



Πολυτεχνείο Κρήτης  
Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος  
Εργαστήριο Σχεδιασμού Περιβαλλοντικών Διεργασιών

**Μικροκοσκίνιση πρωτογενών λυμάτων στην εγκατάσταση  
επεξεργασίας λυμάτων Ρεθύμνου: Απόδοση και ενεργειακό  
περιεχόμενο παραγόμενων βιοστερεών**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



**ΚΑΜΠΟΥΡΑΚΗΣ ΧΡΗΣΤΟΣ**

**Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:**

Γκίκας Πέτρος, Καθηγητής (Επιβλέπων)

Καλογεράκης Νικόλαος, Ομότιμος Καθηγητής

Στεφανάκης Αλέξανδρος, Επίκουρος Καθηγητής

Χανιά, Ιανουάριος 2023

«Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης».

## Ευχαριστίες

Ξεκινώντας να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Πέτρο Γκίκα για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, στην ανάθεση της διπλωματικής μου εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Ανθούλα Μάναλη για την συμβολή και την βοήθεια της στην διπλωματική μου. Επίσης τις θερμές μου ευχαριστίες στον κ. Εμμανουήλ Βρυλλάκη από την ΕΕΛ Ρεθύμνου για την πολύτιμη βοήθεια του.

Επιπλέον, θα ήθελα να εκφράσω την ευχαρίστηση μου στον ομότιμο καθηγητή κ. Καλογεράκη Νικόλαο και στον επίκουρο καθηγητή κ. Στεφανάκη Αλέξανδρο, που είναι μέλη της τριμελούς επιτροπής.

Ακόμα ευχαριστώ τον συμφοιτητή μου Ιωάννη Τσόλη που με την παρέα του έκανε τις σπουδές μου πιο ευχάριστες. Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια μου.

## Περίληψη

Η ραγδαία πληθυσμιακή και βιομηχανική ανάπτυξη συμβάλλουν άμεσα στην αύξηση των βιοστερεών που παράγονται καθημερινά. Οι ανάγκες τις οποίες δημιουργεί η συνεχόμενη αυξητική τάση της παραγωγής αποβλήτων, δεν μπορούν να καλυφθούν με τις μεθόδους που χρησιμοποιούνταν στο παρελθόν. Λόγω του αξιόλογου ενεργειακού περιεχομένου των μικροκοσκινισμένων βιοστερεών, προτείνεται ολοκληρωμένη διαχείριση τους με στόχο την παραγωγή ενέργειας, εφαρμόζοντας τις τεχνολογίες της ξήρανσης και της αεριοποίησης.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία καταγράφηκαν τα χαρακτηριστικά εισερχόμενου- εξερχόμενου αποβλήτου της Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) Ρεθύμνου, πραγματοποιήθηκε η παρακολούθηση λειτουργίας - απόδοσης πιλοτικού μικροκόσκινου που είναι εγκατεστημένο στην συγκεκριμένη ΕΕΛ, καθώς και η αξιολόγηση του ενεργειακού περιεχομένου των παραγόμενων μικροκοσκινισμένων βιοστερεών με την προοπτική περαιτέρω αξιοποίησής τους. Πιο συγκεκριμένα, μετρήθηκαν σε δείγματα εισερχόμενου - εξερχόμενου αποβλήτου της ΕΕΛ Ρεθύμνου, τα TSS ( $170 \pm 59$  mg/L,  $19 \pm 11$  mg/L), BOD<sub>5</sub> ( $311 \pm 46$  mg/L,  $7 \pm 2$  mg/L), και COD ( $199 \pm 46$  mg/L,  $62 \pm 18$  mg/L), αντίστοιχα. Επίσης, σχετικά με την απόδοση της μικροκοσκίνισης και τα χαρακτηριστικά παραγόμενων βιοστερεών μετρήθηκαν: τα TSS εισόδου ( $194 \pm 51$  mg/L) και εξόδου ( $159 \pm 46$  mg/L), η υγρασία (M) των μικροκοσκινισμένων βιοστερεών ( $64 \pm 2\%$ ), τα VS ( $90 \pm 1\%$  των TS) καθώς και η HHV ( $21,5 \pm 1,4$  MJ/kg).

Τέλος, λόγω του αξιόλογου ενεργειακού περιεχομένου των μικροκοσκινισμένων βιοστερεών, προτάθηκε ολοκληρωμένη διαχείριση τους με στόχο την παραγωγή ενέργειας, συμπεριλαμβάνοντας τις τεχνολογίες μικροκοσκίνισης-ηλιακής ξήρανσης-αεριοποίησης. Με βάση τους υπολογισμούς που έγιναν, ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να λειτουργήσει αυτόνομα, αφού η παραγόμενη ενέργεια αναμένεται να καλύπτει τις ενεργειακές ανάγκες της πιλοτικής διάταξης και κατά συνέπεια να προκαλέσει σημαντική μείωση των συνολικών ενεργειακών αναγκών της ΕΕΛ.

**Λέξεις-κλειδιά:** «ΕΕΛ», «βιοστερεά», «μικροκοσκίνιση», «ξήρανση», «αεριοποίηση», «ενέργεια».

## Abstract

The rapid population and industrial growth directly contribute to the increase in the daily produced biosolids. The needs created by the continuous increasing trend of waste production cannot be met by the methods used in the past. Due to the significant energy content of microsieved biosolids, their integrated management is proposed with the aim of energy production, applying drying and gasification technologies.

In this thesis, the characteristics of the incoming and outgoing wastewater at the Wastewater Treatment Plant (WWTP) of Rethymno were recorded, the monitoring of the operation and performance of a pilot microsieve installed in this WWTP was carried out, as well as the evaluation of the energy content of the produced micro-sieved biosolids with the perspective of further their utilization. More specifically, the measurements of the incoming and outgoing wastewater of the WWTP of Rethymno resulted to concentration of TSS ( $170 \pm 59$  mg/L,  $19 \pm 11$  mg/L), BOD<sub>5</sub> ( $311 \pm 46$  mg/L,  $7 \pm 2$  mg/L), and COD ( $199 \pm 46$  mg/L,  $62 \pm 18$  mg/L), respectively. Also, regarding microsieving performance and produced biosolids characteristics were measured: TSS inlet ( $194 \pm 51$  mg/L) and TSS outlet ( $159 \pm 46$  mg/L), moisture (M) of microsieved biosolids ( $64 \pm 2\%$ ), VS ( $90 \pm 1\%$  of TS) as well as HHV ( $21.5 \pm 1.4$  MJ/kg).

Finally, due to the significant energy content of microsieved biosolids, their integrated management was proposed with the aim of energy production, including microsieving-solar drying-gasification technologies. Based on the calculations made, such a system can operate autonomously, since the energy produced is expected to cover the energy needs of the pilot plant and consequently cause a significant reduction in the overall energy needs of WTP.

**Keywords:** “WWTPs”, “biosolids”, “microsieving”, “drying”, “gasification”, “energy”.

## Περιεχόμενα

|   |           |
|---|-----------|
| <b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....</b>  | <b>2</b>  |
| <b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....</b>   | <b>3</b>  |
| <b>ABSTRACT .....</b>   | <b>4</b>  |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΥΓΡΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ - ΒΙΟΣΤΕΡΕΑ.....</b>                         | <b>9</b>  |
| 1.1 Εισαγωγή .....  | 9         |
| 1.2 Παραγωγή και χαρακτηριστικά υγρών αποβλήτων.....                      | 9         |
| 1.3 Παραγωγή και χαρακτηριστικά βιοστερεών.....                           | 10        |
| 1.4 Συμβατικές μέθοδοι επεξεργασίας υγρών αποβλήτων.....                  | 11        |
| 1.4.1 Προ - επεξεργασία και πρωτοβάθμια επεξεργασία .....                 | 11        |
| 1.4.2 Δευτεροβάθμια επεξεργασία.....                                      | 12        |
| 1.4.3 Τριτοβάθμια επεξεργασία .....                                       | 13        |
| 1.4.4 Απολύμανση .....  | 14        |
| 1.4.5 Γραμμή Επεξεργασίας Ιλύος .....                                     | 15        |
| 1.5 Ενεργειακές απαιτήσεις επεξεργασίας υγρών αποβλήτων.....              | 15        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΕΞΕΛΙΞΗ ΡΕΘΥΜΝΟΥ.....</b>                                  | <b>17</b> |
| 2.1 Γενικές Πληροφορίες - Νομοθετικά όρια .....                           | 17        |
| 2.2 Περιγραφή σταδίων επεξεργασίας λυμάτων.....                           | 19        |
| 2.2.1 Φρεάτιο άφιξης λυμάτων .....  | 19        |
| 2.2.2 Εσχάρωση .....  | 19        |
| 2.2.3 Εξάμμωση .....  | 20        |
| 2.2.4 Βιολογική επεξεργασία.....  | 21        |
| 2.2.5 Απολύμανση και διάθεση λυμάτων .....                                | 22        |
| 2.2.6 Επεξεργασία ιλύος.....  | 22        |
| 2.2.7 Υποδοχή – εξισορρόπηση βοθρολυμάτων.....                            | 23        |
| 2.2.8 Υποδοχή – προ-επεξεργασία βιομηχανικών αποβλήτων .....              | 23        |
| 2.2.9 Μονάδα βιομηχανικού νερού .....                                     | 23        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΜΙΚΡΟΚΟΣΚΙΝΙΣΗ .....</b>                                   | <b>24</b> |
| 3.1 Κατηγορίες - Χαρακτηριστικά μικροκόσκινων .....                       | 24        |
| 3.1.1 Φίλτρα Περιστρεφόμενου Ιμάντα (Rotating Belt Filters, RBFs) .....   | 24        |
| 3.1.2 Φίλτρα Περιστρεφόμενου Τυμπάνου (Rotating Drum Filters, RDFs) ..... | 24        |
| 3.1.3 Φίλτρα δίσκου (Disc filters).....                                   | 25        |
| 3.2 Σύγκριση μικροκοσκίνισης με συμβατική πρωτοβάθμια επεξεργασία.....    | 25        |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....</b>   | <b>27</b> |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ - ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ.....</b>  | <b>28</b> |
| 5.1 Πειραματικός σχεδιασμός - Συλλογή δειγμάτων .....  | 28        |
| 5.2 Μικροκόσκινο.....  | 29        |
| 5.3 Αναλυτικές μέθοδοι.....  | 31        |
| 5.3.1 Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (Total Suspended Solids, TSS).....   | 31        |
| 5.3.2 Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (Biochemical Oxygen Demand, BOD).....                                      | 31        |
| 5.3.3 Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (Chemical Oxygen Demand, COD).....  | 32        |
| 5.3.4 Ολικά στερεά (Total Solids, TS) – Υγρασία (Moisture, M).....   | 33        |
| 5.3.5 Ολικά Πτητικά Στερεά (Total Volatile Solids, TVS).....   | 34        |
| 5.3.6 Ανώτερη Θερμογόνοος Δύναμη (Higher Heating Value, HHV) .....   | 34        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....</b>  | <b>36</b> |
| 6.1 Χαρακτηριστικά εισερχόμενου - εξερχόμενου αποβλήτου της ΕΕΛ Ρεθύμνου .....                                 | 36        |
| 6.1.1 TSS εισόδου – εξόδου .....   | 36        |
| 6.1.2 BOD <sub>5</sub> εισόδου – εξόδου .....  | 37        |
| 6.1.3 COD εισόδου – εξόδου .....   | 38        |
| 6.2 Απόδοση απομάκρυνσης TSS και χαρακτηριστικά παραγόμενων βιοστερεών με την μέθοδο της μικροκοσκίνισης ..... | 38        |
| 6.2.1 Απόδοση μικροκόσκινου στην απομάκρυνση TSS .....   | 38        |
| 6.2.2 Ολικά στερεά (TS) – Υγρασία (M) βιοστερεών.....  | 40        |
| 6.2.3 Πτητικά στερεά (VS) βιοστερεών .....   | 41        |
| 6.2.4 Ανώτερη Θερμογόνοος Δύναμη (HHV) βιοστερεών.....   | 41        |
| 6.3 Παραγωγή ενέργειας από μικροκοσκινισμένα βιοστερεά με χρήση θερμικών μεθόδων .....                         | 42        |
| 6.3.1 Ξήρανση.....   | 42        |
| 6.3.2 Αεριοποίηση .....  | 43        |
| 6.3.3 Παραγόμενη ενέργεια .....  | 44        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....</b>   | <b>48</b> |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>   | <b>49</b> |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....</b>   | <b>52</b> |
| 9.1 Δεδομένα TSS εισόδου 2017-2021 από ΕΕΛ Ρεθύμνου .....  | 52        |
| 9.1.1 Ημερήσια .....   | 52        |
| 9.1.2 Μηνιαία .....  | 53        |
| 9.1.3 Συγκεντρωτικά.....   | 55        |
| 9.2 Υπολογισμός πυκνότητας καυσαερίων.....   | 55        |

## Κατάλογος εικόνων

|  |    |
|--|----|
| Εικόνα 1.1 Σχηματική αναπαράσταση επεξεργασία ιλύος (Στεφανάκης, 2022). ....   | 9  |
| Εικόνα 1.2 Κυκλική δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης (Γκίκας, 2020). ....  | 12 |
| Εικόνα 1.3 Τύποι δεξαμενών δευτεροβάθμιας καθίζησης (Γκίκας, 2020). ....   | 13 |
| Εικόνα 1.4 Ροή σε κυκλική ΔΔΚ (Γκίκας, 2020). ....   | 13 |
| Εικόνα 1.5 Διάγραμμα ροής ΕΕΛ, γραμμή επεξεργασίας λυμάτων με τη μέθοδο της ενεργού ιλύος (Νταρακάς, 2010). ....             | 14 |
| Εικόνα 1.6 Χλωρίωση, Οξονισμός, Ακτινοβολία UV (Γκίκας, 2020). ....  | 14 |
| Εικόνα 1.7 Δεξαμενή απολύμανσης ΕΕΛ Ρεθύμνου. ....   | 15 |
| Εικόνα 1.8 Ποσοστιαία κατανάλωση ενέργειας ανά στάδιο επεξεργασίας (Gikas and Tsoutsos, 2015). ....                          | 16 |
| Εικόνα 2.1 Σχηματική αναπαράσταση της ΕΕΛ Ρεθύμνου. ....   | 17 |
| Εικόνα 2.2 ΕΕΛ Ρεθύμνου. ....  | 18 |
| Εικόνα 2.3 Εσχάρωση (Γκίκας, 2020). ....   | 20 |
| Εικόνα 2.4 Μονάδα εξάμμωσης (Γκίκας, 2020). ....   | 21 |
| Εικόνα 3.1 Φίλτρο Περιστρεφόμενου Ιμάντα (Rotating Belt Filter, RBF). ....   | 24 |
| Εικόνα 3.2 Φίλτρο Περιστρεφόμενου τυμπάνου (Rotating Drum Filter, RDF). ....   | 25 |
| Εικόνα 3.3 Φίλτρο δίσκου (Disc filter). ....   | 25 |
| Εικόνα 5.1 Τοποθέτηση των δειγματοληπτών τύπου HACH LANGE BÜHLER 2000 για τον υπολογισμό της απόδοσης της ΕΕΛ Ρεθύμνου. .... | 28 |
| Εικόνα 5.2 Το κινητό εργαστήριο του Πολυτεχνείου Κρήτης όπου πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα. ....                            | 29 |
| Εικόνα 5.3 Το εσωτερικό του κινητού εργαστηρίου όπου πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα. ....                                    | 29 |
| Εικόνα 5.4 Τρισδιάστατη απεικόνιση της πιλοτικής μονάδας του έργου LIFE. ....  | 30 |
| Εικόνα 5.5 Διάγραμμα ροής της πιλοτικής μονάδας του έργου LIFE. ....   | 30 |
| Εικόνα 5.6 Το πιλοτικό μικροκόσκινο της μονάδας του έργου LIFE. ....   | 31 |
| Εικόνα 5.7 Μπουκαλάκια δειγματοληψίας BOD. ....  | 32 |
| Εικόνα 5.8 Θερμοαντιδραστήρας τύπου LT200. ....  | 33 |
| Εικόνα 5.9 Φωτόμετρο τύπου DR1900. ....  | 33 |
| Εικόνα 5.10 Θερμιδόμετρο βόμβας οξυγόνου (XRY-1A Oxygen Bomb Calorimeter). ....  | 35 |



|   |    |
|---|----|
| Εικόνα 5.11 Τοποθέτηση βόμβας οξυγόνου στο θερμιδόμετρο.....                | 35 |
| Εικόνα 6.1 Θάλαμος ηλιακής ξήρανσης ιλύος στον ΧΥΤΑ Χερσονήσου Κρήτης. .... | 43 |

## Κατάλογος πινάκων

|   |    |
|---|----|
| Πίνακας 2.1 Οριακές τιμές (για 95% δειγμάτων). ....                                     | 18 |
| Πίνακας 2.2 Ολικά φορτία προς επεξεργασία (kg/day).....                                 | 18 |
| Πίνακας 2.3 Συγκεντρώσεις εισόδου (mg/L) (Βρυλλάκης, 2010).....                         | 19 |
| Πίνακας 5.1 Συντελεστές για τον υπολογισμό του BOD (Παντίδου, 2019). ....               | 32 |
| Πίνακας 6.1 Απομάκρυνση TSS (%) από μικροκόσκινο. ....                                  | 39 |
| Πίνακας 6.2 Υπολογισμοί ισοζυγίων. ....   | 40 |
| Πίνακας 6.3 Μετρήσεις VS (%) εκ των TS (%).....   | 41 |
| Πίνακας 9.1 Υπολογισμός μίγματος τροφοδοσίας της μηχανής εσωτερικής καύσης. ....        | 56 |
| Πίνακας 9.2 Υπολογισμός της σύστασης των καυσαερίων της μηχανής εσωτερικής καύσης. .... | 56 |

## Κατάλογος διαγραμμάτων

|  |    |
|--|----|
| Διάγραμμα 6.1 TSS εισόδου χωρίς την λειτουργία του μικροκόσκινου.....  | 36 |
| Διάγραμμα 6.2 TSS εισόδου – εξόδου, χωρίς την λειτουργία του μικροκόσκινου (μέρος 1). ....                                   | 37 |
| Διάγραμμα 6.3 TSS εισόδου – εξόδου, χωρίς την λειτουργία του μικροκόσκινου (μέρος 2). ....                                   | 37 |
| Διάγραμμα 6.4 BOD <sub>5</sub> εισόδου – εξόδου χωρίς την λειτουργία του μικροκόσκινου.....                                  | 38 |
| Διάγραμμα 6.5 COD εισόδου – εξόδου χωρίς την λειτουργία του μικροκόσκινου. ....  | 38 |
| Διάγραμμα 6.6 TSS εισόδου – εξόδου μικροκόσκινου.....  | 39 |
| Διάγραμμα 6.7 Υγρασία μικροκοσκινισμένων στερεών.....  | 41 |
| Διάγραμμα 6.8 Ανώτερη Θερμογόνος Δύναμη (HHV) μικροκοσκινισμένων βιοστερεών. ....  | 42 |
| Διάγραμμα 6.9 Ανώτερη Θερμογόνος Δύναμη (HHV) μικροκοσκινισμένων βιοστερεών σε σύγκριση με άλλων καυσίμων ή βιοστερεών. .... | 42 |

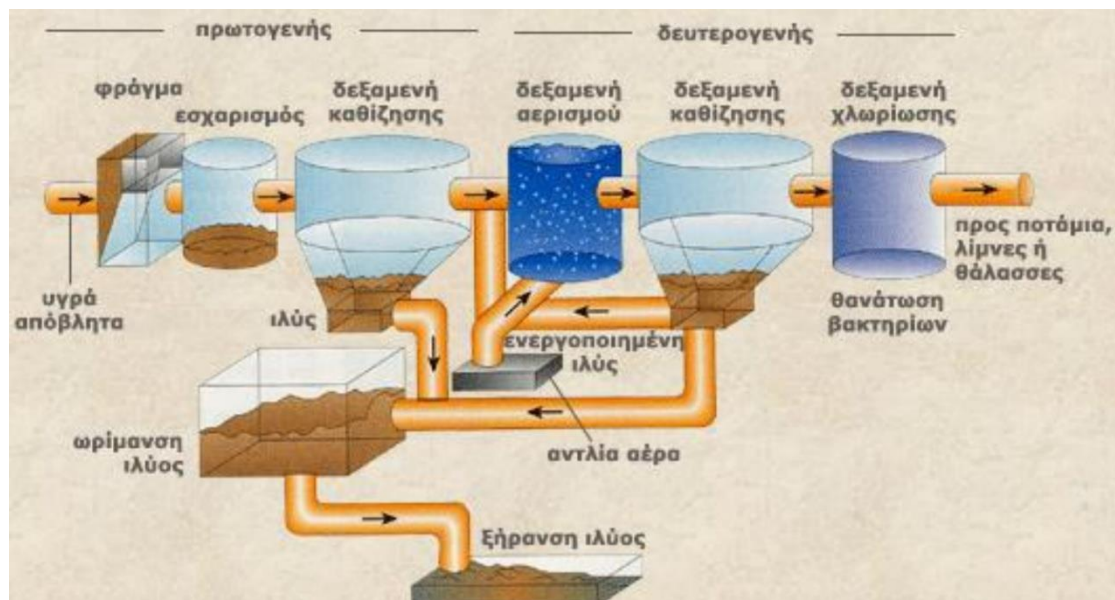
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Υγρά απόβλητα - Βιοστερεά

### 1.1 Εισαγωγή

Η επεξεργασία των λυμάτων στοχεύει στην ελαχιστοποίηση των συνεπειών της διάθεσης λυμάτων στο περιβάλλον. Με τις κατάλληλες διαδικασίες εξουδετερώνονται ή αφαιρούνται τα συστατικά των λυμάτων που ρυπαίνουν ή μολύνουν το περιβάλλον (Διαλυνάς, 1994). Τα υγρά απόβλητα που συλλέγονται από τους δήμους και τους οικισμούς πρέπει τελικά να επιστρέψουν στους υδάτινους αποδέκτες από όπου παρελήφθησαν αρχικά ή στο έδαφος ή να επαναχρησιμοποιηθούν (Metcalf and Eddy, 2017). Με την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων στις Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) παράγεται αξιόλογη ποσότητα βιοστερεών. Η επαναχρησιμοποίηση ή ενεργειακή αξιοποίηση τους θεωρείται η προτιμότερη και φιλικότερη ως προς το περιβάλλον, συγκριτικά με τη διάθεση τους σε Χώρους Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ). Ο ορισμός που θα μπορούσε να δοθεί για την ιλύ είναι ο παρακάτω: το στερεό υπόλειμμα που προκύπτει από την επεξεργασία λυμάτων, όταν διαχωρίζεται το υγρό και στερεό φορτίο. Οι κατηγορίες ιλύος που προκύπτουν ανάλογα με το στάδιο επεξεργασίας των λυμάτων είναι οι παρακάτω:

- Η πρωτοβάθμια ιλύς, η οποία παράγεται κατά την πρωτοβάθμια επεξεργασία των λυμάτων.
- Η βιολογική ιλύς, η οποία παράγεται κατά τη δευτεροβάθμια επεξεργασία των λυμάτων.
- Η μικτή (ομογενοποιημένη) ιλύς, η οποία προκύπτει από την ανάμειξη πρωτοβάθμιας και βιολογικής ιλύος.
- Η τριτοβάθμια ιλύς, η οποία παράγεται κατά την τριτοβάθμια επεξεργασία των λυμάτων.

