



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ**

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

**ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΒΙΟΣΤΕΡΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ  
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ  
ΜΙΚΡΟΚΟΣΚΙΝΙΣΗΣ - ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ**

**ΑΝΘΟΥΛΑ ΜΑΝΑΛΗ**

A.M.: 2017057470

«Η υλοποίηση της διδακτορικής διατριβής συγχρηματοδοτήθηκε από την Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού, Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση», 2014-2020, στο πλαίσιο της Πράξης «Ενίσχυση του ανθρώπινου δυναμικού μέσω της υλοποίησης διδακτορικής έρευνας Υποδράση 2: Πρόγραμμα χορήγησης υποτροφιών ΙΚΥ σε υποψηφίους διδάκτορες των ΑΕΙ της Ελλάδας».



**Επιχειρησιακό Πρόγραμμα  
Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού,  
Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση**

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



**Χανιά, Οκτώβριος 2023**

## ΕΛΛΗΝΙΚΟΣ ΤΙΤΛΟΣ

# «Αξιοποίηση βιοστερεών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με συνδυασμό των μεθόδων μικροκοσκίνισης - αεριοποίησης»

## ΑΓΓΛΙΚΟΣ ΤΙΤΛΟΣ

# “Valorization of biosolids for the production of electric energy by the microsieving - gasification methods”

## ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

### **1. Πέτρος Γκίκας, Καθηγητής (Επιβλέπων)**

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

### **2. Νικόλαος Καλογεράκης, Ομότιμος Καθηγητής**

Εργαστήριο Βιοχημικής Μηχανικής & Περιβαλλοντικής Βιοτεχνολογίας Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης

### **3. Απόστολος Γιαννής, Επίκουρος Καθηγητής**

Εργαστήριο Διαχείρισης Τοξικών και Επικίνδυνων Αποβλήτων, Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης

### **4. Κωνσταντίνος Χρυσικόπουλος, Καθηγητής**

Εργαστήριο Τεχνολογίας του Περιβάλλοντος, Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης

### **5. Παράσχος Μελίδης, Καθηγητής**

Εργαστήριο Διαχείρισης και Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης

### **6. Στέργιος Βακάλης, Επίκουρος Καθηγητής**

Τομέας Περιβαλλοντικής Μηχανικής και Επιστήμης, Τμήμα Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Αιγαίου

### **7. Μιχαήλ Φουντουλάκης, Επίκουρος Καθηγητής**

Τομέας Περιβαλλοντικής Μηχανικής και Επιστήμης, Τμήμα Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Αιγαίου

"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".

## Περίληψη

Η μη αποτελεσματική λειτουργία των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) λόγω της υπερφόρτωσης, σε συνδυασμό με τις υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις των εγκαταστάσεων παρατεταμένου αερισμού, αλλά και την μη ικανοποιητική διαχείριση των βιοστερεών αποτελούν σημαντικά προβλήματα, που θα μπορούσαν να επιλυθούν μέσω ενός καινοτομικού συστήματος απομάκρυνσης των αιωρούμενων στερεών από τα λύματα πριν αυτά υποστούν βιολογική επεξεργασία και επακόλουθης αξιοποίησης των παραγόμενων βιοστερεών.

Μία τέτοια πιλοτική μονάδα, με δυναμικότητα 5.000 m<sup>3</sup>/d εισερχόμενου αποβλήτου, έχει εγκατασταθεί στην ΕΕΛ Ρεθύμνου, αποτελούμενη κατά σειρά από: απομάκρυνση μέρους των στερεών ανάντη της δεξαμενής αερισμού μέσω μικροκοσκίνισης, αφαίρεση υγρασίας των παραγόμενων μικροκοσκινισμένων βιοστερεών μέσω ξήρανσης, παραγωγή αερίου σύνθεσης από τα βιοστερεά μέσω αεριοποίησης, και παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας από την καύση του παραγόμενου αερίου σύνθεσης μέσω μιας Μηχανής Εσωτερικής Καύσης (ΜΕΚ), για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του συστήματος.

Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής, πέρα από την ανάδειξη του ενεργειακού προβλήματος των ΕΕΛ ενεργού ιλύος, εξετάζονται και αξιολογούνται οι τεχνολογίες της προτεινόμενης μεθόδου, οι εφαρμογές τους και η πιθανότητα ευρείας υιοθέτησής τους από τις ΕΕΛ, διερευνώντας έτσι την αξιοποίηση του ενεργειακού περιεχομένου των αστικών υγρών αποβλήτων. Συγκεκριμένα, οι βασικοί στόχοι της διατριβής είναι: (i) η μελέτη του προφίλ των ΕΕΛ της Ελλάδος, ώστε να αναδειχθεί ενεργειακό τους πρόβλημα, (ii) ο σχεδιασμός, η κατασκευή και βελτιστοποίηση της λειτουργίας της παραπάνω πιλοτικής μονάδας, (iii) η εξέταση αποδοτικότητας της μικροκοσκίνισης και της αεριοποίησης, (iv) ο υπολογισμός του κρίσιμου μεγέθους πάνω από το οποίο μια εγκατάσταση μικροκοσκίνισης - αεριοποίησης ανάντη μιας συμβατικής ΕΕΛ ενεργού ιλύος θα έχει θετικό ενεργειακό ισοζύγιο, καθώς και (v) ο χαρακτηρισμός των παραγόμενων βιοστερεών, ο προσδιορισμός σύστασης των παραπροϊόντων και η πρόταση κατάλληλου τρόπου διαχείρισής τους.

Το σύνολο των αποτελεσμάτων των μελετών που διεξήχθησαν οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η προτεινόμενη μέθοδος προ-επεξεργασίας λυμάτων και αξιοποίησης των παραγόμενων βιοστερεών μπορεί να αποτελέσει λύση στις περιβαλλοντικές και οικονομικές παθογένειες που χαρακτηρίζουν τις σύγχρονες συμβατικές ΕΕΛ. Συγκεκριμένα, με την μικροκοσκίνιση απομακρύνεται περίπου το 30 % των στερεών από τα απόβλητα, ενώ παράλληλα παράγονται περίπου 8 kg/h μικροκοσκινισμένα βιοστερεά (σε ξηρή βάση), τα οποία χαρακτηρίζονται από υψηλό ποσοστό οργανικών στερεών (TS 36 ± 2 %, VS 89,6 ± 0,69 % των TS) και αξιόλογο ενεργειακό περιεχόμενο (HHV 21,479 ± 1,434 MJ/kg) που τα καθιστά ιδανικά για υλικό τροφοδοσίας θερμικών μεθόδων επεξεργασίας και επομένως κατάλληλα για περαιτέρω ενεργειακή αξιοποίηση. Ως προς την ενεργειακή αυτονομία της μονάδας, οι υπολογισμοί των ισοζυγίων μάζας και ενέργειας έδειξαν ότι μπορεί να μην είναι δυνατό να επιτευχθεί πλήρης αυτονομία στην παρούσα εφαρμογή, όμως υπάρχουν πολλές εναλλακτικές που οδηγούν σε θετικό αποτέλεσμα με μικρές τροποποιήσεις, οι οποίες μπορούν εύκολα να ενσωματωθούν στην πιλοτική μονάδα σε μελλοντικές εφαρμογές. Επίσης, από τα ισοζύγια φάνηκε ότι τα συστήματα μεγαλύτερης δυναμικότητας πλεονεκτούν ενεργειακά συγκριτικά με τα μικρότερα λόγω «οικονομίας κλίμακος», αφού καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια ανά μονάδα εισερχόμενης μάζας. Τέλος, από τον προσδιορισμό των εισροών - εκροών, την εκτίμηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος αλλά και την Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) της πιλοτικής μονάδας προέκυψε ότι η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου προκαλεί περιβαλλοντική βελτίωση συγκριτικά με τις συνήθεις μεθόδους που εφαρμόζονται ευρέως στις συμβατικές ΕΕΛ.

**Λέξεις - κλειδιά:** ΕΕΛ, βιοστερεά, μικροκοσκίνιση, αεριοποίηση, παραγωγή ενέργειας.



## Abstract

The ineffective operation of WasteWater Treatment Plants (WWTP) due to overloading, in combination with the high energy demands of extended aeration plants, as well as the unsatisfactory management of biosolids, are considered as important problems, which could be solved through an innovative system for the removal of suspended solids from wastewater before biological treatment and subsequent valorization of the produced biosolids.

Such a pilot plant, with capacity of 5.000 m<sup>3</sup>/d of incoming wastewater, has been installed at the WWTP of Rethymno, consisting of: partial solids removal upstream of the aeration tank through microsieving, moisture removal of the produced microsieved biosolids through drying, syngas production from the biosolids through gasification, and electric and thermal energy production from syngas combustion in an Internal Combustion Engine (ICE), for the coverage of energy needs of the system.

In the framework of the present doctoral thesis, except the highlighting of the energy problem of activated sludge WWTPs, the technologies of the suggested method along with their current applications and the potential of their wide apply in WWTPs are examined and evaluated, investigating thus the valorization of wastewater energy content. Specifically, the major goals of this thesis are: (i) the study of the profile of Greek WWTPs, in order to identify their energy problem, (ii) the design, manufacture, and optimization of the aforementioned pilot plant, (iii) the efficiency examination of microsieving and gasification, (iv) the calculation of the critical size above which a microsieving - gasification plant upstream of a conventional activated sludge WWTP will have a positive energy balance, as well as (v) the characterization of the produced biosolids, the determination of by-products composition and the proposal of their suitable management.

The results of the studies conducted lead to the conclusion that the suggested method of wastewater pre-treatment and produced biosolids valorization could be a solution for the environmental and economic malaises which characterize the modern conventional WWTPs. Specifically, about 30 % of solids is removed from wastewater through microsieving, while around 8 kg/h of microsieved biosolids (on dry basis) are produced, with high organic content (TS 36 ± 2 %, VS 89,6 ± 0,69 % of TS) and remarkable energy content (HHV 21,479 ± 1,434 MJ/kg), characteristics which make them ideal feedstock for thermal treatment methods and suitable for further energy valorization. Regarding the energy autonomy of the plant, the calculations of mass and energy balances showed that it may not be possible to achieve complete autonomy in the present application, but there are plenty of alternatives which lead to positive result with minor modifications, easily adaptable to the pilot plant for future applications. Also, based on the balances, it appears that systems with higher capacity have an energy advantage compared to smaller ones due to “economy of scale”, as they consume less per unit of inlet mass. Finally, based on the inputs - outputs determination, the environmental footprint assessment as well as the Life Cycle Assessment (LCA) of the pilot plant, the application of the proposed method showed an environmental improvement compared to usual methods applied to the conventional WWTPs.

**Keywords:** WWTP; biosolids; microsieving; gasification; energy production.

## Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα μου, Καθηγητή κ. Πέτρο Γκίκα για την υποστήριξη, την καθοδήγηση και την συνεργασία καθ' όλο το διάστημα εκπόνησης της διδακτορικής μου διατριβής, όπως επίσης και τα υπόλοιπα δύο μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, τον Ομότιμο Καθηγητή κ. Νικόλαο Καλογεράκη και τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Απόστολο Γιαννή.

Ευχαριστώ πολύ τα λοιπά μέλη της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής, και συγκεκριμένα τον Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Χρυσικόπουλο, τον Καθηγητή κ. Παράσχο Μελίδη, τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Στέργιο Βακάλη και τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Μιχαήλ Φουντουλάκη, που συντέλεσαν στην επιτυχή ολοκλήρωση και υποστήριξη της διατριβής αυτής.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως τους συναδέλφους υποψήφιους διδάκτορες του εργαστηρίου μας, Γιώργο Μακάρογλου και Κωνσταντίνο Τσαμουτσόγλου, για την συμπαράσταση και την εξαιρετική συνεργασία. Μεγάλο ευχαριστώ στην Μάγκυ Κοσσίδα, στην Λίνα Μαναρώλη και στην Πόπη Αντέλλη, για την πολύτιμη βοήθειά τους, καθώς και σε όλους τους φοιτητές και συνεργάτες του Εργαστηρίου Σχεδιασμού Περιβαλλοντικών Διεργασιών αλλά και του Πολυτεχνείου Κρήτης που βοήθησαν με κάθε τρόπο σε αυτή μου την προσπάθεια.

Τέλος, είμαι ευγνώμων απέναντι στην οικογένειά μου, στους δικούς μου ανθρώπους, συγγενείς και φίλους, για την αμέριστη στήριξη και αγάπη που μου προσφέρουν όλα αυτά τα χρόνια.

## Πίνακας περιεχομένων

|  |    |
|--|----|
| Περίληψη.....  | 3  |
| Abstract.....  | 4  |
| Ευχαριστίες .....  | 5  |
| Πίνακας περιεχομένων .....   | 6  |
| Κατάλογος συντομογραφιών .....   | 10 |
| Κατάλογος πινάκων.....   | 12 |
| Κατάλογος εικόνων .....  | 15 |
| Κατάλογος διαγραμμάτων .....   | 18 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Επεξεργασία αστικών υγρών αποβλήτων .....                                  | 21 |
| 1.1 Αστικά υγρά απόβλητα (λύματα) .....  | 21 |
| 1.2 Συμβατικές μέθοδοι επεξεργασίας αστικών υγρών αποβλήτων .....                      | 24 |
| 1.2.1 Προ-επεξεργασία και πρωτοβάθμια επεξεργασία .....                                | 25 |
| 1.2.2 Δευτεροβάθμια επεξεργασία .....  | 27 |
| 1.2.3 Τριτοβάθμια επεξεργασία .....  | 29 |
| 1.2.4 Απολύμανση .....   | 30 |
| 1.3 Ενεργειακές απαιτήσεις για την συμβατική επεξεργασία αστικών υγρών αποβλήτων ..... | 31 |
| 1.4 Προηγμένες μέθοδοι επεξεργασίας αστικών υγρών αποβλήτων .....                      | 32 |
| 1.4.1 Μembrάνες.....   | 32 |
| 1.4.2 Διεργασία Αναερόβιας Οξείδωσης Αμμωνίου (ANAMMOX).....                           | 34 |
| 1.4.3 Συστήματα Ακινητοποιημένης Βιομάζας (IB) .....                                   | 35 |
| 1.4.4 Προηγμένες Διεργασίες Οξείδωσης (AOPs) .....                                     | 37 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Επεξεργασία και διαχείριση βιοστερεών.....                                 | 40 |
| 2.1 Βιοστερεά (ιλύς) .....   | 40 |
| 2.2 Συμβατικές μέθοδοι επεξεργασίας και διαχείρισης ιλύος.....                         | 41 |
| 2.2.1 Ομογενοποίηση - Πάχυνση .....  | 41 |
| 2.2.2 Σταθεροποίηση .....  | 42 |
| 2.2.3 Αφυδάτωση.....   | 43 |
| 2.3 Ενεργειακές απαιτήσεις για την συμβατική επεξεργασία ιλύος.....                    | 44 |
| 2.4 Προηγμένες μέθοδοι επεξεργασίας βιοστερεών .....                                   | 44 |
| 2.4.1 Κομποστοποίηση .....   | 45 |
| 2.4.2 Μικροκοσκίνιση .....   | 46 |
| 2.4.3 Ηλιακή ξήρανση .....   | 50 |
| 2.4.4 Γεώσακοι (Geobags) .....   | 52 |
| 2.4.5 Απομάκρυνση βαρέων μετάλλων .....  | 53 |
| 2.5 Θερμοχημικές μέθοδοι επεξεργασίας ιλύος .....                                      | 54 |

|             |  |     |
|-------------|--|-----|
| 2.5.1       | Περιγραφή και συγκριτικός συσχετισμός των θερμοχημικών μεθόδων .....   | 54  |
| 2.5.2       | Αεριοποίηση.....   | 55  |
| 2.5.3       | Επεξεργασία αερίου σύνθεσης.....   | 59  |
| 2.5.4       | Εφαρμογές αεριοποίησης βιοστερεών.....   | 61  |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. | Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) Ρεθύμνου .....  | 63  |
| 3.1         | Γενικές πληροφορίες και παράμετροι σχεδιασμού .....  | 63  |
| 3.2         | Περιγραφή εγκατάστασης - Στάδια επεξεργασίας.....  | 65  |
| 3.2.1       | Προ-επεξεργασία .....  | 66  |
| 3.2.2       | Βιολογική επεξεργασία .....  | 67  |
| 3.2.3       | Απολύμανση - Διάθεση λυμάτων.....  | 68  |
| 3.2.4       | Γραμμή επεξεργασίας ιλύος .....  | 68  |
| 3.2.5       | Βοθrolύματα - Βιομηχανικό νερό - Βιομηχανικά υγρά απόβλητα.....  | 70  |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. | Σκοπός και μεθοδολογία διδακτορικής διατριβής.....   | 72  |
| 4.1         | Σκοπός.....  | 72  |
| 4.2         | Μεθοδολογία .....  | 72  |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. | Έργο LIFE B2E4sustainable-WWTP .....   | 74  |
| 5.1         | Θεωρητικό υπόβαθρο - Στόχοι του έργου.....   | 74  |
| 5.2         | Σχεδιασμός - περιγραφή πιλοτικής μονάδας προ-επεξεργασίας των λυμάτων και αξιοποίησης των παραγόμενων βιοστερεών ..... | 75  |
| 5.2.1       | Μικροκοσκίνιση .....   | 77  |
| 5.2.2       | Ξήρανση .....  | 79  |
| 5.2.3       | Αεριοποίηση - Παραγωγή ενέργειας.....  | 82  |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. | Πειραματικό μέρος - Υλικά και μέθοδοι.....   | 87  |
| 6.1         | Πειραματική διαδικασία - Δειγματοληψίες .....  | 87  |
| 6.2         | Αναλυτικές μέθοδοι .....   | 88  |
| 6.2.1       | Ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS).....   | 89  |
| 6.2.2       | Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD) .....  | 89  |
| 6.2.3       | Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD).....  | 90  |
| 6.2.4       | Κατανομή σωματιδίων.....   | 91  |
| 6.2.5       | Ολικά στερεά (TS) – Υγρασία (M).....   | 92  |
| 6.2.6       | Πτητικά στερεά (VS).....   | 93  |
| 6.2.7       | Ανώτερη Θερμογόνος Δύναμη (HHV).....   | 93  |
| 6.2.8       | Στοιχειακή ανάλυση.....  | 96  |
| 6.3         | Συλλογή δεδομένων μελετών και μεθοδολογία επεξεργασίας τους.....   | 97  |
| 6.3.1       | Ενεργειακό προφίλ των ΕΕΛ της Ελλάδος .....  | 97  |
| 6.3.2       | Ισοζύγια μάζας και ενέργειας της πιλοτικής μονάδας.....  | 98  |
| 6.3.3       | Εισροές - εκροές της πιλοτικής μονάδας και τρόποι διαχείρισης.....   | 101 |
| 6.3.4       | Εκτίμηση περιβαλλοντικού αποτυπώματος της πιλοτικής μονάδας .....  | 101 |

|  |  |     |
|--|--|-----|
| 6.3.5                                      | Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA) της πιλοτικής μονάδας .....  | 101 |
| 6.3.6                                      | Εκτίμηση της συνεισφοράς της πιλοτικής μονάδας στην διαμόρφωση του νομικού πλαισίου για την διαχείριση αστικών υγρών αποβλήτων ..... | 103 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. Αποτελέσματα - Συζήτηση.....   |  | 104 |
| 7.1  | Ενεργειακό προφίλ των ΕΕΛ της Ελλάδος .....  | 104 |
| 7.2  | Χαρακτηριστικά εισερχόμενου - εξερχόμενου αποβλήτου και δευτεροβάθμιας ιλύος της ΕΕΛ Ρεθύμνου.....                                   | 107 |
| 7.2.1                                      | TSS εισόδου - εξόδου .....   | 107 |
| 7.2.2                                      | BOD <sub>5</sub> εισόδου - εξόδου .....  | 109 |
| 7.2.3                                      | COD εισόδου - εξόδου .....   | 109 |
| 7.2.4                                      | Δευτεροβάθμια ιλύς.....  | 110 |
| 7.3  | Δοκιμές σχετικά με την μικροκοσκίνιση.....   | 110 |
| 7.3.1                                      | Προκαταρκτικές μετρήσεις πειραματικού μικροκόσκινου .....  | 110 |
| 7.3.2                                      | Δοκιμές πιλοτικού μικροκόσκινου .....  | 117 |
| 7.3.3                                      | Σύγκριση χαρακτηριστικών παραγόμενων βιοστερεών με χρήση διαφορετικών τεχνολογιών κοσκίνισης.....                                    | 122 |
| 7.3.4                                      | Σύγκριση μικροκοσκινισμένων βιοστερεών - πρωτοβάθμιας ιλύος .....  | 122 |
| 7.4  | Ισοζύγια μάζας και ενέργειας της πιλοτικής μονάδας.....  | 123 |
| 7.5  | Εισροές - εκροές της πιλοτικής μονάδας και τρόποι διαχείρισης.....   | 131 |
| 7.6  | Εκτίμηση περιβαλλοντικού αποτυπώματος της πιλοτικής μονάδας .....  | 132 |
| 7.6.1                                      | Εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων .....  | 132 |
| 7.6.2                                      | Αξιολόγηση αναμενόμενου περιβαλλοντικού αποτυπώματος.....  | 133 |
| 7.6.3                                      | Συσσωρευτικές - συνεργιστικές επιπτώσεις.....  | 135 |
| 7.6.4                                      | Προτεινόμενοι τρόποι αντιμετώπισης επιπτώσεων.....   | 135 |
| 7.7  | Αξιολόγηση ενεργειακού περιεχομένου βιοστερεών στην Κρήτη .....  | 136 |
| 7.8  | Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA) της προτεινόμενης μεθόδου προ-επεξεργασίας λυμάτων και αξιοποίησης των παραγόμενων βιοστερεών.....         | 139 |
| 7.9  | Εκτίμηση της συνεισφοράς της πιλοτικής μονάδας στην διαμόρφωση του νομικού πλαισίου για την διαχείριση αστικών υγρών αποβλήτων ..... | 141 |
| 7.9.1                                      | Το νομικό πλαίσιο στην Ελλάδα .....  | 142 |
| 7.9.2                                      | Το νομικό πλαίσιο στην Ευρωπαϊκή Ένωση.....  | 143 |
| 7.9.3                                      | Η εκτιμώμενη συνεισφορά του έργου LIFE B2E4sustainable-WWTP .....  | 144 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. Συμπεράσματα - Προτάσεις ..... |  | 147 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. Βιβλιογραφία .....             |  | 150 |
| 9.1  | Ξενόγλωσση βιβλιογραφία .....  | 150 |
| 9.2  | Ελληνική βιβλιογραφία .....  | 163 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10. Παραρτήματα .....             |  | 165 |
| 10.1                                       | Συγκριτικός πίνακας με οφέλη και περιορισμούς αεριοποίησης - πυρόλυσης - αποτέφρωσης.....  | 165 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 10.2  | Φωτογραφίες του συστήματος κροκίδωσης στην ΕΕΛ Ρεθύμνου .....   | 166 |
| 10.3  | Ερωτηματολόγιο της μελέτης για το ενεργειακό προφίλ των ΕΕΛ της Ελλάδος ....  | 166 |
| 10.4  | Διαγράμματα συγκέντρωσης TSS εισερχόμενου αποβλήτου της ΕΕΛ Ρεθύμνου .  | 170 |
| 10.5  | Φωτογραφίες από τις προκαταρκτικές δοκιμές κροκίδωσης .....   | 173 |
| 10.6  | Φωτογραφίες του σκισμένου φίλτρου του πιλοτικού μικροκόσκινου από χαλίκια ..  | 174 |
| 10.7  | Φωτογραφίες από τις δοκιμές κροκίδωσης του πιλοτικού μικροκόσκινου .....  | 174 |
| 10.8  | Υπολογισμοί ισοζυγίων μάζας και θερμικής ενέργειας της πιλοτικής μονάδας με θετικό αποτέλεσμα.....  | 175 |
| 10.9  | Υπολογισμοί ισοζυγίων μάζας και θερμικής ενέργειας της πιλοτικής μονάδας με χρήση μικροκοσκινισμένων βιοστερεών - δευτεροβάθμιας ιλύος..... | 178 |
| 10.10 | Υπολογισμοί ισοζυγίου ηλεκτρικής ενέργειας της πιλοτικής μονάδας.....   | 181 |
| 10.11 | Διαγράμματα και πίνακες αποτελεσμάτων ΑΚΖ .....   | 192 |

## Κατάλογος συντομογραφιών

|         |  |
|---------|--|
| ANAMMOX | ANAerobic AMMONium OXidation - Αναερόβια Οξειδωση Αμμωνίου                         |
| AOPs    | Advanced Oxidation Processes - Προηγμένες Διεργασίες Οξειδωσης                     |
| B2E     | LIFE B2E4sustainable-WWTP  |
| BOD     | Biochemical Oxygen Demand - Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο                          |
| BS      | Baseline   |
| CEN     | Comité Européen de Normalisation - Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τυποποίησης                  |
| COD     | Chemical Oxygen Demand - Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο                                |
| CTU     | Comparative Toxic Units - Συγκριτικές Μονάδες Τοξικότητας                          |
| DAF     | Dissolved Air Flotation - Επίπλευση Διαλυμένου Αέρα                                |
| DF      | Disc Filter - Φίλτρο Δίσκου  |
| DO      | Dissolved Oxygen - Διαλυμένο Οξυγόνο   |
| EF      | Environmental Footprint - Περιβαλλοντικό Αποτύπωμα                                 |
| ER      | Equivalence Ratio - Λόγος αέρα / καυσίμου  |
| FC      | Fecal Coliforms - Κοπρανώδη Κολοβακτηρίδια   |
| FS      | Fixed Solids - Σταθερά Στερεά  |
| FU      | Functional Unit - Λειτουργική Μονάδα   |
| HHV     | Higher Heating Value - Ανώτερη Θερμογόνος Δύναμη                                   |
| HRT     | Hydraulic Retention Time - Υδραυλικός Χρόνος Παραμονής                             |
| IB      | Immobilized Biomass - Ακίνητοποιημένη Βιομάζα                                      |
| ICE     | Internal Combustion Engine   |
| LCA     | Life Cycle Assessment  |
| LCI     | Life Cycle Inventory - Απογραφή Κύκλου Ζωής  |
| LCIA    | Life Cycle Impact Assessment - Ανάλυση Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής                      |
| LHV     | Lower Heating Value - Κατώτερη Θερμογόνος Δύναμη                                   |
| MBR     | Membrane Bioreactor - Βιοαντιδραστήρας Μεμβρανών                                   |
| MF      | Microfiltration - Μικροδιήθηση   |
| MLSS    | Mixed Liquor Suspended Solids - Αιωρούμενα Στερεά Μικτού Υγρού                     |
| MLVSS   | Mixed Liquor Volatile Suspended Solids - Πτητικά Αιωρούμενα Στερεά Μικτού Υγρού    |
| NF      | Nanofiltration - Νανοδιήθηση   |
| PAHs    | Polycyclic Aromatic Hydrocarbons - Πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες         |
| PC      | Primary Clarifier - Πρωτοβάθμια Καθίζηση   |
| PCBs    | Polychlorinated Biphenyls - Πολυχλωριωμένα διφαινύλια                              |
| PCDD/F  | Polychlorinated Dibenzo(p)Dioxin/Furan - Πολυχλωριωμένες διοβενζοδιοξίνες/φουράνια |

|      |  |
|------|--|
| PSS  | Primary Sieved Solids - Πρωτοβάθμια Μικροκοσκινισμένα Βιοστερεά                |
| RBC  | Rotating Biological Contactors - Περιστρεφόμενοι Βιοδίσκοι                     |
| RBF  | Rotating Belt Filter - Φίλτρο Περιστρεφόμενου Ιμάντα                           |
| RDF  | Rotating Drum Filter - Φίλτρο Περιστρεφόμενου Τυμπάνου                         |
| RO   | Reverse Osmosis - Αντίστροφη Όσμωση  |
| SRT  | Solids Retention Time - Χρόνος Παραμονής Στερεών                               |
| SS   | Settleable Solids - Καθιζάνοντα Στερεά   |
| TC   | Total Coliforms - Ολικά Κολοβακτηρίδια   |
| TDS  | Total Dissolved Solids - Ολικά Διαλυμένα Στερεά                                |
| TDSS | Thickened Dewatered Secondary Sludge - Παχυμένη Αφυδατωμένη Δευτεροβάθμια Ιλύς |
| TN   | Total Nitrogen - Ολικό Άζωτο   |
| TOC  | Total Organic Carbon - Ολικός Οργανικός Άνθρακας                               |
| TP   | Total Phosphorus -Ολικός Φώσφορος  |
| TS   | Total Solids - Ολικά Στερεά  |
| TSS  | Total Suspended Solids - Ολικά Αιωρούμενα Στερεά                               |
| UF   | Ultrafiltration - Υπερδιήθηση  |
| UV   | Ultraviolet - Υπεριώδης  |
| VOC  | Volatile Organic Compounds - Πτητικές Οργανικές Ενώσεις                        |
| VS   | Volatile Solids - Πτητικά Στερεά   |
| WGS  | Water Gas Shift - Αντίδραση μετατόπισης νερού-αερίου                           |
| WWTP | WasteWater Treatment Plant   |
| ΑΕΠΟ | Απόφαση Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων  |
| ΑΚΖ  | Ανάλυση Κύκλου Ζωής  |
| ΔΑ   | Δεξαμενή Αερισμού  |
| ΔΔΚ  | Δεξαμενή Δευτεροβάθμιας Καθίζησης  |
| ΔΕΥΑ | Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης Αποχέτευσης                                       |
| ΔΠΚ  | Δεξαμενή Πρωτοβάθμιας Καθίζησης  |
| ΕΕΛ  | Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων   |
| ΗΖ   | Ηλεκτροπαραγωγό Ζεύγος   |
| ΜΕΚ  | Μηχανή Εσωτερικής Καύσης   |
| ΜΠΕ  | Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων  |
| ΣΔΑ  | Σχέδια Διαχείρισης Αποβλήτων   |
| ΧΥΤΑ | Χώροι Υγειονομικής Ταφής   |



## Κατάλογος πινάκων

|   |     |
|---|-----|
| Πίνακας 1.1 Τα βασικά χαρακτηριστικά των αστικών υγρών αποβλήτων με σύντομη περιγραφή (ARHA, 2017; Farazaki and Gikas, 2019; Metcalf and Eddy, 2003; Νταρακάς, 2010; Σαββάκης, 2016)..... | 21  |
| Πίνακας 1.2 Τυπική σύνθεση ανεπεξέργαστων αστικών υγρών αποβλήτων στις ΗΠΑ (Metcalf and Eddy, 2003).....  | 23  |
| Πίνακας 1.3 Χαρακτηριστικά και περιγραφή διεργασιών μεμβρανών με διαφορά πίεσης (Conidi et al., 2020; Eyvaz & Yüksel, 2018; Valdez, 2012). ....   | 33  |
| Πίνακας 1.4 Βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των AOPs με χρήση O <sub>3</sub> και UV (Ξεκουκουλωτάκης, 2023). ....  | 39  |
| Πίνακας 2.1 Εξοικονόμηση ενέργειας με την ενσωμάτωση RBF σε ΕΕΛ ενεργού ιλύος (Franchi and Santoro, 2015).....  | 48  |
| Πίνακας 2.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των τεχνολογιών απομάκρυνσης βαρέων μετάλλων από την ιλύ ([+] πλεονέκτημα, [-] μειονέκτημα, [/] άγνωστη επίδραση) (Geng et al., 2020).....    | 54  |
| Πίνακας 2.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των ευρέως εφαρμοζόμενων τύπων αεριοποιητών (Beenackers, 1999; Kishore, 2009; Samiran et al., 2016). ....                                     | 57  |
| Πίνακας 3.1 Δεδομένα σχεδιασμού της υφιστάμενης ΕΕΛ Ρεθύμνου (έτος 2014) και της επέκτασής της (έτος 2028) (ΑΕΠΟ, 2014). ....   | 64  |
| Πίνακας 3.2 Δεδομένα σχεδιασμού της μονάδας προ-επεξεργασίας βιομηχανικών αποβλήτων (ΑΕΠΟ, 2014).....   | 64  |
| Πίνακας 3.3 Όρια εκροής ρυπαντικών φορτίων της ΕΕΛ (ΑΕΠΟ, 2014). ....   | 64  |
| Πίνακας 3.4 Μέγιστες επιτρεπόμενες συγκεντρώσεις μετάλλων και οργανικών ουσιών στην ιλύ (ΑΕΠΟ, 2014).....   | 65  |
| Πίνακας 3.5 Βασικά χαρακτηριστικά δεξαμενών αερισμού (Ματσούκα, 2003). ....   | 67  |
| Πίνακας 3.6 Χαρακτηριστικά δεξαμενής χλωρίωσης (Κεχαγιαδάκη, 2019).....   | 68  |
| Πίνακας 3.7 Μέθοδοι προ-επεξεργασίας και γραμμές επεξεργασίας των βιομηχανικών αποβλήτων ανάλογα την προέλευσή τους (βυρσοδεψία, σφαγεία, τυροκομεία).....                                | 71  |
| Πίνακας 5.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά του πιλοτικού ξηραντηρίου. ....  | 81  |
| Πίνακας 6.1 Όγκος δείγματος και συντελεστής για τον υπολογισμό του BOD ανάλογα την κλίμακα μέτρησης (Παντίδου και Αντέλλη, 2019). ....  | 90  |
| Πίνακας 7.1 Χαρακτηριστικά δευτεροβάθμιας αφυδατωμένης ιλύος από την ΕΕΛ Ρεθύμνου (μέσος όρος ± τυπική απόκλιση τριών μετρήσεων).....   | 110 |
| Πίνακας 7.2 Παραγωγή βιοστερεών (υγρή - ξηρή βάση) ανά ημέρα (5000 m <sup>3</sup> αποβλήτου).113  |     |
| Πίνακας 7.3 Αποτελέσματα στοιχειακής ανάλυσης μικροκοσκινισμένων βιοστερεών.....  | 116 |
| Πίνακας 7.4 Ποσοστιαία απομάκρυνση TSS του πιλοτικού μικροκόσκινου. ....  | 118 |
| Πίνακας 7.5 Σύγκριση θεωρητικής και πραγματικής παραγωγής βιοστερεών. ....  | 118 |
| Πίνακας 7.6 Μετρήσεις VS (%) εκ των TS (%) για τα μικροκοσκινισμένα βιοστερεά του πιλοτικού μικροκόσκινου. ....   | 121 |
| Πίνακας 7.7 Χαρακτηριστικά παραγόμενων βιοστερεών από πιλοτικό μικροκόσκινο της ΕΕΛ Ρεθύμνου συγκριτικά με λεπτοκόσκινο της ΕΕΛ Ηρακλείου.....  | 122 |
| Πίνακας 7.8 Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά μικροκοσκινισμένων βιοστερεών και πρωτοβάθμιας ιλύος.....   | 123 |

|  |     |
|--|-----|
| Πίνακας 7.9 Υπολογισμοί ισοζυγίων μάζας και θερμικής ενέργειας της πιλοτικής μονάδας.  | 124 |
| Πίνακας 7.10 Υπολογισμοί ισοζυγίου ηλεκτρικής ενέργειας της πιλοτικής μονάδας όπως είναι εγκατεστημένη στην ΕΕΛ Ρεθύμνου (Δυναμικότητα: 5.000 m <sup>3</sup> /d, Υλικό τροφοδοσίας: 100% μικροκοσκινισμένα βιοστερεά).   | 126 |
| Πίνακας 7.11 Υπολογισμοί ισοζυγίων ηλεκτρικής ενέργειας της πιλοτικής μονάδας σε ΕΕΛ με βελτιωμένη διάταξη στον χώρο για διάφορες δυναμικότητες (5.000, 10.000 και 25.000 m <sup>3</sup> /d) και διάφορους συνδυασμούς υλικών τροφοδοσίας (100% μικροκοσκινισμένα βιοστερεά, 50% μικροκοσκινισμένα βιοστερεά - 50% ηλιακά ξηραμένη δευτεροβάθμια ιλύς και 50% μικροκοσκινισμένα βιοστερεά - 50% αφυδατωμένη δευτεροβάθμια ιλύς). | 129 |
| Πίνακας 7.12 Αξιολόγηση επιπτώσεων κατά την φάση κατασκευής της πιλοτικής μονάδας του έργου LIFE B2E4sustainable-WWTP.   | 133 |
| Πίνακας 7.13 Αξιολόγηση επιπτώσεων κατά την φάση λειτουργίας της πιλοτικής μονάδας του έργου LIFE B2E4sustainable-WWTP.  | 134 |
| Πίνακας 7.14 Αποτελέσματα μετρήσεων θερμογόνου δύναμης (HHV, MJ/kg) διαφόρων ειδών ιλύων από ΕΕΛ της Κρήτης.   | 137 |
| Πίνακας 7.15 Τιμές θερμογόνου δύναμης (HHV, MJ/kg) διαφόρων ειδών ιλύων που αναφέρονται βιβλιογραφικά (Abbas et al., 2011; Barber, 2014; Celebi et al., 2021; Fytli and Zabaniotou, 2008; Grabowski and Oleszkiewicz, 1998; Hall, 1999; Huang et al., 2021; Kowalik, 1998; Menon et al., 2020; Ostojski, 2018; Zygadlo, 2001).   | 138 |
| Πίνακας 7.16 Σύγκριση περιβαλλοντικών επιπτώσεων των συστημάτων BS και BS + B2E.   | 141 |
| Πίνακας 7.17 Συνεισφορά του έργου LIFE B2E4sustainable-WWTP στο νομικό πλαίσιο επεξεργασίας λυμάτων και διαχείρισης υδατικών πόρων της Ελλάδας και της Ε.Ε.  | 144 |
| Πίνακας 10.1 Οφέλη και περιορισμοί της αεριοποίησης, της πυρόλυσης και της αποτέφρωσης.  | 165 |
| Πίνακας 10.2 Υπολογισμός ισοζυγίων μάζας και ενέργειας της πιλοτικής μονάδας με 65 αντί 70 % υγρασία των μικροκοσκινισμένων βιοστερεών.  | 175 |
| Πίνακας 10.3 Υπολογισμός ισοζυγίων μάζας και ενέργειας της πιλοτικής μονάδας με 22,5 αντί 21,5 MJ/kg ανώτερη θερμογόνος δύναμη βιοστερεών.   | 176 |
| Πίνακας 10.4 Υπολογισμός ισοζυγίων μάζας και ενέργειας της πιλοτικής μονάδας με 15 αντί 20 % απώλειες λόγω μεταφοράς θερμότητας.   | 177 |
| Πίνακας 10.5 Υπολογισμοί ισοζυγίων μάζας και θερμικής ενέργειας της πιλοτικής μονάδας με χρήση μείγματος 50% μικροκοσκινισμένων βιοστερεών και 50% ηλιακά ξηραμένης δευτεροβάθμιας ιλύος.  | 178 |
| Πίνακας 10.6 Υπολογισμοί ισοζυγίων μάζας και θερμικής ενέργειας της πιλοτικής μονάδας με χρήση μείγματος 50% μικροκοσκινισμένων βιοστερεών και 50% αφυδατωμένης δευτεροβάθμιας ιλύος.  | 180 |
| Πίνακας 10.7 Υπολογισμοί ισοζυγίου ηλεκτρικής ενέργειας της πιλοτικής μονάδας όπως είναι εγκατεστημένη στην ΕΕΛ Ρεθύμνου (Δυναμικότητα: 5.000 m <sup>3</sup> /d, Υλικό τροφοδοσίας: 50% μικροκοσκινισμένα βιοστερεά - 50% ηλιακά ξηραμένη δευτεροβάθμια ιλύς).   | 181 |
| Πίνακας 10.8 Υπολογισμοί ισοζυγίου ηλεκτρικής ενέργειας της πιλοτικής μονάδας σε ΕΕΛ με βελτιωμένη διάταξη στον χώρο (Δυναμικότητα: 5.000 m <sup>3</sup> /d, Υλικό τροφοδοσίας: 100% μικροκοσκινισμένα βιοστερεά).   | 182 |
| Πίνακας 10.9 Υπολογισμοί ισοζυγίου ηλεκτρικής ενέργειας της πιλοτικής μονάδας σε ΕΕΛ με βελτιωμένη διάταξη στον χώρο (Δυναμικότητα: 10.000 m <sup>3</sup> /d, Υλικό τροφοδοσίας: 100% μικροκοσκινισμένα βιοστερεά).  | 183 |

|  |     |
|--|-----|
| Πίνακας 10.10 Υπολογισμοί ισοζυγίου ηλεκτρικής ενέργειας της πιλοτικής μονάδας σε ΕΕΛ με βελτιωμένη διάταξη στον χώρο (Δυναμικότητα: 25.000 m <sup>3</sup> /d, Υλικό τροφοδοσίας: 100% μικροκοσκινισμένα βιοστερεά). .....   | 184 |
| Πίνακας 10.11 Υπολογισμοί ισοζυγίου ηλεκτρικής ενέργειας της πιλοτικής μονάδας σε ΕΕΛ με βελτιωμένη διάταξη στον χώρο (Δυναμικότητα: 5.000 m <sup>3</sup> /d, Υλικό τροφοδοσίας: 50% μικροκοσκινισμένα βιοστερεά - 50% ηλιακά ξηραμένη δευτεροβάθμια ιλύς). .....  | 185 |
| Πίνακας 10.12 Υπολογισμοί ισοζυγίου ηλεκτρικής ενέργειας της πιλοτικής μονάδας σε ΕΕΛ με βελτιωμένη διάταξη στον χώρο (Δυναμικότητα: 10.000 m <sup>3</sup> /d, Υλικό τροφοδοσίας: 50% μικροκοσκινισμένα βιοστερεά - 50% ηλιακά ξηραμένη δευτεροβάθμια ιλύς). ..... | 186 |
| Πίνακας 10.13 Υπολογισμοί ισοζυγίου ηλεκτρικής ενέργειας της πιλοτικής μονάδας σε ΕΕΛ με βελτιωμένη διάταξη στον χώρο (Δυναμικότητα: 25.000 m <sup>3</sup> /d, Υλικό τροφοδοσίας: 50% μικροκοσκινισμένα βιοστερεά - 50% ηλιακά ξηραμένη δευτεροβάθμια ιλύς). ..... | 187 |
| Πίνακας 10.14 Υπολογισμοί ισοζυγίου ηλεκτρικής ενέργειας της πιλοτικής μονάδας σε ΕΕΛ με βελτιωμένη διάταξη στον χώρο (Δυναμικότητα: 5.000 m <sup>3</sup> /d, Υλικό τροφοδοσίας: 50% μικροκοσκινισμένα βιοστερεά - 50% αφυδατωμένη δευτεροβάθμια ιλύς). .....      | 188 |
| Πίνακας 10.15 Υπολογισμοί ισοζυγίου ηλεκτρικής ενέργειας της πιλοτικής μονάδας σε ΕΕΛ με βελτιωμένη διάταξη στον χώρο (Δυναμικότητα: 10.000 m <sup>3</sup> /d, Υλικό τροφοδοσίας: 50% μικροκοσκινισμένα βιοστερεά - 50% αφυδατωμένη δευτεροβάθμια ιλύς). .....     | 189 |
| Πίνακας 10.16 Υπολογισμοί ισοζυγίου ηλεκτρικής ενέργειας της πιλοτικής μονάδας σε ΕΕΛ με βελτιωμένη διάταξη στον χώρο (Δυναμικότητα: 25.000 m <sup>3</sup> /d, Υλικό τροφοδοσίας: 50% μικροκοσκινισμένα βιοστερεά - 50% αφυδατωμένη δευτεροβάθμια ιλύς). .....     | 191 |
| Πίνακας 10.17 Συνεισφορά των πιο σχετικών παραγόντων των συστημάτων BS και B2E αναφορικά με τις κατηγορίες επίπτωσης «ανθρώπινη τοξικότητα - σχετική με καρκίνο» και «ανθρώπινη τοξικότητα - μη σχετική με καρκίνο». .....   | 193 |

## Κατάλογος εικόνων

|   |    |
|---|----|
| Εικόνα 1.1 Αυτοκαθαριζόμενη καμπύλη σχάρα (αριστερά), αυτοκαθαριζόμενη σχάρα κυλιόμενου ιμάντα (μέση), στατικό κόσκινο (δεξιά) (Γκίκας, 2020). ....   | 26 |
| Εικόνα 1.2 Εξαμωτής σταθερής ροής (αριστερά), αεριζόμενος (μέση), κυκλωνοειδούς ροής (δεξιά) (Γκίκας, 2020). ....   | 26 |
| Εικόνα 1.3 ΔΠΚ ορθογωνικής διατομής (πάνω αριστερά), ΔΠΚ κυκλικής διατομής (πάνω δεξιά), υπερχειλιστής τραπεζοειδούς διατομής (κάτω αριστερά), ξέστρο παράσυρσης ιλύος με καμπύλες λεπίδες (κάτω δεξιά) (Γκίκας, 2020)..... | 27 |
| Εικόνα 1.4 Συστήματα απολύμανσης χλωρίωσης (αριστερά), οζονισμού (μέση), ακτινοβολήσης με UV (δεξιά) (Γκίκας, 2020).....  | 30 |
| Εικόνα 1.5 Σχηματική απεικόνιση συστήματος MBR (αριστερά) και φωτογραφία συστήματος μεμβρανών (δεξιά) (Γκίκας, 2020). ....  | 33 |
| Εικόνα 1.6 Σχηματική απεικόνιση χαλικοδιυλιστηρίου (αριστερά) και φωτογραφία όπου φαίνεται η διαβροχή αποβλήτου σε χαλικοδιυλιστήριο με πλαστικό πληρωτικό υλικό (δεξιά) (Γκίκας, 2018).....                                | 35 |
| Εικόνα 1.7 Σχηματική απεικόνιση βιοδίσκου (αριστερά) και φωτογραφία όπου φαίνεται σύστημα βιοδίσκων έτοιμο προς χρήση (δεξιά) (Γκίκας, 2018). ....  | 36 |
| Εικόνα 1.8 Σχηματική απεικόνιση συστήματος ενεργού ιλύος με ακινητοποιημένη βιομάζα (αριστερά) και φωτογραφία όπου φαίνεται τέτοιο σύστημα σε ΕΕΛ των Η.Π.Α. (δεξιά) (Γκίκας, 2018).....                                    | 36 |
| Εικόνα 1.9 Βιομηχανική συσκευή παραγωγής O <sub>3</sub> (αριστερά) και αντιδραστήρας UV ανοικτού αγωγού (δεξιά) (Ξεκουκουλωτάκης, 2023).....  | 39 |
| Εικόνα 2.1 Δεξαμενή πάχυνσης πρωτοβάθμιας ιλύος (πάνω αριστερά), φυγοκεντρικοί παχυντές (πάνω δεξιά), κεκλιμένος παχυντής κοχλία συμπίεσης (κάτω αριστερά), τράπεζες πάχυνσης (κάτω δεξιά) (Γκίκας, 2020).....              | 42 |
| Εικόνα 2.2 Αφυδάτωση ιλύος με φυγοκέντριση (πάνω αριστερά), με κλίνες ξήρανσης (πάνω δεξιά), με ταινιοφιλτρόπρεσσα (κάτω αριστερά), με ηθμό κενού (κάτω δεξιά) (Γκίκας, 2020). ....   | 44 |
| Εικόνα 2.3 Βιοστερεά που υπόκεινται σε κομποστοποίηση σε διάφορες φάσεις (Γκίκας, 2018). ....   | 46 |
| Εικόνα 2.4 Σχηματική απεικόνιση (αριστερά) και φωτογραφία (δεξιά) συστήματος μικροκοσκίνισης με φίλτρο περιστρεφόμενου ιμάντα (RBF) (Gupta, 2018). ....   | 47 |
| Εικόνα 2.5 Σχηματική απεικόνιση (αριστερά) και φωτογραφία (δεξιά) συστήματος μικροκοσκίνισης με φίλτρο περιστρεφόμενου τυμπάνου (RDF). ....   | 49 |
| Εικόνα 2.6 Σχηματική απεικόνιση (αριστερά) και φωτογραφία (δεξιά) συστήματος μικροκοσκίνισης με φίλτρο δίσκου (DF) (Morling, 2019). ....  | 50 |
| Εικόνα 2.7 Κλειστή εγκατάσταση (τύπου θερμοκηπίου) ηλιακής ξήρανσης ιλύος με μηχανική ανάδευση. (ENOX Sp. z o.o., 2023). ....   | 51 |
| Εικόνα 2.8 Γεώσακος (geobag) που χρησιμοποιείται για αφυδάτωση ιλύος (GSSB, 2023). .  | 52 |
| Εικόνα 2.9 Σχηματική απεικόνιση των πιο συνήθων τύπων αεριοποιητών (Γκίκας, 2013). ...  | 58 |
| Εικόνα 3.1 Φωτογραφία της ΕΕΛ Ρεθύμνου, συνοδευόμενη από επεξηγηματικό υπόμνημα των εγκαταστάσεων / κτιρίων της. ....   | 63 |
| Εικόνα 5.1 Τρισδιάστατη απεικόνιση της πιλοτικής μονάδας προ-επεξεργασίας των λυμάτων και αξιοποίησης των παραγόμενων βιοστερεών του έργου LIFE B2E4sustainable-WWTP (Manali and Gikas, 2022; Manali et al., 2022a).....    | 75 |

|  |    |
|--|----|
| Εικόνα 5.2 Αεροφωτογραφία της ΕΕΛ Ρεθύμνου με σημειωμένη την ακριβή τοποθεσία εγκατάστασης της πιλοτικής μονάδας του έργου LIFE B2E4sustainable-WWTP. ....   | 75 |
| Εικόνα 5.3 Φωτογραφία της εγκατεστημένης πιλοτικής μονάδας προ-επεξεργασίας των λυμάτων και αξιοποίησης των παραγόμενων βιοστερεών του έργου LIFE B2E4sustainable-WWTP στην ΕΕΛ Ρεθύμνου. ....   | 76 |
| Εικόνα 5.4 Φωτογραφίες πειραματικού (αριστερά) και πιλοτικού (δεξιά) μικροκόσκινου, που χρησιμοποιήθηκαν στο έργο LIFE B2E4sustainable-WWTP. ....  | 77 |
| Εικόνα 5.5 Τρισδιάστατη και δισδιάστατες απεικονίσεις του μικροκόσκινου με επεξήγηση των διαφόρων τμημάτων του (Manali and Gikas, 2022; Manali et al., 2022b). ....  | 78 |
| Εικόνα 5.6 Τα παραγόμενα μικροκοσκινισμένα βιοστερεά στην τελική τους μορφή (αριστερά), δεξαμενή ανάκτησης στερεών (μέση), μικροκόσκινο με σύστημα κροκίδωσης από πίσω του (δεξιά). ....   | 79 |
| Εικόνα 5.7 Φωτογραφίες του συνδυαστικού συστήματος τροφοδοσίας του ξηραντηρίου (χοάνες και μεταφορικοί κοχλίες για τα μικροκοσκινισμένα βιοστερεά και την ξηραμένη δευτεροβάθμια ιλύ, ζυγιστικό/δοσομετρικό δοχείο και αναβατήριο). .... | 80 |
| Εικόνα 5.8 Τρισδιάστατη απεικόνιση του πιλοτικού ξηραντηρίου και του κυκλώνα του. ....   | 80 |
| Εικόνα 5.9 Φωτογραφίες του πιλοτικού ξηραντηρίου του έργου LIFE B2E4sustainable-WWTP. ....   | 81 |
| Εικόνα 5.10 Τρισδιάστατη απεικόνιση του πιλοτικού συστήματος αεριοποίησης - παραγωγής ενέργειας (αριστερά) και απεικόνιση του αεριοποιητή καθοδικής ροής (δεξιά). ....   | 82 |
| Εικόνα 5.11 Τρισδιάστατη απεικόνιση και χωροθέτηση του συστήματος αεριοποίησης - παραγωγής ενέργειας του έργου LIFE B2E4sustainable-WWTP, με επεξηγηματικό υπόμνημα. ....  | 82 |
| Εικόνα 5.12 Διάγραμμα ροής του πιλοτικού συστήματος αεριοποίησης - παραγωγής ενέργειας (Pothoulaki et al., 2022). ....   | 84 |
| Εικόνα 5.13 Φωτογραφίες του συστήματος αεριοποίησης - παραγωγής ενέργειας του έργου LIFE B2E4sustainable-WWTP στην ΕΕΛ Ρεθύμνου. ....  | 86 |
| Εικόνα 6.1 Αυτόματος ψυχόμενος δειγματολήπτης HACH LANGE BÜHLER 2000, που χρησιμοποιήθηκε για την δειγματοληψία λυμάτων στην ΕΕΛ Ρεθύμνου. ....  | 87 |
| Εικόνα 6.2 Φωτογραφίες του κινητού εργαστηρίου του Πολυτεχνείου Κρήτης που βρίσκεται εγκατεστημένο στην ΕΕΛ Ρεθύμνου και εντός του οποίου πραγματοποιήθηκαν πειραματικές αναλύσεις δειγμάτων. ....                                       | 88 |
| Εικόνα 6.3 Φίλτρα Whatman microfiber filters (αριστερά), αναλυτικός ζυγός ακριβείας Oxford A2204 (μέση) και κλίβανος ξήρανσης Raypa Espinar Termody 20L (δεξιά). ....  | 89 |
| Εικόνα 6.4 Μπουκάλια δειγματοληψίας BOD με συσκευές μέτρησης WTW OxiTop και μαγνητική βάση ανάδευσης WTW IS6 Stirrer (αριστερά) και ψυχόμενος επωαστικός κλίβανος Pol-Eko ST2 (δεξιά). ....  | 90 |
| Εικόνα 6.5 Φιαλίδια Hach για τεστ COD με εύρος μέτρησης 15-150 mg/L O <sub>2</sub> (LCK 314), 1.000-2.000 mg/L O <sub>2</sub> (LCK 314), 1.000-10.000 mg/L O <sub>2</sub> (LCK 314). ....  | 91 |
| Εικόνα 6.6 Θερμοαντιδραστήρας Hach LT 200 (αριστερά) και φωτόμετρο Hach DR 1900 (δεξιά). ....  | 91 |
| Εικόνα 6.7 Αναλυτής μεγέθους σωματιδίων Malvern Mastersizer S, με σκέδαση ακτινών λείζερ. ....   | 92 |
| Εικόνα 6.8 Φούρνος υψηλής θερμοκρασίας Thermo Scientific FB1410M-33. ....  | 93 |

|  |     |
|--|-----|
| Εικόνα 6.9 Το θερμιδόμετρο XRY-1A Oxygen Bomb Calorimeter που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της θερμογόνου δύναμης. ....  | 94  |
| Εικόνα 6.10 Κεφαλή βόμβας οξυγόνου με δείγμα και σύρμα ανάφλεξης.....  | 94  |
| Εικόνα 6.11 Βόμβα οξυγόνου κυλινδρικού σχήματος εντός της οποίας βρίσκονται το δείγμα, το σύρμα, καθώς και το απαραίτητο νερό και οξυγόνο. ....  | 95  |
| Εικόνα 6.12 Εσωτερικός θάλαμος του θερμιδόμετρου με απιονισμένο νερό και την βόμβα οξυγόνου. ....  | 95  |
| Εικόνα 6.13 Ηλεκτρονικός πίνακας μετρήσεων, όπου φαίνονται ο αύξων αριθμός μετρήσεων και οι τιμές της θερμοκρασίας. Στο κάτω μέρος του πίνακα φαίνονται τα κουμπιά Reset, Ignite, End, Data, Stir, Power. .... | 96  |
| Εικόνα 6.14 Στοιχειακός αναλυτής LECO 628. ....  | 97  |
| Εικόνα 7.1 Μικροκοσκινισμένα βιοστερεά σχηματισμένα σε συμπαγείς και σταθεροποιημένες μπρικέτες.....   | 116 |
| Εικόνα 7.2 Το λεπτοκόσκινο «AQUADRUM - AD-1000-1-B» της εταιρίας ANDRITZ S.A.S που είναι εγκατεστημένο στην ΕΕΛ Ηρακλείου. ....  | 122 |
| Εικόνα 7.3 Χάρτης της Κρήτης με σημειωμένες τις ΕΕΛ από τις οποίες έγιναν οι δειγματοληψίες διαφόρων τύπων ιλύος. ....   | 137 |
| Εικόνα 10.1 Δοσομετρική αντλία (αριστερά) και δεξαμενή κροκίδωσης συνδεδεμένη με το πιλοτικό μικροκόσκινο (δεξιά). ....  | 166 |
| Εικόνα 10.2 Πειραματική διάταξη για δοκιμές κροκίδωσης στο εργαστήριο. ....  | 173 |
| Εικόνα 10.3 Ενδεικτική φωτογραφία με κροκιδωμένα υγρά απόβλητα υπό διάφορες συνθήκες pH (6 ή 8) και δοσολογίες κροκιδωτικού μέσου (0,4 - 0,7 mg PAC / L αποβλήτου). ....                                       | 173 |
| Εικόνα 10.4 Φωτογραφίες του φίλτρου του μικροκόσκινου που έχει σκιστεί λόγω των χαλικιών που υπήρχαν στο εισερχόμενο απόβλητο. ....  | 174 |
| Εικόνα 10.5 Έντονη δημιουργία αφρού στο απόβλητο κατά τις δοκιμές κροκίδωσης του πιλοτικού μικροκόσκινου. ....   | 174 |

## Κατάλογος διαγραμμάτων

|   |     |
|---|-----|
| Διάγραμμα 1.1 Διάγραμμα ροής μίας τυπικής ΕΕΛ ενεργού ιλύος (Ζαφειράκου, 2014). ....  | 24  |
| Διάγραμμα 1.2 Διάγραμμα ροής μίας ΕΕΛ ενεργού ιλύος με επαναχρησιμοποίηση νερού και κομποστοποίηση ιλύος.....   | 25  |
| Διάγραμμα 1.3 Διαδικασίες αποικοδόμησης (νιτροποίηση - απονιτροποίηση) για την απομάκρυνση του αζώτου (Pütz, 2012).....   | 28  |
| Διάγραμμα 1.4 Διάγραμμα ροής όπου περιγράφεται σχηματικά η μέθοδος ενεργού ιλύος (αερισμός, δευτεροβάθμια καθίζηση, ανακυκλοφορία), συμπεριλαμβανομένης της νιτροποίησης - απονιτροποίησης (Γκίκας, 2020). ....   | 29  |
| Διάγραμμα 1.5 Διάγραμμα ροής όπου περιγράφονται σχηματικά οι διαδικασίες κροκίδωσης - συσσωμάτωσης - χημικής καθίζησης (Γκίκας, 2020). ....   | 30  |
| Διάγραμμα 1.6 Ποσοστιαία κατανομή ενέργειας σε μία τυπική ΕΕΛ (Cao, 2011).....  | 31  |
| Διάγραμμα 1.7 Σύγκριση συμβατικής νιτροποίησης - απονιτροποίησης (Α) με την διεργασία ANAMMOX (Β) (Gokal, 2017).....  | 34  |
| Διάγραμμα 1.8 Σχηματική απεικόνιση συστήματος ενθυλακωμένης βιομάζας (αριστερά) και εμβαπτισμένης ακινητοποιημένης βιομάζας (δεξιά) (Γκίκας, 2018). ....  | 37  |
| Διάγραμμα 1.9 Οι βασικές κατηγορίες των Προηγμένων Διεργασιών Οξειδωσης (Advanced Oxidation Processes, AOPs) (Ξεκουκουλωτάκης, 2023). ....  | 38  |
| Διάγραμμα 2.1 Διάγραμμα ροής επεξεργασίας λυμάτων και δυνατοτήτων διαχείρισης των παραγόμενων βιοστερεών (Γκίκας, 2018).....  | 45  |
| Διάγραμμα 2.2 Σχηματική απεικόνιση μίας τυπικής διεργασίας αεριοποίησης ιλύος (Oladejo et al., 2019). ....  | 56  |
| Διάγραμμα 3.1 Διάγραμμα ροής της ΕΕΛ Ρεθύμνου με επεξηγηματικό υπόμνημα. ....   | 65  |
| Διάγραμμα 5.1 Διάγραμμα ροής της πιλοτικής μονάδας προ-επεξεργασίας των λυμάτων και αξιοποίησης των παραγόμενων βιοστερεών του έργου LIFE B2E4sustainable-WWTP (Manali and Gikas, 2019a). ....  | 74  |
| Διάγραμμα 6.1 Διαγραμματική απεικόνιση και συσχέτιση σταδίων εκπόνησης μίας μελέτης ΑΚΖ. ....   | 102 |
| Διάγραμμα 7.1 Μέση ημερήσια παραγωγή αποβλήτου ανά κάτοικο ( $m^3/PE \cdot d$ ), με μέση τιμή (διακεκομμένη μπλε γραμμή) και τυπική απόκλιση (διακεκομμένες κόκκινες γραμμές) για τις 17 ΕΕΛ. ....  | 104 |
| Διάγραμμα 7.2 Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά μονάδα όγκου επεξεργασμένου αποβλήτου ( $E_Q, kWh/m^3$ ) συναρτήσει της μέσης ημερήσιας εισερχόμενης παροχής ( $Q_{av}, m^3/d$ ) με γραμμή τάσης. ....  | 105 |
| Διάγραμμα 7.3 Ημερήσια απαίτηση σε ηλεκτρική ενέργεια ανά κάτοικο ( $E_{PE}, kWh/PE \cdot d$ ) συναρτήσει του ισοδύναμου πληθυσμού (PE) με γραμμή τάσης. Κόκκινη, πράσινη και μωβ γραμμή: μέση $E_{PE}$ για ΕΕΛ που εξυπηρετούν έως 10.000, από 10.000 έως 50.000 και άνω των 50.000 PE αντίστοιχα, που αναφέρονται από την Δημοπούλου (2011). .... | 105 |
| Διάγραμμα 7.4 Ημερήσιο ενεργειακό κόστος ανά κάτοικο ( $E_{€/PE}, €/PE \cdot d$ ) συναρτήσει του ισοδύναμου πληθυσμού (PE) με γραμμή τάσης. ....  | 106 |
| Διάγραμμα 7.5 Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας ανά μονάδα όγκου αποβλήτου ( $E_{€/V}, €/m^3$ ) συναρτήσει της μέσης ημερήσιας εισερχόμενης παροχής ( $Q_{av}, m^3/d$ ) με γραμμή τάσης. ....   | 106 |
| Διάγραμμα 7.6 Ενεργειακή κατανομή των βασικών διεργασιών των συμβατικών ΕΕΛ ενεργού ιλύος.....  | 107 |

|  |     |
|--|-----|
| Διάγραμμα 7.7 Συγκεντρώσεις και μέσος όρος για τα TSS εισόδου της ΕΕΛ Ρεθύμνου. ....   | 108 |
| Διάγραμμα 7.8 Συγκεντρώσεις TSS εισόδου (μπλε μπάρες) και εξόδου (κόκκινες μπάρες) της ΕΕΛ Ρεθύμνου (12 μετρήσεις χωρισμένες σε δύο διαγράμματα για να είναι ευανάγνωστα).<br>.....  | 109 |
| Διάγραμμα 7.9 Συγκεντρώσεις BOD <sub>5</sub> εισόδου (μπλε μπάρες) και εξόδου (κόκκινες μπάρες) της ΕΕΛ Ρεθύμνου. ....   | 109 |
| Διάγραμμα 7.10 Συγκεντρώσεις COD εισόδου (μπλε μπάρες) και εξόδου (κόκκινες μπάρες) της ΕΕΛ Ρεθύμνου. ....   | 110 |
| Διάγραμμα 7.11 Συγκεντρώσεις TSS εισόδου (μπλε μπάρες) και εξόδου (κόκκινες μπάρες) του πειραματικού μικροκόσκινου. ....   | 111 |
| Διάγραμμα 7.12 Συγκεντρώσεις BOD <sub>5</sub> εισόδου (μπλε μπάρες) και εξόδου (κόκκινες μπάρες) του πειραματικού μικροκόσκινου. ....  | 111 |
| Διάγραμμα 7.13 Συγκεντρώσεις COD εισόδου (μπλε μπάρες) και εξόδου (κόκκινες μπάρες) του πειραματικού μικροκόσκινου. ....   | 112 |
| Διάγραμμα 7.14 Λόγος BOD <sub>5</sub> /COD εισόδου (μπλε μπάρες) και εξόδου (κόκκινες μπάρες) του πειραματικού μικροκόσκινου. ....   | 112 |
| Διάγραμμα 7.15 Μέγεθος σωματιδίων συναρτήσει του βάρους τους (είσοδος - μπλε γραμμή, έξοδος - κόκκινη γραμμή). ....  | 113 |
| Διάγραμμα 7.16 Μέγεθος σωματιδίων συναρτήσει ποσοστού διέλευσης (είσοδος - μπλε γραμμή, έξοδος - κόκκινη γραμμή). ....   | 113 |
| Διάγραμμα 7.17 Υγρασία (μπλε τμήμα μπάρας) και TS (κόκκινο τμήμα μπάρας) των μικροκοσκινισμένων βιοστερεών. ....   | 114 |
| Διάγραμμα 7.18 VS - οργανικά στερεά (μπλε τμήμα μπάρας) και τέφρα - ανόργανα στερεά (κόκκινο τμήμα μπάρας) των μικροκοσκινισμένων βιοστερεών ως ποσοστό των TS.....  | 114 |
| Διάγραμμα 7.19 Μετρήσεις θερμογόνου δύναμης (HHV) των μικροκοσκινισμένων βιοστερεών (μπλε μπάρες) με μέσο όρο (κόκκινη γραμμή). ....   | 115 |
| Διάγραμμα 7.20 Τιμές θερμογόνου δύναμης διαφόρων ειδών βιοστερεών και άλλων υλικών. ....   | 115 |
| Διάγραμμα 7.21 Συγκεντρώσεις TSS εισόδου (μπλε μπάρες) και εξόδου (κόκκινες μπάρες) του πιλοτικού μικροκόσκινου. ....  | 117 |
| Διάγραμμα 7.22 Συγκεντρωτικό διάγραμμα μετρήσεων συγκέντρωσης TSS εισόδου (μπλε μπάρες) και εξόδου (πορτοκαλί μπάρες) του πιλοτικού μικροκόσκινου.....   | 119 |
| Διάγραμμα 7.23 Συγκεντρωτικό διάγραμμα ποσοστιαίας απομάκρυνσης στερεών από τα λύματα με την χρήση του μικροκόσκινου. ....   | 120 |
| Διάγραμμα 7.24 Συγκεντρωτικό διάγραμμα ωριαίας παραγωγής μικροκοσκινισμένων βιοστερεών (σε ξηρή βάση). ....  | 120 |
| Διάγραμμα 7.25 Μετρήσεις υγρασίας των μικροκοσκινισμένων βιοστερεών (μπλε μπάρες) με μέσο όρο (κόκκινη γραμμή). ....   | 121 |
| Διάγραμμα 7.26 Ημερήσιες μετρήσεις πίεσης πρωτοβάθμιας ιλύος και μικροκοσκινισμένων βιοστερεών (αριστερά) και μέση ημερήσια απόδοση βιοαερίου και μέση συνολική απόδοση βιοαερίου πρωτοβάθμιας ιλύος και μικροκοσκινισμένων βιοστερεών (δεξιά). .... | 123 |
| Διάγραμμα 7.27 Παραγόμενη και καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια της πιλοτικής μονάδας σε ΕΕΛ με βελτιωμένη διάταξη στον χώρο συναρτήσει της δυναμικότητας (Υλικό τροφοδοσίας: 100% μικροκοσκινισμένα βιοστερεά). ....                               | 130 |



|  |     |
|--|-----|
| Διάγραμμα 7.28 Παραγόμενη και καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια της πιλοτικής μονάδας σε ΕΕΛ με βελτιωμένη διάταξη στον χώρο συναρτήσεως της δυναμικότητας (Υλικό τροφοδοσίας: 50% μικροκοσκινισμένα βιοστερεά - 50% ηλιακά ξηραμένα δευτεροβάθμια ιλύς). .....   | 130 |
| Διάγραμμα 7.29 Παραγόμενη και καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια της πιλοτικής μονάδας σε ΕΕΛ με βελτιωμένη διάταξη στον χώρο συναρτήσεως της δυναμικότητας (Υλικό τροφοδοσίας: 50% μικροκοσκινισμένα βιοστερεά - 50% αφυδατωμένη δευτεροβάθμια ιλύς).....   | 131 |
| Διάγραμμα 7.30 Ροές μάζας και ενέργειας της πιλοτικής μονάδας του έργου LIFE B2E4sustainable-WWTP (Manali et al., 2021).....   | 132 |
| Διάγραμμα 7.31 Σχηματική περιγραφή του συστήματος του βασικού σεναρίου (BS), όπου η Παχυμένη Αφυδατωμένη Δευτεροβάθμια Ιλύς (Thickened Dewatered Secondary Sludge, TDSS) κομποστοποιείται και χρησιμοποιείται στην γεωργία (Fernández-Gutiérrez et al., 2023). .....   | 140 |
| Διάγραμμα 7.32 Σχηματική περιγραφή του συστήματος του βασικού σεναρίου (BS) με εφαρμογή της λύσης B2E, όπου τα Πρωτοβάθμια Μικροκοσκινισμένα Βιοστερεά (Primary Sieved Solids, PSS) και η δευτεροβάθμια ιλύς (TDSS) επεξεργάζονται θερμικά (ξήρανση - αεριοποίηση) οδηγώντας σε παραγωγή ενέργειας (Fernández-Gutiérrez et al., 2023). ..... | 140 |
| Διάγραμμα 10.1 Συγκεντρώσεις TSS εισόδου της ΕΕΛ Ρεθύμνου σε ημερήσια βάση ανά έτος (από 2017 έως 2022). .....   | 172 |
| Διάγραμμα 10.2 Συγκεντρώσεις TSS εισόδου της ΕΕΛ Ρεθύμνου σε μηνιαία βάση ανά έτος (από 2017 έως 2022). .....  | 172 |
| Διάγραμμα 10.3 Συγκεντρώσεις TSS εισόδου της ΕΕΛ Ρεθύμνου σε μηνιαία βάση συγκεντρωτικά για τα έτη από 2017 έως 2022.....  | 173 |
| Διάγραμμα 10.4 Συνεισφορά των πιο σχετικών στοιχείων των συστημάτων BS και B2E αναφορικά με την κατηγορία επίπτωσης «κλιματική αλλαγή». .....  | 192 |
| Διάγραμμα 10.5 Συνεισφορά των πιο σχετικών στοιχείων των συστημάτων BS και B2E αναφορικά με την κατηγορία επίπτωσης «οικοτοξικότητα γλυκού νερού».....   | 192 |
| Διάγραμμα 10.6 Συνεισφορά των πιο σχετικών στοιχείων των συστημάτων BS και B2E αναφορικά με την κατηγορία επίπτωσης «χρήση ορυκτών πόρων». .....   | 193 |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Επεξεργασία αστικών υγρών αποβλήτων

### 1.1 Αστικά υγρά απόβλητα (λύματα)

Ως υγρά απόβλητα ορίζονται οι υγρές απορροές υποβαθμισμένης ποιότητας που καταλήγουν στα αποχετευτικά συστήματα, προερχόμενες από οικιακές, βιομηχανικές ή εμπορικές χρήσεις καθώς και άλλα ύδατα που προκύπτουν από ανθρώπινες δραστηριότητες, συμπεριλαμβανομένων των υπόγειων, των επιφανειακών και των όμβριων υδάτων (Metcalf and Eddy, 2003; Muralikrishna and Manickam, 2017). Τα αστικά υγρά απόβλητα λέγονται και λύματα.

