση του LCI του FMSW condensate πραγματοποιείται με τις ακόλουθες παραδοχές και υποδείξεις:

- Τα δεδομένα παρόλο που αναγράφονται στον Πίνακα 15 σε mg/L η λειτουργική μονάδα στο λογισμικό για το προϊόν ήταν τα 0,001 m<sup>3</sup>.
- Τα δεδομένα του FMSW condensate αντλήθηκαν από εργαστηριακές μετρήσεις.
- Όπου αναγράφεται το COD αναφέρεται το ολικό COD, η τιμή του διαλυτού COD ήταν 11593,48 mg/L.
- Όπου αναγράφεται το TOC και το TN, αναφέρεται το διαλυτό TOC και TN.
- Η συγκέντρωση του pH δεν αποτελεί εκροή για το λογισμικό SimaPro, ο λόγος που αναγράφεται στον παραπάνω Πίνακα είναι για την ολοκληρωμένη καταγραφή των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών του FMSW condensate (\*).
- Η συγκέντρωση του Βαλερικού οξέος δεν αποτελεί εκροή για το λογισμικό SimaPro εφόσον δεν υπάρχει βάση δεδομένων για το Βαλερικό οξύ σε εκείνο, ο λόγος που αναγράφεται στον παραπάνω Πίνακα είναι για την ολοκληρωμένη καταγραφή των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών του FMSW condensate (\*\*).
- Τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του υγρού κλάσματος παρόλο που αποτελούν εισροή στο σύστημα εκφράζονται ως εκροή για το λογισμικό SimaPro διότι τα χαρακτηριστικά μιας υδάτινης ροής έχουν τις βάσεις δεδομένων τους στην κατηγορία των εκρών.

### 9.2.2 LCI του MWW (Municipal wastewater)

Τα δεδομένα εισροής για την μοντελοποίηση του MWW στο λογισμικό SimaPro προήλθαν από τον φυσικοχημικό χαρακτηρισμό του συνθετικού μίγματος αστικού λύματος. Όπως αναφέρθηκε και στην ανάλυση Σεναρίων της τεχνοοικονομικής ανάλυσης καθώς και στην συλλογή δεδομένων από τα πειράματα που ολοκληρώθηκαν επιλέχθηκε η δημιουργία

συνθετικού μίγματος το οποίο προσομοιάζει τα χαρακτηριστικά του πραγματικού αστικού λύματος.

Σημαντική παρατήρηση είναι πώς η εισαγωγή των δεδομένων καταγράφηκε σαν εκροή και πιο συγκεκριμένα σαν εκπομπή στο νερό. Η παρούσα διαδικασία δεν αποτελεί πρόβλημα στο σύστημα εφόσον κατά την κατασκευή της διεργασίας όπου τελικά προστέθηκε στο λογισμικό ως εισροή.

Παρακάτω παρατίθεται ο Πίνακας 16 των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών του συνθετικού μίγματος αστικού λύματος.

Πίνακας 16: LCI του MWW

| <b>Εκροές</b>                                     |                           |  |
|---|---------------------------|--|
| <b>Εκπομπές στο νερό</b>                          | <b>Συγκέντρωση (mg/L)</b> | <b>Συγκέντρωση (<math>10^{-12}</math> Henry)</b> |
| COD, Chemical Oxygen Demand                       | 695                       |  |
| TOC, Total Organic Carbon                         | 267                       |  |
| TN, Total Nitrogen                                | 47                        |  |
| Alkalinity, Calcium Carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ) | 100                       |  |
| pH*   |                           | 7,14   |

Η μοντελοποίηση του LCI του MWW πραγματοποιείται με τις ακόλουθες παραδοχές και υποδείξεις:

- Τα δεδομένα παρόλο που αναγράφονται στον Πίνακα 16 σε mg/L η λειτουργική μονάδα στο λογισμικό για το προϊόν ήταν τα 0,001 m<sup>3</sup>.
- Τα δεδομένα προσομοίωσης του αστικού λύματος αντλήθηκαν από βιβλιογραφικές πηγές.
- Όπου αναγράφεται το COD αναφέρεται το ολικό COD
- Η συγκέντρωση του pH δεν αποτελεί εκροή για το λογισμικό SimaPro, ο λόγος που αναγράφεται στον παραπάνω Πίνακα είναι για την ολοκληρωμένη καταγραφή των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών του συνθετικού αστικού λύματος (\*).
- Τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του σύνθετου λύματος παρόλο που αποτελούν εισροή στο σύστημα εκφράζονται ως εκροή για το λογισμικό SimaPro διότι τα χαρακτηριστικά μιας υδάτινης ροής έχουν τις βάσεις δεδομένων τους στην κατηγορία των εκροών.

### 9.2.3 LCI του effluent (PABR)

Τα δεδομένα εισροής για την μοντελοποίηση του effluent στο λογισμικό SimaPro προήλθαν από τον χημικό χαρακτηρισμό της εκροής του περιοδικού αερόβιου αντιδραστήρα (PABR) (digestate).

Σημαντική παρατήρηση είναι πώς η εισαγωγή των δεδομένων καταγράφηκε σαν εκροή και πιο συγκεκριμένα σαν εκπομπή στο νερό. Η παρούσα διαδικασία δεν αποτελεί πρόβλημα στο σύστημα εφόσον κατά την κατασκευή της διεργασίας και στην συνέχεια προστέθηκε στο λογισμικό ως εισροή.

Τα χαρακτηριστικά της εκροής που προέκυψαν παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 17.

Πίνακας 17: LCI του effluent

| <b>Εκροές</b>                                     |                           |  |
|---|---------------------------|--|
| <b>Εκπομπές στο νερό</b>                          | <b>Συγκέντρωση (mg/L)</b> | <b>Συγκέντρωση (<math>10^{-12}</math> Henry)</b> |
| COD, Chemical Oxygen Demand                       | 62,27                     |  |
| TOC, Total Organic Carbon                         | 5,36                      |  |
| TP, Total Phosphorus                              | 4,7                       |  |
| TN, Total Nitrogen                                | 57,96                     |  |
| Alkalinity, Calcium Carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ) | 1775                      |  |
| pH*   |                           | 7,41   |

Η μοντελοποίηση του LCI του effluent πραγματοποιείται με τις ακόλουθες παραδοχές και υποδείξεις:

- Τα δεδομένα παρόλο που αναγράφονται στον Πίνακα 17 σε mg/L η λειτουργική μονάδα στο λογισμικό για το προϊόν ήταν τα 0,001 m<sup>3</sup>.
- Τα δεδομένα του effluent αντλήθηκαν από εργαστηριακές μετρήσεις.
- Όπου αναγράφεται το COD αναφέρεται το ολικό COD.
- Όπου αναγράφεται το TOC και το TN, αναφέρεται το διαλυτό TOC και TN.
- Η συγκέντρωση του pH δεν αποτελεί εκροή για το λογισμικό SimaPro, ο λόγος που αναγράφεται στον παραπάνω Πίνακα είναι για την ολοκληρωμένη καταγραφή των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών του effluent (\*).

- Τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του effluent παρόλο που αποτελούν εισροή στο σύστημα εκφράζονται ως εκροή για το λογισμικό SimaPro διότι τα χαρακτηριστικά μιας υδάτινης ροής έχουν τις βάσεις δεδομένων τους στην κατηγορία των εκροών.

#### 9.2.4 LCI του Σεναρίου 1

Στο λογισμικό SimaPro για την μοντελοποίηση του Σεναρίου 1 και την τελική αναπαράσταση σε διάγραμμα ροής υλικών και διαδικασιών εισάγονται τα δεδομένα όπως παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα.

Πίνακας 18: LCI του Σεναρίου 1

| <b>Εκροή Προϊόντων</b>  |                              |
|-------------------------|------------------------------|
| <b>Προϊόν</b>           | <b>Όγκος (m<sup>3</sup>)</b> |
| Βιοαέριο                | 94                           |
| <b>Εισροές Υλικών</b>   |                              |
| <b>Υλικά</b>            | <b>Όγκος (m<sup>3</sup>)</b> |
| MWW                     | 180                          |
| FMSW condensate         | 20                           |
| <b>Εισροή Μεταφοράς</b> |                              |
| <b>Μεταφορά</b>         | <b>Απόσταση (tkm)</b>        |
| Βυτιοφόρο               | 219,34                       |
| <b>Εισροή Ενέργειας</b> |                              |
| <b>Ενέργεια</b>         | <b>(kWh)</b>                 |
| Ηλεκτρική               | 6,95                         |
| <b>Εκροές Υλικών</b>    |                              |
| <b>Υλικά</b>            | <b>Όγκος (m<sup>3</sup>)</b> |
| Effluent                | 200                          |

#### Εισροές και Εκροές Υλικών

Για τις εισροές και εκροές των υλικών οι τιμές έχουν υπολογιστεί βάσει ισοζυγίων μάζας και ενέργειας και βάσει όγκου αντιδραστήρα PABR ενώ οι βάσεις δεδομένων τους δημιουργήθηκαν εκ νέου όπως αναφέρονται στην παρούσα ενότητα.

#### Ηλεκτρική Ενέργεια

Η ηλεκτρική ενέργεια υπολογίστηκε με την βοήθεια του λογισμικού ASPEN PLUS όπου η διεργασία προσομοιάστηκε με ένα δοχείο ίσου όγκου και παρεμφερούς υλικού κατασκευής με τον PABR, το οποίο τροφοδοτείται με παροχές παρόμοιες με αυτές της διεργασίας. Παρά

όλα αυτά η συγκεκριμένη μελέτη αποσκοπεί σε έναν γενικότερο προσδιορισμό της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας και όχι στον ακριβή υπολογισμό της.

Σχετικά με την βάση δεδομένων που επιλέχθηκε για τον χαρακτηρισμό της ενέργειας οι τύποι της ηλεκτρικής ενέργειας χωρίζονται σε τρεις κύριες κατηγορίες: Χαμηλής τάσης (1000 V), Μεσαίας τάσης (1kV-24kV) και Υψηλής τάσης (>24kV), η διεργασία του Σεναρίου 1 χρησιμοποιεί τριφασικό ρεύμα θεωρείται ως σύστημα χαμηλής τάσης. Για αυτό και στο λογισμικό επιλέχθηκε η βάση δεδομένων *Electricity, low voltage {GR}*.

Σημείωση: Το {GR} αντιπροσωπεύει την γεωγραφική προέλευση των βάσεων δεδομένων συγκεκριμένων διεργασιών.

### **Μεταφορά**

Η μεταφορά αφορά την απόσταση την οποία θα διανύσει το βυτιοφόρο με FMSW condensate όγκου 20 m<sup>3</sup> από το αμαξοστάσιο του Δήμου Χαλανδρίου στα Κ.Ε.Λ. Μεταμόρφωσης, απόστασης 11χλμ. Για την επιλογή της κατάλληλης μονάδας μέτρησης ισχύει ότι 1 μετρικός τόνος αντιστοιχεί σε 1000 kg. Το FMSW condensate έχει πυκνότητα ίση με 997 kg/m<sup>3</sup> και όγκο ίσο με 20 m<sup>3</sup>, επομένως για το βάρος αντιστοιχεί η τιμή των 19.940 kg, τιμή που ανήκει στο εύρος φορτίου 16-32 μετρικού τόνου σύμφωνα με τις κατηγορίες φορτίου του λογισμικού SimaPro. Για αυτό και στο λογισμικό επιλέχθηκε η βάση δεδομένων *Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro6 {RER}*.

Σημείωση: Το ακρωνύμιο του {RER} αντιπροσωπεύει τις βάσεις δεδομένων της Ευρώπης

## 9.3 Συλλογή δεδομένων LCI – Σεναρίου 2

### **Από πειραματικά δεδομένα**

Τα δεδομένα για τη σύνθεση των εισροών και των εκροών των διεργασιών του Σεναρίου 2 συγκεντρώθηκαν για την απογραφή δεδομένων (LCI) από εργαστηριακή έρευνα που διεξήχθη στο εργαστήριο Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας στα πλαίσια του έργου DENOMINATE.