Το υλικό που προκύπτει μετά από την πλήρη επεξεργασία της ιλύος (Εικόνα 1.1) είναι ακίνδυνο και μπορεί να καταλήξει δίχως επιπτώσεις στο περιβάλλον.



Εικόνα 1.1 Σχηματική αναπαράσταση επεξεργασία ιλύος (Στεφανάκης, 2022).

### 1.2 Παραγωγή και χαρακτηριστικά υγρών αποβλήτων

Κάθε κοινότητα παράγει υγρά και στερεά απόβλητα. Τα υγρά απόβλητα είναι η παροχή νερού στην κοινότητα που έχει υποβαθμιστεί λόγω διαφόρων χρήσεων (Στεφανάκης, 2022). Ως υγρά απόβλητα ορίζονται υγρές ουσίες, οι οποίες προκύπτουν από οικιακές, βιομηχανικές ή εμπορικές χρήσεις. Ακόμα δύναται να περιλαμβάνουν επιφανειακά νερά και όμβρια ύδατα (Metcalf & Eddy, 2017). Αξίζει να σημειωθεί ότι όσο περισσότερο παραμένουν χωρίς αερισμό, τόσο περισσότερο δύσοσμα είναι.

Τα χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων ποικίλουν ανάλογα με τις συνθήκες και το βιοτικό επίπεδο, την επάρκεια νερού, τις εισροές βρόχινου νερού και την διάθεση βιομηχανικών ή ειδικών αποβλήτων στο δίκτυο αποχέτευσης (Διαλυνάς, 1994). Τα λύματα χαρακτηρίζονται από ορισμένα ποιοτικά χαρακτηριστικά και περιέχουν διαλυμένες και αιωρούμενες, οργανικές και ανόργανες ουσίες.

Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων διακρίνονται σε τέσσερις βασικές κατηγορίες:

- Φυσικά (οσμή, χρώμα, θολότητα, θερμοκρασία, κλπ.).
- Ανόργανα χημικά (pH, αλκαλικότητα, κλπ.).
- Οργανικά χημικά (αμμωνία, συναφείς αζωτούχες ενώσεις, κλπ.).
- Βιολογικά (βακτήρια, μικροοργανισμοί, κλπ.).

Αναλυτικότερα, τα φρέσκα υγρά απόβλητα έχουν συνήθως, ανοιχτό καφέ - γκρι χρώμα, ενώ όσο περνάει ο χρόνος αποκτούν σκούρο γκρι - μαύρο χρώμα. Επίσης, η μέση τυπική τιμή θερμοκρασίας των αποβλήτων είναι 15,6 °C και αποτελεί σημαντική παράμετρο για τον σχεδιασμό και την λειτουργία των βιολογικών διεργασιών κατά την επεξεργασία των λυμάτων, εξαιτίας της επίδρασης της στο ρυθμό των χημικών αντιδράσεων και στην υδάτινη ζωή. Το χρώμα οφείλεται σε κολλοειδή στερεά και διαλυμένες ουσίες φυσικής προέλευσης ή σε τεχνητές χρωστικές ουσίες. Η θολότητα προέρχεται από αιωρούμενα και κολλοειδή στερεά και εκφράζει την απουσία διαύγειας στο δείγμα του αποβλήτου (μονάδες θολότητας NTU).

Τα αστικά απόβλητα περιέχουν οργανικές ουσίες (υδατάνθρακες, πρωτεΐνες, λίπη, έλαια, φαινόλες), ανόργανες ουσίες (άζωτο, φώσφορο, διάφορα άλατα) και μερικά στερεά. Περιέχουν επίσης ουσίες οι οποίες βρίσκονται σε κολλοειδή μορφή, μικροοργανισμούς, τοξικές ουσίες, μέταλλα, ιχνοστοιχεία καθώς και διαλυμένα αέρια, όπως αμμωνία και υδρόθειο (Ψυλλάκη, 2014).

### **1.3 Παραγωγή και χαρακτηριστικά βιοστερεών**

Τα βιοστερεά είναι τα οργανικά υπολείμματα (ιλύς) που δημιουργούνται κατά την πρωτοβάθμια και τη δευτεροβάθμια καθίζηση των αστικών λυμάτων, τα οποία δύναται να διατεθούν στο περιβάλλον, εάν υποστούν την ενδεδειγμένη επεξεργασία. Η σύνθεση της ιλύος εξαρτάται από το στάδιο στο οποίο συλλέχθηκε. Ανάλογα με το στάδιο μεταβάλλεται και ο βαθμός αφυδάτωσης της. Η ποσότητα της παραγόμενης ιλύος εξαρτάται από το ρυπαντικό φορτίο, τις συνθήκες της μονάδας επεξεργασίας και προφανώς από τον όγκο των λυμάτων. Η ιλύς παρουσιάζει υψηλή περιεκτικότητα σε οργανικά συστατικά και αν υποστεί κατάλληλη επεξεργασία δύναται να συμβάλλει στην αύξηση της γονιμότητας του εδάφους.

Όταν μεγάλες ποσότητες αποβλήτων απορρίπτονται στο περιβάλλον, προκύπτουν σοβαρές καταστάσεις ρύπανσης, όπως η μειωμένη ικανότητα αυτοκαθαρισμού των υδάτων, ο ευτροφισμός και επιπτώσεις στα οικοσυστήματα. Για την επίλυση αυτών των προβλημάτων έχουν αναπτυχθεί

ποικίλες μέθοδοι επεξεργασίας αστικών και βιομηχανικών λυμάτων. Τα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων περιλαμβάνουν πρωτοβάθμια, δευτεροβάθμια και τριτοβάθμια επεξεργασία. Η επεξεργασία των λυμάτων παράγει παραπροϊόντα, όπως άμμο, ιλύς, εσχαρίσματα στα οποία απαιτείται να γίνει η ενδεδειγμένη επεξεργασία πριν τη διάθεσή τους. Η επεξεργασία της ιλύος καταλήγει στη παραγωγή βιοστερεών και η διαχείριση αυτών αποτελεί μια μεγάλη περιβαλλοντική και οικονομική πρόκληση.

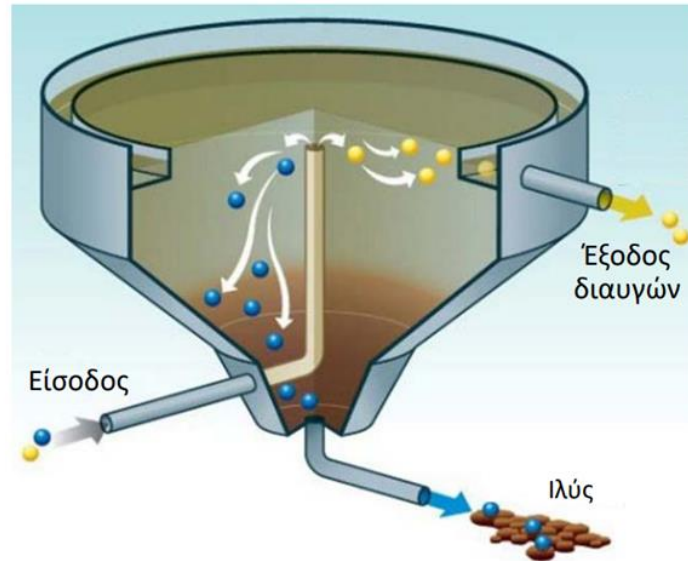
## **1.4 Συμβατικές μέθοδοι επεξεργασίας υγρών αποβλήτων**

### **1.4.1 Προ - επεξεργασία και πρωτοβάθμια επεξεργασία**

Για την προεπεξεργασία υγρών αποβλήτων χρησιμοποιούνται η ανύψωση, η εσχάρωση, η εξάμμωση και η λιποσυλλογή. Το αντλιοστάσιο ανύψωσης είναι απαραίτητο εφόσον τα υγρά απόβλητα εισέρχονται από χαμηλότερο ύψος σε σχέση με την ΕΕΛ και πρέπει να ανυψωθούν για να επιτρέπουν την φυσική ροή στα επόμενα στάδια επεξεργασίας. Οι εσχάρες αποτελούνται από παράλληλες μεταλλικές ράβδους που παρατάσσονται με διάκενα. Η διάμετρος εξαρτάται από τα σωματίδια (5 έως 150mm). Στην εσχάρωση πραγματοποιείται διέλευση λυμάτων μέσα από σχάρες και σκοπός της είναι η απομάκρυνση ογκωδών υλικών (χαρτιά, πλαστικά, κλαδιά), με αποτέλεσμα να μειώνεται η φθορά μηχανολογικού εξοπλισμού και η έμφραξη αγωγών. Στην εξάμμωση πραγματοποιείται διέλευση λυμάτων από δεξαμενή, με σκοπό την απομάκρυνση ανόργανων σωματιδίων λόγω βαρύτητας (κόκκων άμμου, σωματιδίων αργίλου ή άλλων σωματιδίων διαμέτρου μεγαλύτερης από 200  $\mu\text{m}$  που δεν είναι οργανικά), με αποτέλεσμα την προστασία μηχανικού εξοπλισμού από φθορές λόγω τριβών και μείωση συχνότητας καθαρισμού αντιδραστήρων (Στασινάκης, 2015).

Τα αστικά απόβλητα πολλές φορές περιέχουν μεγάλες ποσότητες λιπών, ελαίων και είναι αναγκαίο να αφαιρεθούν, διότι προξενούν προβλήματα στις ΕΕΛ. Η λιποσυλλογή πραγματοποιείται σε κανάλια, ενώ τα λίπη ωθούνται με επιφανειακά ξέστρα, σε φρεάτιο συλλογής λιπών, απ' όπου και αντλούνται με βυτιοφόρο για περαιτέρω επεξεργασία στους χωνευτές αερόβιας σταθεροποίησης της δευτεροβάθμιας λάσπης (Βρυλλάκης, 2010).

Η δεξαμενή πρωτοβάθμιας επεξεργασίας χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση οργανικού υλικού των λυμάτων που βρίσκεται σε σωματιδιακή μορφή (Εικόνα 1.2). Απομακρύνονται αιωρούμενα στερεά με διάμετρο 1 - 100  $\mu\text{m}$  με σκοπό την μείωση των Ολικών Αιωρούμενων Στερεών (Total Suspended Solids, TSS), του φορτίου Βιοχημικού Απαιτούμενου Οξυγόνου (Biochemical Oxygen Demand, BOD) και του φορτίου Χημικού Απαιτούμενου Οξυγόνου (Chemical Oxygen Demand, COD). Συνήθως, στις ΕΕΛ χρησιμοποιούνται δεξαμενές κυκλικής διατομής ωστόσο υπάρχουν και ορθογωνικής διατομής. Επίσης, το ίζημα συλλέγεται με μηχανικά ξέστρα και αποστέλλεται για μετεπεξεργασία, ενώ η υπερχειλίση της δεξαμενής συνεχίζει στα επόμενα στάδια της επεξεργασίας. (Σημείωση: Στην ΕΕΛ Ρεθύμνου δεν υπάρχει δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης, ωστόσο υπάρχει δεξαμενή παρατεταμένου αερισμού).



Εικόνα 1.2 Κυκλική δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης (Γκίκας, 2020).

#### 1.4.2 Δευτεροβάθμια επεξεργασία

Στην δευτεροβάθμια επεξεργασία απομακρύνονται μόνο μικροοργανισμοί και μεταβάλλεται μόνο η τιμή των TSS από τα χαρακτηριστικά του αποβλήτου. Ο σχεδιασμός των δεξαμενών (Εικόνα 1.3, 1.4) απαιτεί εμπειρία, αφού η δευτεροβάθμια ιλύς παρουσιάζει μειωμένη ικανότητα διαχωρισμού σε σχέση με την πρωτοβάθμια ιλύ. Στην βιολογική επεξεργασία χρησιμοποιούνται μικροοργανισμοί, οι οποίοι πολλαπλασιάζονται καταναλώνοντας την οργανική ύλη στα λύματα και απομακρύνονται μεταγενέστερα, με καθίζηση. Όσο αναφορά την δευτεροβάθμια καθίζηση, η αιωρούμενη βιολογική μάζα καθιζάνει και απομακρύνεται με την μορφή λάσπης. Τα προβλήματα που ενδεχομένως να υπάρξουν από την λειτουργία της Δεξαμενής Δευτεροβάθμιας Καθίζησης (ΔΔΚ) είναι τα παρακάτω: διόγκωση ιλύος, αφρισμός ιλύος, ανύψωση ιλύος και ανύψωση ιλύος σε ογκομετρικό κύλινδρο (Γκίκας, 2020).



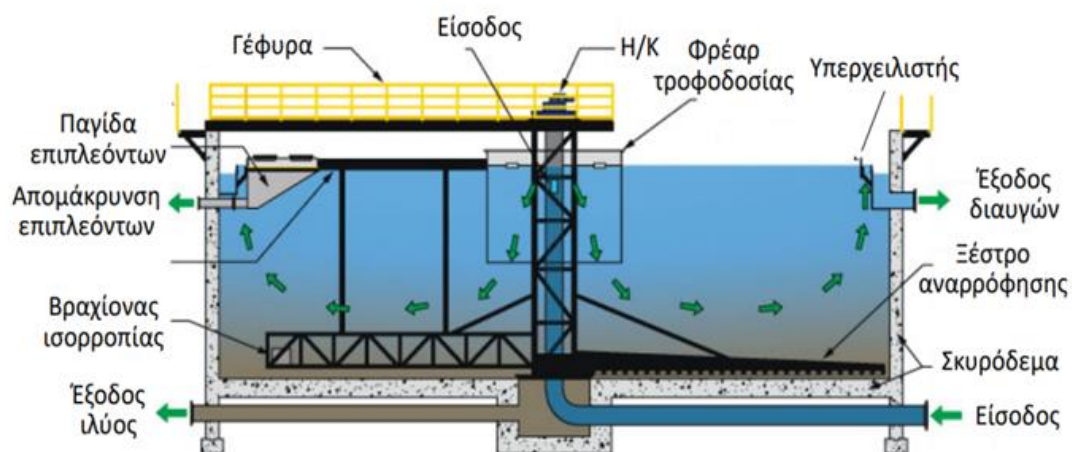


Ορθογωνικής διατομής



Κυκλικής διατομής

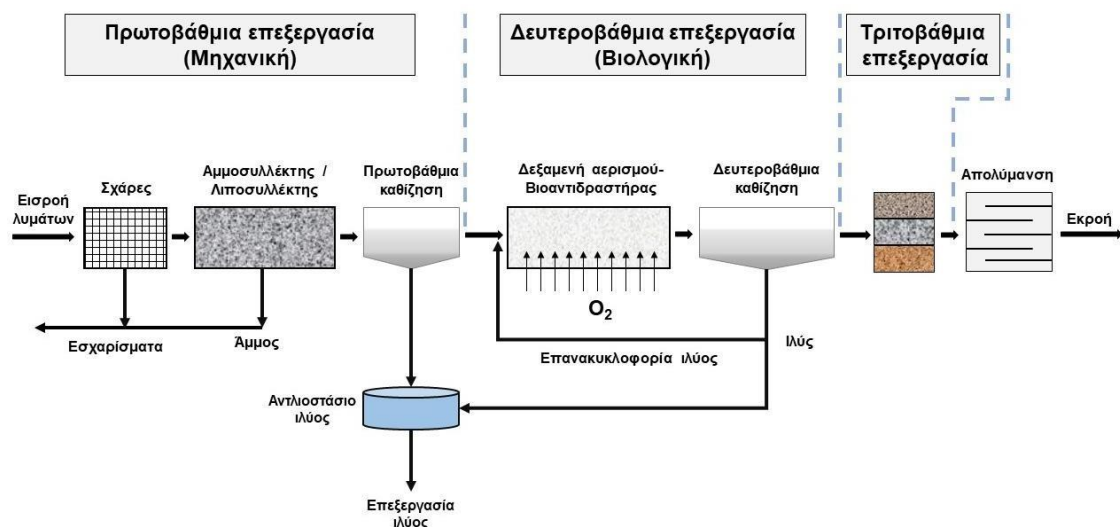
Εικόνα 1.3 Τύποι δεξαμενών δευτεροβάθμιας καθίζησης (Γκίκας, 2020).



Εικόνα 1.4 Ροή σε κυκλική ΔΔΚ (Γκίκας, 2020).

### 1.4.3 Τριτοβάθμια επεξεργασία

Η τριτοβάθμια επεξεργασία αποσκοπεί στην παραγωγή εκροής υψηλής ποιότητας για διάθεση των επεξεργασμένων λυμάτων σε ευαίσθητο υδάτινο αποδέκτη ή όταν η εκροή θα χρησιμοποιηθεί για άρδευση. Κατά την τριτοβάθμια επεξεργασία το υγρό απόβλητο διέρχεται από επιπλέον στάδια επεξεργασίας μετά το τέλος της δευτεροβάθμιας (Εικόνα 1.5) με σκοπό την ελάττωση: του BOD, αζώτου, φωσφόρου και των αιωρούμενων στερεών. Γενικά, συμβάλλει στην αφαίρεση όλων των μικροβίων. Η τριτοβάθμια επεξεργασία δεν θεωρείται απαραίτητη, εάν η επεξεργασία των υγρών αποβλήτων δεν αποσκοπεί σε υψηλή απορρύπανση της ρύπανσης (Νταρακάς, 2016).



Εικόνα 1.5 Διάγραμμα ροής ΕΕΛ, γραμμή επεξεργασίας λυμάτων με τη μέθοδο της ενεργού ιλύος (Νταρακάς, 2010).

#### 1.4.4 Απολύμανση

Τα είδη απολύμανσης διακρίνονται σε: χλωρίωση, οζονισμό και ακτινοβολία UV (Εικόνα 1.6). Ο οζονισμός είναι η πιο αποτελεσματική μέθοδος αλλά και η πιο ακριβή. Η χλωρίωση γίνεται με εφαρμογή είτε αερίου χλωρίου ( $\text{Cl}_2$ ), είτε διοξειδίου του χλωρίου ( $\text{ClO}_2$ ), είτε διαλύματος υποχλωριώδους νατρίου ( $\text{NaOCl}$ ) είτε υποχλωριώδους ασβεστίου ( $\text{Ca(OCl)}_2$ ), τα οποία μπορούν να καταστρέψουν ένζυμα, μικροοργανισμούς και βακτήρια. Προτιμάται να χρησιμοποιείται το χλώριο σε υγρή μορφή διότι είναι εύχρηστο και πιο ακίνδυνο για τον εργαζόμενο. Ο χρόνος παραμονής στην δεξαμενή χλωρίωσης είναι περίπου 2h. Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί η απολύμανση με συσκευές υπεριώδους ακτινοβολίας. Αυτή η μέθοδος έχει μεγάλο αρχικό κόστος, έχει όμως λειτουργικό κόστος συγκρίσιμο με την χλωρίωση (Διαλυνάς, 1994). Ο χρόνος παραμονής στις συσκευές UV είναι μερικά δευτερόλεπτα. Στην ΕΕΛ Ρεθύμνου χρησιμοποιείται η χλωρίωση (Εικόνα 1.7) και γίνεται με υποχλωριώδες νάτριο. Υπάρχει κατασκευασμένη δεξαμενή, ωφέλιμου όγκου  $560 \text{ m}^3$ .



Εικόνα 1.6 Χλωρίωση, Οζονισμός, Ακτινοβολία UV (Γκίκας, 2020).



Εικόνα 1.7 Δεξαμενή απολύμανσης ΕΕΛ Ρεθύμνου.

#### 1.4.5 Γραμμή Επεξεργασίας Ιλύος

Η επεξεργασία της ιλύος περιλαμβάνει τα εξής στάδια: ομογενοποίηση, πάχυνση, αναερόβια χώνευση, αφυδάτωση και κομποστοποίηση. Με την παραπάνω επεξεργασία δημιουργείται ένα σταθεροποιημένο τελικό προϊόν, με αποτέλεσμα η διάθεση του στο περιβάλλον να μην αποτελεί κίνδυνο για τον άνθρωπο.

Γενικά, σε μία ΕΕΛ η καθίζηση εφαρμόζεται (Σκουντούρογλου, 2019):

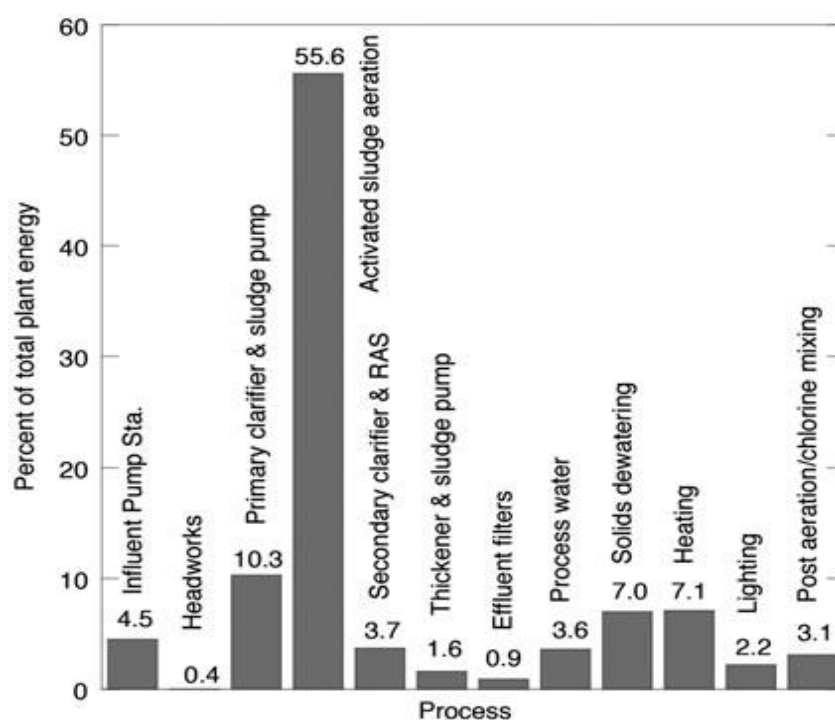
- Για την απομάκρυνση του άμμου στις αμμοσυλλέκτες.
- Για την απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών (πρωτοβάθμια καθίζηση).
- Για την απομάκρυνση των βιολογικών κροκίδων μετά από βιολογική επεξεργασία (δευτεροβάθμια καθίζηση).
- Για την απομάκρυνση των χημικών κροκίδων (σε περίπτωση χημικής κροκίδωσης).
- Για την πάχυνση των στερεών στους παχυντές ιλύος.