Η υποβαθμισμένη ποιότητα των λυμάτων οφείλεται στο γεγονός ότι περιέχουν διάφορους ρύπους και μολυσματικούς παράγοντες (π.χ. παθογόνους μικροοργανισμούς, που αποτελούν κίνδυνο μετάδοσης μολυσματικών ασθενειών). Επίσης, λόγω της περιεκτικότητάς τους σε θρεπτικά συστατικά, ευνοούν την ανάπτυξη υδρόβιων φυτικών οργανισμών (που συμβάλουν στην δημιουργία του φαινομένου του ευτροφισμού) και τοξικών ουσιών (που ενδέχεται να προκαλέσουν καρκίνο, μεταλλάξεις, κ.α.). Ακόμη, με την συσσώρευση ανεπεξέργαστων αστικών υγρών αποβλήτων δημιουργείται έντονη δυσοσμία (λόγω της αποσύνθεσης του οργανικού τους φορτίου) και αισθητική υποβάθμιση του τοπίου. Έτσι, η ανεξέλεγκτη διάθεση λυμάτων στους φυσικούς υδάτινους αποδέκτες αποτελεί κίνδυνο για το περιβάλλον, την δημόσια υγεία και τον άνθρωπο (Νταρακάς, 2010).

Τα λύματα χαρακτηρίζονται από ποικιλομορφία ως προς την ποιότητα και τη σύσταση, ανάλογα τις κλιματικές συνθήκες, τα χαρακτηριστικά της περιοχής προέλευσης (μέγεθος, ανάπτυξη, δείκτες ευημερίας), καθώς και την ποιότητα του νερού και των υπηρεσιών ύδρευσης (Carl and Adams, 1997). Τα βασικά χαρακτηριστικά των αστικών υγρών αποβλήτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.1, ενώ στον Πίνακα 1.2 φαίνεται η τυπική σύνθεση τους πριν υποστούν οποιαδήποτε επεξεργασία.

Πίνακας 1.1 Τα βασικά χαρακτηριστικά των αστικών υγρών αποβλήτων με σύντομη περιγραφή (APHA, 2017; Farazaki and Gikas, 2019; Metcalf and Eddy, 2003; Νταρακάς, 2010; Σαββάκης, 2016).

| Χαρακτηριστικά  | Περιγραφή   |
|---|---|
| <b>Φυσικά</b>   |   |
| Χρώμα   | Συνδέεται με την ηλικία και την κατάσταση σήψης των λυμάτων. Τα φρέσκα απόβλητα εμφανίζουν καφέ - γκρι χρώμα, ενώ η διάσπαση των οργανικών ενώσεων έχει ως αποτέλεσμα την μετατροπή του χρώματος αρχικά σε σκούρο γκρι - μαύρο. |
| Θολερότητα  | Είναι η απουσία διαύγειας, που οφείλεται στην ύπαρξη αιωρούμενων οργανικών και ανόργανων σωματιδίων.  |
| Οσμή  | Δημιουργείται εξαιτίας αέριων ουσιών από την αποσύνθεση οργανικών ενώσεων. Τα φρέσκα λύματα έχουν διακριτική δυσάρεστη οσμή, ενώ μετά η οσμή τους γίνεται περισσότερο δυσάρεστη, λόγω της παραγωγής υδρόθειου.                  |
| Θερμοκρασία   | Στα λύματα κυμαίνεται μεταξύ 10 - 25 °C και εξαρτάται από την προέλευση τους. Επηρεάζει την υδρόβια ζωή, την ταχύτητα των χημικών και βιοχημικών αντιδράσεων καθώς και την καταλληλότητα του νερού για παραγωγικές χρήσεις.     |
| Ολικά Στερεά (Total Solids, TS)                       | Είναι η μάζα του υπολείμματος που αποκτάται μετά την ολική εξάτμιση και ξήρανση ενός δείγματος αστικών υγρών αποβλήτων στους 105 °C. Χωρίζονται TSS και TDS.  |
| Ολικά Διαλυμένα Στερεά (Total Dissolved Solids, TDS)  | Είναι τα στερεά που διηθούνται διαμέσου φίλτρου με μέσο μέγεθος πόρων ίσο με 2.0 μm ή μικρότερο.  |
| Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (Total Suspended Solids, TSS) | Η εύρεση τους είναι κάπως αυθαίρετη, καθώς εξαρτάται από το μέγεθος των πόρων του φίλτρου που χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό τους από τα TDS.  |

|   |   |
|---|---|
| Πτητικά Στερεά (Volatile Solids, VS)  | Είναι το υλικό που εξαερώνεται και οξειδώνεται κατά την καύση ενός ξηρού δείγματος αποβλήτων στους $500 \pm 50$ °C. Τα VS αποτελούνται κυρίως από οργανικό υλικό, ωστόσο μερικά οργανικά δεν καίγονται, ενώ ορισμένα ανόργανα καίγονται σε υψηλές θερμοκρασίες.   |
| Σταθερά Στερεά (Fixed Solids, FS)   | Είναι το υπόλειμμα που απομένει μετά την καύση ξηρού δείγματος αποβλήτων στους $500 \pm 50$ °C. Η αναλογία των VS προς τα FS χρησιμοποιείται συχνά για τον χαρακτηρισμό των αστικών υγρών αποβλήτων ως προς την περιεκτικότητά τους σε οργανικό υλικό.  |
| Καθιζάνοντα Στερεά (Settleable Solids, SS)                                    | Είναι τα στερεά που καθιζάνουν μετά από ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (1 ώρα). Η πρότυπη ανάλυση για τα καθιζάνοντα στερεά απαιτεί την εισαγωγή ενός δείγματος αποβλήτου σε ειδικό κώνο (Imhoff). Στα αστικά λύματα, περίπου το 60 % των αιωρούμενων στερεών καθιζάνει.   |
| <b>Χημικά</b>   |   |
| pH  | Αποτελεί μέτρο της οξύτητας / αλκαλικότητας και συνδέεται με μια πληθώρα διεργασιών κατά την επεξεργασία των αποβλήτων. Το εύρος τιμών του pH που είναι περιβαλλοντικά αποδεκτό για τα επεξεργασμένα λύματα που διατίθενται στο περιβάλλον κυμαίνεται από 6,5 έως 9,5.  |
| Αγωγιμότητα   | Γενικά εκφράζει την ικανότητα των διαλυμάτων να άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα λόγω της παρουσίας ιόντων, ενώ στα αστικά υγρά απόβλητα χρησιμοποιείται ως αντιπροσωπευτικό μέγεθος τη συγκέντρωσης TDS, αλλά και της καταλληλότητας των εκροών των λυμάτων για άρδευση.   |
| Μέταλλα   | Βοηθούν στην εκτίμηση της τοξικότητας της εκροής και της καταλληλότητας της για επαναχρησιμοποίηση. Μέταλλα όπως ψευδάργυρος (Zn), χρώμιο (Cr), χαλκός (Cu), κ.α. σε ίχνη αποτελούν απαραίτητα συστατικά για την ανάπτυξη των οργανισμών, ενώ η παρουσία τους σε μεγάλες ποσότητες τα καθιστά τοξικά. Η απομάκρυνσή τους από τα λύματα είναι σημαντική αφού θεωρούνται θανατηφόρα για τα οικοσυστήματα.   |
| Χλωριούχα (Cl <sup>-</sup> ) - Θειούχα ιόντα (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) | Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της ποιότητας της επεξεργασμένης εκροής, κατά τη χρήση της στη γεωργία.   |
| Ολικό Άζωτο (Total Nitrogen, TN)  | Είναι απαραίτητο θρεπτικό συστατικό για την ανάπτυξη μικροοργανισμών, φυτών και ζώων και χρησιμοποιείται εκτεταμένα ως λίπασμα. Οι κοινές μορφές του αζώτου στα λύματα είναι η αμμωνία (NH <sub>3</sub> ), το αμμώνιο (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ), το αέριο άζωτο (N <sub>2</sub> ), τα νιτρώδη (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ) και τα νιτρικά (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ). Πιο συγκεκριμένα, τα λύματα περιέχουν 40 % οργανικό άζωτο (μέρος των μικροοργανισμών) και 60 % αμμωνία (μεταβολικό προϊόν), μορφές ανεπιθύμητες στα επεξεργασμένα λύματα, καθώς προκαλούν αύξηση της απαίτησης σε οξυγόνο και είναι τοξικές για διάφορα είδη μικροοργανισμών. |
| Ολικός Φώσφορος (Total Phosphorus, TP)  | Είναι απαραίτητο θρεπτικό συστατικό για την ανάπτυξη φυκών, των οποίων όμως η ανεξέλεγκτη ανάπτυξη αποτελεί πρόβλημα για τα επιφανειακά νερά. Στα αστικά υγρά απόβλητα συναντάται σε οργανική και ανόργανη μορφή με αναλογία 75 - 25 % αντίστοιχα. Η ανόργανη μορφή (ορθοφωσφορικά) συμβάλει στον βιολογικό μεταβολισμό, δεν διασπάται περαιτέρω, ενώ μπορεί να κατακρημνιστεί εύκολα με την χρήση κροκιδωτικών μέσων.  |
| Διαλυμένο Οξυγόνο (Dissolved Oxygen, DO)                                      | Είναι απαραίτητο για την αναπνοή των αερόβιων μικροοργανισμών, αποτελεί και παράμετρο ρύπανσης των υδάτων, καθώς όσο μεγαλύτερο είναι το ρυπαντικό φορτίο, τόσο μεγαλύτερη είναι η ανάπτυξη των μικροοργανισμών με αποτέλεσμα την αυξημένη κατανάλωση οξυγόνου. Η αύξηση του DO στα λύματα γίνεται με αερισμό, που επιτρέπει στα αερόβια βακτήρια να εκτελέσουν βιολογική οξείδωση, μειώνοντας σημαντικά το BOD.  |
| Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (Chemical Oxygen Demand, COD)                      | Είναι η ποσότητα του οξυγόνου που απαιτείται για την χημική οξείδωση της οργανικής ύλης προς CO <sub>2</sub> και H <sub>2</sub> O με τη χρήση ισχυρού οξειδωτικού μέσου.  |

|  |  |
|--|--|
| Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (Biochemical Oxygen Demand, BOD) | Είναι η ποσότητα του διαλυμένου οξυγόνου που χρησιμοποιούν οι μικροοργανισμοί για τη βιοχημική οξείδωση του οργανικού υλικού και αποτελεί παράμετρο εκτίμησης του οργανικού φορτίου στα αστικά υγρά απόβλητα.  |
| Ολικός Οργανικός Άνθρακας (Total Organic Carbon, TOC)          | Είναι ο συνολικός άνθρακας που βρίσκεται σε όλες τις οργανικές ενώσεις που υπάρχουν σε ένα δείγμα αστικών υγρών αποβλήτων. Η ανάλυση του απαιτεί θερμότητα, οξυγόνο, υπεριώδη ακτινοβολία, χημικά οξειδωτικά ή ένα συνδυασμό των παραπάνω για την μετατροπή του οργανικού άνθρακα σε CO <sub>2</sub> . |
| Έλαια και λίπη   | Είναι εστέρες αλκοολών ή γλυκερίνης με λιπαρά οξέα που συναντώνται στα λύματα, που σχηματίζουν ένα προστατευτικό στρώμα γύρω από τους ζωντανούς οργανισμούς, παρεμποδίζοντας τα συστήματα ανταλλαγής ύλης και ενέργειας των κυττάρων, προκαλώντας έτσι την θανάτωση τους.                              |
| <b>Βιολογικά</b>   |  |
| Κολοβακτηριοειδή   | Τα κολοβακτηριοειδή είναι μικροοργανισμοί που βοηθούν στην εκτίμηση της παρουσίας παθογόνων μικροοργανισμών και της αποτελεσματικότητας της απολύμανσης.   |
| Ειδικοί μικροοργανισμοί  | Πρόκειται για μικροοργανισμούς που συνδέονται με την αποικοδόμηση της οργανικής ύλης των αποβλήτων, με την νιτροποίηση - απονιτροποίηση, με την απομάκρυνση του φωσφόρου και γενικά με τις βιολογικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα.   |

Πίνακας 1.2 Τυπική σύνθεση ανεπεξέργαστων αστικών υγρών αποβλήτων στις ΗΠΑ (Metcalf and Eddy, 2003).

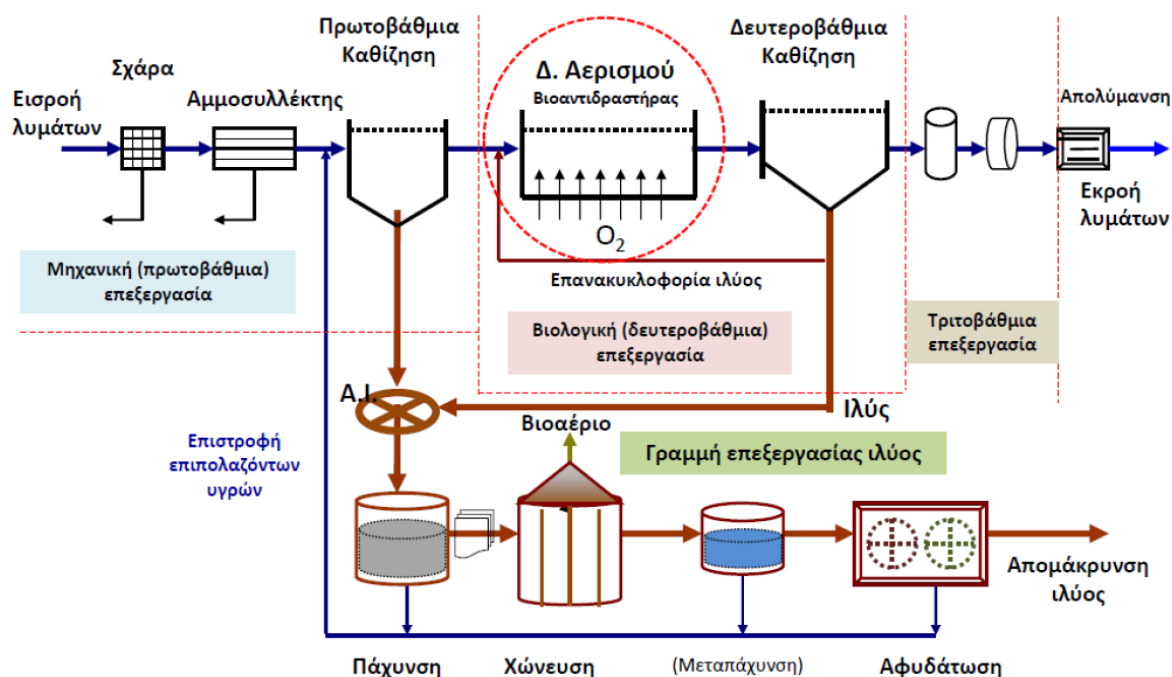
| Ρυπαντές  | Μονάδα | Συγκέντρωση |        |       |
|---|--------|-------------|--------|-------|
|   |        | Χαμηλή      | Μεσαία | Υψηλή |
| Ολικά Στερεά (TS)   | mg/L   | 390         | 720    | 1230  |
| - Ολικά Διαλυμένα Στερεά (TDS)  | mg/L   | 270         | 500    | 860   |
| - Σταθερά Στερεά (FS)   | mg/L   | 160         | 300    | 520   |
| - Πτητικά Στερεά (VS)   | mg/L   | 110         | 200    | 340   |
| - Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (TSS)                                       | mg/L   | 120         | 210    | 400   |
| - Σταθερά Στερεά (FS)   | mg/L   | 25          | 50     | 85    |
| - Πτητικά Στερεά (VS)   | mg/L   | 95          | 160    | 315   |
| Καθιζάνοντα Στερεά (SS)   | mg/L   | 5           | 10     | 20    |
| Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο 5 ημερών (BOD <sub>5</sub> ) στους 20°C | mg/L   | 110         | 190    | 350   |
| Ολικός Οργανικός Άνθρακας (TOC)                                       | mg/L   | 80          | 140    | 260   |
| Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (COD)                                      | mg/L   | 250         | 430    | 800   |
| Ολικό άζωτο (TN)  | mg/L   | 20          | 40     | 70    |
| - Οργανικό άζωτο (ουρία, πρωτεΐνες)                                   | mg/L   | 8           | 15     | 25    |
| - Ελεύθερη Αμμωνία (NH <sub>3</sub> )                                 | mg/L   | 12          | 25     | 45    |
| - Νιτρικά (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )                             | mg/L   | 0           | 0      | 0     |
| - Νιτρώδη (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )                             | mg/L   | 0           | 0      | 0     |
| Ολικός φώσφορος (TP)  | mg/L   | 4           | 7      | 12    |
| - Οργανικός φώσφορος (απορρυπαντικά, εντομοκτόνα)                     | mg/L   | 1           | 2      | 4     |

|  |                 |                                   |                                   |                                    |
|--|-----------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| - Ανόργανος φώσφορος   | mg/L            | 3                                 | 5                                 | 8                                  |
| Χλωρίοντα (Cl <sup>-</sup> )                                 | mg/L            | 30                                | 50                                | 90                                 |
| Θειικά (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )                      | mg/L            | 20                                | 30                                | 50                                 |
| Έλαια και λίπη   | mg/L            | 50                                | 90                                | 100                                |
| Πτητικές Οργανικές Ενώσεις (Volatile Organic Compounds, VOC) | μg/L            | < 100                             | 100 – 400                         | > 400                              |
| Ολικά Κολοβακτηρίδια (Total Coliforms, TC)                   | Αριθμός/ 100 mL | 10 <sup>6</sup> – 10 <sup>8</sup> | 10 <sup>7</sup> – 10 <sup>9</sup> | 10 <sup>7</sup> – 10 <sup>10</sup> |
| Κοπρανώδη Κολοβακτηρίδια (Fecal Coliforms, FC)               | Αριθμός/ 100 mL | 10 <sup>3</sup> – 10 <sup>5</sup> | 10 <sup>4</sup> – 10 <sup>6</sup> | 10 <sup>5</sup> – 10 <sup>8</sup>  |

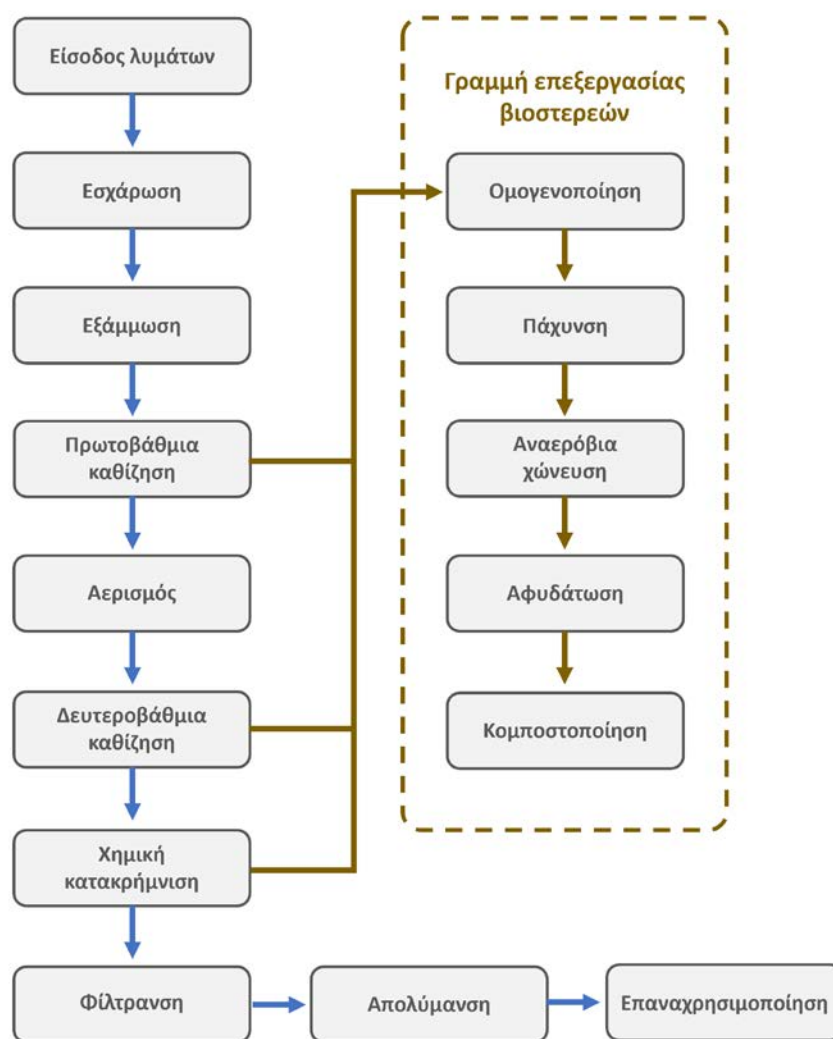
## 1.2 Συμβατικές μέθοδοι επεξεργασίας αστικών υγρών αποβλήτων

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν προβλήματα που θα προκαλούσε η ανεξέλεγκτη διάθεση λυμάτων στους φυσικούς υδάτινους αποδέκτες, αναπτύχθηκαν διάφορες μέθοδοι επεξεργασίας - εξυγίανσης τους και θεσπίστηκε σχετικό νομικό πλαίσιο εντός του οποίου θεσμοθετούνται όρια απόρριψης αποβλήτων και πρότυπα ποιότητας αποδεκτών, με γνώμονα την πρόληψη και τον περιορισμό της ρύπανσης του περιβάλλοντος (βλέπε Κεφάλαιο 7.11 για σχετικό νομικό πλαίσιο) (Κουίμτζης κ.α., 1994).

Η επεξεργασία των αστικών υγρών αποβλήτων πραγματοποιείται εντός ειδικών χώρων που λέγονται Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ). Ο σχεδιασμός και η επιλογή των σταδίων και των μεθόδων επεξεργασίας λυμάτων που λαμβάνουν χώρα σε κάθε ΕΕΛ εξαρτώνται από τις ανάγκες της περιοχής, την φύση και τα χαρακτηριστικά των εισερχόμενων αποβλήτων, τον επιδιωκόμενο βαθμό καθαρισμού, αλλά και το οικονομικό κόστος. Τα βασικά στοιχεία σχεδιασμού μίας ΕΕΛ (συσκευές, μηχανήματα, διαδοχή σταδίων, μέθοδοι επεξεργασίας, συνδέσεις) απεικονίζονται σε διαγράμματα ροής, όπως αυτά που φαίνονται στα Διαγράμματα 1.1 και 1.2.



Διάγραμμα 1.1 Διάγραμμα ροής μίας τυπικής ΕΕΛ ενεργού ιλύος (Ζαφειράκου, 2014).



Διάγραμμα 1.2 Διάγραμμα ροής μίας ΕΕΛ ενεργού ιλύος με επαναχρησιμοποίηση νερού και κομποστοποίηση ιλύος.

### 1.2.1 Προ-επεξεργασία και πρωτοβάθμια επεξεργασία

Η προ-επεξεργασία των λυμάτων αποτελείται από τις διεργασίες της εσχάρωσης και της εξάμμισης, βασικές πληροφορίες για τις οποίες δίνονται ακολούθως (Γκίκας, 2020; Στάμου και Βογιατζής, 1994):

- Κατά την εσχάρωση, απομακρύνονται ογκώδη αντικείμενα που περιέχονται στα λύματα, τα οποία θα μπορούσαν να καταστρέψουν τον μηχανολογικό εξοπλισμό, να μειώσουν την αποτελεσματικότητα των διεργασιών και να συσσωρευτούν στα σημεία ροής των αποβλήτων, προκαλώντας λειτουργικά προβλήματα στις ΕΕΛ. Η εσχάρωση μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορα είδη εσχάρων (χονδρές - κόσκινα - μικροκόσκινα, επίπεδες - καμπύλες - κυλιόμενου ιμάντα, χειρωνακτικά - μηχανικά καθαριζόμενες) (Εικόνα 1.1), ενώ η διάταξη της εσχάρωσης μπορεί να αποτελείται από παράλληλες μπάρες, ράβδους, χονδρά σύρματα, πλέγμα, ή και διάτρητη πλάκα. Τα ανοίγματα είναι συνήθως κυκλικής ή ορθογωνικής διατομής και το μέγεθός τους εξαρτάται από το μέγεθος των υλικών που βρίσκονται στα λύματα. Τα εσχαρίσματα απομακρύνονται από τη μονάδα εσχάρωσης προς ταφή σε Χώρους Υγειονομικής Ταφής (ΧΥΤΑ) ή επανέρχονται στα λύματα έπειτα από τεμαχισμό.





Εικόνα 1.1 Αυτοκαθαριζόμενη καμπύλη σχάρα (αριστερά), αυτοκαθαριζόμενη σχάρα κυλιόμενου ιμάντα (μέση), στατικό κόσκινο (δεξιά) (Γκίκας, 2020).

- Κατά την εξάμμωση, η οποία ακολουθεί της εσχάρωσης, απομακρύνονται άμμος, χώμα και άλλα ανόργανα σωματίδια διαμέτρου μικρότερης των 200  $\mu\text{m}$ , λόγω διαφοράς ειδικού βάρους, με την επίδραση δυνάμεων βαρύτητας. Σκοπός της εξάμμωσης είναι η προστασία του μηχανολογικού εξοπλισμού από αποξέσεις, η αποφυγή συσσώρευσης σωματιδίων σε σωληνώσεις και η μείωση συχνότητας καθαρισμού των δεξαμενών χώνευσης. Οι εξαμμωτές είναι οι ειδικές διατάξεις στις οποίες λαμβάνει χώρα η εξάμμωση και διακρίνονται σε σταθερής ροής, αεριζόμενους και κυκλωνοειδούς ροής (Εικόνα 1.2). Συχνά, παράλληλα με την εξάμμωση γίνεται και η απολίπανση (απομάκρυνση λιπών και ελαίων με επίπλευση).



Εικόνα 1.2 Εξαμμωτής σταθερής ροής (αριστερά), αεριζόμενος (μέση), κυκλωνοειδούς ροής (δεξιά) (Γκίκας, 2020).

Μετά την προ-επεξεργασία, ακολουθεί συνήθως η πρωτοβάθμια επεξεργασία κατά την οποία απομακρύνονται οργανικά και ανόργανα αιωρούμενα στερεά διαμέτρου 1 - 100  $\mu\text{m}$  με σκοπό την μείωση φορτίων TSS, BOD και COD, τα οποία διαφορετικά θα απορρίπτονταν στους υδάτινους αποδέκτες. Τα ποσοστά απομάκρυνσης TSS και BOD που επιτυγχάνονται με την πρωτοβάθμια καθίζηση κυμαίνονται 50 – 70% και 25 – 40%, αντίστοιχα (Στάμου και Βογιατζής, 1994), ενώ οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα είναι βαρυτική καθίζηση και η επίπλευση. Ως προς την βαρυτική καθίζηση, τα λύματα παραμένουν σε δεξαμενές (Δεξαμενές Πρωτοβάθμιας Καθίζησης, ΔΠΚ) για μεγάλο χρονικό διάστημα, ώστε να καθιζάνουν τα στερεά, τα οποία

ακολουθώς απομακρύνονται με ξέστρα (Εικόνα 1.3, κάτω δεξιά) έχοντας την μορφή λάσπης (πρωτοβάθμια ιλύς) από τον πυθμένα των δεξαμενών και επεξεργάζονται περαιτέρω. Οι ΔΠΚ διακρίνονται σε κυκλικής και ορθογωνικής διατομής (Εικόνα 1.3, πάνω), ενώ η επιλογή του τύπου εξαρτάται από τη χωροταξία της εκάστοτε ΕΕΛ αλλά και την εμπειρία της ομάδας σχεδιασμού. Ως προς την επίπλευση, τα στερεά παρασύρονται προς την επιφάνεια της ΔΠΚ από φυσαλίδες αέρα που διοχετεύονται μέσω διαχυτήρων στην μάζα των αποβλήτων και υπερχειλίζουν (Εικόνα 1.3, κάτω αριστερά). Επίσης, σε ειδικές περιπτώσεις (βιομηχανικά υγρά απόβλητα, κολλοειδή στερεά) γίνεται η προσθήκη κροκιδωτικών μέσων, τα οποία αυξάνουν σημαντικά την απόδοση της καθίζησης (Γκίκας, 2020).



Εικόνα 1.3 ΔΠΚ ορθογωνικής διατομής (πάνω αριστερά), ΔΠΚ κυκλικής διατομής (πάνω δεξιά), υπερχειλιστής τραπεζοειδούς διατομής (κάτω αριστερά), ξέστρο παράσυρσης ιλύος με καμπύλες λεπίδες (κάτω δεξιά) (Γκίκας, 2020).

## 1.2.2 Δευτεροβάθμια επεξεργασία

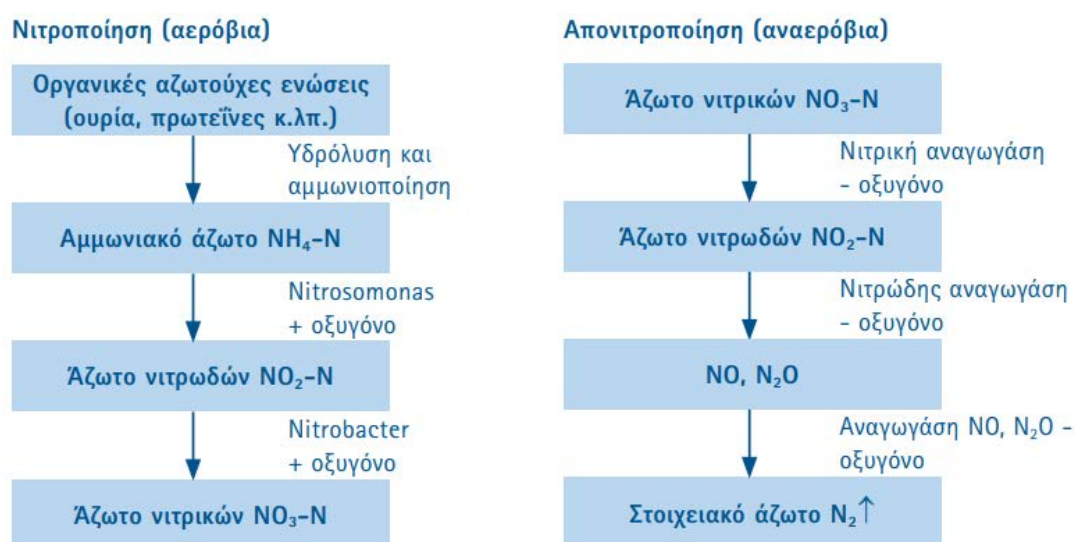
Μετά το πέρας της προ-επεξεργασίας και της πρωτοβάθμιας επεξεργασίας, ακολουθεί η δευτεροβάθμια (ή βιολογική) επεξεργασία, κύριοι στόχοι της οποίας η οξείδωση των διαλυμένων και σωματιδιακών βιοαποικοδομήσιμων συστατικών σε αποδεκτά τελικά προϊόντα, η συσσωμάτωση και απομάκρυνση των μη καθιζάνοντων κολλοειδών στερεών, και η απομάκρυνση οργανικού φορτίου και θρεπτικών συστατικών (αζώτου και φωσφόρου). Κατά την δευτεροβάθμια επεξεργασία απομακρύνονται οργανικά (διαλυμένα ή αιωρούμενα) υλικά από τα λύματα με την βοήθεια μικροοργανισμών που τα καταναλώνουν, ενώ μετά οι μικροοργανισμοί αυτοί απομακρύνονται από τα λύματα με καθίζηση ή άλλη διεργασία απομάκρυνσης στερεών. Η βιολογική επεξεργασία επιτυγχάνεται με διάφορους τρόπους και διακρίνεται σε δύο βασικές κατηγορίες ανάλογα φύση των μικροοργανισμών που χρησιμοποιούνται (Στάμου και Βογιατζής, 1994):



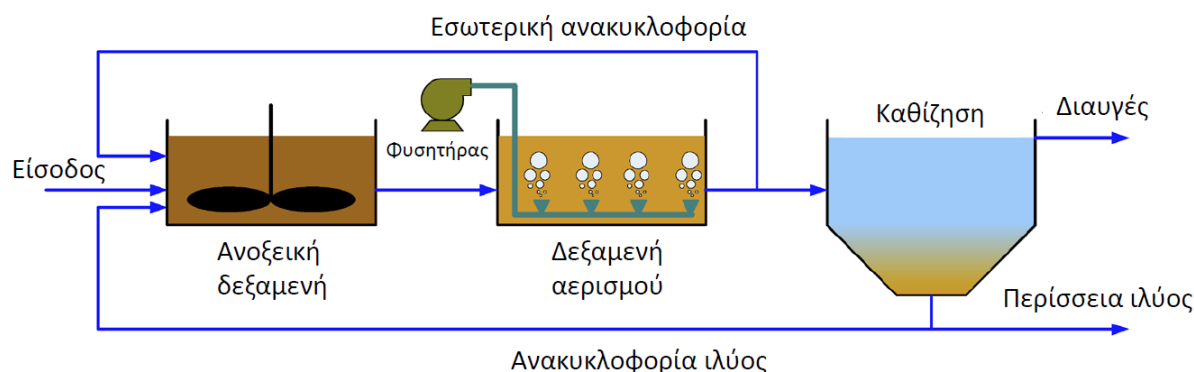
- Μέθοδος ενεργού ιλύος ή λίμνης, όταν οι μικροοργανισμοί βρίσκονται σε αιώρηση μέσα στα λύματα.
- Μέθοδος βιολογικού φίλτρου ή βιολογικού δίσκου, όταν οι μικροοργανισμοί είναι προσκολλημένοι σε κάποια επιφάνεια.

Η μέθοδος ενεργού ιλύος, που είναι η πιο διαδεδομένη και αποτελεσματική, αποτελείται από (i) το στάδιο του αερισμού, που λαμβάνει χώρα σε μία Δεξαμενή Αερισμού (ΔΑ) και κατά το οποίο οι μικροοργανισμοί, παρουσία οξυγόνου, καταναλώνουν την οργανική ύλη των αποβλήτων, και (ii) το στάδιο της δευτεροβάθμιας καθίζησης, που λαμβάνει χώρα σε μία Δεξαμενή Δευτεροβάθμιας Καθίζησης (ΔΔΚ), και κατά το οποίο οι μικροοργανισμοί καθιζάνουν και απομακρύνονται (δευτεροβάθμια ιλύς) προς περαιτέρω επεξεργασία. Επίσης, ένα μέρος της δευτεροβάθμιας ιλύος επανακυκλοφορεί στη ΔΑ με σκοπό την διατήρηση της συγκέντρωσης των Αιωρούμενων Στερεών Μικτού Υγρού (Mixed Liquor Suspended Solids, MLSS), που αποτελεί μία από τις βασικές λειτουργικές παραμέτρους της διεργασίας και επηρεάζει άμεσα την απόδοση της (υψηλή συγκέντρωση → πυκνωση ιλύος → μείωση απόδοσης, χαμηλή συγκέντρωση → αναποτελεσματική βιολογική επεξεργασία) (Alattabi, 2017). Επιπλέον, ο Χρόνος Παραμονής Στερεών (Solids Retention Time, SRT) μπορεί να επηρεάσει τη σύνθεση της μικροβιακής κοινότητας και τη λειτουργικότητα του συστήματος αερισμού, καθώς όταν ο ρυθμός ανάπτυξης των μικροοργανισμών είναι μεγαλύτερος από τον SRT, τότε αυτοί απομακρύνονται πριν προλάβει να επιτευχθεί η βιολογική επεξεργασία (Chan et al., 2017; Chen et al., 2017).

Πολλές φορές, παράλληλα με τη μέθοδο της ενεργού ιλύος, πραγματοποιούνται και οι διεργασίες νιτροποίησης - απονιτροποίησης, για την βιολογική απομάκρυνση του αζώτου. Συγκεκριμένα, κατά την νιτροποίηση (υπό αερόβιες συνθήκες), το αμμωνιακό άζωτο οξειδώνεται και μετατρέπεται σε νιτρώδη και ακολούθως σε νιτρικά ιόντα (Metcalf and Eddy, 2003). Έπειτα, με την διαδικασία της απονιτροποίησης (υπό ανοξικές συνθήκες), τα νιτρικά μετατρέπονται σε αέριο άζωτο, το οποίο διαφεύγει στην ατμόσφαιρα και απομακρύνεται από τα λύματα (Σαρηγιάννης, 2015). Στο Διάγραμμα 1.3 περιγράφεται σχηματικά η διαδικασία της νιτροποίησης - απονιτροποίησης, ενώ στο Διάγραμμα 1.4 αναπαρίσταται η διαδικασία δευτεροβάθμιας επεξεργασίας με την μέθοδο της ενεργού ιλύος, συμπεριλαμβανομένων των διεργασιών νιτροποίησης - απονιτροποίησης.



Διάγραμμα 1.3 Διαδικασίες αποικοδόμησης (νιτροποίηση - απονιτροποίηση) για την απομάκρυνση του αζώτου (Pütz, 2012).

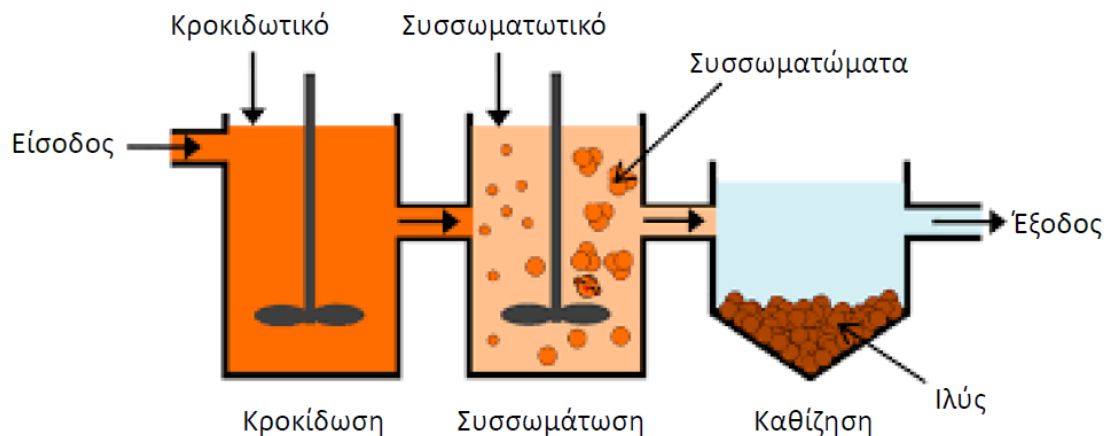


Διάγραμμα 1.4 Διάγραμμα ροής όπου περιγράφεται σχηματικά η μέθοδος ενεργού ιλύος (αερισμός, δευτεροβάθμια καθίζηση, ανακυκλοφορία), συμπεριλαμβανομένης της νιτροποίησης - απονιτροποίησης (Γκίκας, 2020).

### 1.2.3 Τριτοβάθμια επεξεργασία

Η τριτοβάθμια επεξεργασία είναι μία επιπρόσθετη διαδικασία για περαιτέρω απομάκρυνση υπολειπόμενων ανεπιθύμητων συστατικών (από απλά ανόργανα μέχρι πολύπλοκα οργανικά) που συνεχίζουν να υπάρχουν στα λύματα παρά την προηγούμενη επεξεργασία (προ-επεξεργασία, πρωτοβάθμια, δευτεροβάθμια) (Metcalf and Eddy, 2003). Η τριτοβάθμια επεξεργασία κρίνεται απαραίτητη μόνο όταν επιδιώκεται υψηλό επίπεδο απορρύπανσης των λυμάτων, όπως στις περιπτώσεις που πρόκειται να διατεθούν σε ευαίσθητους αποδέκτες ή να επαναχρησιμοποιηθούν (Αντωνιάδης, 2006; Κούγκολος, 2005; Νταρακάς, 2010). Η τριτοβάθμια επεξεργασία μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορες φυσικές, χημικές και βιολογικές μεθόδους. Από τις πιο ευρέως εφαρμοζόμενες είναι οι ακόλουθες (Γκίκας, 2020):

- **Χημική κατακρήμνιση:** Τα κολλοειδή σωματίδια που υπάρχουν στα λύματα φέρουν αρνητικό στατικό ηλεκτρισμό που οδηγεί στην αλληλοαπώθηση και παραμονή τους σε αιώρηση. Η χημική κατακρήμνιση αντιμετωπίζει το πρόβλημα αυτό μέσω της κροκίδωσης και της συσσωμάτωσης (Διάγραμμα 1.5). Συγκεκριμένα, κατά την κροκίδωση χρησιμοποιούνται ειδικές ουσίες (χλωριούχο πολυαργίλιο - PAC, θειικό αργίλιο -  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , κ.λπ.) με την βοήθεια των οποίων εξουδετερώνεται το φορτίο των σωματιδίων διαμέτρου 0,1 - 1  $\mu\text{m}$ , επομένως αποσταθεροποιείται το κολλοειδές σύστημα. Ακολούθως, κατά την συσσωμάτωση χρησιμοποιούνται πολυηλεκτρολύτες που βοηθούν στην δημιουργία συσσωματωμάτων των αποφορτισμένων σωματιδίων. Μετά την κροκίδωση και την συσσωμάτωση ακολουθεί διαχωρισμός της παραγόμενης ιλύος με καθίζηση, επίπλευση ή απευθείας διήθηση. Σε περίπτωση που επιλεγεί η χημική καθίζηση, αυτή πραγματοποιείται σε δεξαμενή παρόμοια με αυτήν της πρωτοβάθμιας καθίζησης (Διάγραμμα 1.5). Στο στάδιο αυτό απομακρύνεται και ο φώσφορος που βρίσκεται σε σωματιδιακή μορφή.
- **Διήθηση - φίλτρανση:** Απευθείας μετά την χημική κατακρήμνιση ή και ανεξαρτήτως, γίνεται η διαδικασία της φίλτρανσης με σκοπό τον περαιτέρω διαχωρισμό των αιωρούμενων ή διαλυμένων στερεών της υγρής φάσης, με την βοήθεια αμμόφιλτρων, επιφανειακών ηθμών ή μεμβρανών.



Διάγραμμα 1.5 Διάγραμμα ροής όπου περιγράφονται σχηματικά οι διαδικασίες κροκίδωσης - συσσωμάτωσης - χημικής καθίζησης (Γκίκας, 2020).

### 1.2.4 Απολύμανση

Το τελευταίο στάδιο επεξεργασίας των αστικών υγρών αποβλήτων, είτε πρόκειται να διατεθούν σε υδάτινο αποδέκτη είτε προορίζονται για επαναχρησιμοποίηση, είναι η απολύμανση κατά την οποία καταστρέφονται οι παθογόνοι μικροοργανισμοί σε τέτοιο βαθμό ώστε να μην ενέχουν κινδύνους για την δημόσια υγεία και το περιβάλλον. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος απολύμανσης είναι η χλωρίωση, ο οζονισμός και η ακτινοβολήση με υπεριώδη (Ultraviolet, UV) ακτινοβολία (Εικόνα 1.4), ενώ η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου και της απαιτούμενης δοσολογίας εξαρτώνται από:

- Την αρχική και την επιθυμητή ποιότητα εκροής
- Τα χαρακτηριστικά του αποβλήτου
- Το μέγεθος της ΕΕΛ
- Την εμπειρία της ομάδας μελέτης
- Το διαθέσιμο κεφάλαιο



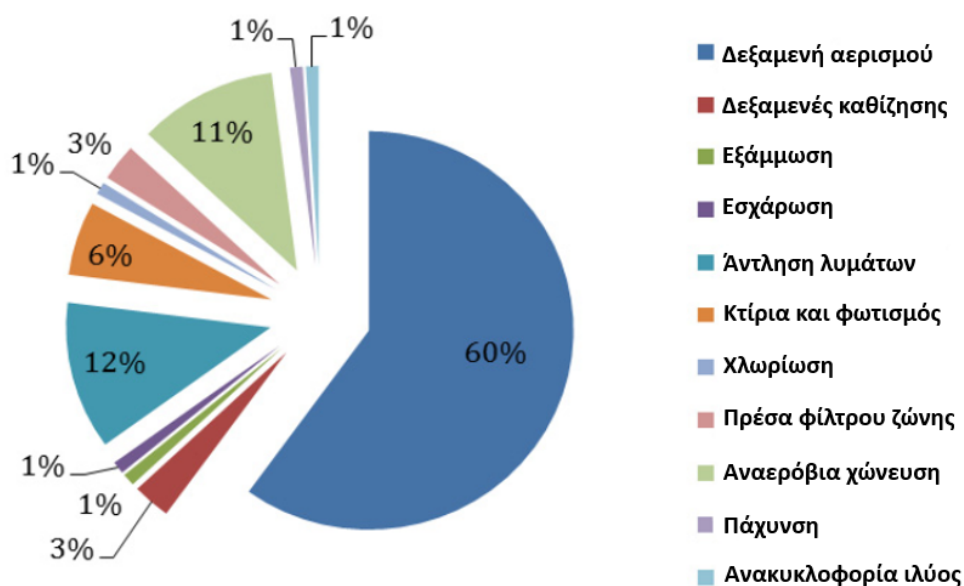
Εικόνα 1.4 Συστήματα απολύμανσης χλωρίωσης (αριστερά), οζονισμού (μέση), ακτινοβολήσης με UV (δεξιά) (Γκίκας, 2020).

### 1.3 Ενεργειακές απαιτήσεις για την συμβατική επεξεργασία αστικών υγρών αποβλήτων

Σε γενικές γραμμές, οι τυπικές ΕΕΛ εκτιμάται ότι απαιτούν περίπου το 1% της συνολικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μιας χώρας (Cao, 2011), ενώ η μέση κατανάλωση τους σε ηλεκτρική ενέργεια κυμαίνεται μεταξύ 0,3 - 2,1 kWh/m<sup>3</sup>, όταν εφαρμόζεται συμβατική επεξεργασία λυμάτων (Gandiglio et al., 2017).

Όπως προαναφέρθηκε, η συμβατική επεξεργασία λυμάτων περιλαμβάνει συνήθως τα εξής στάδια: προ-επεξεργασία, πρωτοβάθμια, δευτεροβάθμια, τριτοβάθμια επεξεργασία, και απολύμανση (βλέπε Κεφάλαιο 1.2). Για την αφαίρεση των ανεπιθύμητων ουσιών των αστικών υγρών αποβλήτων γίνεται ανά περίπτωση ο κατάλληλος συνδυασμός φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών, και επιλέγεται εξοπλισμός κατάλληλος για τις εφαρμοζόμενες διεργασίες καθώς και τις λειτουργίες άντλησης, αερισμού, ανάμιξης, συλλογής ιλύος και φυγοκέντρισης (Metcalf and Eddy, 2003). Σε κάθε στάδιο επεξεργασίας υπάρχει διαφορετικός ρυθμός ενεργειακής κατανάλωσης, ενώ απαιτούμενη ενέργεια για κάθε διεργασία εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των λυμάτων, την επιθυμητή ποιότητα εκροής, το μέγεθος της ΕΕΛ, την επιλεγόμενη τεχνολογία, καθώς και την βαθμίδα επεξεργασίας (Hernández-Sancho et al., 2011; Guimet et al., 2010). Σχετικά με το μέγεθος της εγκατάστασης, είναι αξιοσημείωτο ότι οι ΕΕΛ μικρής δυναμικότητας καταναλώνουν μεγαλύτερα ποσά ενέργειας συγκριτικά με μεγαλύτερες ΕΕΛ (Hernández-Sancho et al., 2011).

Στο Διάγραμμα 1.6 φαίνεται μία ενδεικτική ποσοστιαία κατανομή ενέργειας σε συμβατικές ΕΕΛ, όπου είναι εμφανές ότι ο μεγαλύτερος καταναλωτής ενέργειας είναι ο αερισμός που πραγματοποιείται κατά την βιολογική επεξεργασία των λυμάτων.



Διάγραμμα 1.6 Ποσοστιαία κατανομή ενέργειας σε μία τυπική ΕΕΛ (Cao, 2011).

Ακολουθεί παρουσίαση των ενεργειακών απαιτήσεων κάθε σταδίου συμβατικής επεξεργασίας των αστικών υγρών αποβλήτων:

#### Προ-επεξεργασία και πρωτοβάθμια επεξεργασία

Τα στάδια της προ-επεξεργασίας και της πρωτοβάθμιας επεξεργασίας απαιτούν μικρό μέρος της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας μίας ΕΕΛ (5 - 18 %). Η ενέργεια σε αυτά τα

στάδια καταναλώνεται κυρίως στην συλλογή και άντληση λυμάτων / ιλύος και εξαρτάται από την δομή - θέση του αποχετευτικού συστήματος, το μέγεθος της εγκατάστασης, και το είδος - πλήθος των αντλιών (Longo et al., 2016). Το εύρος της κατανάλωσης ενέργειας για την συλλογή και άντληση των λυμάτων ποικίλλει από χώρα σε χώρα, ενδεικτικά στην βιβλιογραφία αναφέρονται 0,020 - 0,100 kWh/m<sup>3</sup> για τον Καναδά, 0,045 - 0,140 kWh/m<sup>3</sup> για την Ουγγαρία και 0,100 - 0,370 kWh/m<sup>3</sup> για την Αυστραλία (Gu et al., 2017a).

### **Δευτεροβάθμια επεξεργασία**

Οι περισσότερες σύγχρονες συμβατικές ΕΕΛ εφαρμόζουν κατ' ελάχιστο δευτεροβάθμια επεξεργασία στα λύματα, η οποία είναι υπεύθυνη για ένα σημαντικό ποσοστό της καταναλισκόμενης ενέργειας, καθώς το σύστημα αερισμού που περιλαμβάνεται σε αυτού του είδους την επεξεργασία ευθύνεται για το 40 - 80% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας της εγκατάστασης (Cao, 2011; Gu et al., 2017a; Mamais et al., 2015; Metcalf and Eddy, 2003). Όσον αφορά την μέθοδο ενεργού ιλύος, τα συμβατικά συστήματα είναι λιγότερο ενεργοβόρα συγκριτικά με τα συστήματα παρατεταμένου αερισμού, ενώ είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η χρήση μονάδας συμπαραγωγής καλύπτει σημαντικό ποσοστό της ενεργειακής κατανάλωσης του συστήματος αερισμού και της μονάδας επεξεργασίας της ιλύος (Δημοπούλου, 2011). Επιπλέον, η κατανάλωση ενέργειας για την καθίζηση και την ανακυκλοφορία της παραγόμενης δευτεροβάθμιας ιλύος ανέρχεται στο 0,5 - 1,5 % και 1,5 - 3,5% της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας της ΕΕΛ, αντίστοιχα.

### **Τριτοβάθμια επεξεργασία - Απολύμανση**

Όταν μία ΕΕΛ εφαρμόζει και τριτοβάθμια επεξεργασία, η οποία παρουσιάζει αυξημένες ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια συγκριτικά με τα υπόλοιπα στάδια επεξεργασίας, τότε ναι μεν βελτιώνεται η ποιότητα των αποβλήτων προς διάθεση, αλλά αυξάνεται και η κατανάλωση ενέργειας (Longo et al., 2016). Οι τιμές απαιτούμενης ενέργειας για τριτοβάθμια επεξεργασία και απολύμανση των λυμάτων εξαρτώνται από τις εφαρμοζόμενες τεχνολογίες. Ενδεικτικά, για απολύμανση με χρήση ακτινοβολίας UV έχει βρεθεί εύρος 0,03 - 0,15 kWh/m<sup>3</sup>, για τον μηχανικό εξοπλισμό που απαιτείται για τη δόσολογία διάφορων χημικών (άλατα αλουμινίου ή σιδήρου, χλωριωμένα αντιδραστήρια κ.λπ.) 0,009 - 0,015 kWh/m<sup>3</sup>, ενώ για την διήθηση 0,0074 - 0,0027 kWh/m<sup>3</sup> (Cao, 2011; Gikas, 2017a; Longo et al., 2016).

## **1.4 Προηγμένες μέθοδοι επεξεργασίας αστικών υγρών αποβλήτων**

### **1.4.1 Μεμβράνες**

Ως μεμβράνη μπορεί να ορισθεί μια δομή που διαθέτει πολύ μεγαλύτερες πλευρικές διαστάσεις σε σχέση με το πάχος της, και μέσω της οποίας δύναται να λάβει χώρα μεταφορά μάζας υπό την επίδραση μιας ποικιλίας από ωθούσες δυνάμεις (Koros et al., 1996). Οι διεργασίες μεμβράνης με ωθούσα δύναμη την διαφορά της πίεσης διακρίνονται στις ακόλουθες κατηγορίες, ενώ τα χαρακτηριστικά τους μαζί με σύντομη περιγραφή δίνονται στον Πίνακα 1.3 (Chollom, 2014):

- Μικροδιήθηση (Microfiltration, MF)
- Υπερδιήθηση (Ultrafiltration, UF)
- Νανοδιήθηση (Nanofiltration, NF)
- Αντίστροφη Ωσμωση (Reverse Osmosis, RO)



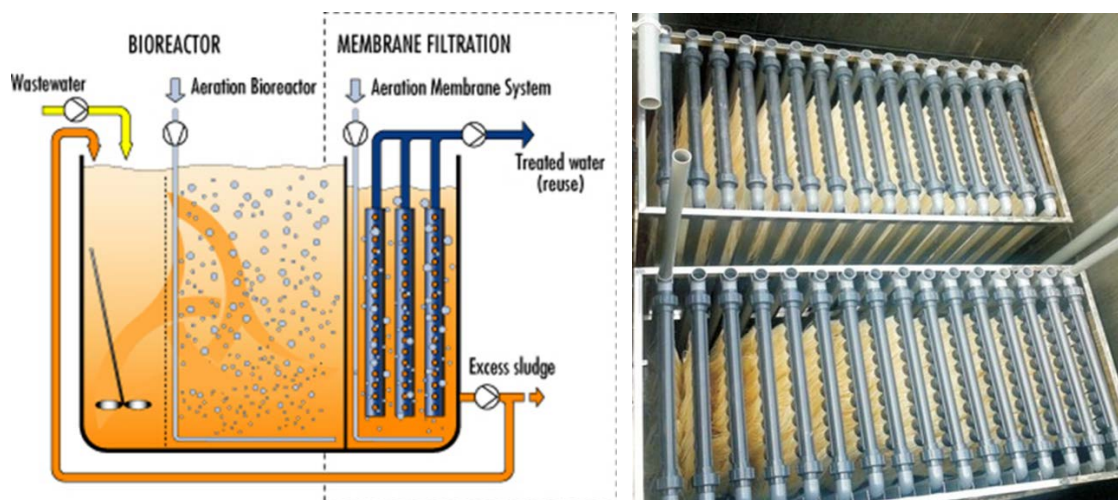
Πίνακας 1.3 Χαρακτηριστικά και περιγραφή διεργασιών μεμβρανών με διαφορά πίεσης (Conidi et al., 2020; Eyvaz & Yüksel, 2018; Valdez, 2012).

| Διεργασίες μεμβρανών | Ανοίγματα πόρων (μm) | Πίεση (bar) | Περιγραφή   |
|----------------------|----------------------|-------------|---|
| MF                   | 0,1 - 1              | 1 - 3       | Η MF χρησιμοποιείται πρωταρχικά για τον διαχωρισμό σωματιδίων και βακτηρίων από μικρότερες διαλυμένες ουσίες.   |
| UF                   | 0,001 - 1            | 2 - 5       | Με την UF μπορούν να συμπυκνωθούν μόρια όπως πεπτιδία, πρωτεΐνες ή άλλα σωματίδια.  |
| NF                   | 0,001 - 0,01         | 5 - 15      | Η NF είναι η διεργασία μεμβρανών κατά την οποία λαμβάνει χώρα απόρριψη μόνο των πολλαπλά φορισμένων ανιόντων, ενώ τα μονοφορισμένα ανιόντα διέρχονται μέσω της μεμβράνης. Επιπλέον, λαμβάνει χώρα απόρριψη μη φορισμένων διαλυμένων συστατικών και θετικά φορισμένων ιόντων, σε ποσοστό που εξαρτάται από το μέγεθος και το σχήμα των μορίων. |
| RO                   | 0,0001 - 0,001       | 15 - 75     | Η RO είναι ευρέως γνωστή για την υψηλή αποτελεσματικότητά της στο διαχωρισμό μικρών σωματιδίων, συμπεριλαμβανομένων βακτηρίων και μονοσθενών ιόντων όπως ιόντα νατρίου και ιόντων χλωρίου έως 99,5%.  |

Τα τελευταία χρόνια εφαρμόζεται όλο και περισσότερο μια σχετικά νέα τεχνολογία επεξεργασίας λυμάτων, τα συστήματα Βιοαντιδραστήρων Μεμβρανών (Membrane Bioreactor, MBR) (Εικόνα 1.5). Πρόκειται για συστήματα ενεργού ιλύος, όπου ο διαχωρισμός της βιομάζας γίνεται με διήθηση με χρήση μεμβρανών (συνήθως MF ή UF).