### **Από Λογισμικό**

Επιπλέον, λήφθηκε υπόψη η πιο δημοφιλής βάση δεδομένων Ecoinvent (*Ecoinvent 3-allocation, cut-off by classification-system*) του λογισμικού (<https://ecoinvent.org/>), καθώς επίσης και από βάσεις δεδομένων που εμπεριέχονται στο λογισμικό Ανάλυσης Κύκλου Ζωής SimaPro όπως την βασική βάση δεδομένων ELCD (*ELCD*). Συνεπώς, αναπτύχθηκε ένας αντιπροσωπευτικός κατάλογος δεδομένων προσαρμοσμένος για την Ελλάδα. Τέλος από τις βάσεις δεδομένων δεν παραλήφθηκε να επιλεγθεί και εκείνη η βάση δεδομένων Methods (*Methods*).

#### 9.3.1 LCI του FMSW condensate

Τα δεδομένα εισροής για την μοντελοποίηση του FMSW condensate στο λογισμικό SimaPro προήλθαν από τον χημικό χαρακτηρισμό του υγρού κλάσματος καθ' όλη την διάρκεια του κύκλου ξήρανσης, μέσω συλλογής ωριαίων δειγμάτων του συμπυκνώματος (FMSW condensate). Ακολούθησαν 4 σειρές μετρήσεων ξεχωριστά για τις 4 εποχές του χρόνου (Καλοκαίρι, Φθινόπωρο, Χειμώνα, Άνοιξη) από τις οποίες βρέθηκε ο Μέσος Όρος τους και έτσι εισήχθησαν στο λογισμικό. Παρακάτω παρατίθεται ο Πίνακας 19 με τις ποσότητες της εισροής σε mg ανά L.

Σημαντική παρατήρηση είναι πώς η εισαγωγή των δεδομένων καταγράφηκε σαν εκροή και πιο συγκεκριμένα σαν εκπομπή στο νερό. Η παρούσα διαδικασία δεν αποτελεί πρόβλημα στο σύστημα εφόσον κατά την κατασκευή της διεργασίας θα ανακληθεί στο λογισμικό ως εισροή.

Παρακάτω παρατίθεται ο Πίνακας 19 των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών του FMSW condensate.

Πίνακας 19: LCI του FMSW condensate

| <b>Εκροές</b>               |                           |  |
|-----------------------------|---------------------------|--|
| <b>Εκπομπές στο νερό</b>    | <b>Συγκέντρωση (mg/L)</b> | <b>Συγκέντρωση (<math>10^{-12}</math> Henry)</b> |
| COD, Chemical Oxygen Demand | 12827,36                  |  |
| TOC, Total Organic Carbon   | 3808,88                   |  |
| TN, Total Nitrogen          | 13,78                     |  |
| pH*                         |                           | 3,27   |
| Οξικό                       | 1123,88                   |  |
| Προπιονικό                  | 291,40                    |  |
| Ισο-βουτυρικό               | 61,67                     |  |
| Βουτυρικό οξύ               | 74,15                     |  |
| Ισο-βαλερικό                | 23,83                     |  |
| Βαλερικό οξύ**              | 19,20                     |  |
| Γαλακτικό οξύ               | 52,88                     |  |
| Αιθανόλη                    | 4006,56                   |  |

Η μοντελοποίηση του LCI του FMSW condensate πραγματοποιείται με τις ακόλουθες παραδοχές και υποδείξεις:

- Τα δεδομένα παρόλο που αναγράφονται στον Πίνακα 19 σε mg/L η λειτουργική μονάδα στο λογισμικό για το προϊόν ήταν τα 0,001 m<sup>3</sup>.
- Τα δεδομένα του FMSW condensate αντλήθηκαν από εργαστηριακές μετρήσεις.
- Όπου αναγράφεται το COD αναφέρεται το ολικό COD, η τιμή του διαλυτού COD ήταν 11593,48 mg/L.
- Όπου αναγράφεται το TOC και το TN, αναφέρεται το διαλυτό TOC και TN.



- Η συγκέντρωση του pH δεν αποτελεί εκροή για το λογισμικό SimaPro, ο λόγος που αναγράφεται στον παραπάνω Πίνακα είναι για την ολοκληρωμένη καταγραφή των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών του FMSW condensate (\*).
- Η συγκέντρωση του Βαλερικού οξέος δεν αποτελεί εκροή για το λογισμικό SimaPro εφόσον δεν υπάρχει βάση δεδομένων για το Βαλερικό οξύ σε εκείνο, ο λόγος που αναγράφεται στον παραπάνω Πίνακα είναι για την ολοκληρωμένη καταγραφή των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών του FMSW condensate (\*\*).
- Τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του FMSW condensate παρόλο που αποτελούν εισροή στο σύστημα εκφράζονται ως εκροή για το λογισμικό SimaPro διότι τα χαρακτηριστικά μιας υδάτινης ροής έχουν τις βάσεις δεδομένων τους στην κατηγορία των εκροών.

### 9.3.2 LCI του WAS

Τα δεδομένα εισροής για την μοντελοποίηση του WAS στο λογισμικό SimaPro προήλθαν από τον φυσικοχημικό χαρακτηρισμό της ενεργοποιημένης ιλύς (WAS), η οποία έχει προέλθει από τη Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων Λυκόβρυσης του νομού Αττικής.

Σημαντική παρατήρηση είναι πώς η εισαγωγή των δεδομένων καταγράφηκε σαν εκροή και πιο συγκεκριμένα σαν εκπομπή στο νερό. Η παρούσα διαδικασία δεν αποτελεί πρόβλημα στο σύστημα εφόσον κατά την κατασκευή της διεργασίας θα ανακληθεί στο λογισμικό ως εισροή.

Παρακάτω παρατίθεται ο Πίνακας 20 των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών της ενεργοποιημένης ιλύς (WAS).

Πίνακας 20: LCI του WAS

| <b>Εκροές</b>   | <b>Συγκέντρωση</b> | <b>Συγκέντρωση</b>              |
|---|--------------------|---------------------------------|
| <b>Εκπομπές</b>   | <b>(mg/L)</b>      | <b>(10<sup>-12</sup> Henry)</b> |
| <b>στο νερό</b>   |                    |                                 |
| COD,<br>Chemical<br>Oxygen<br>Demand                        | 32000              |                                 |
| TOC,<br>Total<br>Organic<br>Carbon                          | 8500               |                                 |
| TN,<br>Total<br>Nitrogen                                    | 1300               |                                 |
| Alkalinity,<br>Calcium<br>Carbonate<br>(CaCO <sub>3</sub> ) | 4000               |                                 |
| TSS,<br>Total<br>Suspended<br>Solids                        | 22000              |                                 |
| pH*   |                    | 6,8                             |

|                   |     |
|-------------------|-----|
| Οξικό             | 110 |
| Προπιονικό        | 75  |
| Ισο-<br>βουτυρικό | 21  |
| Βουτυρικό<br>οξύ  | 15  |
| Ισο-<br>βαλερικό  | 10  |
| Βαλερικό<br>οξύ** | 2   |
| Αιθανόλη          | 180 |

Η μοντελοποίηση του LCI του WAS πραγματοποιείται με τις ακόλουθες παραδοχές και υποδείξεις:

- Τα δεδομένα παρόλο που αναγράφονται στον Πίνακα 20 σε mg/L η λειτουργική μονάδα στο λογισμικό για το προϊόν ήταν τα 0,001 m<sup>3</sup>.
- Τα δεδομένα του WAS αντλήθηκαν από εργαστηριακές μετρήσεις.
- Όπου αναγράφεται το COD αναφέρεται το ολικό COD, η τιμή του διαλυτού COD ήταν 1500 mg/L.
- Όπου αναγράφεται το TOC και το TN, αναφέρεται το διαλυτό TOC και TN.
- Η συγκέντρωση του pH δεν αποτελεί εκροή για το λογισμικό SimaPro, ο λόγος που αναγράφεται στον παραπάνω Πίνακα είναι για την ολοκληρωμένη καταγραφή των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών του WAS (\*).
- Η συγκέντρωση του Βαλερικού οξέος δεν αποτελεί εκροή για το λογισμικό SimaPro εφόσον δεν υπάρχει βάση δεδομένων για το Βαλερικό οξύ σε εκείνο, ο λόγος που αναγράφεται στον παραπάνω Πίνακα είναι για την ολοκληρωμένη καταγραφή των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών του WAS (\*\*).
- Τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του WAS παρόλο που αποτελούν εισροή στο σύστημα εκφράζονται ως εκροή για το λογισμικό SimaPro διότι τα χαρακτηριστικά μιας υδάτινης ροής έχουν τις βάσεις δεδομένων τους στην κατηγορία των εκρών.

### 9.3.3 LCI του effluent (CSTR)

Τα δεδομένα εισροής για την μοντελοποίηση του effluent στο λογισμικό SimaPro προήλθαν από τον χημικό χαρακτηρισμό της εκροής του αντιδραστήρα συνεχούς ανάδευσης δεξαμενής (CSTR). Λόγω της επιρροής του υδραυλικού χρόνου παραμονής στην αναερόβια συν-χώνευση του μίγματος FMSW Condensate/WAS χρειάζεται να αναφερθεί πως τα ακόλουθα δεδομένα αφορούν τον υδραυλικό χρόνο παραμονής (HRT) των 15 ημερών (15d) ο οποίος αντιστοιχεί στην φάση 5 της πειραματικής αναφοράς για ογκομετρική αναλογία σε FMSW Condensate 67% όπου αποδείχθηκε και η βέλτιστη φάση.

Τα χαρακτηριστικά της εκροής που προέκυψαν παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 21.

Πίνακας 21: LCI του effluent (CSTR)

| Εκροές  |                    |                                 |
|---|--------------------|---------------------------------|
| Εκπομπές στο νερό                                 | Συγκέντρωση (mg/L) | Συγκέντρωση ( $10^{-12}$ Henry) |
| COD, Chemical Oxygen Demand                       | 5000               |                                 |
| TN, Total Nitrogen                                | 60                 |                                 |
| TSS, Total Suspended Solids                       | 7500               |                                 |
| Alkalinity, Calcium Carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ) | 1800               |                                 |
| pH*   |                    | 7,29                            |
| Οξικό   | 65                 |                                 |

Η μοντελοποίηση του LCI του effluent πραγματοποιείται με τις ακόλουθες παραδοχές και υποδείξεις:

- Τα δεδομένα παρόλο που αναγράφονται στον Πίνακα 21 σε mg/L η λειτουργική μονάδα στο λογισμικό για το προϊόν ήταν τα 0,001 m<sup>3</sup>.
- Τα δεδομένα του effluent αντλήθηκαν από εργαστηριακές μετρήσεις.
- Όπου αναγράφεται το COD αναφέρεται το ολικό COD, η τιμή του διαλυτού COD ήταν 140 mg/L.
- Η συγκέντρωση του pH δεν αποτελεί εκροή για το λογισμικό SimaPro, ο λόγος που αναγράφεται στον παραπάνω Πίνακα είναι για την ολοκληρωμένη καταγραφή των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών του effluent (\*).
- Τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του effluent παρόλο που αποτελούν εισροή στο σύστημα εκφράζονται ως εκροή για το λογισμικό SimaPro διότι τα χαρακτηριστικά μιας υδάτινης ροής έχουν τις βάσεις δεδομένων τους στην κατηγορία των εκρών.

#### 9.3.4 LCI του Σεναρίου 2

Στο λογισμικό SimaPro για την μοντελοποίηση του Σεναρίου 2 και την τελική αναπαράσταση σε διάγραμμα ροής υλικών και διαδικασιών εισάγονται τα δεδομένα όπως παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 22.

Πίνακας 22: LCI του Σεναρίου 2

| Εκροή Προϊόντων |                         |
|-----------------|-------------------------|
| Προϊόν          | Όγκος (m <sup>3</sup> ) |
| Βιοαέριο        | 179,8                   |

| <b>Εισροές Υλικών</b>   |                              |
|-------------------------|------------------------------|
| <b>Υλικά</b>            | <b>Όγκος (m<sup>3</sup>)</b> |
| WAS                     | 10                           |
| FMSW condensate         | 20                           |
| <b>Εισροή Μεταφοράς</b> |                              |
| <b>Μεταφορά</b>         | <b>Απόσταση (tkm)</b>        |
| Βυτιοφόρο               | 219,34                       |
| <b>Εισροή Ενέργειας</b> |                              |
| <b>Ενέργεια</b>         | <b>(kWh)</b>                 |
| Ηλεκτρική               | 6,16                         |
| <b>Εκροές Υλικών</b>    |                              |
| <b>Υλικά</b>            | <b>Όγκος (m<sup>3</sup>)</b> |
| Effluent                | 30                           |

### **Εισροές και Εκροές Υλικών**

Για τις εισροές και εκροές των υλικών οι τιμές έχουν υπολογιστεί βάσει ισοζυγίων μάζας και βάσει όγκου αντιδραστήρα PABR ενώ οι βάσεις δεδομένων τους δημιουργήθηκαν εκ νέου όπως αναφέρονται στην παρούσα ενότητα.