#### 1.5 Ενεργειακές απαιτήσεις επεξεργασίας υγρών αποβλήτων

Οι ΕΕΛ συμβάλλουν σε μικρή κλίμακα στην αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Κατά την επεξεργασία παράγονται:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  και  $\text{N}_2\text{O}$  ενώ παράλληλα εκπέμπουν επιπλέον  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  εξαιτίας των ενεργειακών τους απαιτήσεων που έχει σαν αποτέλεσμα την κατανάλωση υγρών καυσίμων. Τα τελευταία είκοσι χρόνια, εξαιτίας της αύξησης των υγρών λυμάτων, έχει οδηγήσει σε αντίστοιχη αύξηση των εγκαταστάσεων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Σε συνδυασμό με την αυστηροποίηση της νομοθεσίας για την ποιότητα εκροής των εγκαταστάσεων οδήγησε στην εισαγωγή νέων, πιο ενεργοβόρων τεχνολογιών (Nakagawa et al., 2006). Γενικά, οι ενεργειακές ανάγκες των εγκαταστάσεων υψηλές. Παράλληλα το κόστος της κλοβατώρας αυξάνεται λόγω του παγκόσμιας αύξησης τιμών. Η ποσότητα ενέργειας που χρειάζεται κάθε μονάδα εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της κάθε μονάδας. Αναλυτικότερα οι κύριοι παράγοντες είναι το μέγεθος της ΕΕΛ, η



χρησιμοποιούμενη τεχνολογία και τα χαρακτηριστικά του λύματος που εισέρχεται στην μονάδα προς επεξεργασία (Εικόνα 1.8). Επίσης, σημαντικός παράγοντας είναι η ηλικία της εγκατάστασης. Ακόμα όσο υψηλότερη είναι η απαιτούμενη εκροή, τόσο υψηλότερη είναι η κατανάλωση ενέργειας. Το πρόβλημα αυτό είναι εντονότερο στο νησιωτικό μέρος της Ελλάδας, όπου υπάρχουν μικρές ΕΕΛ με υψηλή κατανάλωση ενέργειας. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η κατανάλωση ενέργειας των συγκεκριμένων εγκαταστάσεων υπολογίζεται ότι μελλοντικά θα αυξηθεί λόγω του υψηλότερου πληθυσμού. Με αποτέλεσμα να υπερφορτωθούν οι μονάδες με μεγαλύτερες ποσότητες λυμάτων. Στο προαναφερόμενο φαινόμενο συμβάλλει και η αυστηρότερη νομοθεσία σχετικά με την ποιότητα εκροής για επαναχρησιμοποίηση ή διάθεση σε ευαίσθητο υδάτινο αποδέκτη. Απαιτείται περαιτέρω έρευνα για την βελτιστοποίηση των μεθόδων επεξεργασίας.

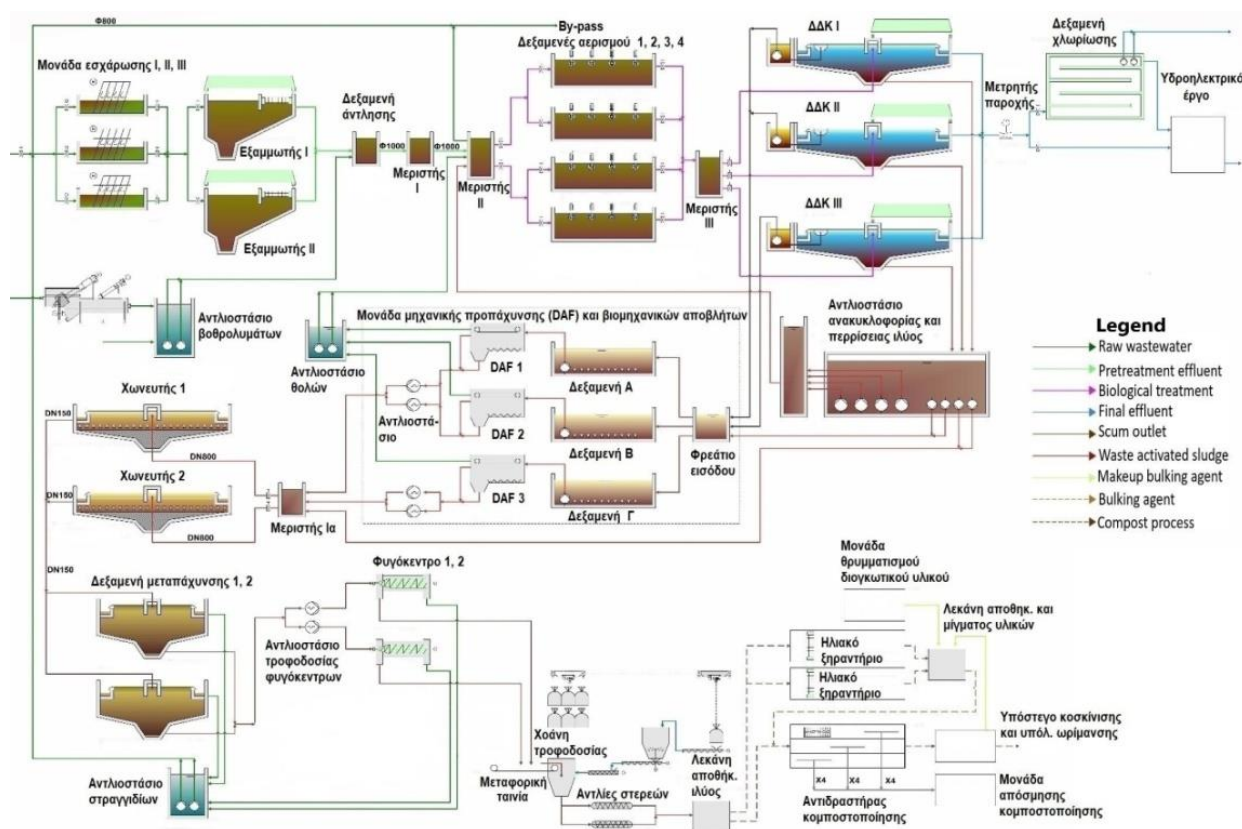


Εικόνα 1.8 Ποσοστιαία κατανάλωση ενέργειας ανά στάδιο επεξεργασίας (Gikas and Tsoutsos, 2015).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΕΕΛ Ρεθύμνου

### 2.1 Γενικές Πληροφορίες - Νομοθετικά όρια

Η ΕΕΛ Ρεθύμνου κατασκευάστηκε με σκοπό να εξυπηρετεί πληθυσμό 90.000 ισοδύναμων κατοίκων. Επίσης κατασκευάστηκε για να εξυπηρετεί τον χειμώνα 96.000 ισοδύναμο πληθυσμό, το θέρους 126.200 με αιχμή θέρους 151.750 (Εικόνα 2.1, 2.2). Επίσης, εξυπηρετεί φορτία λυμάτων που προέρχονται από τον Δήμο Ρεθύμνου αλλά και των οικισμών του, όσο και από την ξενοδοχειακή ζώνη και τη ζώνη των ενδιαμέσων οικισμών του Δήμου Αρκαδίου, όπως επίσης και από τους οικισμούς Ατσιπόπουλο, Πρινές, Γεράνι του επίσης όμορου Δήμου Νικηφόρου Φωκά αλλά ακόμα και για ποσότητες βοθρολυμάτων από το Ρέθυμνο και γειτονικούς οικισμούς, καθώς και τα βιομηχανικά απόβλητα που ήδη δέχεται η ΕΕΛ, μετά από εγκατάσταση προεπεξεργασίας, καθώς και πιθανά μελλοντικά φορτία από τα αποφρακτικά μηχανήματα της ΔΕΥΑΡ. Στην Ελλάδα, η εναρμόνιση των ΕΕΛ με τις διατάξεις της Ευρωπαϊκής Οδηγίας 91/271/ΕΟΚ έγινε με την έκδοση της ΚΥΑ 5673/400/97: «Μέτρα και όροι για την επεξεργασία των αστικών λυμάτων» (ΦΕΚ 192/Β/14-3-97) (Λεγόντης, 2010). Οι μέγιστοι αποδεκτοί μέσοι όροι των συγκεντρώσεων στην έξοδο των εγκαταστάσεων (σύνθετο 24ωρο δείγμα) για περίοδο ενός μηνός στην ΕΕΛ Ρεθύμνου, εμφανίζονται στον Πίνακα 2.1.



Εικόνα 2.1 Σχηματική αναπαράσταση της ΕΕΛ Ρεθύμνου.



Εικόνα 2.2 ΕΕΛ Ρεθύμνου.

Πίνακας 2.1 Οριακές τιμές (για 95% δειγμάτων).

|                             |             |
|-----------------------------|-------------|
| BOD <sub>5</sub>            | < 20 mg/L   |
| COD                         | < 100 mg/L  |
| Αιωρούμενα στερεά (SS)      | < 20mg/L    |
| Αμμωνία, NH <sub>4</sub> -N | < 4mg/L     |
| Νιτρικά, NO <sub>3</sub> -N | < 10mg/L    |
| Ολικό άζωτο, N              | < 16mg/L    |
| Φώσφορος, P                 | < 10 mg/L   |
| Κολοβακτηριοειδή            | < 500/100mL |
| Χλώριο                      | <0,5 mg/L   |

Η ΕΕΛ Ρεθύμνου έχει κατασκευαστεί προκειμένου να εξυπηρετεί τα παρακάτω φορτία για την επόμενη εικοσαετία με τα δεδομένα που εμφανίζονται στους Πίνακες 2.2 και 2.3.

Πίνακας 2.2 Ολικά φορτία προς επεξεργασία (kg/day).

| Παράμετροι εισόδου - εξόδου      | Χειμώνας | Θέρος | Αιχμή Θέρους |
|----------------------------------|----------|-------|--------------|
| Συνολικό φορτίο BOD <sub>5</sub> | 5.760    | 7.572 | 9.105        |
| Συνολικό φορτίο SS               | 6.144    | 6.548 | 7.284        |
| Συνολικό φορτίο N                | 768      | 885   | 1.147        |
| Συνολικό φορτίο P                | 288      | 370   | 455          |

Πίνακας 2.3 Συγκεντρώσεις εισόδου (mg/L) (Βρυλλάκης, 2010).

| Συγκεντρώσεις εισόδου | Χειμώνας | Θέρος | Αιχμή Θέρους |
|-----------------------|----------|-------|--------------|
| BOD <sub>5</sub>      | 300      | 342   | 323          |
| SS                    | 320      | 296   | 259          |
| N                     | 40       | 40    | 41           |
| P                     | 15       | 17    | 16           |

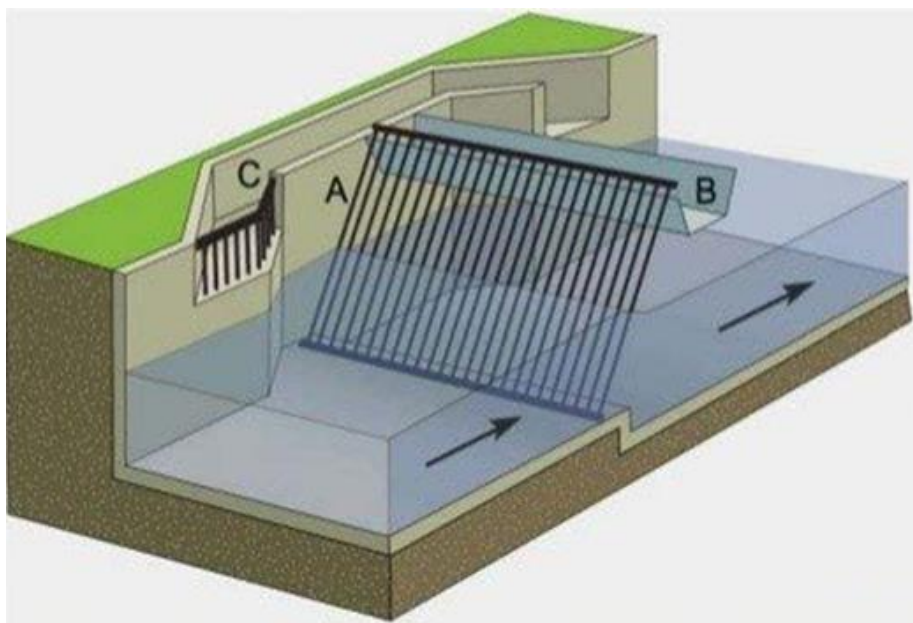
## 2.2 Περιγραφή σταδίων επεξεργασίας λυμάτων

### 2.2.1 Φρεάτιο άφιξης λυμάτων

Στην ΕΕΛ Ρεθύμνου, τα υγρά απόβλητα διοχετεύονται μέσω δικτύου αποχέτευσης σε φρεάτιο άφιξης μαζί με τα στραγγίσματα από τα μέρη της εγκατάστασης καθώς και τα επεξεργασμένα βιομηχανικά λύματα. Υπάρχει επίσης ένα σύστημα παράκαμψης που επιτρέπει τη διοχέτευση των λυμάτων απευθείας στον αγωγό εκβολής σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης (Κεχαγιαδάκη, 2019).

### 2.2.2 Εσχάρωση

Τα λύματα, μετά το φρεάτιο εισόδου, οδηγούνται με φυσική ροή στην εσχάρωση, εξάμμωση και λιποσυλλογή. Η εσχάρωση αποτελείται από 2 κύρια κανάλια και 3<sup>ο</sup> εφεδρικό, τα δύο εκ των οποίων είναι εξοπλισμένα με ευθύγραμμες αυτοκαθαριζόμενες εσχάρες. Τα εσχαρίσματα οδηγούνται από μεταφορική ταινία, σε δοχείο αποθήκευσης και αποκομιδής. Στην παρακάτω εικόνα στο σημείο Α φαίνεται η επίπεδη σχάρα τοποθετημένη στο κανάλι ροής. Στο σημείο Β εμφανίζεται το κανάλι στράγγισης και απομάκρυνσης εχарισμάτων, ενώ στο σημείο C είναι το κανάλι παράκαμψης ροής εφοδιασμένο με χειρωνακτική καθαριζόμενη σχάρα (Εικόνα 2.2). Επίσης, η εσχάρωση και η εξάμμωση στεγάζονται σε ξεχωριστά κτίρια, τα οποία εξαερίζονται μέσω αεραγωγών που οδηγούν τον αέρα στο κεντρικό σύστημα απόσμησης της εγκατάστασης, το οποίο βρίσκεται δίπλα στο κτίριο των εσχάρων (Βρυλλάκης, 2010).

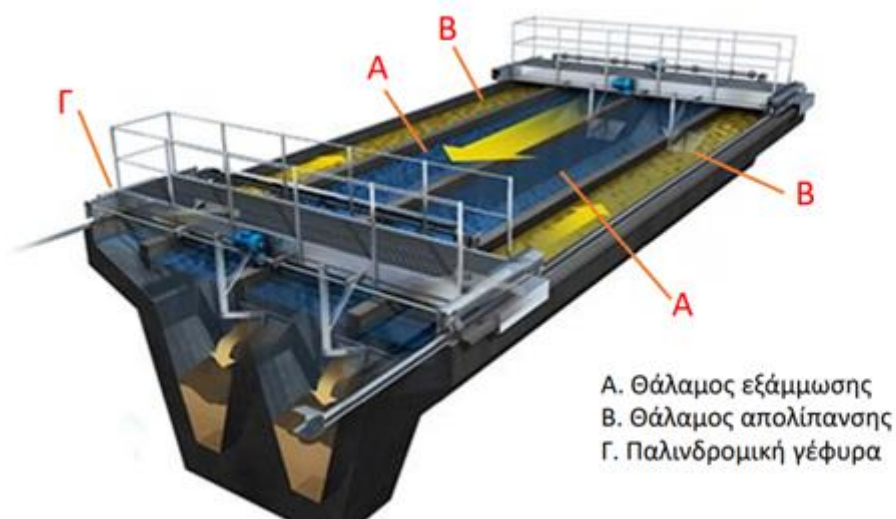


Εικόνα 2.3 Εσχάρωση (Γκίκας, 2020).

### 2.2.3 Εξάμμωση

Μετά την εσχάρωση τα λύματα περνούν στον εξαμμωτή που αποτελείται από 2 παράλληλα κανάλια, τα οποία είναι πλήρως εξοπλισμένα. Η μονάδα εσχάρωσης και εξάμμωσης των βοθρολυμάτων, είναι δυναμικότητας  $90 \text{ m}^3/\text{h}$  και κατάλληλη για την απομάκρυνση στερεών βοθρολυμάτων με μέγιστη συγκέντρωση στερεών  $15.000 \text{ mg/L}$ . Ο εξαμμωτής απομονώνεται με θυροφράγματα ανάντη της εσχάρωσης και είναι αεριζόμενος για την ελεγχόμενη ανάδευση των λυμάτων. Η άμμος που συγκεντρώνεται σε εκβάθυνση του πυθμένα, σαρώνεται από κινητή γέφυρα και απομακρύνεται με αντλίες άμμου που τροφοδοτούν αυτόματο σύστημα διαχωρισμού της άμμου. Η άμμος καθιζάνει στον πυθμένα του εξαμμωτή και συλλέγεται με κοχλία στο ανάντη άκρο της δεξαμενής. Η διαχωριζόμενη άμμος αδειάζεται στο κουβά φορτωτή και στην συνέχεια μεταφέρεται προς αποκομιδή. Παράλληλα με τον εξαμμωτή υπάρχει κανάλι ηρεμίας της ροής για την επίπλευση των λιπών, τα οποία συλλέγονται με τη βοήθεια του επιφανειακού ξέστρου της κινητής γέφυρας και αποθηκεύονται σε φρεάτιο (Εικόνα 2.3). Έπειτα, τα λίπη μεταφέρονται στους αερόβιους χωνευτές με βυτιοφόρο (Μ. Βρυλλάκης, 2010).





Εικόνα 2.4 Μονάδα εξάμμωσης (Γκίκας, 2020).

#### 2.2.4 Βιολογική επεξεργασία

Στην ΕΕΛ Ρεθύμνου, η επεξεργασία των λυμάτων πραγματοποιείται με την μέθοδο του παρατεταμένου αερισμού. Με την συγκεκριμένη διαδικασία πραγματοποιείται απομάκρυνση του φωσφόρου και του αζώτου. Μετά την εξάμμωση, τα υγρά απόβλητα υπερχειλίζουν σε κανάλι απ' όπου οδηγούνται στον μεριστή Ι και παρακάμπτοντας τις δύο πρώην δεξαμενές πρωτοβάθμιας καθίζησης οδηγούνται στον μεριστή ΙΙ, όπου επιστρέφει και η ανακυκλοφορία της λάσπης. Το μίγμα λυμάτων και λάσπης (μικτό υγρό) από τον μεριστή ΙΙ, ισοκατανέμεται στις 4 δεξαμενές αερισμού, όπου πραγματοποιείται οξείδωση των οργανικών, νιτροποίηση καθώς και απονιτροποίηση.

Κατά την βιολογική επεξεργασία, το υγρό απόβλητο υποβάλλεται σε αερόβια και αναερόβια επεξεργασία με σκοπό την αποικοδόμηση των οργανικών ουσιών. Το μικτό υγρό υπερχειλίζει στον μεριστή ΙΙΙ και οδηγείται δια βαρύτητας προς τις δεξαμενές τελικής καθίζησης. Στις τρεις δεξαμενές καθίζησης κάτω από συνθήκες ηρεμίας διαχωρίζονται τα στερεά από τα υγρά. Η λάσπη που καθιζάνει επαναανακυκλοφορείται στις δεξαμενές αερισμού μέσω του υφιστάμενου αντλιοστασίου επαναανακυκλοφορίας, ενώ η περίσσεια λάσπη αντλείται με υποβρύχιες αντλίες είτε προς την μονάδα μηχανικής προπάχυνσης DAF, είτε κατευθείαν στους αερόβιους χωνευτές. Η επιπλέον αφρολάσπη στις τρεις δεξαμενές δευτεροβάθμιας καθίζησης συλλέγεται σε τρία αντλιοστάσια και από εκεί αντλείται προς τις τρεις μονάδες προπάχυνσης της δευτεροβάθμιας λάσπης με επίπλευση διαλυμένου αέρα (Βρυλλάκης, 2010).

Στην έξοδο της υφιστάμενης μονάδας εξάμμωσης υπάρχει κανάλι που απολήγει σε φρεάτιο, από το οποίο τροφοδοτείται ο μεριστής Ι. Ο μεριστής αυτός είναι σχεδιασμένος ώστε να διανέμει την παροχή σε δύο δεξαμενές προκαθίζησης. Υπάρχει ακόμη και υπερχειλίση παράκαμψης που κατευθύνει τα λύματα στον μεριστή ΙΙ και έπειτα στις δεξαμενές αερισμού. Η σημερινή λειτουργία γίνεται με παράκαμψη των δεξαμενών πρωτοβάθμιας καθίζησης και διοχέτευση των λυμάτων κατευθείαν στις δεξαμενές αερισμού, μέσω του μεριστή ΙΙ. Οι πρώην δεξαμενές πρωτοβάθμιας καθίζησης έχουν μετατραπεί σε δεξαμενές αερόβιας σταθεροποίησης της ιλύος (Μ. Βρυλλάκης, 2010).

### 2.2.5 Απολύμανση και διάθεση λυμάτων

Στην συνέχεια το υγρό απόβλητο οδηγείται στην υφιστάμενη μονάδα μέτρησης παροχής σε κανάλι Parshall, έπειτα στην υφιστάμενη δεξαμενή χλωρίωσης. Το χλώριο είναι στη μορφή του υποχλωριώδους νατρίου. Στην έξοδο της δεξαμενής πραγματοποιείται αποχλωρίωση των λυμάτων. Μετά την απολύμανση – αποχλωρίωση τα καθαρά οδηγούνται μέσω αγωγού βαρύτητας προς το φρεάτιο φόρτισης του υποθαλάσσιου αγωγού εκβολής. Στο ίδιο φρεάτιο καταλήγουν και τα υγρά των παρακάμφσεων (Μ. Βρυλλάκης, 2010).

### 2.2.6 Επεξεργασία ιλύος

Η επεξεργασία της ιλύος πραγματοποιείται ως εξής: ομογενοποίηση, δεξαμενή πάχυνσης, δεξαμενή αναερόβιας χώνευσης, σύστημα αφυδάτωσης και κομποστοποίηση. Αναλυτικότερα, η διεργασία της πάχυνσης έχει σκοπό την μείωση της περιεχόμενης υγρασίας, δηλαδή μείωση του όγκου της ιλύος. Η πάχυνση επιτυγχάνεται με βαρύτητα, επίπλευση και μηχανικά μέσα. Η περίσσεια ιλύς, είτε μετά τη μονάδα μηχανικής προπάχυνσης DAF, είτε κατευθείαν από το αντλιοστάσιο ανακυκλοφορίας και περίσσειας, οδηγείται στις δύο δεξαμενές αερόβιας χώνευσης. Ο αερισμός γίνεται με σύστημα φυσητήρων –διαχυτών. Από τους αερόβιους χωνευτές, η λάσπη με τη βοήθεια της βαρύτητας οδηγείται στους υφιστάμενους μεταπαχυντές βαρύτητας. Μετά, η λάσπη διοχετεύεται προς το σύστημα μηχανικής αφυδάτωσης, αποτελούμενο από δύο μονάδες φυγοκέντρωσης. Τα υγρά των μεταπαχυντών βαρύτητας και τα υγρά της αφυδάτωσης αποθηκεύονται σε υφιστάμενη δεξαμενή στραγγισμάτων και στην συνέχεια αντλούνται στο φρεάτιο άφιξης της ΕΕΛ (Μ. Βρυλλάκης, 2010).