Στις διεργασίες μεμβρανών παρατηρούνται συνήθως τρία ρεύματα: (i) το ρεύμα τροφοδοσίας που ωθείται μέσω αντλίας έναντι της επιφάνειας της μεμβράνης, και το οποίο διαχωρίζεται σε (ii) ρεύμα προϊόντος ή διήθημα (διαπερατά συστατικά που διέρχονται μέσω της μεμβράνης) και (iii) ρεύμα απόρριψης ή κατακράτημα (μη διαπερατά συστατικά).

Τα συστήματα MBR λειτουργούν υπό τις εξής συνθήκες: συγκεντρώσεις MLSS = 5 - 20 g/L, SRT = 5 - 20 d, Υδραυλικό Χρόνο Παραμονής (Hydraulic Retention Time, HRT) = 4 - 6 h και φόρτιση COD = 1,2 - 3,2 kg/(m<sup>3</sup>·d). Επίσης, μπορούν να επιτύχουν εκροή με BOD < 5 mg/L και θολρότητα < 1 NTU (Nephelometric Turbidity Units), ενώ η κατανάλωση ενέργειας τους είναι 2-3 φορές αυτής που απαιτεί η διεργασία ενεργού ιλύος (Γκίκας, 2020).



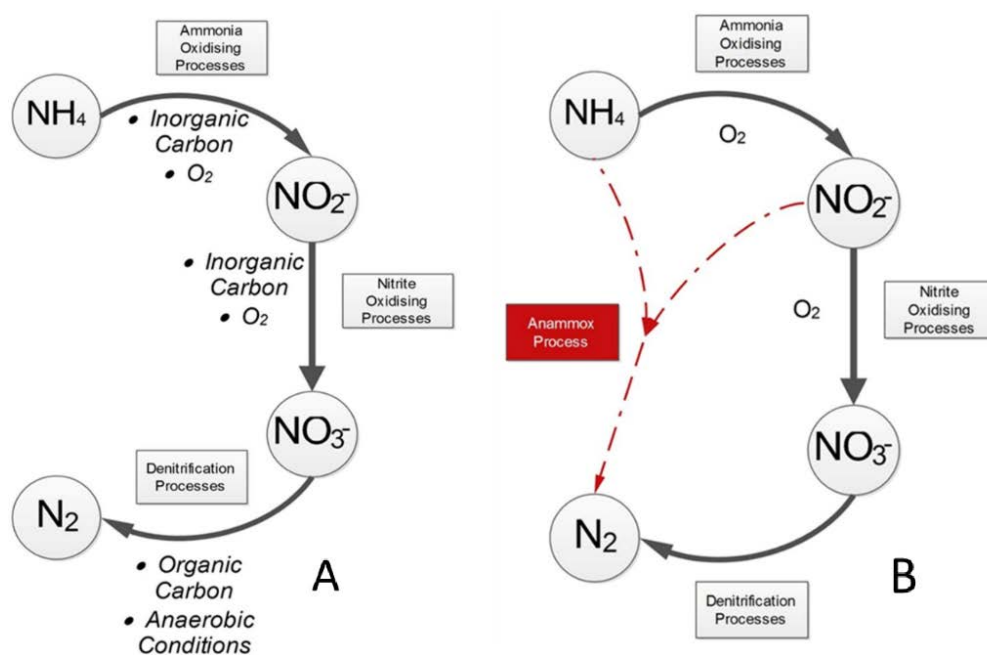
Εικόνα 1.5 Σχηματική απεικόνιση συστήματος MBR (αριστερά) και φωτογραφία συστήματος μεμβρανών (δεξιά) (Γκίκας, 2020).

### 1.4.2 Διεργασία Αναερόβιας Οξειδωσης Αμμωνίου (ANAMMOX)

Πέρα από την συμβατική απομάκρυνση του αζώτου που πραγματοποιείται συνήθως παράλληλα με την μέθοδο ενεργού ιλύος, έχουν αναπτυχθεί διάφορες προηγμένες μέθοδοι. Μία από τις πιο ενδιαφέρουσες είναι η διεργασία Αναερόβιας Οξειδωσης Αμμωνίου (ANaerobic AMMOonium OXidation, ANAMMOX).

Στην διεργασία ANAMMOX το αμμώνιο μετατρέπεται σε αέριο άζωτο υπό ανοξικές συνθήκες, με την βοήθεια βακτηρίων που χρησιμοποιούν τα νιτρώδη ως δέκτες ηλεκτρονίων. Σκοπός της τεχνολογίας αυτής είναι η βελτίωση της απομάκρυνσης του αζώτου από τα λύματα (αύξηση απόδοσης, μείωση ενεργειακής κατανάλωσης και μείωση αποτυπώματος άνθρακα) μέσω της χρήσης βακτηρίων ικανών για αναερόβια οξείδωση του αμμωνίου (Ali and Okabe, 2015).

Η διεργασία ANAMMOX πλεονεκτεί συγκριτικά με την συμβατική απομάκρυνση αζώτου λόγω του ότι (i) είναι αυτότροφη διεργασία κατά την οποία καταναλώνεται  $\text{CO}_2$  και δεν απαιτείται προσθήκη μεθανόλης ως πηγή άνθρακα (μειωμένο αποτύπωμα άνθρακα), (ii) οδηγεί σε υψηλότερα ποσοστά απομάκρυνσης του αζώτου (αυξημένη απόδοση), και (iii) απαιτεί μικρότερα ποσά ενέργειας (μειωμένη ενεργειακή κατανάλωση). Στο Διάγραμμα 1.7 που ακολουθεί γίνεται σύγκριση της συμβατικής νιτροποίησης - απονιτροποίησης με την διεργασία ANAMMOX.



Διάγραμμα 1.7 Σύγκριση συμβατικής νιτροποίησης - απονιτροποίησης (Α) με την διεργασία ANAMMOX (Β) (Gokal, 2017).

Βέβαια, η επίτευξη της αυξημένης απόδοσης στην απομάκρυνση του αζώτου προϋποθέτει συνεχή έλεγχο συγκεκριμένων λειτουργικών παραμέτρων (θερμοκρασία, pH, DO, συγκέντρωση αζώτου, και συγκέντρωση άνθρακα). Επίσης, είναι πιθανό να εντοπίζεται διαφορά στην απόδοση απομάκρυνσης του αζώτου των διαφόρων συστημάτων ANAMMOX, παρά το γεγονός ότι αυτά λειτουργούν υπό τις ίδιες συνθήκες, που οφείλεται σε διαφορές στις μεταβολικές διεργασίες κάθε βακτηριακής κοινότητας. Επομένως, οι συνθήκες λειτουργίας κάθε εφαρμογής της διεργασίας ANAMMOX θα πρέπει να διερευνώνται μεμονωμένα, ώστε να προσδιορίζονται οι βέλτιστες συνθήκες ανά περίπτωση (Van der Star et al., 2007).

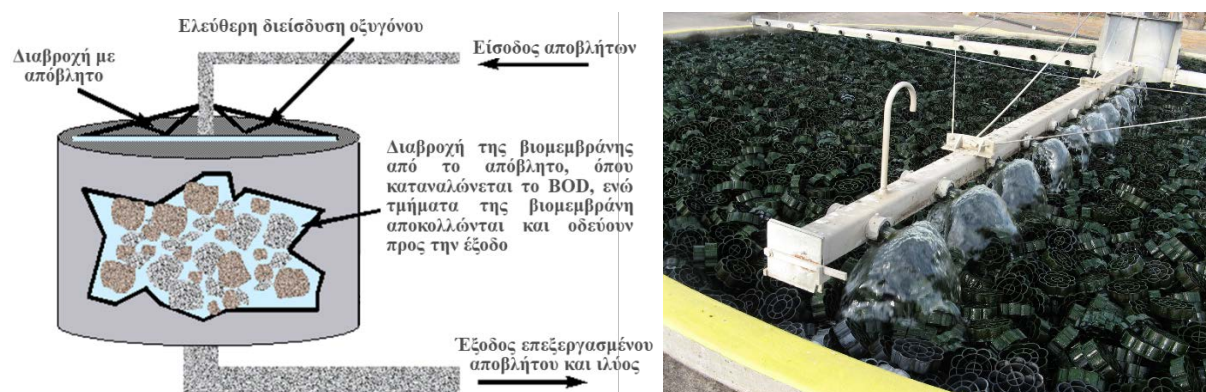
### 1.4.3 Συστήματα Ακίνητοποιημένης Βιομάζας (IB)

Τα συστήματα Ακίνητοποιημένης Βιομάζας (Immobilized Biomass, IB) αποτελούν επίσης μία προηγμένη μέθοδο επεξεργασίας λυμάτων. Στους βιοαντιδραστήρες IB το σύνολο της περιεχόμενης βιομάζας βρίσκεται ακίνητοποιημένο σε κάποιον φορέα σχηματίζοντας βιομεμβράνη (biofilm), ενώ το θρεπτικό υπόστρωμα υπόκειται σε διάχυση επί της βιομεμβράνης, ώστε να φτάσει στο άμεσο περιβάλλον των μικροοργανισμών και να αποδομηθεί.

Τα συστήματα αυτά απαιτούν μικρό χώρο εγκατάστασης λόγω της υψηλής συγκέντρωσης βιομάζας, δεν ενέχουν κίνδυνο έκπλυσης της βιομάζας λόγω αιφνίδιας υδραυλικής φόρτισης και χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερη αντοχή σε τοξικές ουσίες. Βέβαια, για να λειτουργήσουν αποδοτικά απαιτείται υψηλή συγκέντρωση DO, καθώς το οξυγόνο πρέπει να διαχυθεί στην βιομεμβράνη προτού αντιδράσει. Επίσης, είναι πιθανόν να παρουσιαστούν προβλήματα απόφραξης λόγω της περιοδικής αποκόλλησης τμημάτων της βιομεμβράνης.

Για την βιολογική επεξεργασία αστικών υγρών αποβλήτων χρησιμοποιούνται κυρίως μικροβιακά συστήματα μη εμβαπτισμένης ακίνητοποιημένης βιομάζας (π.χ. χαλικοδιυλιστήρια), εμβαπτισμένης ακίνητοποιημένης βιομάζας (π.χ. ρευστοποιημένες κλίνες) και κροκιδωμένης αιωρούμενης βιομάζας (π.χ. ενεργός ιλύς) (Γκίκας, 2018).

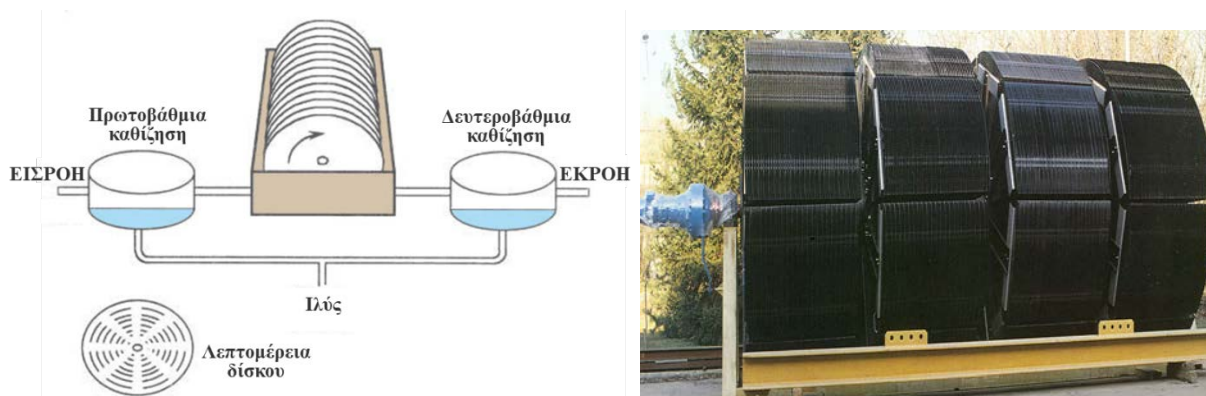
Τα **χαλικοδιυλιστήρια** (trickling filters) είναι δεξαμενές (συνήθως κυκλικής διατομής) πληρωμένες με πέτρες ή με ειδικά μορφοποιημένα τεμάχια πλαστικών, επί των οποίων αναπτύσσεται βιομεμβράνη. Το απόβλητο τροφοδοτείται στο άνω μέρος των δεξαμενών και αποδομείται εντός των βιομεμβρανών κατά την καθοδική του πορεία εντός του φίλτρου. Από τον πυθμένα εξέρχεται το επεξεργασμένο απόβλητο και τμήματα αποκολλημένων βιομεμβρανών ως ιλύς (Εικόνα 1.6). Στα χαλικοδιυλιστήρια πραγματοποιείται συνήθως μερική ανακυκλοφορία του επεξεργασμένου αποβλήτου, με την οποία μειώνεται η συγκέντρωση στην είσοδο, εξισορροπείται η φόρτιση, διασφαλίζεται ότι η βιομάζα διατηρείται υγρή, μειώνεται οι διαφορές θερμοκρασίας και η ανάπτυξη εντόμων και επιτυγχάνεται ταχύτερη ροή στην διεπιφάνεια υγρού - βιομεμβράνης.



Εικόνα 1.6 Σχηματική απεικόνιση χαλικοδιυλιστηρίου (αριστερά) και φωτογραφία όπου φαίνεται η διαβροχή αποβλήτου σε χαλικοδιυλιστήριο με πλαστικό πληρωτικό υλικό (δεξιά) (Γκίκας, 2018).

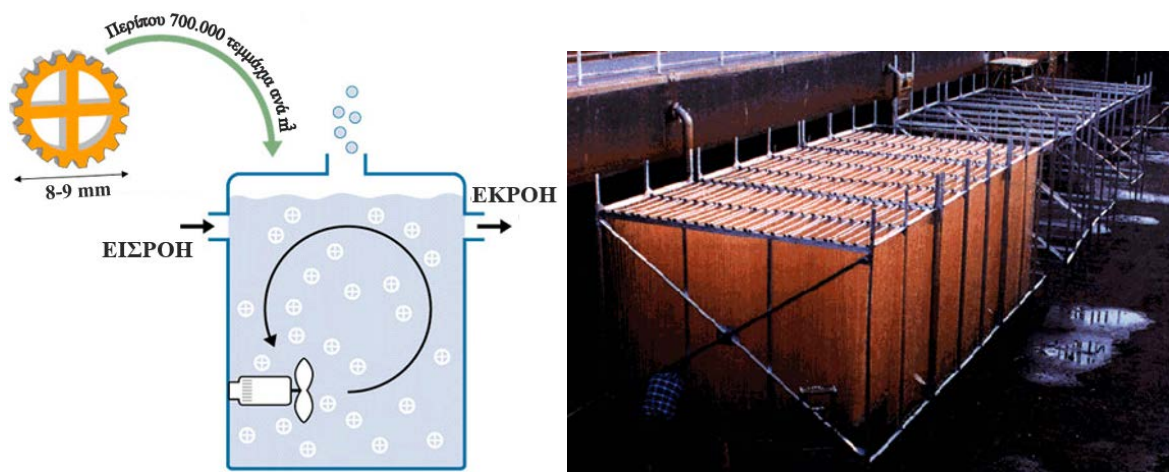
Ένα διαδεδομένο σύστημα IB είναι επίσης και οι **περιστρεφόμενοι βιοδίσκοι** (Rotating Biological Contactors, RBC). Το σύστημα αυτό αποτελείται από συστοιχία περιστρεφόμενων ομοαξονικών δίσκων πολυστυρενίου ή πολυχλωριούχου βινυλίου, μερικά εμβαπτισμένων (~40%) στην υγρή φάση. Πάνω στους δίσκους αναπτύσσεται βιομεμβράνη που αποδομεί τα θρεπτικά συστατικά της υγρής φάσης (δυνατότητα νιτροποίησης), προσλαμβάνοντας οξυγόνο από το μη εμβαπτισμένο τμήμα των δίσκων. Απαιτείται απομάκρυνση των καθιζανόντων στερεών πριν την επεξεργασία με RBC, ενώ συνήθως το εξερχόμενο απόβλητο καθιζάνει σε ΔΔΚ.





Εικόνα 1.7 Σχηματική απεικόνιση βιοδίσκου (αριστερά) και φωτογραφία όπου φαίνεται σύστημα βιοδίσκων έτοιμο προς χρήση (δεξιά) (Γκίκας, 2018).

Η ακινητοποιημένη βιομάζα χρησιμοποιείται και σε συστήματα **ενεργού ιλύος** (Fixed-Film Activated Sludge), τα οποία βασίζονται στην ανάπτυξη βιομεμβρανών επί ειδικών πλαστικών φορέων, οι οποίοι βρίσκονται σε αιώρηση εντός της δεξαμενής αντίδρασης ή στερεωμένοι σε κάποια σημεία της. Λόγω της υψηλής ειδικής συγκέντρωσης βιομάζας, οι αντιδραστήρες αυτού του τύπου χαρακτηρίζονται από υψηλές αποδόσεις ανά όγκο, ενώ η πλειοψηφία τέτοιων συστημάτων έχει κατοχυρώσει την τεχνολογία με διπλώματα ευρεσιτεχνίας.

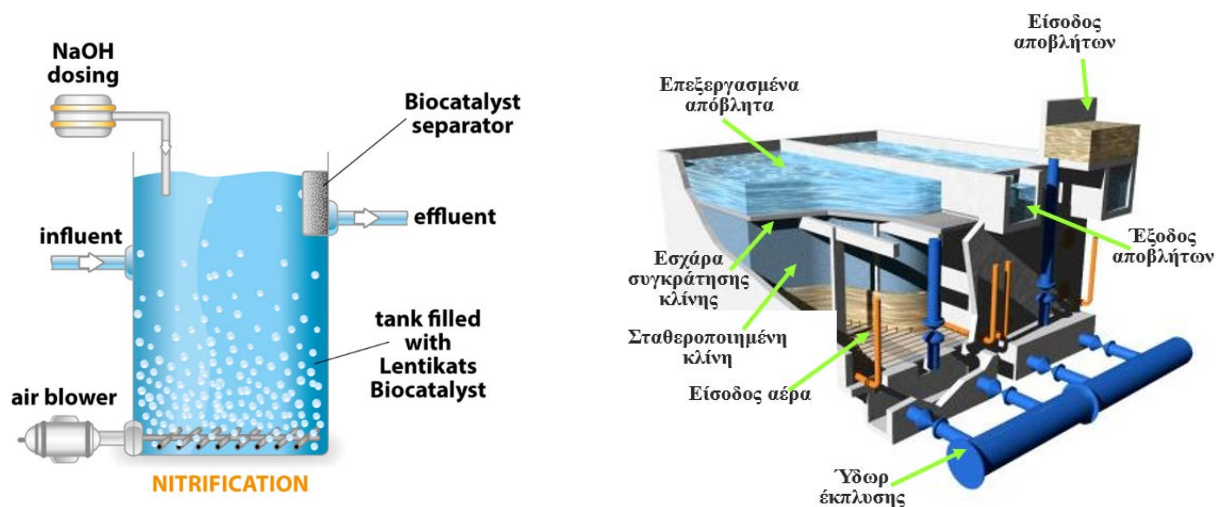


Εικόνα 1.8 Σχηματική απεικόνιση συστήματος ενεργού ιλύος με ακινητοποιημένη βιομάζα (αριστερά) και φωτογραφία όπου φαίνεται τέτοιο σύστημα σε ΕΕΛ των Η.Π.Α. (δεξιά) (Γκίκας, 2018).

Στην ίδια κατηγορία προηγμένων μεθόδων επεξεργασίας αστικών υγρών αποβλήτων ανήκουν επίσης (Διάγραμμα 1.8):

- Τα συστήματα **ενθυλακωμένης βιομάζας** (encapsulated growth), στα οποία η βιομάζα βρίσκεται ενθυλακωμένη εντός πολυμερούς, διαπερατού από τα αντιδρώντα και τα προϊόντα της αντίδρασης. Το πολυμερές έχει συνήθως σφαιρικό ή φακοειδές σχήμα και διάμετρο μερικών χιλιοστών. Η βιομάζα αναπτύσσεται εντός του πολυμερούς, ενώ δεν δύναται να εισέλθουν άλλοι μικροοργανισμοί. Το σύστημα βρίσκει εφαρμογές στην κατάλυση ειδικών βιοαντιδράσεων και σε περιπτώσεις νιτροποίησης - απονιτροποίησης.
- Τα συστήματα **εμβαπτισμένης ακινητοποιημένης βιομάζας** (submerged attached growth), στα οποία η βιομάζα βρίσκεται ακινητοποιημένη επί φορέων με σχετικά μικρή διάμετρο (συνήθως μικρότερη των 5mm). Διακρίνονται σε συστήματα σταθεροποιημένης και ρευστοποιημένης κλίνης, ανάλογα με τον βαθμό ελευθερίας κίνησης των φορέων. Συστήματα τέτοιου είδους βρίσκουν εφαρμογή σε αποικοδόμηση ιδιαίτερα δύσκολων αποβλήτων, και χαρακτηρίζονται από τον υψηλό βαθμό

απορρόφησης αιφνίδιων φορτίσεων σε τοξικές ουσίες, αλλά και σε σημαντικές διακυμάνσεις του υδραυλικού φορτίου.



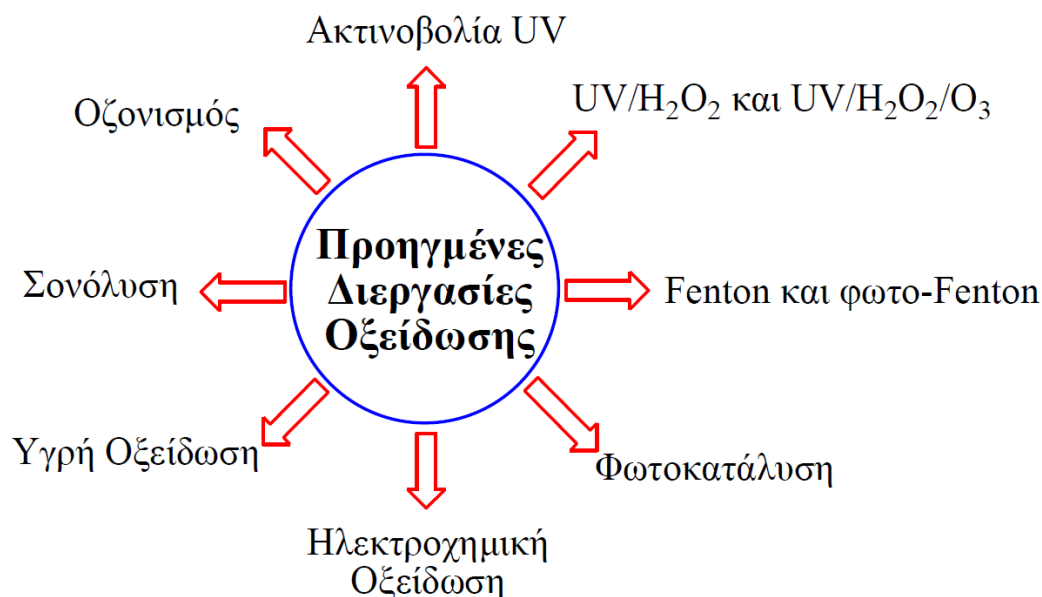
Διάγραμμα 1.8 Σχηματική απεικόνιση συστήματος ενθυλακωμένης βιομάζας (αριστερά) και εμβαπτισμένης ακινητοποιημένης βιομάζας (δεξιά) (Γκίκας, 2018).

#### 1.4.4 Προηγμένες Διεργασίες Οξειδωσης (AOPs)

Οι Προηγμένες Διεργασίες Οξειδωσης (Advanced Oxidation Processes, AOPs) είναι χημικές οξειδωτικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία νερού και αστικών υγρών αποβλήτων. Αποσκοπούν στην οξείδωση οργανικών ή ανόργανων ρύπων καθώς και στην αδρανοποίηση παθογόνων μικροοργανισμών, και συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται για την καταστροφή οργανικών ρύπων, την μείωση του οργανικού φορτίου των αποβλήτων, την βελτίωση βιο-αποδομησιμότητας των αποβλήτων καθώς και την απολύμανσή τους (Ξεκουκουλωτάκης, 2023).

Γενικά, οποιαδήποτε αντίδραση οξείδωσης συνοδεύεται από την πρόσληψη οξυγόνου ή την αποβολή υδρογόνου από μία ουσία ή απλά την αποβολή ηλεκτρονίων από μία ουσία ή ακόμα γενικότερα την αύξηση του αριθμού οξείδωσης ενός ατόμου. Συγκεκριμένα, στις AOPs ο μηχανισμός οξείδωσης περιλαμβάνει τον σχηματισμό ριζών υδροξυλίου ( $\text{HO}^\bullet$ ) κάτω από συνθήκες θερμοκρασίας περιβάλλοντος και ατμοσφαιρικής πίεσης. Οι βασικές κατηγορίες των AOPs είναι οι ακόλουθες (Διάγραμμα 1.9):

- Οζονισμός (Ozonation,  $\text{O}_3$ )
- Υπεριώδης ακτινοβολία (Ultraviolet Radiation, UV)
- Υπεριώδης ακτινοβολία και υπεροξείδιο του υδρογόνου ( $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$ )
- Υπεριώδης ακτινοβολία, υπεροξείδιο του υδρογόνου και όζον ( $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$ )
- Οξείδωση με άλατα του σιδήρου ( $\text{Fe(III)}/\text{Fe(II)}$ ) παρουσία  $\text{H}_2\text{O}_2$  (οξείδωση Fenton και photo-Fenton)
- Ετερογενής φωτοκατάλυση
- Ηλεκτροχημική οξείδωση
- Υγρή οξείδωση
- Σονόλυση



Διάγραμμα 1.9 Οι βασικές κατηγορίες των Προηγμένων Διεργασιών Οξείδωσης (Advanced Oxidation Processes, AOPs) (Ξεκουκουλωτάκης, 2023).

Οι δύο πιο εφαρμοζόμενες AOPs είναι ο οζονισμός και η ακτινοβολία με UV, για τις οποίες ακολουθεί συνοπτική περιγραφή (Ξεκουκουλωτάκης, 2023):

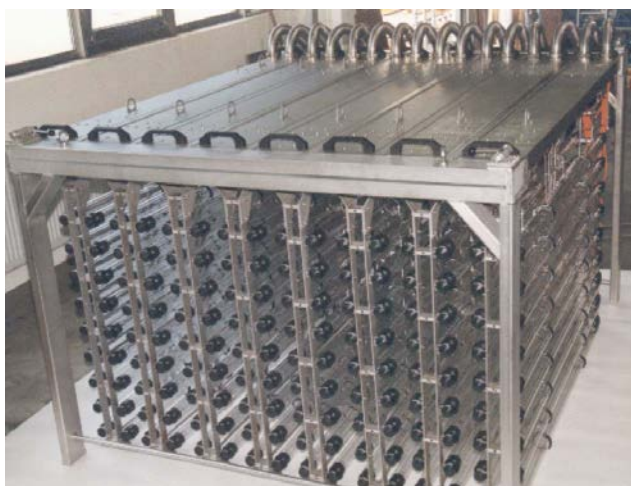
- **Οζονισμός:** Τα τελευταία χρόνια αυξάνεται συνεχώς η χρήση του O<sub>3</sub> στις μονάδες επεξεργασίας νερού και αστικών υγρών αποβλήτων, προκειμένου να επιτευχθεί απολύμανση και διάσπαση υπολειμματικών οργανικών ενώσεων. Λόγω της γρήγορης διάσπασής του προς O<sub>2</sub> δεν είναι δυνατόν να παραχθεί και να αποθηκευτεί / μεταφερθεί, επομένως παράγεται από το O<sub>2</sub> του αέρα ή από καθαρό O<sub>2</sub> (με UV ή ηλεκτρική εκκένωση ή ηλεκτρόλυση) επιτόπου στις μονάδες επεξεργασίας νερού και αστικών υγρών αποβλήτων. Συνήθως εισάγεται στο υπό επεξεργασία δείγμα νερού / αποβλήτου με την μορφή οζονισμένου νερού, ενώ ακόμα και στα πιο αποδοτικά συστήματα συναντάται υπολειμματικό O<sub>3</sub> στα απαέρια, το οποίο είναι απαραίτητο να διασπαστεί (θερμικά με ή χωρίς την χρήση καταλυτών). Η οξείδωση που προκαλεί το O<sub>3</sub> μπορεί να είναι άμεση (απευθείας οξείδωση ενώσεων) ή έμμεση (σχηματισμός HO<sup>•</sup>). Εκτός της απολύμανσης και της οξείδωσης οργανικών ρύπων, το O<sub>3</sub> χρησιμοποιείται και για οξείδωση Fe<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, H<sub>2</sub>S, σουλφιδίων, ενώσεων που προκαλούν οσμές και γεύσεις στο νερό καθώς και για απομάκρυνση χρώματος.
- **Ακτινοβολία με UV:** Η μέθοδος της ακτινοβολίας με UV είναι μία διαδικασία φωτόλυσης, κατά την οποία γίνεται απορρόφηση φωτονίων ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (με μήκη κύματος 100 - 400 nm) με αποτέλεσμα την πρόκληση οξείδωσης. Η ακτινοβολία UV (και συγκεκριμένα η UVC με μήκη κύματος 200 - 280 nm) είναι αποτελεσματική για την απολύμανση και την διάσπαση οργανικών ενώσεων. Η μικροβιοκτόνος δράση της οφείλεται στην απορρόφησή της από το DNA των κυττάρων και στην παρεμπόδιση αντιγραφής του. Οι πηγές UV που χρησιμοποιούνται συνήθως για την επεξεργασία νερού και αστικών υγρών αποβλήτων είναι λάμπες υδραργύρου (χαμηλής πίεσης - χαμηλής ισχύος, χαμηλής πίεσης - υψηλής ισχύος, μεσαίας πίεσης - υψηλής ισχύος), οι οποίες είναι ίδιες με τις κοινές λάμπες φθορισμού, χωρίς το εσωτερικό φθοριστικό υλικό. Οι λάμπες UV αποτελούν το βασικό τμήμα των αντιδραστήρων UV, οι οποίοι είναι εξοπλισμένοι με προστατευτικούς σωλήνες χαλαζία που περιβάλλουν τις λάμπες, δοχείο ή διάταξη που συγκρατεί τις λάμπες και τους σωλήνες, τροφοδοτικά των λαμπών, σύστημα καθαρισμού των σωλήνων, καθώς και σύστημα καταγραφής της δόσης της ακτινοβολίας UV. Οι αντιδραστήρες UV χωρίζονται σε ανοικτού αγωγού (όπου η ροή επιτυγχάνεται υπό την επίδραση της βαρύτητας) και σε κλειστά δοχεία αυξημένης πίεσης.



Ο Πίνακας 1.4 συνοψίζει τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του οζονισμού και της ακτινοβολήσης με UV, ενώ στην Εικόνα 1.9 δίνονται φωτογραφίες εγκαταστάσεων που εφαρμόζουν τις τεχνικές αυτές.

Πίνακας 1.4 Βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των AOPs με χρήση  $O_3$  και UV (Ξεκουκουλωτάκης, 2023).

| AOPs  | Πλεονεκτήματα   | Μειονεκτήματα   |
|-------|---|---|
| $O_3$ | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ισχυρό απολυμαντικό.</li> <li>- Δεν απαιτεί αγορά και χειρισμό τοξικών χημικών αντιδραστηρίων.</li> <li>- Δεν απαιτεί μεγάλο χώρο εγκατάστασης.</li> <li>- Προσαρμόζεται εύκολα σε υπάρχουσες εγκαταστάσεις.</li> <li>- Είναι αποτελεσματικό σε μεγάλο εύρος μικροβίων.</li> <li>- Βελτιώνει την ποιότητα των υδάτινων αποδεκτών.</li> <li>- Απουσία τοξικότητας για την υδρόβια ζωή.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Παρουσία <math>Br^-</math>, σχηματισμός <math>BrO_3^-</math>, που είναι καρκινογόνα.</li> <li>- Ασταθές, επί τόπου παρασκευή.</li> <li>- Είναι τοξικό και διαβρωτικό, επομένως πρέπει να ακολουθούνται ειδικές συνθήκες ασφαλείας.</li> <li>- Δεν υπολογίζεται εύκολα η απαραίτητη συγκέντρωσή του στο νερό.</li> <li>- Υψηλό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας.</li> <li>- Απαιτεί υψηλή συντήρηση εξοπλισμού.</li> </ul>   |
| UV    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Είναι αποτελεσματική στην αδρανοποίηση μεγάλους εύρους μικροοργανισμών, συμπεριλαμβανομένων και των ανθεκτικών στην απολύμανση με χλωρίωση.</li> <li>- Δεν απαιτείται η προσθήκη χημικών οξειδωτικών αντιδραστηρίων.</li> <li>- Μειώνεται ο κίνδυνος από την παραγωγή, μεταφορά, αποθήκευση και χειρισμό τοξικών χημικών αντιδραστηρίων.</li> <li>- Πολύ μικροί χρόνοι επαφής.</li> <li>- Δεν σχηματίζονται επικίνδυνα / τοξικά παραπροϊόντα.</li> <li>- Απαιτεί μικρό χώρο εγκατάστασης.</li> <li>- Δεν προκαλούνται γεύσεις και οσμές στο επεξεργασμένο νερό.</li> <li>- Ευκολία στον χειρισμό.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Δεν υπάρχει υπολειμματική συγκέντρωση του απολυμαντικού για την προστασία του νερού στο δίκτυο παροχής και κατανάλωσης.</li> <li>- Ορισμένοι μικροοργανισμοί αναγεννιούνται στο σκοτάδι.</li> <li>- Επηρεάζεται σημαντικά από την ύπαρξη αιωρούμενων στερεών και θολερότητας.</li> <li>- Υψηλές συγκεντρώσεις <math>NO_3^-</math> οδηγούν στον σχηματισμό <math>NO_2^-</math>.</li> <li>- Παρατηρούνται επικαθήσεις στους σωλήνες χαλαζία, επομένως απαιτείται περιοδικός καθαρισμός.</li> </ul> |



Εικόνα 1.9 Βιομηχανική συσκευή παραγωγής  $O_3$  (αριστερά) και αντιδραστήρας UV ανοικτού αγωγού (δεξιά) (Ξεκουκουλωτάκης, 2023).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Επεξεργασία και διαχείριση βιοστερεών

### 2.1 Βιοστερεά (ιλύς)

Ο όρος βιοστερεά (ή ιλύς ή λυματολάσπη) αναφέρεται στο ημιστερεό υπόλειμμα που παράγεται ως το κύριο υποπροϊόν κατά την πρωτοβάθμια, δευτεροβάθμια και τριτοβάθμια επεξεργασία των λυμάτων (Bodzek et al., 1997; Edwards et al., 2017), ενώ τα υπολείμματα της προ-επεξεργασίας (χονδρόκοκκα στερεά σωματίδια, κόκκοι, άμμος, έλαια και λίπη) δεν θεωρούνται ιλύς (Hall, 1999). Πρόκειται για ένα αρκετά ομοιογενές υδαρές υλικό με συγκέντρωση στερεών 30-40 φορές υψηλότερη από αυτή που έχουν τα εισερχόμενα λύματα.

Η ιλύς αποτελείται κυρίως από οργανικά υλικά (σε ξηρή βάση: 40% πρωτεΐνες, 10-25% λιπίδια, 14% υδαάνθρακες, λιγνίνη), ανόργανα υλικά (30-50% τέφρα) και μικροοργανισμούς, ενώ το ποσοστό των στερεών της ποικίλει και κυμαίνεται συνήθως από 0,25 έως 12% ανάλογα το στάδιο επεξεργασίας από το οποίο προέρχεται (Harrison et al., 2006; Manara and Zabaniotou, 2012; Youssef et al., 2011). Τα χαρακτηριστικά της παρουσιάζουν ποικιλομορφία και εξαρτώνται από διάφορες παραμέτρους (π.χ. τύπος ΕΕΛ, περιβαλλοντικές απαιτήσεις, κλιματικές συνθήκες, κ.α.). Ορισμένα από τα συστατικά των βιοστερεών, όπως το οργανικό φορτίο, το άζωτο, ο φώσφορος, το κάλιο και το ασβέστιο έχουν γεωργική αξία και μπορούν να λειτουργήσουν ευεργετικά ως προς το έδαφος, καθιστώντας τα βιοστερεά κατάλληλα για χρήση ως εδαφοβελτιωτικά. Όμως, τα βιοστερεά ενδέχεται να περιέχουν και βαρέα μέταλλα, παθογόνους μικροοργανισμούς, καθώς και ανθεκτικούς οργανικούς ρύπους, γεγονός που τα καθιστά επικίνδυνα για το περιβάλλον και την δημόσια υγεία, γι' αυτό και είναι κρίσιμο να είναι γνωστά όλα τα χαρακτηριστικά προκειμένου να επιλέγεται ο κατάλληλος τρόπος επεξεργασίας και διαχείρισης της (Fytli and Zabaniotou, 2008; Oladejo et al., 2019).

Εκτός των συστατικών, ενδιαφέρον παρουσιάζουν και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της ιλύος, εκ των οποίων τα βασικότερα είναι το pH, το υπόλειμμα καύσης, ο οργανικός άνθρακας, η ικανότητα αφυδάτωσης και η θερμική ικανότητα. Σχετικά με την θερμική ικανότητα, αυτή σχετίζεται με την θερμική ενέργεια που παράγεται κατά την καύση της ιλύος, δηλαδή τη θερμογόνο δύναμη. Η θερμογόνο δύναμη της ιλύος αποτελεί βασική ιδιότητα για την ενεργειακή της αξιολόγηση, καθώς αποτελεί μέτρο του θερμικού της περιεχομένου / δυναμικού, ενώ υπολογίζεται με βάση την εκλυόμενη ενέργεια από την πλήρη και τέλεια καύση της ιλύος με οξυγόνο, με τα προϊόντα και τα αντιδρώντα να βρίσκονται στους 25°C (Kim et al., 2005). Η θερμογόνο δύναμη εκφράζεται σε μονάδες ενέργειας ανά μονάδα μάζας (kJ/kg, kcal/kg, BTU/lb) καυσίμου και διακρίνεται σε Ανώτερη Θερμογόνο Δύναμη (Higher Heating Value, HHV) όταν στα προϊόντα καύσης το νερό βρίσκεται σε υγρή κατάσταση και σε Κατώτερη Θερμογόνο Δύναμη (Lower Heating Value, LHV) όταν στα προϊόντα καύσης το νερό βρίσκεται σε αέρια κατάσταση. Ο υπολογισμός της γίνεται με την χρήση ειδικού επιστημονικού οργάνου που ονομάζεται θερμιδόμετρο (για περισσότερες πληροφορίες βλέπε Κεφάλαιο 6.2.7).

Η ιλύς κατηγοριοποιείται σε πρωτοβάθμια, δευτεροβάθμια και τριτοβάθμια ανάλογα με το στάδιο της επεξεργασίας λυμάτων από το οποίο προέρχεται (βλέπε Κεφάλαιο 1.2). Τα κύρια χαρακτηριστικά κάθε τύπου ιλύος είναι τα εξής:

- **Πρωτοβάθμια ιλύς:** Η συγκέντρωση των ολικών στερεών (καθιζάνοντα και αιωρούμενα) της κυμαίνεται μεταξύ 2 - 7 %, από τα οποία περίπου το 70 % είναι οργανικά και το 30 % ανόργανα. Μπορεί να αφυδατωθεί ευκολότερα από τους άλλους τύπους ιλύος επειδή αποτελείται από σωματίδια μεγαλύτερου και πιο διακριτού μεγέθους. Αποσυντίθεται εύκολα, έχει δυσάρεστη οσμή και το χρώμα της είναι φαιόχρωμο (φρέσκια) έως μαύρο (αποσυντιθέμενη) (Turovskiy and Mathai, 2006).
- **Δευτεροβάθμια (βιολογική) ιλύς:** Αποτελείται κυρίως από βιολογικά στερεά, κυρίως βακτηριακά κύτταρα και περιέχει ελάχιστα οργανικά στερεά (0,5 - 1,5 %). Ορισμένες φορές περιέχει και στερεά που δεν απομακρύνθηκαν κατά την πρωτοβάθμια επεξεργασία καθώς και υπολείμματα μικροοργανισμών. Είναι ογκώδης και

αφυδατώνεται δυσκολότερα από την πρωτοβάθμια ιλύ, εξαιτίας των βιολογικών κροκίδων που περιέχει (Turovskiy and Mathai, 2006).

- **Τριτοβάθμια ιλύς:** Τα χαρακτηριστικά της εξαρτώνται από τις διεργασίες που εφαρμόστηκαν κατά την τριτοβάθμια επεξεργασία των λυμάτων. Συνήθως, επιλέγονται χημικές διαδικασίες, καθώς με την προσθήκη διάφορων χημικών ουσιών βελτιώνεται η ικανότητα καθίζησης των αιωρούμενων στερεών, όπως περιεγράφηκε στο Κεφάλαιο 1.2.3. Η ιλύς που προκύπτει ονομάζεται χημική, περιέχει κυρίως ανόργανα συστατικά και η ικανότητα αφυδάτωσής της εξαρτάται από το είδος των χημικών που χρησιμοποιήθηκαν. Βέβαια, ανάλογα την επιλεγόμενη μέθοδο τριτοβάθμιας επεξεργασίας η ιλύς μπορεί να χαρακτηριστεί ως χωνεμένη, κομποστοποιημένη, προετοιμασμένη (conditioned), ξηραμένη, πυκνωμένη και αφυδατωμένη κ.λπ. (Cantinho et al., 2016; Pathak et al., 2009; Verlicchi and Zambello, 2015).

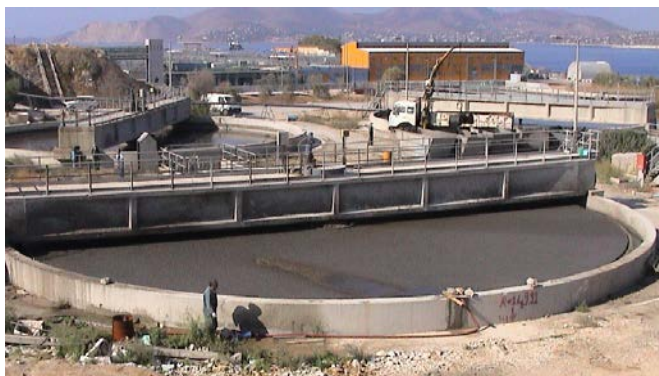
## 2.2 Συμβατικές μέθοδοι επεξεργασίας και διαχείρισης ιλύος

Η διαχείριση της ιλύος καθορίζεται από ευρύ νομικό πλαίσιο παγκοσμίως (βλέπε Κεφάλαιο 7.11) και αποσκοπεί στην μείωση της υγρασίας, στην μείωση του οργανικού φορτίου καθώς και στην σταθεροποίηση της σύστασης της (Christodoulou and Stamatelou, 2016; Kacprazk et al., 2017; Wisniowska et al., 2019). Συνήθως, μια συμβατική διαχείριση της ιλύος αποτελείται κυρίως από διάφορες φυσικές, χημικές και βιολογικές διαδικασίες, όπως η ομογενοποίηση, η πάχυνση (βαρύτητα, επίπλευση κ.λπ.), η σταθεροποίηση (αναερόβια/αερόβια χώνευση, προσθήκη ασβέστη κ.λπ.) και η αφυδάτωση (Kelessidis and Stasinakis, 2012; Sansaniwal et al., 2017a).

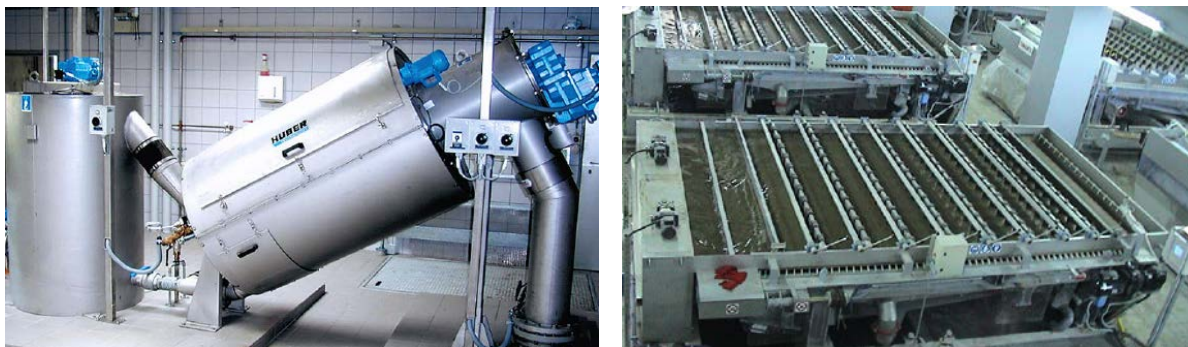
### 2.2.1 Ομογενοποίηση - Πάχυνση

Αρχικά, τα βιοστερεά που προκύπτουν από την πρωτοβάθμια, την δευτεροβάθμια και την χημική επεξεργασία των αποβλήτων, τα οποία διαφέρουν ως προς την σύσταση και την ρευστότητά τους, εισάγονται στην δεξαμενή ομογενοποίησης, στην οποία αναμειγνύονται με χρήση αερισμού δίνοντας μια ομοιόμορφη και καλά αναμειγνύμενη ιλύ. Σε αυτή την δεξαμενή γίνεται και η προσωρινή αποθήκευση της ιλύος που αποσκοπεί στη μείωση της διαφοράς φάσης της επεξεργασίας της ιλύος με αυτή των αποβλήτων, καθώς ενώ η παραγωγή της είναι συνεχής, η επεξεργασία και διάθεση της γίνεται ορισμένες ώρες της ημέρας, είτε λόγω ωραρίου του προσωπικού, είτε λόγω μη δυνατότητας λειτουργίας ταυτόχρονα όλων των μονάδων επεξεργασίας της (Στάμου και Βογιατζής, 1994).

Μετά ακολουθεί η διαδικασία της πάχυνσης, με την οποία μειώνεται η περιεχόμενη υγρασία και συνεπώς ο όγκος των βιοστερεών. Η πάχυνση πραγματοποιείται σε ειδικές δεξαμενές, που ονομάζονται παχυντές και μπορεί να επιτευχθεί με βαρύτητα (ο πιο διαδεδομένος τρόπος), με επίπλευση (με αέρα υπό υψηλή πίεση) ή με μηχανικά μέσα (φυγόκεντρος, κοχλίας συμπίεσης, τράπεζες πάχυνσης, περιστρεφόμενα τύμπανα, δίσκοι, σάκοι, κ.λπ.) (Εικόνα 2.1). Η περιεκτικότητα της παχυμένης ιλύος σε στερεά κυμαίνεται από 3 - 10 %, ώστε η άντληση της να είναι εφικτή (Brandt et al., 2017; Metcalf and Eddy, 2003).







Εικόνα 2.1 Δεξαμενή πάχυνσης πρωτοβάθμιας ιλύος (πάνω αριστερά), φυγοκεντρικοί παχυντές (πάνω δεξιά), κεκλιμένος παχυντής κοχλία συμπίεσης (κάτω αριστερά), τράπεζες πάχυνσης (κάτω δεξιά) (Γκίκας, 2020).

## 2.2.2 Σταθεροποίηση

Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία της πάχυνσης, ακολουθεί συνήθως η σταθεροποίηση της ιλύος (ειδικά όταν πρόκειται για πρωτοβάθμια ιλύ), με την οποία επιτυγχάνεται εξάλειψη του δυναμικού σήψης, μείωση των δυσάρεστων οσμών, απομάκρυνση των παθογόνων μικροοργανισμών, και μετατροπή της σε ένα σταθερό προϊόν κατάλληλο προς τελική διάθεση (Metcalf and Eddy, 2003). Οι κύριες μέθοδοι σταθεροποίησης της ιλύος περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω:

- **Αλκαλική σταθεροποίηση:** Αυξάνεται το pH (τουλάχιστον στο 12) της ιλύος με την προσθήκη αλκαλικών ουσιών (όπως είναι το  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), με σκοπό τη δημιουργία ακατάλληλου περιβάλλοντος για την επιβίωση και αναπαραγωγή των μικροοργανισμών, καθώς και την καθυστέρηση των μικροβιακών αντιδράσεων (Metcalf and Eddy, 2003; Στάμου και Βογιατζής, 1994). Βέβαια, μετά ακολουθεί μείωση του pH λόγω της επαφής της ιλύος με το ατμοσφαιρικό  $\text{CO}_2$ . Το αλκαλικά σταθεροποιημένο προϊόν είναι κατάλληλο για πολλές εφαρμογές (αποκατάσταση των ορυχείων, υποκατάστατο ασβέστη, πηγή οργανικής ύλης, λίπασμα, υλικό επίστρωσης σε ΧΥΤΑ, κ.λπ.) (Spellman, 2013).
- **Αερόβια χώνευση:** Η βιολογική μετατροπή της οργανικής ύλης της ιλύος επιτυγχάνεται με τη διοχέτευση αέρα σε ανοιχτές συνήθως δεξαμενές. Κατά την αερόβια χώνευση πραγματοποιείται αερισμός και ανάδευση της ιλύος για 15 - 20 μέρες, ενώ αποδομείται το 40-60% των πτητικών στερεών (Νταρακάς, 2010). Καθώς αποσυντίθεται η οργανική ύλη από τους αερόβιους μικροοργανισμούς εκλύεται θερμότητα, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της θερμοκρασίας πάνω από τους  $50^\circ\text{C}$ , γεγονός που μειώνει τους απαιτούμενους χρόνους αερισμού σε 5 - 6 μέρες. Τα κύρια τελικά προϊόντα της είναι  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_3^-$  και υπολειμματικό κυτταρικό υλικό, ενώ συγκριτικά με την αναερόβια χώνευση, η αερόβια χώνευση είναι ταχύτερη, έχει μικρότερο κόστος επένδυσης, αποτελεί μια πιο ελαστική διαδικασία με μεγαλύτερη ευελιξία στις μεταβολές του pH, όμως απαιτεί πολύ μεγαλύτερες ποσότητες ενέργειας (λόγω ανάγκης συνεχούς τροφοδότησης με οξυγόνο), γι' αυτό συνήθως εφαρμόζεται σε μικρές ΕΕΛ (Mason et al., 1992; Νταρακάς, 2010).
- **Αναερόβια χώνευση:** Πρόκειται για μια διαδικασία που λαμβάνει χώρα χωρίς μοριακό οξυγόνο, υπό μεσόφιλες ( $37^\circ\text{C}$ ) ή θερμόφιλες ( $55^\circ\text{C}$ ) συνθήκες (Cao and Pawłowski, 2012; Song et al., 2004). Η σύνθετη βιοχημική μέθοδος μετατροπής της αναερόβιας χώνευσης αποτελείται από τέσσερις μεταβολικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα με τη βοήθεια συγκεκριμένων βακτηρίων: υδρόλυση, οξεογένεση, ακετογένεση και μεθανογένεση (Oladejo et al., 2019; Tyagi and Lo, 2013). Κατά τη διάρκεια αυτών των σταδίων, η οργανική ύλη μετατρέπεται σε βιοαέριο, ενώ παράγεται μια σταθεροποιημένη ιλύς με μειωμένη μάζα και όγκο και με τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί ως λίπασμα (Martins das Neves et al., 2009; Oladejo et al., 2019;

Zhang et al., 2014). Το παραγόμενο βιοαέριο αποτελείται συνήθως από 60% CH<sub>4</sub>, 38% CO<sub>2</sub> και 2% άλλα αέρια, ενώ η θερμογόνο δύναμή του είναι περίπου 21,5 MJ/m<sup>3</sup>, οπότε είναι μια πλούσια πηγή ενέργειας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή βιομεθανίου, την παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας, τη μερική κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της ΕΕΛ (25-50% μιας συμβατικής μονάδας) και τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (McCarty et al., 2011; Zhang et al., 2014). Η αναερόβια χώνευση είναι μια καθιερωμένη μέθοδος με χαμηλό κόστος και ικανότητα επεξεργασίας ιλύος με υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία, ενώ παράγει πράσινη ενέργεια, ανακτά θρεπτικά συστατικά και εξαλείφει το κόστος μεταφοράς και διάθεσης. Ωστόσο, υπάρχουν σημαντικοί περιορισμοί, όπως ο μεγάλος χρόνος παραμονής (10 - 30 ημέρες για τη μετατροπή του 30 - 60 % της οργανικής ύλης), η χαμηλή απόδοση μετατροπής, η χαμηλή βιοαποδομησιμότητα της χωνεμένης ιλύος, οι εκπομπές οσμών, η απαίτηση κατάλληλης επεξεργασίας για την αποφυγή κινδύνων για την υγεία, η απαίτηση περαιτέρω κομποστοποίησης της χωνεμένης ιλύος πριν από την εφαρμογή στο έδαφος, το υψηλό κόστος εγκατάστασης κ.λπ. (Adar et al., 2016; Appels et al., 2008; Oladejo et al., 2019; Ponsa et al., 2017; Wang et al., 2013). Διάφορες τεχνικές έχουν διερευνηθεί εκτενώς, με στόχο να ξεπεραστούν τα κύρια εμπόδια της αναερόβιας χώνευσης. Οι τεχνολογίες προ-επεξεργασίας και η συγχώνευση της ιλύος με άλλα υποστρώματα είναι οι δύο πιο μελετημένες και εφαρμοσμένες μέθοδοι για την αύξηση της απόδοσης βιοαερίου και τη βελτίωση των χαρακτηριστικών της τελικής ιλύος (Tandukar and Pavlostathis, 2015; Wang et al., 2017; Zhang et al., 2014).

### 2.2.3 Αφυδάτωση

Η ιλύς που προκύπτει από την διαδικασία της σταθεροποίησης βρίσκεται ακόμη σε υδαρή κατάσταση, γι' αυτό και κρίνεται απαραίτητο να αφυδατωθεί, ώστε να μειωθεί περαιτέρω το ποσοστό υγρασίας της (55 - 80 %), σε σημείο που να είναι δυνατό να διαχειριστεί ως στερεό (Turovskiy and Mathai, 2006; Γκίκας, 2020). Η αφυδάτωση μπορεί να πραγματοποιηθεί με χρήση φυγόκεντρου, ταινιοφιλτρόπρεσσας, θαλαμοφιλτρόπρεσσας, ηθμών κενού, κλινών ξήρανσης, κ.α. (Εικόνα 2.2).







Εικόνα 2.2 Αφυδάτωση ιλύος με φυγοκέντριση (πάνω αριστερά), με κλίνες ξήρανσης (πάνω δεξιά), με ταινιοφιλτρόπρεσσα (κάτω αριστερά), με ηθμό κενού (κάτω δεξιά) (Γκίκας, 2020).

## 2.3 Ενεργειακές απαιτήσεις για την συμβατική επεξεργασία ιλύος

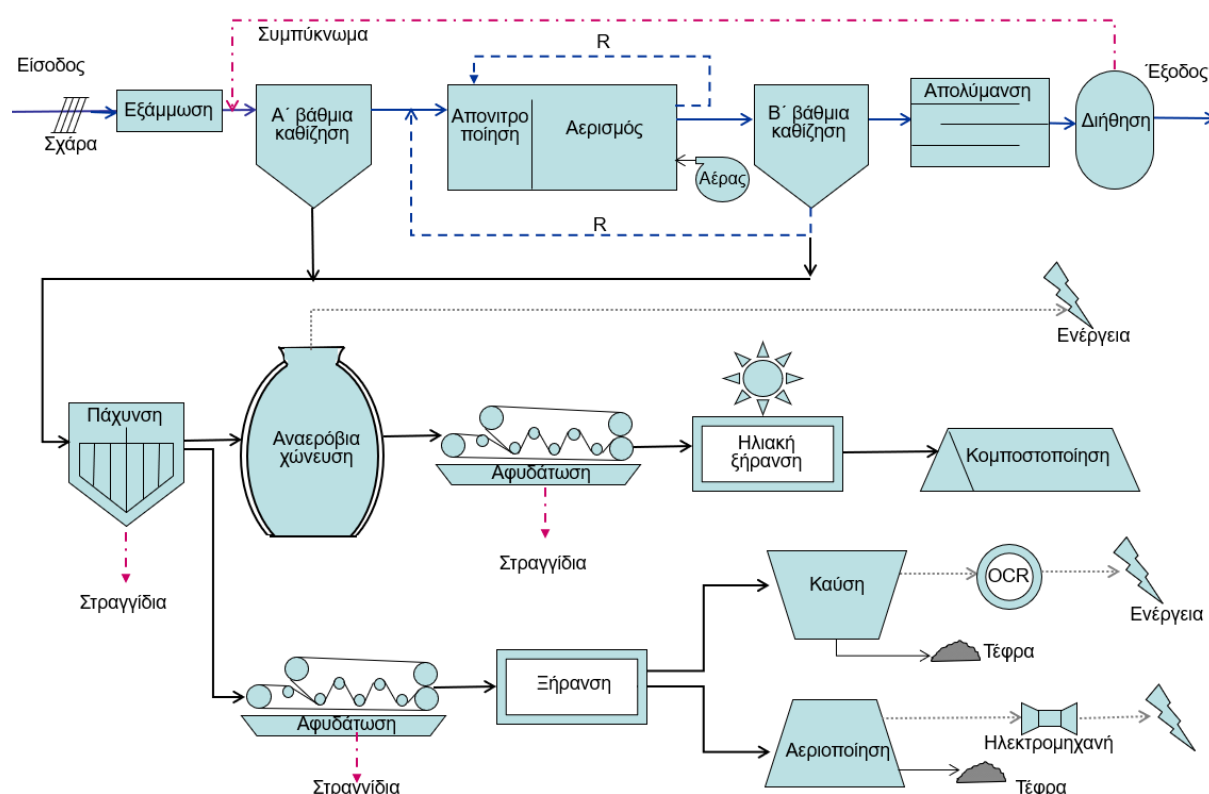
Το ποσοστό ενέργειας που καταναλώνεται στα διάφορα στάδια συμβατικής επεξεργασίας της ιλύος μπορεί να φτάσει έως και το 20 % επί του συνόλου της καταναλισκόμενης ενέργειας της ΕΕΛ. Για την Ελλάδα, έχει υπολογιστεί ότι το ποσοστό αυτό ανέρχεται περίπου στο 8%, με βάση μία έρευνα που επικεντρώθηκε σε 10 ΕΕΛ της Ελλάδας με δυναμικότητα από 15.000 έως 4.000.000 ισοδύναμους κατοίκους (Mamais et al., 2015).

Συνήθως, η σταθεροποίηση με τη μέθοδο της αερόβιας χώνευσης είναι η πιο ενεργοβόρα μέθοδος επεξεργασίας της ιλύος, λόγω της συνεχούς απαίτησης τροφοδοσίας με οξυγόνο, όπως συμβαίνει και στην διεργασία του αερισμού των λυμάτων. Αντιθέτως, η αναερόβια χώνευση είναι ενεργειακά αποδοτικότερη επιλογή (0,26 kWh/kg ξηρής λάσπης), καθώς παράγει ενέργεια μέσω του παραγόμενου βιοαερίου, που μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την απόδοση της ΕΕΛ σε σχέση με το ενεργειακό κόστος και την αυτάρκεια της εγκατάστασης (Gu et al., 2017a; Awe et al., 2016). Σημαντικό ποσοστό της ενεργειακής κατανάλωσης αντιπροσωπεύει και η αφυδάτωση της ιλύος, με τη μηχανική φυγοκέντριση να είναι η πιο ενεργειακά απαιτητική διεργασία (Longo et al., 2016). Για την αφυδάτωση της ιλύος απαιτούνται 0,82 - 1,53 kWh/kg ξηρής λάσπης, διακύμανση που οφείλεται στον τύπο της τεχνολογίας που χρησιμοποιείται (Soares et al., 2017).

Τέλος, σε πολλές χώρες (Βέλγιο, Γαλλία, Γερμανία, Δανία, ΗΠΑ, Ιαπωνία), το 15 - 50 % της επεξεργασμένης ιλύος υφίσταται αποτέφρωση (Arnold and Merta, 2011). Η κατανάλωση ενέργειας για την επεξεργασία ιλύος με την συμβατική μέθοδο ενεργού ιλύος συμπεριλαμβανομένης της αποτέφρωσης είναι βέβαια πολύ υψηλότερη (0,38 - 1,49 kWh/m<sup>3</sup>) σε σύγκριση με την ίδιας δυναμικότητας μέθοδο χωρίς αποτέφρωση (Mizuta and Shimada, 2010).

## 2.4 Προηγμένες μέθοδοι επεξεργασίας βιοστερεών

Εκτός από τις συμβατικές μεθόδους επεξεργασίας βιοστερεών, έχουν αναπτυχθεί πολλές εναλλακτικές διεργασίες που εφαρμόζονται ολοένα και περισσότερο με σκοπό την αξιοποίηση των βιοστερεών (και κυρίως του ενεργειακού τους περιεχομένου) και την περιβαλλοντικά φιλικότερη διάθεσή τους. Στο Διάγραμμα 2.1 απεικονίζονται οι διάφορες δυνατότητες διαχείρισης των βιοστερεών που προκύπτουν από την επεξεργασία λυμάτων, συμβατικές ή μη, οι περισσότερες από τις οποίες έχουν ήδη αναφερθεί (βλέπε Κεφάλαιο 2.2) ή αναφέρονται ακολούθως.

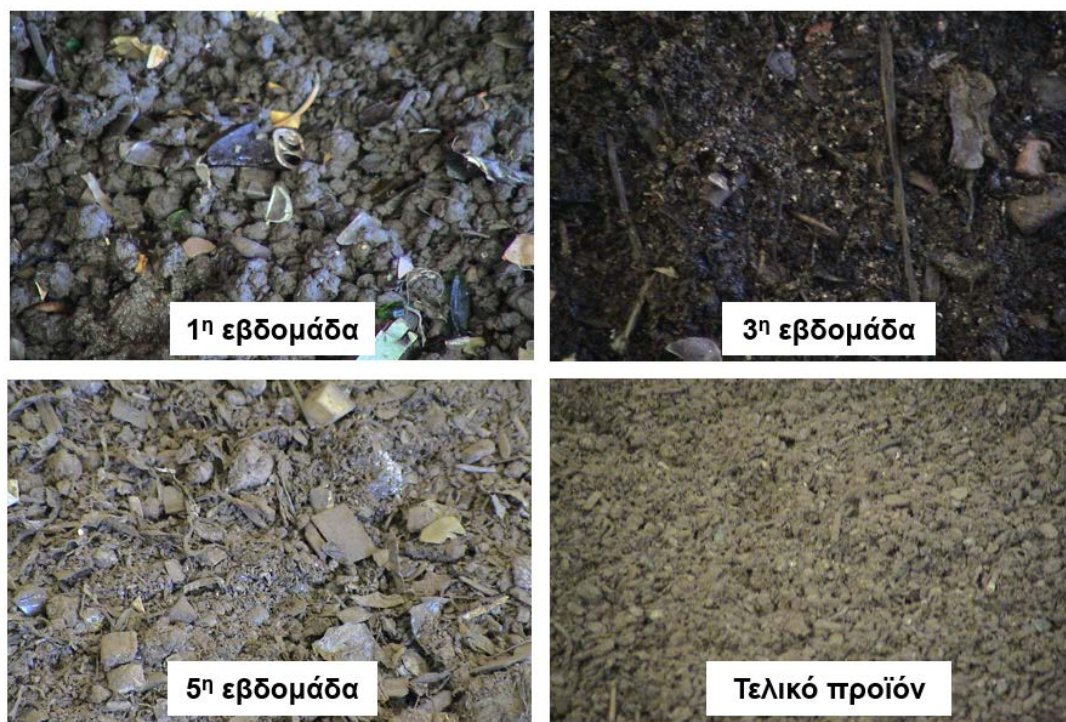


Διάγραμμα 2.1 Διάγραμμα ροής επεξεργασίας λυμάτων και δυνατοτήτων διαχείρισης των παραγόμενων βιοστερεών (Γκίκας, 2018).