### **Ηλεκτρική Ενέργεια**

Η ηλεκτρική ενέργεια υπολογίζεται με την βοήθεια του λογισμικού ASPEN PLUS όπου η διεργασία προσομοιάστηκε με ένα δοχείο ίσου όγκου και παρεμφερούς υλικού κατασκευής με τον PABR, το οποίο τροφοδοτείται με παροχές παρόμοιες με αυτές της διεργασίας. Παρά όλα αυτά η συγκεκριμένη μελέτη αποσκοπεί σε έναν γενικότερο προσδιορισμό της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας και όχι στον ακριβή υπολογισμό της. Σχετικά με την βάση δεδομένων που επιλέχθηκε για τον χαρακτηρισμό της ενέργειας οι τύποι της ηλεκτρικής ενέργειας χωρίζονται σε τρεις κύριες κατηγορίες: Χαμηλής τάσης (1000 V), Μεσαίας τάσης (1kV-24kV) και Υψηλής τάσης (>24kV), η διεργασία του Σεναρίου 2 χρησιμοποιεί τριφασικό ρεύμα, επομένως θεωρείται ως σύστημα χαμηλής τάσης. Για αυτό και στο λογισμικό επιλέχθηκε η βάση δεδομένων *Electricity, low voltage {GR}*.

Σημείωση: Το {GR} αντιπροσωπεύει την γεωγραφική προέλευση των βάσεων δεδομένων συγκεκριμένων διεργασιών.

### **Μεταφορά**

Η μεταφορά αφορά την απόσταση την οποία θα διανύσει το βυτιοφόρο φορτωμένο με FMSW condensate όγκου 20 m<sup>3</sup> από το αμαξοστάσιο του Δήμου Χαλανδρίου στα Κ.Ε.Λ. Μεταμόρφωσης, απόστασης 11χλμ. Για την επιλογή της κατάλληλης μονάδας μέτρησης ισχύει ότι 1 μετρικός τόνος αντιστοιχεί σε 1000 kg. Το FMSW condensate έχει πυκνότητα ίση με 997 kg/m<sup>3</sup> και όγκο ίσο με 20 m<sup>3</sup>, επομένως για το βάρος αντιστοιχεί η τιμή των 19.940 kg, τιμή που ανήκει στο εύρος φορτίου 16-32 μετρικού τόνου σύμφωνα με τις κατηγορίες φορτίου του λογισμικού SimaPro. Για αυτό και στο λογισμικό επιλέχθηκε η βάση δεδομένων *Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro6 {RER}*.

Σημείωση: Το ακρωνύμιο του {RER} αντιπροσωπεύει τις βάσεις δεδομένων της Ευρώπης.

## ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ SimaPro - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

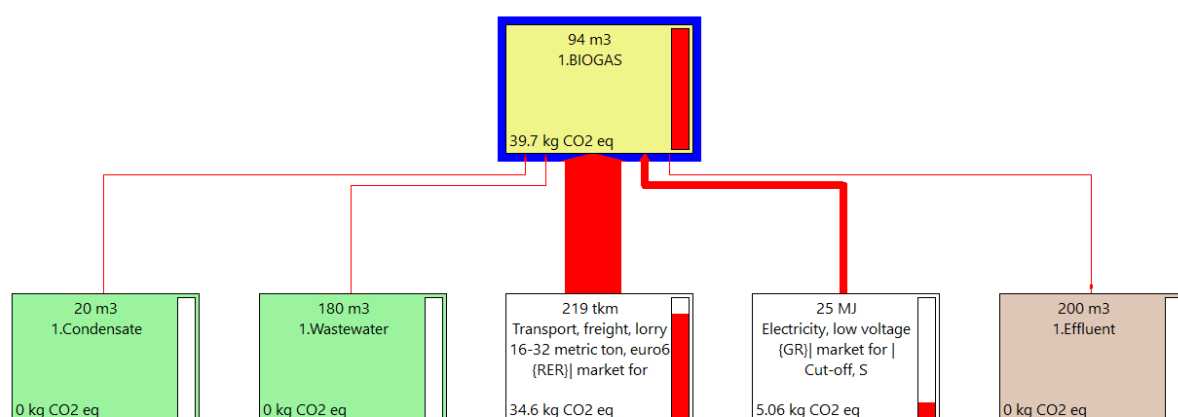
Στην παρούσα εργασία παρέχονται εμπειριστατωμένες περιβαλλοντικές επισκοπήσεις δύο βέλτιστων σεναρίων διαχείρισης υγρού κλάσματος το οποίο προέρχεται από ξήρανση οικιακών τροφικών υπολειμμάτων, καθώς και περιβαλλοντικές προκλήσεις οι οποίες προκύπτουν από τις διεργασίες των σεναρίων αυτών. Το **Σενάριο 1** αφορά την αναερόβια συγχώνευση των Αστικών Λυμάτων (MWW) και του Υγρού Κλάσματος (FMSW condensate) σε αναλογία 10%-90% αντίστοιχα σε αντιδραστήρα (PABR). Το **Σενάριο 2** αφορά την αναερόβια συν-χώνευση της Περίσσειας Ενεργού Ιλύος (WAS) και του Υγρού Κλάσματος (FMSW condensate) σε αναλογία 66,7%-33,3% σε αντιδραστήρα (CSTR).

### 10.1 Ανάλυση Σεναρίου 1: Αναερόβια Συγχώνευση Αστικών Λυμάτων και FMSW condensate

Το πρώτο Σενάριο που μελετήθηκε με την βοήθεια του λογισμικού SimaPro ήταν αυτό της απευθείας αναερόβιας συγχώνευσης αστικών λυμάτων και FMSW condensate σε ταχύρρυθμο αντιδραστήρα με ανακλαστήρες τύπου PABR με βασική ιδέα την ενίσχυση των αστικών λυμάτων ως προς την συγκέντρωση οργανικού φορτίου με στόχο την δημιουργία ενός κατάλληλου υποστρώματος για την αναερόβια διεργασία χώνευσης.

#### 10.1.1 Δέντρο Διεργασιών Σεναρίου 1

Στο Σχήμα 20 αποτυπώνεται το διάγραμμα ροής της διεργασίας αναερόβιας συγχώνευσης του Σεναρίου 1 για την καλύτερη κατανόηση και οπτικοποίηση του συστήματος και στο Σχήμα 23 αποτυπώνεται το διάγραμμα ροής υπολογισμών περιβαλλοντικών επιπτώσεων ή αλλιώς δέντρο διεργασιών του Σεναρίου 1, όπως διαμορφώνεται από το λογισμικό, έπειτα από αποκοπές για την παρουσίαση των σημαντικότερων διαδικασιών:



Σχήμα 21: Δέντρο διεργασιών SimaPro Σεναρίου 1

Τα αποτελέσματα των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που απεικονίζονται στο δέντρο των διεργασιών είναι σε μονάδες kg CO<sub>2</sub> eq εφόσον για την αναπαράσταση του επιλέχθηκε ο χαρακτηρισμός της υπερθέρμανση του πλανήτη (Characterization, Global warming). Από τα

αποτελέσματα της ανάλυσης παρατηρείται πως οι εισροές και οι εκροές της διεργασίας φέρουν μηδαμινό περιβαλλοντικό φορτίο (0 kg CO<sub>2</sub> eq) σε αντίθεση με το φορτίο της μεταφορά του FMSW condensate το οποίο όπως φαίνεται και από το Σχήμα 23 φέρει το μεγαλύτερο φορτίο (34,6 kg CO<sub>2</sub> eq). Σχετικά με την ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται για την λειτουργία του αντιδραστήρα εκείνη εκδηλώνει μια επίδραση προς το περιβάλλον αλλά συγκριτικά με εκείνη της μεταφοράς είναι περίπου 7 φορές μικρότερη (5,06 kg CO<sub>2</sub> eq).

#### 10.1.2 Αξιολόγηση επιπτώσεων Σεναρίου 1

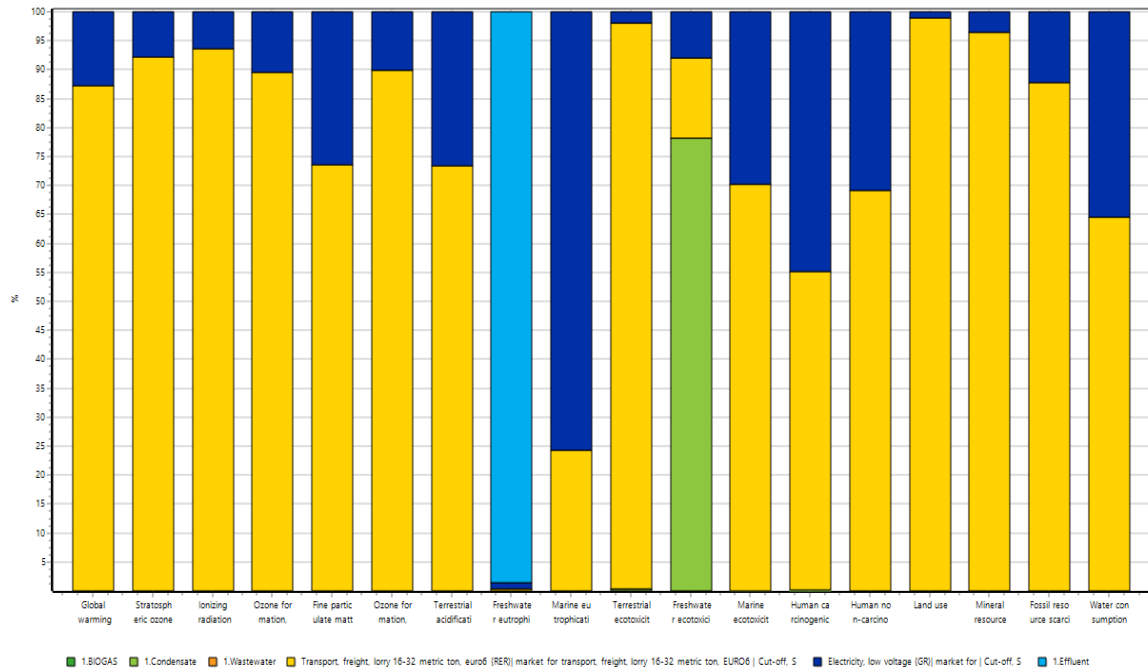
Τα αποτελέσματα της LCIA για τα εξεταζόμενα δομικά στοιχεία παρουσιάζονται στο ακόλουθο Διάγραμμα ως διάγραμμα 100% για όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων της μεθόδου.

Στο παρακάτω Διάγραμμα 3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της LCIA για το Σενάριο 1: Αναερόβια Συγχώνευση Αστικών Λυμάτων και FMSW condensate. Σύμφωνα με την ανάλυση των περιβαλλοντικών εστιών επιβάρυνσης (Environmental hotspot analysis), η μεταφορά της εισροής του FMSW condensate για την έναρξη της αναερόβιας συγχώνευσης του Σεναρίου 1 αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο μερίδιο επιβάρυνσης για τις περισσότερες από τις κατηγορίες επιπτώσεων που εξετάζονται. Πιο συγκεκριμένα το ποσοστό % στις 15 από τις 18 κατηγορίες επιπτώσεων που συμβάλλει η μεταφορά κυμαίνεται σε ποσοστά άνω των 50% ενώ φτάνει μέχρι και 98,9%, ποσοστό που αντιστοιχεί στην κατηγορία επίπτωσης “Χρήση γης”.