Η αφυδατωμένη ιλύς μέσω των δύο αντλιών μίξης – μεταφοράς του υφιστάμενου συστήματος προσθήκης ασβέστη οδηγείται στη λεκάνη αποθήκευσης της μονάδας ηλιακής ξήρανσης – κομποστοποίησης. Μέρος της αφυδατωμένης λάσπης οδηγείται σε δύο ηλιακά ξηραντήρια για ξήρανση έως 70% στερεά. Τα ηλιακά ξηραντήρια είναι τύπου θερμοκηπίου μηχανοποιημένα με αναστροφέα του υλικού, ανεμιστήρες ανακυκλοφορίας του αέρα και αυτόματο έλεγχο υγρασίας και θερμοκρασίας. Το ξηρό υλικό εξόδου από τα ηλιακά ξηραντήρια, που ονομάζεται βιόχωμα, αναμιγνύεται με την αφυδατωμένη λάσπη και διογκωτικό υλικό (θρυμματισμένα κλαδιά – ξύλα, ώριμο κομπόστ και το ανακυκλούμενο χονδρόκοκκο κλάσμα κοσκίνισης του κομπόστ) και οδηγείται στα κανάλια της κομποστοποίησης. Η διακίνηση των υλικών γίνεται με δύο φορτωτές. Τα στάδια της αρχικής ζύμωσης και μερικής ωρίμανσης μέσα στο κτίριο της κομποστοποίησης είναι πλήρως μηχανοποιημένα και αυτοματοποιημένα. Η κομποστοποίηση διαθέτει αναστροφέα μείγματος με παράλληλη μετατόπιση στα κανάλια, φυσητήρες αερισμού και απαγωγής της θερμότητας, δίκτυο στραγγισμάτων, αυτόνομο PLC και χημική πλυντρίδα απόσμησης. Η μονάδα ηλιακής ξήρανσης – κομποστοποίησης συμπληρώνεται με το υπόστεγο θρυμματισμού και το υπόστεγο κοσκίνισης και τελικής ωρίμανσης (Μ. Βρυλλάκης, 2010).

Το ώριμο κομπόστ θα πληροί τις προδιαγραφές της ποιότητας Α. Η ποιότητα Α ορίζεται κατά την Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος Αμερικής (U.S. Environmental Protection Agency, EPA) ως εξής:

- Η συγκέντρωση των fecal coliforms κατά την διάθεση του τελικού προϊόντος θα πρέπει να είναι μικρότερη από 1000 αποικίες (cfu) ανά γραμμάριο ξηρών στερεών.
- Η συγκέντρωση της Salmonella spp. θα πρέπει να είναι μικρότερη από 3 αποικίες (cfu) ανά 4 γραμμάρια ξηρών στερεών.

- Η θερμοκρασία μέσα στα κανάλια της κομποστοποίησης θα διατηρείται στους 55°C ή υψηλότερα για δεκαπέντε τουλάχιστον ημέρες.
- Ο χρόνος παραμονής στον αντιδραστήρα ζύμωσης και στην ωρίμανση θα είναι τουλάχιστον 90 ημέρες συνολικά.
- Το τελικό προϊόν θα παραμένει εντελώς άοσμο ακόμα και μετά από δημιουργία συνθηκών επαναζύμωσης, δηλαδή αυξημένη θερμοκρασία και υγρασία (Βρυλλάκης, 2010).

Η ιλύς που καθιζάνει σε κάθε δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης οδηγείται σε κεντρικό υφιστάμενο υγρό θάλαμο, απ' όπου επανανακυκλοφορείται προς το μεριστή II, ενώ τμήμα αυτής απομακρύνεται από το σύστημα και οδηγείται είτε προς τις αεριζόμενες δεξαμενές Α, Β, Γ της μονάδας μηχανικής προπάχυνσης (DAF), είτε προς το μικρό μεριστή πριν τους αερόβιους χωνευτές I και II (Βρυλλάκης, 2010).

### 2.2.7 Υποδοχή – εξισορρόπηση βοθρολυμάτων

Η μονάδα υποδοχής και προεπεξεργασίας βοθρολυμάτων είναι κλειστό σύστημα προκατασκευασθέν ενός στομίου με εσχάρωση και εξάμωση του οποίου η έξοδος με άντληση και μέσω του τεχνικού καναλιού οδηγείται στο μεριστή II πριν τις δεξαμενές αερισμού (Βρυλλάκης, 2010). Η συγκεκριμένη μονάδα έχει δυναμικότητα 90 m<sup>3</sup>/h (Κεχαγιαδάκη, 2019).

### 2.2.8 Υποδοχή – προ-επεξεργασία βιομηχανικών αποβλήτων

Η εγκατάσταση υποδοχής και προεπεξεργασίας των βιομηχανικών αποβλήτων λαμβάνει λύματα από τυροκομία, βυρσοδεψεία και σφαγεία. Η μέθοδος προ-επεξεργασίας των βιομηχανικών αποβλήτων από τα βυρσοδεψεία περιλαμβάνει οξείδωση των θειούχων και χημική κροκίδωση χρωμίου, αιωρούμενων στερεών και λιπών, ενώ η αφαίρεση των ελαίων πραγματοποιείται με επίπλευση. Για τα βιομηχανικά απόβλητα που προέρχονται από τα τυροκομία και τα σφαγεία περιλαμβάνεται η χημική κροκίδωση των TSS, χρωμίου και λιπών, αλλά και η αφαίρεση των λιπών με επίπλευση. Τέλος, τα προ-επεξεργασμένα βιομηχανικά απόβλητα κατευθύνονται στην είσοδο της ΕΕΛ για την περαιτέρω επεξεργασία τους (Κεχαγιαδάκη, 2019).

### 2.2.9 Μονάδα βιομηχανικού νερού

Η δυναμικότητα της μονάδας βιομηχανικού νερού στην ΕΕΛ Ρεθύμνου είναι 50 m<sup>3</sup>/h και διαθέτει διήθηση, απολύμανση και αποθήκευση. Η διήθηση πραγματοποιείται με αμμοδιυλιστήρια καθοδικής ροής και το νερό που προκύπτει από τη διαδικασία της αντίστροφης πλύσης υπερχειλίζει σε πλευρικά κανάλια και καταλήγει στο αντλιοστάσιο αφρών. Το βιομηχανικό νερό τροφοδοτεί ολόκληρη την ΕΕΛ, παράλληλα χρησιμοποιείται και για την άρδευση των εξωτερικών χώρων (Δανδόλου, 2010).



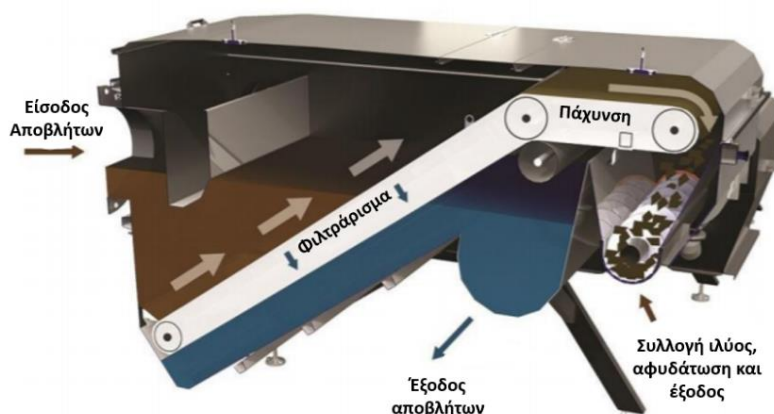
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Μικροκοσκίνιση

Η μικροκοσκίνιση χρησιμοποιείται για να επεξεργαστεί υγρά απόβλητα και αποτελεί μια αποδοτική εναλλακτική μέθοδο αντί της πρωτοβάθμιας καθίζησης, όπου απομακρύνονται κυρίως ογκώδη σωματίδια. Η βασική ιδέα της μικροκοσκίνισης είναι να απομακρυνθούν τα στερεά όσο το δυνατόν πιο γρήγορα και αποδοτικότερα, διευκολύνοντας με αυτόν τον τρόπο την μετέπειτα επεξεργασία. Μέχρι στιγμής, δεν χρησιμοποιείται ευρέως στην Ελλάδα.

### 3.1 Κατηγορίες - Χαρακτηριστικά μικροκόσκινων

#### 3.1.1 Φίλτρα Περιστρεφόμενου Ιμάντα (Rotating Belt Filters, RBFs)

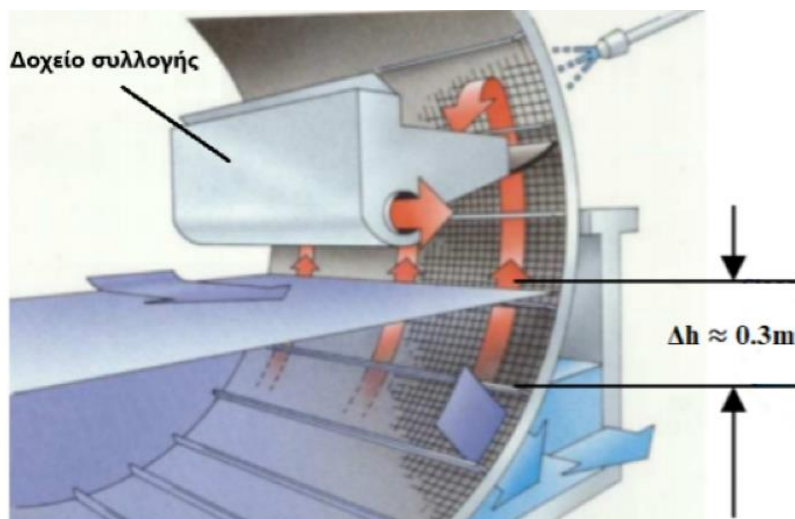
Τα Φίλτρα Περιστρεφόμενου Ιμάντα (Rotating Belt Filters, RBFs) αποτελούνται από σχάρα κόσκινου που περιστρέφεται, που τοποθετείται υπό κλίση και έχει στόχο να απομακρυνθούν τα αιωρούμενα στερεά που η καθίζησή τους χρειάζεται πολύ χρόνο (Εικόνα 3.1). Καθώς εισέρχονται τα λύματα διαμέσου του κόσκινου, γίνεται προσκόλληση των αιωρούμενων στερεών πάνω στο πλέγμα. Παράλληλα, στο άνω άκρο του φίλτρου βρίσκεται ένα αυτόματο σύστημα καθαρισμού για τον καθαρισμό του πλέγματος του φίλτρου και την αφαίρεση τυχόν συσσωρευμένης λάσπης. Η μεταφορά του φιλτραρισμένου αποβλήτου πραγματοποιείται μέσω βαρύτητας στο σημείο εξόδου χωρίς να διακόπτεται η επεξεργασία, ενώ τα συλλεγόμενα στερεά συμπιέζονται και κατευθύνονται για ξήρανση (Lema&Martinez, 2017).



Εικόνα 3.1 Φίλτρο Περιστρεφόμενου Ιμάντα (Rotating Belt Filter, RBF).

#### 3.1.2 Φίλτρα Περιστρεφόμενου Τυμπάνου (Rotating Drum Filters, RDFs)

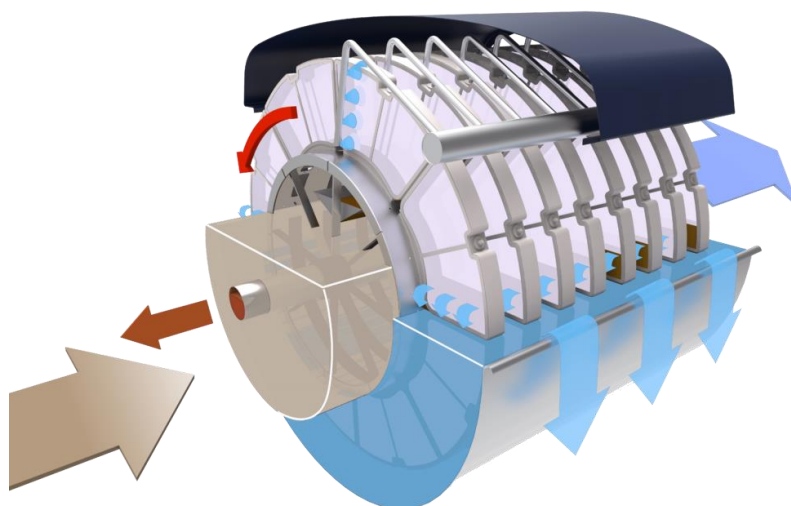
Τα υγρά απόβλητα διέρχονται στο εσωτερικό των Φίλτρων Περιστρεφόμενου Τυμπάνου (Rotating Drum Filters, RDFs) και στοχεύουν στην απομάκρυνση των στερεών που χρειάζεται μεγάλο χρονικό διάστημα για να πραγματοποιηθεί η καθίζηση τους. Ενώ λειτουργεί, τα πιο μεγάλα στερεά κατακρατούνται στους πόρους του φίλτρου, προκαλώντας μια αύξηση της στάθμης του λύματος στο εσωτερικού του. Μόλις η στάθμη του λύματος φτάσει σε μέγιστη τιμή  $\Delta h = 0.3\text{m}$  (Εικόνα 3.2), το RDF περιστρέφεται ξεκινώντας η πλύση υψηλής πίεσης (Carles, 2015).



Εικόνα 3.2 Φίλτρο Περιστρεφόμενου τυμπάνου (Rotating Drum Filter, RDF).

### 3.1.3 Φίλτρα δίσκου (Disc filters)

Ανάλογη τεχνολογία με τα μηχανήματα μικροκοσκίνισης παρουσιάζουν και τα Φίλτρα δίσκου (Disc filters) (Εικόνα 3.3). Και αυτή η μέθοδος στοχεύει στην απομάκρυνση των στερεών που χρειάζονται πολύ χρονικό διάστημα για να καθίση τους. Μετά το τέλος της περιστροφής τους καθαρίζονται με νερό υπό πίεση και τα στερεά εισέρχονται στους ειδικά διαμορφωμένους χώρους αποβλήτων. Η ταχύτητα περιστροφής θεωρείται χαμηλή. Όπως και στις προηγούμενες μεθόδους δεν απαιτείται προσθήκη χημικών. Η συγκεκριμένη τεχνολογία δύναται να χρησιμοποιηθεί σε επεξεργασία αστικών λυμάτων, αντί της πρωτοβάθμιας επεξεργασίας είτε της δευτεροβάθμιας με πολύ μικρότερο φίλτρο πόρων. Η συγκεκριμένη τεχνολογία αν συγκριθεί με συμβατικές μεθόδους για την απομάκρυνση στερεών, το οικολογικό της αποτύπωμα είναι αρκετά λιγότερο.



Εικόνα 3.3 Φίλτρο δίσκου (Disc filter).

## 3.2 Σύγκριση μικροκοσκίνισης με συμβατική πρωτοβάθμια επεξεργασία

**Μειονεκτήματα πρωτοβάθμιας καθίζησης:**

- Μεγάλος χρόνος παραμονής των αποβλήτων με αποτέλεσμα την απώλεια χρόνου και την δυσοσμία.
- Οι δεξαμενές είναι ογκώδεις και ενδεχομένως να υπάρχει έλλειψη χώρου στις ΕΕΛ, ειδικότερα σε μικρότερες πόλεις.

**Πλεονεκτήματα μικροκοσκίνισης:**

- Χαμηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις σε σχέση με την πρωτοβάθμια καθίζηση.
- Δεν υπάρχει προσθήκη χημικών άρα είναι μια διεργασία φιλική προς το περιβάλλον.
- Μηδενικός χρόνος παραμονής αποβλήτων, έναντι της πρωτοβάθμιας επεξεργασίας που κυμαίνεται μεταξύ 1,5 - 2,5 h.
- Μικρότερο κεφαλαιουχικό και λειτουργικό κόστος από την πρωτοβάθμια επεξεργασία.
- Τα βιοστερεά που παράγονται από τα μικροκόσκινα έχουν περιεκτικότητα 40% - 45% ενώ για την πρωτοβάθμια επεξεργασία είναι 3,5% - 4%.
- Στην μικροκοσκίνιση πραγματοποιείται επιλεκτική απομάκρυνση των πιο ευμεγεθών σωματιδίων με αποτέλεσμα την αύξηση της βιοποδομησιμότητας των απόβλητων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Σκοπός της εργασίας

Σε συστήματα παρατεταμένου αερισμού (όπως στην ΕΕΛ Ρεθύμνου) δεν πραγματοποιείται πρωτοβάθμια καθίζηση, άρα τα λύματα εισέρχονται απευθείας στη δεξαμενή αερισμού μετά τις διεργασίες προ-επεξεργασίας. Αυτό έχει δραματική επίπτωση στην κατανάλωση ενέργειας στην δεξαμενή αερισμού, καθώς τα TSS που θα μπορούσαν να έχουν απομακρυνθεί με τον διαχωρισμό, αποδομούνται από αερόβιους μικροοργανισμούς. Συνεπώς ο παρατεταμένος αερισμός θεωρείται διαδικασία με υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις και σταδιακά εγκαταλείπεται λόγω κόστους.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η καταγραφή των χαρακτηριστικών εισερχόμενου - εξερχόμενου αποβλήτου της ΕΕΛ Ρεθύμνου, η παρακολούθηση λειτουργίας-απόδοσης πιλοτικού μικροκόσκινου που είναι εγκατεστημένο στην συγκεκριμένη ΕΕΛ (ως προτεινόμενη λύση για την αποφόρτιση της δεξαμενής αερισμού), καθώς και η αξιολόγηση του ενεργειακού περιεχομένου των παραγόμενων μικροκοσκινισμένων βιοστερεών με την προοπτική περαιτέρω αξιοποίησής τους. Πιο συγκεκριμένα, μετρήθηκαν τα TSS, BOD<sub>5</sub> και COD σε δείγματα εισερχόμενου - εξερχόμενου αποβλήτου της ΕΕΛ Ρεθύμνου (περίοδος δειγματοληψίας: Φεβρουάριος 2022). Επίσης, σχετικά με την απόδοση της μικροκοσκίνισης και τα χαρακτηριστικά παραγόμενων βιοστερεών μετρήθηκαν: TSS εισόδου-εξόδου από μικροκόσκινο, Ολικά στερεά (TS), Υγρασία (M), Πτητικά στερεά (VS) καθώς και Ανώτερη Θερμογόνο Δύναμη (HHV) βιοστερεών (περίοδος δειγματοληψίας: Φεβρουάριος 2021). Τέλος, λόγω του αξιόλογου ενεργειακού περιεχομένου των μικροκοσκινισμένων βιοστερεών, προτείνεται ολοκληρωμένη διαχείριση τους με στόχο την παραγωγή ενέργειας, εφαρμόζοντας τις τεχνολογίες της ξήρανσης και της αεριοποίησης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. Πειραματικό μέρος - Υλικά και μέθοδοι

### 5.1 Πειραματικός σχεδιασμός - Συλλογή δειγμάτων

#### Με την λειτουργία του πιλοτικού μικροκόσκινου

Οι δειγματοληψίες έγιναν στην ΕΕΛ Ρεθύμνου, κατά την διάρκεια λειτουργίας του πιλοτικού μικροκόσκινου που έχει εγκατασταθεί εκεί. Η άντληση της παροχής αποβλήτου για το μικροκόσκινο γινόταν από το κανάλι εξόδου της εξάμμωσης. Για την διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν δύο αυτόματοι δειγματολήπτες HACH LANGE BÜHLER 2000 (Εικόνα 5.1), με συχνότητα της συλλογής δειγμάτων ανά μία ώρα για μία ημέρα. Μετά, τα δείγματα της κάθε μέρας αναμειγνύονταν σε κοινό δοχείο, παίρνοντας έτσι ανάμεικτο δείγμα. Ο πρώτος δειγματολήπτης τοποθετήθηκε κατάντη της δεξαμενής εξάμμωσης και ο δεύτερος κατάντη του μικροκόσκινου. Επίσης, μια μικρή ποσότητα μικροκοσκινισμένων βιοστερεών συλλεγόταν από τον κοχλία συμπίεσης του μικροκόσκινου.



Εικόνα 5.1 Τοποθέτηση των δειγματοληπτών τύπου HACH LANGE BÜHLER 2000 για τον υπολογισμό της απόδοσης της ΕΕΛ Ρεθύμνου.

#### Χωρίς την λειτουργία του πιλοτικού μικροκόσκινου

Οι δειγματοληψίες πραγματοποιήθηκαν και πάλι στην ΕΕΛ Ρεθύμνου, χωρίς να λειτουργεί αυτή τη φορά το πιλοτικό μικροκόσκινο. Για την διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιοι δύο δειγματολήπτες, με τον πρώτο δειγματολήπτη να είναι τοποθετημένος στο ίδιο σημείο (κατάντη της δεξαμενής εξάμμωσης) και τον δεύτερο στην έξοδο της ΕΕΛ Ρεθύμνου. Η συχνότητα/τρόπος δειγματοληψίας ήταν ίδιος με την πρώτη φάση πειραμάτων.

Όλες οι δειγματοληψίες της διπλωματικής εργασίας (με ή χωρίς την λειτουργία του πιλοτικού μικροκόσκινου) έγιναν με καλό καιρό ώστε να μην εμφανιστούν εσφαλμένες τιμές στα αποτελέσματα. Έπειτα πραγματοποιούνταν άμεσα η μέτρηση του δείγματος στο κινητό εργαστήριο του Πολυτεχνείου Κρήτης το οποίο βρίσκεται στην ΕΕΛ Ρεθύμνου (Εικόνα 5.2, 5.3).



Εικόνα 5.2 Το κινητό εργαστήριο του Πολυτεχνείου Κρήτης όπου πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα.

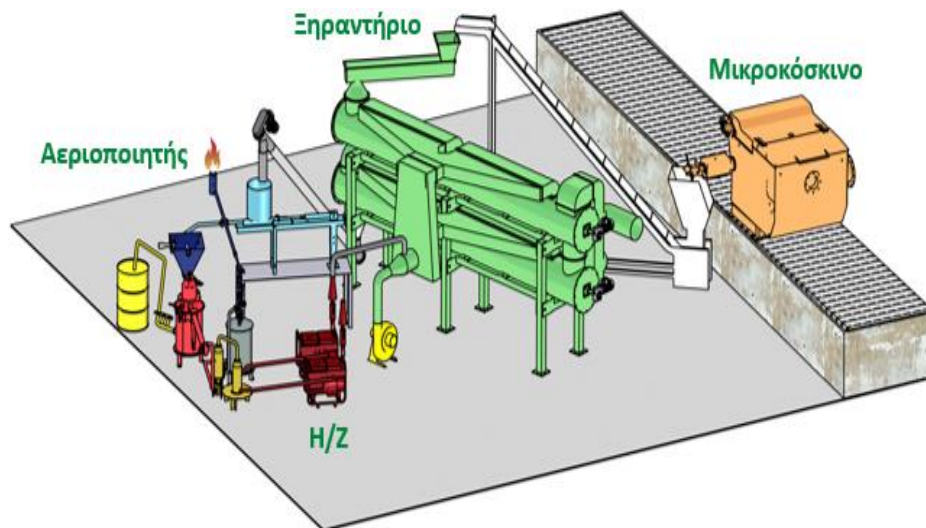


Εικόνα 5.3 Το εσωτερικό του κινητού εργαστηρίου όπου πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα.