## 2.4.1 Κομποστοποίηση

Η κομποστοποίηση (ή λιπασματοποίηση) είναι μια αποδοτική και περιβαλλοντικά αποδεκτή μέθοδος σταθεροποίησης της ιλύος που εφαρμόζεται εδώ και χρόνια σε ορισμένες ΕΕΛ, όμως δεν συγκαταλέγεται στις συμβατικές μεθόδους καθώς δεν έχει εδραιωθεί ακόμα καθολικά.

Πρόκειται για μια σχετικά πολύπλοκη διεργασία βιολογικής αποικοδόμησης της οργανικής ύλης της ιλύος που οδηγεί στον σχηματικό χουμικών οξέων και στην παραγωγή θερμότητας, δημιουργώντας τελικά ένα σταθεροποιημένο προϊόν (κομπόστ). Κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης, ένα σημαντικό μέρος του οργανικού φορτίου της ιλύος (περίπου 20 - 30 %) μετατρέπεται σε  $\text{CO}_2$  και  $\text{H}_2\text{O}$ , ενώ παράλληλα καταστρέφονται οι παθογόνοι μικροοργανισμοί (Γκίκας, 2018). Επίσης, οι αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στην κομποστοποίηση είναι εξώθερμες, με αποτέλεσμα να παράγεται θερμότητα και να ανεβαίνει η θερμοκρασία έως και τους  $70^\circ\text{C}$ . Για να λάβει χώρα η κομποστοποίηση, πρέπει η υγρασία της πρώτης ύλης να κυμαίνεται γύρω στο 60 %, γι' αυτό και η ιλύς (που συνήθως έχει περισσότερη υγρασία) αναμειγνύεται με σχετικά ξηρά αδρανή υλικά (π.χ. πριονίδι ή άχυρα). Επίσης, είναι απαραίτητο το οργανικό κλάσμα να υπερβαίνει το 50 % του στερεού μέρους και ο λόγος C/N να μην υπερβαίνει το 50/1. Το παραγόμενο κομπόστ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό, αφού πρόκειται για ένα υλικό απαλλαγμένο από παθογόνους μικροοργανισμούς και δυσάρεστες οσμές. Στην Εικόνα 2.3 φαίνεται το υλικό στις διάφορες φάσεις της κομποστοποίησης.



Εικόνα 2.3 Βιοστερεά που υπόκεινται σε κομποστοποίηση σε διάφορες φάσεις (Γκίκας, 2018).

Η κομποστοποίηση λαμβάνει χώρα σε ανοιχτά (σωροί) ή σε κλειστά (βιοαντιδραστήρες) συστήματα και μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε τρεις βασικές μεθόδους (Γκίκας, 2018; Νταρακάς, 2010):

- **Φυσικά αεριζόμενοι σωροί:** Το μείγμα αφυδατωμένης ιλύος και αδρανούς υλικού στρώνεται σε σωρούς ύψους 1 - 2 m και πλάτους βάσης 2 - 5 m. Κατά την διάρκεια των 3 - 4 εβδομάδων που διαρκεί η διεργασία οι σωροί αναμοχλεύονται ισχυρά τουλάχιστον 5 φορές.
- **Τεχνητά αεριζόμενοι σωροί:** Το μείγμα αφυδατωμένης ιλύος και αδρανούς υλικού απλώνεται πάνω από σύστημα σωληνώσεων στους οποίους παροχετεύεται αέρας. Η διεργασία διαρκεί 3 - 4 εβδομάδες και απαιτείται ένας επιπλέον μήνας για σταθεροποίηση. Ακολούθως, πραγματοποιείται εσχάρωση και ανάκτηση του αδρανούς υλικού. Το τυπικό ύψος σωρών είναι συνήθως 2,0 - 2,5 m.
- **Μηχανικά συστήματα κομποστοποίησης:** Η διεργασία λαμβάνει χώρα σε αντιδραστήρα (είτε εμβολικής ροής είτε πλήρους ανάμειξης), διαρκεί περίπου 2 εβδομάδες και απαιτούνται 3 επιπλέον εβδομάδες για ωρίμανση.

## 2.4.2 Μικροκοσκίνιση

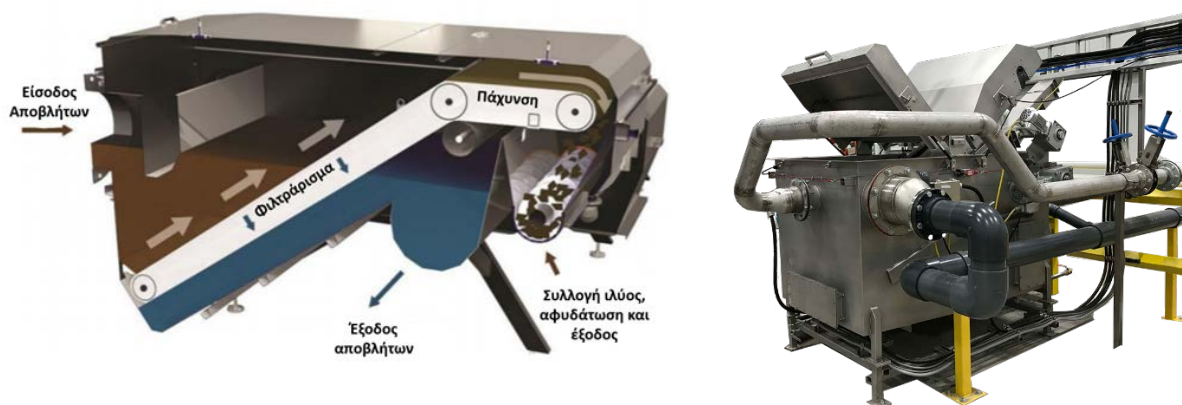
Η μικροκοσκίνιση είναι μια αποδοτική καινοτόμα μέθοδος απομάκρυνσης στερεών από τα λύματα (Gupta, 2018; Koliopoulos and Gikas, 2013). Πρόκειται για μια τεχνολογία φυσικού διαχωρισμού, η οποία εφαρμόζεται εδώ και χρόνια σε Καναδά και ΗΠΑ, με πάνω από 300 εγκατεστημένα συστήματα (Grabbe et al., 1998; Bourgeous et al., 2003). Μερικά από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα συστήματα μικροκοσκίνισης είναι τα ακόλουθα (Lema and Martinez, 2017):

- Φίλτρο Περιστρεφόμενου Ιμάντα (Rotating Belt Filter, RBF)
- Φίλτρο Περιστρεφόμενου Τυμπάνου (Rotating Drum Filter, RDF)
- Φίλτρο Δίσκου (Disc Filter, DF)



### **Φίλτρο Περιστρεφόμενου Ιμάντα (Rotating Belt Filter, RBF)**

Ένα RBF αποτελείται από κεκλιμένο περιστρεφόμενο ιμάντα με λεπτό πλέγμα, που στοχεύει στην απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών από τα λύματα (Εικόνα 2.4). Καθώς τα λύματα διαπερνούν τον περιστρεφόμενο ιμάντα, τα αιωρούμενα στερεά προσκολλώνται πάνω στο πλέγμα, ενώ παράλληλα ένα αυτόματο σύστημα καθαρισμού είναι εγκατεστημένο στο άνω άκρο του φίλτρου για να καθαρίζει συνεχώς το πλέγμα και να αφαιρεί τυχόν συσσωρευμένα βιοστερεά, έτσι ώστε με την πλήρη περιστροφή του κόσκινου να επιτυγχάνεται παράλληλα ο καθαρισμός και το φιλτράρισμα των αποβλήτων. Το φιλτραρισμένο απόβλητο εκρέει μέσω βαρύτητας στο σημείο εξόδου προς περαιτέρω επεξεργασία, ενώ τα διαχωρισμένα βιοστερεά συμπιέζονται για περαιτέρω αφυδάτωση και συλλέγονται. Η ταχύτητα και το ύψος της ροής των αποβλήτων στο εσωτερικό του φίλτρου εξαρτώνται από την παροχή εισόδου και προσφέρεται δυνατότητα ρύθμισής τους. Η απόδοση των συστημάτων μικροκοσκίνησης με RBFs εξαρτάται από την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων του εισερχόμενου αποβλήτου, το μέγεθος ανοίγματος πόρων του φίλτρου (50 - 500  $\mu\text{m}$ , με συνηθέστερο το 350  $\mu\text{m}$  για εφαρμογές αστικών υγρών αποβλήτων πλήρους κλίμακας) και την εισερχόμενη παροχή (Lema and Martinez, 2017; Paulsrud et al., 2014).



Εικόνα 2.4 Σχηματική απεικόνιση (αριστερά) και φωτογραφία (δεξιά) συστήματος μικροκοσκίνησης με φίλτρο περιστρεφόμενου ιμάντα (RBF) (Gupta, 2018).

Η πλειοψηφία των εφαρμογών της μικροκοσκίνησης με χρήση RBFs αφορά στην αφαίρεση των πρωτοβάθμιων στερεών που περιέχονται στα υγρά απόβλητα. Οι εφαρμογές αυτές περιλαμβάνουν κυρίως (Franchi and Santoro, 2015):

- Αφαίρεση πρωτοβάθμιων στερεών σε ΕΕΛ που δεν διαθέτουν πρωτοβάθμια καθίζηση.
- Αντικατάσταση μη αποδοτικών ΔΠΚ.
- Προ-επεξεργασία για να ακολουθήσουν βιολογικές διεργασίες (π.χ. μεμβράνες).
- Αποκεντρωμένες μονάδες επαναχρησιμοποίησης νερού.

Ωστόσο, τα RBFs μπορούν να λειτουργήσουν αποτελεσματικά και σε άλλα στάδια επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, αρκεί να γίνει η κατάλληλη επιλογή μεγέθους ανοίγματος πόρων, τρόπου λειτουργίας και/ή χημικής προετοιμασίας (εάν απαιτείται). Πιο συγκεκριμένα (Franchi and Santoro, 2015):

- Διήθηση σε παντοροϊκά συστήματα αποχέτευσης.
- Προ-επεξεργασία για να ακολουθήσει χημικά ενισχυμένη πρωτοβάθμια επεξεργασία, ενισχύοντας την αφαίρεση TSS και BOD.
- Προστασία για βιολογικές διεργασίες ευαίσθητες στα σωματίδια (π.χ. ANAMMOX).
- Ανάκτηση/συγκομιδή φυκών.
- Εμπλουτισμός με VS για βελτιωμένη παραγωγή βιοαερίου.
- Πάχυνση ενεργού ιλύος.

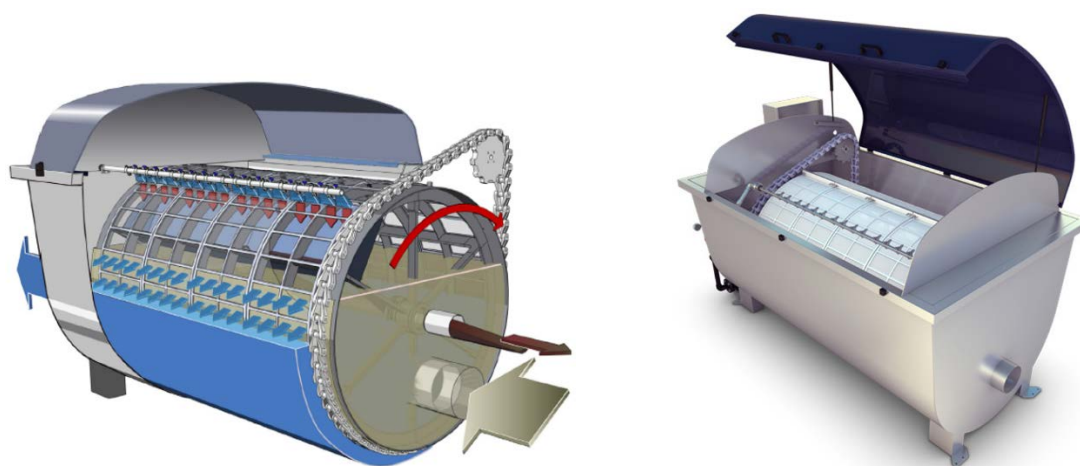
Λόγω της απομάκρυνσης των αιωρούμενων στερεών από τα λύματα, τα RBFs συμβάλλουν σημαντικά στην εξοικονόμηση ενέργειας των ΕΕΛ όπου εγκαθίστανται. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.1, η προσθήκη RBF σε μία ΕΕΛ ενεργού ιλύος η οποία δεν διαθέτει πρωτοβάθμια καθίζηση έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας κατά 22 % (στην περίπτωση που έπεται αερόβια χώνευση) και 28 % (στην περίπτωση που έπεται αναερόβια χώνευση). Μάλιστα, το μεγαλύτερο ποσοστό εξοικονόμησης οφείλεται στις μειωμένες ενεργειακές απαιτήσεις της δευτεροβάθμιας επεξεργασίας (19 και 24 % για αερόβια και αναερόβια χώνευση, αντίστοιχα), ενώ μικρότερο ποσοστό εξοικονόμησης επιτυγχάνεται στην επεξεργασία ιλύος (Franchi and Santoro, 2015).

Πίνακας 2.1 Εξοικονόμηση ενέργειας με την ενσωμάτωση RBF σε ΕΕΛ ενεργού ιλύος (Franchi and Santoro, 2015).

| Χαρακτηριστικά ΕΕΛ                         |         |       |           |       |
|--|---------|-------|-----------|-------|
| Εισερχόμενο BOD (mg/L)                     | 250     |       |           |       |
| Εκτιμώμενη % απομάκρυνση BOD μέσω RBF      | 30      |       |           |       |
| Εισερχόμενα TSS (mg/L)                     | 250     |       |           |       |
| Εκτιμώμενη % απομάκρυνση TSS μέσω RBF      | 50      |       |           |       |
| Δυναμικότητα ΕΕΛ (m <sup>3</sup> /d)       | 36.000  |       |           |       |
| Τύπος Χώνευσης                             | Αερόβια |       | Αναερόβια |       |
| Απομάκρυνση πρωτοβάθμιων βιοστερεών        | Καμία   | RBF   | Καμία     | RBF   |
| Καταναλισκόμενη ισχύς (kWh/d)              |         |       |           |       |
| RBF  | -       | 64    | -         | 64    |
| Βιολογική επεξεργασία (αερισμός)           | 15675   | 10973 | 15675     | 10973 |
| Ανακυκλοφορία ιλύος                        | 423     | 423   | 423       | 423   |
| Πάχυνση με επίπλευση                       | 1805    | 1264  | 1805      | 1264  |
| Χώνευση                                    | 6850    | 6850  | 1400      | 1400  |
| Αφυδάτωση με φιλτρόπρεσσα                  | 384     | -     | 384       | -     |
| Απολύμανση (χλωρίωση/UV)                   | 27      | 27    | 27        | 27    |
| Συνολική καταναλισκόμενη ισχύς (kWh/d)     |         |       |           |       |
| Σύνολο πρωτοβάθμιας επεξεργασίας           | 0       | 64    | 0         | 64    |
| Σύνολο δευτεροβάθμιας επεξεργασίας         | 16098   | 11396 | 16098     | 11396 |
| Σύνολο επεξεργασίας ιλύος                  | 9039    | 8114  | 3589      | 2664  |
| Συνολικά                                   | 25164   | 19600 | 19714     | 14150 |
| Εξοικονόμηση ενέργειας (%)                 |         |       |           |       |
| Εξοικονόμηση από δευτεροβάθμια επεξεργασία | 19      |       | 24        |       |
| Εξοικονόμηση από επεξεργασία ιλύος         | 4       |       | 5         |       |
| Συνολική εξοικονόμηση                      | 22      |       | 28        |       |

### **Φίλτρο Περιστρεφόμενου Τυμπάνου (Rotating Drum Filter, RDF)**

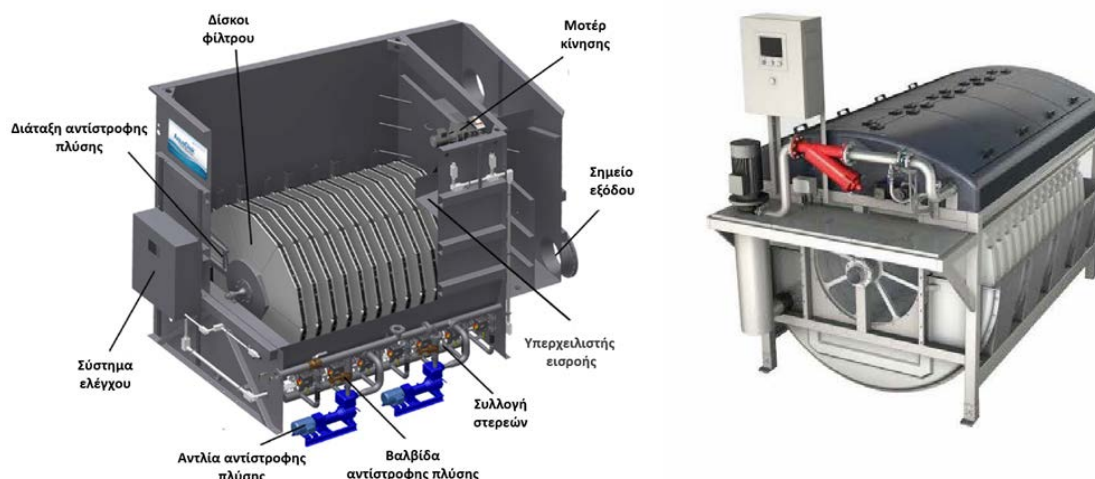
Σε αυτό το σύστημα μικροκοσκίνισης, το απόβλητο διέρχεται μέσω βαρύτητας στο εσωτερικό ενός τυμπάνου, στοχεύοντας και πάλι στην απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών από τα λύματα (Εικόνα 2.5). Το μέγεθος ανοίγματος των πόρων του RDF κυμαίνεται μεταξύ 10 - 500  $\mu\text{m}$ , η επιφάνεια που καταλαμβάνει κυμαίνεται από 0,35 έως 22,5  $\text{m}^2$  (ανάλογα με τις ανάγκες που εξυπηρετεί) και είναι κατάλληλο για παροχές λυμάτων που κυμαίνονται μεταξύ 2 και 1.000 L/s (Lema and Martinez, 2017). Κατά την διαδικασία της μικροκοσκίνισης, τα μεγαλύτερα στερεά κατακρατούνται στους πόρους του φίλτρου, προκαλώντας αύξηση της αντίστασης διήθησης και τελικά αύξηση της στάθμης ύδατος στο εσωτερικού του. Όταν η στάθμη του νερού φτάσει στο ανώτατο επιτρεπτό σημείο, το RDF αρχίζει να περιστρέφεται, ενώ παράλληλα ξεκινάει και πλύση υψηλής πίεσης. Το νερό πλύσης που διαπερνά τους πόρους φίλτρων απελευθερώνει τα στερεά που διατηρούνται στην εσωτερική πλευρά του φίλτρου και συλλέγονται σε ένα δίσκο που τοποθετείται στο εσωτερικό του. Η διήθηση δεν σταματά κατά τη διάρκεια της πλύσης, ενώ το ίδιο το διήθημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέσο έκπλυσης (Carles et al., 2015).



Εικόνα 2.5 Σχηματική απεικόνιση (αριστερά) και φωτογραφία (δεξιά) συστήματος μικροκοσκίνισης με φίλτρο περιστρεφόμενου τυμπάνου (RDF).

### **Φίλτρο Δίσκου (Disc Filter, DF)**

Στην συγκεκριμένη τεχνολογία μικροκοσκίνισης η απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών πραγματοποιείται με την βοήθεια φίλτρου δίσκου (Εικόνα 2.6). Συγκεκριμένα, το απόβλητο εισέρχεται διαμέσου σωλήνων τροφοδοσίας ή καναλιού στο εσωτερικό του φίλτρου, μέσω βαρύτητας. Το εσωτερικό του φίλτρου διαθέτει ξεχωριστούς διαδοχικούς περιστρεφόμενους κυκλικούς δίσκους, οι οποίοι αποτελούνται από μικρά κόσκινα με ανοίγματα πόρων 20 - 35  $\mu\text{m}$  (Metcalf and Eddy, 2003). Καθώς το απόβλητο ρέει εντός του φίλτρου, τα σωματίδια μεγάλου μεγέθους το φράζουν, με αποτέλεσμα να αυξάνεται σταδιακά η στάθμη του αποβλήτου. Η στάθμη του αποβλήτου ελέγχεται συνεχώς και όταν χρειαστεί, δίνεται το σήμα για την έναρξη της περιστροφής των κυκλικών δίσκων και την ενεργοποίηση συστήματος αντίστροφης πλύσης. Η εκροή του επεξεργασμένου αποβλήτου συνεχίζει την πορεία της στην γραμμή επεξεργασίας των αποβλήτων, ενώ τα συλλεγόμενα μικροκοσκινισμένα βιοστερεά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διάφορες εφαρμογές.



Εικόνα 2.6 Σχηματική απεικόνιση (αριστερά) και φωτογραφία (δεξιά) συστήματος μικροκοσκίνησης με φίλτρο δίσκου (DF) (Morling, 2019).

Η μικροκοσκίνηση πλεονεκτεί συγκριτικά με την συμβατική πρωτοβάθμια επεξεργασία, στα εξής σημεία:

- Απαιτεί το 1/20 του χώρου, ενώ συνήθως παράγεται παρόμοια ή ακόμα και καλύτερη ποιότητα λυμάτων (Gikas, 2017a).
- Παράγει βιοστερεά με 40 - 45 % στερεά, περιεκτικότητα διπλάσια σε σχέση με την συμβατική επεξεργασία (Franchi et al., 2012; Koliopoulos and Gikas, 2013).
- Τα μικροκοσκινισμένα βιοστερεά θεωρούνται ιδανική πρώτη ύλη για αεριοποίηση, καθώς απαιτούν περιορισμένη περαιτέρω αφυδάτωση και έχουν υψηλότερη HHV (22 MJ/kg, σε ξηρή βάση), από εκείνη των βιοστερεών που προκύπτουν από πρωτοβάθμια συμβατική επεξεργασία (τα οποία έχουν HHV περίπου 17 MJ/kg) (Gikas, 2017b).
- Σε αντίθεση με τις ΔΠΚ όπου τα στερεά αφαιρούνται κυρίως ως συνάρτηση της ταχύτητας καθίζησής τους, ο διαχωρισμός των μικροκόσκινων πραγματοποιείται ανάλογα με το μέγεθος των σωματιδίων. Αυτός είναι ο κύριος λόγος για τον οποίο τα μικροκόσκινια είναι σε θέση να αφαιρούν αποτελεσματικότερα τις ίνες (π.χ. την κυτταρίνη που προέρχεται από το χαρτί τουαλέτας) (Ruiken et al., 2013).
- Δεν εμφανίζει προβλήματα θερμικής διαστρωμάτωσης σε αντίθεση με τις ΔΠΚ (Franchi and Santoro, 2015).
- Όταν εφαρμόζεται μικροκοσκίνηση αντί πρωτοβάθμιας καθίζησης σε μία ΕΕΛ, μειώνονται οι ενεργειακές απαιτήσεις της ΔΑ κατά 8% (Behera et al., 2018)
- Κατά κανόνα, το κόστος των μικροκόσκινων είναι 30 - 50 % χαμηλότερο από εκείνο των ΔΠΚ (Franchi and Santoro, 2015).

### 2.4.3 Ηλιακή ξήρανση

Η ηλιακή ξήρανση θεωρείται μία προηγμένη μέθοδος μείωσης της περιεχόμενης υγρασίας της ιλύος με χρήση ηλιακής ενέργειας, η οποία χαρακτηρίζεται από χαμηλό κόστος και μικρό περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Η χρήση της ευνοείται σε χώρες με εύκρατο κλίμα και υψηλά επίπεδα ηλιοφάνειας (όπως είναι και η Ελλάδα). Η διεργασία της ηλιακής ξήρανσης έχει χαμηλό λειτουργικό κόστος και αποτελεί την κατάλληλη μέθοδο για τη σταθεροποίηση και την υγιεινοποίηση της βιολογικής ιλύος για ΕΕΛ μικρής δυναμικότητας, που παράγουν έως 5.000 τόνους ιλύος ετησίως (Στούπας και Κοτσανίδης, 2009).

Η ηλιακή ξήρανση πραγματοποιείται σε κλειστές εγκαταστάσεις (διάφανες κατασκευές, μορφής θερμοκηπίου), που έχουν ασφατικό δάπεδο και πλευρικούς τοίχους λίθινου υποστρώματος με στεγανό υλικό επίστρωσης. Η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας γίνεται συνήθως μέσω μαύρης μεταλλικής επιφάνειας που υπάρχει σε επίπεδο ηλιακό



συλλέκτη. Πάνω από τη μεταλλική απορροφητική επιφάνεια βρίσκεται ένα διαφανές κάλυμμα μορφής θερμοκηπίου (συνήθως από γυαλί ή πλαστικό), το οποίο παγιδεύει τη θερμότητα. Σε επαφή με την απορροφητική επιφάνεια τοποθετούνται λεπτοί σωλήνες μέσα στους οποίους διοχετεύεται υγρό, που απαγάγει και μεταφέρει τη θερμότητα μέσω μικρών αντλιών (κυκλοφορητές) στη δεξαμενή αποθήκευσης (Κατσιμαντού, 2007).

Εντός αυτών των ειδικά διαμορφωμένων θερμοκηπίων, η ιλύς διαστρώνεται, ξηραίνεται μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας και παράλληλα αναδεύεται μηχανικά. Κατά τη ξήρανση, ουσιαστικά τα μόρια του υγρού νερού εξατμίζονται, όμως για να γίνει αυτό πρέπει να υπάρχει διαφορά στην πίεση των υδρατμών μεταξύ της ιλύος και του αέρα, συνεπώς είναι απαραίτητη η παροχή αέρα. Ο αερισμός στις κλειστές εγκαταστάσεις ηλιακής ξήρανσης μπορεί να είναι είτε φυσικός (μέσω παραθύρων που ανοιγοκλείνουν αυτόματα μέσω συστημάτων αυτοματισμού) είτε τεχνητός (εξαερισμός με ανεμιστήρες) (Στούπας και Κοτσανίδης, 2009). Με τον τεχνητό αερισμό μπορεί να ρυθμιστεί με ακρίβεια ο επιθυμητός όγκος του εισερχόμενου αέρα, όμως η λειτουργία του απαιτεί μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας συγκριτικά με το φυσικό αερισμό. Η ανανέωση της επιφάνειας της ιλύος επιτυγχάνεται με συχνή χειρωνακτική ή μηχανική ανάδευση, με την πιο διαδεδομένη να είναι η μηχανική ανάδευση με την χρήση περιστρεφόμενου άξονα (Εικόνα 2.7). Για την αντιμετώπιση δυσάρεστων οσμών και τη διαχείριση του αέρα χρησιμοποιούνται βιο-φίλτρα, ενώ ελέγχεται διαρκώς η υγρασία και η εσωτερική θερμοκρασία του συστήματος για να μειωθούν οι ενεργειακές δαπάνες και να βελτιστοποιηθεί η απόδοση ξήρανσης (Στούπας και Κοτσανίδης, 2009).



Εικόνα 2.7 Κλειστή εγκατάσταση (τύπου θερμοκηπίου) ηλιακής ξήρανσης ιλύος με μηχανική ανάδευση. (ENOX Sp. z o.o., 2023).

Με τη μέθοδο της ηλιακής ξήρανσης, είναι εφικτό να επιτευχθεί ξήρανση της ιλύος σε πολύ υψηλά ποσοστά (70 - 90 %), με αποτέλεσμα την σημαντική μείωση του όγκου της. Ακόμη, λόγω της ανάπτυξης υψηλών θερμοκρασιών, η ιλύς υγιεινοποιείται και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό. Επιπλέον, τα παραγόμενα ξηραμένα βιοστερεά παρουσιάζουν υψηλή HHV, γεγονός που ευνοεί την περαιτέρω ενεργειακή τους αξιοποίηση ως καύσιμη ύλη (Στούπας και Κοτσανίδης, 2009).

Τέλος, η ηλιακή ξήρανση πλεονεκτεί συγκριτικά με τις κλίνες ξήρανσης (συμβατική μέθοδος αφυδάτωσης της ιλύος, που πραγματοποιείται σε ανοιχτές φυσικά αεριζόμενες εγκαταστάσεις, αποτελούμενες από στεγανό δάπεδο σκυροδέματος, στρώμα άμμου/χαλικιού και αποχετευτικό δίκτυο), καθώς πραγματοποιείται σε κλειστές εγκαταστάσεις, επομένως αποφεύγονται τα ακόλουθα προβλήματα: η προσθήκη υγρασίας στην ιλύ λόγω βροχοπτώσεων που καθυστερεί την διαδικασία της ξήρανσης, η δημιουργία δυσάρεστων

οσμών, η ρύπανση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα και προβλήματα υγιεινής του εργαζόμενου προσωπικού (Κατσιμαντού, 2007).

#### 2.4.4 Γεώσακοι (Geobags)

Ένας εναλλακτικός τρόπος αφαίρεσης υγρασίας από τα βιοστερεά είναι οι σάκοι αφυδάτωσης από γεωύφασμα ή γεώσακοι (geotextile dewatering bags or geobags) (Εικόνα 2.8). Πρόκειται για μία αναδυόμενη τεχνολογία που εξελίσσεται συνεχώς και βρίσκει ολοένα και ευρύτερη εφαρμογή, καθώς είναι αποτελεσματική, οικονομική, απαιτεί μικρό χώρο εγκατάστασης και είναι φιλική προς το περιβάλλον (GSSB, 2023).

Ως προς την διαδικασία, το νερό που περιέχεται στην ιλύ εκρέει από το πορώδες γεωύφασμα από το οποίο είναι φτιαγμένοι οι σάκοι, ενώ τα στερεά (συνήθως μεγέθους  $> 10 \mu\text{m}$ ) παραμένουν εντός του σάκου. Οι γεώσακοι είναι ραμμένοι με ειδικό νήμα υψηλής αντοχής, ώστε να μην δημιουργούνται προβλήματα (ξηλώματα, ανοίγματα, κ.λπ.) σε συνθήκες υψηλής πίεσης και καταπόνησης. Ορισμένες φορές το αρχικό μέγεθος ανοίγματος πόρων του γεωυφάσματος είναι ελαφρώς μεγαλύτερο από το μέγεθος των στερεών που επιδιώκεται να παραμείνουν εντός του σάκου, όμως τα ίδια τα στερεά σχηματίζουν γρήγορα ένα επιπλέον στρώμα φίλτρου (κέικ) στην εσωτερική επιφάνεια του γεωυφάσματος, με αποτέλεσμα να μικραίνει το τελικό μέγεθος ανοίγματος των πόρων και να γίνεται αποτελεσματικά η συγκράτηση των στερεών. Με την διαδικασία αυτή ουσιαστικά δημιουργείται ένα φίλτρο δύο σταδίων (γεωύφασμα και κέικ) με υψηλή απόδοση φίλτρανσης (πάνω από 90 %), το οποίο είναι ικανό να φιλτράρει λεπτόκοκκα υλικά και θεωρείται κατάλληλο για την αφαίρεση νερού από την λυματολάσπη.

Ο τύπος του γεωυφάσματος είναι σημαντική παράμετρος λειτουργίας της τεχνολογίας αυτής, καθώς συμμετέχει στον καθορισμό του απαιτούμενου χρόνου παραμονής της ιλύος για επαρκή αφυδάτωση (περίπου 7 ημέρες κατά μέσο όρο), του κατάλληλου μεγέθους των σάκων, καθώς και των βέλτιστων επιθυμητών συνθηκών περιβάλλοντος / χώρου εγκατάστασης. Το γεωύφασμα είναι συνήθως από πολυπροπυλένιο, το οποίο είναι πολύ αποτελεσματικό αφού παράγει υγρή εκροή που δύναται να επιστραφεί στον κύκλο του νερού με μικρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ενώ παράλληλα η αφυδατωμένη ιλύς μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό. Το μέγεθος του γεώσακου εξαρτάται (πέρα από το τύπο του γεωυφάσματος) από τον επιθυμητό όγκο νερού προς αφαίρεση αλλά και από τον διαθέσιμο χώρο για εγκατάσταση.

Τα κυριότερα οφέλη από την χρήση γεώσακων για την αφαίρεση υγρασίας από την ιλύ είναι η αποτελεσματική συγκράτηση στερεών, η ευκολία λειτουργίας, η συμμόρφωση με τους κανονισμούς βελτιστοποίησης κόστους και περιβάλλοντος, καθώς και το γεγονός ότι δεν απαιτούν συχνή παρακολούθηση και συντήρηση.



Εικόνα 2.8 Γεώσακος (geobag) που χρησιμοποιείται για αφυδάτωση ιλύος (GSSB, 2023).

## 2.4.5 Απομάκρυνση βαρέων μετάλλων

Έχει διαπιστωθεί ότι κατά την επεξεργασία των λυμάτων περίπου το 50 - 80 % των βαρέων μετάλλων (συγκεκριμένα Cu, Zn, Pb, Cr, Cd, Hg, και Mn) που περιέχονται στα λύματα περνάει στην ιλύ μέσω φυσικοχημικών και βιολογικών αλληλεπιδράσεων (Yang et al., 2020). Η απομάκρυνση των βαρέων μετάλλων από την ιλύ είναι απαραίτητη προκειμένου να καταστεί δυνατή η ασφαλής επαναχρησιμοποίηση ή διάθεσή της, γι' αυτό και έχουν αναπτυχθεί πολλές σχετικές μέθοδοι τα τελευταία χρόνια. Οι κυριότερες τεχνολογίες απομάκρυνσης των βαρέων μετάλλων από την ιλύ είναι οι εξής (Babel and Del Mundo Dacera, 2006; Fontmorin and Sillanpaa, 2017; Xu et al., 2017a,b; Xu et al., 2020a,b):

- **Αποκατάσταση με ηλεκτροκινητική μέθοδο (electrokinetic remediation):** Η μέθοδος αυτή πραγματοποιείται εισάγοντας συστοιχίες ηλεκτροδίων στην ιλύ και εφαρμόζοντας χαμηλής πίεσης άμεσο ηλεκτρικό ρεύμα. Το νερό της ιλύος ή κάποιο άλλο προστιθέμενο διάλυμα ηλεκτρολύτη λειτουργεί ως αγωγίμο μέσο (Fu et al., 2017; Tang et al., 2017). Στην κάθοδο  $O_2$ ,  $H^+$ ,  $Cl^-$ , και μεταλλικά ιόντα ανάγονται, ενώ στην άνοδο πραγματοποιούνται αντιδράσεις οξειδωσης, με τις οποίες επιτυγχάνεται μεταφορά ουσιών μέσω φαινομένων συζευγμένης αγωγιμότητας (ηλεκτροφόρηση, ηλεκτρώσμωση, ηλεκτρομετανάστευση) (Gao et al., 2013; Liu et al., 2018). Η αποκατάσταση με ηλεκτροκινητική αυτή είναι η μόνη που έχει εφαρμοστεί και σε πιλοτική κλίμακα, σε αντίθεση με τις λοιπές μεθόδους που εφαρμόζονται μέχρι στιγμής μόνο σε εργαστηριακή κλίμακα.
- **Εκχύλιση υπερκρίσιμου υγρού (supercritical fluid extraction):** Αρχικά η εκχύλιση μετάλλων με την χρήση υπερκρίσιμου  $CO_2$  είχε θεωρηθεί αδύνατο να πραγματοποιηθεί, γιατί τα ιόντα των βαρέων μετάλλων έχει θετικό φορτίο και είναι ισχυρά πολικά, ενώ το υπερκρίσιμο  $CO_2$  είναι ένας μη πολικός διαλύτης. Όμως, έγιναν προσπάθειες να εξισορροπηθεί αυτή η διαφορά, μειώνοντας την πολικότητα των ιόντων των βαρέων μετάλλων (προσθήκη χηλικών μέσων) ή αυξάνοντας την πολικότητα του υπερκρίσιμου  $CO_2$  (προσθήκη μεθανόλης, αιθανόλης, οκτανόλης) (Lin et al., 2014).
- **Επεξεργασία με χημικά μέσα (chemical agent treatment):** Στην μέθοδο αυτή χρησιμοποιούνται οξέα, χηλικά μέσα καθώς και μεταλλικά στοιχεία ως εκχυλιστές. Η απόδοση απομάκρυνσης βαρέων μετάλλων μέσω εκχύλισης με οξέα εξαρτάται από τον τύπο του οξέος, το pH, τον χρόνο ανάδευσης και την θερμοκρασία. Τα οργανικά οξέα έχουν αποδειχθεί πιο αποτελεσματικά έναντι των ανόργανων οξέων αλλά και των χηλικών μέσων, γιατί είναι βιοαποδομήσιμα και μπορούν να πραγματοποιήσουν εκχυλίσεις σε ήπιες όξινες συνθήκες (pH 3 - 4) (Wang et al., 2015). Τα χηλικά μέσα δεσμεύουν τα βαρέα μέταλλα δημιουργώντας σύμπλοκα που αντικαθιστούν τις προϋπάρχουσες συνδέσεις μεταξύ ιλύος και μετάλλων (Gheju et al., 2011), ενώ τα μεταλλικά στοιχεία (όπως ο  $Fe^{3+}$ ) μειώνουν το pH της ιλύος και οξειδώνουν τα μεταλλικά της συστατικά. Η εφαρμογή της επεξεργασίας με χημικά μέσα για την απομάκρυνση βαρέων μετάλλων από την ιλύ είναι περιορισμένη λόγω των μεγάλων απαιτούμενων ποσοτήτων χημικών και του υψηλού λειτουργικού κόστους και της παραγωγής τοξικών παραπροϊόντων (Gu et al., 2017b; Rastegar et al., 2014).
- **Επεξεργασία με μέσα καθαρισμού φυτικής προέλευσης (plant-based washing agents):** Τα μέσα αυτά μπορεί να είναι πολυσακχαρίτες ή άλλες ουσίες που έχουν την ικανότητα να δεσμεύουν τα βαρέα μέταλλα που υπάρχουν στην ιλύ, δημιουργώντας σύμπλοκα (Nguyen et al., 2013).
- **Εκχύλιση με ιοντοανταλλαγή (ion-exchange extraction):** Η απομάκρυνση των βαρέων μετάλλων πραγματοποιείται με την χρήση ιοντοανταλλακτικής ρητίνης, η οποία μέχρι πρότινος αξιοποιούνταν για την ανάκτηση βαρέων μετάλλων από υγρά ή στερεά γενικότερα (Lee et al., 2006)
- **Προηγμένες Διεργασίες Οξειδωσης (Advanced Oxidation Processes, AOPs):** Οι μέθοδοι αυτές (βλέπε Κεφάλαιο 1.4.4 για περαιτέρω πληροφορίες) είναι ικανές να διαλύσουν τα βαρέα μέταλλα που υπάρχουν στην ιλύ, με διαλυτότητες > 70 %.



Συγκεκριμένα, με τις AOPs καταστρέφονται οι κροκίδες ιλύος, γεγονός που αυξάνει την διαλυτότητα της ιλύος. Επίσης, χρησιμοποιούνται οξέα τα οποία παράγουν ελεύθερες ρίζες, βελτιώνοντας έτσι την κινητικότητα των βαρέων μετάλλων (μέσω μείωσης του pH σε τιμές < 2) (Akmeahmet Balcioglu et al., 2017; Oncu and Balcioglu, 2013).

- **Βιοέκπλυση (bioleaching):** Οι διεργασίες βιοέκπλυσης πλεονεκτούν έναντι των λοιπών τεχνολογιών εξαιτίας των ήπιων συνθηκών λειτουργίας και της φιλικότητας προς το περιβάλλον (Rastegar et al., 2014; Chen and Cheng, 2019). Η μέθοδος βιοέκπλυσης χρησιμοποιεί μικροοργανισμούς αντί χημικών για να διαλύσει μεταλλικά οξείδια και σουλφίδια. Πρόκειται για μία μέθοδο με απλή λειτουργία και 80 % λιγότερη κατανάλωση χημικών συγκριτικά με την επεξεργασία με χημικά μέσα (Gu et al., 2018; Pathak et al., 2009).

Στον Πίνακα 2.2 που ακολουθεί φαίνονται τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των προαναφερθέντων τεχνολογιών απομάκρυνσης των βαρέων μετάλλων από την ιλύ.

Πίνακας 2.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των τεχνολογιών απομάκρυνσης βαρέων μετάλλων από την ιλύ ([+] πλεονέκτημα, [-] μειονέκτημα, [/] άγνωστη επίδραση) (Geng et al., 2020).

| Μέθοδος   | Παράμετροι σύγκρισης  |               |                           |                    |                |
|---|-----------------------|---------------|---------------------------|--------------------|----------------|
|   | Υψηλή λειτουργικότητα | Χαμηλό κόστος | Σύντομη διάρκεια έκπλυσης | Παραμονή θρεπτικών | Επιπλέον οφέλη |
| Αποκατάσταση με ηλεκτροκινητική                   | -                     | -             | +                         | /                  | /              |
| Εκχύλιση υπερκρίσιμου υγρού                       | -                     | -             | +                         | /                  | /              |
| Επεξεργασία με χημικά μέσα                        | +                     | -             | +                         | -                  | -              |
| Επεξεργασία με μέσα καθαρισμού φυτικής προέλευσης | -                     | +             | +                         | +                  | -              |
| Εκχύλιση με ιοντοανταλλαγή                        | -                     | +             | +                         | /                  | +              |
| AOPs (Fenton)                                     | +                     | -             | +                         | +                  | +              |
| Βιοέκπλυση  | +                     | +             | -                         | -                  | +              |

## 2.5 Θερμοχημικές μέθοδοι επεξεργασίας ιλύος

Οι παραδοσιακές μέθοδοι επεξεργασίας και διάθεσης της ιλύος έχουν αποδειχθεί αναποτελεσματικές υπό τις υφιστάμενες απαιτητικές συνθήκες (αυστηροί κανονισμοί, αύξηση της παραγωγής ιλύος, έλλειψη χώρου, ασφάλεια του περιβάλλοντος και της υγείας από τις επικίνδυνες ουσίες) (Lewis and Gattie, 2002; Syed-Hassan et al., 2017). Η ευρεία εφαρμογή νέων εναλλακτικών και βιώσιμων τεχνολογιών για τη διαχείριση της ιλύος θεωρείται επείγουσα ανάγκη. Ορισμένες προηγμένες μέθοδοι περιεγράφηκαν στο Κεφάλαιο 2.4, ενώ παρακάτω πρόκειται να αναπτυχθούν οι θερμοχημικές μέθοδοι επεξεργασίας των βιοστερεών.

### 2.5.1 Περιγραφή και συγκριτικός συσχετισμός των θερμοχημικών μεθόδων

Οι θερμοχημικές μέθοδοι επεξεργασίας της ιλύος θεωρούνται οι πιο αποτελεσματικές λύσεις για την ενεργειακή αξιοποίηση της ιλύος, καθώς μπορούν να τη μετατρέψουν σε πολύτιμα προϊόντα και να ανακτήσουν σημαντικό μέρος της εσωτερικής της ενέργειας (Sansaniwal et al., 2017a; Syed-Hassan et al., 2017). Οι θερμοχημικές διεργασίες μπορούν να χωριστούν στις ακόλουθες κατηγορίες: θερμικές (πυρόλυση, αποτέφρωση, αεριοποίηση, απανθράκωση, υγροποίηση, διεργασίες υπερκρίσιμου νερού), βιοχημικές (ζύμωση, αναερόβια χώνευση) και

χημικές (μετεστεροποίηση, μετατροπή ζωικών-φυτικών ελαίων σε βιοντίζελ) (Demirbas, 2001; Singh and Gu, 2010; Wang et al., 2017; Zhang et al., 2017).

Γενικότερα, οι θερμοχημικές διεργασίες είναι κατάλληλες για όλα τα είδη βιομάζας, αλλά είναι πιο αποτελεσματικές σε ποώδη, ξυλώδη υλικά με χαμηλή υγρασία. Η πλήρης ξήρανση της ιλύος δεν είναι υποχρεωτική κατά τη διάρκεια αρκετών θερμοχημικών μεθόδων, όπως η αποτέφρωση, η αεριοποίηση, η πυρόλυση και η αναερόβια χώνευση. Ωστόσο, είναι πιθανό ορισμένες τεχνολογίες να χρειάζονται μείωση της περιεκτικότητας σε νερό (Adar et al., 2016; Xu et al., 2008).

Η αποτέφρωση και η αεριοποίηση θεωρούνται οι πιο διαδεδομένες εναλλακτικές τεχνολογίες για τη θερμική επεξεργασία της ιλύος και χρησιμοποιούνται ευρέως στην Ευρώπη (Γερμανία, Βέλγιο, Γαλλία, Δανία, Ολλανδία κ.λπ.), όπου οι κυβερνήσεις τις υποστηρίζουν με χρηματοδότηση και ειδικά κίνητρα (Kelessidis and Stasinakis, 2012; Manara and Zabaniotou, 2012; Praspaliauskas and Pedišius, 2017; Sansaniwal et al., 2017b). Είναι αξιοσημείωτο ότι η αποτέφρωση έχει αποδειχθεί πιο παραγωγική για τη διαχείριση της ιλύος όταν συνδυάζεται με άλλες μεθόδους (συν-αποτέφρωση) όπως η πυρόλυση και η αεριοποίηση υπό συγκεκριμένες συνθήκες (Fytli and Zabaniotou, 2008; Praspaliauskas and Pedišius, 2017).

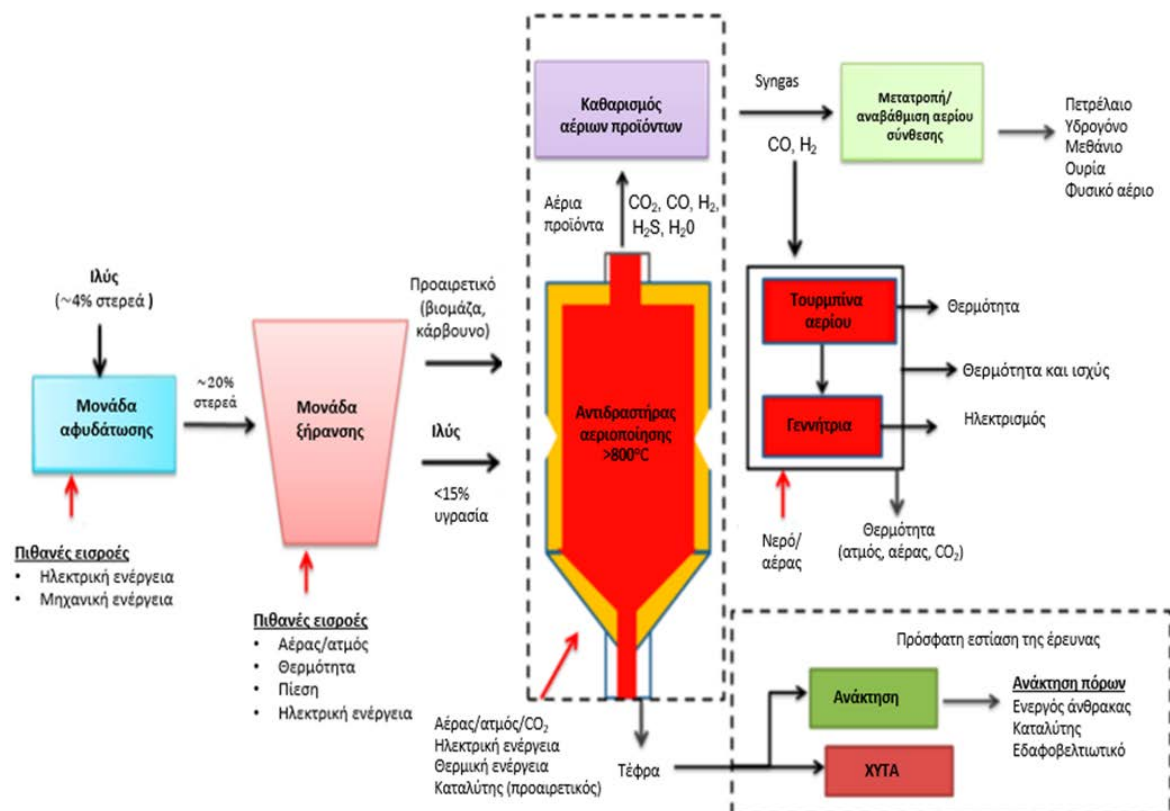
Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές συγκριτικές αξιολογήσεις των θερμοχημικών διεργασιών. Γενικότερα, οι εναλλακτικές / προηγμένες μέθοδοι έχουν αναβαθμισμένη απόδοση με μεγάλη ποικιλία τελικών εφαρμογών σε σύγκριση με τις συμβατικές διεργασίες και χαρακτηρίζονται από σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως η παραγωγή ενέργειας, η γρήγορη επεξεργασία, τα υψηλής ποιότητας προϊόντα, η μεγάλη μείωση του όγκου της ιλύος κ.λπ. (Raheem et al., 2018; Xu and Lancaster, 2009). Παρά τα πλεονεκτήματα τους, οι μέθοδοι αυτές αντιμετωπίζουν και ορισμένα προβλήματα, κυρίως λόγω της έλλειψης εμπειρίας, που αφορούν την υψηλή υγρασία της πρώτης ύλης (η οποία απαιτεί αφυδάτωση / πάχυνση), την ανάγκη προετοιμασίας και καθαρισμού του παραγόμενου αερίου, καθώς και την επεξεργασία των ρύπων που περιέχονται στα απόβλητά τους (Fytli and Zabaniotou, 2008; Raheem et al., 2018; Syed-Hassan et al., 2017; Xu and Lancaster, 2009). Αναλυτικός πίνακας με τα κύρια οφέλη και τους περιορισμούς της αεριοποίησης, της πυρόλυσης και της αποτέφρωσης δίνεται στο [Παράρτημα](#).

Σύμφωνα με διάφορες μελέτες, η αεριοποίηση είναι μια διαδικασία χωρίς ανάγκη πρόσθετου καυσίμου και χωρίς σημαντικές εκπομπές επικίνδυνων ενώσεων (όπως οξείδια του θείου, οξείδια του αζώτου, βαρέα μέταλλα, χλωριωμένες διβενζοδιοξίνες, διβενζοφουράνια κ.λπ.), καθώς είναι μια καθαρή χημικά αναγωγική μέθοδος, οπότε είναι προτιμότερη από την αποτέφρωση, λαμβάνοντας υπόψη τα περιβαλλοντικά κριτήρια (Adar et al., 2016; Fytli and Zabaniotou, 2008; Marrero et al., 2004). Επίσης, κατά τη διαδικασία αεριοποίησης, γίνεται αποτελεσματική ανάκτηση ενέργειας παρά την υψηλή περιεκτικότητα της ιλύος σε νερό (έως και 30 %), η οποία βοηθά με την παροχή του απαραίτητου ατμού τις χημικές αντιδράσεις και θεωρείται πλεονέκτημα έναντι της πυρόλυσης (Adar et al., 2016; Syed-Hassan et al., 2017). Ωστόσο, ορισμένοι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η τεχνολογία της αεριοποίησης χαρακτηρίζεται από σημαντικούς περιορισμούς ανάλογα με τις συνθήκες, οι οποίοι καθιστούν αυτή την εναλλακτική μέθοδο μετατροπής της ιλύος σε ενέργεια λιγότερο προτιμητέα από την πυρόλυση, την αποτέφρωση, την αναερόβια χώνευση και την οξείδωση υπερκρίσιμου νερού (Garrido-Baserba et al., 2015; Samolada and Zabaniotou, 2014).

## 2.5.2 Αεριοποίηση

Η αεριοποίηση της βιομάζας είναι η θερμοχημική μετατροπή στερεών ανθρακούχων υλικών σε αέριο καύσιμο (Buragohain et al., 2010; Sansaniwal et al., 2017b; Zhang et al., 2014). Πρόκειται για μερική καύση της βιομάζας, καθώς ο λόγος αέρα / καυσίμου (Equivalence Ratio, ER) είναι κάτω από την απαιτούμενη τιμή για στοιχειομετρική καύση (Buragohain et al., 2010; Martínez et al., 2012). Η διεργασία λαμβάνει χώρα σε αντιδραστήρα που ονομάζεται αεριοποιητής και πραγματοποιείται συνήθως σε υψηλές θερμοκρασίες και ατμοσφαιρική πίεση

(Sansaniwal et al., 2017b; Zhang et al., 2014). Η αεριοποίηση μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε διάφορους τύπους ανάλογα με το μέσο της (αέρας, ατμός, οξυγόνο, υπερκρίσιμο νερό) καθώς και με την ενθαλπία της (ενδόθερμη ή εξώθερμη) (Thamavithya and Dutta, 2008). Στο Διάγραμμα 2.2 που ακολουθεί απεικονίζεται σχηματικά μία τυπική διεργασία αεριοποίησης ιλύος.

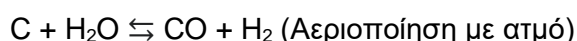
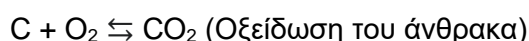
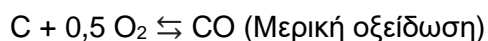


Διάγραμμα 2.2 Σχηματική απεικόνιση μίας τυπικής διεργασίας αεριοποίησης ιλύος (Oladejo et al., 2019).

Ως προς την χημική διαδικασία, κατά την διάρκεια της αεριοποίησης λαμβάνουν χώρα αρκετές πολύπλοκες χημικές αντιδράσεις, που θα μπορούσαν να συνοψιστούν στην ακόλουθη εξίσωση (Bridgwater et al., 1999; Sikarwar et al., 2017):



Οι κυριότερες αντιδράσεις που πραγματοποιούνται κατά την διάρκεια της αεριοποίησης είναι οι εξής:



Επιπλέον, υπάρχουν διάφορες δευτερεύουσες χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά τη διαδικασία αεριοποίησης. Ορισμένες από αυτές τις αντιδράσεις απεικονίζονται παρακάτω:





$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$  (Αντίδραση μετατόπισης νερού-αερίου, Water Gas Shift - WGS)

$\text{CO} + 3 \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$  (Μεθανοποίηση)

Το βασικό προϊόν της αεριοποίησης είναι το αέριο σύνθεσης (syngas), το οποίο αποτελείται κυρίως από  $\text{H}_2$  και  $\text{CO}$  (η αναλογία  $\text{H}_2/\text{CO}$  κυμαίνεται μεταξύ 4,0 - 1,0 ανάλογα τις συνθήκες λειτουργίας), καθώς και από  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ , υδρατμούς και διάφορους ελαφρούς υδρογονάνθρακες ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$  κ.λπ.) (Burbano et al., 2011; Zhang et al., 2014). Η θερμογόνος δύναμη του αερίου σύνθεσης εξαρτάται από το μέσο αεριοποίησης, έτσι κυμαίνεται από 4 έως 7  $\text{MJ}/\text{Nm}^3$  στην περίπτωση αεριοποίησης με αέρα, αλλά πολύ υψηλότερη θερμογόνος δύναμη (12 - 28  $\text{MJ}/\text{Nm}^3$ ) μπορεί να επιτευχθεί μέσω αεριοποίησης με καθαρό  $\text{O}_2$  (Sikarwar et al., 2016). Το παραγόμενο αέριο σύνθεσης είναι θερμό και περιέχει πολλές ακαθαρσίες αμέσως μετά την παραγωγή του, επομένως για να αποκτήσει τις επιθυμητές ιδανικές ιδιότητες (υψηλή καθαρότητα, χαμηλή περιεκτικότητα σε πίσσα, απουσία επικίνδυνων συστατικών) είναι απαραίτητο να ακολουθηθεί μια διαδικασία προετοιμασίας και καθαρισμού (Gautam et al., 2011; Martínez et al., 2012) (βλέπε Κεφάλαιο 2.5.3). Το αέριο σύνθεσης είναι κατάλληλο για μια σειρά από διαφορετικές εφαρμογές, όπως η παραγωγή καθαρών  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  και  $\text{CH}_4$ , η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω καύσης, η παραγωγή θερμότητας για την ξήρανση της ιλύος, η παραγωγή καυσίμων μεταφοράς, καθώς και εκλεκτική σύνθεση χημικών ουσιών και καυσίμων (καύσιμα Fischer-Tropsch, μεθανόλη, αμμωνία, διμεθυλαιθέρας κ.λπ.) (Chacartegui et al., 2012; Lv et al., 2007; Rostrup-Nielsen and Christiansen, 2011; Sansaniwal et al., 2017b; Werle and Wilk, 2010; Zhang et al., 2014).

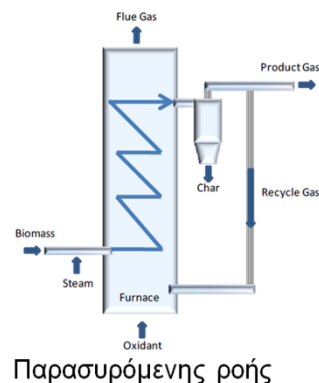
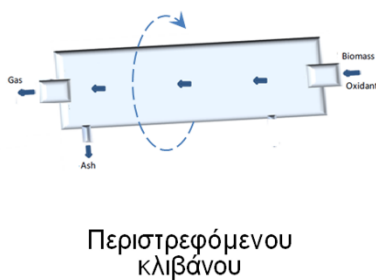
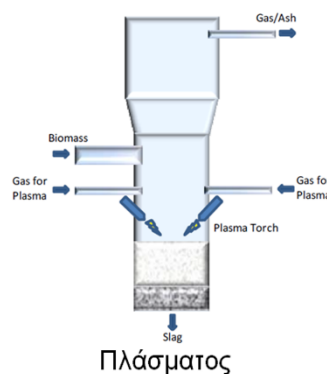
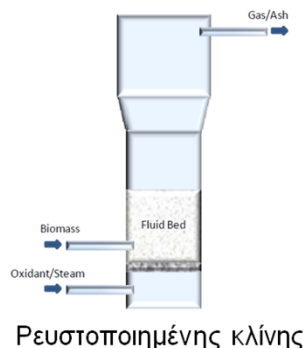
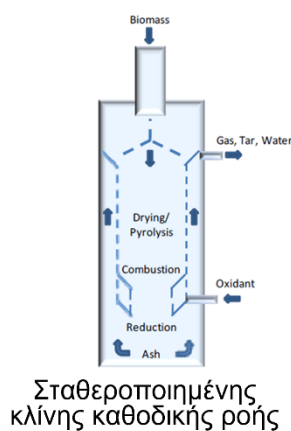
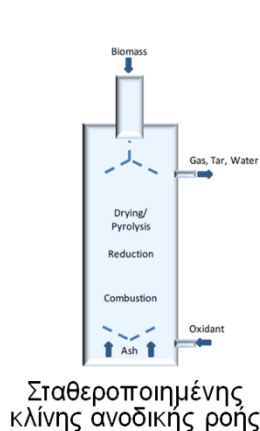
Υπάρχουν αρκετές παράμετροι που επηρεάζουν την απόδοση της διεργασίας αεριοποίησης και τη σύνθεση - ποιότητα του τελικού αερίου (Basu, 2010; Heidenreich and Foscolo, 2015; Huang and Yuan, 2016; Watson et al., 2018). Οι σημαντικότερες από αυτές είναι οι ακόλουθες: ο τύπος του αεριοποιητή, ο τύπος των υλικών κλίνης, ο τύπος του υλικού τροφοδοσίας (χημική σύσταση και θερμοχημικές ιδιότητες), το μέσο αεριοποίησης, η ροή του μέσου, το μέγεθος σωματιδίων βιομάζας, η θερμοκρασία αντίδρασης, ο ρυθμός θέρμανσης, η πίεση, η περιεκτικότητα σε υγρασία, ο χρόνος παραμονής του αερίου, οι τεχνικές ψύξης - καθαρισμού του αερίου σύνθεσης, ο λόγος ισοδυναμίας, και η προσθήκη καταλυτών. Αυτές οι παράμετροι πρέπει να παρακολουθούνται καταλλήλως, ώστε να επιτυγχάνεται ποσοστό μετατροπής του άνθρακα που υπερβαίνει το 90% και το επιθυμητό επίπεδο ποιότητας του παραγόμενου αερίου σύνθεσης.

Μία από τις πιο κρίσιμες παραμέτρους για την ποιότητα του παραγόμενου αερίου σύνθεσης, η οποία αναφέρθηκε προηγουμένως είναι ο τύπος του αεριοποιητή. Οι αντιδραστήρες αεριοποίησης μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με διάφορα κριτήρια, όπως το μέσο αεριοποίησης (αεριοποιητές με αέρα, οξυγόνο ή ατμό), την πηγή θερμότητας (αυτοθερμικοί / άμεσοι, όταν η θέρμανση παρέχεται από τη μερική καύση ή αλλοθερμικοί / έμμεσοι, για εξωτερική πηγή θέρμανσης), την πίεση (ατμοσφαιρικοί ή υπό πίεση) και τον σχεδιασμό (σταθερής κλίνης (fixed - bed), ρευστοποιημένης κλίνης (fluidized - bed), συμπαρασυρόμενης ροής (entrained - flow), μεταφοράς (transport) ή πλάσματος (plasma)) (Puig-Arnavat et al., 2010; Samiran et al., 2016). Όλοι οι τύποι αεριοποιητών έχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα όσον αφορά τον τύπο καυσίμου, την εφαρμογή και τη λειτουργία, επομένως είναι σημαντικό να επιλέγεται ο κατάλληλος για κάθε περίπτωση. Τα κύρια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των ευρέως εφαρμοζόμενων τύπων αεριοποιητών δίνονται στον Πίνακα 2.3 που ακολουθεί, ενώ οι πιο συνήθεις τύποι αεριοποιητών απεικονίζονται σχηματικά στην Εικόνα 2.9.

Πίνακας 2.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των ευρέως εφαρμοζόμενων τύπων αεριοποιητών (Beenackers, 1999; Kishore, 2009; Samiran et al., 2016).

| Τύπος αεριοποιητή | Πλεονεκτήματα   | Μειονεκτήματα  |
|-------------------|---|--|
| Σταθερής κλίνης   | -Απλούστερος σχεδιασμός<br>-Αποτελεσματική και αποδεδειγμένη τεχνολογία | -Μη ομοιομορφία στη θερμοκρασία<br>-Μεγάλος χρόνος παραμονής |

|                        |  |  |
|------------------------|--|--|
|                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Οικονομικός σε μικρή κλίμακα</li> <li>-Ανθεκτικός σε μεγάλο εύρος βιομάζας</li> <li>-Υψηλή απόδοση μετατροπής άνθρακα</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Απαιτείται εκτεταμένος καθαρισμός αερίου</li> <li>-Μικρή ποσότητα τελικού ψυχρού αερίου σύνθεσης</li> </ul>  |
| Ρευστοποιημένης κλίνης | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Ευρεία εφαρμογή στη βιομηχανία</li> <li>-Ομοιομορφία στην κατανομή της θερμοκρασίας</li> <li>-Χαμηλή παραγωγή πίσσας</li> <li>-Μικρός χρόνος παραμονής</li> <li>-Μεγάλη χωρητικότητα</li> <li>-Δυνατότητα προσθήκης καταλύτη</li> <li>-Καλή δυνατότητα κλιμάκωσης</li> <li>-Κατάλληλο για μεγάλη δυναμικότητα (&gt;1MW)</li> <li>-Καλός έλεγχος θερμοκρασίας και υψηλοί ρυθμοί αντίδρασης</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Δεν είναι οικονομικό για μικρή κλίμακα</li> <li>-Υψηλό κλάσμα σωματιδίων στο αέριο σύνθεσης</li> <li>-Περιορισμοί καυσίμου ως προς το μέγεθος των σωματιδίων</li> <li>-Πρόβλημα διάβρωσης</li> </ul>   |
| Συμπαρασυρόμενης ροής  | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Πολύ χαμηλή παραγωγή πίσσας</li> <li>-Υψηλή ποιότητα αερίου σύνθεσης</li> <li>-Καλή επαφή και ανάμιξη αερίου-στερεού</li> <li>-Υψηλή απόδοση μετατροπής άνθρακα</li> <li>-Κατάλληλο και οικονομικό για μεγάλη δυναμικότητα (&gt;1MW)</li> <li>-Πολύ καλή δυνατότητα κλιμάκωσης</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Πολύπλοκη κατασκευή και λειτουργία</li> <li>-Υψηλό λειτουργικό κόστος</li> <li>-Ακατάλληλο για βιομάζα</li> <li>-Προβλήματα με τα υλικά κατασκευής σε υψηλή θερμοκρασία</li> <li>-Περιορισμοί καυσίμου ως προς το μέγεθος των σωματιδίων (μη ανεκτικότητα σε χονδροειδή σωματίδια)</li> <li>-Πρόβλημα με την ψύξη του ακατέργαστου αερίου</li> </ul> |



Εικόνα 2.9 Σχηματική απεικόνιση των πιο συνήθων τύπων αεριοποιητών (Γκίκας, 2013).