Όσον αφορά την ηλεκτρική ενέργεια παρατηρείται πως η παρουσία της συμβολή είναι ορατή και στις 18 κατηγορίες επιπτώσεων με τον “Θαλάσσιο ευτροφισμό” να υπερτερεί με ποσοστό 75,7%, ενώ στις υπόλοιπες 17 παρατηρείται ποσοστό συνεισφοράς εύρους 1,15%-44,9%.

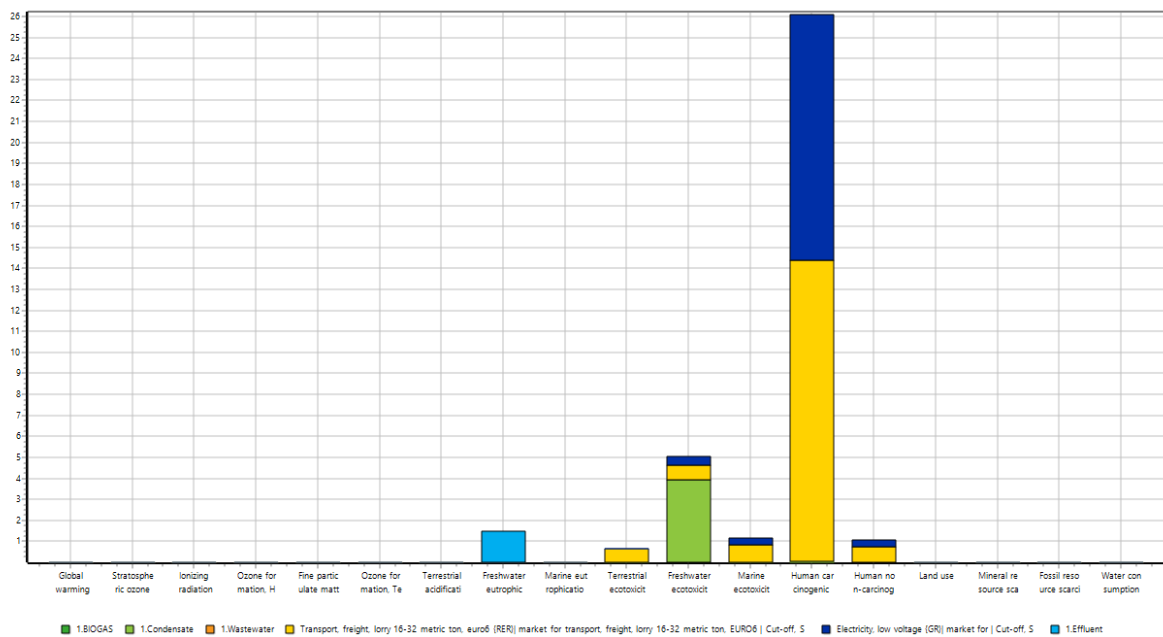
Σχετικά με την “Υπερθέρμανση του πλανήτη”, μια κατηγορία επιπτώσεων όντας από τις πιο σημαντικές που απασχολεί τις περισσότερες αναλύσεις κύκλου ζωής, οι συντελεστές που συμβάλλουν για την επιβάρυνση της είναι ο συντελεστής της μεταφοράς σε ποσοστό 87,3% και αυτός της ηλεκτρική ενέργεια με 12,7% συμβολή. Άλλη μια κατηγορία επιπτώσεων την οποία οι ρύποι που παράγονται από την μεταφορά αυξάνουν το αντίκτυπο των βλαβών της, ενώ στο Σχήμα 20 εμφανίζονται και οι τιμές τους.

Το MWW, το Biogas, το Effluent και το FMSW condensate δεν παρουσιάζουν σημαντική συνεισφορά (η οποία μπορεί να θεωρηθεί και αμελητέα) στις περισσότερες από τις κατηγορίες επιπτώσεων που αξιολογήθηκαν, με μοναδική εξαίρεση για το Effluent και το FMSW condensate που στις κατηγορίες “Ευτροφισμός των γλυκών υδάτων” και “Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων” αντίστοιχα έχουν μεγάλο ποσοστό επιβλαβής επίδρασης σε ποσοστά 98,5% και 78,1% ακολούθως.



Διάγραμμα 3: Characterization - Αποτελέσματα της LCIA για το Σενάριο 1

Η ένταξη της κανονικοποίησης (Normalization) στην παρούσα μελέτη εντάσσεται συμπληρωματικά ώστε να μπορέσουν να επισημανθούν πιο σημαντικές κατηγορίες επιπτώσεων που επιβαρύνονται από την διεργασία του Σεναρίου 1, οι οποίες δεν διακρίνονται από το ποσοστό συμβολής των κατηγοριών. Μετά την κανονικοποίηση οι δείκτες κατηγορίας επιπτώσεων έχουν όλοι την ίδια μονάδα, έτσι διευκολύνεται η αναμεταξύ τους σύγκριση.



Διάγραμμα 4: Normalization - Αποτελέσματα της LCIA για το Σενάριο 1

Από Διάγραμμα 4 παρατηρείται πως οι κατηγορίες επιπτώσεων που επηρεάζονται περισσότερο με σειρά σημαντικότητας είναι οι εξής:

- Ανθρώπινη καρκινογόνος τοξικότητα
- Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων
- Ευτροφισμός των γλυκών υδάτων
- Θαλάσσια οικοτοξικότητα
- Ανθρώπινη μη-καρκινογόνος τοξικότητα
- Χερσαία οικοτοξικότητα

Στα Παραρτήματα A-Z παρουσιάζονται οι πραγματικές τιμές χωρίς κανονικοποίηση των τιμών των αποτελέσματα των κατηγοριών επιπτώσεων που είναι και οι κυριότερες όπως μπορεί να φανεί από το Διάγραμμα 4. Από τα αποτελέσματα των Διαγραμμάτων του characterization, του Normalization καθώς και τις τιμές Παραρτήματα A-Z είναι φανερό πως όπως αναφέρθηκε και παραπάνω ένα ποσοστό επίδρασης δεν είναι από μόνο του αντιπροσωπευτικό. Η απόδειξη φαίνεται από την σύγκριση των Παραρτημάτων A και Z όπου οι τιμές του A φαίνονται μικρότερες από εκείνες του Z αλλά παρ' όλα αυτά φέρει και τις σημαντικότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

### **Μεταφορά (Transportation)**

Από τα αποτελέσματα της κανονικοποίησης η κατηγορία που επρόκειτο να πληγεί περισσότερο από την μεταφορά του FMSW condensate από το αμαξοστάσιο του Δήμου Χαλανδρίου μέχρι τα Κ.Ε.Λ. Λυκόβρυσης είναι εκείνη της “Ανθρώπινης καρκινογόνου τοξικότητας”. Μια πιθανή εξήγηση για την εν λόγω επιβάρυνση από την μεταφορά είναι το γεγονός πως οι ρύποι που εκπέμπονται από την μεταφορά μπορούν να επηρεάσουν την ανθρώπινη υγεία. Το σύνολο των δεδομένων της μεταφοράς αντιπροσωπεύει την υπηρεσία μεταφοράς εμπορευμάτων 1tkm με φορτηγό της κατηγορίας μεγέθους 16-32 μετρικών τόνων μικτού βάρους οχήματος (GVW) και της κατηγορίας εκπομπών EURO6, ενώ σχετικά με τους ρύπους που φέρει ένα EURO6, όπου επιλέχθηκε για την ανάλυση της διεργασίας, καταγράφονται οι εξής: οξείδια του αζώτου, οξείδιο του αζώτου, μεθάνιο, υδρογονάνθρακες μη μεθανίου, αμμωνία, βενζόλιο και μόλυβδος. Έτσι οι χημικές ουσίες αυτές εκτός ότι εισπνέονται καθημερινά από τον άνθρωπο είναι πιθανό να συσσωρευτούν στην ανθρώπινη αλυσίδα και έστω και έμμεσα να εισχωρήσουν στον ανθρώπινο οργανισμό, ενώ η ίδια εξήγηση μπορεί να δοθεί και για την κατηγορία της “Ανθρώπινης μη-καρκινογόνου τοξικότητας”

Σχετικά με τις κατηγορίες “Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων”, “Θαλάσσια οικοτοξικότητα” και “Χερσαία οικοτοξικότητα” παρατηρείται ότι αναφέρονται και οι τρεις στην οικοτοξικότητα. Ακόμα τα σύνολα δεδομένων του λογισμικού για τις μεταφορές αναφέρονται σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής των μεταφορών, ο οποίος σημαίνει κατασκευή, λειτουργία, συντήρηση και το τέλος του κύκλου ζωής των οχημάτων και των οδικών υποδομών. Έτσι εφόσον η μεταφορά αφορά ολόκληρο τον κύκλο ζωής η επιβάρυνση από την μεταφορά μπορεί να ερμηνευτεί από το γεγονός ότι η οικοτοξικότητα αποτελεί μια από τις επικίνδυνες ιδιότητες των αποβλήτων και συγκεκριμένα για τα απόβλητα που προκύπτουν από την επεξεργασία ορυκτών που περιέχουν μέταλλα, όπου η επεξεργασία ορυκτών είναι κομμάτι της.

Τέλος να σημειωθεί πως η βάση δεδομένων της μεταφορά στο λογισμικό SimaPro περιλαμβάνει τις μέσες απαιτήσεις μεταφοράς για το συγκεκριμένο προϊόν εντός της εν λόγω γεωγραφίας, καθώς και εισροές του ίδιου του προϊόντος για την κάλυψη τυχόν απωλειών στο εμπόριο και τις μεταφορές.



## Ηλεκτρική ενέργεια (Electricity)

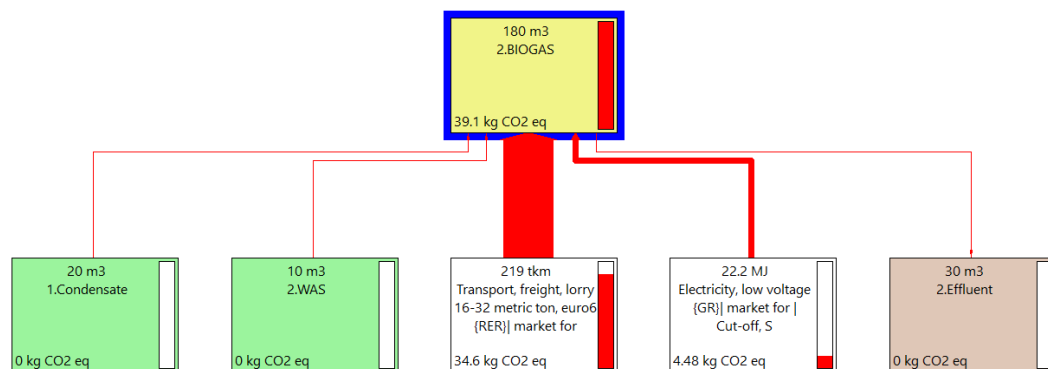
Η επιβάρυνση των κατηγοριών επιπτώσεων από την ηλεκτρική ενέργεια είναι το γεγονός πως η Ελλάδα ακόμα έχει σε μεγάλο ποσοστό διεργασίες οι οποίες λειτουργούν με βάση την βενζίνη, σε σύγκριση με άλλες χώρες. Για τον λόγο αυτό μέχρι να μειωθούν οι διεργασίες με βάση την βενζίνη (petrol based processes) οι αναλύσεις κύκλου ζωής θα έχουν στα αποτελέσματα τους το περιβαλλοντικό αντίκτυπο της ενέργειας.

### 10.2 Ανάλυση Σεναρίου 2: Αναερόβια συγχώνευση Περίσσειας Ενεργού Ιλύος και FMSW condensate

Το δεύτερο Σενάριο που μελετήθηκε με την βοήθεια του λογισμικού SimaPro ήταν αυτό της ένταξης του FMSW condensate στο υφιστάμενο διαχειριστικό μοντέλο των αστικών λυμάτων και πιο συγκεκριμένα με συνδιαχείριση περίσσειας ενεργού ιλύος σε αντιδραστήρα συνεχούς ανάδευσης δεξαμενής (CSTR) με βασική ιδέα την εισαγωγή του FMSW condensate έμμεσα στο υφιστάμενο διαχειριστικό πλάνο μέσω της συγχώνευσης του με την περίσσεια ενεργού ιλύος.