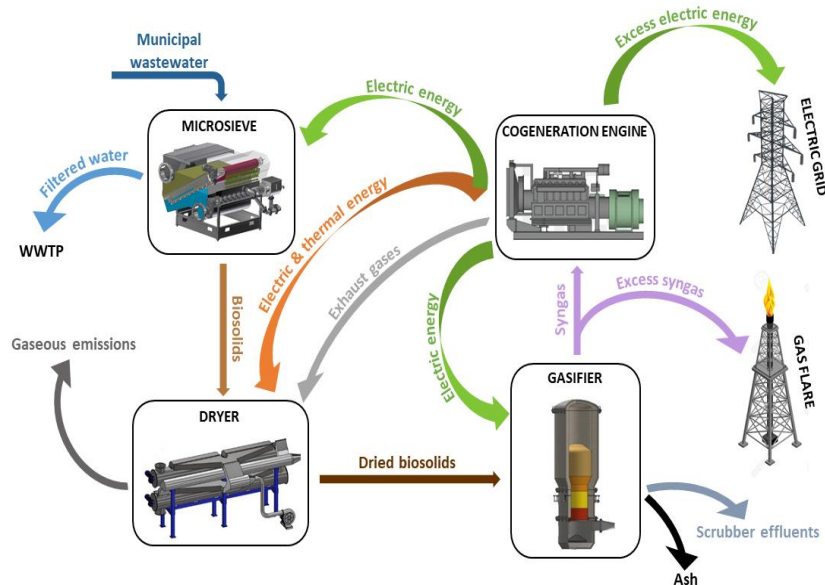
## 5.2 Μικροκόσκινο

Το πιλοτικό μικροκόσκινο που έχει εγκατασταθεί στην ΕΕΛ Ρεθύμνου, αποτελεί μέρος μία πλήρους πιλοτικής μονάδας που υλοποιείται στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού Προγράμματος LIFE B2E4sustainable - WWTP. Πρόκειται για έργο επίδειξης που έχει στόχο τη βελτίωση της απόδοσης του παρατεταμένου αερισμού σε ΕΕΛ και στην προστασία του υδάτινου περιβάλλοντος από τη ρύπανση που οφείλεται από τα απόβλητα αυτών, μέσω ενός καινοτομικού συστήματος αξιοποίησης βιοστερεών. Μία τέτοια πιλοτική μονάδα με δυναμικότητα  $5000 \text{ m}^3/\text{d}$  αποβλήτων, έχει εγκατασταθεί στην ΕΕΛ Ρεθύμνου και αποτελείται κατά σειρά από: διαχωρισμό βιοστερεών μέσω μικροκοσκίνησης, ξήρανση, αεριοποίηση προς αέριο σύνθεσης και παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας μέσω μιας μηχανής εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ) για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του συστήματος (Εικόνα 5.4, 5.5). Αναμένεται η αύξηση των επιδόσεων της ΕΕΛ μέσω της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, αξιοποίηση λύος με ταυτόχρονη μείωση του όγκου της, και μείωση των ενεργειακών αναγκών της δεξαμενής αερισμού.





Εικόνα 5.4 Τρισδιάστατη απεικόνιση της πιλοτικής μονάδας του έργου LIFE.



Εικόνα 5.5 Διάγραμμα ροής της πιλοτικής μονάδας του έργου LIFE.

Σχετικά με την μικροκοσκίνιση, τα λύματα εισέρχονται στο μικροκόσκινο μέσω υποβρύχιας φυγοκεντρικής αντλίας. Το μικροκόσκινο κατακρατάει βιοστερεά άνω των 150 - 200  $\mu\text{m}$ . Το μικροκόσκινο εσωτερικά διαθέτει δύο περιστρεφόμενους κυλίνδρους οι οποίοι κινούν μία υφασμάτινη ταινία (Εικόνα 5.6). Το μικροκόσκινο επίσης διαθέτει μηχανικό ξέστρο καθώς και μηχανισμό νερού υπό πίεσης για να καθαρίζεται η ταινία του. Ακόμα έχει κοχλίας συμπίεσης για τα παραγόμενα μικροκοσκινισμένα βιοστερεά. Η απομάκρυνση των TSS, για τα υγρά απόβλητα υπολογίζεται μεταξύ 30 - 50% (Gikas & Manali, 2018a). Αξίζει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να πραγματοποιήσει μείωση έως και 70% των ενεργειακών απαιτήσεων αν συγκριθεί με την συμβατική διαδικασία παρατεταμένου αερισμού.



Εικόνα 5.6 Το πιλοτικό μικροκόσκινο της μονάδας του έργου LIFE.

### 5.3 Αναλυτικές μέθοδοι

#### 5.3.1 Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (Total Suspended Solids, TSS)

Για τον υπολογισμό των TSS αρχικά προθερμαίνεται ο φούρνος στους 100 °C. Ζυγίζεται το φίλτρο και στην συνέχεια εισέρχεται στο σύστημα τριπλής διήθησης. Στην συνέχεια το δείγμα εισέρχεται στον φούρνο για 2 ώρες. Έπειτα ζυγίζεται το ξηρό δείγμα.

#### 5.3.2 Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (Biochemical Oxygen Demand, BOD)

Τα πειράματα για το BOD είναι χρονοβόρα καθώς χρειάζονται είκοσι ημέρες. Επομένως χρησιμοποιείται το BOD<sub>5</sub> που προσδιορίζεται κατά την διάρκεια των πέντε πρώτων ημερών του πειράματος στους 20 °C. Κατά την διάρκεια του πειράματος το δείγμα αποθηκεύεται σε σκοτεινό σημείο σε συνθήκες επώασης 20°C.

Ο προσδιορισμός του BOD<sub>5</sub> πραγματοποιήθηκε με τη μανομετρική μέθοδο που βασίζεται στη μέτρηση της διαφοράς της πίεσης που δημιουργείται σε καλά κλεισμένη φιάλη με το δείγμα, σε πέντε ημέρες. (Παντίδου, 2019).

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι επιλογές που έχουμε για τον όγκο του δείγματος. Από την εκτιμώμενη μέτρηση του BOD<sub>5</sub>, υπολογίζεται η κατάλληλη κλίμακα και επιλέγεται ο αντίστοιχος όγκος δείγματος. Όσο αυξάνεται η αναμενόμενη τιμή BOD<sub>5</sub>, μειώνεται ο όγκος του δείγματος, ώστε να εξασφαλίζεται, με το κενό που μένει στη φιάλη, επαρκές οξυγόνο για τη βιοαποικοδόμηση του δείγματος. Τέλος, πολλαπλασιάζεται το αποτέλεσμα της μέτρησης με τον κατάλληλο συντελεστή, ανάλογα με τον όγκο δείγματος που χρησιμοποιήθηκε.



Πίνακας 5.1 Συντελεστές για τον υπολογισμό του BOD (Παντίδου, 2019).

| Όγκος δείγματος (mL) | Κλίμακα μέτρησης (mg O <sub>2</sub> /L) | Συντελεστής |
|----------------------|---|-------------|
| 432                  | 0-40                                    | 1           |
| 365                  | 0-80                                    | 2           |
| 250                  | 0-200                                   | 5           |
| 164                  | 0-400                                   | 10          |
| 97                   | 0-800                                   | 20          |
| 43,5                 | 0-2000                                  | 50          |
| 22,7                 | 0-4000                                  | 100         |

Για την διεξαγωγή της μέτρησης του BOD<sub>5</sub> χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω:

- Αντιδραστήριο NaOH
- Μπουκάλια δειγματοληψίας BOD (Εικόνα 5.7)
- Βάση μαγνητικού αναδευτήρα (Συσκευή OxiTop)
- Μεταλλική μαγνητική πλάκα
- Θάλαμος επώασης (20°C)
- Λαϊμός από καουτσούκ για τοποθέτηση NaOH



Εικόνα 5.7 Μπουκάλια δειγματοληψίας BOD.

### 5.3.3 Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (Chemical Oxygen Demand, COD)

Ο προσδιορισμός του COD απαιτεί τη μέτρηση του οξυγόνου που καταναλώνεται κατά τη διαδικασία της χημικής οξείδωσης του δείγματος. Η συγκεκριμένη οξείδωση πραγματοποιείται παρουσία ισχυρού οξειδωτικού μέσου και καταλύτη, σε όξινο περιβάλλον, σε υψηλές θερμοκρασίες. Το οξειδωτικό που χρησιμοποιήθηκε είναι διάλυμα διχρωμικού καλίου (K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>), το όξινο περιβάλλον εξασφαλίζεται με πυκνό θειικό οξύ (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) και για καταλύτη χρησιμοποιήθηκε θειικός άργυρος (Ag<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Ως θερμοκρασία χώνευσης ορίστηκαν οι 150 °C και ως χρόνος χώνευσης οι δύο ώρες. Μετά το πέρας της διαδικασίας της χώνευσης του μίγματος προσδιορίστηκε η περίσσεια των διχρωμικών

iónτων  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ , με φωτομέτρηση. Τα ιόντα χρωμίου  $\text{Cr}^{3+}$  έχουν πράσινο χρώμα. Η οργανική ύλη του οξειδωμένου δείγματος προσδιορίζεται ως ισοδύναμη ποσότητα οξυγόνου. Τα παραπάνω αντιδραστήρια διατίθενται σε φιαλίδια στα οποία πρέπει απλά να προστεθεί συγκεκριμένη ποσότητα δείγματος (Παντίδου, 2019).

#### Μεθοδολογία

1. Ανακινείται αρκετά το φιαλίδιο με τα αντιδραστήρια με σκοπό της διάλυσης του ιζήματος του πυθμένα.
2. Με σιφώνιο λαμβάνεται 1ml από το δείγμα, στο οποίο έχει πραγματοποιηθεί φίλτρανση και 1 ml απιονισμένου νερού, αδειάζοντας το στο φιαλίδιο.
3. Τοποθετείται το φιαλίδιο σε θερμοαντιδραστήρα για 2 ώρες στους 150 °C (Εικόνα 5.8).
4. Τέλος πραγματοποιείται η φωτομέτρηση (Εικόνα 5.9).



Εικόνα 5.8 Θερμοαντιδραστήρας τύπου LT200.



Εικόνα 5.9 Φωτόμετρο τύπου DR1900.

#### 5.3.4 Ολικά στερεά (Total Solids, TS) – Υγρασία (Moisture, M)

Μία από τις σημαντικότερες φυσικές ιδιότητες των αποβλήτων, αποτελούν τα στερεά, τα οποία είναι είτε οργανικά είτε ανόργανα συστατικά, αιωρούμενα ή διαλυμένα στη μάζα των αποβλήτων. Ανάλογα με τις φυσικές ιδιότητές τους, διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες: τα ολικά στερεά, τα σταθερά

στερεά, τα πτητικά στερεά και τα καθιζάνοντα στερεά. Ως ολικά στερεά ορίζεται το υπόλειμμα της ξήρανσης ενός δείγματος υγρού αποβλήτου σε μία συγκεκριμένη θερμοκρασία (100°C - 102°C), μετρούμενο σε mg υπολείμματος ανά λίτρο δείγματος. Τα αιωρούμενα στερεά είναι τα στερεά που συγκρατούνται στο ειδικό φίλτρο. Τα διαλυμένα στερεά αποτελούν τα στερεά του δείγματος διαπερνούν το ειδικό φίλτρο. Το άθροισμα των διαλυμένων και αιωρούμενων στερεών αποτελεί τα ολικά στερεά ενός δείγματος. Για τον προσδιορισμό της υγρασίας, το δείγμα ζυγίστηκε αρχικά και στην συνέχεια εισήχθη σε φούρνο στους 100 °C - 102 °C για 24 ώρες. Έπειτα το δείγμα ζυγίστηκε και πάλι.

### 5.3.5 Ολικά Πτητικά Στερεά (Total Volatile Solids, TVS)

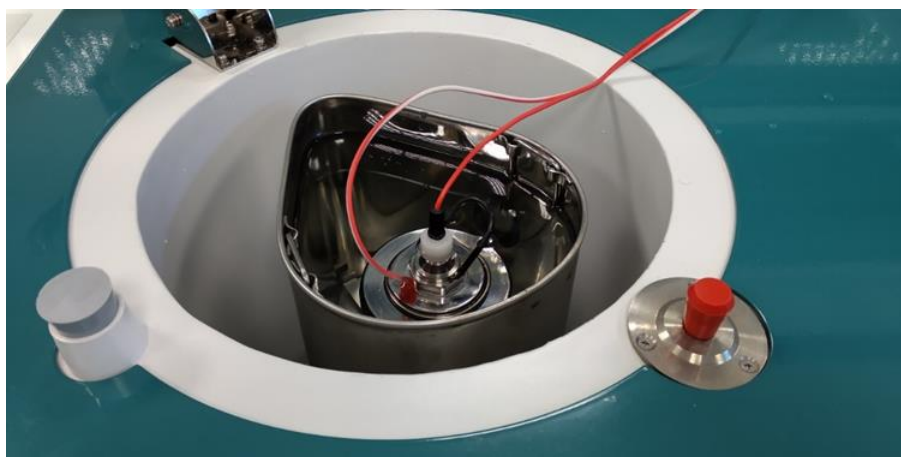
Ως Ολικά Πτητικά Στερεά (Total Volatile Solids, TVS) ορίζεται το σύνολο των πτητικών περιεχόμενων ουσιών, ο προσδιορισμός των οποίων γίνεται με πύρωση του στερεού υπολείμματος σε θερμοκρασία 600°C για 2 ώρες. Η συγκεκριμένη απώλεια κατά τη διαδικασία της καύσης αποτελεί τα ολικά πτητικά στερεά. Επίσης τα συγκεκριμένα στερεά μπορούν να χωριστούν σε διαλυμένα και σε αιωρούμενα. Τα διαλυμένα πτητικά στερεά είναι τα στερεά τα οποία κατά την πύρωση των ολικών διαλυμένων στερεών εξατμίζονται σε θερμοκρασία 600°C. Τα αιωρούμενα πτητικά στερεά είναι τα στερεά τα οποία προκύπτουν από την εξάτμιση των ολικών αιωρούμενων στερεών κατά την πύρωση του δείγματος σε θερμοκρασία 550°C.

### 5.3.6 Ανώτερη Θερμογόνος Δύναμη (Higher Heating Value, HHV)

Αξιοποιώντας ενεργειακά τα βιοστερεά, η διαχείρισή τους κρίνεται ως πολύ καλή πρόταση, καθώς αποτελεί μια φιλική προς το περιβάλλον μέθοδο. Η ενεργειακή αυτή λύση χρησιμοποιεί τις πολύ μεγάλες ποσότητες των βιοστερεών που παράγονται ως καύσιμο υλικό για την παραγωγή ενέργειας. Η παραγόμενη ενέργεια χρησιμοποιείται για να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες των ΕΕΛ. Για αυτό μελετάται στην συγκεκριμένη εργασία η θερμογόνος δύναμη των βιοστερεών. Η θερμογόνος δύναμη μπορεί να διακριθεί σε ανώτερη και κατώτερη. Όταν στα προϊόντα καύσης το νερό βρίσκεται σε υγρή κατάσταση, η θερμογόνος δύναμη ονομάζεται ανώτερη, αφού δεν έχει απορροφηθεί ενέργεια. Ενώ αν στα προϊόντα καύσης το νερό βρίσκεται σε αέρια κατάσταση (υδρατμοί), η θερμογόνος δύναμη ονομάζεται κατώτερη, αφού το νερό έχει απορροφήσει ενέργεια άρα η θερμογόνος δύναμη έχει μικρότερη τιμή. Για την μέτρηση χρησιμοποιήθηκε θερμιδόμετρο βόμβας οξυγόνου, XRY-1A Oxygen Bomb Calorimeter (Εικόνα 5.10).



Εικόνα 5.10 Θερμιδόμετρο βόμβας οξυγόνου (XRY-1A Oxygen Bomb Calorimeter).



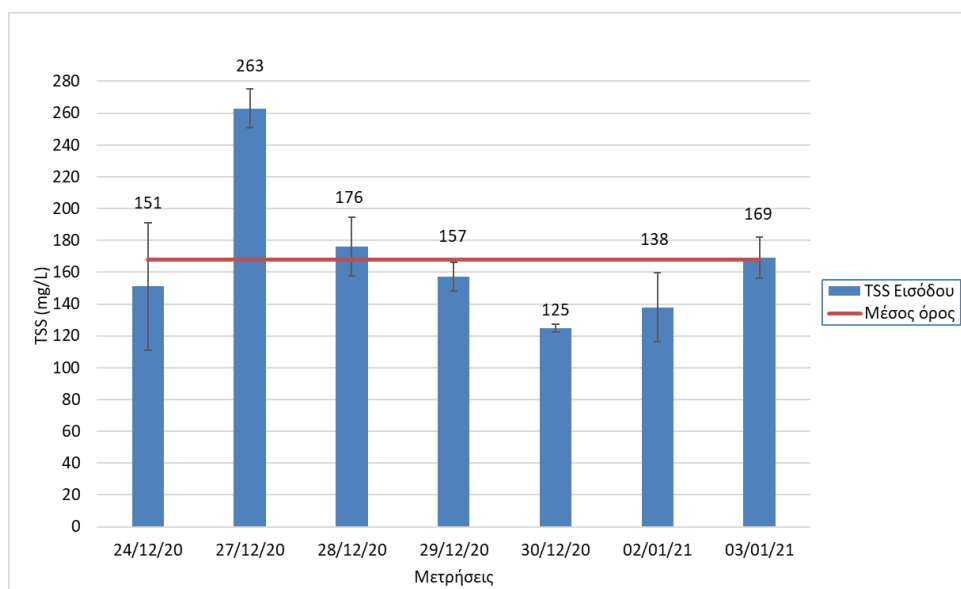
Εικόνα 5.11 Τοποθέτηση βόμβας οξυγόνου στο θερμιδόμετρο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. Αποτελέσματα και συζήτηση

### 6.1 Χαρακτηριστικά εισερχόμενου - εξερχόμενου αποβλήτου της ΕΕΛ Ρεθύμνου

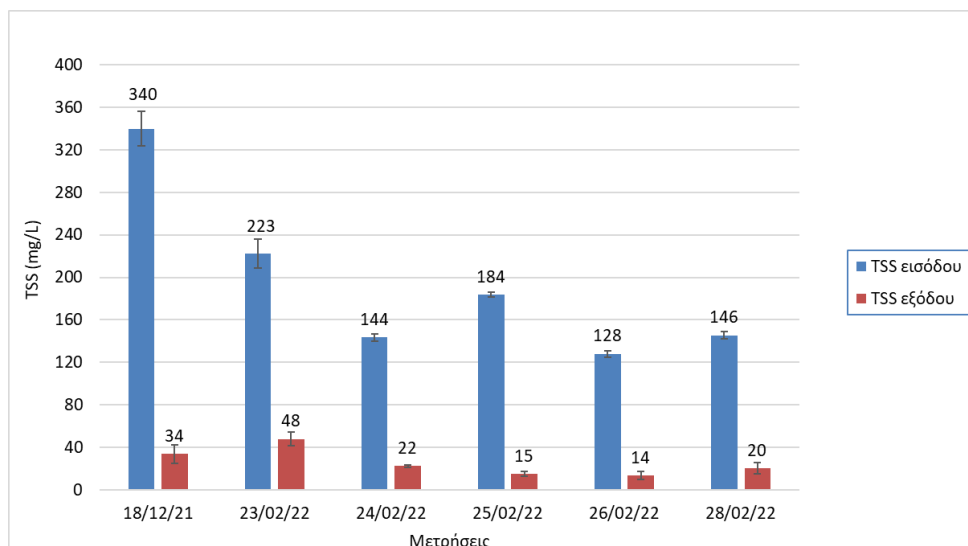
#### 6.1.1 TSS εισόδου – εξόδου

Στο διάγραμμα 6.1 παρουσιάζονται οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν χωρίς την λειτουργία του μικροκόσκινου. Ο μέσος όρος των TSS ισούται με  $168 \pm 42$  mg/L. Αξίζει να σημειωθεί ότι στις μετρήσεις 30/12/2020 και 02/01/2021 υπήρξε έντονη βροχόπτωση στο Ρέθυμνο και σε αυτό το γεγονός ενδέχεται οφείλονται οι χαμηλές συγκεντρώσεις σε TSS. Επίσης, τα TSS εισόδου της ΕΕΛ Ρεθύμνου από το 2017 έως και το 2021, σύμφωνα με τις αναλύσεις εργαστηρίου της, είναι κατά μέσο όρο  $229 \pm 102$  mg/L (για αναλυτικά διαγράμματα, βλ. Παράρτημα 9.1).

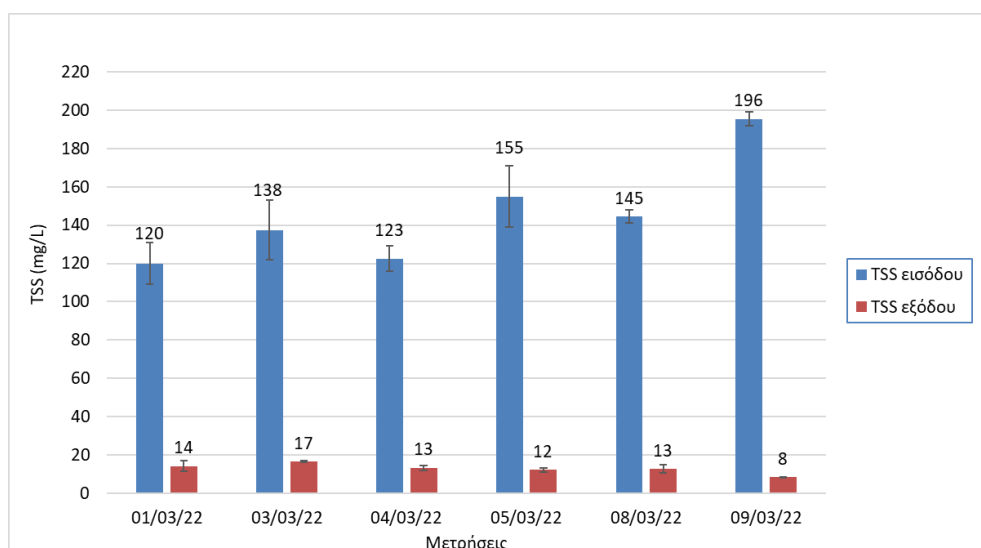


Διάγραμμα 6.1 TSS εισόδου χωρίς την λειτουργία του μικροκόσκινου.

Στα διαγράμματα 6.2 - 6.3 παρουσιάζονται οι μετρήσεις εισόδου - εξόδου της ΕΕΛ Ρεθύμνου, χωρίς την λειτουργία του μικροκόσκινου. Μετά το πέρας των σταδίων επεξεργασίας εμφανίζεται δραστική μείωση της συγκέντρωσης των TSS στα λύματα, αφού στην είσοδο βρέθηκε συγκέντρωση  $170 \pm 59$  mg/L, ενώ στην έξοδο αντίστοιχα  $19 \pm 11$  mg/L, γεγονός που είναι και απαραίτητο πριν την διάθεση τους στον θαλάσσιο αποδέκτη.