Η αεριοποίηση παρουσιάζει διάφορα τεχνολογικά, περιβαλλοντικά, κοινωνικά και οικονομικά οφέλη. Ορισμένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της διεργασίας είναι τα εξής: η μετατροπή αποβλήτων σε χρήσιμη ενέργεια, η αξιοποίηση διαφόρων πρώτων υλών (ξύλο, βιομάζα, φυσικό αέριο, άνθρακας, οργανικά απόβλητα κ.λπ.), οι υψηλές ποσότητες παραγόμενης ενέργειας, η αποτελεσματική παραγωγή αερίου σύνθεσης με πολλές προοπτικές χρήσης, οι πολύ χαμηλές εκπομπές  $SO_x$  και  $NO_x$ , η ανυπαρξία ανάγκης για συμπληρωματικό καύσιμο, η ενεργειακή αυτονομία, οι περιορισμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, η δυνατότητα για εφαρμογή σε εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας, η φιλικότητα προς το περιβάλλον κ.λπ. (Fytilli and Zabaniotou, 2008; Gil-Lalaguna et al., 2014; Heidenreich and Foscolo, 2015; Pfeifer and Hofbauer, 2008; Raheem et al., 2018; Syed-Hassan et al., 2017; Vassilev et al., 2010).

Ωστόσο, η αεριοποίηση χαρακτηρίζεται επίσης από διάφορα, εν πολλοίς τεχνικά εμπόδια, για τα περισσότερα από τα οποία έχουν διερευνηθεί βιώσιμες λύσεις. Ορισμένα γενικά μειονεκτήματα της διεργασίας αεριοποίησης είναι η έλλειψη εξειδικευμένου εργατικού δυναμικού, η φτωχή αγορά, η περιορισμένη κοινωνική προσαρμοστικότητα και οι παλιομοδίτικες κυβερνητικές πολιτικές (Sansaniwal et al., 2017b). Ένα από τα πιο συνηθισμένα τεχνικά ζητήματα είναι οι ανεπιθύμητες ενώσεις στο αέριο σύνθεσης, που παράγονται από το σύστημα τροφοδοσίας ή από τον αεριοποιητή (Raheem et al., 2018; Sansaniwal et al., 2017b; Syed-Hassan et al., 2017). Μεταξύ όλων των ρύπων, η μεγάλη ποσότητα πίσσας (μείγμα αρωματικών υδρογονανθράκων και άλλων οργανικών χημικών ουσιών) προκαλεί μεγάλη ανησυχία. Οι διαδικασίες προετοιμασίας και καθαρισμού του αερίου σύνθεσης επιλύουν αυτά τα ζητήματα, όμως και οι ίδιες θεωρούνται σημαντικά εμπόδια, επειδή παρουσιάζουν τεχνικές δυσκολίες, αυξάνουν το κόστος και περιπλέκουν την κατασκευή και τη λειτουργία ολόκληρου του συστήματος αεριοποίησης. Ένας άλλος περιορισμός είναι η απαίτηση χαμηλής περιεκτικότητας σε νερό (το πολύ 30%), αλλά αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω της ξήρανσης και της αεριοποίησης της ιλύος με τη χρήση της ενέργειας από το παραγόμενο αέριο σύνθεσης (Gil-Lalaguna et al., 2014; Raheem et al., 2018). Επίσης, μια ολοκληρωμένη μονάδα αεριοποίησης χαρακτηρίζεται από υψηλό κόστος επένδυσης και λειτουργίας, το οποίο αποτελεί το πιο κρίσιμο εμπόδιο για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας και ποικίλει όσον αφορά την απόδοση του αεριοποιητή, την ικανότητα παραγωγής ενέργειας κ.λπ. (Sansaniwal et al., 2017b; Watson et al., 2018).

### 2.5.3 Επεξεργασία αερίου σύνθεσης

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το αέριο σύνθεσης που παράγεται από τον αντιδραστήρα αεριοποίησης, περιέχει διάφορα ανεπιθύμητα παραπροϊόντα - ρύπους που οφείλονται σε ακαθαρσίες στην πρώτη ύλη ή σε ατελή αεριοποίηση (Woolcock and Brown, 2013). Πιο συγκεκριμένα, η πίσσα, τα αιωρούμενα σωματίδια και διάφορες ανόργανες ουσίες (αλκαλικά μέταλλα και ενώσεις αζώτου, θείου και χλωρίου) μπορούν να προκαλέσουν σημαντικά προβλήματα στη διεργασία αεριοποίησης, τα οποία συνοψίζονται ως εξής (Luque et al., 2012; Martínez et al., 2012; Richardson et al., 2015; Sansaniwal et al., 2017b):

- Η πίσσα (μείγμα υδρογονανθράκων) οδηγεί σε διάβρωση, συσσωμάτωση, απόφραξη και ρύπανση του περιφερειακού εξοπλισμού (κινητήρες, τουρμπίνες κ.λπ.), λόγω του πολυμερισμού της σε πιο σύνθετα μόρια και του σχηματισμού αερολυμάτων. Επίσης, οι πίσσες μπορούν να απενεργοποιήσουν τους καταλύτες, ενώ παράλληλα θεωρούνται και επιβλαβείς για την ανθρώπινη υγεία.
- Τα αιωρούμενα σωματίδια προκαλούν προβλήματα διάβρωσης, συσσωμάτωσης, καθώς και ρύπανσης τόσο του περιφερειακού εξοπλισμού όσο και του περιβάλλοντος.
- Τα αλκαλικά μέταλλα (όπως το Na και το K) μπορούν να οδηγήσουν σε συσσωμάτωση και διάβρωση των μεταλλικών επιφανειών, καθώς και σε απενεργοποίηση των καταλυτών.
- Οι ενώσεις αζώτου ( $NO_x$ ,  $NH_3$  και  $HCN$ ), θείου ( $H_2S$ ,  $SO_2$ ) και χλωρίου ( $HCl$ ) ευθύνονται για τα φαινόμενα της διάβρωσης, της δηλητηρίασης των μεταλλικών καταλυτών καθώς και της περιβαλλοντικής ρύπανσης.

Τα επίπεδα των ρύπων στο αέριο σύνθεσης παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία και εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις ακαθαρσίες της πρώτης ύλης και την τεχνολογία παραγωγής του αερίου σύνθεσης (Woolcock and Brown, 2013). Υπό οποιεσδήποτε συνθήκες όμως, είναι απαραίτητο να προετοιμάζεται και να καθαρίζεται το ακατέργαστο αέριο σύνθεσης πριν από τη χρήση του, προκειμένου να επιτυγχάνεται αποτελεσματικότητα της διεργασίας και να λαμβάνεται πολύτιμο βιοκαύσιμο ως τελικό προϊόν (Kosstrin, 2017; Raheem et al., 2018; Sansaniwal et al., 2017b). Οι τεχνολογίες καθαρισμού του αερίου σύνθεσης ταξινομούνται σε ψυχρές ( $T < \sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), ζεστές ( $T > 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) και θερμές (ενδιάμεσες θερμοκρασίες), ανάλογα με τη θερμοκρασία του επεξεργασμένου αερίου στην έξοδο της διάταξης καθαρισμού (Bermudez and Fidalgo, 2016; Courson and Gallucci, 2019; Woolcock and Brown, 2013).

Η ψυχρή οδός είναι η πρώτη και πιο ανεπτυγμένη μέθοδος καθαρισμού του αερίου σύνθεσης, κατά την οποία απορροφούνται σχεδόν όλοι οι ρύποι του αερίου σύνθεσης από νερό ή άλλο υγρό μέσω διάφορων τύπων μηχανών πλύσης (τις λεγόμενες «πλυντηρίδες») (Bermudez and Fidalgo, 2016; Woolcock and Brown, 2013). Αναλυτικότερα, η πίσσα και τα αιωρούμενα σωματίδια απομακρύνονται από το αέριο σύνθεσης μέσω πλυντηρίδων υγρού, συνήθως στην ίδια διεργασία. Επίσης, οι ατμοί αλκαλικών μετάλλων συμπυκνώνονται λόγω μείωσης της θερμοκρασίας, δημιουργώντας μικρά σωματίδια μέσω συσσωμάτωσης ή συνδυασμένες ενώσεις με πίσσες, οπότε απομακρύνονται μαζί με τα σωματίδια και τις πίσσες (Hirohata et al., 2008; Woolcock and Brown, 2013). Η απομάκρυνση των αζωτούχων ρύπων επιτυγχάνεται συνήθως με απορρόφηση σε νερό, ενώ οι ενώσεις χλωρίου μπορούν επίσης να απομακρυνθούν αποτελεσματικά με τη χρήση πλυντηρίδων υγρού μέσω εναπόθεσης  $\text{NH}_4\text{Cl}$  ή απορρόφησης ατμών  $\text{HCl}$ . Ο ψυχρός καθαρισμός του θείου περιλαμβάνει διάφορες χημικές, φυσικές ή φυσικοχημικές μεθόδους με διαλύτες, χημικές τεχνικές οξειδοαναγωγής και βιολογικές διεργασίες (Woolcock and Brown, 2013; Yeo et al., 2019). Παρά την ωριμότητά τους και την ευρεία εφαρμογή τους, οι τεχνολογίες ψυχρού καθαρισμού ενδέχεται να προκαλέσουν απώλειες θερμικής ενέργειας και να δημιουργήσουν πρόσθετες δαπάνες λόγω της ανάγκης επεξεργασίας των υγρών εκροών - αποβλήτων των πλυντηρίδων προκειμένου να πληρούνται τα περιβαλλοντικά πρότυπα (Woolcock and Brown, 2013).

Η ζεστή οδός είναι μια νεότερη προσέγγιση που μπορεί να δώσει λύση σε αυτά τα ζητήματα, καθώς το αέριο δεν ψύχεται και αναθερμαίνεται, γεγονός που οδηγεί σε καλύτερη συνολική ενεργειακή απόδοση (Bermudez and Fidalgo, 2016). Οι τεχνολογίες ζεστού καθαρισμού του αερίου σύνθεσης είναι κυρίως αποτελεσματικές για την απομάκρυνση: πίσσας (θερμική πυρόλυση, καταλυτική πυρόλυση, μη θερμικά πλάσματα και φυσικός διαχωρισμός), αιωρούμενων σωματιδίων (αδρανειακός διαχωρισμός, διήθηση με φράγματα, ηλεκτροστατική αλληλεπίδραση) και ενώσεων του θείου (προσρόφηση σε τρία στάδια: αναγωγή, θείωση και αναγέννηση) (Woolcock and Brown, 2013). Επίσης, τα αλκαλικά μέταλλα μπορούν να απομακρυνθούν μαζί με άλλους ρύπους μέσω συμπύκνωσης ή μέσω θερμής προσρόφησης σε στερεά προσροφητικά υλικά. Η προσρόφηση χρησιμοποιείται συνήθως και για την απομάκρυνση ενώσεων χλωρίου (Dou et al., 2006; Woolcock and Brown, 2013).

Οι τεχνολογίες θερμού καθαρισμού λειτουργούν σε ενδιάμεσες θερμοκρασίες, προσφέροντας την ευκαιρία να αποφευχθούν τα μειονεκτήματα τόσο της ψυχρής όσο και της ζεστής οδού, και εφαρμόζονται συχνά για την απομάκρυνση της πίσσας και του χλωρίου (Woolcock and Brown, 2013). Είναι αξιοσημείωτο ότι μεταξύ όλων των ρύπων, η πίσσα θεωρείται η πιο προβληματική, γι' αυτό και οι στρατηγικές απομάκρυνσής της έχουν μελετηθεί διεξοδικά σε αρκετές μελέτες (Abu El-Rub et al., 2004; Courson and Gallucci, 2019; Shen and Yoshikawa, 2013; Valderrama Rios et al., 2018). Συμπερασματικά, κάθε μία από τις προαναφερθείσες τεχνολογίες καθαρισμού χαρακτηρίζεται από πλεονεκτήματα και περιορισμούς, οπότε η επιλογή της κατάλληλης διαδικασίας καθαρισμού και προετοιμασίας θα πρέπει να επικεντρώνεται στην τελική χρήση του αερίου σύνθεσης, στα πρότυπα εκπομπών και στις προδιαγραφές κάθε εφαρμογής (Basu, 2010; Richardson et al., 2015; Woolcock and Brown, 2013).

## 2.5.4 Εφαρμογές αεριοποίησης βιοστερεών

Τα τελευταία χρόνια έχουν πραγματοποιηθεί πολλές εφαρμογές αεριοποίησης βιοστερεών, από τις οποίες έχουν προκύψει σημαντικά ευρήματα σχετικά με τις προοπτικές της τεχνολογίας. Η πλειοψηφία των ερευνών επικεντρώνεται στην τεχνική περιγραφή και μελέτη της τεχνολογίας της αεριοποίησης (τεχνικές λεπτομέρειες, συνθήκες λειτουργίας, παράμετροι που επηρεάζουν την απόδοση, κ.λπ.), ενώ υπάρχουν και εναλλακτικές προσεγγίσεις που διαφέρουν από τις συνήθειες, καθώς επικεντρώνονται στην εξέταση της τεχνολογίας μέσω μοντελοποίησης (Gabbar et al., 2020; Sanaye et al., 2022; Shi et al., 2022; Viswanathan et al., 2022; Zhang et al., 2021).

Μελετώντας τις παραπάνω εφαρμογές, προκύπτει το συμπέρασμα ότι τα πιο κρίσιμα χαρακτηριστικά για την ταξινόμηση και την αξιολόγηση τους είναι ο τύπος του υλικού τροφοδοσίας, ο ρυθμός τροφοδοσίας, ο τύπος φόρτωσης και ο τύπος του αεριοποιητή. Ένα κοινό ζήτημα σε όλες τις εφαρμογές ήταν η αφαίρεση της περίσσειας νερού, πριν από τη αεριοποίηση, για την οποία διενεργήθηκαν διάφορες διαδικασίες αφυδάτωσης ή/και ξήρανσης, με τις συνηθέστερες να είναι η ξήρανση στον ήλιο, στον αέρα ή σε φούρνο. Η κλίμακα (εργαστηριακή ή πιλοτική) είναι επίσης καθοριστικός παράγοντας για την διαμόρφωση της διεργασίας. Ο ρυθμός τροφοδοσίας στις υπάρχουσες εφαρμογές κυμάνθηκε από μόλις 4 g/h έως και 1 ton/h. Σε όλες τις εφαρμογές που μελετήθηκαν ήταν ο τύπος φόρτωσης ήταν με παρτίδες, εκτός από αυτές των Arjhan et al. (2013), Manali and Gikas (2019b) και Wnukowski et al. (2020) που υιοθέτησαν συνεχή λειτουργία. Όσον αφορά τον τύπο του αεριοποιητή, στην πλειονότητα των εφαρμογών χρησιμοποιήθηκαν αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης, ενώ σε αρκετές μελέτες επιλέχθηκαν και άλλα συστήματα αεριοποιητών (σταθερής κλίνης, περιστρεφόμενου κλίβανου, καθοδικής ροής).

Με βάση τα κυριότερα αποτελέσματα των εφαρμογών αεριοποίησης βιοστερεών με χρήση αέρα/ατμού/ $O_2$  ως μέσο αεριοποίησης, η απόδοση της διεργασίας επηρεάζεται από διάφορες παραμέτρους, οι κυριότερες από τις οποίες είναι:

- **Θερμοκρασία:** Γενικά, η θερμοκρασία αεριοποίησης θα πρέπει να επιλέγεται όσο το δυνατόν υψηλότερη, ώστε να επιτυγχάνεται ικανοποιητικά υψηλή απόδοση αερίου σύνθεσης, υψηλή απόδοση ψυχρού αερίου και χαμηλή παραγωγή πίσσας και εξανθρακώματος (Khan et al., 2021; Nipattumakul et al., 2010; Schmid et al., 2021; Zaccariello and Mastellone, 2020).
- **Μέσο αεριοποίησης:** Ανάμεσα στον αέρα, τον ατμό και το  $O_2$ , το προτιμότερο από οικονομικής απόψεως είναι ο αέρας, με την χρήση του οποίου παράγεται αέριο σύνθεσης υψηλής ποιότητας, με ικανοποιητική θερμογόνο δύναμη, χαμηλή περιεκτικότητα σε πίσσα και σχετικά υψηλή απόδοση ψυχρού αερίου (Calvo et al., 2013). Ωστόσο, η αντικατάσταση του αέρα με ατμό βελτιώνει τα χαρακτηριστικά του αερίου σύνθεσης (de Andrés et al., 2011a; de Andrés et al., 2011b; Nipattumakul et al., 2010). Όπως είναι λογικό, η χρήση μείγματος αέρα και ατμού θα μπορούσε να είναι μια αποτελεσματική εναλλακτική λύση (Roche et al., 2014).
- **Λόγος αέρα / καυσίμου (ER):** Γενικά, έχει διαπιστωθεί ότι η αύξηση του ER βελτιώνει την απόδοση της αεριοποίησης (βελτίωση της ποιότητας και της απόδοσης του αερίου σύνθεσης, απομάκρυνση της πίσσας), καθώς ενισχύει την αντίδραση οξείδωσης και μειώνει την παραγωγή προσμίξεων (Choi et al., 2017; Khan et al., 2021; Migliaccio et al., 2021). Ωστόσο, οι Arjhan et al. (2013) παρατήρησαν ότι η θερμογόνο δύναμη του αερίου σύνθεσης τείνει να μειώνεται με την αύξηση του ER, ενώ κατέληξαν επίσης στο συμπέρασμα ότι η θερμοκρασία και ο ER συνδέονται γραμμικά.
- **Προσθήκη καταλύτη:** Η θετική επίδραση της παρουσίας καταλυτών στην απόδοση της αεριοποίησης έχει αποδειχθεί με διάφορους τρόπους στις εφαρμογές που μελετήθηκαν. Οι κύριες ουσίες που χρησιμοποιούνται ως καταλύτες είναι ο ενεργός άνθρακας, ο ασβεστόλιθος, η αλουμίνα, ο δολομίτης, ο ολιβίνης και το  $CaO$ , ενώ τα κυριότερα οφέλη από την προσθήκη τους στην διεργασία της αεριοποίησης είναι η αύξηση απόδοσης του αερίου σύνθεσης, η μείωση παραγωγής προσμίξεων, η μείωση

παραγωγής πίσσας, η αύξηση θερμογόνου δύναμης του αερίου σύνθεσης και η παραγωγή αερίου σύνθεσης πλούσιου σε  $H_2$  (Chen et al., 2017; Choi et al., 2017; Choi et al., 2018; de Andrés et al. 2011a; de Andrés et al., 2011b, Roche et al., 2014; Schmid et al., 2018).

Αναφορικά με τις εφαρμογές αεριοποίησης βιοστερεών με χρήση υπερκρίσιμου νερού ως μέσο αεριοποίησης, έχουν χρησιμοποιηθεί διάφοροι τύποι βιοστερεών ως υλικά τροφοδοσίας (ακατέργαστη, χωνεμένη, αφυδατωμένη, δευτεροβάθμια και ξηραμένη), ενώ η θερμοκρασία σε αυτό το είδος αεριοποίησης κυμαίνεται από 300 έως 750 °C. Οι περισσότερες μελέτες επικεντρώθηκαν στη διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας, της πίεσης, του χρόνου παραμονής, της περιεκτικότητας σε υγρασία, της περιεκτικότητας σε οργανική ύλη και της προσθήκης καταλύτη στην απόδοση αεριοποίησης, στην απόδοση αεριοποίησης του άνθρακα, στη σύσταση και απόδοση του αερίου σύνθεσης, καθώς και στα χαρακτηριστικά των υγρών και στερεών προϊόντων. Κοινό συμπέρασμα από όλες τις μελέτες είναι ότι οι αυξημένες τιμές θερμοκρασίας ενισχύουν τη διαδικασία αεριοποίησης (Adar et al., 2019; Adar et al., 2020; Chen et al., 2022b; Yan et al., 2021), ενώ και πάλι επιβεβαιώνεται ότι οι καταλύτες παίζουν θετικό ρόλο στην διεργασία (Adar et al., 2020; Chen et al., 2022a; Yan et al., 2021; Zhai et al., 2013).



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) Ρεθύμνου

### 3.1 Γενικές πληροφορίες και παράμετροι σχεδιασμού

Η ΕΕΛ ή ΔΕΥΑ (Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης Αποχέτευσης) Ρεθύμνου (Εικόνα 3.1) λειτουργεί από το 1995 και βρίσκεται στην τοποθεσία Μύτη Γρύντα (3 χλμ δυτικά της πόλης του Ρεθύμνου). Καταλαμβάνει έκταση 35 στρεμμάτων κατά προσέγγιση και δέχεται:

- Λύματα και βοθρολύματα της πόλης του Ρεθύμνου, των παραλιακών οικισμών του ανατολικού Ρεθύμνου, των οικισμών των Δημοτικών Ενοτήτων Ρεθύμνου, Αρκαδίου και Νικηφόρου Φωκά
- Βιομηχανικά υγρά απόβλητα από τις δυτικές και νοτιοδυτικές περιοχές του Ρεθύμνου (βυρσοδεψεία, σφαγεία και τυροκομεία), τα οποία προ-επεξεργάζονται κατάλληλα, ώστε να μπορούν να επεξεργαστούν μαζί με τα αστικά υγρά απόβλητα.



Εικόνα 3.1 Φωτογραφία της ΕΕΛ Ρεθύμνου, συνοδευόμενη από επεξηγηματικό υπόμνημα των εγκαταστάσεων / κτιρίων της.

Οι σχεδιαστικές παράμετροι στις οποίες βασίστηκε η κατασκευή της ΕΕΛ Ρεθύμνου φαίνονται στους Πίνακες 3.1 και 3.2 που ακολουθούν. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με την Απόφαση Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων (ΑΕΠΟ) της ΕΕΛ Ρεθύμνου, Α.Π. οικ.175133/26-09-2014, η οποία είναι αναρτημένη στην ιστοσελίδα του Υπουργείου Περιβάλλοντος Και Ενέργειας, τα δεδομένα σχεδιασμού της υφιστάμενης ΕΕΛ Ρεθύμνου (παρούσα φάση - έτος 2014) και της επέκτασής της (τελική φάση - έτος 2028) φαίνονται στον Πίνακα 3.1. Επίσης, στον Πίνακα 3.2 δίνονται τα δεδομένα στα οποία βασίστηκε ο σχεδιασμός της μονάδας προ-επεξεργασίας βιομηχανικών αποβλήτων (ΑΕΠΟ, 2014).

Πίνακας 3.1 Δεδομένα σχεδιασμού της υφιστάμενης ΕΕΛ Ρεθύμνου (έτος 2014) και της επέκτασής της (έτος 2028) (ΑΕΠΟ, 2014).

| Παράμετρος                               | Παρούσα φάση (2014) | Τελική φάση (2028) |
|--|---------------------|--------------------|
| Ισοδύναμος πληθυσμός (κάτοικοι)          | 74.000              | 126.200            |
| Μέση ημερήσια παροχή (m <sup>3</sup> /d) | 17.880              | 28.170             |
| Παροχή βοθρολυμάτων (m <sup>3</sup> /d)  | 200                 | 200                |
| BOD <sub>5</sub> (kg/d)                  | 4.440               | 7.572              |
| SS (kg/d)                                | 4.800               | 8.100              |
| TKN (kg/d)                               | 750                 | 1.215              |
| TP (kg/d)                                | 240                 | 360                |

Πίνακας 3.2 Δεδομένα σχεδιασμού της μονάδας προ-επεξεργασίας βιομηχανικών αποβλήτων (ΑΕΠΟ, 2014).

| Παράμετρος                                      | Βυρσοδεψία | Σφαγεία | Τυροκομεία |
|---|------------|---------|------------|
| Ημερήσια παροχή (m <sup>3</sup> /d)             | 240        | 200     | 15         |
| BOD <sub>5</sub> (kg/d)                         | 360        | 240     | 450        |
| COD (kg/d)                                      | 960        | 500     | 975        |
| SS (kg/d)                                       | 360        | 300     | 60         |
| Θειούχα (S <sup>2-</sup> ) (kg/d)               | 36         | -       | -          |
| Χρώμιο (Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) (kg/d) | 9.6        | -       | -          |
| Χλωριούχα (kg/d)                                | 480        | 20      | 15         |
| TN (kg/d)                                       | 33,6       | 40      | 25,8       |
| Λίπη - Έλαια (kg/d)                             | 43,2       | 100     | -          |

Στον Πίνακα 3.3 παρουσιάζονται οι μέγιστοι αποδεκτοί μέσοι όροι των συγκεντρώσεων της εκροής της ΕΕΛ, σύμφωνα με την ΚΥΑ 5673/400/1997 (Οδηγία 91/271 ΕΟΚ) και οικείες Νομαρχιακές Αποφάσεις. Παρομοίως, στον Πίνακα 3.4 δίνονται οι οριακές τιμές συγκέντρωσης βαρέων μετάλλων και ορισμένων οργανικών ουσιών στην ιλύ που προορίζεται για χρήση στην γεωργία, δασοπονία ή αποκατάσταση εδάφους.

Πίνακας 3.3 Όρια εκροής ρυπαντικών φορτίων της ΕΕΛ (ΑΕΠΟ, 2014).

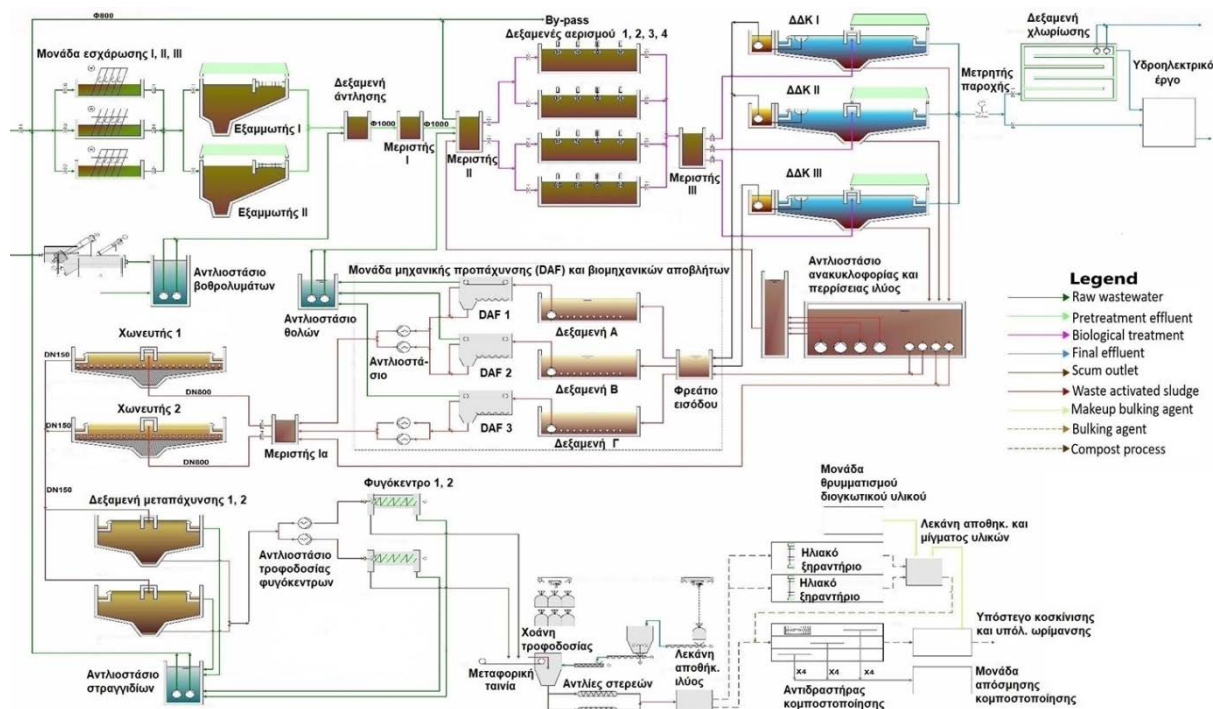
| Παράμετρος  | Τιμή  |
|---|-------|
| BOD <sub>5</sub> (mg/L)                               | ≤ 25  |
| COD (mg/L)  | ≤ 125 |
| SS (mg/L)   | ≤ 35  |
| Καθιζάνοντα στερεά εντός 2 ωρών σε κώνο Imhoff (mL/L) | < 0,3 |
| TN (mg/L)   | < 15  |
| NH <sub>3</sub> -N (mg/L)                             | ≤ 2   |
| Λίπη - Έλαια (mg/L)                                   | < 0,1 |
| Επιπλέοντα στερεά (mg/L)                              | = 0   |
| Κολοβακτηριοειδή (πλήθος/100mL)                       | < 500 |

Πίνακας 3.4 Μέγιστες επιτρεπόμενες συγκεντρώσεις μετάλλων και οργανικών ουσιών στην ιλύ (ΑΕΠΟ, 2014).

| Παράμετρος   | Μέγιστη επιτρεπόμενη συκέντρωση |
|--|---------------------------------|
| Cd (mg/kg ξηράς ουσίας)  | 5                               |
| Cr (ολικό) (mg/kg ξηράς ουσίας)  | 500                             |
| Cu (mg/kg ξηράς ουσίας)  | 800                             |
| Hg (mg/kg ξηράς ουσίας)  | 5                               |
| Ni (mg/kg ξηράς ουσίας)  | 200                             |
| Pb (mg/kg ξηράς ουσίας)  | 500                             |
| Zn (mg/kg ξηράς ουσίας)  | 2500                            |
| Πολυχλωριωμένα διφαινύλια (Polychlorinated biphenyls, PCBs) (mg/kg ξηράς ουσίας)   | 0,8                             |
| Πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs) (mg/kg ξηράς ουσίας)                      | 6                               |
| Πολυχλωριωμένες διοβενζοδιοξίνες/διοβενζοφουράνια (Polychlorinated Dibenzo(p)Dioxin/Furan, PCDD/F) (ng TE/kg ξηράς ουσίας) | 100                             |

### 3.2 Περιγραφή εγκατάστασης - Στάδια επεξεργασίας

Σύμφωνα με την υπ' αριθμόν 175133/26-10-2014 ΑΕΠΟ, η ΕΕΛ Ρεθύμνου δέχεται αστικά λύματα μέσω κεντρικών αποχετευτικών αγωγών, αντλιοστασίων και συλλεκτήρων. Ως προς τα βιομηχανικά υγρά απόβλητα, αυτά εισέρχονται στην μονάδα προ-επεξεργασίας τους μέσω καταθλιπτικών αγωγών, αγωγών βαρύτητας και βυτιοφόρων. Στο Διάγραμμα 3.1 απεικονίζονται όλες οι επιμέρους διεργασίες της ΕΕΛ σε ένα συνολικό διάγραμμα ροής της εγκατάστασης.



Διάγραμμα 3.1 Διάγραμμα ροής της ΕΕΛ Ρεθύμνου με επεξηγηματικό υπόμνημα.

Η ΕΕΛ Ρεθύμνου επεξεργάζεται τα λύματα με την μέθοδο της ενεργού ιλύος με παρατεταμένο αερισμό και αποτελείται από τα εξής στάδια επεξεργασίας:

1. Προ-επεξεργασία

- Φρεάτιο άφιξης λυμάτων
- Εσχάρωση
- Εξάμμωση - Λιποσυλλογή

2. Βιολογική επεξεργασία

- Αερισμός
- Δευτεροβάθμια Καθίζηση
- Αντλιοστάσιο ανακυκλοφορίας και περίσσειας ιλύος

3. Απολύμανση (χλωρίωση) - Διάθεση λυμάτων

4. Επεξεργασία ιλύος

- Μηχανική προ-πάχυνση
- Αερόβια χώνευση
- Μετά-πάχυνση βαρύτητας και αφυδάτωση
- Ηλιακή ξήρανση - Κομποστοποίηση

5. Υποδοχή και εξισορρόπηση βοθρολυμάτων

6. Παραγωγή βιομηχανικού νερού (άρδευση και βοηθητικές χρήσεις)

7. Υποδοχή και προ-επεξεργασία βιομηχανικών αποβλήτων

### 3.2.1 Προ-επεξεργασία

#### Φρεάτιο άφιξης λυμάτων

Στο φρεάτιο άφιξης, το οποίο βρίσκεται εντός του κλειστού κτιρίου προ-επεξεργασίας, καταλήγουν μέσω δικτύου αποχέτευσης τα λύματα, τα στραγγίδια από τα διάφορα τμήματα της ΕΕΛ καθώς και τα προ-επεξεργασμένα βιομηχανικά υγρά απόβλητα. Για περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης, έχει προβλεφθεί διάταξη παράκαμψης που οδηγεί τα λύματα απευθείας στον αγωγό εκβολής (Κεχαγιαδάκη, 2019).

#### Μονάδα εσχάρωσης

Η μονάδα εσχάρωσης βρίσκεται επίσης στο κτίριο προ-επεξεργασίας, το οποίο είναι εφοδιασμένο με πλήρες σύστημα εξαερισμού - απόσμησης. Η εσχάρωση διαθέτει τρία κανάλια πλάτους 0,8 m, εκ των οποίων τα δύο είναι βασικά και το ένα εφεδρικό, αποτελούμενα από ανοξείδωτα ηλεκτροκίνητα θυροφράγματα πριν και μετά τις εσχάρες. Οι εσχάρες είναι ευθύγραμμες αυτοκαθαριζόμενες, με πάχος ράβδων σχάρας 8 mm και πάχος διακένων 10mm.

Η απομάκρυνση των εσχαρισμάτων γίνεται με μηχανισμό που ενεργοποιείται μέσω ελέγχου διαφορικής στάθμης ή μέσω χρονοπρογράμματος. Από τη χοάνη τα εσχαρίσματα μεταφέρονται μέσω μεταφορικού ιμάντα σε ειδικούς κάδους αποκομιδής (Δανδόλου, 2010).

#### Μονάδα εξάμμωσης - λιποσυλλογής

Μετά την εσχάρωση, ακολουθεί η διαδικασία της εξάμμωσης και της λιποσυλλογής, που πραγματοποιούνται και πάλι σε κλειστό κτίριο με κατάλληλους αεραγωγούς για την απόσμηση του αέρα. Τα λύματα αρχικά οδηγούνται σε δίδυμο αεριζόμενο εξαμμητή, ενεργού όγκου 75

m<sup>3</sup> (μήκος 18,60 m, πλάτος 2,00 m, βάθος 2,70 m). Ο εξαμμητός είναι εξοπλισμένος με διαχυτήρες χονδρής φυσαλίδας, οι οποίοι παρέχουν αέρα από δύο φυσητήρες (έναν βασικό και έναν εφεδρικό), δυναμικότητας 330 Nm<sup>3</sup>/d σε μανομετρικό 400 mbar, προκειμένου να αερίζονται επαρκώς τα λύματα. Η απαιτούμενη ποσότητα άμμου είναι 6.513 m<sup>3</sup>/d, η σάρωσή της πραγματοποιείται με κινητή γέφυρα και με τη βοήθεια υποβρύχιων αντλιών οδηγείται στο αυτόματο σύστημα διαχωρισμού της, από όπου συλλέγεται σε ειδικά δοχεία αποκομιδής. Δίπλα απλό τον εξαμμητό υπάρχει το κανάλι ηρεμίας ροής πλάτους 1.05 m, από το οποίο γίνεται η λιποσυλλογή με τη βοήθεια ξέστρου κινητής γέφυρας. Τα συλλεγμένα λίπη και έλαια οδηγούνται σε ειδικό φρεάτιο προς αποκομιδή (Δανδόλου, 2010).

### 3.2.2 Βιολογική επεξεργασία

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τα λύματα στην ΕΕΛ Ρεθύμνου επεξεργάζονται με την μέθοδο της ενεργού ιλύος με παρατεταμένο αερισμό. Επομένως, μετά την προ-επεξεργασία, ακολουθεί η βιολογική επεξεργασία που πραγματοποιείται με αερισμό, δευτεροβάθμια καθίζηση και μερική ανακυκλοφορία της ιλύος.

#### Δεξαμενές αερισμού (ΔΑ)

Η επεξεργασία των αστικών υγρών αποβλήτων με αερισμό περιλαμβάνει τον συνδυασμό βιολογικής αερόβιας και αναερόβιας επεξεργασίας, με σκοπό την μείωση οργανικού, αζωτούχου και φωσφορούχου φορτίου τους, όπως αναφέρθηκε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 1.2.2.

Στην συγκεκριμένη ΕΕΛ υπάρχουν τέσσερις όμοιες ΔΑ, τύπου οξειδωτικής τάφρου, όγκου 1.600 m<sup>3</sup> η καθεμία. Περαιτέρω χαρακτηριστικά των ΔΑ φαίνονται στον Πίνακα 3.5. Οι ΔΑ είναι εφοδιασμένες με επιφανειακούς βραδύστροφους αεριστήρες οριζόντιου άξονα, ισχύος 30 kW ο καθένας, ώστε να επιτυγχάνεται ο αερισμός των λυμάτων. Τα απόβλητα εκρέουν από τις ΔΑ μέσω ηλεκτροκίνητων υπερχειλιστών.

Πίνακας 3.5 Βασικά χαρακτηριστικά δεξαμενών αερισμού (Ματσούκα, 2003).

| Παράμετρος  | Τιμή  |
|---|-------|
| Βάθος υγρού (m)   | 3     |
| Πλάτος (m)  | 6,95  |
| Μήκος (m)   | 45    |
| Χρόνος παραμονής μικροοργανισμών (Solids Retention Time, SRT) (d)                             | 5     |
| Αιωρούμενα Στερεά Μικτού Υγρού (Mixed Liquor Suspended Solids, MLSS)                          | 6.000 |
| Πτητικά Αιωρούμενα Στερεά Μικτού Υγρού (Mixed Liquor Volatile Suspended Solids, MLVSS) (mg/L) | 3.900 |
| Λόγος εσωτερικής ανακυκλοφορίας   | 2     |
| DO (mg/L)   | 2     |

#### Δεξαμενές Δευτεροβάθμιας Καθίζησης (ΔΔΚ)

Μετά τις ΔΑ, τα λύματα καθιζάνουν σε τρεις όμοιες κυκλικές ΔΔΚ διαμέτρου 32 m και δυναμικότητας 7.500 m<sup>3</sup>/d, έκαστη (μέσο βάθος 3,13 m, πλευρικό βάθος 2,65 m). Τα επεξεργασμένα λύματα απομακρύνονται από τις ΔΔΚ μέσω περιμετρικών τριγωνικών υπερχειλιστών και οδηγούνται στο φρεατίου εξόδου. Η δευτεροβάθμια παραγόμενη ιλύς συλλέγεται στο αντλιοστάσιο ανακυκλοφορίας και περισσεΐας ιλύος μέσω υπόγειου αγωγού, από όπου ένα μέρος της επανακυκλοφορεί προς την διάταξη του αερισμού, ενώ η υπόλοιπη



κατευθύνεται προς την γραμμή επεξεργασίας ιλύος, συγκεκριμένα στην μονάδα μηχανικής προ-πάχυνσης. Τέλος, τα επιπλέοντα στερεά απομακρύνονται μέσω ακτινικού επιφανειακού ξέστρου και ακολούθως διοχετεύονται στα φρεάτια επιπλεόντων.

### **Αντλιοστάσιο ανακυκλοφορίας και περίσσειας ιλύος**

Στον υγρό θάλαμο του αντλιοστασίου ανακυκλοφορίας και περίσσειας ιλύος συγκεντρώνεται η καθιζάνουσα δευτεροβάθμια ιλύς. Από εκεί, η ιλύς χωρίζεται σε τρία μέρη:

- Το 1<sup>ο</sup> μέρος ανακυκλοφορεί προς τις ΔΑ, με τη βοήθεια τεσσάρων υποβρύχιων αντλιών. Οι αντλίες αυτές έχουν δυναμικότητα 800 m<sup>3</sup>/d και ισχύ 15 kW, η καθεμία.
- Το 2<sup>ο</sup> μέρος (περίσσεια) ιλύος οδηγείται με υποβρύχια αντλία (δυναμικότητας 46 m<sup>3</sup>/d και ισχύος 3 kW) μέσω καταθλιπτικού αγωγού στη μονάδα προ-πάχυνσης.
- Το 3<sup>ο</sup> μέρος (περίσσεια) ιλύος διοχετεύεται με υποβρύχια αντλία (δυναμικότητας 46 m<sup>3</sup>/d και ισχύος 3 kW) στους αερόβιους χωνευτές.

### **3.2.3 Απολύμανση - Διάθεση λυμάτων**

Μετά την δευτεροβάθμια καθίζηση, και αφού μετρηθεί η παροχή των λυμάτων σε κανάλι Parshall, αυτά οδηγούνται μέσω βαρύτητας στη μονάδα απολύμανσης, όπου υφίστανται χλωρίωση, προκειμένου να απομακρυνθεί το μικροβιακό φορτίο τους, και στη συνέχεια αποχλωρίωση, προκειμένου να εξουδετερωθεί το υπολειμματικό χλώριο. Αρχικά, η χλωρίωση πραγματοποιείται με διάλυμα NaClO περιεκτικότητας 12%, μέσω δοσομετρικής αντλίας δυναμικότητας 70 L/h στο φρεάτιο εισόδου, ενώ η παροχή της αντλίας ρυθμίζεται βάσει των ενδείξεων του μετρητή παροχής. Λεπτομέρειες σχετικά με τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά της δεξαμενής χλωρίωσης μαιανδρικού τύπου δίνονται στον Πίνακα 3.6.

Πίνακας 3.6 Χαρακτηριστικά δεξαμενής χλωρίωσης (Κεχαγιαδάκη, 2019).

| Παράμετρος                         | Τιμή   |
|------------------------------------|--------|
| Μέγιστη παροχή (m <sup>3</sup> /d) | 28.170 |
| Όγκος δεξαμενής (m <sup>3</sup> )  | 560    |
| Αριθμός λωρίδων                    | 6      |
| Μήκος λωρίδας (m)                  | 16,90  |
| Πλάτος λωρίδας (m)                 | 2      |
| Χρόνος επαφής (min)                | 28,6   |

Ακολούθως, γίνεται αποχλωρίωση σε κατάλληλο φρεάτιο με χρήση όξινου θειώδους νατρίου (NaHSO<sub>3</sub>), το οποίο δεσμεύει το υπολειμματικό χλώριο. Για να ρυθμιστεί σωστά η δόση του αποχλωριωτικού υπάρχει εγκατεστημένος μετρητής υπολειμματικού χλωρίου στην έξοδο της δεξαμενής χλωρίωσης. Επίσης, ακριβώς μετά την δεξαμενή χλωρίωσης διάταξη για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω υδροστροβίλου, που συνδέεται με γεννήτρια 60 kW. Τέλος, η διάθεση των λυμάτων πραγματοποιείται με αγωγό εκβολής 580 m σε βάθος 20 m στη θαλάσσια περιοχή του κόλπου Γρύντα.

### **3.2.4 Γραμμή επεξεργασίας ιλύος**

#### **Μονάδα μηχανικής προ-πάχυνσης**

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3.2.2, ένα μέρος της περίσσειας της παραγόμενης δευτεροβάθμιας ιλύος οδηγείται στη μονάδα μηχανικής προ-πάχυνσης. Η μονάδα αυτή

αποτελείται από δύο συστήματα Επίπλευσης Διαλυμένου Αέρα (Dissolved Air Flotation, DAF) και τρεις αεριζόμενες δεξαμενές προσωρινής αποθήκευσης της ιλύος.

Αρχικά, η ιλύς αποθηκεύεται στις τρεις ορθογωνικές δεξαμενές (ωφέλιμος όγκος  $410\text{m}^3$ ), που είναι κατασκευασμένες από οπλισμένο σκυρόδεμα, όπου και αερίζεται με διαχυτήρες λεπτής φυσαλίδας. Μετά, η ιλύς οδηγείται στα δύο συστήματα DAF, μέσω τριών αντλιών δυναμικότητας  $30\text{ m}^3/\text{h}$  και  $2.6\text{ kW}$ , η καθεμία. Το κάθε σύστημα DAF έχει ενεργή επιφάνεια  $23\text{m}^2$  και αποτελείται από (ΑΕΠΟ, 2014):

- Δεξαμενές κατασκευασμένες από ανοξείδωτο χάλυβα, οι οποίες φέρουν διάταξη ξέστρου επιφανείας τύπου αλυσίδας.
- Αντλίες τροφοδοσίας για την κάλυψη των μονάδων σε νερό, η οποία γίνεται με χρήση μέρους της δευτεροβάθμιας εκροής.
- Αυτόματο σύστημα παρασκευής και δοσομέτρησης πολυηλεκτρολύτη συνολικού όγκου  $1.000\text{ L}$  και δυναμικότητας δοσομέτρησης μεταξύ  $100 - 2.000\text{ g/h}$ .
- Αντλίες θετικής εκτόπισης για την έξοδο της λάσπης, με δυναμικότητα  $10\text{ m}^3/\text{h}$ , οι οποίες αναρροφούν την λάσπη από την χοάνη των μονάδων DAF.
- Αντλίες εξόδου θολών νερών δυναμικότητας  $80\text{ m}^3/\text{h}$  και ισχύος  $6.5\text{ kW}$ , η καθεμία.

### **Μονάδα αερόβιας χώνευσης**

Μετά την προ-πάχυνση αλλά και από το αντλιοστάσιο ανακυκλοφορίας και περισσειας της ιλύος (βλέπε Κεφάλαιο 3.2.2), η ιλύς υπόκειται σε αερόβια χώνευση. Για την πραγματοποίηση της διεργασίας χρησιμοποιούνται δύο χωνευτές κυκλικού σχήματος, διαμέτρου  $22\text{ m}$ , επιφάνειας  $380\text{ m}^2$ , βάθους  $3\text{ m}$ , και ωφέλιμου όγκου  $1,150\text{ m}^3$ , ο καθένας (Κεχαγιαδάκη, 2019).

### **Μονάδα μετά-πάχυνσης και αφυδάτωσης**

Ακολούθως της αναερόβιας χώνευσης, η ιλύς υφίσταται μετά-πάχυνση σε δύο κυκλικούς παχυντές βαρύτητας (διάμετρος  $10\text{ m}$ , βάθος  $4,5\text{ m}$ , ωφέλιμος όγκος  $520\text{ m}^3$ ). Η τροφοδοσία της ιλύος γίνεται κεντρικά μέσω του τυμπάνου εισόδου του κινητού ξέστρου, ενώ μέσω των ειδικών κατακόρυφων ράβδων διευκολύνεται η άνοδος των υγρών και η καθίζηση της συμπυκνωμένης ιλύος. Έπειτα, η παχυμένη ιλύς αντλείται με αντλίες θετικής εκτόπισης προκειμένου να οδηγηθεί στην μονάδα αφυδάτωσης, ενώ τα θολά νερά επιστρέφουν στην μονάδα προ-επεξεργασίας της ΕΕΛ (βλέπε Κεφάλαιο 3.2.1).

Η αφυδάτωση της σταθεροποιημένης ιλύος γίνεται σε κλειστό κτίριο με τη χρήση δύο φυγόκεντρων διαχωριστών δυναμικότητας  $450\text{ kg/h}$ , ο καθένας. Για τη μεταφορά του διαλύματος πολυηλεκτρολύτη στο δοχείο ανάμιξης με την ιλύ χρησιμοποιούνται δύο αντλίες θετικής εκτόπισης. Τα στραγγίδια της μονάδας συγκεντρώνονται στο φρεάτιο των στραγγιδίων και από εκεί στην είσοδο της ΕΕΛ. Ακολούθως, η αφυδατωμένη ιλύς οδηγείται μέσω μεταφορικού κοχλία στη μονάδα προσθήκης ασβέστη για την τελική σταθεροποίηση της και στη συνέχεια μέσω αντλιών μεταφέρεται στις λεκάνες αφυδατωμένης ιλύος και μίγματος υλικών.

### **Μονάδα ηλιακής ξήρανσης - κομποστοποίησης**

Το τελευταίο στάδιο επεξεργασίας της ιλύος είναι η ηλιακή ξήρανση - κομποστοποίηση, η οποία πραγματοποιείται μετά την αφυδάτωση. Συγκεκριμένα, ένα μέρος της αφυδατωμένης ιλύος ξηραίνεται ηλιακά. Μετά, μίγμα αφυδατωμένης ιλύος, διογκωτικού υλικού και ξηραμένης

Ιλύος οδηγείται στη μονάδα κομποστοποίησης. Η συνδυασμένη μονάδα ηλιακής ξήρανσης – κομποστοποίησης αποτελείται από τα εξής επιμέρους τμήματα (ΑΕΠΟ, 2014):

- Αντιδραστήρα κομποστοποίησης - βιοξήρανσης που αποτελείται από τρία κανάλια ενεργού πλάτους 3 m, μήκους 70 m και ύψους ιλύος 2 m. Ο ενεργός όγκος του αντιδραστήρα είναι  $1.260 \text{ m}^3$ . Το σύστημα αερισμού αποτελείται από δίκτυο αγωγών και σύστημα διοχέτευσης αέρα δυναμικότητας  $15.000 \text{ m}^3/\text{h}$ .
- Δύο ηλιακά ξηραντήρια τύπου θερμοκηπίου. Το κάθε ηλιακό ξηραντήριο έχει ενεργό πλάτος 24,50 m, μήκος 95 m και ελάχιστο ύψος ιλύος 4 m.
- Μονάδα ωρίμανσης που αποτελείται από χώρο κόσκινου (διαστάσεις 12,35 m x 9 m), χώρο αποθήκευσης χονδρόκοκκου υλικού (διαστάσεις 12,35 m x 9 m), χώρο ωρίμανσης και αποθήκευσης (διαστάσεις 45,50 m x 18 m) και υπόστεγο κοσκίνισης και υπολειπόμενης ωρίμανσης (επιφάνεια  $1.200 \text{ m}^2$ ).
- Χημική πλυντηρίδα απόσμησης κομποστοποίησης διασταυρούμενης ροής (διαστάσεις 95,65 m x 12,85 m).
- Λεκάνες αφυδατωμένης ιλύος και μίγματος υλικών (επιφάνεια  $450 \text{ m}^2$ ).
- Υπόστεγο θρυμματισμού (επιφάνεια  $450 \text{ m}^2$ ) με θρυμματιστή διογκωτικού υλικού δυναμικότητας  $5.050 \text{ tn/h}$ .

### 3.2.5 Βοθρολύματα - Βιομηχανικό νερό - Βιομηχανικά υγρά απόβλητα

#### **Μονάδα υποδοχής - εξισορρόπησης βοθρολυμάτων**

Η μονάδα υποδοχής - εξισορρόπησης των βοθρολυμάτων της ΕΕΛ Ρεθύμνου έχει δυναμικότητα  $90 \text{ m}^3/\text{h}$  και αποτελείται από:

- Χονδροεσχάρα για την αφαίρεση ογκωδών αντικειμένων.
- Λεπτοεσχάρα αυτοκαθαριζόμενη διακένων 6 mm.
- Αεριζόμενο εξαμμωτή (χωρίς λιποσυλλέκτη).
- Δεξαμενή εξισορρόπησης και προ-αερισμού, ενεργού όγκου  $53 \text{ m}^3$ .
- Αντλιοστάσιο κατάθλιψης προς το φρεάτιο εισόδου.

Μετά την ολοκλήρωση της εξισορρόπησης τα βοθρολύματα οδηγούνται με βαρύτητα στη δεξαμενή άντλησης και από εκεί συνεχίζεται η επεξεργασία τους μαζί με τα λύματα.

#### **Μονάδα βιομηχανικού νερού**

Η μονάδα βιομηχανικού νερού της ΕΕΛ έχει δυναμικότητα  $50 \text{ m}^3/\text{h}$  και περιλαμβάνει:

- Διήθηση: Η διήθηση των επεξεργασμένων λυμάτων λαμβάνει χώρα με αμμοδιυλιστήρια καθοδικής ροής. Τα νερά που προκύπτουν από τη διαδικασία της αντίστροφης πλύσης υπερχειλίζουν σε πλευρικά κανάλια και καταλήγουν στο αντλιοστάσιο αφρών.
- Απολύμανση - Αποθήκευση: Τα απόβλητα που υπέστησαν διήθηση, καταλήγουν στη δεξαμενή απολύμανσης χωρητικότητας περίπου  $200 \text{ m}^3$ , όπου απολυμαίνονται και αποθηκεύονται.
- Τροφοδοσία: Η μονάδα βιομηχανικού νερού τροφοδοτεί όλα τα υφιστάμενα τμήματα της ΕΕΛ, καθώς το νερό αυτό χρησιμοποιείται για την άρδευση χώρων πρασίνου και άλλες χρήσεις.

**Μονάδα υποδοχής και προ-επεξεργασίας βιομηχανικών αποβλήτων**

Η μονάδα υποδοχής και προ-επεξεργασίας των βιομηχανικών αποβλήτων δέχεται απόβλητα από βυρσοδεψία, σφαγεία και τυροκομεία (βλέπε Πίνακα 3.2). Τα απαραίτητα στοιχεία για την μονάδα δίνονται στον ακόλουθο Πίνακα 3.7.

Πίνακας 3.7 Μέθοδοι προ-επεξεργασίας και γραμμές επεξεργασίας των βιομηχανικών αποβλήτων ανάλογα την προέλευσή τους (βυρσοδεψία, σφαγεία, τυροκομεία).

|                                 |  |
|---------------------------------|--|
| <b>Προέλευση αποβλήτων</b>      | Βυρσοδεψία   |
| <b>Μέθοδος προ-επεξεργασίας</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Οξείδωση θειούχων</li> <li>Χημική κροκίδωση χρωμίου, αιωρούμενων στερεών, λιπών</li> <li>Αφαίρεση ελαίων με επίπλευση</li> </ul>  |
| <b>Γραμμή επεξεργασίας</b>      | <ul style="list-style-type: none"> <li>Δύο περιστρεφόμενα κόσκινα δυναμικότητας 50 m<sup>3</sup>/h</li> <li>Μέτρηση παροχής ηλεκτρομαγνητικού τύπου</li> <li>Διόρθωση pH με διάλυμα καυστικής σόδας</li> <li>Εξισορρόπηση και οξείδωση θειούχων με αερισμό παρουσία θειικού μαγγανίου σε δίδυμη δεξαμενή εναλλασσόμενης λειτουργίας</li> <li>Κροκίδωση και επίπλευση με διαλυμένο αέρα.</li> </ul> |
| <b>Προέλευση αποβλήτων</b>      | Σφαγεία  |
| <b>Μέθοδος προ-επεξεργασίας</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Χημική κροκίδωση TSS, χρωμίου, λιπών</li> <li>Αφαίρεση λιπών με επίπλευση</li> </ul>  |
| <b>Γραμμή επεξεργασίας</b>      | <ul style="list-style-type: none"> <li>Δύο περιστρεφόμενα κόσκινα δυναμικότητας 50 m<sup>3</sup>/h</li> <li>Μέτρηση παροχής ηλεκτρομαγνητικού τύπου</li> <li>Εξισορρόπηση σε αεριζόμενη δεξαμενή</li> <li>Κροκίδωση με χλωριούχο πολυαργίλιο</li> <li>Επίπλευση με διαλυμένο αέρα</li> </ul>   |
| <b>Προέλευση αποβλήτων</b>      | Τυροκομεία   |
| <b>Μέθοδος προ-επεξεργασίας</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Χημική κροκίδωση TSS, χρωμίου, λιπών</li> <li>Αφαίρεση λιπών με επίπλευση</li> </ul>  |
| <b>Γραμμή επεξεργασίας</b>      | <ul style="list-style-type: none"> <li>Εξισορρόπηση σε αεριζόμενη δεξαμενή</li> <li>Διόρθωση pH με διάλυμα καυστικής σόδας</li> <li>Διβάθμιος αεριζόμενος βιολογικός αντιδραστήρας</li> <li>Κροκίδωση και επίπλευση για περαιτέρω επεξεργασία</li> </ul>   |

Τέλος, τα προ-επεξεργασμένα βιομηχανικά υγρά απόβλητα οδηγούνται στην είσοδο της ΕΕΛ για την περαιτέρω επεξεργασία τους, ενώ η παχυμένη ιλύς οδηγείται με αντλίες εκτόπισης στους δύο αερόβιους χωνευτές της ΕΕΛ.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Σκοπός και μεθοδολογία διδακτορικής διατριβής

### 4.1 Σκοπός

Τα περιβαλλοντικό πρόβλημα με το οποίο ασχολείται κατά βάση η παρούσα διδακτορική διατριβή είναι η μη επαρκής και ασύμφορη ενεργειακά επεξεργασία αστικών υγρών αποβλήτων με τις ευρέως διαδεδομένες ΕΕΛ ενεργού ιλύος.

Συγκεκριμένα, η διατριβή καλείται αφενός να αναδείξει το πρόβλημα μέσα από μία εκτεταμένη μελέτη του ενεργειακού προφίλ των ΕΕΛ της Ελλάδος, αφετέρου να απαντήσει στο καίριο ερευνητικό ερώτημα κατά πόσο είναι ικανή μία καινοτόμα μέθοδος προ-επεξεργασίας λυμάτων (μέσω μικροκοσκίνισης) και αξιοποίησης των παραγόμενων βιοστερεών (μέσω αεριοποίησης) να αποτελέσει λύση του μακροχρόνιου αυτού προβλήματος.

Κατ' επέκταση, στα πλαίσια της διατριβής, πέρα από την ανάδειξη του ενεργειακού προβλήματος των ΕΕΛ ενεργού ιλύος, εξετάζονται και αξιολογούνται σφαιρικά οι τεχνολογίες της προτεινόμενης μεθόδου (μικροκοσκίνιση και αεριοποίηση), οι εφαρμογές τους και η πιθανότητα ευρείας υιοθέτησής τους από τις ΕΕΛ, αξιοποιώντας έτσι το ενεργειακό περιεχόμενο των λυμάτων.

Κύριοι στόχοι της διδακτορικής διατριβής λοιπόν είναι:

1. Η μελέτη του προφίλ των ΕΕΛ της Ελλάδος, ώστε να αναδειχθεί το λειτουργικό και ενεργειακό πρόβλημα της συμβατικής επεξεργασίας λυμάτων με την μέθοδο της ενεργού ιλύος.
2. Ο σχεδιασμός και η κατασκευή μίας πιλοτικής μονάδας προ-επεξεργασίας λυμάτων (μέσω μικροκοσκίνισης) και αξιοποίησης των παραγόμενων βιοστερεών (μέσω αεριοποίησης) με παράλληλη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
3. Η βελτιστοποίηση της λειτουργίας της παραπάνω πιλοτικής μονάδας.
4. Η εξέταση των προτεινόμενων τεχνολογιών (μικροκοσκίνιση και αεριοποίηση) ως προς την αποδοτικότητα τους τόσο η κάθε μία χωριστά όσο και συνδυασμένες σε ένα ενιαίο σύστημα αξιοποίησης βιοστερεών.
5. Ο υπολογισμός του κρίσιμου μεγέθους πάνω από το οποίο μια εγκατάσταση μικροκοσκίνισης - αεριοποίησης ανάντη μιας συμβατικής ΕΕΛ ενεργού ιλύος θα έχει θετικό ενεργειακό ισοζύγιο.
6. Ο χαρακτηρισμός των παραγόμενων βιοστερεών, ο προσδιορισμός σύστασης των παραπροϊόντων της πιλοτικής μονάδας και η πρόταση κατάλληλου τρόπου διαχείρισής τους.

### 4.2 Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία που κρίθηκε κατάλληλη για την απάντηση των ερευνητικών ερωτημάτων της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η εξής:

1. Για να μελετηθεί το ενεργειακό προφίλ των ΕΕΛ της Ελλάδος, πραγματοποιήθηκε συλλογή στοιχείων από τους υπεύθυνους λειτουργίας ενός αριθμού ΕΕΛ μέσω ερωτηματολογίου. Ακολούθησε η επεξεργασία των δεδομένων αυτών και η εξαγωγή βασικών συμπερασμάτων.



2. Για τον σχεδιασμό και την κατασκευή της πιλοτικής μονάδας προ-επεξεργασίας λυμάτων και αξιοποίησης των παραγόμενων βιοστερεών έγινε ο κατάλληλος σχεδιασμός με βάση τις απαιτούμενες προδιαγραφές. Κατόπιν πραγματοποιήθηκαν αναλυτικές μελέτες κατασκευής και τέλος υλοποιήθηκε η κατασκευή των διαφόρων μερών της μονάδας σε εξειδικευμένα μηχανουργεία.
3. Για την βελτιστοποίηση της πιλοτικής μονάδας, κατά την διάρκεια λειτουργίας της, έγιναν μεταβολές σε διάφορες παραμέτρους, μέχρι να βρεθούν οι βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας της πιλοτικής μονάδας.
4. Για την μελέτη της αποδοτικότητας της μικροκοσκίνισης και της αεριοποίησης, πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις σε κάθε στάδιο της πιλοτικής μονάδας, ώστε να συλλεχθούν τα απαραίτητα δεδομένα για την αξιολόγηση των προτεινόμενων τεχνολογιών.
5. Για να υπολογιστεί το κρίσιμο μέγεθος πάνω από το οποίο η μονάδα θα έχει θετικό ενεργειακό ισοζύγιο, έγιναν κατάλληλοι υπολογισμοί ισοζυγίων μάζας και ενέργειας.
6. Για να γίνει ο χαρακτηρισμός των παραγόμενων βιοστερεών, να προσδιοριστούν τα παραπροϊόντα της πιλοτικής μονάδας και να προταθεί κατάλληλος τρόπος διαχείρισής τους, διεξήχθησαν πειραματικές διαδικασίες/αναλύσεις σε όλα τα στάδια επεξεργασίας και έπειτα έγινε επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. Έργο LIFE B2E4sustainable-WWTP

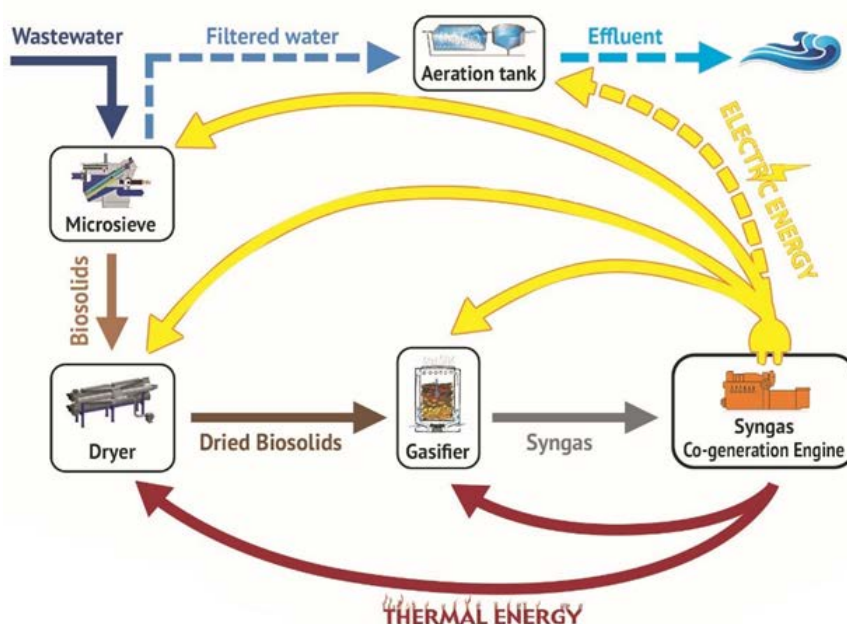
### 5.1 Θεωρητικό υπόβαθρο - Στόχοι του έργου

Είναι κατά κανόνα αποδεκτό ότι οι υπερφορτωμένες ΕΕΛ ενεργού ιλύος λειτουργούν με μειωμένη αποδοτικότητα, γεγονός που σε συνδυασμό με τις υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις τους και την ανεπαρκή διαχείριση βιοστερεών αποτελεί καίριο ζήτημα, που χρήζει άμεσης αντιμετώπισης, καθώς επηρεάζει αρνητικά το περιβάλλον, την οικονομία και την ανθρώπινη υγεία. Λύση στα προαναφερθέντα προβλήματα θα μπορούσε να αποτελέσει ένα καινοτομικό σύστημα αξιοποίησης βιοστερεών, που θα στοχεύει στην αναβάθμιση υπερφορτωμένων ΕΕΛ, στην προστασία του υδάτινου περιβάλλοντος από ρύπανση εξαιτίας εκροών των ΕΕΛ, στην βιώσιμη διαχείριση βιοστερεών και στην παραγωγή ενέργειας από τα πλούσια σε ενεργειακό περιεχόμενο βιοστερεά.

Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής, μία τέτοια πιλοτική μονάδα προ-επεξεργασίας των λυμάτων και αξιοποίησης των παραγόμενων βιοστερεών με δυναμικότητα 5000 m<sup>3</sup>/d αποβλήτων, έχει υλοποιηθεί στην ΕΕΛ Ρεθύμνου, αποτελούμενη κατά σειρά από (Διάγραμμα 5.1) (Manali and Gikas, 2019a; Manali and Gikas, 2019b):

- **Μικροκόσκινο** (Microsieve), για την απομάκρυνση μέρους των στερεών προτού εισέλθουν στην δεξαμενή αερισμού.
- **Ξηραντήριο** (Dryer), για την αφαίρεση υγρασίας των παραγόμενων μικροκοσκινισμένων βιοστερεών.
- **Αεριοποιητή** (Gasifier), για την παραγωγή αερίου σύνθεσης από τα βιοστερεά.
- **Μηχανή Εσωτερικής Καύσης** - MEK (Co-generation Engine), για την παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, από την καύση του παραγόμενου αερίου σύνθεσης, που θα χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της πιλοτικής μονάδας.

Τα προσδοκώμενα αποτελέσματα είναι η αύξηση των επιδόσεων της ΕΕΛ, η αξιοποίηση της ιλύος με ταυτόχρονη μείωση του όγκου της, καθώς και η μείωση των ενεργειακών αναγκών της δεξαμενής αερισμού.

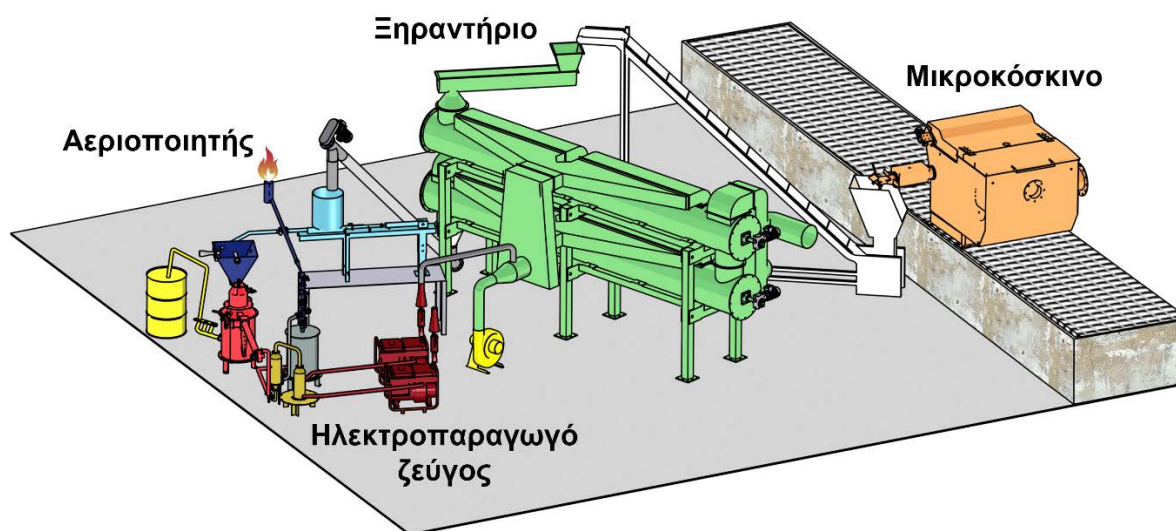


Διάγραμμα 5.1 Διάγραμμα ροής της πιλοτικής μονάδας προ-επεξεργασίας των λυμάτων και αξιοποίησης των παραγόμενων βιοστερεών του έργου LIFE B2E4sustainable-WWTP (Manali and Gikas, 2019a).

Η πιλοτική μονάδα υλοποιείται στα πλαίσια του ευρωπαϊκού ερευνητικού έργου με τίτλο: «New concept for energy self-sustainable wastewater treatment process and biosolids management, LIFE B2E4sustainable-WWTP», LIFE16 ENV/GR/000298, το οποίο συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή και το Πράσινο Ταμείο.

## 5.2 Σχεδιασμός - περιγραφή πιλοτικής μονάδας προ-επεξεργασίας των λυμάτων και αξιοποίησης των παραγόμενων βιοστερεών

Η πιλοτική μονάδα προ-επεξεργασίας των λυμάτων και αξιοποίησης των παραγόμενων βιοστερεών απεικονίζεται τρισδιάστατα στην Εικόνα 5.1. Επίσης, στην Εικόνα 5.2 φαίνεται η ακριβής τοποθεσία της πιλοτικής μονάδας εντός της ΕΕΛ Ρεθύμνου, ενώ την Εικόνα 5.3 δίνεται φωτογραφία της πιλοτικής μονάδας όπως είναι εγκατεστημένη στην ΕΕΛ Ρεθύμνου.



Εικόνα 5.1 Τρισδιάστατη απεικόνιση της πιλοτικής μονάδας προ-επεξεργασίας των λυμάτων και αξιοποίησης των παραγόμενων βιοστερεών του έργου LIFE B2E4sustainable-WWTP (Manali and Gikas, 2022; Manali et al., 2022a).



Εικόνα 5.2 Αεροφωτογραφία της ΕΕΛ Ρεθύμνου με σημειωμένη την ακριβή τοποθεσία εγκατάστασης της πιλοτικής μονάδας του έργου LIFE B2E4sustainable-WWTP.



Εικόνα 5.3 Φωτογραφία της εγκατεστημένης πιλοτικής μονάδας προ-επεξεργασίας των λυμάτων και αξιοποίησης των παραγόμενων βιοστερεών του έργου LIFE B2E4sustainable-WWTP στην ΕΕΛ Ρεθύμνου.

Εκτός των βασικών μερών της πιλοτικής μονάδας (μικροκόσκινο, ξηραντήριο, αεριοποιητής, MEK), έχουν ενσωματωθεί σε αυτή και άλλα συμπληρωματικά μέρη, απαραίτητα για την εύρυθμη λειτουργία της, τα βασικότερα από τα οποία είναι:

- Σύστημα ανακυκλοφορίας του νερού πλύσης του μικροκόσκινου και των στραγγισμάτων των μικροκοσκινισμένων βιοστερεών, με σκοπό την ανάκτηση τυχόν απωλειών στερεών που βρίσκονται στα εισερχόμενα λύματα (περιγράφεται στο Κεφάλαιο 5.2.1).
- Σύστημα κροκίδωσης, το οποίο τροφοδοτεί με κροκιδωτικά μέσα τα εισερχόμενα λύματα, ώστε να μελετηθεί η συμβολή της κροκίδωσης στην αποδοτικότητα της μικροκοσκίνισης (περιγράφεται στο Κεφάλαιο 5.2.1).
- Συνδυαστικό σύστημα τροφοδοσίας του ξηραντηρίου, το οποίο προσφέρει την δυνατότητα εισόδου τόσο μικροκοσκινισμένων βιοστερεών όσο και ξηραμένης δευτεροβάθμιας ιλύος στο ξηραντήριο, για την μελέτη λειτουργίας της πιλοτικής μονάδας υπό διάφορες αναλογίες ανάμιξης των δύο αυτών υλικών (περιγράφεται στο Κεφάλαιο 5.2.2).
- Σύστημα ψύξης και καθαρισμού του παραγόμενου αερίου σύνθεσης, με σκοπό αφενός την απομάκρυνση ανεπιθύμητων προσμίξεων που περιέχονται στο αέριο σύνθεσης αμέσως μετά την έξοδό του από τον αεριοποιητή, αφετέρου την προετοιμασία του για να εισέλθει στην MEK (περιγράφεται στο Κεφάλαιο 5.2.3).

Όλα τα επιμέρους τμήματα της πιλοτικής μονάδας (μικροκόσκινο, ξηραντήριο, μονάδα αεριοποίησης - παραγωγής ενέργειας) συνδέονται με ανεξάρτητους ηλεκτρολογικούς πίνακες τροφοδοσίας, οι οποίοι είναι εξοπλισμένοι με όλα τα απαραίτητα εξαρτήματα για την ομαλή λειτουργία των συστημάτων, όπως διακόπτες, ασφάλειες, μετατροπείς, κ.λπ. Επίσης, η πιλοτική μονάδα στο σύνολό της εναρμονίζεται με όλες τις σχετικές ευρωπαϊκές οδηγίες, είναι εξοπλισμένη με τα απαραίτητα συστήματα ασφαλείας, και τα επιμέρους τμήματά της επικοινωνούν μέσω συστήματος αυτοματισμού.

Παρακάτω, ακολουθεί εκτενής περιγραφή όλων των μερών της πιλοτικής μονάδας με αναλυτικά στοιχεία αναφορικά με τον σχεδιασμό και την κατασκευή τους.



### 5.2.1 Μικροκοσκίνιση

Το υπόβαθρο της τεχνολογίας της μικροκοσκίνισης αναλύθηκε και στο Κεφάλαιο 2.4.1. Τα βασικά χαρακτηριστικά της τεχνολογίας συνοψίζονται ακολούθως:

- Βασίζεται στην απομάκρυνση στερεών μέσω διήθησης.
- Παράγει βιοστερεά με υψηλή περιεκτικότητα σε στερεά.
- Απαιτεί σημαντικά μικρότερο χώρο συγκριτικά με μία διάταξη πρωτοβάθμιας καθίζησης.
- Τα παραγόμενα μικροκοσκινισμένα βιοστερεά μπορούν να αξιοποιηθούν περαιτέρω, μέσω αεριοποίησης ή άλλων τεχνολογιών.

Στα πλαίσια του έργου LIFE B2E4sustainable-WWTP, χρησιμοποιήθηκαν δύο μικροκόσκινα με ίδια αρχή λειτουργίας (RBF). Συγκεκριμένα, το ένα μικροκόσκινο (αποκαλούμενο εφεξής πειραματικό) βρισκόταν ήδη στην ΕΕΛ Ρεθύμνου και χρησιμοποιήθηκε για προκαταρκτικές μετρήσεις (Εικόνα 5.4, αριστερά). Οι μετρήσεις αυτές βοήθησαν στον κατάλληλο σχεδιασμό και κατασκευή του δεύτερου μικροκόσκινου (αποκαλούμενο εφεξής πιλοτικό) (Εικόνα 5.4, δεξιά).



Εικόνα 5.4 Φωτογραφίες πειραματικού (αριστερά) και πιλοτικού (δεξιά) μικροκόσκινου, που χρησιμοποιήθηκαν στο έργο LIFE B2E4sustainable-WWTP.

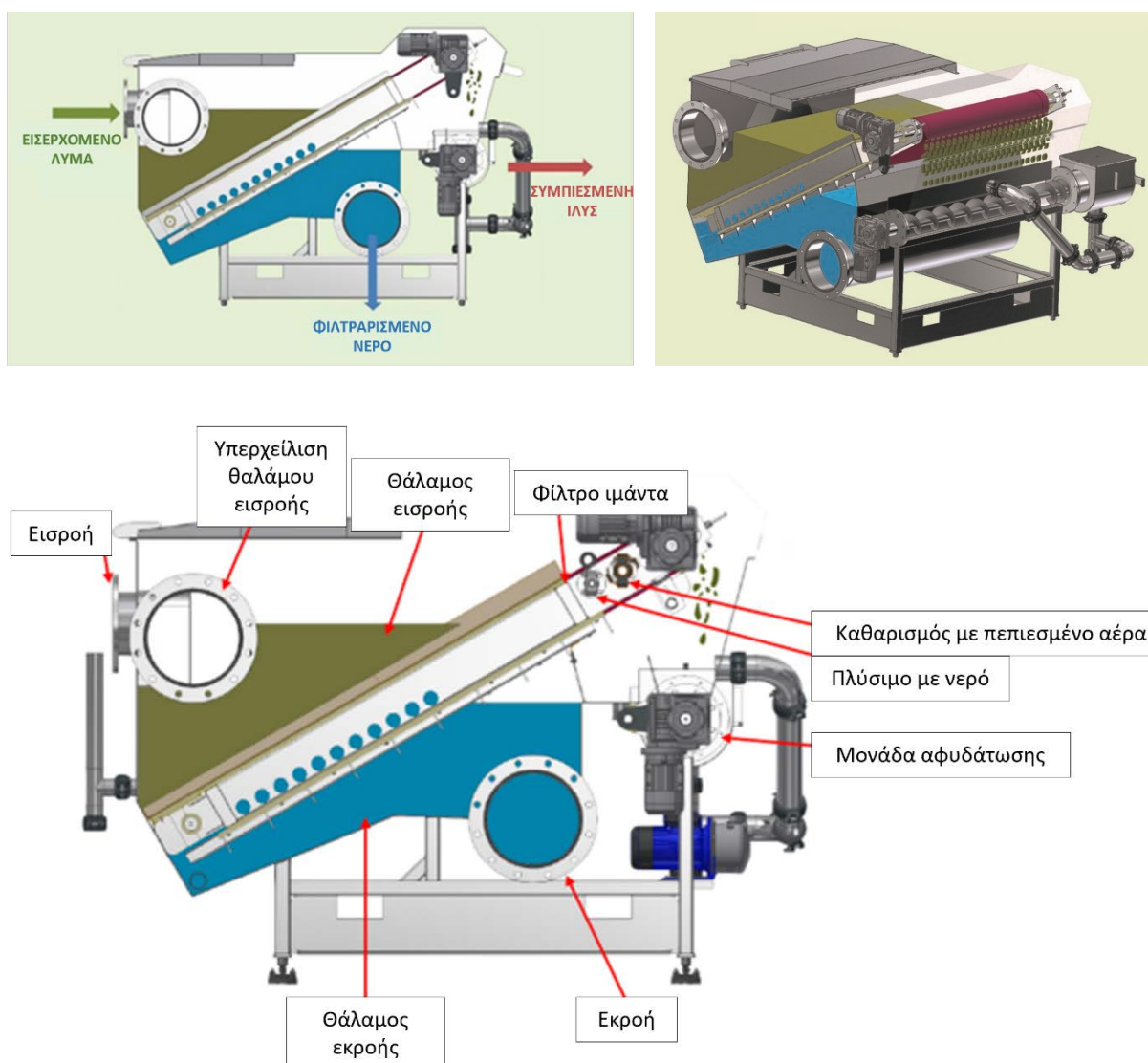
Όσον αφορά το πιλοτικό μικροκόσκινο, έχει δυναμικότητα επεξεργασίας έως 200 m<sup>3</sup>/h εισερχόμενου αποβλήτου, οι διαστάσεις του είναι 2.477 x 1.400 x 1.758 cm (μήκος x πλάτος x ύψος) και είναι κατασκευασμένο από ανοξείδωτο χάλυβα (AISI 304, AISI 316). Τα βασικά μέρη του μικροκόσκινου απεικονίζονται στην Εικόνα 5.5 και είναι τα ακόλουθα:

- **Θάλαμος εισροής** από όπου πραγματοποιείται η είσοδος του αποβλήτου στο μικροκόσκινο, με τη βοήθεια υποβρύχιας φυγοκεντρικής αντλίας που έχει εγκατασταθεί εντός καναλιού που βρίσκεται σε κοντινή απόσταση, μέσα στο κτίριο της εξάμμωσης.
- **Θάλαμος μικροκοσκίνισης**, στον οποίο υπάρχει φίλτρο περιστρεφόμενου ιμάντα, κατασκευασμένο από πολυεστερικό ύφασμα, πλάτους 1.100 cm, με άνοιγμα πόρων 250 ή 350 μm. Η ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής του ιμάντα γίνεται με αυτόματο ρυθμιστή στροφών και κυμαίνεται από 4,5 μέχρι 7,5 m/min. Στον θάλαμο αυτόν πραγματοποιείται η μικροκοσκίνιση του αποβλήτου, η οποία επιτυγχάνεται μέσω του ιμάντα, αλλά ενισχύεται και λόγω της δημιουργίας ενός στρώματος βιοστερεών τα οποία επενδύουν την επιφάνεια του ιμάντα με αποτέλεσμα να λειτουργούν σαν επιπλέον φίλτρο. Αφού δημιουργηθεί αυτό το στρώμα βιοστερεών πάνω στον ιμάντα, αυτά αφαιρούνται με την βοήθεια μηχανικού ξέστρου και νερού, και ακολούθως κατευθύνονται στην μονάδα αφυδάτωσης.
- **Διάταξη πλύσης ιμάντα** όπου καθαρίζεται ο ιμάντας με αέρα και νερό, ώστε να απαλλαχθεί από υπολείμματα βιοστερεών και να ξεκινήσει πάλι η διαδικασία της φίλτρανσης. Για την πλύση του ιμάντα χρησιμοποιείται βιομηχανικό νερό από την ΕΕΛ



Ρεθύμνου, το οποίο όμως έχει χαμηλή πίεση, γεγονός που οδηγούσε στην αναποτελεσματική πλύση του ιμάντα. Για να λυθεί το πρόβλημα, εγκαταστάθηκε δίπλα στο μικροκόσκινο μία δεξαμενή πολυαιθυλενίου όπου συλλέγεται το νερό και από εκεί οδηγείται στον ιμάντα με την απαραίτητη πίεση.

- **Θάλαμος εκροής** στον οποίο οδηγείται το φιλτραρισμένο απόβλητο που έχει προκύψει από την διαδικασία της μικροκοσκίνισης. Ο θάλαμος εκροής είναι σφραγισμένος, γεγονός που συμβάλει σε καλύτερη ποιότητα εκροής και σε αποτελεσματικότερη λειτουργία του μικροκόσκινου, εφόσον αποφεύγεται η ανάμιξη εισροής - εκροής.
- **Μονάδα αφυδάτωσης** αποτελούμενη από μεταφορικό περιστρεφόμενο κοχλία και θάλαμο συμπίκνωσης/συμπίεσης. Τα βιοστερεά που έχουν συλλεχθεί μέσω του ξέστρου από τον ιμάντα στον θάλαμο μικροκοσκίνισης, μεταφέρονται με περιστρεφόμενο κοχλία προς τον θάλαμο συμπίκνωσης, όπου αφαιρείται επιπλέον υγρασία με αποτέλεσμα την δημιουργία των μικροκοσκινισμένων βιοστερεών στην τελική τους μορφή (Εικόνα 5.6, αριστερά).



Εικόνα 5.5 Τρισδιάστατη και δισδιάστατες απεικονίσεις του μικροκόσκινου με επεξήγηση των διαφόρων τμημάτων του (Manali and Gikas, 2022; Manali et al., 2022b).

Συμπληρωματικά ως προς το μικροκόσκινο, σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν τα εξής δύο συστήματα, προκειμένου να εξασφαλιστεί η μέγιστη δυνατή απόδοσή του:

- **Σύστημα ανακυκλοφορίας** του νερού πλύσης του μικροκόσκινου και των στραγγισμάτων των μικροκοσκινισμένων βιοστερεών (Εικόνα 5.6, μέση), με σκοπό την ανάκτηση τυχόν απωλειών στερεών που βρίσκονται στα εισερχόμενα λύματα, που έγιναν αντιληπτές λόγω της μεγάλης διαφοράς της θεωρητικής παραγωγής βιοστερεών (διαφορά TSS εισόδου-εξόδου) συγκριτικά με την πραγματική (παραγόμενα μικροκοσκινισμένα βιοστερεά). Το σύστημα αποτελείται από μία δεξαμενή στην οποία συλλέγεται το νερό πλύσης και τα στραγγίσματα των βιοστερεών και κατόπιν επιστρέφει στην είσοδο του μικροκόσκινου.
- **Σύστημα κροκίδωσης** (Εικόνα 5.6, δεξιά), το οποίο τροφοδοτεί με κροκιδωτικά μέσα τα εισερχόμενα λύματα, ώστε να μελετηθεί η συμβολή της κροκίδωσης στην αποδοτικότητα της μικροκοσκίνισης. Το σύστημα αποτελείται από δοσομετρική αντλία μέσω της οποίας γίνεται τροφοδοσία του εισερχόμενου αποβλήτου με κροκιδωτικό μέσο εντός μίας δεξαμενής πολυαιθυλενίου. Το απόβλητο εισέρχεται στο μικροκόσκινο, αφού πρώτα αναμιχθεί επαρκώς με το κροκιδωτικό με την χρήση στατικού αναμεικτήρα και παραμένει περίπου 1,5 - 2 min στην δεξαμενή για να προλάβουν να δημιουργηθούν κροκίδες. Περισσότερες φωτογραφίες του συστήματος κροκίδωσης υπάρχουν στο [Παράρτημα](#).



Εικόνα 5.6 Τα παραγόμενα μικροκοσκινισμένα βιοστερεά στην τελική τους μορφή (αριστερά), δεξαμενή ανάκτησης στερεών (μέση), μικροκόσκινο με σύστημα κροκίδωσης από πίσω του (δεξιά).

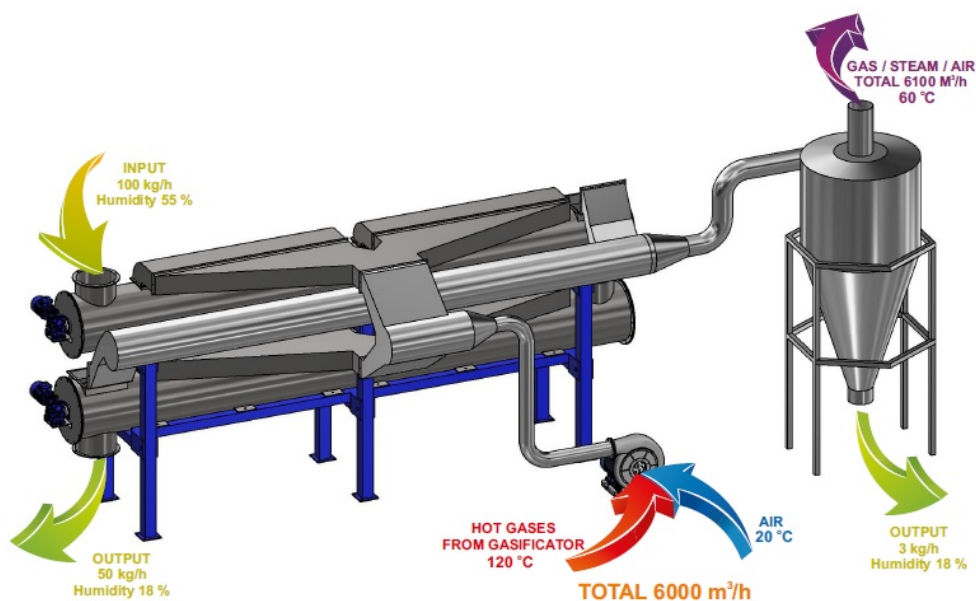
### 5.2.2 Ξήρανση

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω (βλέπε Κεφάλαιο 5.2), το ξηραντήριο τροφοδοτείται μέσω ενός συνδυαστικού συστήματος, το οποίο προσφέρει την δυνατότητα τροφοδοσίας τόσο μικροκοσκινισμένων βιοστερεών όσο και ξηραμένης δευτεροβάθμιας ιλύος, για την μελέτη λειτουργίας της πιλοτικής μονάδας υπό διάφορες αναλογίες ανάμιξης των δύο αυτών υλικών. Το σύστημα αυτό αποτελείται από χοάνες και μεταφορικούς κοχλίες για τα μικροκοσκινισμένα βιοστερεά και την ξηραμένη δευτεροβάθμια ιλύ, ζυγιστικό/δοσομετρικό δοχείο που δέχεται τα δύο αυτά υλικά και αναβατήριο για την τροφοδοσία του ξηραντηρίου, με χωρητικότητα 60 kg υλικού ανά κουβά (Εικόνα 5.7).



Εικόνα 5.7 Φωτογραφίες του συνδυαστικού συστήματος τροφοδοσίας του ξηραντηρίου (χοάνες και μεταφορικοί κοχλίες για τα μικροκοσκινισμένα βιοστερεά και την ξηραμένη δευτεροβάθμια ιλύ, ζυγιστικό/δοσομετρικό δοχείο και αναβατήριο).

Το ξηραντήριο της πιλοτικής μονάδας απεικονίζεται τρισδιάστατα στην Εικόνα 5.8. Το συγκεκριμένο ξηραντήριο βασίζει τη λειτουργία του στην υπό ανάδευση επαφή υγρού υλικού με θερμό αέρα που παράγεται από τον αεριοποιητή ως καυσάεριο.



Εικόνα 5.8 Τρισδιάστατη απεικόνιση του πιλοτικού ξηραντηρίου και του κυκλώνα του.

Αναλυτικότερα, ειδικοί κοχλίες μεταφοράς και ταυτόχρονης συνεχούς ανάδευσης εξασφαλίζουν τη σταθερότητα του υλικού στη ροή θερμού αέρα καθ' όλη τη γραμμή ξήρανσης. Το ξηραντήριο είναι εξοπλισμένο με σύστημα διανομής θερμού αέρα, μέσω του οποίου εισάγεται ζεστός και ξηρός αέρας στην γραμμή ξήρανσης. Στο τέλος της γραμμής ξήρανσης, αναρροφάται υγρός αέρας από το κύκλωμα αναρρόφησης, το οποίο έπειτα εκκενώνεται σε κυκλώνα για να δεσμεύσει πτητικά και ελαφρά σωματίδια. Η έξοδος της γραμμής ξήρανσης, η



οποία θα ήταν η τελική έξοδος των ξηραμένων βιοστερεών, αναμιγνύεται με το υλικό που συλλέγεται από τον κυκλώνα και κατόπιν οδηγείται στον αεριοποιητή. Στον Πίνακα 5.1 περιγράφονται ορισμένα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του ξηραντηρίου, ενώ στην Εικόνα 5.9 δίνονται φωτογραφίες του ξηραντηρίου.

Πίνακας 5.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά του πιλοτικού ξηραντηρίου.

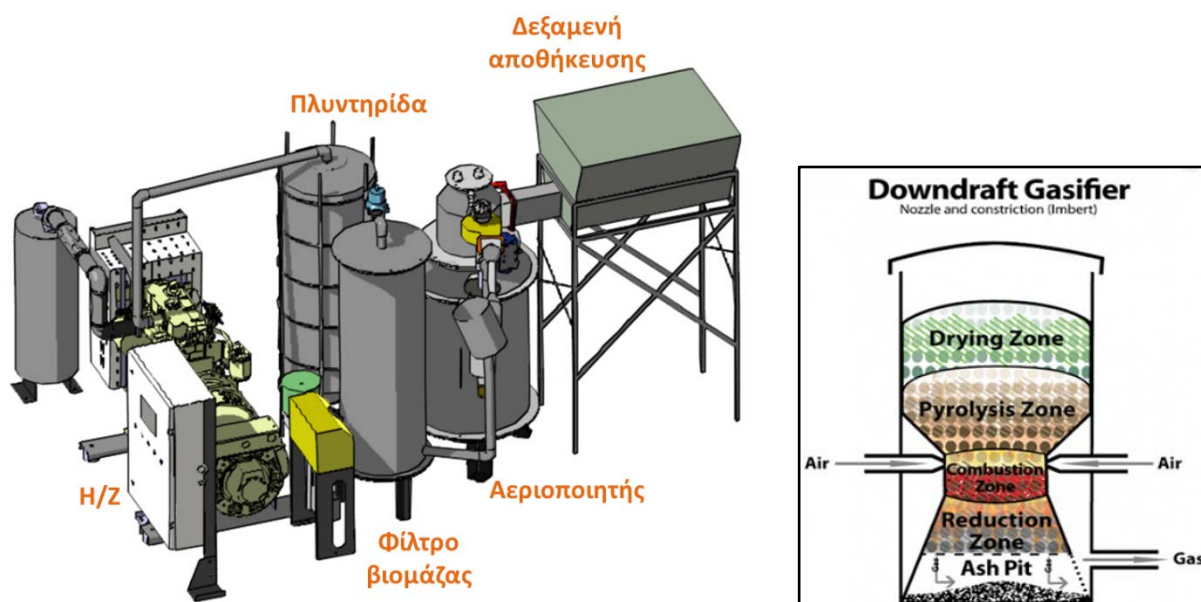
| Παράμετρος                 | Περιγραφή  |
|----------------------------|--|
| Χωρητικότητα ξηραντηρίου   | Έως 150 kg/h   |
| Πρώτη ύλη                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Φαινομενική πυκνότητα &gt; 500 kg/m<sup>3</sup></li> <li>Υγρασία περίπου 55 – 75 %</li> </ul>   |
| Τελικό προϊόν              | <ul style="list-style-type: none"> <li>Φαινομενική πυκνότητα &gt; 250 kg/m<sup>3</sup></li> <li>Υγρασία περίπου 10 – 15 %</li> </ul>   |
| Ηλεκτρικά τεχνικά στοιχεία | <ul style="list-style-type: none"> <li>Τάση λειτουργίας 400 V/50 Hz</li> <li>Τάση μεταγωγής 230 V/50 Hz</li> <li>Προστασίες IP 54 για τους ηλεκτροκινητήρες και τα κουτιά διακλάδωσης, IP 40 για τις ομάδες ελέγχου και διανομής</li> <li>Καλωδίωση σύμφωνα με τον κανονισμό VDE 0100</li> </ul> |
| Θερμοκρασία                | <ul style="list-style-type: none"> <li>Στο εσωτερικό των γραμμών έως 110 °C</li> <li>Θερμοκρασία περιβάλλοντος +8 °C έως +30 °C</li> </ul>   |
| Δύο γραμμές ξήρανσης       | <ul style="list-style-type: none"> <li>Διάμετρος 600 mm, μήκος 6.000 mm η κάθε μία</li> <li>Ανοξείδωτο περίβλημα</li> <li>Κατακόρυφες αρθρώσεις των γραμμών</li> <li>Κύκλωμα παροχής ζεστού αέρα</li> <li>Κύκλωμα αναρρόφησης αέρα και σκόνης</li> <li>Αισθητήρας υγρασίας</li> </ul>            |
| Σύστημα συλλογής σκόνης    | Κυκλώνας 600 mm  |



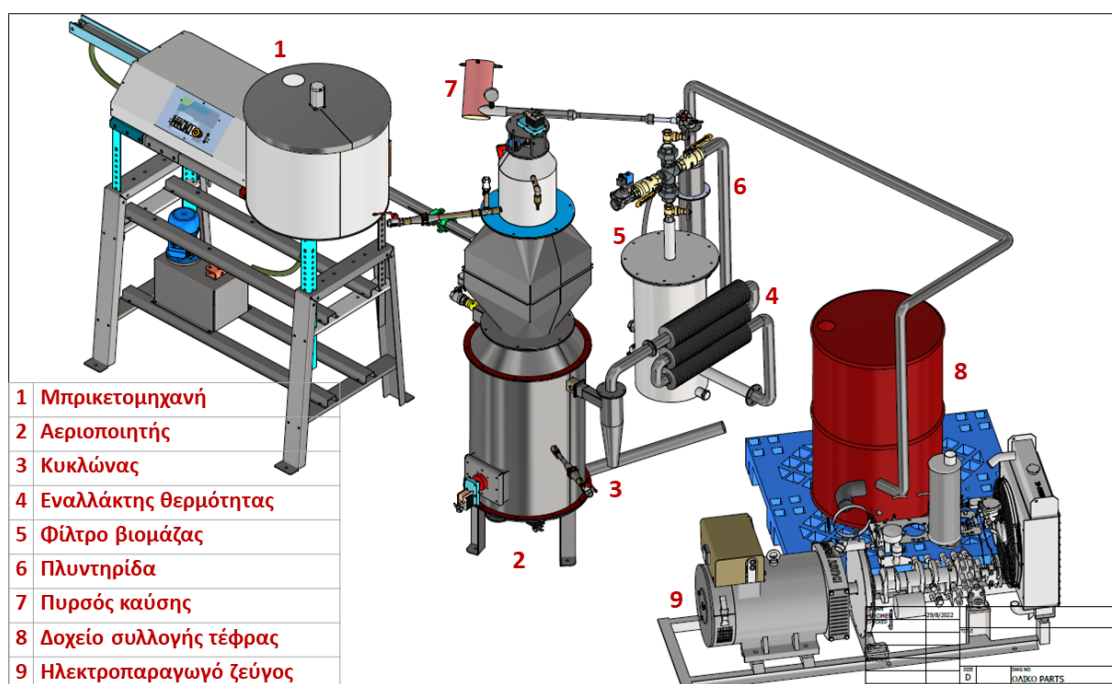
Εικόνα 5.9 Φωτογραφίες του πιλοτικού ξηραντηρίου του έργου LIFE B2E4sustainable-WWTP.

### 5.2.3 Αεριοποίηση - Παραγωγή ενέργειας

Η αεριοποίηση (τεχνολογία, επεξεργασία του αερίου σύνθεσης, εφαρμογές) συζητήθηκε ενδελεχώς στα Κεφάλαια 2.5.2 - 2.5.3 - 2.5.4. Στα πλαίσια του έργου LIFE B2E4sustainable-WWTP, πραγματοποιήθηκε αεριοποίηση βιοστερεών με χρήση αντιδραστήρια καθοδικής ροής (downdraft gasifier) (Εικόνα 5.10, δεξιά) και επιλέχθηκε το «ψυχρό μονοπάτι» (cold route) για την επεξεργασία του παραγόμενου αερίου σύνθεσης. Κατόπιν, επιλέχθηκε να γίνει καύση του αερίου σύνθεσης σε ΜΕΚ ή Ηλεκτροπαραγωγό Ζεύγος (ΗΖ), με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της πιλοτικής μονάδας. Τα βασικά μέρη του συστήματος αεριοποίησης - παραγωγής ενέργειας απεικονίζονται τρισδιάστατα στις Εικόνες 5.10 (αριστερά) και 5.11.



Εικόνα 5.10 Τρισδιάστατη απεικόνιση του πιλοτικού συστήματος αεριοποίησης - παραγωγής ενέργειας (αριστερά) και απεικόνιση του αεριοποιητή καθοδικής ροής (δεξιά).

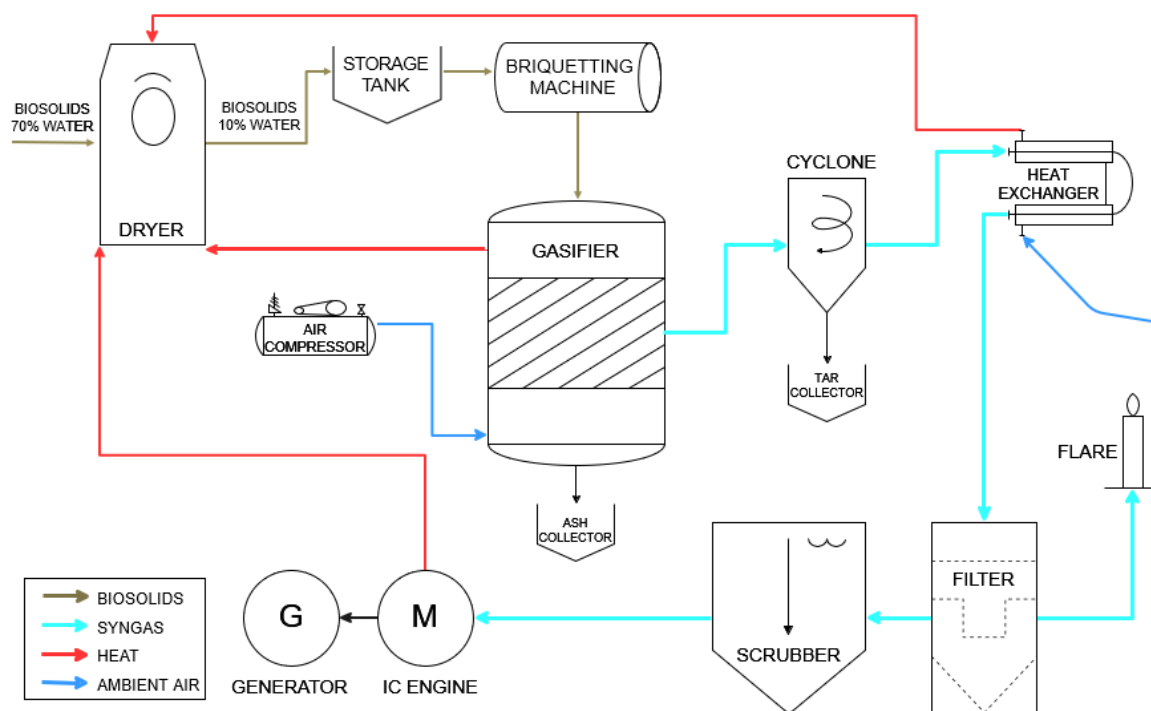


Εικόνα 5.11 Τρισδιάστατη απεικόνιση και χωροθέτηση του συστήματος αεριοποίησης - παραγωγής ενέργειας του έργου LIFE B2E4sustainable-WWTP, με επεξηγηματικό υπόμνημα.



Η διαδικασία ξήρανσης - αεριοποίησης - παραγωγής ενέργειας περιγράφεται διαγραμματικά στην Εικόνα 5.12. Τα βασικά μέρη του συστήματος αναλύονται παρακάτω (Manali and Gikas, 2022; Pothoulaki et al., 2022):

- **Σύστημα εισόδου** μέσω του οποίου συνδέεται το ξηραντήριο (dryer) με το σύστημα αεριοποίησης, ώστε να γίνεται η τροφοδοσία των ξηραμένων βιοστερεών (με περιεχόμενη υγρασία 10-15%, η οποία είναι η βέλτιστη για την συγκεκριμένη τεχνολογία αεριοποίησης).
- **Δεξαμενή αποθήκευσης** (storage tank) των ξηραμένων βιοστερεών, καλυμμένη για την αποφυγή απορρόφησης υγρασίας και εξοπλισμένη με αισθητήρα πλήρωσης κατάλληλο για περιβάλλον με σκόνη.
- **Μπρικετομηχανή** (briquetting machine) για την διαμόρφωση των ξηραμένων βιοστερεών σε μπρικέτες, διαδικασία απαραίτητη για την συγκεκριμένη τεχνολογία αεριοποίησης, καθώς έχει παρατηρηθεί ότι αν η βιομάζα εισαχθεί σε σκόνη φράζει ο αντιδραστήρας και δημιουργούνται σοβαρά λειτουργικά προβλήματα. Η μπρικετομηχανή έχει δυναμικότητα παραγωγής μπρικέτας έως 100 kg/h, ισχύ 15 kW, παράγει μπρικέτα διαμέτρου 4 cm, και είναι εξοπλισμένη με σύστημα τεμαχισμού ώστε να μεταβάλλεται το μήκος μπρικέτας και με σύστημα μεταφοράς (με μεταφορική ταινία) των μπρικετών προς το σύστημα αεριοποίησης.
- **Αεριοποιητής** καθοδικής ροής (gasifier) με δυναμικότητα τροφοδοσίας έως 15 kg/h βιομάζας και δυνατότητα παραγωγής αερίου σύνθεσης έως 30 m<sup>3</sup>/h. Ο αεριοποιητής λειτουργεί σε υποπίεση έως 5kPa και για την κατασκευή του χρησιμοποιήθηκαν πυράντοχα υλικά, κατάλληλα για θερμοκρασίες έως 1200 °C. Ο τύπος του αντιδραστήρα είναι Imbert και αποτελείται από τις εξής ζώνες: ζώνη ξήρανσης, ζώνη πυρόλυσης, ζώνη καύσης, ζώνη μείωσης, χώρος τέφρας (Εικόνα 5.10, δεξιά). Επίσης, ο αεριοποιητής διαθέτει σύστημα αυτόματης ανάφλεξης μέσω ακροφύσιου στη ζώνη καύσης, ενώ η εσωτερική γεωμετρία και η εσωτερική δομή της επιφάνειας του είναι σχεδιασμένες ώστε να υπάρχει ομοιόμορφη και σταδιακή βύθιση του καυσίμου και να εμποδίζεται ο σχηματισμός νεκρού χώρου. Τέλος, ο αεριοποιητής είναι εξοπλισμένος με όλους τους απαραίτητους αισθητήρες για την ομαλή λειτουργία του.
- **Σύστημα εισαγωγής αέρα** (air compressor) με φυσητήρα για παραγωγή 10-30 m<sup>3</sup>/h αερίου σύνθεσης. Το σύστημα είναι ρυθμιζόμενο ηλεκτρονικά και εξοπλισμένο με κατάλληλο μετατροπέα ρύθμισης στροφών.
- **Σύστημα συλλογής τέφρας** (ash collector), αεροστεγές, που επιτρέπει την απομάκρυνση της χωρίς να επηρεάζεται η λειτουργία της αεριοποίησης. Έπειτα η συλλεγμένη τέφρα απομακρύνεται από το χώρο αποθήκευσης με κοχλία και καταλήγει σε μεταλλικά βαρέλια χωρητικότητας 200 L με αισθητήρα στάθμης, ώστε να δίνεται σήμα για την αλλαγή τροφοδοσίας από το πλήρες προς το κενό βαρέλι.
- **Σύστημα επεξεργασίας αερίου σύνθεσης** για την ψύξη και τον καθαρισμό του, αποτελούμενο από κυκλώνα, δοχείο συλλογής πίσσας, εναλλάκτη θερμότητας, φίλτρο και πλυντηρίδα (cyclone, tar collector, heat exchanger, filter and scrubber).
- **Πυρός** (flare) για την καύση ακατάλληλου ή περισσευούμενου αερίου σύνθεσης, ο οποίος είναι εξοπλισμένος με σύστημα παρακολούθησης φλόγας με συναγερμό.
- **Ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος** (internal combustion engine - generator) στο οποίο καίγεται το επεξεργασμένο αέριο σύνθεσης προς παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας. Το ΗΖ έχει μέγιστη ισχύ συνεχούς λειτουργίας 6 kVA στα 220 Volt, είναι εξοπλισμένο με ηλεκτρονικό ρυθμιστή στροφών, διαθέτει σταθεροποιητή τάσης, ηχομονωτικό κάλυμμα καθώς και πλήρες σύστημα ελέγχου και προστασίας. Επίσης, παρέχει την δυνατότητα ανάκτησης θερμότητας από τα καυσαέρια και κατεύθυνσης των καυσαερίων προς το ξηραντήριο με σκοπό την αξιοποίηση της περιεχόμενης θερμότητάς τους. Τέλος, το ΗΖ είναι εξοπλισμένο με όλους τους απαραίτητους αισθητήρες για την ομαλή λειτουργία του.



Εικόνα 5.12 Διάγραμμα ροής του πιλοτικού συστήματος αεριοποίησης - παραγωγής ενέργειας (Pothoulaki et al., 2022).

Όσον αφορά το ανεπεξέργαστο αέριο σύνθεσης, αυτό αποτελείται κυρίως από  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ , και  $\text{CH}_4$ , όμως περιέχει και διάφορες ανεπιθύμητες προσμίξεις / ρύπους (αιωρούμενα σωματίδια, πίσσα, καθώς και ενώσεις θείου, αζώτου και χλωρίου). Η μέθοδος επεξεργασίας του αερίου σύνθεσης στην συγκεκριμένη εφαρμογή επιλέχθηκε με βάση το «ψυχρό μονοπάτι» και αποτελείται από τα εξής μέρη (Manali and Gikas, 2022; Pothoulaki et al., 2022):

- **Κυκλώνας** (cyclone) για την συγκράτηση αιωρούμενων σωματιδίων και υπολειμμάτων πίσσας από το αέριο σύνθεσης, στο κάτω μέρος του οποίου υπάρχει δοχείο για την συλλογή της πίσσας και ακαθαρσιών (tar collector).
- **Εναλλάκτης θερμότητας** (heat exchanger) ευθείας σωλήνωσης για την ψύξη του αερίου σύνθεσης. Συγκεκριμένα, πριν την εισαγωγή του αερίου σύνθεσης στο φίλτρο βιομάζας, ψύχεται με τη χρήση εναλλάκτη και ο απαγόμενος θερμός αέρας οδηγείται προς ξηραντήριο. Ο εναλλάκτης αέρος-αέρος δέχεται παροχή αερίου σύνθεσης 5 - 25  $\text{m}^3/\text{h}$  σε θερμοκρασία 300 - 500  $^\circ\text{C}$  και ψύχει το αέριο έως 120 - 180  $^\circ\text{C}$ .
- **Φίλτρο** (filter) βιομάζας πολλαπλών στρωμάτων για την απομάκρυνση αιωρούμενων σωματιδίων και υπολειμμάτων πίσσας από το αέριο σύνθεσης. Το φίλτρο έχει ύψος κλίνης και διάμετρο κατάλληλα για παροχή 10 - 30  $\text{m}^3/\text{h}$  αερίου σύνθεσης, ενώ διαθέτει βάση για το κάθε στρώμα και κατάλληλα διαμορφωμένο χώρο για τοποθέτηση βιομάζας ή κόκκων μεγέθους 2 - 20 mm. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα να αφαιρείται και να αντικαθίσταται το κάθε στρώμα χωρίς να πρέπει να αποσυναρμολογηθεί όλο το φίλτρο, διαθέτει στην είσοδο και στην έξοδο αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας και πίεσης, διαθέτει αυτόματο σύστημα διακοπής της παροχής του αερίου σύνθεσης, και είναι κατασκευασμένο από ισχυρά αντιδιαβρωτικό υλικό.
- **Πλυντηρίδα** (scrubber) για την απομάκρυνση ενώσεων θείου, χλωρίου, αζώτου, καθώς και υπολειμμάτων πίσσας. Η πλυντηρίδα λειτουργεί με νερό, είναι εφοδιασμένη με πληρωτικά υλικά (Packed Bed Scrubber) αντοχής στη διάβρωση και είναι κατασκευασμένη από ισχυρά αντιδιαβρωτικό υλικό. Το προς καθαρισμό αέριο εισάγεται κοντά στον πυθμένα, ενώ το νερό ψεκάζεται από την κορυφή της κλίνης και ρέει πάνω στο πληρωτικό υλικό. Υπάρχει αντλία δοσομέτρησης και σύστημα ανάμειξης του νερού με υδράσβεστο (ασβεστοπολτό) για την απομάκρυνση χλωρίου και θείου,

ενώ παράλληλα δίνεται και η επιλογή να μπορεί να λειτουργήσει η πλυντηρίδα και αποκλειστικά με νερό, για την απομάκρυνση θείου, αζώτου και πίσσας. Επίσης, η πλυντηρίδα διαθέτει: (i) σύστημα έτσι ώστε το καθαρισμένο ρεύμα αερίου να περνά μέσα από έναν διαχωριστήρα σταγονιδίων κοντά στην έξοδο, όπου αφαιρείται η παρασυρόμενη υγρασία, (ii) σύστημα έτσι ώστε το υγρό έκπλυσης να συλλέγεται στον πυθμένα και τμήμα του να ανακυκλώνεται μέσω αντλίας στην είσοδο και όταν υπάρχει ανάγκη το υπόλοιπο να απορρίπτεται αυτόματα, (iii) χημικούς αισθητήρες μέτρησης και κύκλωμα ελέγχου του pH και της αγωγιμότητας του ανακυκλωμένου υγρού έκπλυσης, και (iv) αυτόματες βαλβίδες στρατσώνας και αυτόματες βαλβίδες για την ρύθμιση της ροής του νερού.

Συμπληρωματικά, στην έξοδο του κυκλώνα και στην έξοδο της πλυντηρίδας γίνεται μέτρηση της παροχής του αερίου σύνθεσης, ενώ στην έξοδο της πλυντηρίδας γίνεται και ανάλυση του παραγόμενου αερίου σύνθεσης.

Κλείνοντας, το σύστημα είναι τοποθετημένο σε στεγασμένο χώρο, ενώ ο ηλεκτρολογικός πίνακας βρίσκεται εντός κλειστού μονωμένου οικίσκου, που είναι κατασκευασμένος με βιομηχανικό δάπεδο και εργονομική σχεδίαση τέτοια που επιτρέπει την πρόσβαση σε όλα τα επιμέρους συστήματα. Στην Εικόνα 5.13 φαίνεται το πλήρες σύστημα όπως είναι εγκατεστημένο στην ΕΕΛ Ρεθύμνου, ορισμένα από τα μέρη του πιο ευκρινώς (αεριοποιητής, μπρικετομηχανή, ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος) καθώς και μπρικέτες από πριονίδι που σχηματίστηκαν κατά τις δοκιμές λειτουργίας της μπρικετομηχανής.



**Αεριοποιητής**



**Μπρικετομηχανή**



**Παραγωγή μπρικέτας**



**Μπρικέτες από πριονίδι**





**Ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος**



**Πλήρες σύστημα αεριοποίησης - παραγωγής ενέργειας**

Εικόνα 5.13 Φωτογραφίες του συστήματος αεριοποίησης - παραγωγής ενέργειας του έργου LIFE B2E4sustainable-WWTP στην ΕΕΛ Ρεθύμνου.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. Πειραματικό μέρος - Υλικά και μέθοδοι

### 6.1 Πειραματική διαδικασία - Δειγματοληψίες

Για τις προκαταρκτικές μετρήσεις του πειραματικού μικροκόσκινου (περίοδος 2017 - 2018), οι δειγματοληψίες εισερχόμενου και εξερχόμενου αποβλήτου γίνονταν από ειδικές βάνες - βρύσες οι οποίες υπάρχουν πάνω στο μικροκόσκινο. Πριν την λήψη του δείγματος, αφηνόταν η βρύση να τρέξει για ορισμένα δευτερόλεπτα προκειμένου να είναι βέβαιο ότι δεν θα υπήρχαν υπολείμματα από προηγούμενες δειγματοληψίες. Επίσης, λαμβανόταν και ποσότητα μικροκοσκινισμένων βιοστερεών από την έξοδο της μονάδας αφυδάτωσης του μικροκόσκινου. Όλα τα δείγματα συντηρούνταν σε φορητό ψυγείο κατά την μεταφορά τους από την ΕΕΛ Ρεθύμνου μέχρι το Πολυτεχνείο Κρήτης και αναλύονταν άμεσα στο Εργαστήριο Σχεδιασμού Περιβαλλοντικών Διεργασιών.

Για τον προσδιορισμό χαρακτηριστικών εισερχόμενου - εξερχόμενου αποβλήτου της ΕΕΛ Ρεθύμνου καθώς και του πιλοτικού μικροκόσκινου (περίοδος 2020 - 2021), η δειγματοληψία λυμάτων έγινε με την χρήση ψυχόμενων αυτόματων δειγματοληπτών HACH LANGE BÜHLER 2000 (Εικόνα 6.1), με συχνότητα της συλλογής δειγμάτων ανά μία ώρα για μία ημέρα. Μετά, τα δείγματα της κάθε μέρας αναμειγνύονταν σε κοινό δοχείο, παίρνοντας έτσι σταθμισμένο δείγμα 24ώρου.



Εικόνα 6.1 Αυτόματος ψυχόμενος δειγματολήπτης HACH LANGE BÜHLER 2000, που χρησιμοποιήθηκε για την δειγματοληψία λυμάτων στην ΕΕΛ Ρεθύμνου.

Ως προς την τοποθέτηση των δειγματοληπτών:

- Ο πρώτος δειγματολήπτης τοποθετήθηκε πριν το μικροκόσκινο και συγκεκριμένα μέσα στο κτίριο της εξάμμωσης. Το δείγμα λαμβανόταν από την δεξαμενή εξάμμωσης, προκειμένου να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά του προ - επεξεργασμένου εισερχόμενου αποβλήτου της ΕΕΛ, το οποίο ταυτόχρονα αποτελούσε και την εισροή του μικροκόσκινου.
- Ο δεύτερος δειγματολήπτης τοποθετήθηκε σε πρώτη φάση ακριβώς πριν την απόρριψη του επεξεργασμένου αποβλήτου προς τον υδροφορέα, προκειμένου να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά του εξερχόμενου αποβλήτου της ΕΕΛ. Ακολούθως, ο δειγματολήπτης μεταφέρθηκε και τοποθετήθηκε μετά το μικροκόσκινο, λαμβάνοντας δείγμα από την εκροή του, με σκοπό να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά του φιλτραρισμένου αποβλήτου και να καταστεί δυνατός ο υπολογισμός απόδοσης της μικροκοσκίνισης.



Επίσης, λαμβάνονταν δείγματα μικροκοσκινισμένων βιοστερεών από την έξοδο της μονάδας αφυδάτωσης του πιλοτικού μικροκόσκινου, όπως και στο πειραματικό μικροκόσκινο. Για τις πειραματικές αναλύσεις αυτής της περιόδου χρησιμοποιήθηκε το κινητό εργαστήριο του Πολυτεχνείου Κρήτης.



Εικόνα 6.2 Φωτογραφίες του κινητού εργαστηρίου του Πολυτεχνείου Κρήτης που βρίσκεται εγκατεστημένο στην ΕΕΛ Ρεθύμνου και εντός του οποίου πραγματοποιήθηκαν πειραματικές αναλύσεις δειγμάτων.

Για την συλλογή δειγμάτων διαφόρων ειδών ιλύος από ΕΕΛ της Κρήτης (πρωτοβάθμια, δευτεροβάθμια, ομογενοποιημένη, χωνεμένη, ξηραμένη δευτεροβάθμια), χρησιμοποιούνταν κατάλληλα δοχεία (μπουκάλια ή σακούλες αναλόγως την μορφή και την περιεχόμενη υγρασία της κάθε ιλύος). Η δειγματοληψία γινόταν σε συνεργασία με το προσωπικό της κάθε ΕΕΛ προκειμένου να διασφαλιστεί η ορθότητα και η ασφάλεια της διαδικασίας. Στη συνέχεια, τα δείγματα που επρόκειτο να αναλυθούν εντός των επόμενων 5 ημερών αποθηκεύονταν στο ψυγείο (4 °C), ενώ τα δείγματα των οποίων η ανάλυση θα γινόταν μετά από μεγαλύτερο χρονικό διάστημα των 5 ημερών, αποθηκεύονταν στην κατάψυξη (-15 °C). Ο μέγιστος χρόνος αποθήκευσης των δειγμάτων στην κατάψυξη δεν ξεπερνούσε τις 15 μέρες.

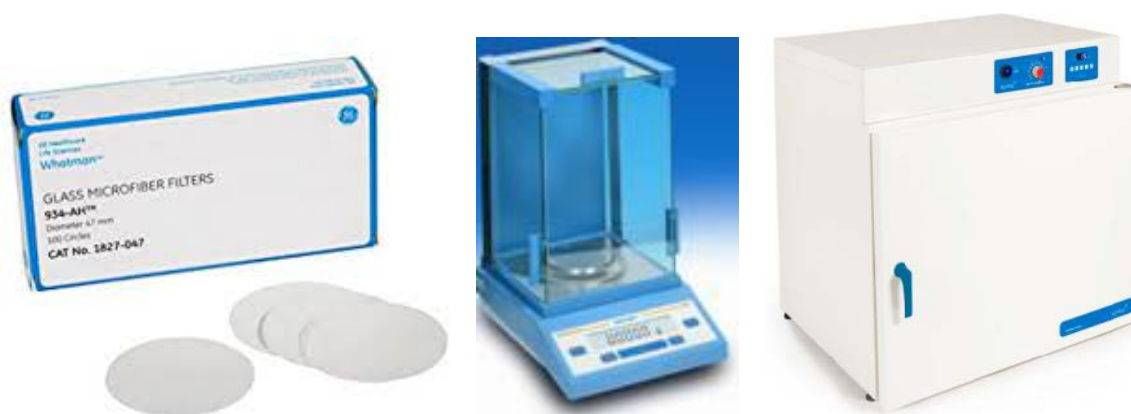
## 6.2 Αναλυτικές μέθοδοι

Γενικά, η ανάλυση δειγμάτων αστικών υγρών αποβλήτων βασίστηκε στον προσδιορισμό TSS, BOD, COD, και κατανομής σωματιδίων, ενώ στα δείγματα ιλύος προσδιορίστηκαν τα TS, VS, HHV και πραγματοποιήθηκε στοιχειακή ανάλυση. Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν

σύμφωνα με τις αναλυτικές μεθόδους που περιγράφονται παρακάτω και κατόπιν τα αποτελέσματα επεξεργάστηκαν κατάλληλα ώστε να εξαχθούν τα απαραίτητα συμπεράσματα.

### 6.2.1 Ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS)

Η μέτρηση των TSS πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις Standard Methods (Solids 2540 D). Για τον υπολογισμό των TSS, συγκεκριμένος όγκος δείγματος αποβλήτου διηθείται σε σύστημα τριπλής διήθησης υπό κενό, χρησιμοποιώντας ειδικά φίλτρα (Whatman glass microfiber filters, Grade 934, ανοίγματος πόρων 1.5  $\mu\text{m}$ , διαμέτρου 47 mm), τα οποία έχουν ζυγιστεί προηγουμένως σε εργαστηριακό αναλυτικό ζυγό ακριβείας (Oxford A2204). Στην συνέχεια το φίλτρο, με τα στερεά που έχει κατακρατήσει, εισέρχεται σε προ-θερμασμένο κλίβανο ξήρανσης (Raypa Espinar Termody 20L) στους 103 - 105  $^{\circ}\text{C}$  για περίπου 2 ώρες (μέχρι να αφαιρεθεί πλήρως η υγρασία του) (Εικόνα 6.3). Έπειτα, το φίλτρο με τα στερεά τοποθετείται σε ξηραντήρα μέχρι να επανέλθει σε θερμοκρασία δωματίου και ζυγίζεται εκ νέου. Η διαφορά μάζας του φίλτρου πριν και μετά τη διήθηση, είναι η μάζα του στερεού υπολείμματος, που σε συνδυασμό με τον χρησιμοποιούμενο όγκο του αποβλήτου δίνει τα mg των TSS ανά L αποβλήτου (εκφρασμένα σε mg/L).



Εικόνα 6.3 Φίλτρα Whatman microfiber filters (αριστερά), αναλυτικός ζυγός ακριβείας Oxford A2204 (μέση) και κλίβανος ξήρανσης Raypa Espinar Termody 20L (δεξιά).

### 6.2.2 Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD)

Η χρονική διάρκεια για την πλήρη μέτρηση του BOD είναι μεγάλη (20 μέρες), γι' αυτό αντί αυτού μετρείται το BOD<sub>5</sub>, δηλαδή το BOD κατά τις 5 πρώτες μέρες. Η μέτρηση του BOD<sub>5</sub> βασίζεται στην ακριβή μέτρηση του διαλυμένου οξυγόνου ενός δείγματος στην αρχή και στο τέλος της περιόδου των πέντε ημερών, ενώ κατά την διάρκεια αυτού του χρονικού διαστήματος το δείγμα αποθηκεύεται σε σκοτεινό σημείο σε συνθήκες επώασης 20  $^{\circ}\text{C}$ . Η διαφορά στη συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου μετά από 5 μέρες αντιπροσωπεύει την «απαίτηση σε οξυγόνο» για την αναπνοή των αερόβιων βιολογικών μικροοργανισμών του δείγματος.

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 που περιέχει το δείγμα (Παντίδου και Αντέλλη, 2019). Στον Πίνακα 6.1 δίνονται οι απαιτούμενοι όγκοι των δειγμάτων που πρέπει να τοποθετηθούν στην φιάλη με βάση την αναμενόμενη τιμή του BOD<sub>5</sub>, Όσο αυξάνεται η αναμενόμενη τιμή BOD<sub>5</sub>, μειώνεται ο όγκος του δείγματος, ώστε να εξασφαλίζεται επαρκές οξυγόνο για τη βιοαποικοδόμηση του δείγματος με το κενό που μένει στη φιάλη. Τέλος, το αποτέλεσμα της μέτρησης πολλαπλασιάζεται με τον κατάλληλο συντελεστή, ανάλογα με τον όγκο δείγματος που χρησιμοποιήθηκε.

Πίνακας 6.1 Όγκος δείγματος και συντελεστής για τον υπολογισμό του BOD ανάλογα την κλίμακα μέτρησης (Παντίδου και Αντέλλη, 2019).

| Όγκος δείγματος (mL) | Κλίμακα μέτρησης (mgO <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 - 2.000                              | 50          |
| 22,7                 | 0 - 4.000                              | 100         |

Για την διεξαγωγή της μέτρησης του BOD<sub>5</sub> χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα σκεύη / όργανα / αναλώσιμα (Εικόνα 6.4):

- Αντιδραστήριο NaOH
- Λαιμός από καουτσούκ για την σωστή τοποθέτησή του NaOH
- Μπουκάλια δειγματοληψίας BOD
- Συσκευές μέτρησης BOD (WTW OxiTop)
- Μαγνητική βάση ανάδευσης (WTW IS6 Stirrer)
- Μαγνήτες ανάδευσης από Teflon.
- Ψυχόμενος επωαστικός κλίβανος (Pol-Eko ST2)



Εικόνα 6.4 Μπουκάλια δειγματοληψίας BOD με συσκευές μέτρησης WTW OxiTop και μαγνητική βάση ανάδευσης WTW IS6 Stirrer (αριστερά) και ψυχόμενος επωαστικός κλίβανος Pol-Eko ST2 (δεξιά).

### 6.2.3 Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD)

Ο προσδιορισμός του COD απαιτεί τη μέτρηση του οξυγόνου που καταναλώνεται κατά τη διαδικασία της χημικής οξείδωσης του δείγματος. Συγκεκριμένα, με βάση τις Standard Methods (COD 5220), η 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 ο καταλύτης είναι θειικός άργυρος (Ag<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Η θερμοκρασία χώνευσης είναι

150 °C και χρόνος χώνευσης είναι 2 ώρες. Μετά το πέρας της διαδικασίας της χώνευσης του μίγματος και αφού αυτό επανέλθει σε θερμοκρασία δωματίου, προσδιορίζεται η περίσσεια των διχρωμικών ιόντων ( $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ), 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 έτοιμα σε φιαλίδια της εταιρίας Hach, στα οποία πρέπει απλά να προστεθεί συγκεκριμένη ποσότητα δείγματος και να ακολουθηθεί η μεθοδολογία που αναγράφεται στο κουτί (Γιαντίδου και Αντέλλη, 2019).

Τα φιαλίδια που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις της διατριβής αυτής φαίνονται στην Εικόνα 6.5. Η χώνευση έγινε στον θερμοαντιδραστήρα της Hach LT 200 (Εικόνα 6.6, αριστερά), ενώ η μέτρηση στο φασματοφωτόμετρο της Hach DR 1900 (Εικόνα 6.6, δεξιά).