#### 10.2.1 Δέντρο Διεργασιών Σεναρίου 2

Στο Σχήμα 21 αποτυπώνεται το διάγραμμα ροής της διεργασίας αναερόβιας συγχώνευσης του Σεναρίου 2 για την καλύτερη κατανόηση και οπτικοποίηση του συστήματος και στο Σχήμα 24 αποτυπώνεται το διάγραμμα ροής υπολογισμών περιβαλλοντικών επιπτώσεων ή αλλιώς δέντρο διεργασιών του Σεναρίου 2, όπως διαμορφώνεται από το λογισμικό, έπειτα από αποκοπές για την παρουσίαση των σημαντικότερων διαδικασιών:



Σχήμα 22: Δέντρο διεργασιών SimaPro Σεναρίου 2

Τα αποτελέσματα των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που απεικονίζονται στο δέντρο των διεργασιών είναι σε μονάδες kg CO<sub>2</sub> eq εφόσον για την αναπαράσταση του επιλέχθηκε ο χαρακτηρισμός της υπερθέρμανση του πλανήτη (Characterization, Global warming). Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρατηρείται πως οι εισροές και οι εκροές της διεργασίας φέρουν μηδαμινό περιβαλλοντικό φορτίο (0 kg CO<sub>2</sub> eq) σε αντίθεση με το φορτίο της μεταφοράς του FMSW condensate το οποίο όπως φαίνεται και από το Σχήμα 24 φέρει το μεγαλύτερο φορτίο (34,6 kg CO<sub>2</sub> eq). Σχετικά με την ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται για την λειτουργία του αντιδραστήρα εκείνη εκδηλώνει μια επίδραση προς το περιβάλλον αλλά συγκριτικά με εκείνη της μεταφοράς είναι περίπου 7 φορές μικρότερη (4,48 kg CO<sub>2</sub> eq).

### 10.2.2 Αξιολόγηση επιπτώσεων Σεναρίου 2

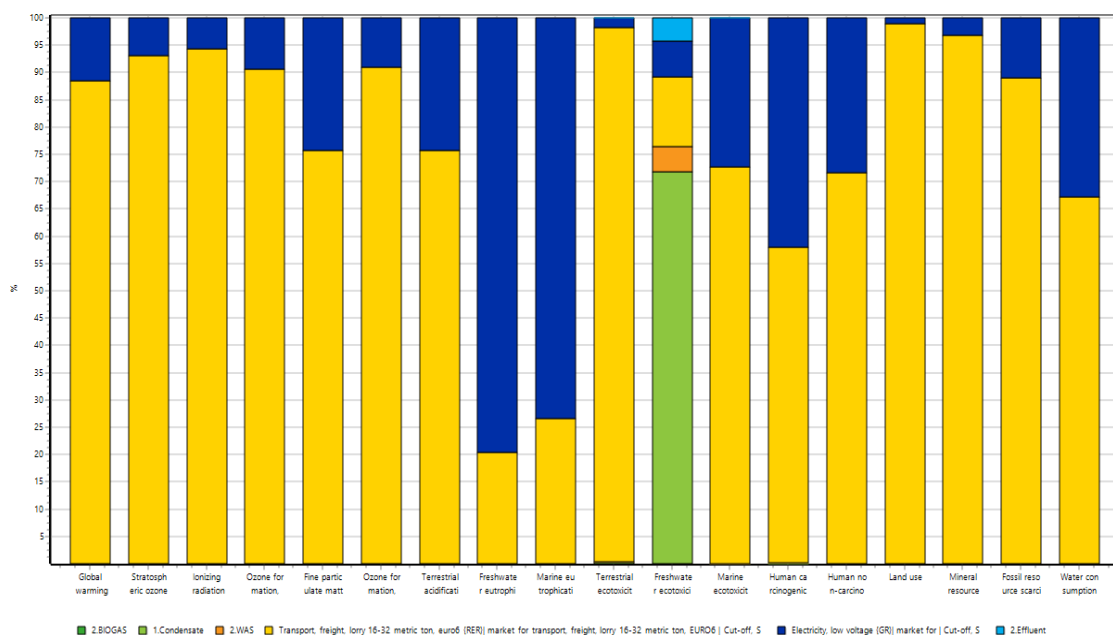
Τα αποτελέσματα της LCIA για τα εξεταζόμενα δομικά στοιχεία παρουσιάζονται στο ακόλουθο Διάγραμμα 5 ως διάγραμμα 100% για όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων της μεθόδου.

Στο παρακάτω Διάγραμμα 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της LCIA για το Σενάριο 2: Αναερόβια Συγχώνευση Περίσσειας Ενεργού Ιλύος και FMSW condensate. Σύμφωνα με την ανάλυση των περιβαλλοντικών εστιών επιβάρυνσης (Environmental hotspot analysis), η μεταφορά της εισροής του FMSW condensate για την έναρξη της αναερόβιας συγχώνευσης του Σεναρίου 2 αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο μερίδιο επιβάρυνσης για τις περισσότερες από τις κατηγορίες επιπτώσεων που εξετάζονται. Πιο συγκεκριμένα το ποσοστό % στις 15 από τις 18 κατηγορίες επιπτώσεων που συμβάλλει η μεταφορά κυμαίνεται σε ποσοστά άνω των 50% ενώ φτάνει μέχρι και 99%, ποσοστό που αντιστοιχεί στην κατηγορία επίπτωσης “Χρήση γης”.

Όσον αφορά την ηλεκτρική ενέργεια παρατηρείται πως η παρουσία της συμβολή είναι ορατή και στις 18 κατηγορίες επιπτώσεων με τον “Ευτροφισμός των γλυκών υδάτων” και τον “Θαλάσσιο ευτροφισμό” να υπερτερούν με ποσοστά 79,5% και 73,4% αντίστοιχα, ενώ στις υπόλοιπες 16 παρατηρείται ποσοστό συνεισφοράς εύρους 1,02%-32,8%.

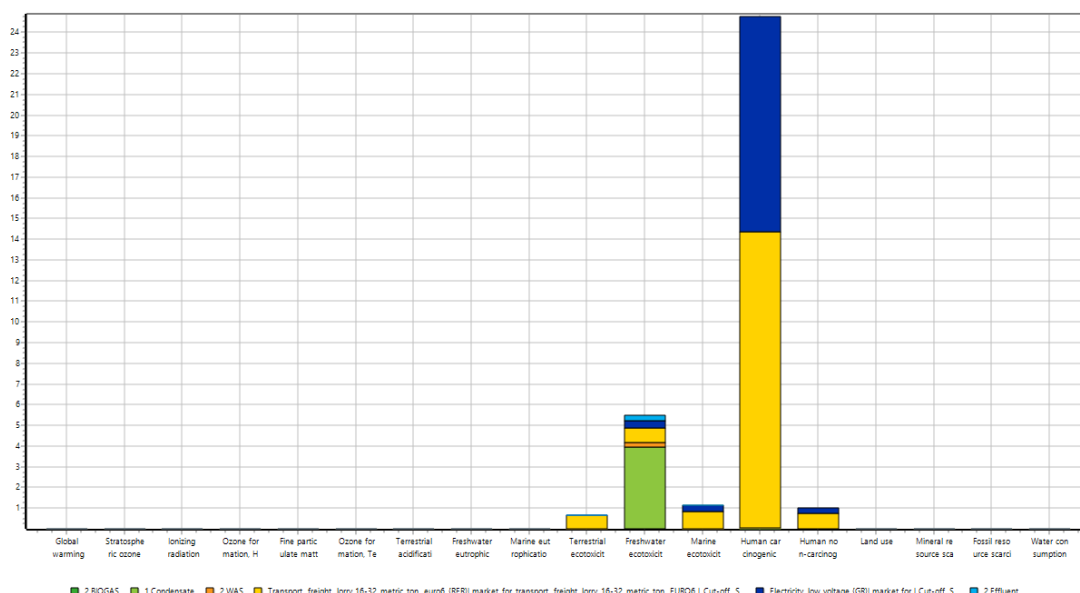
Σχετικά με την “Υπερθέρμανση του πλανήτη”, μια κατηγορία επιπτώσεων όντας από τις πιο σημαντικές που απασχολεί τις περισσότερες αναλύσεις κύκλου ζωής, οι συντελεστές που συμβάλλουν για την επιβάρυνση της είναι ο συντελεστής της μεταφοράς σε ποσοστό 88,5% και αυτός της ηλεκτρική ενέργεια με 11,5% συμβολή. Άλλη μια κατηγορία επιπτώσεων την οποία οι ρύποι που παράγονται από την μεταφορά αυξάνουν το αντίκτυπο των βλαβών της, ενώ στο Σχήμα 21 παρουσιάζονται και οι τιμές τους.

Το WAS, το Biogas, το Effluent και το FMSW condensate δεν παρουσιάζουν σημαντική συνεισφορά στις περισσότερες από τις κατηγορίες επιπτώσεων που αξιολογήθηκαν, με μοναδική εξαίρεση την κατηγορία “Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων” όπου παρατηρείται συμβολή WAS, Effluent και FMSW condensate σε ποσοστά επιβλαβής επίδρασης 4,55%, 4,31% και 71,9% αντίστοιχως.



Διάγραμμα 5: Characterization - Αποτελέσματα της LCIA για το Σενάριο 2

Η ένταξη της κανονικοποίησης (Normalization) στην παρούσα μελέτη εντάσσει συμπληρωματικά ώστε να μπορέσουν να επισημανθούν πιο σημαντικές κατηγορίες επιπτώσεων που επιβαρύνονται από την διεργασία του Σεναρίου 2, οι οποίες δεν διακρίνονται από το ποσοστό συμβολής των κατηγοριών. Μετά την κανονικοποίησης οι δείκτες κατηγορίας επιπτώσεων έχουν όλοι την ίδια μονάδα, έτσι διευκολύνεται η αναμεταξύ τους σύγκριση.



Διάγραμμα 6: Normalization - Αποτελέσματα της LCIA για το Σενάριο 2

Από το Διάγραμμα 6 παρατηρείται πως οι κατηγορίες επιπτώσεων που επηρεάζονται περισσότερο με σειρά σημαντικότητας είναι οι εξής:

- Ανθρώπινη καρκινογόνος τοξικότητα
- Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων
- Θαλάσσια οικοτοξικότητα
- Ανθρώπινη μη-καρκινογόνος τοξικότητα
- Χερσαία οικοτοξικότητα

Στα Παραρτήματα Η-Λ παρουσιάζονται οι πραγματικές τιμές χωρίς κανονικοποίηση των τιμών των αποτελέσματα των κατηγοριών επιπτώσεων που είναι και οι κυριότερες όπως μπορεί να φανεί από το Διάγραμμα 6. Από τα αποτελέσματα των Διαγραμμάτων του characterization, του Normalization καθώς και τις τιμές Παραρτήματα Η-Λ είναι φανερό πως όπως αναφέρθηκε και παραπάνω ένα ποσοστό επίδρασης δεν είναι από μόνο του αντιπροσωπευτικό. Η απόδειξη φαίνεται από την σύγκριση των Παραρτημάτων Η-Λ όπου οι τιμές του Η φαίνονται μικρότερες από εκείνες του Λ αλλά παρ' όλα αυτά φέρει και τις σημαντικότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

### Μεταφορά (Transportation)

Από τα αποτελέσματα της κανονικοποίησης η κατηγορία που επρόκειτο να πληγεί περισσότερο από την μεταφορά του FMSW condensate από το αμαξοστάσιο του Δήμου Χαλανδρίου μέχρι τα Κ.Ε.Λ. Λυκόβρυσης είναι εκείνη της "Ανθρώπινης καρκινογόνου τοξικότητας". Μια πιθανή εξήγηση για την εν λόγω επιβάρυνση από την μεταφορά είναι το

γεγονός πως οι ρύποι που εκπέμπονται από την μεταφορά μπορούν να επηρεάσουν την ανθρώπινη υγεία. Το σύνολο των δεδομένων της μεταφοράς αντιπροσωπεύει την υπηρεσία μεταφοράς εμπορευμάτων 1tkm με φορτηγό της κατηγορίας μεγέθους 16-32 μετρικών τόνων μικτού βάρους οχήματος (GVW) και της κατηγορίας εκπομπών EURO6, ενώ σχετικά με τους ρύπους που φέρει ένα EURO6, όπου επιλέχθηκε για την ανάλυση της διεργασίας, καταγράφονται οι εξής: οξειδία του αζώτου, οξείδιο του αζώτου, μεθάνιο, υδρογονάνθρακες μη μεθανίου, αμμωνία, βενζόλιο και μόλυβδος. Έτσι οι χημικές ουσίες αυτές εκτός ότι εισπνέονται καθημερινά από τον άνθρωπο είναι πιθανό να συσσωρευτούνε στην ανθρώπινη αλυσίδα και έστω και έμμεσα να εισχωρήσουνε στον ανθρώπινο οργανισμό, ενώ η ίδια εξήγηση μπορεί να δοθεί και για την κατηγορία της “Ανθρώπινης μη-καρκινογόνου τοξικότητας”

Σχετικά με τις κατηγορίες “Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων”, “Θαλάσσια οικοτοξικότητα” και “Χερσαία οικοτοξικότητα” παρατηρείται ότι αναφέρονται και οι τρεις στην οικοτοξικότητα. Ακόμα τα σύνολα δεδομένων του λογισμικού για τις μεταφορές αναφέρονται σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής των μεταφορών, ο οποίος σημαίνει κατασκευή, λειτουργία, συντήρηση και το τέλος του κύκλου ζωής των οχημάτων και των οδικών υποδομών. Έτσι εφόσον η μεταφορά αφορά ολόκληρο τον κύκλο ζωής η επιβάρυνση από την μεταφορά μπορεί να ερμηνευτεί από το γεγονός ότι η οικοτοξικότητα αποτελεί μια από τις επικίνδυνες ιδιότητες των αποβλήτων και συγκεκριμένα για τα απόβλητα που προκύπτουν από την επεξεργασία ορυκτών που περιέχουν βαρέα μέταλλα, όπου η επεξεργασία ορυκτών είναι κομμάτι της.