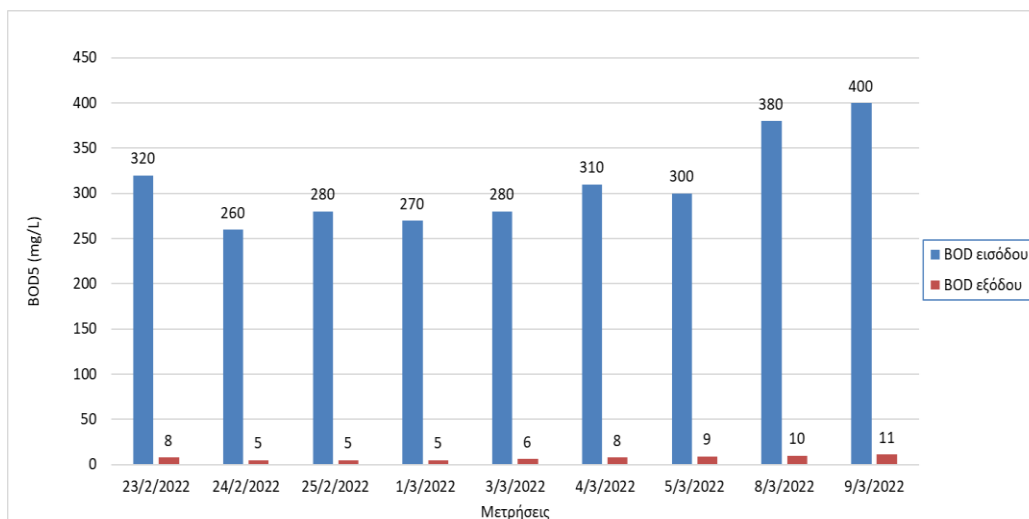
Διάγραμμα 6.2 TSS εισόδου – εξόδου, χωρίς την λειτουργία του μικροκόσκινου (μέρος 1).



Διάγραμμα 6.3 TSS εισόδου – εξόδου, χωρίς την λειτουργία του μικροκόσκινου (μέρος 2).

### 6.1.2 BOD<sub>5</sub> εισόδου – εξόδου

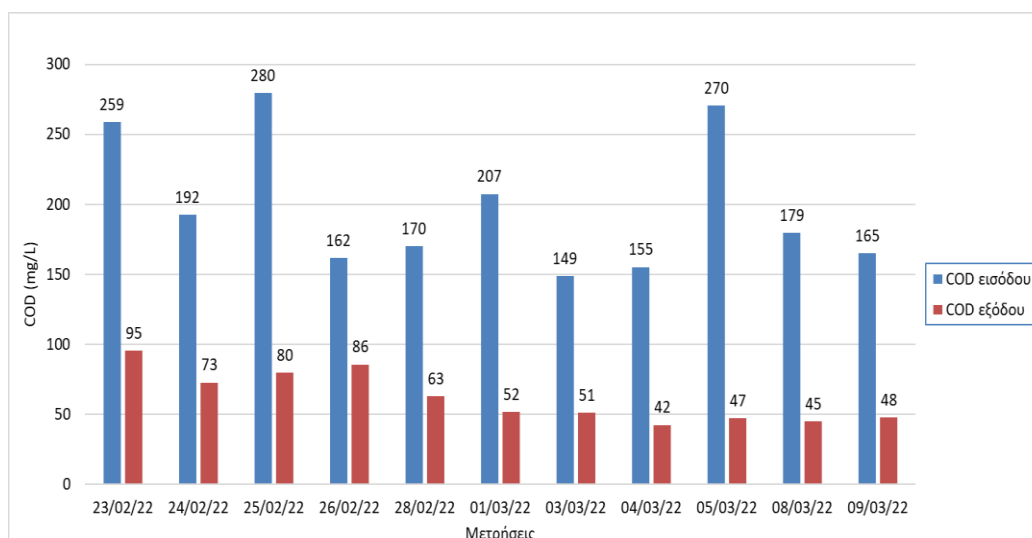
Κατά την διάρκεια των μετρήσεων του Φεβρουαρίου – Μαρτίου 2022 υπολογίστηκε το BOD<sub>5</sub> του δείγματος. Οι μετρήσεις εμφανίζονται στο διάγραμμα 6.4, όπου φαίνεται ότι κατά την είσοδο στην ΕΕΛ Ρεθύμνου το BOD<sub>5</sub> εμφανίζεται σε υψηλές συγκεντρώσεις ( $311 \pm 46$  mg/L), ενώ μετά το τέλος της επεξεργασίας των λυμάτων το BOD<sub>5</sub> εμφανίζεται  $7 \pm 2$  mg/L.



Διάγραμμα 6.4 BOD<sub>5</sub> εισόδου – εξόδου χωρίς την λειτουργία του μικροκόσκινου.

### 6.1.3 COD εισόδου – εξόδου

Κατά την διάρκεια των μετρήσεων του Φεβρουαρίου – Μαρτίου 2022 υπολογίστηκε το COD του δείγματος. Οι μετρήσεις εμφανίζονται στο διάγραμμα 6.5, όπως είναι λογικό μετά τα στάδια της επεξεργασίας το COD έχει μειωθεί, αφού στην είσοδο βρέθηκε συγκέντρωση  $199 \pm 46$  mg/L, ενώ στην έξοδο αντίστοιχα  $62 \pm 18$  mg/L.

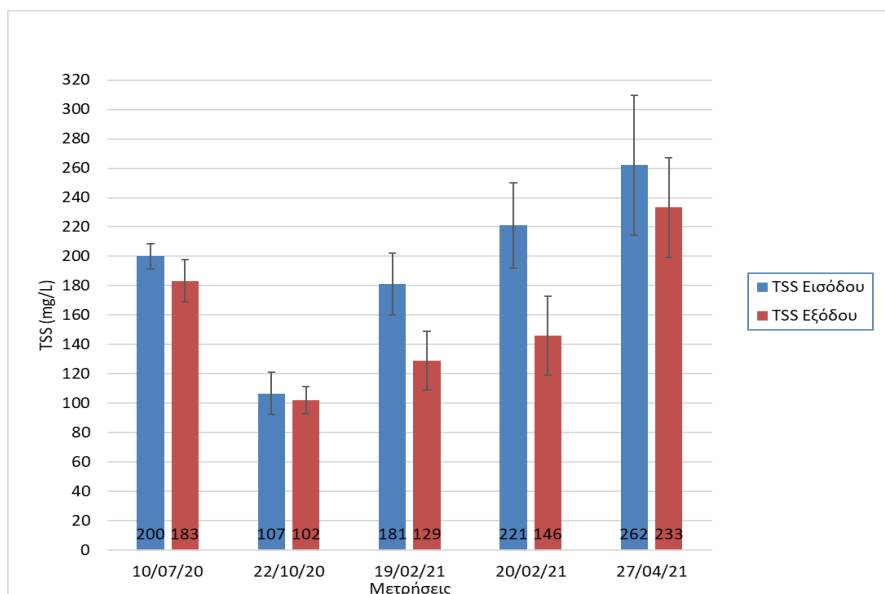


Διάγραμμα 6.5 COD εισόδου – εξόδου χωρίς την λειτουργία του μικροκόσκινου.

## 6.2 Απόδοση απομάκρυνσης TSS και χαρακτηριστικά παραγόμενων βιοστερεών με την μέθοδο της μικροκοσκίνησης

### 6.2.1 Απόδοση μικροκόσκινου στην απομάκρυνση TSS

Στο διάγραμμα 6.6 αναγράφονται οι συγκεντρώσεις των TSS κατά την λειτουργία του μικροκόσκινου. Η μπλε στήλη παρουσιάζει την συγκέντρωση των TSS ακριβώς πριν το μικροκόσκινο ( $194 \pm 51$  mg/L), ενώ η κόκκινη γραμμή τα αποτελέσματα από την εκροή του μικροκόσκινου ( $159 \pm 46$  mg/L). Παρατηρείται μείωση των TSS, άρα το μηχάνημα λειτουργεί.



**Διάγραμμα 6.6 TSS εισόδου – εξόδου μικροκόσκινου.**

Στον πίνακα 6.1 φαίνεται η % απομάκρυνση TSS που επιτυγχάνεται μέσω του μικροκόσκινου (μέσος όρος 17%). Το μικροκόσκινο κατασκευάστηκε με σκοπό να απομακρύνει 20 - 30 % των TSS. Παρατηρείται ότι μόνο στις 2 από τις 5 μετρήσεις εμφανίζεται ικανοποιητική απομάκρυνση των TSS. Η διακύμανση στην απόδοση του μικροκόσκινου μπορεί να οφείλεται στην ποιότητα του εισερχόμενου αποβλήτου, αφού η σύσταση του διαφέρει.

**Πίνακας 6.1 Απομάκρυνση TSS (%) από μικροκόσκινο.**

| Ημερομηνία | TSS Εισόδου | TSS Εξόδου | Απομάκρυνση (%) | Μέσος όρος Απομάκρυνσης |
|------------|-------------|------------|-----------------|-------------------------|
| 10/07/20   | 200         | 183        | 9%              | 17%                     |
| 22/10/20   | 107         | 102        | 5%              |                         |
| 19/02/21   | 181         | 129        | 29%             |                         |
| 20/02/21   | 221         | 146        | 34%             |                         |
| 27/04/21   | 262         | 233        | 11%             |                         |

Στον πίνακα 6.2, φαίνεται από τον υπολογισμό των ισοζυγίων, ότι η θεωρητική παραγωγή βιοστερεών (η διαφορά TSS εισόδου-εξόδου) είναι αρκετά υψηλότερη από την πραγματική (παραγόμενα μικροκοσκινισμένα βιοστερεά), γεγονός που δείχνει ότι το παρόν σύστημα επιδέχεται βελτίωσης. Για τον λόγο αυτό ενσωματώθηκε αργότερα σύστημα συλλογής-ανακυκλοφορίας του νερού πλύσης και των στραγγισμάτων των μικροκοσκινισμένων βιοστερεών, με σκοπό την ανάκτηση χαμένων στερεών.



Πίνακας 6.2 Υπολογισμοί ισοζυγίων.

| ΙΣΟΖΥΓΙΟ 19/02/21                |                   |                                  |   |   |  |
|----------------------------------|-------------------|----------------------------------|---|---|--|
| ΒΙΟΣΤΕΡΕΑ                        |                   |                                  |   |   |  |
| Παραγόμενη λάσπη (kg, ΥΓΡΗ ΦΑΣΗ) | % Στερεά          | Παραγόμενη λάσπη (kg, ΞΗΡΗ ΦΑΣΗ) | Συνολικά εισερχόμενα λύματα (m <sup>3</sup> ) | Παραγόμενη λάσπη (kg, ΞΗΡΗ ΦΑΣΗ)/m <sup>3</sup> | Παραγόμενη λάσπη (kg, ΞΗΡΗ ΦΑΣΗ)/ 5000m <sup>3</sup> |
| 8,5                              | 37%               | 3,145                            | 1040  | 0,0030  | 15   |
| TSS                              |                   |                                  |   |   |  |
| TSS εισόδου (mg/L)               | TSS εξόδου (mg/L) | mg απομακρυσμένων TSS/ L         | g απομακρυσμένων TSS/ m <sup>3</sup>          | kg απομακρυσμένων TSS/ m <sup>3</sup>           | kg απομακρυσμένων TSS/ 5000m <sup>3</sup>            |
| 181                              | 129               | 52                               | 52  | 0,052   | 260  |
|                                  |                   |                                  |   | XANONTAI (σε kg)                                | -245   |

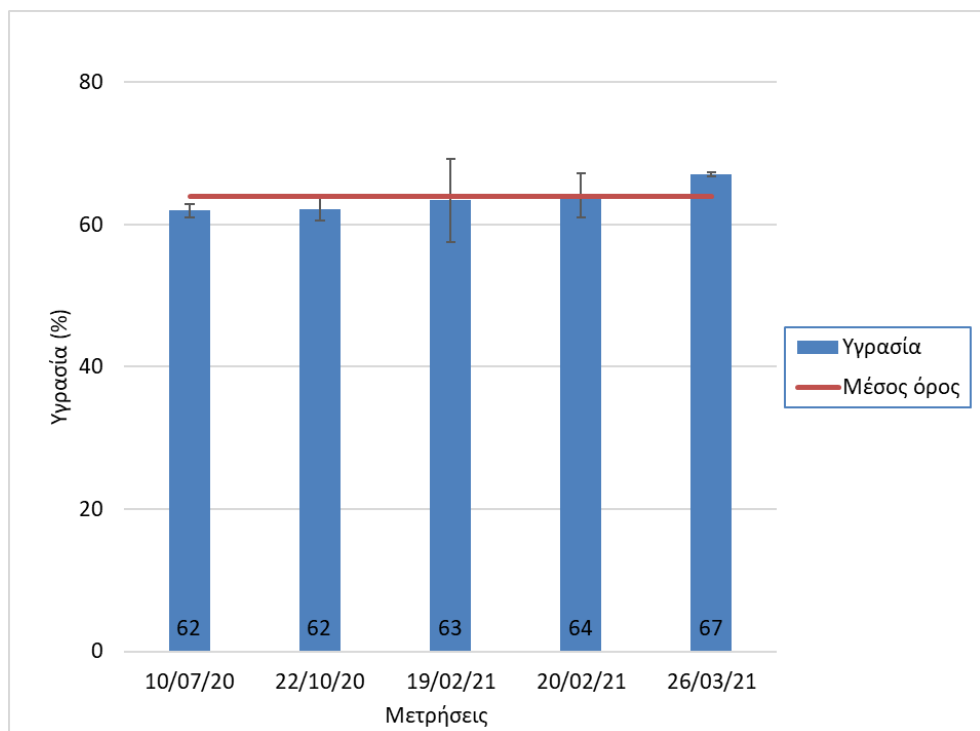
  

| ΙΣΟΖΥΓΙΟ 20/02/21                |                   |                                  |   |   |  |
|----------------------------------|-------------------|----------------------------------|---|---|--|
| ΒΙΟΣΤΕΡΕΑ                        |                   |                                  |   |   |  |
| Παραγόμενη λάσπη (kg, ΥΓΡΗ ΦΑΣΗ) | % Στερεά          | Παραγόμενη λάσπη (kg, ΞΗΡΗ ΦΑΣΗ) | Συνολικά εισερχόμενα λύματα (m <sup>3</sup> ) | Παραγόμενη λάσπη (kg, ΞΗΡΗ ΦΑΣΗ)/m <sup>3</sup> | Παραγόμενη λάσπη (kg, ΞΗΡΗ ΦΑΣΗ)/ 5000m <sup>3</sup> |
| 2,5                              | 36%               | 0,9                              | 522   | 0,0017  | 9  |
| TSS                              |                   |                                  |   |   |  |
| TSS εισόδου (mg/L)               | TSS εξόδου (mg/L) | mg απομακρυσμένων TSS/ L         | g απομακρυσμένων TSS/ m <sup>3</sup>          | kg απομακρυσμένων TSS/ m <sup>3</sup>           | kg απομακρυσμένων TSS/ 5000m <sup>3</sup>            |
| 221                              | 146               | 75                               | 75  | 0,075   | 375  |
|                                  |                   |                                  |   | XANONTAI (σε kg)                                | -366   |

Σχετικά με την λειτουργία του μικροκόσκινου, παρατηρήθηκαν προβλήματα λόγω της στιγμιαίας ακανόνιστης ροής του αποβλήτου με αποτέλεσμα το φιλτρόπανο να βγαίνει από την θέση του και να σταματάει η λειτουργία του μηχανήματος. Ακόμα, η παρουσία χαλικιών στο μικροκόσκινο, που θα έπρεπε να είχαν αφαιρεθεί από τις προηγούμενες διεργασίες, συμβάλλουν στην μείωση της απόδοσης του μηχανήματος.

#### 6.2.2 Ολικά στερεά (TS) – Υγρασία (M) βιοστερεών

Στο διάγραμμα 6.7 παρουσιάζεται η υγρασία των μικροκοσκινισμένων βιοστερεών. Αρχικά τα βιοστερεά αφυδατώνονται με την βοήθεια ενός κοχλία και κατόπιν εξέρχονται από το μικροκόσκινο. Ο μέσος όρος υγρασίας είναι  $64 \pm 2\%$ .



Διάγραμμα 6.7 Υγρασία μικροκοσκινισμένων στερεών.

### 6.2.3 Πτητικά στερεά (VS) βιοστερεών

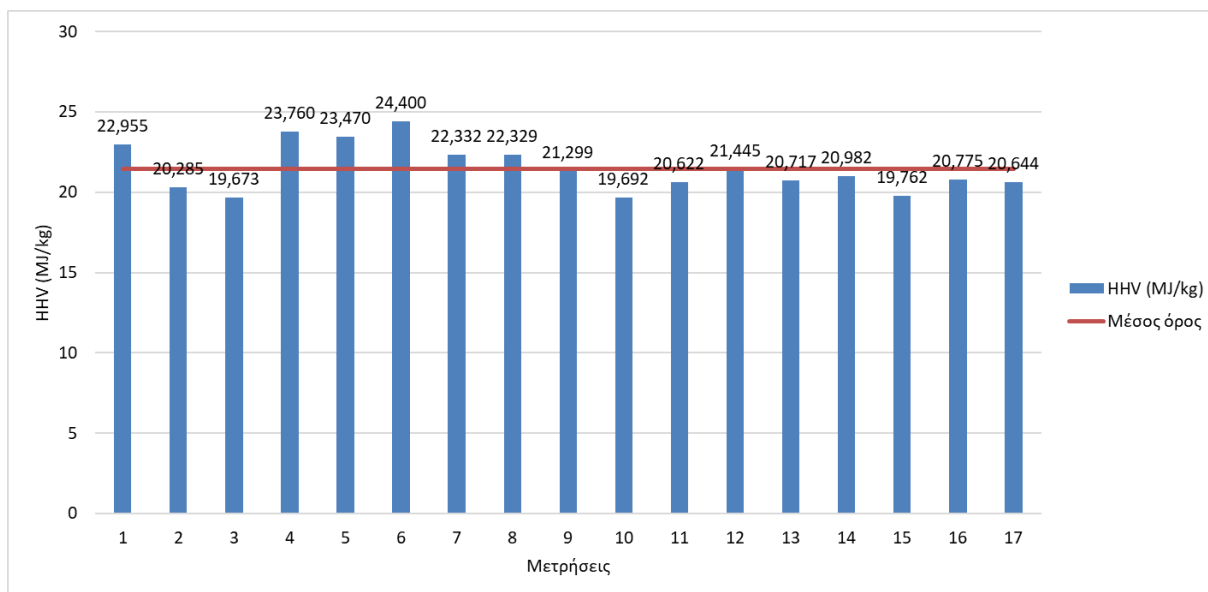
Όπως παρατηρείται από τις μετρήσεις στον πίνακα 6.3, το ποσοστό των πτητικών στερεών ( $90 \pm 1\%$ ) είναι υψηλό στα ολικά στερεά. Επομένως η ενεργειακή τους αξιοποίηση μπορεί να πραγματοποιηθεί. Αξίζει να σημειωθεί ότι η μέση τιμή των VS σε πρωτοβάθμια λάσπη είναι ίση με 65%.

Πίνακας 6.3 Μετρήσεις VS (%) εκ των TS (%).

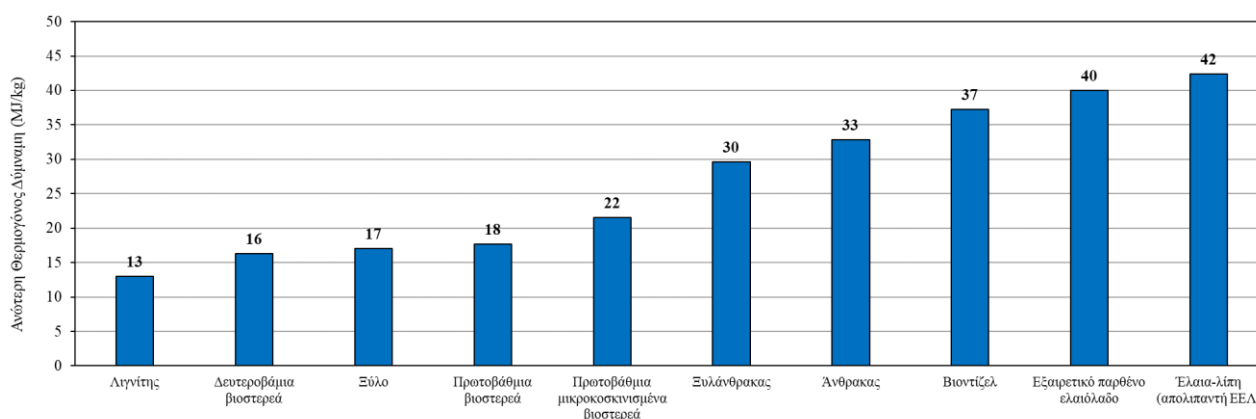
| Μετρήσεις VS (%) εκ των TS (%) |            |                 |
|--------------------------------|------------|-----------------|
| Ημερομηνία                     | Μέσος Όρος | Τυπική Απόκλιση |
| 10/07/20                       | 88,9       | 0,4             |
| 22/10/20                       | 89,0       | 1,6             |
| 26/03/21                       | 90,9       | 0,0             |

### 6.2.4 Ανώτερη Θερμογόνο Δύναμη (HHV) βιοστερεών

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 6.8, η HHV των μικροκοσκινισμένων βιοστερεών είναι  $21,5 \pm 1,4$  MJ/kg, η οποία σε σύγκριση με τις τιμές της θερμογόνου δύναμης άλλων καυσίμων ή βιοστερεών είναι αξιόλογη (Διάγραμμα 6.9).



Διάγραμμα 6.8 Ανώτερη Θερμογόνος Δύναμη (HHV) μικροκοσκινισμένων βιοστερεών.



Διάγραμμα 6.9 Ανώτερη Θερμογόνος Δύναμη (HHV) μικροκοσκινισμένων βιοστερεών σε σύγκριση με άλλων καυσίμων ή βιοστερεών.

## 6.3 Παραγωγή ενέργειας από μικροκοσκινισμένα βιοστερεά με χρήση θερμικών μεθόδων

### 6.3.1 Ξήρανση

Η ηλιακή ξήρανση αποτελεί εναλλακτική μέθοδο ξήρανσης της υλούς που βασίζεται στην ηλιακή ενέργεια (Κατσιμαντού, 2007). Στην ΕΕΛ Ρεθύμνου θα μπορούσε να έχει άμεση εφαρμογή η ηλιακή ξήρανση λόγω της ηλιοφάνειας που επικρατεί στην περιοχή. Πρόκειται για μία μέθοδο θέρμανσης της υλούς μέχρι την θερμοκρασία που επιτυγχάνεται στο θερμοκήπιο (Εικόνα 6.1) και ξήρανση μέσω της εξάτμισης του νερού από την επιφάνεια της. Το αποτέλεσμα της μεθόδου είναι η παραγωγή του προϊόντος με περιεκτικότητα σε στερεά άνω του 70% και πρόκειται για μία μέθοδο με χαμηλό λειτουργικό κόστος (Ηλιακή Ξήρανση Λυματολάσπης, 2020).



**Εικόνα 6.1** Θάλαμος ηλιακής ξήρανσης ιλύος στον ΧΥΤΑ Χερσονήσου Κρήτης.

Στην παρούσα εργασία προτείνεται κλειστή εγκατάσταση ξήρανσης των παραγόμενων βιοστερεών. Για την διαστασιολόγηση του θερμοκηπίου επιλέγονται τα βιοστερεά που συλλέχθηκαν από την εγκατάσταση του Ρεθύμνου, με τιμή HHV ίση με  $21,5 \pm 1,4$  MJ/kg. Τα βιοστερεά έχουν τοποθετηθεί σε διατάξεις που μοιάζουν με θερμοκήπιο, διαστάσεων  $58 \times 10$  m<sup>2</sup>. Ταυτόχρονα, έχει τοποθετηθεί στο κέντρο της μονάδας ένας αεραγωγός εξάτμισης, αφήνοντας την μπροστινή πλευρά του κτιρίου ανοιχτή. Ακόμη, το υλικό κατασκευής του δαπέδου είναι η άσφαλτος και οι πλευρικοί τοίχοι έχουν επιφάνεια 10 m<sup>2</sup>, με λίθινη βάση και στεγανό υλικό επίστρωσης, δηλαδή σκυρόδεμα (Κατσιμαντού, 2007).