Εικόνα 6.5 Φιαλίδια Hach για τεστ COD με εύρος μέτρησης 15-150 mg/L O<sub>2</sub> (LCK 314), 1.000-2.000 mg/L O<sub>2</sub> (LCK 514), 1.000-10.000 mg/L O<sub>2</sub> (LCK 014).



Εικόνα 6.6 Θερμοαντιδραστήρας Hach LT 200 (αριστερά) και φωτόμετρο Hach DR 1900 (δεξιά).

#### 6.2.4 Κατανομή σωματιδίων

Για τον προσδιορισμό της κατανομής μεγέθους των σωματιδίων εφαρμόστηκε η μέθοδος της σκέδασης ακτινών λέιζερ και συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε το όργανο Mastersizer S, της εταιρείας Malvern (Εικόνα 6.7). Τα λογισμικά του οργάνου διαθέτει όλα τα συνήθη μοντέλα κατανομών μεγεθών κόνεων και παρέχει τη δυνατότητα επιλογής βάσει του οποίου ο χρήστης επιθυμεί να γίνει η ανάλυση των πρωτογενών αποτελεσμάτων σκέδασης. Με την συγκεκριμένη μέθοδο μπορεί να μετρηθεί γρήγορα και με μεγάλη ακρίβεια μεγάλο εύρος μεγεθών (0,01 - 2.000 μm), ενώ είναι εύκολη και η επανάληψη της διαδικασίας για πολλαπλά δείγματα. Επίσης, η εισαγωγή του δείγματος γίνεται σε ξηρή μορφή ή σε μορφή υδατικού αιωρήματος.



Ως προς την πειραματική διαδικασία, η ποσότητα του δείγματος που εισάγεται προς μέτρηση εξαρτάται από τον δείκτη συσκότισης, ο οποίος δείχνει το πλήθος των σωματιδίων που εισάγονται στο όργανο και η τιμή του οποίου πρέπει να ξεπερνά απαραίτητως το 10. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων ανάγονται σε ισοδύναμες σφαιρικές διαμέτρους, παρά το γεγονός ότι στην πραγματικότητα τα σχήματα τους ποικίλλουν. Η εισαγωγή του δείγματος (αφού ανακινηθεί ώστε να είναι ομοιογενές) μαζί με προσθήκη νερού γίνεται στον θάλαμο εισαγωγής που βρίσκεται στο μπροστινό τμήμα του οργάνου και στον οποίο γίνεται συνεχής ανάδευση. Στη συνέχεια, το δείγμα διοχετεύεται στα κελιά του οργάνου, τα οποία διαπερνά μια ευθυγραμμισμένη ακτίνα λέιζερ. Τα αποτελέσματα εμφανίζονται και αποθηκεύονται σε υπολογιστή, ενώ το όργανο έχει προ-ρυθμισμένα κλάσματα στα οποία ανιχνεύει το μέγεθος των σωματιδίων. Επίσης πέρα από τις καμπύλες κατανομών, σημαντικό στοιχείο είναι και ο δείκτης residual που πρέπει να έχει όσο το δυνατόν μικρότερη τιμή, κοντά στο 0. Ενδεικτικές είναι και οι τιμές D5, D50 και D90, οι οποίες μας υποδεικνύουν ότι οι διάμετροι του 5 % - 50 % - 90 % του δείγματος είναι μικρότερες από την αναγραφόμενη τιμή. Αν για παράδειγμα σε μια μέτρηση το D90 είναι 200  $\mu\text{m}$ , αυτό σημαίνει ότι το 90 % του υλικού μας αποτελείται από σωματίδια μεγέθους μικρότερου των 200  $\mu\text{m}$ .



Εικόνα 6.7 Αναλυτής μεγέθους σωματιδίων Malvern Mastersizer S, με σκέδαση ακτινών λέιζερ.

### 6.2.5 Ολικά στερεά (TS) – Υγρασία (M)

Για τον προσδιορισμό των TS και συνεπώς της υγρασίας (M) δειγμάτων ιλύος, ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία:

- Ζύγιση μίας ποσότητας δείγματος σε εργαστηριακό αναλυτικό ζυγό ακριβείας (Oxford A2204).
- Τοποθέτηση σε προ-θερμασμένο κλίβανο ξήρανσης (Raypa Espinar Termodry 20L) στους 100 - 102  $^{\circ}\text{C}$  για 24 ώρες, ώστε να αφαιρεθεί πλήρως η περιεχόμενη υγρασία.
- Επανάληψη ζύγισης του ξηραμένου υλικού.
- Υπολογισμός TS - M δεδομένου ότι η συνολική μάζα του αρχικού δείγματος ισούται με το άθροισμα στερεών και υγρασίας, και τέλος αναγωγή των αποτελεσμάτων σε ποσοστά %.



### 6.2.6 Πτητικά στερεά (VS)

Για την μέτρηση των πτητικών στερεών (VS) των δειγμάτων ιλύος πραγματοποιείται πρώτα ξήρανση για την πλήρη αφαίρεση υγρασίας (βλέπε Κεφάλαιο 6.2.5). Στη συνέχεια, μία ποσότητα από το ξηραμένο δείγμα τοποθετείται σε ειδικό πυρίμαχο σκεύος (κάψα πορσελάνης), ζυγίζεται σε αναλυτικό ζυγό ακριβείας και εισάγεται σε φούρνο υψηλής θερμοκρασίας (Thermo Scientific FB1410M-33) στους 600 °C για περίπου 2 - 3 ώρες (ανάλογα την ποσότητα της ιλύος) (Εικόνα 6.8). Μετά την πάροδο αυτού του διαστήματος και αφού το δείγμα επανέλθει σε θερμοκρασία δωματίου, επαναλαμβάνεται η ζύγιση και η διαφορά των τιμών δίνει τη μάζα των VS, δηλαδή την περιεκτικότητα της λάσπης σε οργανικά ενώ το υπολειπόμενο την ποσότητα των ανόργανων αντίστοιχα.



Εικόνα 6.8 Φούρνος υψηλής θερμοκρασίας Thermo Scientific FB1410M-33.

### 6.2.7 Ανώτερη Θερμογόνος Δύναμη (HHV)

Η μέτρηση της θερμογόνου δύναμης των δειγμάτων ιλύος πραγματοποιήθηκε σε θερμιδόμετρο, επιστημονικό όργανο που προσδιορίζει την ικανότητα παραγωγής θερμικής ενέργειας ενός υλικού (ρευστού ή στερεού) κατά την καύση του. Συγκεκριμένα, μετρήθηκε η Ανώτερη Θερμογόνος Δύναμη (Higher Heating Value, HHV) με την χρήση του θερμιδόμετρου βόμβας οξυγόνου XRY-1A Oxygen Bomb Calorimeter και τα αποτελέσματα εκφράστηκαν σε MJ/kg (Εικόνα 6.9).



Εικόνα 6.9 Το θερμιδόμετρο XRY-1A Oxygen Bomb Calorimeter που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της θερμογόνου δύναμης.

Η λεπτομερής πειραματική διαδικασία καθώς και όλες οι απαραίτητες οδηγίες παρέχονται από τον κατασκευαστή εντός του εγχειριδίου χρήσης που συνοδεύει το όργανο. Συνοπτικά, τα βασικά βήματα της διαδικασίας είναι τα ακόλουθα:

- Τοποθετείται 1 g δείγματος εντός της βόμβας οξυγόνου και περίπου 10 cm σύρμα ανάφλεξης (διαμέτρου 0,1 mm, φτιαγμένο από Ni - Cr, με θερμογόνου δύναμη 6000 J/g). Το δείγμα πρέπει να είναι σε μορφή ταμπλέτας και όχι σκόνης, για να μπορέσει να πραγματοποιηθεί σωστά η καύση του. Το σύρμα ανάφλεξης στερεώνεται στους δυο πόλους υποδοχής που υπάρχουν στις άκρες της κεφαλής της βόμβας οξυγόνου και πρέπει να βρίσκεται όσο το δυνατόν πιο κοντά στο δείγμα, χωρίς όμως να έρχονται σε επαφή μεταξύ τους (Εικόνα 6.10).



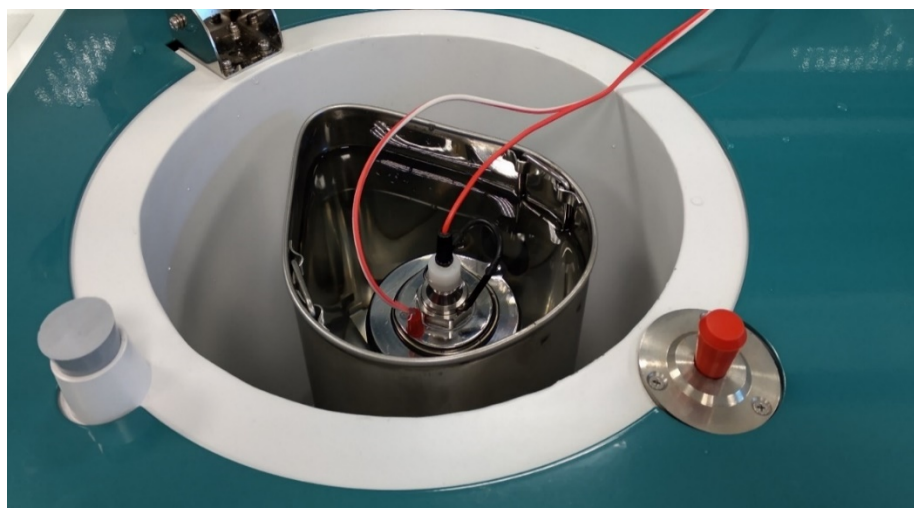
Εικόνα 6.10 Κεφαλή βόμβας οξυγόνου με δείγμα και σύρμα ανάφλεξης.

- Η βόμβα οξυγόνου με το δείγμα, το σύρμα και 10 mL απιονισμένου νερού συνδέεται με φιάλη οξυγόνου (Εικόνα 6.11). Η λαβή της φιάλης περιστρέφεται μέχρι η ένδειξη του μετρητή πίεσης να φτάσει μεταξύ 2,5 - 3,0 mPa, που σημαίνει ότι έχει εισαχθεί το απαραίτητο για την καύση οξυγόνο εντός της βόμβας.



Εικόνα 6.11 Βόμβα οξυγόνου κυλινδρικού σχήματος εντός της οποίας βρίσκονται το δείγμα, το σύρμα, καθώς και το απαραίτητο νερό και οξυγόνο.

- Ελέγχεται η θερμοκρασία του απιονισμένου νερού στο εξωτερικό μέρος του θερμιδόμετρου να είναι κατά 0,2 - 0,5 °C υψηλότερη σε σχέση με τον εσωτερικό θάλαμο και κατόπιν τοποθετείται η βόμβα οξυγόνου με το δείγμα στην ειδικά διαμορφωμένη θέση (Εικόνα 6.12), αφού έχει συνδεθεί με τα απαραίτητα για την καύση καλώδια.



Εικόνα 6.12 Εσωτερικός θάλαμος του θερμιδόμετρου με απιονισμένο νερό και την βόμβα οξυγόνου.

- Κλείνεται το καπάκι του θερμιδόμετρου, τοποθετείται ο αισθητήρας θερμοκρασίας στην ειδική υποδοχή, συνδέεται το θερμιδόμετρο στην πρίζα, ενεργοποιείται από κουμπί «on-off» που υπάρχει στο πίσω μέρος του οργάνου και ξεκινάει να λειτουργεί πατώντας το κουμπί «Power» (Εικόνα 6.13).

- Όταν σταθεροποιηθεί η θερμοκρασία, πατιέται το κουμπί «Stir», για να ξεκινήσει η ανάδευση του νερού στον εσωτερικό θάλαμο και στη συνέχεια το κουμπί «Reset», για να μηδενίσει ο αριθμός μετρήσεων που είχαν καταγραφεί μέχρι στιγμής (Εικόνα 6.13).
- Καταγράφονται οι πρώτες 10 μετρήσεις θερμοκρασίας και έπειτα πατιέται το κουμπί «Ignite», με το οποίο δίνεται η εντολή για την καύση του δείγματος. Τότε, ο αριθμός μετρήσεων μηδενίζεται αυτόματα και το όργανο ξεκινάει να αποθηκεύει τις τιμές της θερμοκρασίας κάθε 30 sec. Σε αυτό το σημείο, πρέπει να παρατηρηθεί αύξηση θερμοκρασίας με γρήγορο ρυθμό για να είναι σίγουρο ότι έγινε η καύση εντός της βόμβας.
- Αφού ληφθούν 31 μετρήσεις, πατιέται το κουμπί «End», με το οποίο σταματάει η διαδικασία λήψης μετρήσεων από το όργανο, το κουμπί «Stir», για να σταματήσει η ανάδευση του νερού στον εσωτερικό θάλαμο και το κουμπί «Data» για να καταγραφούν οι αποθηκευμένες μετρήσεις (Εικόνα 6.13).



Εικόνα 6.13 Ηλεκτρονικός πίνακας μετρήσεων, όπου φαίνονται ο αύξων αριθμός μετρήσεων και οι τιμές της θερμοκρασίας. Στο κάτω μέρος του πίνακα φαίνονται τα κουμπιά Reset, Ignite, End, Data, Stir, Power.

- Η βόμβα οξυγόνου αφαιρείται από το θερμιδόμετρο και αφού καθαριστεί και στεγνωθεί προσεκτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επόμενη μέτρηση.
- Όλα τα δεδομένα της διαδικασίας (μάζα δείγματος, μάζα σύρματος, μετρήσεις θερμοκρασίας πριν και μετά την καύση) επεξεργάζονται με την βοήθεια μαθηματικών τύπων στο πρόγραμμα λογιστικών φύλλων Microsoft Excel.

## 6.2.8 Στοιχειακή ανάλυση

Για τον προσδιορισμό της στοιχειακής ανάλυσης δειγμάτων βιοστερεών χρησιμοποιήθηκε το όργανο LECO 628 (Εικόνα 6.14). Συγκεκριμένα, για τον προσδιορισμό C, H και N εφαρμόστηκε το UNE-EN ISO 16948, ενώ για την μέτρηση S και Cl το UNE-EN ISO 16994. Η πειραματική διαδικασία περιγράφεται αναλυτικά στο εγχειρίδιο χρήσης που συνοδεύει το όργανο.





Εικόνα 6.14 Στοιχειακός αναλυτής LECO 628.

### 6.3 Συλλογή δεδομένων μελετών και μεθοδολογία επεξεργασίας τους

Εκτός των πειραματικών διαδικασιών των οποίων η μεθοδολογία δειγματοληψίας και ανάλυσης αναπτύχθηκαν παραπάνω (Κεφάλαια 6.1 και 6.2), στα πλαίσια της διδακτορικής έρευνας διενεργήθηκαν και διάφορες μελέτες. Για κάθε μελέτη, ακολουθήθηκε συγκεκριμένος τρόπος συλλογής δεδομένων και ακολούθως εφαρμόστηκε κατάλληλη μεθοδολογία επεξεργασίας των δεδομένων.

#### 6.3.1 Ενεργειακό προφίλ των ΕΕΛ της Ελλάδος

Προκειμένου να αναδειχθεί το λειτουργικό και ενεργειακό πρόβλημα των ΕΕΛ ενεργού ιλύος, μελετήθηκε το ενεργειακό προφίλ των ΕΕΛ της Ελλάδος. Για να γίνει αυτό, χρησιμοποιήθηκε ερωτηματολόγιο για τη συλλογή δεδομένων, το οποίο συμπληρώθηκε ηλεκτρονικά από 22 ΕΕΛ, όμως μόνο οι 17 το συμπλήρωσαν επαρκώς ώστε να μπορούν να εξαχθούν τα απαραίτητα συμπεράσματα. Το ερωτηματολόγιο αποτελούνταν από 36 ερωτήσεις, ποσοτικές και ποιοτικές, κλειστού και ανοικτού τύπου, συνοπτικά διατυπωμένες και κατηγοριοποιημένες σε 4 θεματικές ενότητες (για το πλήρες ερωτηματολόγιο, βλέπε [Παράρτημα](#)):

1. **Γενικά στοιχεία:** όνομα ΕΕΛ, στοιχεία λειτουργού, υπηρεσία που ανήκει, υλοποίηση ενεργειακής αξιολόγησης στο παρελθόν.
2. **Τεχνικό μέρος - Σχετικά με την συνολική ενεργειακή απαίτηση της ΕΕΛ:** ενεργειακά στοιχεία για το σύνολο της ΕΕΛ (χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, πετρελαίου ή φυσικού αερίου), συνολική ετήσια κατανάλωση (kWh/y), συνολικό ετήσιο κόστος ηλεκτρικού ρεύματος (€/y), ετήσια εισερχόμενη παροχή λυμάτων ( $m^3/y$ ).
3. **Τεχνικό μέρος - Σχετικά με την ΕΕΛ:** χρόνια λειτουργίας, εμβαδό, μέση ημερήσια παροχή εισόδου ( $m^3/d$ ), εξυπηρετούμενος ισοδύναμος πληθυσμός, ποιοτικά χαρακτηριστικά εισόδου και εξόδου, επεξεργασία βοθρολυμάτων, εγκατεστημένη και καταναλισκόμενη ισχύς (kW), καταναλισκόμενη ενέργεια (kWh/d), ώρες λειτουργίας ημερησίως.
4. **Γενικά σχόλια και παρατηρήσεις:** για το ερωτηματολόγιο και τις απαντήσεις, περαιτέρω πληροφορίες για την λειτουργία της ΕΕΛ.

Η επεξεργασία των δεδομένων, που συλλέχθηκαν από τα ερωτηματολόγια, έγινε με τη χρήση του προγράμματος λογιστικών φύλλων Microsoft Excel.



### 6.3.2 Ισοζύγια μάζας και ενέργειας της πιλοτικής μονάδας

Για να υπολογιστεί η αποδοτικότητα των προτεινόμενων τεχνολογιών αλλά και να αξιολογηθεί γενικότερα η λειτουργία της πιλοτικής μονάδας, χρησιμοποιήθηκαν ισοζύγια μάζας και ενέργειας. Οι υπολογισμοί των ισοζυγίων βασίστηκαν τόσο στις αρχές διατήρησης μάζας και ενέργειας (για την θεωρητική τους εκτίμηση) όσο και στα χαρακτηριστικά λειτουργίας των μερών της πιλοτικής μονάδας. Οι κυριότερες εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τους θεωρητικούς υπολογισμούς καθώς και η λογική που ακολουθήθηκε περιγράφονται παρακάτω (Τσαμουτσόγλου, 2020).

Για τον προσδιορισμό της απαιτούμενης ενέργειας για ξήρανση, χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθες εξισώσεις, λαμβάνοντας υπόψη κατά την εφαρμογή τους ότι ορισμένες παράμετροι κυμαίνονται σε ένα εύρος τιμών (περιεχόμενη υγρασία μικροκοσκινισμένων βιοστερεών, επιθυμητή περιεχόμενη υγρασία βιοστερεών για αεριοποίηση). Η απαιτούμενη ενέργεια για ξήρανση είναι το άθροισμα λανθάνουσας θερμότητας εξάτμισης και της αισθητής θερμότητας του νερού. Η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης εκφράζει το ποσό της θερμότητας που απαιτείται να προστεθεί στη μονάδα της μάζας, όταν γίνεται αλλαγή της κατάστασής της από υγρή σε αέρια υπό σταθερή πίεση και θερμοκρασία (Εξίσωση 6.1). Για παράδειγμα το νερό παραμένει στους 100 °C ενώ βράζει. Η θερμότητα που προστίθεται για να συνεχίσει η εξάτμιση του νερού είναι λανθάνουσα θερμότητα (Cengel and Boles, 2014).

$$\dot{Q}_l = m \cdot L \quad 6.1$$

Όπου,

- $m$ : η μάζα του νερού εκφρασμένη συνήθως σε kg.
- $L$ : η λανθάνουσα θερμότητα. Η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του νερού στους 100 °C και πίεση 1 atm ισούται με 2.256,4 KJ/kg (Varzakas and Tzia, 2014).

Η αισθητή θερμότητα εκφράζει το ποσό θερμότητας που προκαλεί αλλαγές στη θερμοκρασία ενός αντικειμένου και προσδιορίζεται από τον νόμο της θερμιδομετρίας ο οποίος περιγράφεται με την Εξίσωση 6.2 (Cengel and Boles, 2014).

$$\dot{Q}_s = m \cdot C \cdot \Delta T \quad 6.2$$

Όπου,

- $m$ : η μάζα της ουσίας εκφρασμένη συνήθως σε kg.
- $C$ : η ειδική θερμοχωρητικότητα της ουσίας εκφρασμένη σε KJ/kg·K. Η ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού είναι ίση με 4,184 KJ/kg·K (Fredlund et al., 2012).
- $\Delta T$ : η μεταβολή της θερμοκρασίας εκφρασμένη σε K ή °C.

Συνεπώς, από το άθροισμα της λανθάνουσας θερμότητας εξάτμισης (Εξίσωση 6.1) και της αισθητής θερμότητας του νερού (Εξίσωση 6.2) υπολογίστηκε η απαιτούμενη ενέργεια για ξήρανση (Εξίσωση 6.3) (Cengel and Boles, 2014).

$$\dot{Q}_{\text{total}} = \dot{Q}_s + \dot{Q}_l \quad 6.3$$

Όσον αφορά την διαδικασία της αεριοποίησης - παραγωγής ενέργειας, οι υπολογισμοί βασίστηκαν σε εξισώσεις που περιγράφονται παρακάτω, λαμβάνοντας υπόψη ότι ορισμένες παράμετροι δεν έχουν σταθερές τιμές, αλλά κυμαινόμενες (θερμογόνος δύναμη βιοστερεών,

απόδοση αεριοποιητή, απόδοση MEK, απώλειες λόγω μεταφοράς θερμότητας). Αρχικά, το ενεργειακό περιεχόμενο των βιοστερεών (σε MJ/h) υπολογίστηκε από την Εξίσωση 6.4.

$$\dot{Q}_{\text{biosolids}} = \dot{m}_{\text{biosolids in gasifier}} \cdot \text{HHV}_{\text{biosolids}} \quad 6.4$$

Όπου,

- $\dot{m}_{\text{biosolids in gasifier}}$ : η μαζική παροχή της τροφοδοτούμενης βιομάζας στον αεριοποιητή σε kg/h.
- $\text{HHV}_{\text{biosolids}}$ : η ανώτερη θερμογόνος δύναμη των βιοστερεών σε MJ/kg.

Έπειτα, λαμβάνοντας υπόψη ότι από 1 kg εισερχόμενης βιομάζας παράγονται 2 m<sup>3</sup> αερίου σύνθεσης (Modeling Gasifier Mass, 2010) και ότι η απόδοση του αεριοποιητή κυμαίνεται μεταξύ 70 - 90 % (Kreith and Krumdieck, 2014), ο υπολογισμός της HHV του αερίου σύνθεσης υπολογίστηκε με βάση την Εξίσωση 6.5 (Rajvanshi, 1986):

$$n = \frac{\Delta H_{\text{syngas}} \cdot \left(\frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}\right) \cdot 2(\text{m}^3)}{\Delta H_{\text{biosolids}} \cdot \left(\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}\right) \cdot 1\text{kg}} \rightarrow \Delta H_{\text{syngas}} = \frac{n \cdot \Delta H_{\text{biosolids}}}{2} \quad 6.5$$

Όπου,

- $\Delta H_{\text{syngas}}$ : η ανώτερη θερμογόνος δύναμη (HHV) του αερίου σύνθεσης σε MJ/m<sup>3</sup>.
- $\Delta H_{\text{biosolids}}$ : η ανώτερη θερμογόνος δύναμη (HHV) των βιοστερεών σε MJ/kg.
- n: ο βαθμός απόδοσης του αεριοποιητή.

Ο υπολογισμός του ενεργειακού περιεχομένου του αερίου σύνθεσης (σε MJ) βασίστηκε στην Εξίσωση 6.6

$$\dot{Q}_{\text{syngas}} = \dot{V}_{\text{syngas yield}} \cdot \text{HHV}_{\text{syngas}} \quad 6.6$$

Όπου,

- $\dot{V}_{\text{syngas yield}}$ : η ογκομετρική παροχή του αερίου σύνθεσης σε m<sup>3</sup>/h.
- $\Delta H_{\text{syngas}}$ : η ανώτερη θερμογόνος δύναμη (HHV) του αερίου σύνθεσης σε MJ/m<sup>3</sup>.

Κατόπιν, υπολογίστηκε η παραγόμενη θερμική και ηλεκτρική ενέργεια, η οποία πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών πιλοτικής μονάδας, λαμβάνοντας υπόψη ότι η απόδοση της MEK σε ηλεκτρική ενέργεια είναι 20%, σε θερμική ενέργεια 50 % και στο 30 % είναι οι απώλειες. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, η παραγόμενη θερμική ενέργεια καθώς και οι απώλειες από την MEK υπολογίστηκαν από τις Εξισώσεις 6.7, 6.8 και 6.9 αντίστοιχα.

$$E_{\text{engine-electric}} = n_{\text{electric}} \cdot \dot{Q}_{\text{syngas}} \quad 6.7$$

$$\dot{Q}_{\text{engine-thermal}} = n_{\text{thermal}} \cdot \dot{Q}_{\text{syngas}} \quad 6.8$$

$$\dot{Q}_{\text{engine-losses}} = n_{\text{losses}} \cdot \dot{Q}_{\text{syngas}} \quad 6.9$$

Όπου,

- $\dot{Q}_{\text{syngas}}$ : το ενεργειακό περιεχόμενο του αερίου σύνθεσης σε MJ.
- $n_{\text{electric}}$ : ο βαθμός απόδοσης της MEK σε ηλεκτρική ενέργεια.
- $n_{\text{thermal}}$ : ο βαθμός απόδοσης της MEK σε θερμική ενέργεια.
- $n_{\text{losses}}$ : οι απώλειες της MEK.

Τέλος, η συνολική παρεχόμενη θερμική ενέργεια από το σύστημα αεριοποίησης - παραγωγής ενέργειας προς το ξηραντήριο (σε MJ) υπολογίστηκε από την Εξίσωση 6.10:

$$\dot{Q}_{\text{total to dryer}} = \dot{Q}_{\text{engine-thermal}} + \dot{Q}_{\text{exhaust fumes}} + \dot{Q}_{\text{syngas cooling}} + \dot{Q}_{\text{gasifier-thermal}} + \dot{Q}_{\text{syngas combustion}} \quad 6.10$$

Όπου,

- $\dot{Q}_{\text{engine-thermal}}$ : η θερμική ενέργεια από την MEK (Εξίσωση 6.8).
- $\dot{Q}_{\text{exhaust fumes}}$ : η θερμική ενέργεια από τα καυσαέρια της MEK (Εξίσωση 6.11) (Vijay et al., 2016).
- $\dot{Q}_{\text{syngas cooling}}$ : η θερμική ενέργεια από την ψύξη του αερίου σύνθεσης (Εξίσωση 6.12) (Doherty et al., 2015).
- $\dot{Q}_{\text{gasifier-thermal}}$ : η θερμική ενέργεια από τον αντιδραστήρα του αεριοποιητή (5% του ενεργειακού περιεχομένου του παραγόμενου αερίου σύνθεσης).
- $\dot{Q}_{\text{syngas combustion}}$ : η θερμική ενέργεια από την καύση ποσοστού 10% του παραγόμενου αερίου σύνθεσης που οδηγείται απευθείας στο ξηραντήριο.

$$\dot{Q}_{\text{exhaust fumes}} = \rho_K \cdot \dot{V}_K \cdot C_{P_K} \cdot (T_f - T_i) \quad 6.11$$

Όπου,

- $\rho_{\text{syngas}}$ : Η πυκνότητα των καυσαερίων σε kg/m<sup>3</sup>.
- $\dot{V}_K$ : Η ογκομετρική παροχή των καυσαερίων σε m<sup>3</sup>/h, που βασίστηκε το γεγονός ότι η αναλογία air/ syngas είναι 1:1 (Reed and Das, 1988).
- $C_{P_K}$ : Η ειδική θερμοχωρητικότητα των καυσαερίων σε KJ/kg·K.
- $T_f$ : Η θερμοκρασία των καυσαερίων μετά την ψύξη τους σε K ή °C.
- $T_i$ : Η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από την μηχανή σε K ή °C.

$$\dot{Q}_{\text{syngas cooling}} = \rho_{\text{syngas}} \cdot \dot{V}_{\text{syngas}} \cdot C_{P_{\text{syngas}}} \cdot (T_f - T_i) \quad 6.12$$

Όπου,

- $\rho_{\text{syngas}}$ : Η πυκνότητα του αερίου σύνθεσης σε kg/m<sup>3</sup>.
- $\dot{V}_{\text{syngas}}$ : Ο όγκος του αερίου σύνθεσης σε m<sup>3</sup>.
- $C_{P_{\text{syngas}}}$ : Η ειδική θερμοχωρητικότητα του αερίου σύνθεσης σε KJ/kg·K.
- $T_f$ : Η θερμοκρασία του αερίου σύνθεσης μετά την ψύξη του σε K ή °C.
- $T_i$ : Η θερμοκρασία του αερίου σύνθεσης στην έξοδο του αεριοποιητή σε K ή °C.

### 6.3.3 Εισροές - εκροές της πιλοτικής μονάδας και τρόποι διαχείρισης

Στα πλαίσια της μελέτης της πιλοτικής μονάδας προ-επεξεργασίας των λυμάτων και αξιοποίησης των παραγόμενων βιοστερεών προσδιορίστηκαν οι εισροές και οι εκροές του συστήματος, ενώ για κάθε εκροή προτάθηκε κατάλληλη διαδικασία προσδιορισμού σύστασης και τρόπος διαχείρισης ανάλογα την κατάταξή της ως επικίνδυνη ή μη.

Για να οριστούν οι εισροές και οι εκροές της πιλοτικής μονάδας, έγινε μελέτη σε κάθε βασικό στάδιο επεξεργασίας (μικροκοσκίνιση, ξήρανση, αεριοποίηση - παραγωγή ενέργειας) και δημιουργήθηκε αναλυτικό διάγραμμα ροής στο οποίο είναι εμφανείς οι ροές μάζας και ενέργειας της πιλοτικής μονάδας (βλέπε Κεφάλαιο 7.7). Κατόπιν, για κάθε ένα παραπροϊόν της διαδικασίας προτάθηκε κατάλληλος τρόπος διαχείρισης σύμφωνα με αυτά που ορίζονται από την νομοθεσία.

Τέλος, για την διασφάλιση ορθής και ασφαλούς λειτουργίας της πιλοτικής μονάδας, προτάθηκε εφαρμογή αυστηρού προγράμματος παρακολούθησης και συντήρησης, ώστε να αναγνωρίζονται έγκαιρα οποιεσδήποτε διαρροές ή αστοχίες και να αντιμετωπίζονται άμεσα και αποτελεσματικά.

### 6.3.4 Εκτίμηση περιβαλλοντικού αποτυπώματος της πιλοτικής μονάδας

Προκειμένου να αξιολογηθεί σφαιρικά η πρόταση εναλλακτικής προ-επεξεργασίας λυμάτων και αξιοποίησης βιοστερεών εντός των ΕΕΛ ενεργού ιλύος κρίθηκε απαραίτητο εκτιμηθεί το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της πιλοτικής μονάδας. Μάλιστα, εκπονήθηκε ολοκληρωμένη Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΜΠΕ) και εκδόθηκε Απόφαση Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων (ΑΕΠΟ), ώστε να επιτραπεί η υλοποίηση (κατασκευή, εγκατάσταση και λειτουργία) της πιλοτικής μονάδας στην ΕΕΛ Ρεθύμνου, σύμφωνα με τα όσα ορίζει το ισχύον νομικό πλαίσιο.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εκτίμηση περιβαλλοντικού αποτυπώματος της πιλοτικής μονάδας είναι η εξής:

- Αρχικά, έγινε καταγραφή ορισμένων βασικών στοιχείων του έργου, όπως το είδος, το μέγεθος, η γεωγραφική θέση, η διοικητική υπαγωγή, η κατάταξη, ο φορέας, οι αποστάσεις από σημαντικές περιοχές κ.α.
- Ακολούθησε περιγραφή του στόχου του έργου, αναφέρθηκαν αναπτυξιακά, περιβαλλοντικά και κοινωνικά κριτήρια/επιχειρήματα υπέρ της υλοποίησης του και επεξηγήθηκαν τα αναμενόμενα οφέλη του σε τοπικό, περιφερειακό και εθνικό επίπεδο.
- Κατόπιν, πραγματοποιήθηκε πλήρης τεχνική περιγραφή του έργου τόσο για την φάση κατασκευής όσο και για την φάση λειτουργίας του, στα πλαίσια της οποίας προσδιορίστηκαν οι απαιτούμενες ποσότητες πρώτων υλών, νερού και ενέργειας αλλά και οι αναμενόμενες ποσότητες αποβλήτων.
- Ακολούθως, διερευνήθηκαν εναλλακτικές λύσεις και περιεγράφηκε πλήρως η υφιστάμενη κατάσταση του περιβάλλοντος, χωρίς την πιλοτική μονάδα (κλιματολογικά, μορφολογικά, γεωλογικά, ατμοσφαιρικά, ανθρωπογενή χαρακτηριστικά κ.α.).
- Τέλος, εκτιμήθηκαν και αξιολογήθηκαν οι επιπτώσεις του έργου στα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος και προτάθηκε τρόπος αντιμετώπισής τους, καθώς και κατάλληλη περιβαλλοντική διαχείριση και παρακολούθηση.

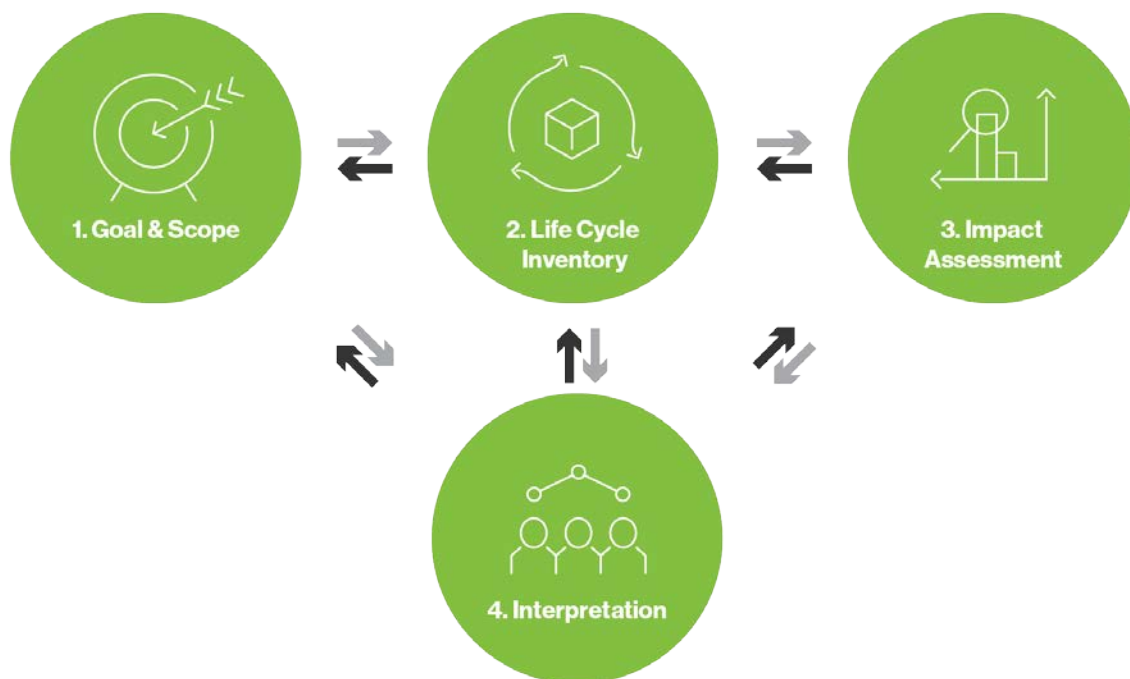
### 6.3.5 Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA) της πιλοτικής μονάδας

Για την πληρέστερη αξιολόγηση της πιλοτικής μονάδας από περιβαλλοντικής απόψεως, έγινε Ανάλυση Κύκλου Ζωής, εφεξής αποκαλούμενη ΑΚΖ (Life Cycle Assessment, LCA). Γενικά, η ΑΚΖ είναι μία τεχνική αξιολόγησης των περιβαλλοντικών πτυχών και των δυνητικών επιπτώσεων που συνδέονται με ένα προϊόν, με βασικά χαρακτηριστικά την κατάρτιση καταλόγου εισροών - εκροών ενός συστήματος προϊόντων, την αξιολόγηση των



περιβαλλοντικών επιπτώσεων που συνδέονται με τις καταγεγραμμένες εισροές - εκροές, καθώς και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων, των φάσεων ανάλυσης απογραφής και επιπτώσεων, σε σχέση με τους στόχους της μελέτης (ISO, 1997).

Η μεθοδολογία μίας ΑΚΖ ορίζεται από τα ISO 14040:14043, και συνοψίζεται σε 4 βασικά στάδια, τα οποία απεικονίζονται στο Διάγραμμα 6.1 και ακολουθήθηκαν στην συγκεκριμένη περίπτωση.



Διάγραμμα 6.1 Διαγραμματική απεικόνιση και συσχέτιση σταδίων εκπόνησης μίας μελέτης ΑΚΖ.

Τα στάδια αυτά είναι τα εξής:

1. **Ο καθορισμός του σκοπού και πλαισίου μελέτης** (goal and scope definition): περιλαμβάνει τον καθορισμό του σκοπού της μελέτης, προβλεπόμενη εφαρμογή της, το κοινό για το οποίο προορίζεται και την επιδιωκόμενη χρήση αποτελεσμάτων. Επίσης, ορίζονται τα όρια του συστήματος μελέτης καθώς και η Λειτουργική Μονάδα (Functional Unit, FU).
2. **Η Απογραφή Κύκλου Ζωής** (Life Cycle Inventory, LCI): γίνεται απογραφή όλων των ροών (ενέργειας, πρώτων υλών, αποβλήτων, εκπομπών, κ.λπ.) που εισέρχονται και εξέρχονται καθ' όλη την διάρκεια ζωής του συστήματος. Η απογραφή των δεδομένων είναι μια ποσοτική περιγραφή των συνολικών ισοζυγίων μάζας και ενέργειας μέσα στα όρια του συστήματος και γίνεται αναφορικά με την FU.
3. **Η Ανάλυση Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής** (Life Cycle Impact Assessment, LCIA): πραγματοποιείται η περαιτέρω επεξεργασία του συνόλου των αποτελεσμάτων της απογραφής δεδομένων από πλευράς περιβαλλοντικών επιπτώσεων και κοινωνικών προτιμήσεων. Η εκτίμηση επιπτώσεων είναι μια ποσοτική ή/και ποιοτική και χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει και να ερμηνεύσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προσδιορίστηκαν κατά το στάδιο της απογραφής (Guinée and Lindeijer, 2002).

4. **Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων** (results interpretation): αξιολογούνται τα αποτελέσματα, οι επιλογές και οι υποθέσεις των LCI και LCIA που προηγήθηκαν ως προς τη συνέπεια, την πληρότητα, την ορθότητα και την ευρωστία τους και εξάγονται συμπεράσματα και υποδείξεις για τη λήψη αποφάσεων αναφορικά με το εξεταζόμενο σύστημα (Van Oers et al., 2002).

#### 6.3.6 Εκτίμηση της συνεισφοράς της πιλοτικής μονάδας στην διαμόρφωση του νομικού πλαισίου για την διαχείριση αστικών υγρών αποβλήτων

Στα πλαίσια μελέτης και αξιολόγησης της προτεινόμενης μεθόδου προ-επεξεργασίας λυμάτων και αξιοποίησης των παραγόμενων βιοστερεών του καινοτομικής πιλοτικής μονάδας του έργου LIFE B2E4sustainable-WWTP εκτιμήθηκε και η συνεισφορά της στην διαμόρφωση του νομικού πλαισίου για την διαχείριση αστικών υγρών αποβλήτων. Πιο συγκεκριμένα, έγινε χαρτογράφηση των νομοθεσιών, οδηγιών και κανονισμών, που σχετίζονται με την επεξεργασία λυμάτων και τη διαχείριση υδατικών πόρων, τόσο εθνικό όσο και σε ευρωπαϊκό επίπεδο (Σύρπης, 2023).

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε η συλλογή του σχετικού εθνικού και ευρωπαϊκού νομικού πλαισίου, το οποίο ακολούθως μελετήθηκε προσεκτικά, απομονώθηκαν τα βασικότερα σημεία του και καταγράφηκαν συνοπτικά. Στην συνέχεια, οι πρωταρχικοί στόχοι, το αντικείμενο μελέτης και η εφαρμογή των προτεινόμενων τεχνολογιών του έργου LIFE B2E4sustainable-WWTP συσχετίστηκαν με κάθε νομοθεσία / οδηγία / κανονισμό, ώστε να προσδιοριστεί σε κάθε περίπτωση η άμεση ή έμμεση σύνδεση μεταξύ του έργου και του νομικού πλαισίου.

Ακολουθώντας αυτή την μεθοδολογία, διερευνήθηκε η δυνατότητα ενσωμάτωσης των προτεινόμενων τεχνολογιών του έργου LIFE B2E4sustainable-WWTP σε διάφορες ΕΕΛ ανά την Ελλάδα και την Ευρώπη. Ακόμη, εκτιμήθηκε η συμβολή της πιλοτικής μονάδας μικροκοσκίνισης - αεριοποίησης βιοστερεών στη αναθεώρηση / ανανέωση του υπάρχοντος νομικού πλαισίου, καθώς και η συνεισφορά στην διαμόρφωση νέων κανονισμών για πιο εκσυγχρονισμένη, ενεργειακά αποδοτική και περιβαλλοντικά φιλική διαχείριση λυμάτων.

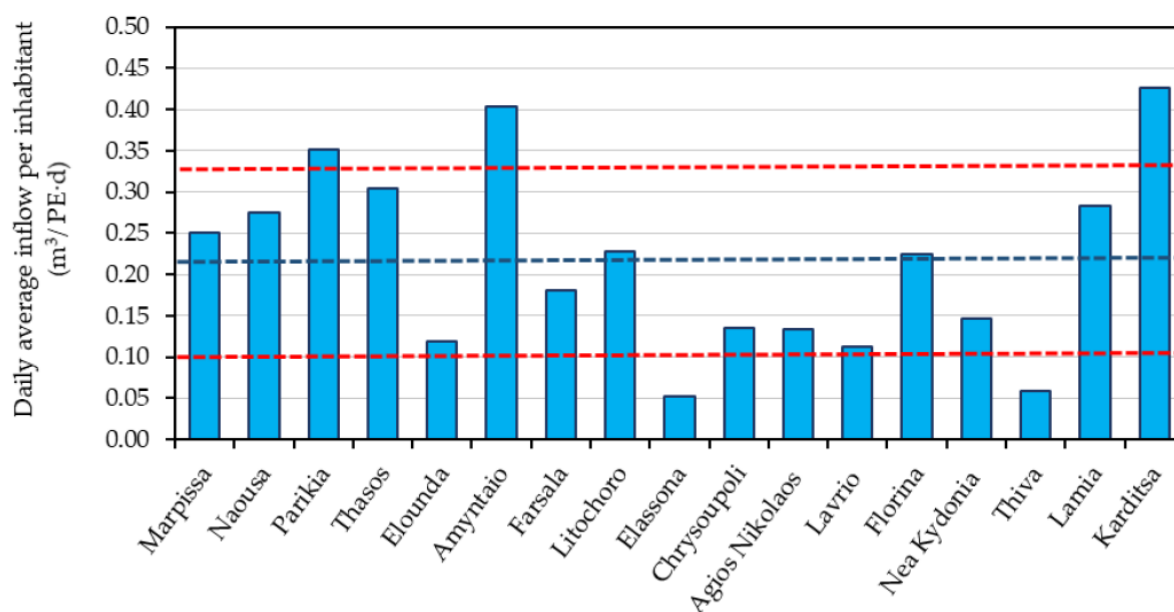
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. Αποτελέσματα - Συζήτηση

### 7.1 Ενεργειακό προφίλ των ΕΕΛ της Ελλάδος

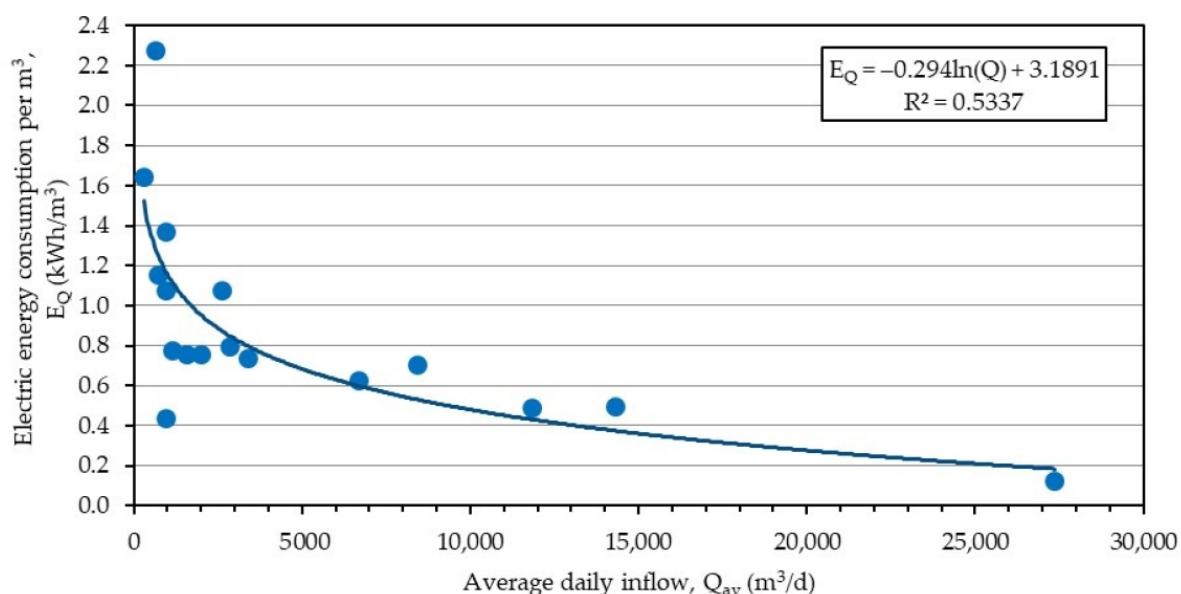
Η υψηλή ενεργειακή κατανάλωση των ΕΕΛ είναι ένα ζήτημα που απασχολεί την παγκόσμια κοινότητα αλλά και την Ελλάδα, όπου η πλειοψηφία των ΕΕΛ λειτουργεί με παρατεταμένο αερισμό, γεγονός που οδηγεί σε υψηλά λειτουργικά κόστη λόγω των υψηλών ενεργειακών αναγκών.

Η παρούσα μελέτη διερευνήσε τις ενεργειακές απαιτήσεις 17 ΕΕΛ ενεργού ιλύος της Ελλάδος, οι οποίες εξυπηρετούν 1.100 - 56.000 κατοίκους, με μέση ημερήσια εισερχόμενη παροχή μεταξύ 300 - 27.300 m<sup>3</sup>/d. Οι ΕΕΛ που συμπεριλήφθηκαν στην μελέτη είναι οι εξής: Μάρπησσα, Νάουσα, Παροικιά, Θάσος, Ελούντα, Αμύνταιο, Φάρσαλα, Λιτόχωρο, Ελασσόνα, Χρυσούπολη, Άγιος Νικόλαος, Λαύριο, Φλώρινα, Νέα Κυδωνία, Θήβα, Λαμία και Καρδίτσα. Λεπτομέρειες σχετικά με την τοποθεσία, τις διεργασίες, την μέση ημερήσια παροχή ( $Q_{av}$ , m<sup>3</sup>/d), τον εξυπηρετούμενο πληθυσμό (Population Equivalent, PE), την μέση ημερήσια κατανάλωση ενέργειας (kWh/d) καθώς και την κατανάλωση ενέργειας ανά m<sup>3</sup>,  $E_Q$  (kWh/m<sup>3</sup>) για κάθε μία από τις υπό μελέτη ΕΕΛ δίνονται εντός σχετικής επιστημονικής δημοσίευσης (Siatou et al., 2020; Siatou et al., 2021). Τα βασικότερα αποτελέσματα της μελέτης παρατίθενται παρακάτω.

Αρχικά, η ημερήσια παραγωγή αποβλήτου ανά κάτοικο βρέθηκε ότι κυμαίνεται μεταξύ 0,052 και 0,426 m<sup>3</sup>/PE·d, με μέση τιμή  $0,217 \pm 0,114$  m<sup>3</sup>/PE·d (Διάγραμμα 7.1). Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά μονάδα όγκου ( $E_Q$ ) κυμαίνεται μεταξύ 0,128 - 2,280 kWh/m<sup>3</sup> (μέση τιμή  $0,903 \pm 0,509$  kWh/m<sup>3</sup>), ακολουθώντας την σχεδόν λογαριθμική φθίνουσα συσχέτιση με την μέση ημερήσια εισερχόμενη παροχή ( $Q_{av}$ ),  $E_Q = -0,294 \ln Q_{av} + 3,1891$ ;  $R^2 = 0,5337$  (Διάγραμμα 7.2).

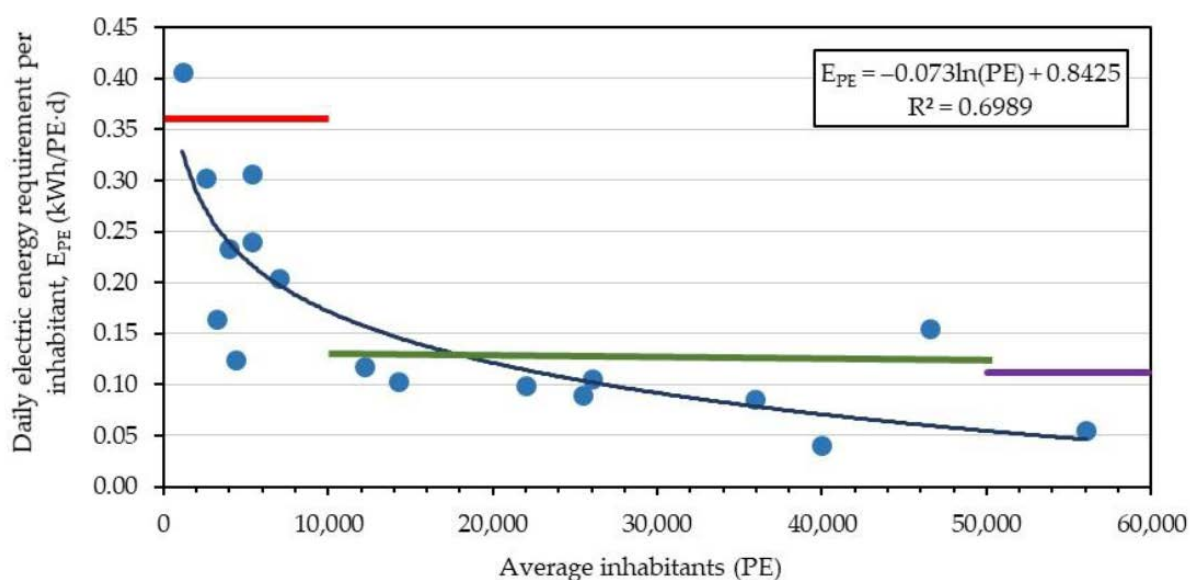


Διάγραμμα 7.1 Μέση ημερήσια παραγωγή αποβλήτου ανά κάτοικο (m<sup>3</sup>/PE·d), με μέση τιμή (διακεκομμένη μπλε γραμμή) και τυπική απόκλιση (διακεκομμένες κόκκινες γραμμές) για τις 17 ΕΕΛ.



Διάγραμμα 7.2 Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά μονάδα όγκου επεξεργασμένου αποβλήτου ( $E_Q$ , kWh/m<sup>3</sup>) συναρτήσει της μέσης ημερήσιας εισερχόμενης παροχής ( $Q_{av}$ , m<sup>3</sup>/d) με γραμμή τάσης.

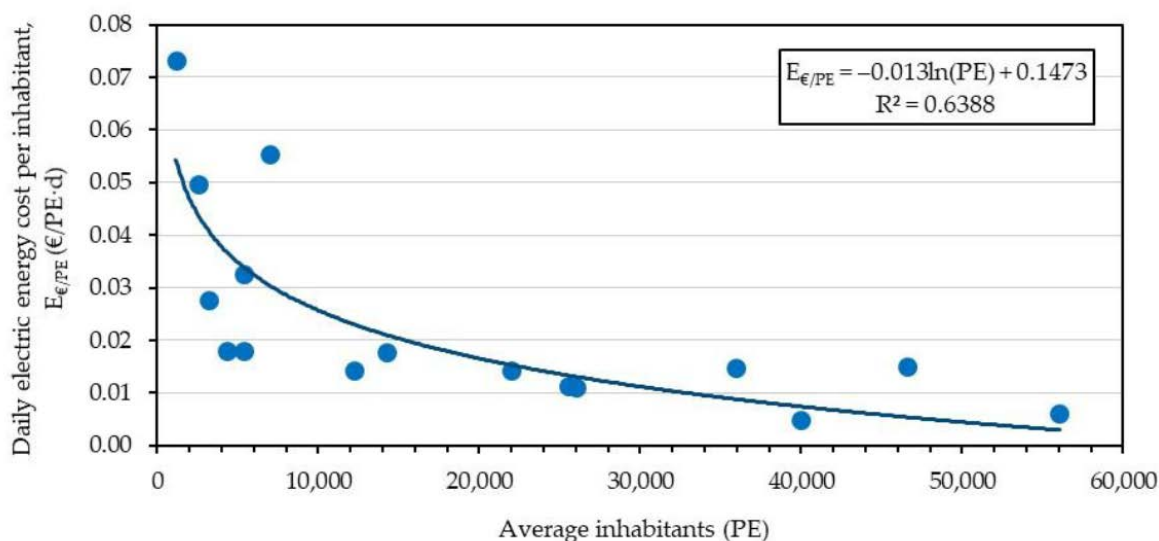
Παρόμοια σχέση βρέθηκε και μεταξύ των ημερήσιων απαιτήσεων σε ηλεκτρική ενέργεια για επεξεργασία αποβλήτου ανά κάτοικο ( $E_{PE}$ ) συναρτήσει του ισοδύναμου πληθυσμού (PE). Συγκεκριμένα, το  $E_{PE}$  βρέθηκε ότι κυμαίνεται μεταξύ 0,041 - 0,407 kWh/PE·d, με μέση τιμή  $0,167 \pm 0,101$  kWh/PE·d, ενώ η σχέση με το PE είναι η  $E_{PE} = -0,073\ln(PE) + 0,8425$ ;  $R^2 = 0,6989$  (Διάγραμμα 7.3). Μάλιστα, οι τιμές αυτές είναι πολύ κοντά στις αντίστοιχες που φαίνονται στο Διάγραμμα 7.3 με κόκκινη, πράσινη και μωβ γραμμή, που έχουν αναφερθεί σε άλλη έρευνα (Δημοπούλου, 2011).



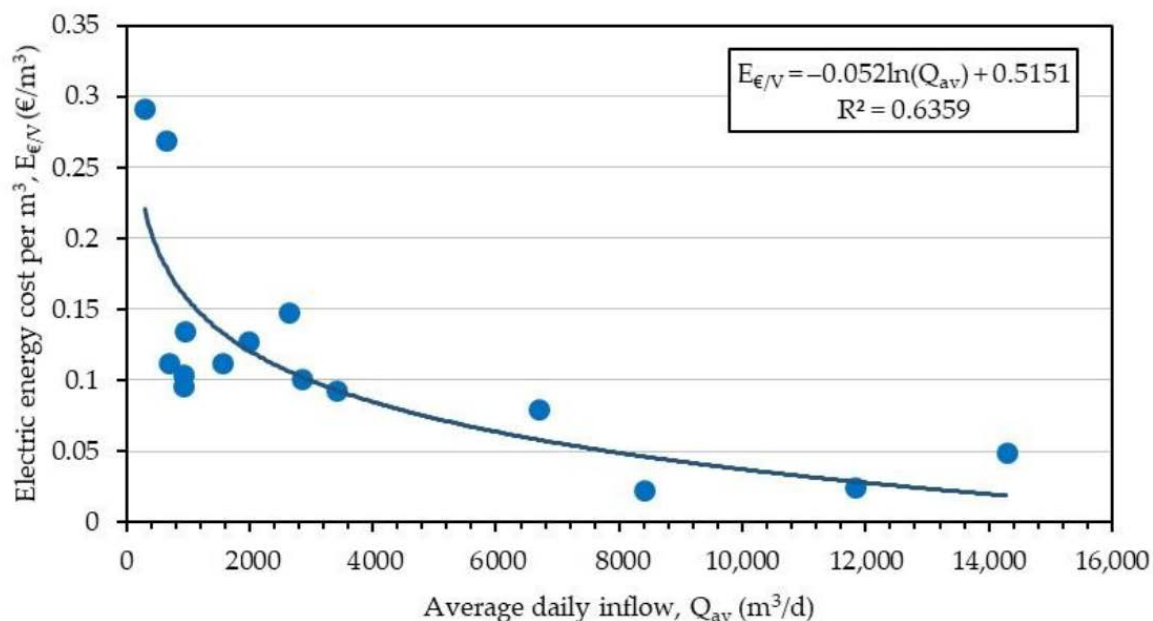
Διάγραμμα 7.3 Ημερήσια απαίτηση σε ηλεκτρική ενέργεια ανά κάτοικο ( $E_{PE}$ , kWh/PE·d) συναρτήσει του ισοδύναμου πληθυσμού (PE) με γραμμή τάσης. Κόκκινη, πράσινη και μωβ γραμμή: μέση  $E_{PE}$  για ΕΕΛ που εξυπηρετούν έως 10.000, από 10.000 έως 50.000 και άνω των 50.000 PE αντίστοιχα, που αναφέρονται από την Δημοπούλου (2011).

Παρομοίως, για το ημερήσιο ενεργειακό κόστος ανά κάτοικο ( $E_{€PE}$ ) συναρτήσει του ισοδύναμου πληθυσμού (PE), καθώς και για το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας ανά μονάδα όγκου αποβλήτου ( $E_{€V}$ ) συναρτήσει της μέσης ημερήσιας εισερχόμενης παροχής ( $Q_{av}$ ),

βρέθηκαν σχεδόν λογαριθμικές τάσεις,  $E_{€/PE} = -0,013\ln(PE) + 0,1473$ ;  $R^2 = 0,6388$  (Διάγραμμα 7.4) και  $E_{€/V} = -0,052\ln(Q_{av}) + 0,5151$ ;  $R^2 = 0,6359$  (Διάγραμμα 7.5), αντίστοιχα, ενώ τα εύρη τιμών βρέθηκαν 0,005 - 0,073 €/PE·d με μέση τιμή  $0,024 \pm 0,019$  €/PE·d για το  $E_{€/PE}$  και 0,012 - 0,291 €/m<sup>3</sup> με μέση τιμή  $0,111 \pm 0,077$  €/m<sup>3</sup> για το  $E_{€/V}$ .



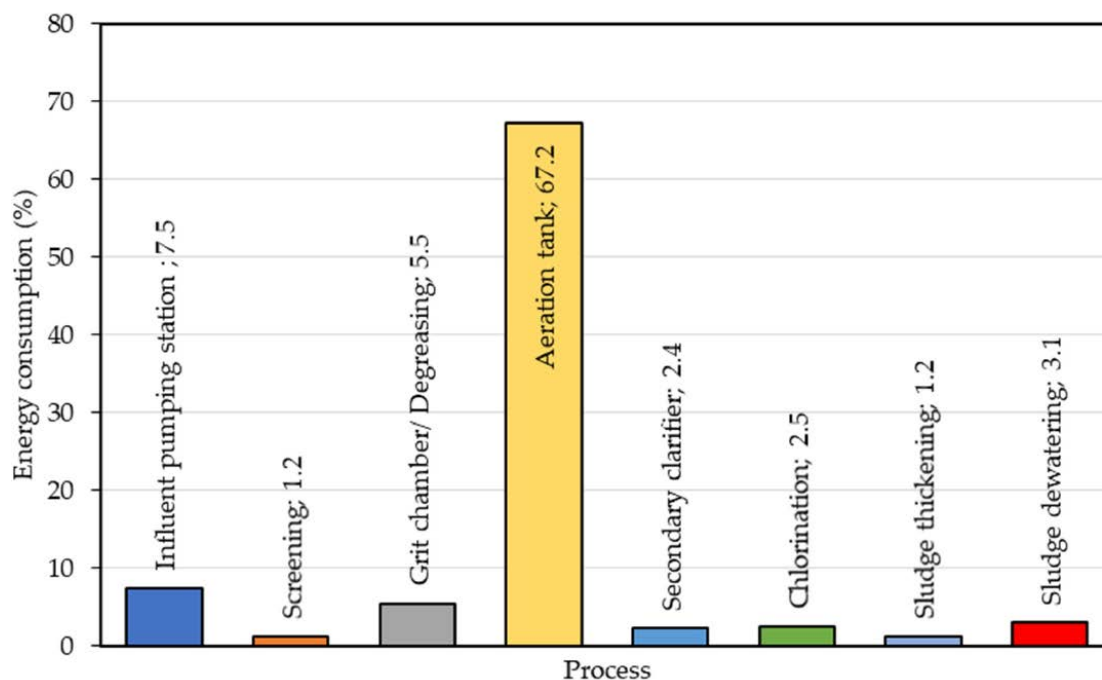
Διάγραμμα 7.4 Ημερήσιο ενεργειακό κόστος ανά κάτοικο ( $E_{€/PE}$ , €/PE·d) συναρτήσει του ισοδύναμου πληθυσμού (PE) με γραμμή τάσης.



Διάγραμμα 7.5 Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας ανά μονάδα όγκου αποβλήτου ( $E_{€/V}$ , €/m<sup>3</sup>) συναρτήσει της μέσης ημερήσιας εισερχόμενης παροχής ( $Q_{av}$ , m<sup>3</sup>/d) με γραμμή τάσης.

Τέλος, προσδιορίστηκε η ενεργειακή κατανομή των βασικών διεργασιών των συμβατικών ΕΕΛ ενεργού ιλύος (Διάγραμμα 7.6), από την οποία φαίνεται ότι το στάδιο του αερισμού είναι ο κύριος καταναλωτής ηλεκτρικής ενέργειας με ποσοστό 67,2% (0,618 kWh/m<sup>3</sup>), το οποίο συνάδει με την βιβλιογραφία (Daw et al., 2012; Energy Solutions, 2009; Metcalf and Eddy, 2003; WERF, 2010). Ακολουθούν κατά σειρά: το αντλιοστάσιο (7,5%), η δευτεροβάθμια καθίζηση (2,4%), η εξάμμωση (5,5%), η αφυδάτωση ιλύος (3,1%), η χλωρίωση (2,5%) , η εσχάρωση (1,2%) και η πάχυνση ιλύος (1,2%).





Διάγραμμα 7.6 Ενεργειακή κατανομή των βασικών διεργασιών των συμβατικών ΕΕΛ ενεργού ιλύος.