Τέλος να σημειωθεί πως η βάση δεδομένων της μεταφορά στο λογισμικό SimaPro περιλαμβάνει τις μέσες απαιτήσεις μεταφοράς για το συγκεκριμένο προϊόν εντός της εν λόγω γεωγραφίας, καθώς και εισροές του ίδιου του προϊόντος για την κάλυψη τυχόν απωλειών στο εμπόριο και τις μεταφορές.

### **Ηλεκτρική ενέργεια (Electricity)**

Η επιβάρυνση των κατηγοριών επιπτώσεων από την ηλεκτρική ενέργεια οφείλεται στο γεγονός πως η Ελλάδα ακόμα έχει ακόμα σε μεγάλο ποσοστό διεργασίες οι οποίες λειτουργούν με βάση την βενζίνη, σε σύγκριση με άλλες χώρες. Για τον λόγο αυτό μέχρι να μειωθούν οι διεργασίες με βάση την βενζίνη (petrol based processes) οι αναλύσεις κύκλου ζωής θα έχουνε στα αποτελέσματα τους το περιβαλλοντικό αντίκτυπο της ενέργειας.

## **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Στην παρούσα ανάλυση κύκλου ζωής μελετήθηκαν δύο κύρια σενάρια:

Το **πρώτο** διαχειριστικό σενάριο προτείνει την απευθείας αναερόβια συν-χώνευση FMSW condensate και Αστικών Λυμάτων σε έναν ταχύρρυθμο αντιδραστήρα με ανακλαστήρες τύπου PABR (Periodic Anaerobic Baffled Reactor). Το συγκεκριμένο διαχειριστικό σενάριο βασίζεται στην ιδέα της ενίσχυσης των αστικών λυμάτων ως προς την συγκέντρωση οργανικού φορτίου με σκοπό της δημιουργίας ενός κατάλληλου υποστρώματος για την διεργασία της αναερόβιας χώνευσης.

Ενώ το **δεύτερο** διαχειριστικό σενάριο που προτείνεται στοχεύει στην ένταξη του FMSW condensate στο υφιστάμενο διαχειριστικό μοντέλο των αστικών λυμάτων.

Ως λειτουργική μονάδα λαμβάνεται η παραγωγή υγρού κλάσματος (condensate) της ξήρανσης/τεμαχισμού των τροφικών υπολειμμάτων η οποία είναι 0,2 L ανά μέρα ανά κάτοικο. Η εφαρμογή της μελέτης έγινε για 100.000 κατοίκους η παραγωγή του υγρού κλάσματος και ανέρχεται στα 20 m<sup>3</sup> ανά μέρα ανά 100.000 κατοίκους. Ως χώρος επεξεργασίας της συνδιαχείρισης των δύο ρευμάτων λαμβάνεται το Κ.Ε.Λ. Μεταμόρφωσης,

μέσης απόστασης 11 χλμ. από το αμαξοστάσιο του Δήμου Χαλανδρίου (100000 κατοίκων) στο οποίο και λαμβάνει χώρα η διεργασία της ξήρανσης των ζυμώσιμων τροφικών αποβλήτων.

### 11.1 Συμπεράσματα Σεναρίου 1

Κύρια συμπεράσματα από την ανάλυση κύκλου ζωής των δύο σεναρίων, με σειρά σημαντικότητας είναι:

α) Η ανθρώπινη καρκινογόνος τοξικότητα (Human carcinogenic toxicity), επηρεάζεται από τη μεταφορά του condensate και την ενέργεια που καταναλώνεται για την διεργασία.

β) Η οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (Freshwater ecotoxicity), από το Condensate κυρίως λόγω της υψηλής οργανικής φόρτισης.

γ) Ο ευτροφισμός των γλυκών υδάτων (Freshwater eutrophication), από Effluent (εκροή του PABR), άρα και την περεταίρω επεξεργασία του χωνεμένου υπολείμματος.

δ) Η θαλάσσια οικοτοξικότητα (Marine ecotoxicity), επηρεάζεται από την μεταφορά του condensate και την ενέργεια που καταναλώνεται στην διεργασία.

ε) Η ανθρώπινη μη-καρκινογόνος τοξικότητα (Human non-carcinogenic toxicity), επηρεάζεται επίσης από την μεταφορά του condensate στα ΚΕΛ και την ενέργεια που καταναλώνεται στην διεργασία.

ζ) ενώ η χερσαία οικοτοξικότητα (Terrestrial ecotoxicity) επηρεάζεται επίσης από την μεταφορά του condensate.

### 11.2 Συμπεράσματα Σεναρίου 2

Κύρια συμπεράσματα από την ανάλυση κύκλου ζωής για το Σενάριο 2, με σειρά σημαντικότητας είναι:

α) Η ανθρώπινη καρκινογόνος τοξικότητα (Human carcinogenic toxicity), επηρεάζεται από μεταφορά του condensate και την ενέργεια που καταναλώνεται στην διεργασία.

β) Η οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (Freshwater ecotoxicity), από το condensate κυρίως αλλά και από WAS, μεταφορά και ενέργεια.

γ) Η θαλάσσια οικοτοξικότητα (Marine ecotoxicity), επηρεάζεται από τη μεταφορά του condensate και την ενέργεια που καταναλώνεται στην διεργασία.

δ) Η ανθρώπινη μη-καρκινογόνος τοξικότητα (Human non-carcinogenic toxicity), επηρεάζεται από τη μεταφορά του condensate και την ενέργεια που καταναλώνεται στην διεργασία.

ε) Η χερσαία οικοτοξικότητα (Terrestrial ecotoxicity), από την μεταφορά του condensate.

### 11.3 Προτάσεις βελτίωσης αποδοτικότητας

Με βάση τα παραπάνω τα κύρια συμπεράσματα που απορρέουν είναι η ανάγκη για επεξεργασία του condensate, η επίπτωση λόγω της μεταφοράς του από το Δήμο στο ΚΕΛ (αυτό θα μπορούσε να μειωθεί αν η εγκατάσταση γινόταν στο Δήμο και όχι στα ΚΕΛ). Η ενέργεια που καταναλώνεται στις δύο διεργασίες καθώς και η εκροή του PABR και η ανάγκη περαιτέρω επεξεργασίας με σκοπό την επίτευξη των περιβαλλοντικών ορίων ασφαλούς απόρριψης στο περιβάλλον.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Algapani, D. E., Qiao, W., di Pumpo, F., Bianchi, D., Wandera, S. M., Adani, F., & Dong, R. (2018). Long-term bio-H<sub>2</sub> and bio-CH<sub>4</sub> production from food waste in a continuous two-stage system: Energy efficiency and conversion pathways. *Bioresource Technology*, 248, 204–213. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2017.05.164>
- Allen, E., Browne, J. D., & Murphy, J. D. (2013). Evaluation of the biomethane yield from anaerobic co-digestion of nitrogenous substrates. *https://Doi.Org/10.1080/09593330.2013.806564*, 34(13–14), 2059–2068. <https://doi.org/10.1080/09593330.2013.806564>
- Chan, Y. J., Chong, M. F., Law, C. L., & Hassell, D. G. (2009a). A review on anaerobic-aerobic treatment of industrial and municipal wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 155(1–2), 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.06.041>
- Chan, Y. J., Chong, M. F., Law, C. L., & Hassell, D. G. (2009b). A review on anaerobic–aerobic treatment of industrial and municipal wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 155(1–2), 1–18. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2009.06.041>
- Curran, M. A. (2006). *US EPA Life Cycle Assessment: Principles and Practice*.
- Defra. (2013). *Advanced Thermal Treatment of Municipal Solid Waste*. [www.defra.gov.uk](http://www.defra.gov.uk)<http://www.defra.gov.uk/publications/>
- Drexler, I. L. C., Prieto, A. L., & Yeh, D. (2014). Wastewater Constituents. *Comprehensive Water Quality and Purification*, 7–29. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382182-9.00043-8>
- Ersahin, M. E., Ozgun, H., Dereli, R. K., Ozturk, I., Ersahin, M. E., Ozgun, H., Dereli, R. K., & Ozturk, I. (2011). Anaerobic Treatment of Industrial Effluents: An Overview of Applications. *Waste Water - Treatment and Reutilization*. <https://doi.org/10.5772/16032>
- European Environment Agency. (n.d.). *Municipal waste management across European countries*.
- Heijungs, R., Huppel, G., & Guinée, J. B. (2010). Life cycle assessment and sustainability analysis of products, materials and technologies. Toward a scientific framework for sustainability life cycle analysis. *Polymer Degradation and Stability*, 95(3), 422–428. <https://doi.org/10.1016/J.POLYMDEGRADSTAB.2009.11.010>
- Huijbregts, M. A. J., Hellweg, S., Frischknecht, R., Hungerbühler, K., & Hendriks, A. J. (2008). Ecological footprint accounting in the life cycle assessment of products. *Ecological Economics*, 64(4), 798–807. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLECON.2007.04.017>
- ILCD-Handbook-General-guide-for-LCA-DETAILED-GUIDANCE-12March2010-ISBN-fin-v1.0-EN*. (n.d.).
- Life cycle-based standards and guidelines - PRé Sustainability*. (n.d.). Retrieved 2 August 2023, from <https://pre-sustainability.com/articles/lca-standards-and-guidelines/>

- Liu, G., Xu, X., Zhu, L., Xing, S., & Chen, J. (2013). Biological nutrient removal in a continuous anaerobic–aerobic–anoxic process treating synthetic domestic wastewater. *Chemical Engineering Journal*, *225*, 223–229. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2013.01.098>
- Liu, S., Daigger, G. T., Liu, B., Zhao, W., & Liu, J. (2020). Enhanced performance of simultaneous carbon, nitrogen and phosphorus removal from municipal wastewater in an anaerobic-aerobic-anoxic sequencing batch reactor (AOA-SBR) system by alternating the cycle times. *Bioresource Technology*, *301*, 122750. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2020.122750>
- Lyberatos, G., & Vagenas, D. (2016). Διαχείριση ιλύος. *Wastewater Treatment*, 315–323. <https://www.politeianet.gr/books/9789604183463-lumperatos-gerasimos-tziolas-diacheirisi-ugron-apobliton-279326>
- Lytras, G., Koutroumanou, E., & Lyberatos, G. (2020). Anaerobic co-digestion of condensate produced from drying of Household Food Waste and Waste Activated Sludge. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *8*(4), 103947. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2020.103947>
- Managing municipal solid waste - a review of achievements in 32 European countries.* (n.d.). <https://doi.org/10.2800/71424>
- Mathioudakis, D., Michalopoulos, I., Kalogeropoulos, K., Papadopoulou, K., & Lyberatos, G. (2021). Anaerobic digestion of dried/shredded food waste in a periodic anaerobic baffled reactor. *Water Science and Technology*, *84*(2), 420–430. <https://doi.org/10.2166/WST.2021.230>
- Meegoda, J. N., Li, B., Patel, K., & Wang, L. B. (2018). A Review of the Processes, Parameters, and Optimization of Anaerobic Digestion. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2018, Vol. 15, Page 2224, *15*(10), 2224. <https://doi.org/10.3390/IJERPH15102224>
- Mohan, D., Singh, K. P., & Singh, V. K. (2008). Wastewater treatment using low cost activated carbons derived from agricultural byproducts—A case study. *Journal of Hazardous Materials*, *152*(3), 1045–1053. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2007.07.079>
- Municipal waste statistics - Statistics Explained.* (n.d.). Retrieved 10 September 2023, from [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal\\_waste\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal_waste_statistics)
- Recchioni, M., Mathieux, F., Goralczyk, M., & Schau, E. M. (2012). *ILCD Data Network and ELCD Database: current use and further needs for supporting Environmental Footprint and Life Cycle Indicator Projects.* <https://doi.org/10.2788/78678>
- Russell, A. J. (2005). Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards. Guinée Jeroen B (Ed.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2002, ISBN: 1-4020-0228-9, p. 692, 303 USD. *Journal of Cleaner Production*, *13*(13–14), 1359. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2005.05.017>
- SimaPro database manual Methods library.* (2020).
- SimaPro Database Manual Methods Library Title: SimaPro Database Manual Methods Library.* (2020).