### 6.3.2 Αεριοποίηση

Η αεριοποίηση προτείνεται για την ενεργειακή αξιοποίηση των βιοστερεών (όπως θα εφαρμοστεί και στο έργο LIFE. Η αεριοποίηση προσφέρει πολλαπλά πλεονεκτήματα σε σχέση με την καύση και την πυρόλυση. Η αεριοποίηση διαφοροποιείται από την πυρόλυση καθώς απαιτείται η παρουσία περίσσειας υδρατμών για να μετατραπεί το αντιδρών σε καύσιμο αέριο (Fytali & Zabaniotou, 2008). Στην πυρόλυση χρησιμοποιείται εξωτερική πηγή θερμότητας για την ενεργοποίηση των ενδόθερμων αντιδράσεων θερμικής διάσπασης των απορριμμάτων σε συνθήκες απουσίας οξυγόνου. Ωστόσο η αεριοποίηση είναι αυτοσυντηρούμενη χρησιμοποιώντας ως πρόσθετο καύσιμο αέριο, για την μετατροπή των οργανικών υπολειμμάτων σε αέρια προϊόντα. Η απαιτούμενη ενέργεια στην αεριοποίηση, προκύπτει από καύση μέρους του οργανικού υλικού στον αντιδραστήρα αεριοποίησης (Bridgewater & Evans, 1993).

Η καύση πραγματοποιείται συχνά με τη μεικτή καύση βιοστερεών και αστικών στερεών απορριμμάτων (Kelessidis & Stasinakis, 2012). Ο πρωτεύων σκοπός της συγκεκριμένης μεθόδου είναι να απορριφθούν τα βιοστερεά και όχι να αξιοποιηθούν ενεργειακά (Gikas, 2017). Κατά τη διάρκεια της καύσης προκύπτουν ρυπογόνα αέρια (οξείδια του αζώτου, διοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του θείου). Ωστόσο με τη μέθοδο της αεριοποίησης, οι εκπομπές ρυπογόνων ουσιών είναι λιγότερες σε σχέση με την καύση (Bridgewater & Evans, 1993).

Στο αέριο σύνθεσης βρίσκονται ανεπιθύμητα σωματίδια και υπολείμματα πίσσας, τα οποία απομακρύνονται μέσω πολυκυκλώνα συγκράτησης. Μια φιάλη είναι τοποθετημένη στο κάτω μέρος του κυκλώνα, ώστε να συλλέγει την πίσσα και τις ακαθαρσίες που εξέρχονται κατά την επεξεργασία.

Έπειτα, το αέριο σύνθεσης εισέρχοντας στο φίλτρο βιομάζας, φιλτράρονται η πίσσα και διάφορες ρυπογόνες ουσίες. Η μέγιστη θερμοκρασία του αερίου δεν πρέπει να υπερβαίνει τους 180-200°C, καθώς χρησιμοποιείται βιομάζα για φιλτράρισμα και εμφανίζεται ο κίνδυνος πυρόλυσης. Ακόμα, για την καύση περισσευούμενου αερίου υπάρχει πυρσός. Για να απομακρυνθούν οι ενώσεις του θείου στο αέριο σύνθεσης χρησιμοποιείται κατάλληλα σχεδιασμένη πλυντηρίδα αποθείωσης. Το αέριο, εφόσον έχει ψυχθεί και καθαριστεί οδεύει στο σύστημα ανάλυσης ρύπων ώστε να διαπιστωθεί η καταλληλότητά του και να οδηγηθεί στη συνέχεια στη μηχανή εσωτερικής καύσης με τελικό σκοπό να δημιουργηθεί ενέργεια.

Τα σημαντικότερα προϊόντα της αεριοποίησης είναι το μονοξείδιο του άνθρακα και το υδρογόνο, ωστόσο σε λιγότερες ποσότητες παράγονται μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα. Το υπόλειμμα κατά την καύση είναι η τέφρα. Στόχος της αεριοποίησης στην ΕΕΛ Ρεθύμνου είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για την κάλυψη αναγκών της μονάδας. Κατά την διάρκεια της αεριοποίησης πραγματοποιούνται οι παρακάτω αντιδράσεις (Gikas & Stedman, 2011):

- $C + CO_2 \rightarrow 2CO, \Delta H = +172 \text{ MJ/kmol}$
- $C + H_2O \rightarrow CO + H_2, \Delta H = +131 \text{ MJ/kmol}$
- $C + 2H_2 \rightarrow CH_4, \Delta H = -75 \text{ MJ/kmol}$
- $CO + H_2O \rightarrow H_2 + CO_2, \Delta H = -41 \text{ MJ/kmol}$
- $CH_4 + H_2O \rightarrow CO_2 + 3H_2, \Delta H = +206 \text{ MJ/kmol}$

### 6.3.3 Παραγόμενη ενέργεια

Η βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρασία για την λειτουργία του αεριοποιητή είναι μεταξύ 15– 20% με αποτέλεσμα η πλήρης ξήρανση των βιοστερεών να μην είναι απαραίτητη. Για τον υπολογισμό των ισοζυγίων, η υγρασία θεωρείται ίση με 15%. Το υλικό τροφοδοτείται στον αεριοποιητή με τη βοήθεια κοχλίου, ενώ η λειτουργία του αεριοποιητή πραγματοποιείται με σύστημα αεριοποίησης καθοδικού ρεύματος. Ως βαθμό απόδοσης του αεριοποιητή επιλέγεται ο μέσος βαθμός απόδοσης (80%) (Kreith & Krumdieck, 2014). Η ποσότητα των βιοστερεών που εισέρχονται στον αεριοποιητή ισούται με 15 kg/h. Η HHV των βιοστερεών της ΕΕΛ Ρεθύμνου μετρήθηκε ίση με 21,5 MJ/kg. Άρα, το ενεργειακό περιεχόμενο των βιοστερεών δίνεται με τη εξίσωση 1:

$$Q = m \cdot HHV \Rightarrow Q = 15 \text{ kg/h} \cdot 21,5 \text{ MJ/kg} \Rightarrow Q = 322,5 \text{ MJ/h} \quad (1)$$

Αναλύονται οι όροι της εξίσωσης:

- $Q$  : ενεργειακό περιεχόμενο βιοστερεών.
- $m$ : παροχή τροφοδοτούμενων βιοστερεών στον αεριοποιητή.
- HHV: ανώτερη θερμογόνος δύναμη βιοστερεών.

Επίσης εμπειρικά είναι γνωστό ότι από 1 kg εισερχόμενης βιομάζας παράγονται 2 m<sup>3</sup> syngas, επομένως για 15 kg βιομάζας θα παραχθούν 30 m<sup>3</sup> syngas (Biomass Gasification Research, 2014). Η HHV του syngas δίνεται από τη εξίσωση 2:

$$n = \frac{HHV_{syn} * 2}{HHV * 1} \Rightarrow HHVs_{syn} = \frac{n * HHV}{2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow HHV_{syn} = \frac{0,8 * 21,5 \frac{MJ}{kg} * 1kg}{2 m^3} \Rightarrow HHVs_{syn} = 8,6 \frac{MJ}{m^3}$$

Αναλύονται οι όροι της εξίσωσης:

- $n$ : βαθμός απόδοσης αεριοποιητή.
- $HHV_{syn}$ : ανώτερη θερμογόνοος δύναμη syngas.

Μετά την εύρεση της HHV του syngas, το ενεργειακό περιεχόμενο του syngas δίνεται με την εξίσωση 3:

$$Q_{syn} = V_{syn} * HHV_{syn} \Rightarrow Q_{syn} = 30 m^3/h * 8,6 MJ/m^3 \Rightarrow Q_{syn} = 258 MJ/h (3)$$

Αναλύονται οι όροι της εξίσωσης:

- $Q_{syn}$ : ενεργειακό περιεχόμενο syngas.
- $V_{syn}$ : ογκομετρική παροχή syngas.

Θεωρείται ότι ο βαθμός απόδοσης του ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους σε ηλεκτρική ενέργεια είναι 20%, σε θερμική ενέργεια 30% και 50% είναι οι απώλειες. Άρα η ανακτώμενη ηλεκτρική ενέργεια που προκύπτει από το θερμικό περιεχόμενο του syngas δίνεται από την εξίσωση 4:

$$P_{el.eng} = n_{el.} * Q_{syn} \Rightarrow P_{el.eng} = 0,2 * 258 MJ/h$$

$$\Rightarrow P_{el.eng} = 51,6 MJ/h = 14,33 kW (4)$$

Αναλύονται οι όροι της εξίσωσης:

- $P_{el.eng}$ : ανακτώμενη ηλεκτρική ενέργεια.
- $n_{el.}$ : βαθμός απόδοσης.

Η ανακτώμενη θερμική ενέργεια που προκύπτει από το θερμικό περιεχόμενο του syngas δίνεται με την εξίσωση 5:

$$Q_{useful.th} = n_{th} * Q_{syn} \Rightarrow Q_{useful.th} = 0,3 * 258 MJ/h \Rightarrow$$

$$Q_{useful.th} = 77,4 MJ/h (5)$$

Αναλύονται οι όροι της εξίσωσης:

- $Q_{useful.th}$ : ανακτώμενη θερμική ενέργεια.
- $n_{th}$ : βαθμός απόδοσης.



Η γεννήτρια θα παράγει από το σύστημα υδρόψυξης 77,4 MJ/h εκμεταλλεύσιμη θερμική ενέργεια σε μορφή θερμού νερού στους 90°C, ενώ οι απώλειες δίνονται από εξίσωση 6:

$$Q_{\text{los}} = \eta_{\text{los}} * Q_{\text{syn}} \Rightarrow Q_{\text{los}} = 0,5 * 258 \text{ MJ/h} \Rightarrow$$

$$Q_{\text{los}} = 129 \text{ MJ/h (6)}$$

Αναλύονται οι όροι της εξίσωσης:

- $Q_{\text{los}}$ : ενεργειακές απώλειες.
- $\eta_{\text{los}}$ : βαθμός απόδοσης.

Για την εύρεση της ανακτώμενης θερμικής ενέργειας από τη ψύξη του syngas λαμβάνονται οι εξής παράμετροι:

- $\rho_{\text{syngas}}$  πυκνότητα του syngas: 0,44 kg/m<sup>3</sup> στους 400°C (Dogru et al., 2002).
- $V_{\text{syngas}}$ : όγκος του syngas: 30 m<sup>3</sup> από τον εμπειρικό τύπο 1:2syngas.
- $Cp_{\text{syngas}}$ : ειδική θερμοχωρητικότητα syngas: 1,34 kJ/kg\*K στους 400°C (Dogru et al., 2002).
- $T_f$  θερμοκρασία syngas μετά τη ψύξη του: 150°C.
- $T_i$ : θερμοκρασία syngas στην έξοδο του αεριοποιητή: 400°C.

Επομένως η ανακτώμενη θερμική ενέργεια κατά τη ψύξη του syngas δίνεται με την εξίσωση 7:

$$Q_{\text{cool-syn}} = \rho_{\text{syngas}} * V_{\text{syngas}} * Cp_{\text{syngas}} * (T_f - T_i) \text{ } ^\circ\text{C} \Rightarrow$$

$$Q_{\text{cool-syn}} = 0,44 \text{ kg/m}^3 * 30 \text{ m}^3 * 1,34 \text{ kJ/kg} * \text{K} * (150 - 400) \text{ } ^\circ\text{C} \Rightarrow$$

$$Q_{\text{cool-syn}} = -4.422 \text{ KJ/h} \Rightarrow$$

$$Q_{\text{cool-syn}} = -4,422 \text{ MJ/h, το αρνητικό πρόσημο υποδηλώνει απελευθέρωση. (7)}$$

Αναλύονται οι όροι της εξίσωσης:

- $Q_{\text{cool-syn}}$ : ανακτώμενη θερμική ενέργεια κατά τη ψύξη του syngas.

Για να πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός της ανακτώμενης θερμικής ενέργειας από τα καυσαέρια της μηχανής λαμβάνονται οι εξής παράμετροι:

- $\rho_k$ : πυκνότητα καυσαερίων: 0,56 kg/m<sup>3</sup> (οι υπολογισμοί αναλυτικότερα στο Παράρτημα 9.2).
- $V_k$ : ογκομετρική παροχή καυσαερίων: Δεδομένου ότι η αναλογία air/syngas είναι 1:1:  $V_k = V_{\text{syngas}} + V_{\text{air}} \Rightarrow 30 \text{ m}^3 + 30 \text{ m}^3 \Rightarrow V_k = 60 \text{ m}^3$
- $Cp_k$ : ειδική θερμοχωρητικότητα καυσαερίων: 1,1 kJ/kg\*K (Jadhao & Thombare, 2013).
- $T_f$ : θερμοκρασία καυσαερίων μετά τη ψύξη τους: 100°C.
- $T_i$ : θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από τη μηχανή 400°C.

Επομένως η ανακτώμενη θερμική ενέργεια που θα προκύψει από την μηχανή δίνεται με την

εξίσωση 8:

$$Q_{\text{ex-fumes}} = \rho_k * V_k * C_{p_k} * (T_f - T_i) \text{ } ^\circ\text{C} \Rightarrow$$

$$Q_{\text{ex-fumes}} = 0,56 \text{ kg/m}^3 * 60 \text{ m}^3 * 1,1 \text{ kJ/kg} * \text{K} * (100 - 400) \text{ } ^\circ\text{C} \Rightarrow$$

$$Q_{\text{ex-fumes}} = -11.088 \text{ KJ/h} \Rightarrow Q_{\text{ex-fumes}} = -11,088 \text{ MJ/h (απελευθέρωση)}. (8)$$

Αναλύονται οι όροι της εξίσωσης:

- $Q_{\text{ex-fumes}}$  : ανακτώμενη θερμική ενέργεια από τα καυσαέρια της μηχανής.

Η συνολική ανακτώμενη θερμική ενέργεια δίνεται με την εξίσωση 9:

$$Q_{\text{heat-rec}} = Q_{\text{cool-syn}} + Q_{\text{ex-fumes}} \Rightarrow$$

$$Q_{\text{heat-rec}} = 4,422 \text{ MJ/h} + 11,088 \text{ MJ/h} \Rightarrow Q_{\text{heat-rec}} = 15,510 \text{ MJ/h} (9)$$

Αναλύονται οι όροι της εξίσωσης:

- $Q_{\text{heat-rec}}$  : συνολική ανακτώμενη θερμική ενέργεια.

Η καταναλωμένη ενέργεια του αεριοποιητή ισούται με 1 kWh και η κατανάλωση ενέργειας της κλειστής εγκατάστασης ηλιακής ξήρανσης είναι μεταξύ 20 – 30 kWh. Επιλέγεται η μέση τιμή (25 kWh). Επομένως, η συνολική κατανάλωση ενέργειας της κλειστής εγκατάστασης ηλιακής ξήρανσης και του αεριοποιητή ανέρχεται στα: 25 kWh + 1 kWh = 26 kWh = 93,6 MJ/h. Η συνολική παραγόμενη θερμική ενέργεια ισούται:

$$Q_{\text{useful-total.th}} = Q_{\text{useful-th}} + Q_{\text{heat-rec}} = 77,4 + 15,51 = 92,91 \text{ MJ/h}.$$

Αφού η θερμική ενέργεια δεν αρκεί για την λειτουργία του συστήματος, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί και η ηλεκτρική ενέργεια. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ισούται με 51,6 MJ/h άρα η συνολική ενέργεια ισούται με:

$$Q_{\text{total}} = 92,91 \text{ MJ/h} + 51,6 \text{ MJ/h} = 144,51 \text{ MJ/h}$$

Καταλήγοντας το προτεινόμενο σύστημα δύναται να λειτουργήσει με αυτονομία. Η ηλεκτρική ενέργεια που περισσεύει θα καλύψει μέρος των ενεργειακών αναγκών των υπόλοιπων διαφορετικών τμημάτων της ΕΕΛ.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. Συμπεράσματα και προτάσεις

Στην παρούσα διπλωματική πραγματοποιήθηκε η καταγραφή των χαρακτηριστικών εισερχόμενου και εξερχόμενου αποβλήτου της ΕΕΛ Ρεθύμνου. Επίσης, μελετήθηκε η απόδοση του πιλοτικού μικροκόσκινου που είναι εγκατεστημένο στην συγκεκριμένη ΕΕΛ, ώστε να αξιολογηθεί κατά πόσο μπορεί να θεωρηθεί ιδανική λύση για την αποφόρτιση της δεξαμενής αερισμού. Επιπλέον, έγινε αξιολόγηση του ενεργειακού περιεχομένου των παραγόμενων μικροκοσκινισμένων βιοστερεών και προτάθηκε πλήρης διαδικασία αξιοποίησης τους.

Πιο συγκεκριμένα, μετρήθηκαν σε δείγματα εισερχόμενου - εξερχόμενου αποβλήτου της ΕΕΛ Ρεθύμνου, τα TSS ( $170 \pm 59$  mg/L,  $19 \pm 11$  mg/L), BOD<sub>5</sub> ( $311 \pm 46$  mg/L,  $7 \pm 2$  mg/L), και COD ( $199 \pm 46$  mg/L,  $62 \pm 18$  mg/L), αντίστοιχα. Επίσης, σχετικά με την απόδοση της μικροκοσκίνισης και τα χαρακτηριστικά παραγόμενων βιοστερεών μετρήθηκαν: τα TSS εισόδου ( $194 \pm 51$  mg/L) και εξόδου ( $159 \pm 46$  mg/L), η υγρασία (M) των μικροκοσκινισμένων βιοστερεών ( $64 \pm 2\%$ ), τα VS ( $90 \pm 1\%$  των TS) καθώς και η HHV ( $21,5 \pm 1,4$  MJ/kg). Τέλος, λόγω του αξιόλογου ενεργειακού περιεχομένου των μικροκοσκινισμένων βιοστερεών, προτείνεται ολοκληρωμένη διαχείριση τους με στόχο την παραγωγή ενέργειας.

Συμπερασματικά, η τεχνολογία της μικροκοσκίνισης μπορεί να αντικαταστήσει ικανοποιητικά την δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης, εξοικονομώντας χώρο και χρήματα. Επίσης, μπορεί να μειώσει την ενεργειακή κατανάλωση της δεξαμενής αερισμού, λόγω της απομάκρυνσης των στερεών από το απόβλητο, επιτυγχάνοντας έτσι την μείωση των ενεργειακών αναγκών της ΕΕΛ.

Ακόμη, το προτεινόμενο σύστημα αξιοποίησης βιοστερεών (μικροκοσκίνιση-ηλιακή ξήρανση-αεριοποίηση) μπορεί να λειτουργήσει αυτόνομα, αφού με βάση τους υπολογισμούς το περίσσειμα ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καλυφθούν οι ενεργειακές ανάγκες των υπόλοιπων τμημάτων της μονάδας, καθιστώντας την ενεργειακά αυτόνομη.

Εν κατακλείδι, σε μελλοντική έρευνα θα ήταν χρήσιμο να μελετηθούν τα παρακάτω:

- Κατά την λειτουργία του μικροκόσκινου περνούσε το  $\frac{1}{4}$  της παροχής της ΕΕΛ Ρεθύμνου, θα ήταν ενδιαφέρον να μελετηθεί να διέρχεται η συνολική παροχή.
- Να πραγματοποιηθεί οικονομική μελέτη για την βιωσιμότητα της μονάδας χρησιμοποιώντας ως καύσιμο τα βιοστερεά.
- Θεσμοθέτηση αξιοποίησης βιοστερεών, καθώς παράγεται ενέργεια για τις ανάγκες των ΕΕΛ με ελάχιστο περιβαλλοντικό κόστος.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. Βιβλιογραφία

Fytilli D. and Zabaniotou A. (2008). Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods - a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews.

Bridgwater A. and Evans G. (1993). An Assessment of Thermochemical Conversion Systems for Processing Biomass and Refuse, Energy Technology Support Unit on behalf of the Department of Trade, ETSU B/T1/00207/REP.

Gikas P., Noll S., Stedman K. (2011). Gasification of Primary Fine-Screened Solids for Energy Production, Eurasia Waste Management Symposium, Halic Congress Center, Istanbul.

Kreith F. and Krumdieck S. (2014). Principles of Sustainable Energy Systems.

Jadhao J. and Thombare D. (2013). Review on Exhaust Gas Heat Recovery for IC Engine, International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT).

Biomass Gasification Research (2014). Retrieved 18 12, 2022 from [https://www.eiu.edu/energy/hhv\\_of\\_syn\\_gas.pdf](https://www.eiu.edu/energy/hhv_of_syn_gas.pdf)

Gikas P. (2017). Ultra high temperature gasification of municipal wastewater primary biosolids in a rotary kiln reactor to produce synthetic gas, Journal of Environmental Management.

Kelessidis A. and Stasinakis A. (2012). Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries.

Mamais D. and Stasinakis A. (2015). Wastewater treatment process impact on energy savings and greenhouse gas emissions. Water Science and Technology.

Agrafioti E. and Diamadopoulos E. (2012). A strategic plan for reuse of treated municipal wastewater for crop irrigation on the Island of Crete. Agricultural Water Management.

Lema J. (2017). Innovative wastewater treatment & resource recovery technologies: impacts on energy, economy and environment. London: IWA publishing.

Gikas P. and Manali A. (2018). Mass And Energy Balances For Gasification Of Primary Sieved Solids. 5th International Conference on Small And Decentralized Water and Wastewater Treatment Plants (SWAT). Thessaloniki: 5th SWAT Conference.

Gikas P. and Manali A. (2019). Thermal And Electric Energy Production Using Primary Sieved Solids From Municipal Wastewater, as Gasification Feedstock. Patra: Summer School on Wastewater and Biosolids Management (WWSS19).

Gikas P. and Manali A. (2019). Utilization Of Primary Sieved Solids For Gasification And Energy Production. Sardinia: 17th International Waste Management and Landfill Symposium.

Gikas P. and Manali A. (2020). Energy consumption and internal distribution in activated sludge wastewater plants of Greece.

Gikas P. and Manali A. (2021). Anaerobic Digestion for Biogas Production from Municipal Sewage Sludge: A Comparative Study between Fine Mesh Sieved Primary Sludge and Sedimented Primary Sludge.

Panepinto D., Fiore S., Zappone M., Genon G., Meucci L. (2016). Evaluation of the energy efficiency of a large wastewater treatment plant in Italy.

Tchobanoglous G., Burton F., Stensel H. (2003). Metcalf and Eddy wastewater engineering: treatment and reuse. New York: McGraw-Hill.

Γκίκας Π. (2020). Σημειώσεις μαθήματος: Σχεδιασμός Περιβαλλοντικών Εγκαταστάσεων και Εκτίμηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων I & II, Πολυτεχνείο Κρήτης.

Διαλυνάς Γ. (1994). Petra II, Λειτουργία και συντήρηση μικρών μονάδων επεξεργασίας λυμάτων.

Ψυλλάκη Ε. (2014). Σημειώσεις μαθήματος “Ελέγχου ρύπανσης νερών”, Πολυτεχνείο Κρήτης.

Καρπούζας Δ. (2014). Πρωτοβάθμια επεξεργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Κεχαγιαδάκη Δ. (2019). Τοξικές ουσίες στην Ιλύ της Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων Ρεθύμνου. Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.