- Solarte Toro, J. C., Mariscal Moreno, J. P., & Aristizábal Zuluaga, B. H. (2017). Evaluación de la digestión y co-digestión anaerobia de residuos de comida y de poda en bioreactores a escala laboratorio. *Revista ION*, 30(1), 105–116. <https://doi.org/10.18273/REVISION.V30N1-2017008>
- Sosnowski, P., Wieczorek, A., & Ledakowicz, S. (2003). Anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid wastes. *Advances in Environmental Research*, 7(3), 609–616. [https://doi.org/10.1016/S1093-0191\(02\)00049-7](https://doi.org/10.1016/S1093-0191(02)00049-7)
- Speece, R. E. (1971). *The pH tolerance of anaerobic digestion I am presently working on Superoxygenation for Water Quality Management. View project.* <https://www.researchgate.net/publication/308396454>
- Stamatelidou, K., Antonopoulou, G., & Lyberatos, G. (2011). Production of biogas via anaerobic digestion. *Handbook of Biofuels Production: Processes and Technologies*, 266–304. <https://doi.org/10.1533/9780857090492.2.266>
- Tai, J., Zhang, W., Che, Y., & Feng, D. (2011). Municipal solid waste source-separated collection in China: A comparative analysis. *Waste Management*, 31(8), 1673–1682. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2011.03.014>
- Tang, Y. Q., Koike, Y., Liu, K., An, M. Z., Morimura, S., Wu, X. L., & Kida, K. (2008). Ethanol production from kitchen waste using the flocculating yeast *Saccharomyces cerevisiae* strain KF-7. *Biomass and Bioenergy*, 32(11), 1037–1045. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2008.01.027>
- Varjani, S. J., Gnansounou, E., Gurunathan, B., Pant, D., & Zakaria, Z. A. (Eds.). (2018). *Waste Bioremediation*. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-7413-4>
- Vavouraki, A. I., Angelis, E. M., & Kornaros, M. (2013). Optimization of thermo-chemical hydrolysis of kitchen wastes. *Waste Management*, 33(3), 740–745. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2012.07.012>
- Zhang, L., Lee, Y. W., & Jahng, D. (2011). Anaerobic co-digestion of food waste and piggery wastewater: Focusing on the role of trace elements. *Bioresour. Technol.*, 102(8), 5048–5059. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2011.01.082>
- Zhang, R., El-Mashad, H. M., Hartman, K., Wang, F., Liu, G., Choate, C., & Gamble, P. (2007). Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion. *Bioresour. Technol.*, 98(4), 929–935. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.02.039>
- Εργασία, Δ., Ναυπηγών, Σ., Μηχανικών, Μ., & Μεταφορών, Ε. Θ. (2013). *ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΤΗΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ.*
- Παραδόσεων, Σ. (2016). *ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ.*



ELCD | GHG Protocol. <https://ghgprotocol.org/Third-Party-Databases/ELCD> (2 August 2023, date last accessed).

Greece - Countries & Regions - IEA. <https://www.iea.org/countries/greece> (24 August 2023, date last accessed).

Huijbregts M., Hellweg S., Frischknecht R., Hungerbühler K., Hendriks J., 2008.

Huijbregts MAJ, Hellweg S, Frischknecht R, Hungerbühler K, Hendriks AJ. Ecological footprint accounting in the life cycle assessment of products. *Ecological Economics* 2008; 64: 798–807.

ILCD-Handbook-General-guide-for-LCA-DETAILED-GUIDANCE-12March2010-ISBN-fin-v1.0-EN. .

Jolliet, O. et al, 2016. ENVIRONMENTAL LIFE CYCLE ASSESSMENT.

Kolotzek, S. et al., 2018. A company-oriented model for the assessment of raw material supply risks, environmental impact and social implications. *Journal of Cleaner Production*: 176

Life cycle-based standards and guidelines - PRé Sustainability. <https://pre-sustainability.com/articles/lca-standards-and-guidelines/> (2 August 2023, date last accessed).

market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6, UPR, ecoinvent 3.6, Consequential | GLAD. <https://www.globalcadataaccess.org/market-transport-freight-lorry-16-32-metric-ton-euro6-upr-ecoinvent-36-consequential-0> (28 August 2023, date last accessed).

Mathioudakis, D.; Karageorgis, P.; Papadopoulou, K.; Astrup, T.F.; Lyberatos, G. Environmental and Economic Assessment of Alternative Food Waste Management Scenarios. *Sustainability* 2022, 14, 9634. <https://doi.org/10.3390/su14159634>

Recchioni M, Mathieux F, Goralczyk M, Schau EM. ILCD Data Network and ELCD Database: current use and further needs for supporting Environmental Footprint and Life Cycle Indicator Projects. 2012;

SimaPro Database Manual Methods Library Title: SimaPro Database Manual Methods Library. 2020;

SimaPro database manual Methods library. 2020.

Understanding Electricity in SimaPro – Long Trail Sustainability. <https://longtrailsustainability.com/understanding-electricity-in-simapro/> (25 August 2023, date last accessed).

Understanding Electricity in SimaPro – Long Trail Sustainability. <https://longtrailsustainability.com/understanding-electricity-in-simapro/> (22 August 2023, date last accessed).

What do the abbreviations enclosed in processes mean? <https://support.simapro.com/s/article/What-do-the-abbreviations-in-processes-mean> (22 August 2023, date last accessed).

Ρουμελιώτη Ηρώ, 2013. «Ανάλυση κύκλου ζωής της μεταλλικής κατασκευής πλοίου»

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

### Παράρτημα Α: Characterization- Human carcinogenic toxicity – Σενάριο 1

| Process                       | Unit       | Total       | 1.BIOGAS | 1.Condensate | 1.Wastewater | Transport   | Electricity | 1.Effluent |
|-------------------------------|------------|-------------|----------|--------------|--------------|-------------|-------------|------------|
| <b>Total of all processes</b> | kg 1,4-DCB | 97,4        | 0,0      | 0,0962       | 0,0          | 53,5        | 43,8        | 0,0        |
| <b>1.BIOGAS</b>               | kg 1,4-DCB | 0,0         | 0,0      | 0,0          | 0,0          | 0,0         | 0,0         | 0,0        |
| <b>1.Condensate</b>           | kg 1,4-DCB | 0,0962      | 0,0      | 0,0962       | 0,0          | 0,0         | 0,0         | 0,0        |
| <b>1.Effluent</b>             | kg 1,4-DCB | 0,0         | 0,0      | 0,0          | 0,0          | 0,0         | 0,0         | 0,0        |
| <b>1.Wastewater</b>           | kg 1,4-DCB | 0,0         | 0,0      | 0,0          | 0,0          | 0,0         | 0,0         | 0,0        |
| <b>Electricity</b>            | kg 1,4-DCB | <b>43,8</b> | 0,0      | 0,0          | 0,0          | 0,0         | <b>43,8</b> | 0,0        |
| <b>Transport</b>              | kg 1,4-DCB | <b>53,5</b> | 0,0      | 0,0          | 0,0          | <b>53,5</b> | 0,0         | 0,0        |

### Παράρτημα Β: Characterization – Freshwater ecotoxicity- Σενάριο 1

| Process                       | Unit       | Total        | 1.BIOGAS | 1.Condensate | 1.Wastewater | Transport    | Electricity  | 1.Effluent |
|-------------------------------|------------|--------------|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------|
| <b>Total of all processes</b> | kg 1,4-DCB | 7,03         | 0,0      | 5,5          | 0,0          | 0,971        | 0,566        | 0,0        |
| <b>1.BIOGAS</b>               | kg 1,4-DCB | 0,0          | 0,0      | 0,0          | 0,0          | 0,0          | 0,0          | 0,0        |
| <b>1.Condensate</b>           | kg 1,4-DCB | <b>5,5</b>   | 0,0      | <b>5,5</b>   | 0,0          | 0,0          | 0,0          | 0,0        |
| <b>1.Effluent</b>             | kg 1,4-DCB | 0,0          | 0,0      | 0,0          | 0,0          | 0,0          | 0,0          | 0,0        |
| <b>1.Wastewater</b>           | kg 1,4-DCB | 0,0          | 0,0      | 0,0          | 0,0          | 0,0          | 0,0          | 0,0        |
| <b>Electricity</b>            | kg 1,4-DCB | <b>0,566</b> | 0,0      | 0,0          | 0,0          | 0,0          | <b>0,566</b> | 0,0        |
| <b>Transport</b>              | kg 1,4-DCB | <b>0,971</b> | 0,0      | 0,0          | 0,0          | <b>0,971</b> | 0,0          | 0,0        |

### Παράρτημα Γ: Characterization – Freshwater eutrophication-Σενάριο 1

| Process                       | Unit    | Total       | 1.BIOGAS | 1.Condensate | 1.Wastewater | Transport | Electricity | 1.Effluent  |
|-------------------------------|---------|-------------|----------|--------------|--------------|-----------|-------------|-------------|
| <b>Total of all processes</b> | kg P eq | 0,954       | 0,0      | 0,0962       | 0,0          | 0,00267   | 0,0117      | 0,94        |
| <b>1.BIOGAS</b>               | kg P eq | 0,0         | 0,0      | 0,0          | 0,0          | 0,0       | 0,0         | 0,0         |
| <b>1.Condensate</b>           | kg P eq | 0,0         | 0,0      | 0,0          | 0,0          | 0,0       | 0,0         | 0,0         |
| <b>1.Effluent</b>             | kg P eq | <b>0,94</b> | 0,0      | 0,0          | 0,0          | 0,0       | 0,0         | <b>0,94</b> |
| <b>1.Wastewater</b>           | kg P eq | 0,0         | 0,0      | 0,0          | 0,0          | 0,0       | 0,0         | 0,0         |
| <b>Electricity</b>            | kg P eq | 0,0117      | 0,0      | 0,0          | 0,0          | 0,0       | 0,0117      | 0,0         |
| <b>Transport</b>              | kg P eq | 0,00267     | 0,0      | 0,0          | 0,0          | 0,00267   | 0,0         | 0,0         |

### Παράρτημα Δ: Characterization – Marine ecotoxicity - Σενάριο 1

| Process                       | Unit       | Total  | 1.BIOGAS | 1.Condensate | 1.Wastewater | Transport | Electricity | 1.Effluent |
|-------------------------------|------------|--------|----------|--------------|--------------|-----------|-------------|------------|
| <b>Total of all processes</b> | kg 1,4-DCB | 1,19E4 | 0,0      | 0,0883       | 0,0          | 8,34E3    | 3,53E3      | 0,0        |

|                     |            |               |     |        |     |               |               |     |
|---------------------|------------|---------------|-----|--------|-----|---------------|---------------|-----|
| <b>1.BIOGAS</b>     | kg 1,4-DCB | 0,0           | 0,0 | 0,0    | 0,0 | 0,0           | 0,0           | 0,0 |
| <b>1.Condensate</b> | kg 1,4-DCB | 0,0883        | 0,0 | 0,0883 | 0,0 | 0,0           | 0,0           | 0,0 |
| <b>1.Effluent</b>   | kg 1,4-DCB | 0,0           | 0,0 | 0,0    | 0,0 | 0,0           | 0,0           | 0,0 |
| <b>1.Wastewater</b> | kg 1,4-DCB | 0,0           | 0,0 | 0,0    | 0,0 | 0,0           | 0,0           | 0,0 |
| <b>Electricity</b>  | kg 1,4-DCB | <b>3,53E3</b> | 0,0 | 0,0    | 0,0 | 0,0           | <b>3,53E3</b> | 0,0 |
| <b>Transport</b>    | kg 1,4-DCB | <b>8,34E3</b> | 0,0 | 0,0    | 0,0 | <b>8,34E3</b> | 0,0           | 0,0 |

#### Παράρτημα E: Characterization – Human non-carcinogenic toxicity- Σενάριο 1

| Process                       | Unit       | Total         | 1.BIOGAS | 1.Condensate | 1.Wastewater | Transport     | Electricity   | 1.Effluent |
|-------------------------------|------------|---------------|----------|--------------|--------------|---------------|---------------|------------|
| <b>Total of all processes</b> | kg 1,4-DCB | 9,8E3         | 0,0      | 0,0          | 0,0          | 6,78E3        | 3,02E3        | 0,0        |
| <b>1.BIOGAS</b>               | kg 1,4-DCB | 0,0           | 0,0      | 0,0          | 0,0          | 0,0           | 0,0           | 0,0        |
| <b>1.Condensate</b>           | kg 1,4-DCB | 0,0           | 0,0      | 0,0          | 0,0          | 0,0           | 0,0           | 0,0        |
| <b>1.Effluent</b>             | kg 1,4-DCB | 0,0           | 0,0      | 0,0          | 0,0          | 0,0           | 0,0           | 0,0        |
| <b>1.Wastewater</b>           | kg 1,4-DCB | 0,0           | 0,0      | 0,0          | 0,0          | 0,0           | 0,0           | 0,0        |
| <b>Electricity</b>            | kg 1,4-DCB | <b>3,02E3</b> | 0,0      | 0,0          | 0,0          | 0,0           | <b>3,02E3</b> | 0,0        |
| <b>Transport</b>              | kg 1,4-DCB | <b>6,78E3</b> | 0,0      | 0,0          | 0,0          | <b>6,78E3</b> | 0,0           | 0,0        |

#### Παράρτημα Z: Characterization – Terrestrial ecotoxicity – Σενάριο 1

| Process                       | Unit       | Total       | 1.BIOGAS | 1.Condensate | 1.Wastewater | Transport  | Electricity | 1.Effluent |
|-------------------------------|------------|-------------|----------|--------------|--------------|------------|-------------|------------|
| <b>Total of all processes</b> | kg 1,4-DCB | 715         | 0,0      | 2,4          | 0,0          | 699        | 13,9        | 0,0        |
| <b>1.BIOGAS</b>               | kg 1,4-DCB | 0,0         | 0,0      | 0,0          | 0,0          | 0,0        | 0,0         | 0,0        |
| <b>1.Condensate</b>           | kg 1,4-DCB | 2,4         | 0,0      | 2,4          | 0,0          | 0,0        | 0,0         | 0,0        |
| <b>1.Effluent</b>             | kg 1,4-DCB | 0,0         | 0,0      | 0,0          | 0,0          | 0,0        | 0,0         | 0,0        |
| <b>1.Wastewater</b>           | kg 1,4-DCB | 0,0         | 0,0      | 0,0          | 0,0          | 0,0        | 0,0         | 0,0        |
| <b>Electricity</b>            | kg 1,4-DCB | <b>13,9</b> | 0,0      | 0,0          | 0,0          | 0,0        | <b>13,9</b> | 0,0        |
| <b>Transport</b>              | kg 1,4-DCB | <b>699</b>  | 0,0      | 0,0          | 0,0          | <b>699</b> | 0,0         | 0,0        |

#### Παράρτημα Η: Characterization- Human carcinogenic toxicity- Σενάριο 2

| Process                       | Unit       | Total       | 2.BIOGAS | 1.Condensate | 2.WAS | Transport   | Electricity | 2.Effluent |
|-------------------------------|------------|-------------|----------|--------------|-------|-------------|-------------|------------|
| <b>Total of all processes</b> | kg 1,4-DCB | 92,4        | 0,0      | 0,0962       | 0,0   | 53,5        | 38,8        | 0,0        |
| <b>2.BIOGAS</b>               | kg 1,4-DCB | 0,0         | 0,0      | 0,0          | 0,0   | 0,0         | 0,0         | 0,0        |
| <b>1.Condensate</b>           | kg 1,4-DCB | 0,0962      | 0,0      | 0,0962       | 0,0   | 0,0         | 0,0         | 0,0        |
| <b>2.Effluent</b>             | kg 1,4-DCB | 0,0         | 0,0      | 0,0          | 0,0   | 0,0         | 0,0         | 0,0        |
| <b>2.WAS</b>                  | kg 1,4-DCB | 0,0         | 0,0      | 0,0          | 0,0   | 0,0         | 0,0         | 0,0        |
| <b>Electricity</b>            | kg 1,4-DCB | <b>38,8</b> | 0,0      | 0,0          | 0,0   | 0,0         | <b>38,8</b> | 0,0        |
| <b>Transport</b>              | kg 1,4-DCB | <b>53,5</b> | 0,0      | 0,0          | 0,0   | <b>53,5</b> | 0,0         | 0,0        |

Παράρτημα Θ: Characterization – Freshwater ecotoxicity- Σενάριο 2

| Process                       | Unit       | Total        | 2.BIOGAS | 1.Condensate | 2.WAS        | Transport    | Electricity  | 2.Effluent  |
|-------------------------------|------------|--------------|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| <b>Total of all processes</b> | kg 1,4-DCB | 7,65         | 0,0      | 5,5          | 0,348        | 0,971        | 0,502        | 0,33        |
| <b>2.BIOGAS</b>               | kg 1,4-DCB | 0,0          | 0,0      | 0,0          | 0,0          | 0,0          | 0,0          | 0,0         |
| <b>1.Condensate</b>           | kg 1,4-DCB | <b>5,5</b>   | 0,0      | <b>5,5</b>   | 0,0          | 0,0          | 0,0          | 0,0         |
| <b>2.Effluent</b>             | kg 1,4-DCB | <b>0,33</b>  | 0,0      | 0,0          | 0,0          | 0,0          | 0,0          | <b>0,33</b> |
| <b>2.WAS</b>                  | kg 1,4-DCB | <b>0,348</b> | 0,0      | 0,0          | <b>0,348</b> | 0,0          | 0,0          | 0,0         |
| <b>Electricity</b>            | kg 1,4-DCB | <b>0,502</b> | 0,0      | 0,0          | 0,0          | 0,0          | <b>0,502</b> | 0,0         |
| <b>Transport</b>              | kg 1,4-DCB | <b>0,971</b> | 0,0      | 0,0          | 0,0          | <b>0,971</b> | 0,0          | 0,0         |

Παράρτημα Ι: Characterization – Marine ecotoxicity- Σενάριο 2

| Process                       | Unit       | Total         | 2.BIOGAS | 1.Condensate | 2.WAS   | Transport     | Electricity   | 2.Effluent |
|-------------------------------|------------|---------------|----------|--------------|---------|---------------|---------------|------------|
| <b>Total of all processes</b> | kg 1,4-DCB | 1,15E4        | 0,0      | 0,0883       | 0,00514 | 8,34E3        | 3,53E3        | 0,00464    |
| <b>2.BIOGAS</b>               | kg 1,4-DCB | 0,0           | 0,0      | 0,0          | 0,0     | 0,0           | 0,0           | 0,0        |
| <b>1.Condensate</b>           | kg 1,4-DCB | 0,0883        | 0,0      | 0,0883       | 0,0     | 0,0           | 0,0           | 0,0        |
| <b>2.Effluent</b>             | kg 1,4-DCB | 0,00464       | 0,0      | 0,0          | 0,0     | 0,0           | 0,0           | 0,00464    |
| <b>2.WAS</b>                  | kg 1,4-DCB | 0,00514       | 0,0      | 0,0          | 0,00514 | 0,0           | 0,0           | 0,0        |
| <b>Electricity</b>            | kg 1,4-DCB | <b>3,53E3</b> | 0,0      | 0,0          | 0,0     | 0,0           | <b>3,53E3</b> | 0,0        |
| <b>Transport</b>              | kg 1,4-DCB | <b>8,34E3</b> | 0,0      | 0,0          | 0,0     | <b>8,34E3</b> | 0,0           | 0,0        |

Παράρτημα Κ: Characterization – Human non-carcinogenic toxicity- Σενάριο 2

| Process                       | Unit       | Total         | 2.BIOGAS | 1.Condensate | 2.WAS | Transport     | Electricity   | 2.Effluent |
|-------------------------------|------------|---------------|----------|--------------|-------|---------------|---------------|------------|
| <b>Total of all processes</b> | kg 1,4-DCB | 9,46E3        | 0,0      | 0,0          | 0,0   | 6,78E3        | 2,68E3        | 0,0        |
| <b>2.BIOGAS</b>               | kg 1,4-DCB | 0,0           | 0,0      | 0,0          | 0,0   | 0,0           | 0,0           | 0,0        |
| <b>1.Condensate</b>           | kg 1,4-DCB | 0,0           | 0,0      | 0,0          | 0,0   | 0,0           | 0,0           | 0,0        |
| <b>2.Effluent</b>             | kg 1,4-DCB | 0,0           | 0,0      | 0,0          | 0,0   | 0,0           | 0,0           | 0,0        |
| <b>2.WAS</b>                  | kg 1,4-DCB | 0,0           | 0,0      | 0,0          | 0,0   | 0,0           | 0,0           | 0,0        |
| <b>Electricity</b>            | kg 1,4-DCB | <b>2,68E3</b> | 0,0      | 0,0          | 0,0   | 0,0           | <b>2,68E3</b> | 0,0        |
| <b>Transport</b>              | kg 1,4-DCB | <b>6,78E3</b> | 0,0      | 0,0          | 0,0   | <b>6,78E3</b> | 0,0           | 0,0        |

Παράρτημα Λ: Characterization – Terrestrial ecotoxicity – Σενάριο 2

| Process                       | Unit       | Total       | 2.BIOGAS | 1.Condensate | 2.WAS  | Transport | Electricity | 2.Effluent |
|-------------------------------|------------|-------------|----------|--------------|--------|-----------|-------------|------------|
| <b>Total of all processes</b> | kg 1,4-DCB | 714         | 0,0      | 2,4          | 0,0733 | 699       | 12,3        | 0,013      |
| <b>2.BIOGAS</b>               | kg 1,4-DCB | 0,0         | 0,0      | 0,0          | 0,0    | 0,0       | 0,0         | 0,0        |
| <b>1.Condensate</b>           | kg 1,4-DCB | 2,4         | 0,0      | 2,4          | 0,0    | 0,0       | 0,0         | 0,0        |
| <b>2.Effluent</b>             | kg 1,4-DCB | 0,013       | 0,0      | 0,0          | 0,0    | 0,0       | 0,0         | 0,013      |
| <b>2.WAS</b>                  | kg 1,4-DCB | 0,0733      | 0,0      | 0,0          | 0,0733 | 0,0       | 0,0         | 0,0        |
| <b>Electricity</b>            | kg 1,4-DCB | <b>12,3</b> | 0,0      | 0,0          | 0,0    | 0,0       | <b>12,3</b> | 0,0        |

|                  |            |            |     |     |     |            |     |     |
|------------------|------------|------------|-----|-----|-----|------------|-----|-----|
| <b>Transport</b> | kg 1,4-DCB | <b>699</b> | 0,0 | 0,0 | 0,0 | <b>699</b> | 0,0 | 0,0 |
|------------------|------------|------------|-----|-----|-----|------------|-----|-----|