Λεγοντής Α. (2010). Μεταπτυχιακή διατριβή διαχείριση και επεξεργασία υγρών αποβλήτων στην εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων Καβάλας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Αγρονόμων Τοποπογράφων Μηχανικών.

Λέκκα Θ. (2013). Επεξεργασία υγρών αποβλήτων – περιγραφή και λειτουργία μονάδας επεξεργασίας λυμάτων Ιωαννίνων. Ηράκλειο: Τεχνολογικό και εκπαιδευτικό ίδρυμα Κρήτης σχολή τεχνολογικών εφαρμογών, τμήμα: Μηχανολογίας.

Βρυλλάκης Μ., Πριναράκης Δ. (2010). Μελέτη αναβάθμισης και επέκτασης βιολογικού καθαρισμού Ρεθύμνου.

Νταρακάς Ε. (2016). Τεχνικές περιβάλλοντος, διεργασίες επεξεργασίας νερού και υγρών αποβλήτων. Εκδόσεις Σοφία Θεσσαλονίκη.

Παντίδου Αρ., Αντέλλη Κ. (2019). Σημειώσεις εργαστηριακών ασκήσεων Ελέγχου ρύπανσης νερών, Πολυτεχνείο Κρήτης.

Σκουντούρογλου Ε. (2019). Μέθοδοι εξυγίανσης και χαρακτηρισμός ιλύος, εγκαταστάσεων επεξεργασίας αστικών λυμάτων. Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, τμήμα: Πολιτικών Μηχανικών.

Στασινάκης Α. (2015). Σημειώσεις μαθήματος: Εισαγωγή στην περιβαλλοντική μηχανική, μέθοδοι επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, Πανεπιστήμιο Αιγαίου.

Στεφανάκης Α. (2022). Σημειώσεις μαθήματος: Φυσικές διεργασίες στην επεξεργασία νερού και υγρών αποβλήτων, Πολυτεχνείο Κρήτης.

Τσαμουτσόγλου Κ. (2020). Ισοζύγια μάζας και ενέργειας του καινοτομικού συστήματος ενεργειακής αξιοποίησης βιοστερεών με τη μέθοδο της αεριοποίησης, Πολυτεχνείο Κρήτης.

Κατσιμαντού Κ. (2007). Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία με τίτλο: Ξήρανση Ιλύος Αστικών και Βιομηχανικών Αποβλήτων με τη βοήθεια της Ηλιακής Ενέργειας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πολυτεχνική Σχολή Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

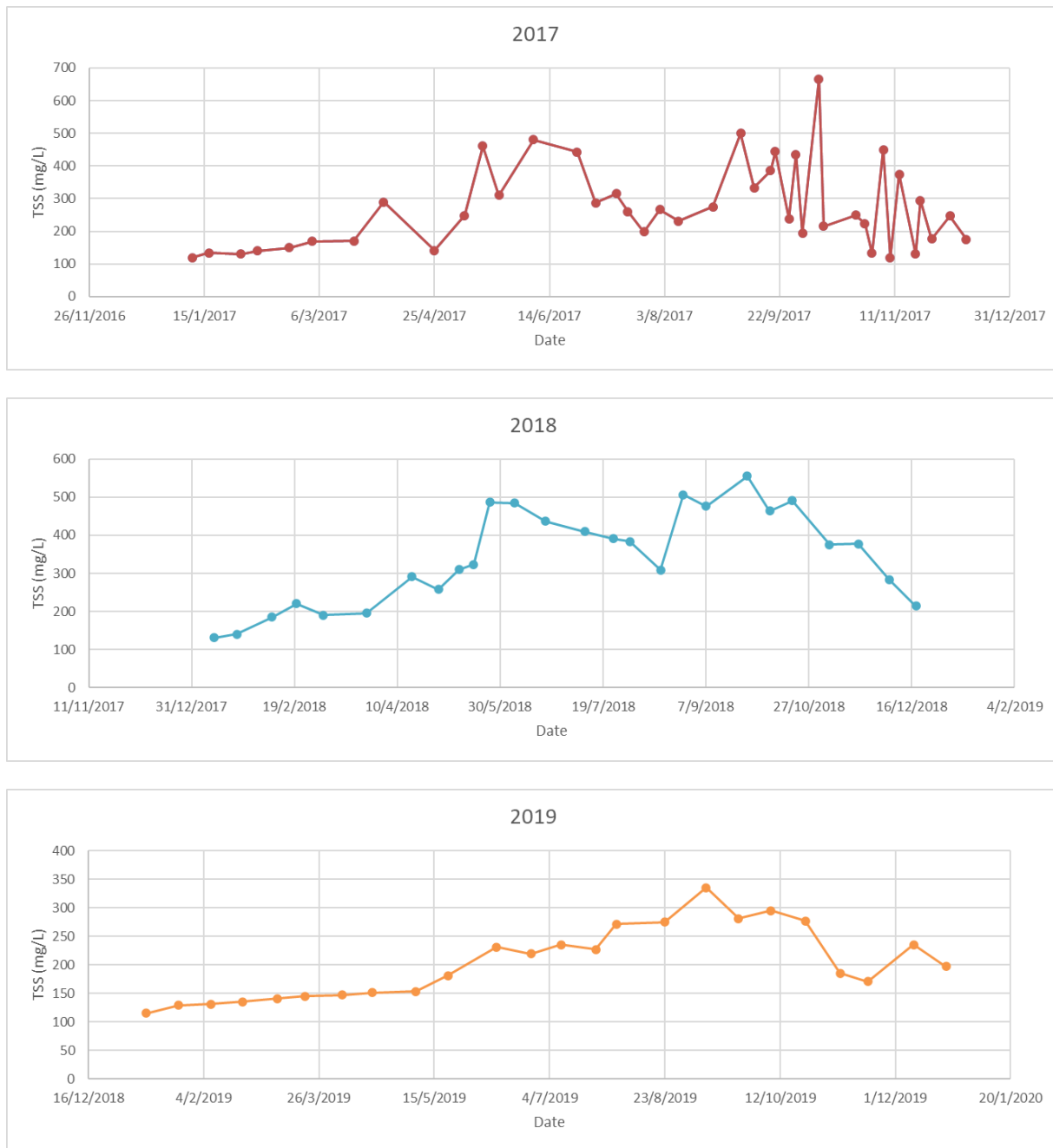
Ηλιακή ξήρανση λυματολάσπης (2020). Ανακτήθηκε στις 10/12/2022 από <https://mesogeos.gr/biosolids-technologies-solar-drying>

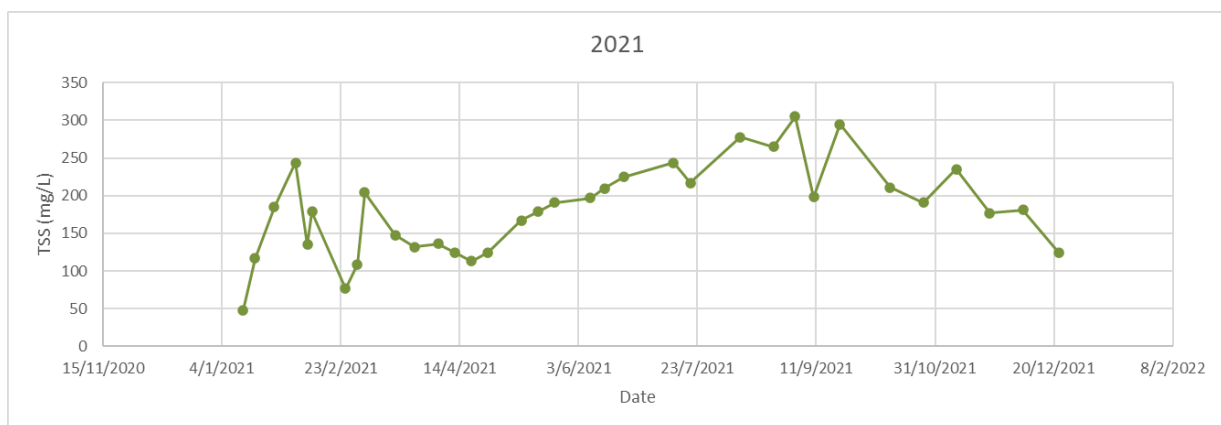
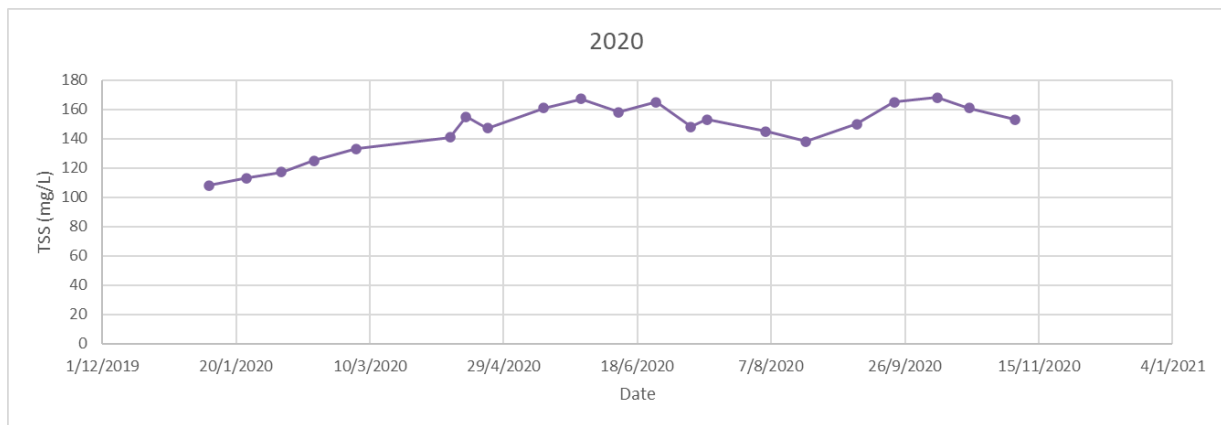


## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. Παράρτημα

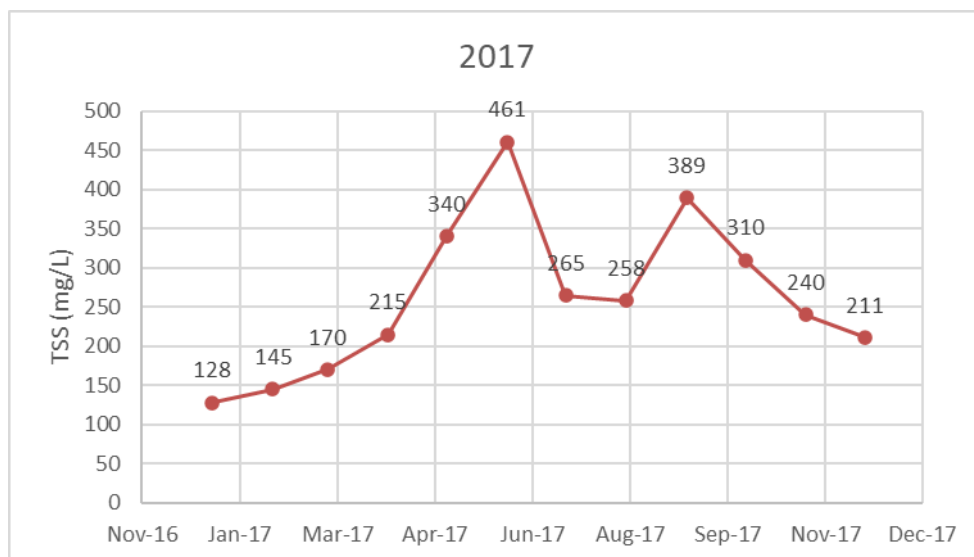
### 9.1 Δεδομένα TSS εισόδου 2017-2021 από ΕΕΛ Ρεθύμνου

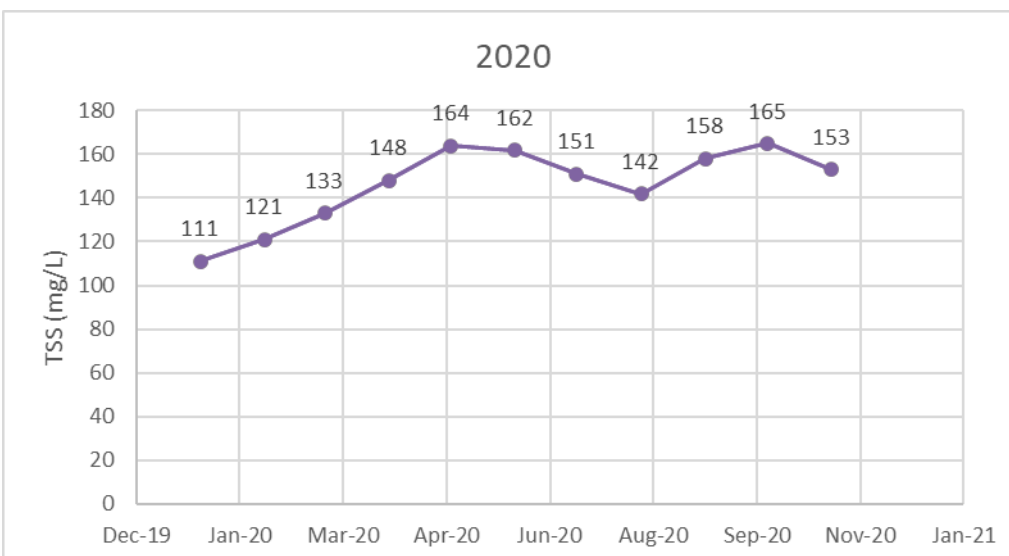
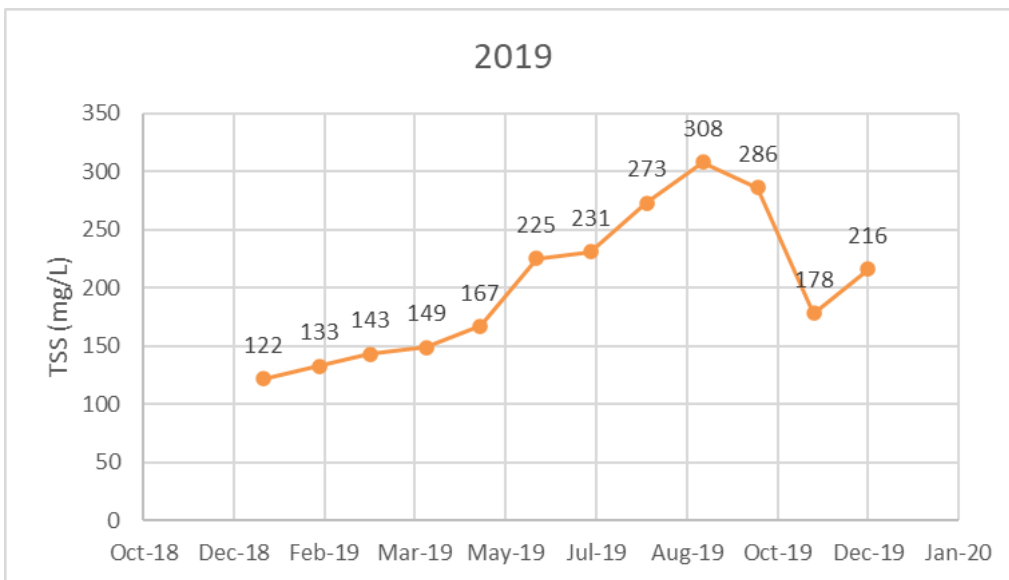
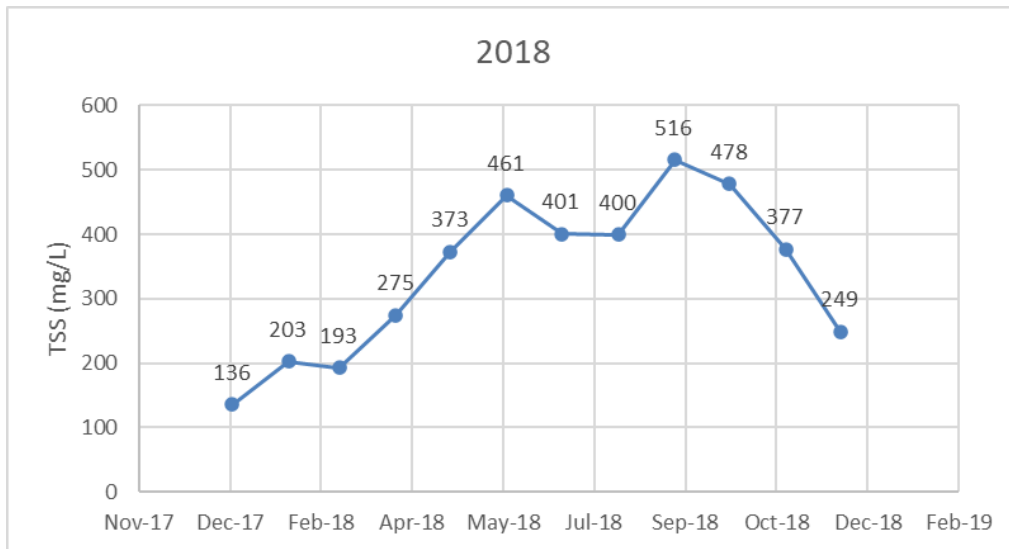
#### 9.1.1 Ημερήσια





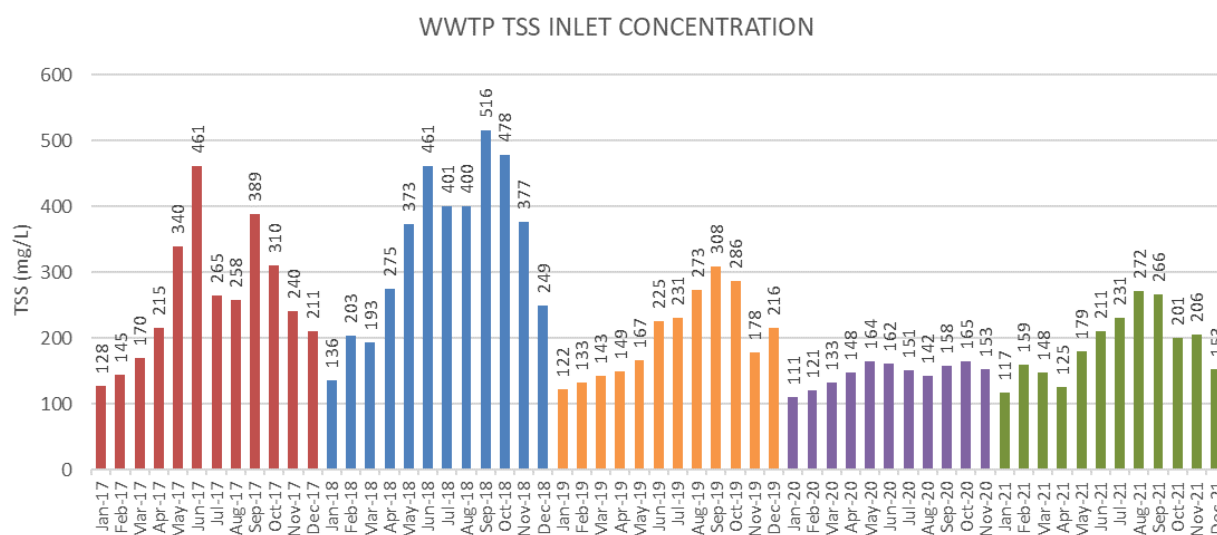
### 9.1.2 Μηνιαία







### 9.1.3 Συγκεντρωτικά



## 9.2 Υπολογισμός πυκνότητας καυσαερίων

Στους Πίνακες 9.1 και 9.2 παρουσιάζεται η μεθοδολογία υπολογισμού της πυκνότητας των καυσαερίων της μηχανής εσωτερικής καύσης. Στον Πίνακα 9.1 υπολογίστηκε το μίγμα τροφοδοσίας (syngas-air) στη μηχανή εσωτερικής καύσης, θεωρώντας ότι η αναλογία syngas/air είναι 1:1 και γνωρίζοντας τα κύρια συστατικά του syngas και του αέρα (Reed & Das, 1988).

Πίνακας 9.1 Υπολογισμός μίγματος τροφοδοσίας της μηχανής εσωτερικής καύσης.

| Κύρια συστατικά syngas | Σύσταση syngas (%v/v)<br>(Dogru et al., 2002) | Σύσταση αέρα (%v/v)<br>(Egorov & Karpushkin, 1988) | Μίγμα Τροφοδοσίας 1:1 (% v/v) |
|------------------------|---|--|-------------------------------|
| H <sub>2</sub>         | 11,0  | 0  | 5,5                           |
| CO                     | 8,5   | 0  | 4,25                          |
| O <sub>2</sub>         | 0,5   | 21   | 10,75                         |
| N <sub>2</sub>         | 64  | 79   | 71,5                          |
| CO <sub>2</sub>        | 13  | 0  | 6,5                           |
| H <sub>2</sub> O       | 3   | 0  | 1,5                           |
| Σύνολο                 | 100   | 100  | 100                           |

Έπειτα πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός της πυκνότητας των καυσαερίων της μηχανής εσωτερικής καύσης. Για τους υπολογισμούς του Πίνακα 9.2 θεωρήθηκε η παραδοχή ότι το syngas είναι ιδανικό αέριο, επομένως ισχύει η καταστατική εξίσωση. Οι αντιδράσεις που πραγματοποιούνται είναι:

- $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$  (1)
- $2\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2$  (2)

Πίνακας 9.2 Υπολογισμός της σύστασης των καυσαερίων της μηχανής εσωτερικής καύσης.

| Κύρια συστατικά καυσαερίων | Σύσταση καυσαερίων(%v/v) | Σύσταση καυσαερίων(%v/v) στο 100% | Μοριακό βάρος (g/mol) | Μάζα(g) | Σύσταση καυσαερίων(%w/w) | Κλάσμα μάζας | Πυκνότητα στους 400°C (kg/m <sup>3</sup> ) |
|----------------------------|--------------------------|-----------------------------------|-----------------------|---------|--------------------------|--------------|--|
| H <sub>2</sub>             | 0                        | 0                                 | 2                     | 0       | 0                        | 0            | 0  |
| CO                         | 0                        | 0                                 | 28                    | 0       | 0                        | 0            | 0  |
| O <sub>2</sub>             | 5,88                     | 6,18                              | 32                    | 197,60  | 7,10                     | 0,071        | 0,60                                       |
| N <sub>2</sub>             | 71,50                    | 75,16                             | 28                    | 2104,60 | 75,20                    | 0,75         | 0,50                                       |
| CO <sub>2</sub>            | 10,75                    | 11,30                             | 44                    | 497,20  | 17,80                    | 0,18         | 0,80                                       |
| H <sub>2</sub> O           | 7                        | 7,36                              | 18                    | 0       | 0                        | 0            | 0  |
| Σύνολο                     | 95,13                    | 100                               |                       | 2799,50 | 100                      | 1            | 0,56                                       |

Αφού θεωρήθηκε ιδανικό αέριο η αναλογία των όγκων ισούται με αυτή των moles, υπολογίστηκε το γινόμενο του μοριακού βάρους του κάθε συστατικού και της σύστασης των καυσαερίων (%v/v) στο 100%, η μάζα των συστατικών του καυσαερίου (%w/w). Από το γινόμενο του κλάσματος της μάζας και της πυκνότητας στους 400°C του κάθε συστατικού των καυσαερίων, υπολογίστηκε ότι η πυκνότητα των καυσαερίων ισούται με 0,56 kg/m<sup>3</sup>.