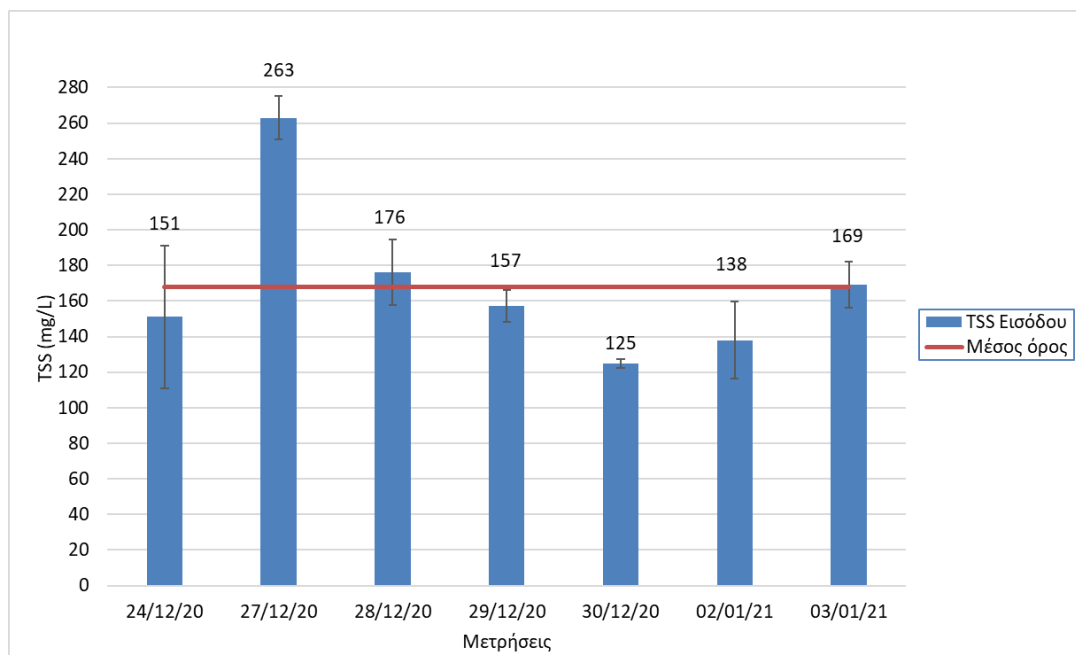
Συμπερασματικά, η μεγάλη διακύμανση των ενεργειακών απαιτήσεων ανά μονάδα όγκου εισροής και ανά εξυπηρετούμενο κάτοικο αναδεικνύουν ότι η απόδοση των ΕΕΛ επιδέχεται μεγάλης βελτίωσης αναφορικά με την κατανάλωση ενέργειας. Οι διακυμάνσεις αυτές σε συνδυασμό με την υψηλή ενεργειακή κατανάλωση του αερισμού, δείχνουν ότι κρίνεται αναγκαία η ανάπτυξη καινοτομικών και ενεργειακά αποτελεσματικών μεθόδων επεξεργασίας αποβλήτων. Μία τέτοια πρόταση εξετάζεται και στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής, ώστε να διαπιστωθεί αν μπορεί να αποτελέσει λύση στο χρόνιο ενεργειακό πρόβλημα των ΕΕΛ ενεργού ιλύος.

## 7.2 Χαρακτηριστικά εισερχόμενου - εξερχόμενου αποβλήτου και δευτεροβάθμιας ιλύος της ΕΕΛ Ρεθύμνου

Προκειμένου να υπάρχει σαφής εικόνα της υφιστάμενης κατάστασης της ΕΕΛ Ρεθύμνου (χωρίς την λειτουργία της πιλοτικής μονάδας) προσδιορίστηκαν τα βασικά χαρακτηριστικά εισερχόμενου και εξερχόμενου αποβλήτου (TSS, BOD, COD) (Καμπουράκης, 2023), καθώς και της δευτεροβάθμιας ξηραμένης ιλύος (TS, VS, HHV).

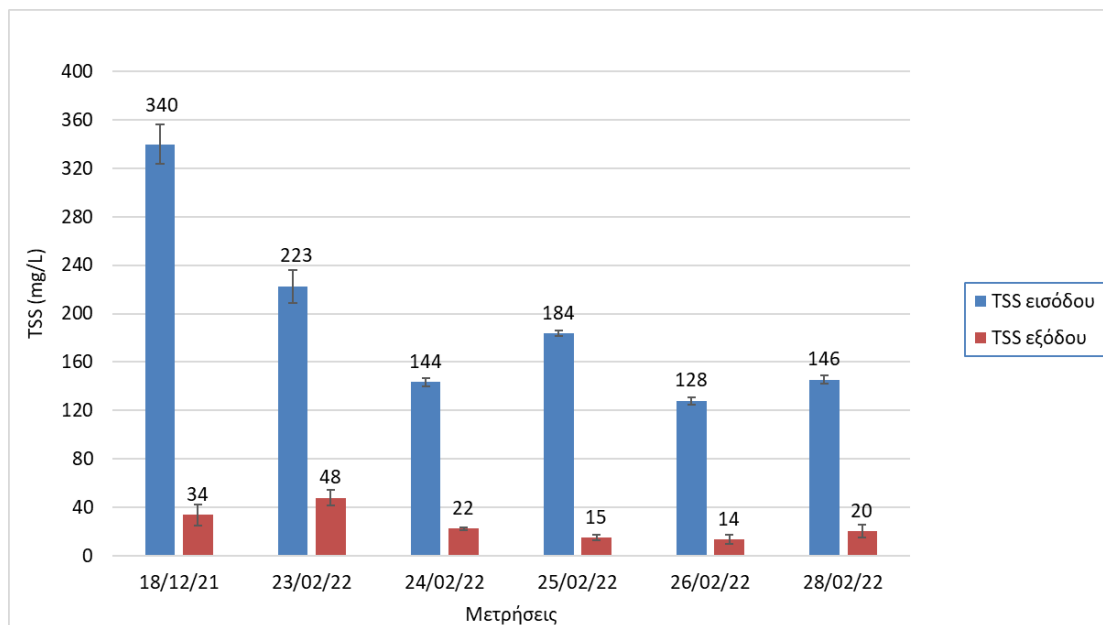
### 7.2.1 TSS εισόδου - εξόδου

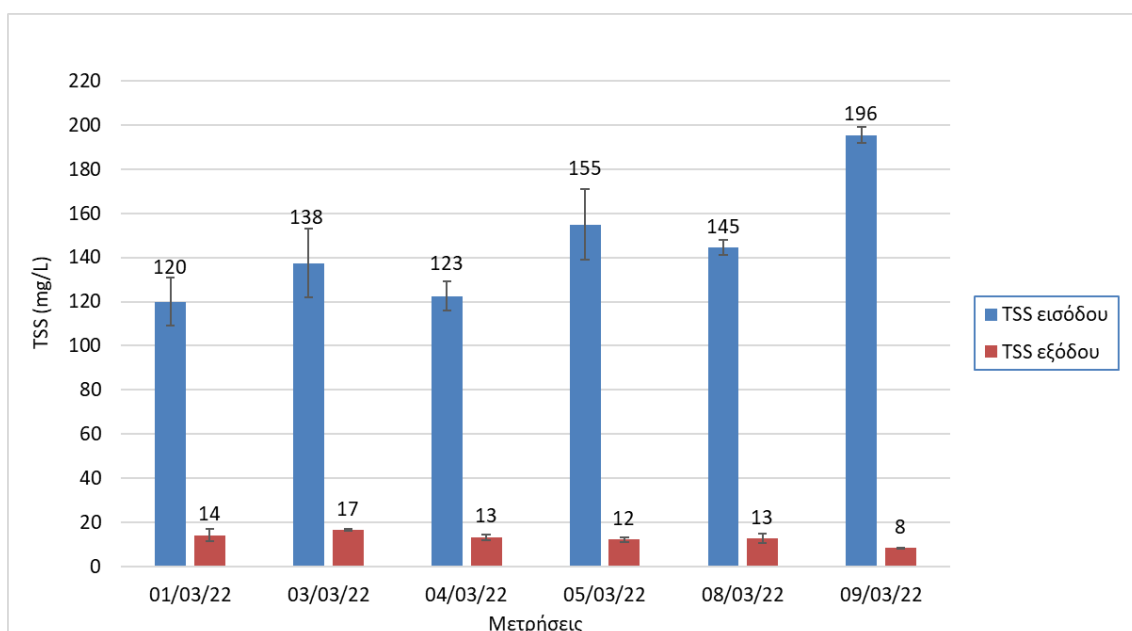
Στο Διάγραμμα 7.7 παρουσιάζονται οι μετρήσεις των TSS εισόδου, από τις οποίες προκύπτει μέσος όρος  $168 \pm 42$  mg/L. Παρατηρούμε ότι οι μετρήσεις που ελήφθησαν στις 30/12/2020 και 02/01/2021 είναι χαμηλότερες, γεγονός που ενδέχεται να οφείλεται στην έντονη βροχόπτωση που σημειώθηκε στην περιοχή εκείνες τις μέρες. Για να υπάρχει πληρέστερη εικόνα περί των περιεχόμενων TSS στο εισερχόμενο απόβλητο, συλλέχθηκαν οι μετρήσεις του εργαστηρίου της ΕΕΛ Ρεθύμνου από το 2017 έως και το 2022, από την επεξεργασία των οποίων προκύπτει ότι η συγκέντρωση των TSS εισόδου είναι κατά μέσο όρο  $243 \pm 107$  mg/L (για αναλυτικά διαγράμματα, βλέπε [Παράρτημα](#)) (Manali et al., 2022b).



Διάγραμμα 7.7 Συγκεντρώσεις και μέσος όρος για τα TSS εισόδου της ΕΕΛ Ρεθύμνου.

Κατόπιν, έγιναν ορισμένες μετρήσεις TSS εισόδου και εξόδου στην ΕΕΛ Ρεθύμνου (Διάγραμμα 7.8), με βάση τις οποίες επιβεβαιώνεται το αναμενόμενο, δηλαδή ότι 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.

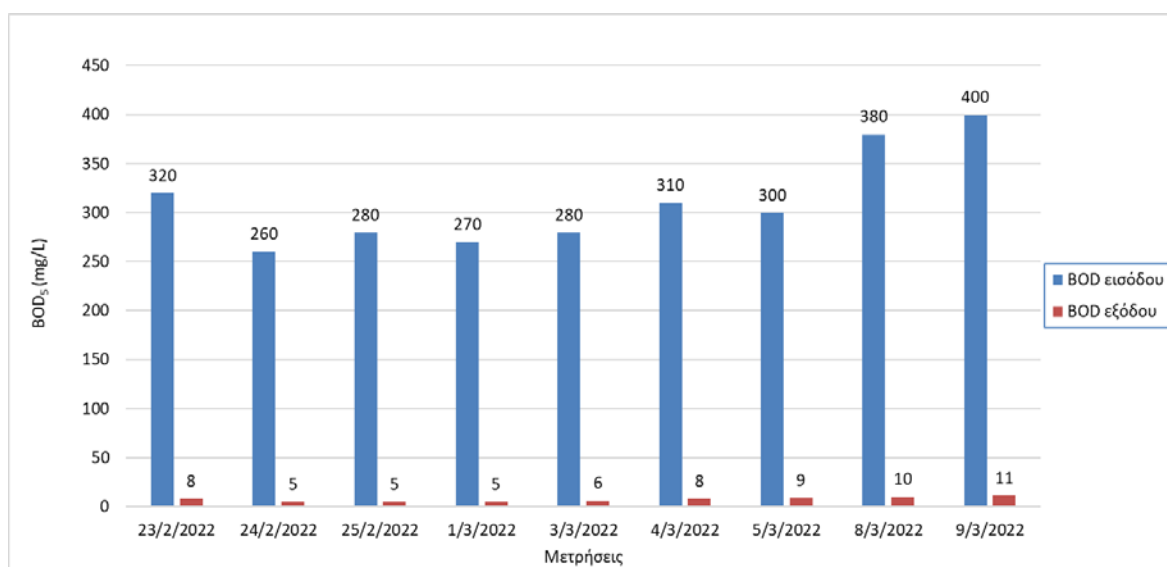




Διάγραμμα 7.8 Συγκεντρώσεις TSS εισόδου (μπλε μπάρες) και εξόδου (κόκκινες μπάρες) της ΕΕΛ Ρεθύμνου (12 μετρήσεις χωρισμένες σε δύο διαγράμματα για να είναι ευανάγνωστα).

## 7.2.2 BOD<sub>5</sub> εισόδου - εξόδου

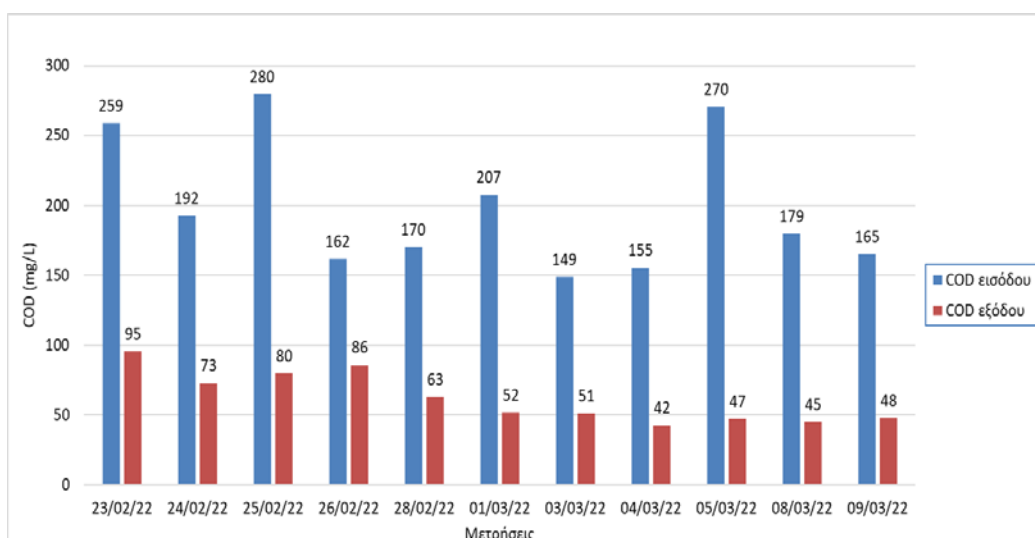
Παρακάτω, παρουσιάζονται οι μετρήσεις των BOD<sub>5</sub>, με την είσοδο να είναι πολύ υψηλότερη ( $311 \pm 46$  mg/L) από την έξοδο ( $7 \pm 2$  mg/L), γεγονός που επιβεβαιώνει ότι λειτουργεί σωστά η ΕΕΛ (Διάγραμμα 7.9).



Διάγραμμα 7.9 Συγκεντρώσεις BOD<sub>5</sub> εισόδου (μπλε μπάρες) και εξόδου (κόκκινες μπάρες) της ΕΕΛ Ρεθύμνου.

## 7.2.3 COD εισόδου - εξόδου

Παράλληλα, μετρήθηκε και η συκέντρωση του COD του εισερχόμενου και του εξερχόμενου αποβλήτου, δίνοντας μέσους όρους  $199 \pm 46$  mg/L και  $62 \pm 18$  mg/L, αντίστοιχα, τιμές που είναι λογικές, καθώς μετά την επεξεργασία αποβλήτων το COD πρέπει να μειώνεται δραστικά.



Διάγραμμα 7.10 Συγκεντρώσεις COD εισόδου (μπλε μπάρες) και εξόδου (κόκκινες μπάρες) της ΕΕΛ Ρεθύμνου.

## 7.2.4 Δευτεροβάθμια ιλύς

Όπως περιεγράφηκε στο Κεφάλαιο 5.2.2, κατά την λειτουργία της πιλοτικής μονάδας το ξηραντήριο τροφοδοτείται με μικροκοσκινισμένα βιοστερεά και με ηλιακά ξηραμένη δευτεροβάθμια ιλύ της ΕΕΛ Ρεθύμνου (αποκλειστικά με ένα υλικό ή και με ανάμιξη των υλικών σε διάφορες αναλογίες). Για να έχουμε μία σαφή εικόνα για την συγκεκριμένη δευτεροβάθμια ιλύ και να σχεδιαστεί κατάλληλα το συνδυαστικό σύστημα τροφοδοσίας, προσδιορίστηκαν τα βασικά χαρακτηριστικά της ιλύος (Πίνακας 7.1). Όπως φαίνεται και στα αποτελέσματα, πρόκειται για ένα αρκετά ξηρό υλικό ( $87,01 \pm 0,16$  % στερεά) με σχετικά καλό ενεργειακό περιεχόμενο ( $16,445 \pm 0,719$  MJ/kg θερμογόνο δύναμη).

Πίνακας 7.1 Χαρακτηριστικά δευτεροβάθμιας αφυδατωμένης ιλύος από την ΕΕΛ Ρεθύμνου (μέσος όρος  $\pm$  τυπική απόκλιση τριών μετρήσεων).

| Παράμετρος  | Τιμή               |
|-------------|--------------------|
| TS (%)      | $87,01 \pm 0,16$   |
| VS (%)      | $67,08 \pm 0,64$   |
| HHV (MJ/kg) | $16,445 \pm 0,719$ |

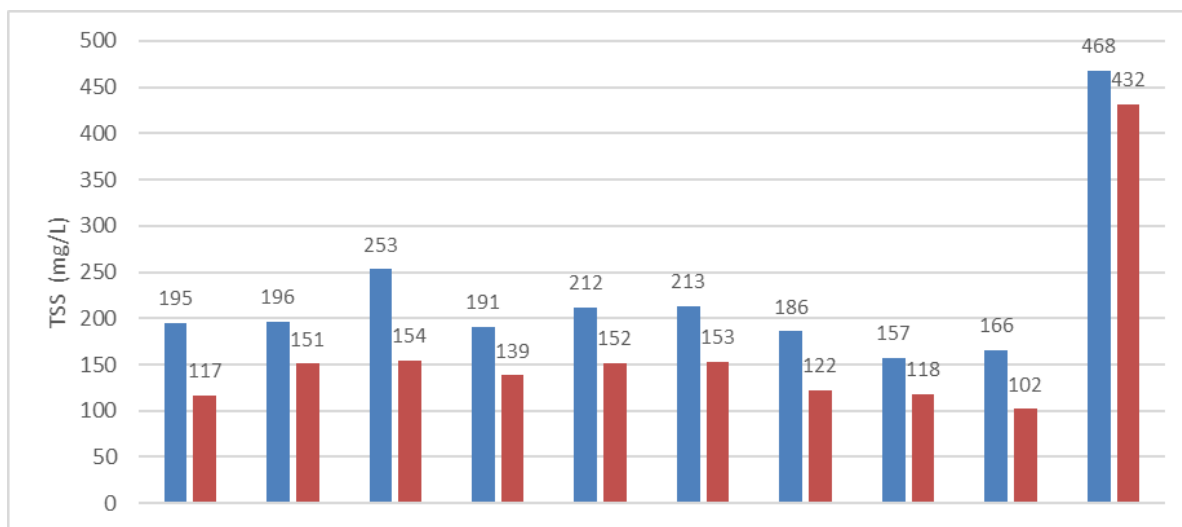
## 7.3 Δοκιμές σχετικά με την μικροκοσκίνιση

### 7.3.1 Προκαταρκτικές μετρήσεις πειραματικού μικροκόσκινου

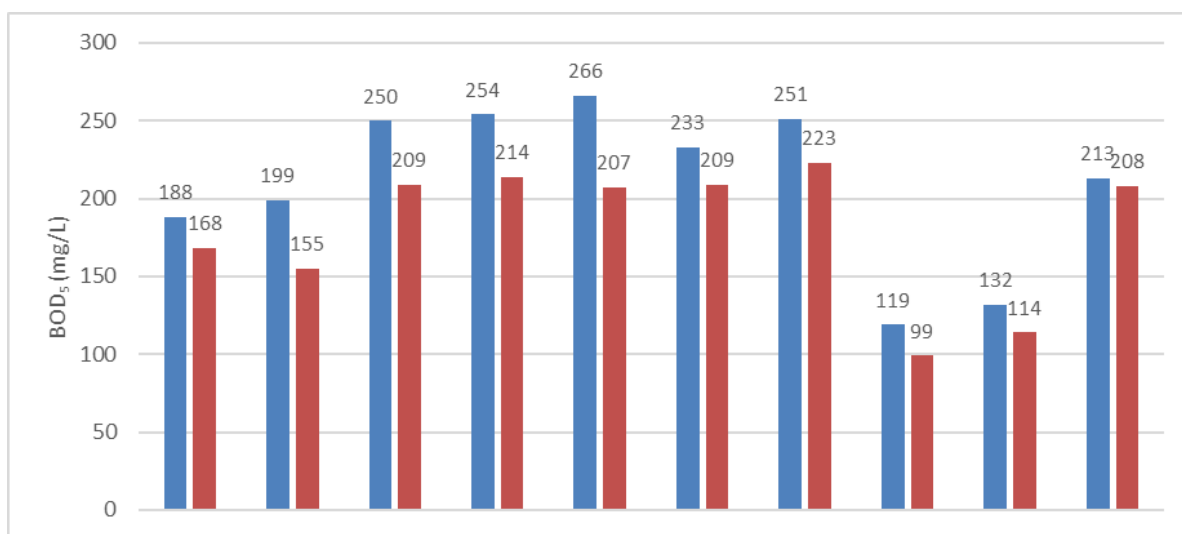
Προτού εγκατασταθεί η πιλοτική μονάδα προ-επεξεργασίας των λυμάτων και αξιοποίησης των παραγόμενων βιοστερεών, πραγματοποιήθηκαν ορισμένες προκαταρκτικές μετρήσεις στο πειραματικό μικροκόσκινο που βρίσκεται στη ΕΕΛ Ρεθύμνου και έχει την ίδια αρχή λειτουργίας με το πιλοτικό (βλέπε Κεφάλαιο 5.2.1). Οι μετρήσεις αυτές αφορούν στην λειτουργία του μικροκόσκινου, στην επίδραση της προσθήκης κροκιδωτικών μέσων στην ποσότητα των μικροκοσκινισμένων βιοστερεών που παράγονται, καθώς και στα χαρακτηριστικά των παραγόμενων βιοστερεών.

Αρχικά, ως προς την απόδοση του μικροκόσκινου, προσδιορίστηκαν τα ποσοστά απομάκρυνσης TSS, BOD<sub>5</sub>, και COD, τα οποία όπως φαίνεται παρακάτω είναι  $29,2 \pm 9\%$  για

TSS (Διάγραμμα 7.11),  $14 \pm 6\%$  για BOD<sub>5</sub> (Διάγραμμα 7.12), και  $16,5 \pm 6\%$  για COD (Διάγραμμα 7.13), αντίστοιχα. Επίσης, ο λόγος BOD<sub>5</sub>/COD είναι  $0,41 \pm 0,13$  για την είσοδο και  $0,43 \pm 0,15$  για την έξοδο (Διάγραμμα 7.14).

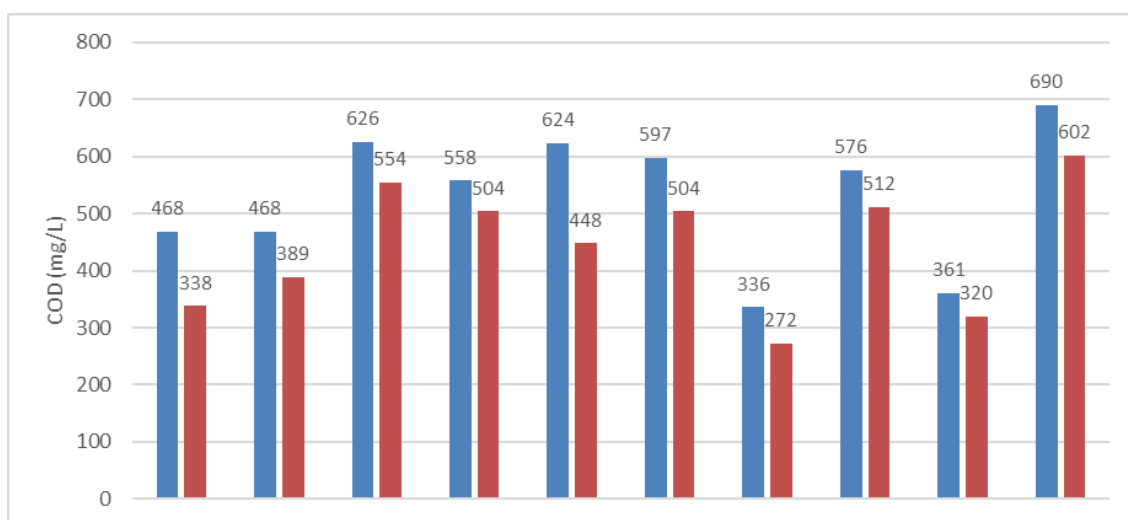


Διάγραμμα 7.11 Συγκεντρώσεις TSS εισόδου (μπλε μπάρες) και εξόδου (κόκκινες μπάρες) του πειραματικού μικροκόσμου.

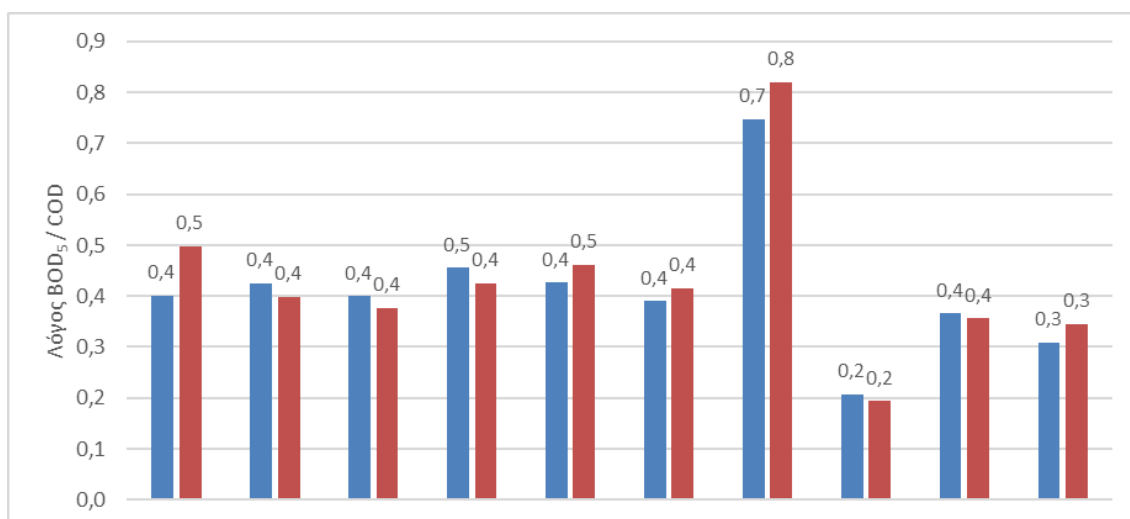


Διάγραμμα 7.12 Συγκεντρώσεις BOD<sub>5</sub> εισόδου (μπλε μπάρες) και εξόδου (κόκκινες μπάρες) του πειραματικού μικροκόσμου.



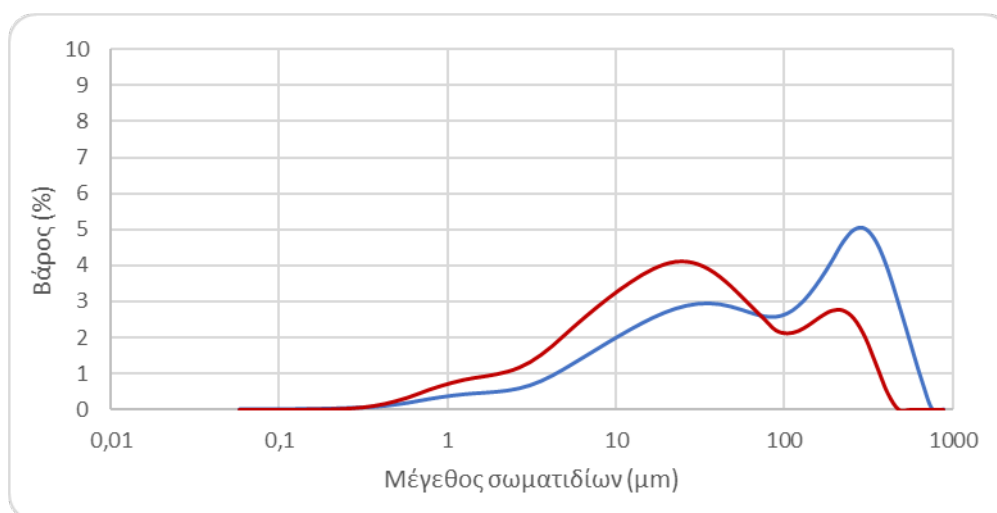


Διάγραμμα 7.13 Συγκεντρώσεις COD εισόδου (μπλε μπάρες) και εξόδου (κόκκινες μπάρες) του πειραματικού μικροκόσκινου.

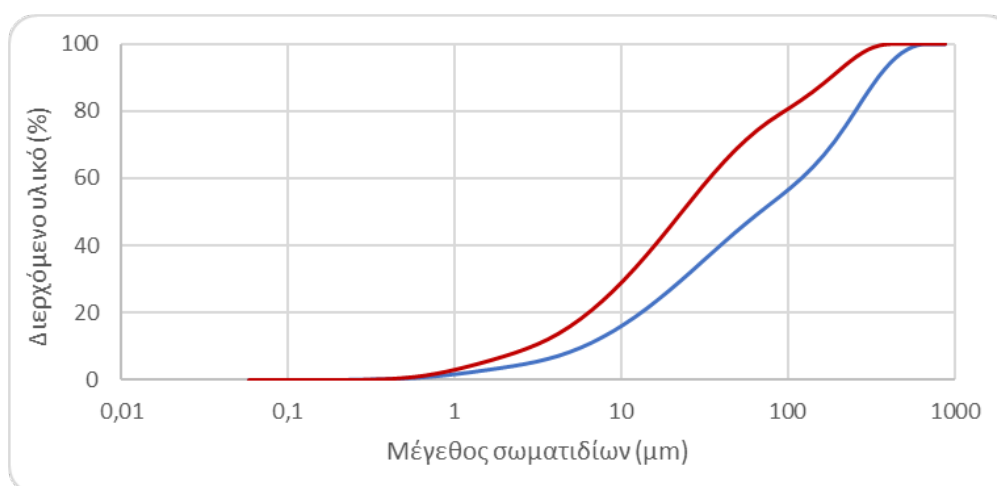


Διάγραμμα 7.14 Λόγος BOD<sub>5</sub>/COD εισόδου (μπλε μπάρες) και εξόδου (κόκκινες μπάρες) του πειραματικού μικροκόσκινου.

Επίσης, προσδιορίστηκε η κατανομή μεγέθους των σωματιδίων του αποβλήτου που εισέρχεται και εξέρχεται από το μικροκόσκινο. Στα Διαγράμματα 7.15 και 7.16 που ακολουθούν, παρουσιάζεται το μέγεθος των σωματιδίων σε συνάρτηση με το βάρος τους (%) και με το ποσοστό διέλευσης του δείγματος. Από τα αποτελέσματα, συμπεραίνουμε ότι χαρακτηριστικό της λειτουργίας του μικροκόσκινου δεν είναι απλώς η απομάκρυνση των στερεών σωματιδίων, αλλά η επιλεκτική αφαίρεση των πιο ογκωδών. Πιο συγκεκριμένα, στο Διάγραμμα 7.15 φαίνεται ότι ενώ στην είσοδο εντοπίζεται υψηλή συγκέντρωση σε σωματίδια γύρω από την περιοχή των 300 μm, μετά την μικροκοσκίνηση η συγκέντρωση αυτή μειώνεται κατά πολύ και εμφανίζεται αυξημένη συγκέντρωση στην περιοχή των 25 μm. Επίσης, στο Διάγραμμα 7.16, φαίνεται ότι πάντα στην είσοδο έχουμε μεγαλύτερο ποσοστό ογκωδών σωματιδίων συγκριτικά με την έξοδο που αποτελείται από μικρότερα σε μέγεθος σωματίδια.



Διάγραμμα 7.15 Μέγεθος σωματιδίων συναρτήσει του βάρους τους (είσοδος - μπλε γραμμή, έξοδος - κόκκινη γραμμή).



Διάγραμμα 7.16 Μέγεθος σωματιδίων συναρτήσει ποσοστού διέλευσης (είσοδος - μπλε γραμμή, έξοδος - κόκκινη γραμμή).

Ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος για το μικροκόσκινο είναι η μέση ημερήσια παραγωγή βιοστερεών, η οποία με βάση τις δοκιμές τα αποτελέσματα των οποίων φαίνονται στον Πίνακα 7.2 είναι κατά μέσο όρο 276 kg/d (σε ξηρή βάση).

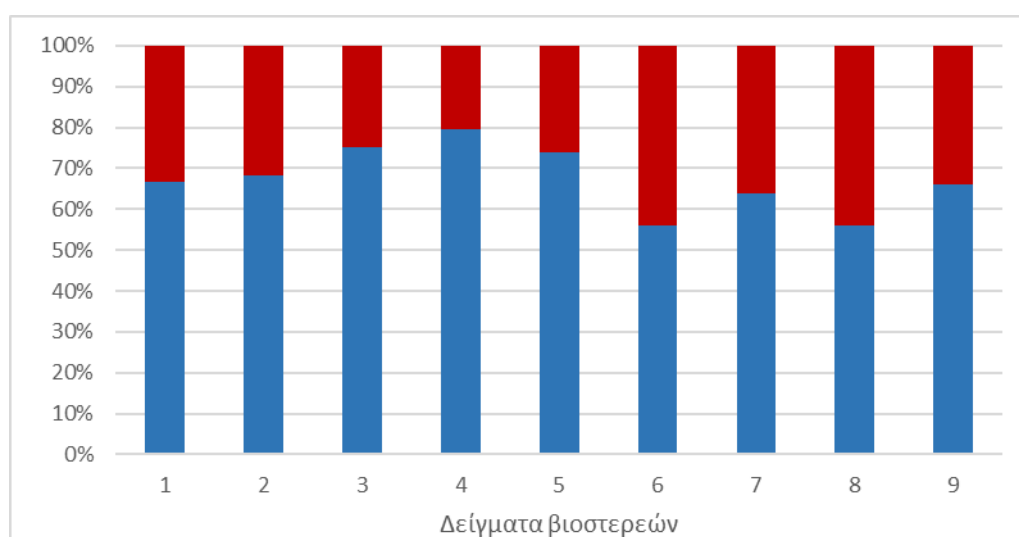
Πίνακας 7.2 Παραγωγή βιοστερεών (υγρή - ξηρή βάση) ανά ημέρα (5000 m<sup>3</sup> αποβλήτου).

| Ολικό εισερχόμενο απόβλητο (m <sup>3</sup> ) | Παραγόμενα βιοστερεά (kg, υγρή βάση) | Παραγόμενα βιοστερεά (kg, ξηρή βάση) | Παραγόμενα βιοστερεά (kg, ξηρή βάση)/ m <sup>3</sup> | Παραγόμενα βιοστερεά (kg, ξηρή βάση)/ 5000 m <sup>3</sup> |
|--|--------------------------------------|--------------------------------------|--|---|
| 135  | 9,2                                  | 3,36                                 | 0,0249   | 124,37  |
| 135  | 10,3                                 | 3,35                                 | 0,0248   | 123,98  |
| 70   | 12,8                                 | 4,61                                 | 0,0658   | 329,14  |
| 60   | 6,3                                  | 2,27                                 | 0,0378   | 189,00  |
| 125  | 17,8                                 | 6,23                                 | 0,0498   | 249,20  |
| 108  | 18,2                                 | 6,73                                 | 0,0624   | 311,76  |
| 108  | 19,4                                 | 7,18                                 | 0,0665   | 332,31  |

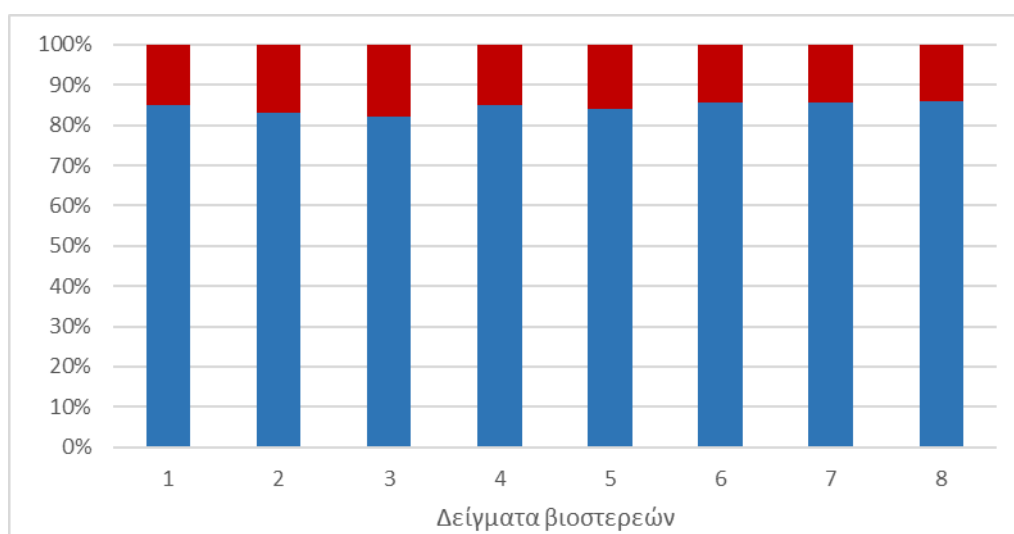
|                   |      |       |               |               |
|-------------------|------|-------|---------------|---------------|
| 190,8             | 34,8 | 12,88 | 0,0675        | 337,42        |
| 42                | 8,1  | 3,00  | 0,0714        | 356,79        |
| 66,7              | 12,2 | 4,51  | 0,0677        | 338,38        |
| 142               | 26,2 | 9,69  | 0,0683        | 341,34        |
| <b>Μέσος όρος</b> |      |       | <b>0,0552</b> | <b>275,79</b> |

Σχετικά με την προσθήκη κροκιδωτικών (βλέπε [Παράρτημα](#) για φωτογραφίες από τις δοκιμές κροκιδώσης), οι μετρήσεις που έγιναν δεν έδειξαν κάποια σημαντική αύξηση στην ποσότητα των παραγόμενων βιοστερεών.

Τα χαρακτηριστικά των παραγόμενων μικροοσκινισμένων βιοστερεών που προσδιορίστηκαν είναι τα TS, VS και HHV, ενώ έγινε και στοιχειακή ανάλυση και δοκιμές μπρικετοποίησης. Αρχικά, τα TS βρέθηκαν  $32,7 \pm 7,6$  %, ενώ τα VS  $84,5 \pm 1,3$  % των TS, όπως φαίνεται στα Διαγράμματα 7.17 - 7.18.

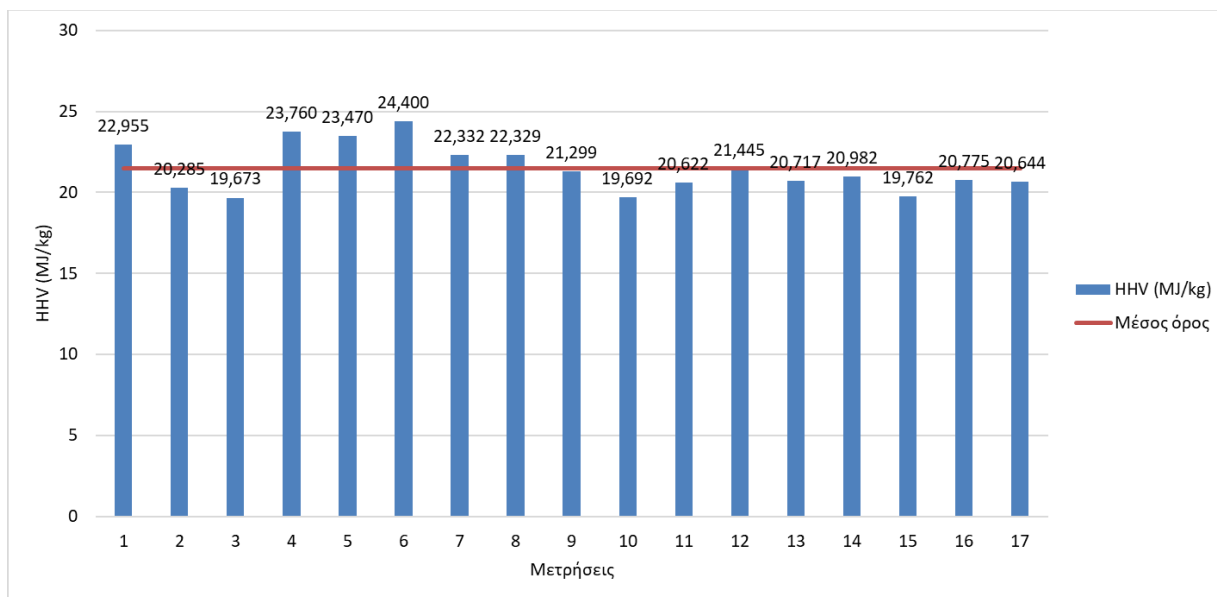


Διάγραμμα 7.17 Υγρασία (μπλε τμήμα μπάρας) και TS (κόκκινο τμήμα μπάρας) των μικροοσκινισμένων βιοστερεών.

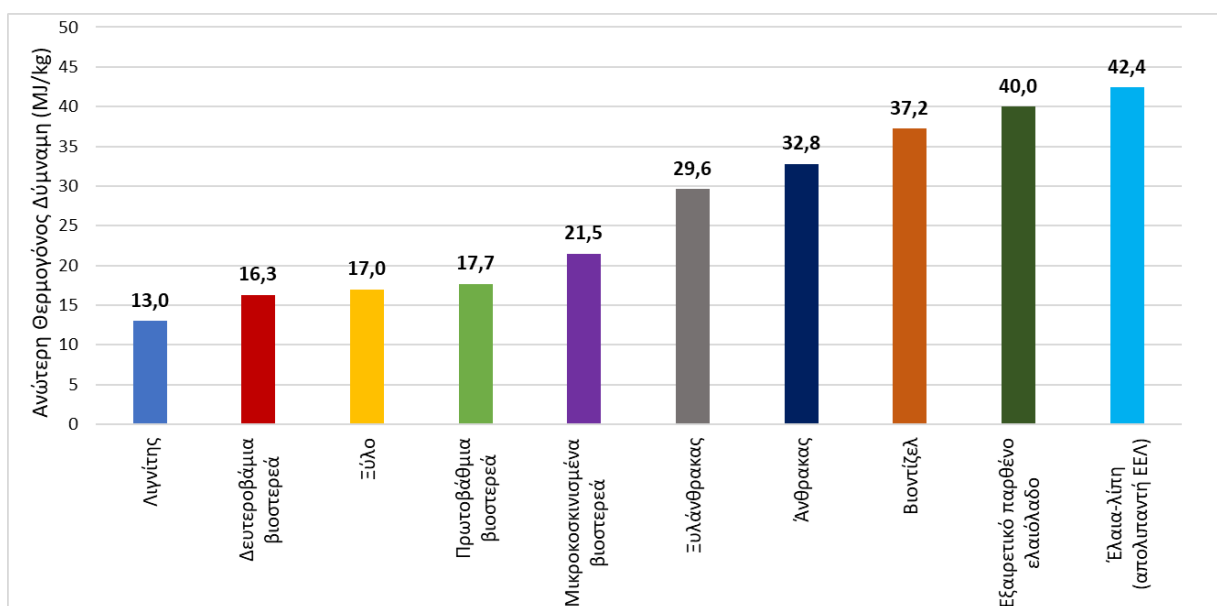


Διάγραμμα 7.18 VS - οργανικά στερεά (μπλε τμήμα μπάρας) και τέφρα - ανόργανα στερεά (κόκκινο τμήμα μπάρας) των μικροοσκινισμένων βιοστερεών ως ποσοστό των TS.

Η θερμογόνος δύναμη (HHV) των μικροκοσκινισμένων βιοστερεών μετρήθηκε επανειλημμένα σε 4 διαφορετικά εργαστήρια και βρέθηκε  $21,479 \pm 1,434$  MJ/kg (Διάγραμμα 7.19). Επίσης, πραγματοποιήθηκε σύγκριση της θερμογόνου δύναμης των μικροκοσκινισμένων βιοστερεών με τις τιμές της θερμογόνου δύναμης άλλων υλικών (λιγνίτης, ξύλο, ξυλάνθρακας, άνθρακας, βιοντίζελ, ελαιόλαδο, έλαια - λίπη) καθώς και άλλων ειδών βιοστερεών (πρωτοβάθμια, δευτεροβάθμια) (Διάγραμμα 7.20), από την οποία φαίνεται ότι τα μικροκοσκινισμένα βιοστερεά έχουν αξιόλογο ενεργειακό περιεχόμενο, και μάλιστα ανώτερο από άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως σαν καύσιμα. Το γεγονός αυτό καθιστά τα μικροκοσκινισμένα βιοστερεά ιδανικά για υλικό τροφοδοσίας θερμικών μεθόδων επεξεργασίας (αεριοποίηση, πυρόλυση, κ.λπ.)



Διάγραμμα 7.19 Μετρήσεις θερμογόνου δύναμης (HHV) των μικροκοσκινισμένων βιοστερεών (μπλε μπάρες) με μέσο όρο (κόκκινη γραμμή).



Διάγραμμα 7.20 Τιμές θερμογόνου δύναμης διαφόρων ειδών βιοστερεών και άλλων υλικών.

Από την στοιχειακή ανάλυση (Πίνακας 7.3), φαίνεται ότι τα μικροκοσκινισμένα βιοστερεά αποτελούνται κυρίως από C ( $52,5 \pm 0,216$  %), αλλά και από H και N σε μικρότερα ποσοστά

( $7,5 \pm 0,205$  % και  $2,2 \pm 0,019$  %, αντίστοιχα), ενώ υπάρχουν και ελάχιστες ποσότητες S ( $0,30 \pm 0,012$  %) και Cl ( $0,05 \pm 0,005$  %) (Σημείωση: το υπόλοιπο 38 % είναι κυρίως O, το οποίο όμως δεν είναι δυνατόν να μετρηθεί με τον στοιχειακό αναλυτή).

Πίνακας 7.3 Αποτελέσματα στοιχειακής ανάλυσης μικροκοσκινισμένων βιοστερεών.

| Στοιχείο | Μονάδες       | Τιμές | Μέσος όρος $\pm$ Τυπική απόκλιση |
|----------|---------------|-------|----------------------------------|
| C        | % (επί ξηρού) | 52,7  | $52,5 \pm 0,216$                 |
|          |               | 52,2  |                                  |
|          |               | 52,6  |                                  |
| H        | % (επί ξηρού) | 7,2   | $7,5 \pm 0,205$                  |
|          |               | 7,5   |                                  |
|          |               | 7,7   |                                  |
| N        | % (επί ξηρού) | 2,22  | $2,2 \pm 0,019$                  |
|          |               | 2,22  |                                  |
|          |               | 2,18  |                                  |
| S        | % (επί ξηρού) | 0,32  | $0,30 \pm 0,012$                 |
|          |               | 0,29  |                                  |
|          |               | 0,30  |                                  |
| Cl       | % (επί ξηρού) | 0,05  | $0,05 \pm 0,005$                 |
|          |               | 0,04  |                                  |
|          |               | 0,05  |                                  |

Τέλος, αφού συλλέχθηκε μία ικανοποιητική ποσότητα βιοστερεών, τα οποία υπέστησαν ηλιακή ξήρανση, χρησιμοποιήθηκε ειδική μηχανή μπρικετοποίησης, προκειμένου να εξεταστεί αν είναι ικανά τα μικροκοσκινισμένα βιοστερεά να σχηματίσουν μπρικέτες, καθώς με αυτή την μορφή γίνεται η τροφοδοσία στον αεριοποιητή καθοδικής ροής. Τα αποτελέσματα ήταν πολύ ικανοποιητικά, καθώς τα βιοστερεά μετασχηματίστηκαν σε συμπαγείς και σταθεροποιημένες μπρικέτες, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.1.



Εικόνα 7.1 Μικροκοσκινισμένα βιοστερεά σχηματισμένα σε συμπαγείς και σταθεροποιημένες μπρικέτες.

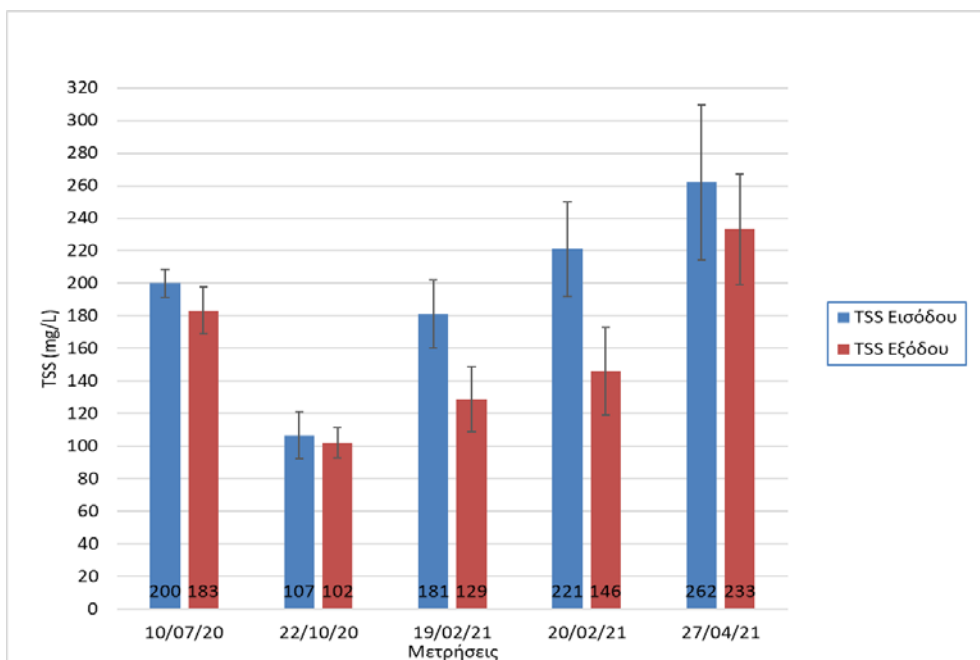


### 7.3.2 Δοκιμές πιλοτικού μικροκόσκινου

Το πιλοτικό μικροκόσκινο εγκαταστάθηκε στην ΕΕΛ Ρεθύμνου τον Ιούλιο του 2020. Από τότε μέχρι και τον Σεπτέμβριο του 2021 πραγματοποιήθηκαν διάφορες δοκιμές, ώστε να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα για την λειτουργικότητα και την αποτελεσματικότητά του. Με βάση τα αποτελέσματα κάθε φάσης δοκιμών, γίνονταν οι κατάλληλες τροποποιήσεις στο μηχάνημα ή στις επικρατούσες συνθήκες με σκοπό την μέγιστη δυνατή βελτίωση στην απόδοση. Οι δοκιμές που έγιναν στο πιλοτικό μικροκόσκινο περιλαμβάνουν συνοπτικά: διάφορες δοκιμές συχνότητας πλύσης του ιμάντα, ταχύτητας του ιμάντα και εισερχόμενης παροχής λυμάτων, εφαρμογή δύο ειδών φίλτρου ιμάντα (άνοιγμα πόρων 350  $\mu\text{m}$  και 250  $\mu\text{m}$ ), προσθήκη κροκιδωτικών και ενσωμάτωση συστήματος συλλογής - ανακυκλοφορίας του νερού πλύσης και των στραγγισμάτων των μικροκοσκινισμένων βιοστερεών.

Αναφορικά με την λειτουργία του μικροκόσκινου, παρατηρήθηκαν προβλήματα λόγω της στιγμιαίας ακανόνιστης ροής του αποβλήτου, με αποτέλεσμα το φίλτρο ιμάντα να βγαίνει από την θέση του και να σταματάει η λειτουργία του μηχανήματος. Ακόμα, η παρουσία χαλικιών στο εισερχόμενο απόβλητο, που θα έπρεπε να είχαν αφαιρεθεί κατά την προ-επεξεργασία (εσχάρωση - εξάμμωση), προκάλεσε 2 φορές το σκίσιμο του φίλτρου με άνοιγμα πόρων 250  $\mu\text{m}$ , το οποίο αντικαταστάθηκε με αντίστοιχο φίλτρο με άνοιγμα πόρων 350  $\mu\text{m}$  (σχετικές φωτογραφίες υπάρχουν στο [Παράρτημα](#)).

Σχετικά με την απόδοση του μικροκόσκινου στην απομάκρυνση TSS, παρουσιάζονται εδώ ορισμένες μετρήσεις. Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 7.21, σημειώνεται μείωση στο εξερχόμενο απόβλητο ( $159 \pm 46 \text{ mg/L}$ ) συγκριτικά με το εισερχόμενο ( $194 \pm 51 \text{ mg/L}$ ) με την απομάκρυνση TSS που επιτυγχάνεται να είναι 17% κατά μέσο όρο. Βέβαια, όπως φαίνεται αναλυτικότερα και στον Πίνακα 7.4, μόνο στις 2 από τις 5 μετρήσεις εμφανίζεται ικανοποιητική απομάκρυνση των TSS (29% στις 19/02/2021 και 34% στις 20/02/2021), καθώς το μικροκόσκινο κατασκευάστηκε με σκοπό να απομακρύνει 20 - 30 % των TSS. Μία πιθανή εξήγηση της διακύμανσης στην απόδοση του μικροκόσκινου είναι η ποιότητα του εισερχόμενου αποβλήτου, αφού η σύσταση του είναι συνεχώς μεταβαλλόμενη.



Διάγραμμα 7.21 Συγκεντρώσεις TSS εισόδου (μπλε μπάρες) και εξόδου (κόκκινες μπάρες) του πιλοτικού μικροκόσκινου.

Πίνακας 7.4 Ποσοστιαία απομάκρυνση TSS του πιλοτικού μικροκόσκινου.

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

Ωστόσο, η απομάκρυνση των TSS θα έπρεπε να είναι υψηλότερη σύμφωνα με τους υπολογισμούς των ισοζυγίων που φαίνονται στον Πίνακα 7.5, καθώς 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.

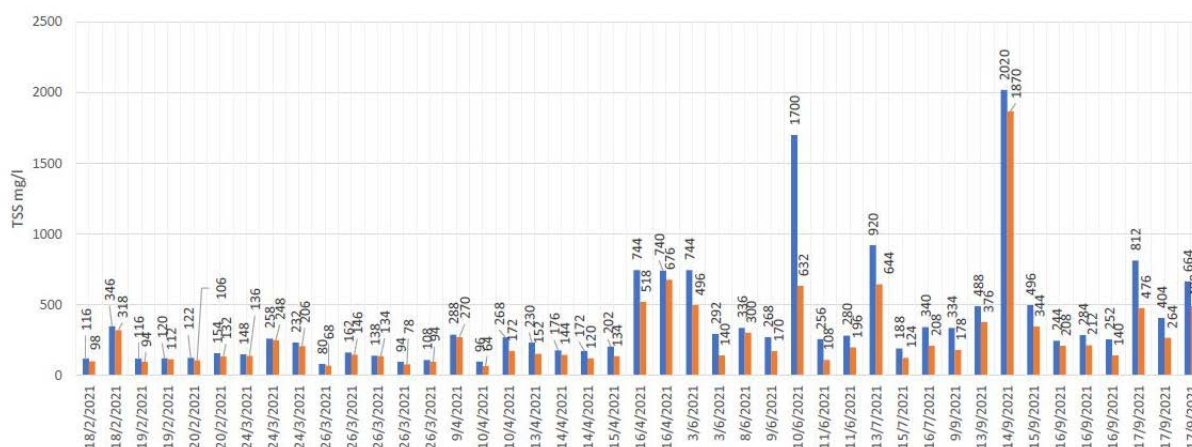
Πίνακας 7.5 Σύγκριση θεωρητικής και πραγματικής παραγωγής βιοστερεών.

| ΙΣΟΖΥΓΙΟ 19/02/21                |                   |                                  |   |   |  |
|----------------------------------|-------------------|----------------------------------|---|---|--|
| Πραγματική παραγωγή βιοστερεών   |                   |                                  |   |   |  |
| Παραγόμενη λάσπη (kg, υγρή φάση) | % Στερεά          | Παραγόμενη λάσπη (kg, ξηρή φάση) | Συνολικά εισερχόμενα λύματα (m <sup>3</sup> ) | Παραγόμενη λάσπη (kg, ξηρή φάση) / m <sup>3</sup> | Παραγόμενη λάσπη (kg, ξηρή φάση) / 5000 m <sup>3</sup> |
| 8,5                              | 37%               | 3,145                            | 1040  | 0,0030  | 15   |
| Θεωρητική παραγωγή βιοστερεών    |                   |                                  |   |   |  |
| 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 / 5000 m <sup>3</sup>            |
| 181                              | 129               | 52                               | 52  | 0,052   | 260  |
|                                  |                   |                                  |   | Χάνονται (σε kg)                                  | - 245  |

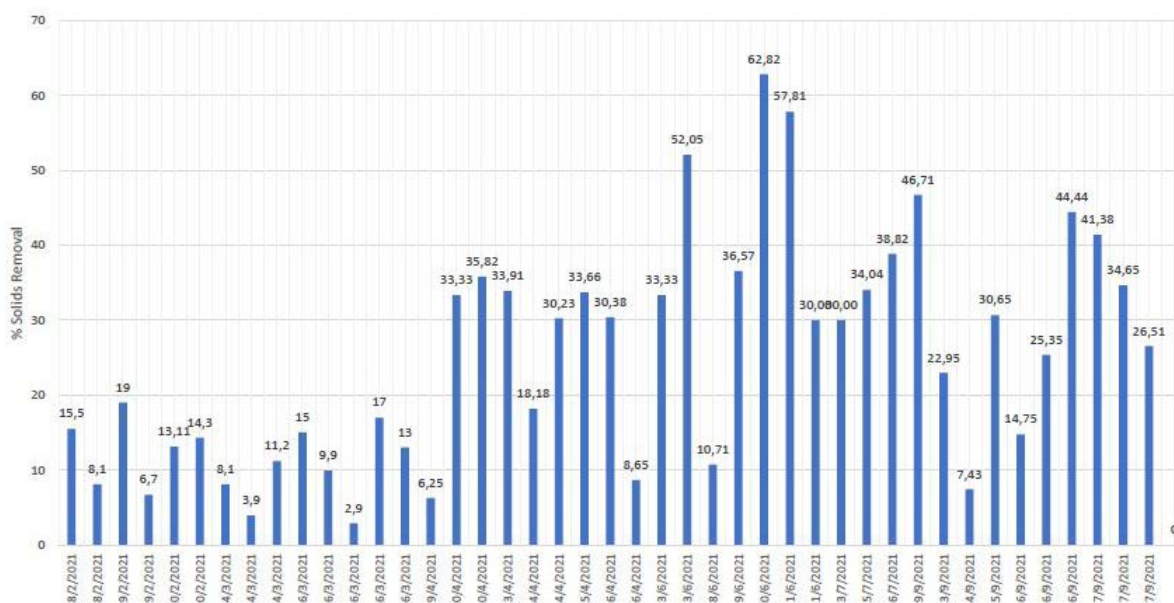
| ΙΣΟΖΥΓΙΟ 20/02/21                |                   |                                  |   |   |  |
|----------------------------------|-------------------|----------------------------------|---|---|--|
| Πραγματική παραγωγή βιοστερεών   |                   |                                  |   |   |  |
| Παραγόμενη λάσπη (kg, υγρή φάση) | % Στερεά          | Παραγόμενη λάσπη (kg, ξηρή φάση) | Συνολικά εισερχόμενα λύματα (m <sup>3</sup> ) | Παραγόμενη λάσπη (kg, ξηρή φάση) / m <sup>3</sup> | Παραγόμενη λάσπη (kg, ξηρή φάση) / 5000 m <sup>3</sup> |
| 2,5                              | 36%               | 0,9                              | 522   | 0,0017  | 9  |
| Θεωρητική παραγωγή βιοστερεών    |                   |                                  |   |   |  |
| 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 / 5000 m <sup>3</sup>            |
| 221                              | 146               | 75                               | 75  | 0,075   | 375  |
|                                  |                   |                                  |   | Χάνονται (σε kg)                                  | - 366  |

Επίσης, στο μικροκόσκινο ενσωματώθηκε σύστημα κροκίδωσης του εισερχόμενου αποβλήτου (περιγράφεται στο Κεφάλαιο 5.2.1), με σκοπό την μελέτη συμβολής της κροκίδωσης στην αύξηση της απόδοσης του μικροκόσκινου στην απομάκρυνση TSS. Η προσθήκη κροκιδωτικών προκάλεσε διάφορα λειτουργικά προβλήματα στο μικροκόσκινο, όπως η έντονη δημιουργία αφρού στο εισερχόμενο απόβλητο, η εισαγωγή σημαντικής ποσότητας αποβλήτου στην μονάδα αφυδάτωσης και η υπερχειλίση του αποβλήτου, με αποτέλεσμα να χάνεται σημαντική ποσότητα στερεών λόγω της υπερχειλίσης και να δημιουργείται η ανάγκη για μείωση της εισερχόμενης παροχής, οδηγώντας στην μείωση δυναμικότητας και απόδοσης του της μικροκοσκίνισης (βλέπε [Παράρτημα](#) για φωτογραφίες από τις δοκιμές με το σύστημα κροκίδωσης).

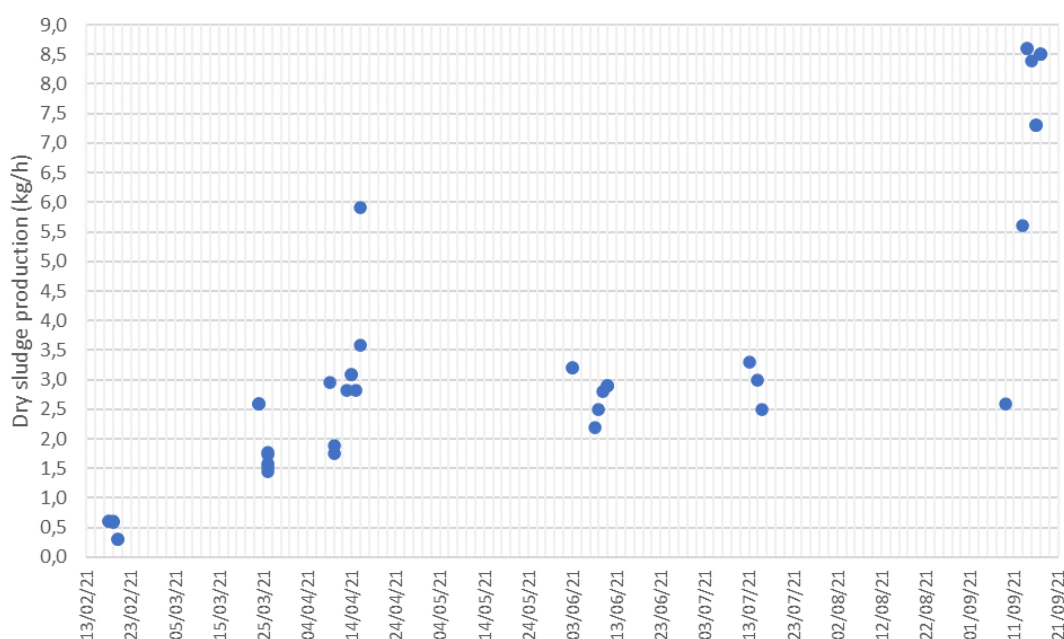
Κλείνοντας το θέμα απόδοσης του μικροκόσκινου στην απομάκρυνση TSS, στα Διαγράμματα 7.22 και 7.23 παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα ως προς την συγκέντρωση TSS εισόδου - εξόδου και την ποσοστιαία απομάκρυνση στερεών από τα λύματα αντίστοιχα, όπου φαίνεται ότι η μέση απομάκρυνση στερεών που μπορεί να επιτευχθεί από το μικροκόσκινο είναι περίπου 30 %. Επίσης, η ωριαία παραγωγή βιοστερεών σε ξηρή βάση είναι κατά μέσο όρο 7,7 kg/h για την τελευταία και αποδοτικότερη φάση δοκιμών που πραγματοποιήθηκε τον Σεπτέμβριο του 2021, η οποία έγινε με φίλτρο ιμάντα ανοίγματος πόρων 350  $\mu\text{m}$ , εισερχόμενη παροχή λυμάτων 200  $\text{m}^3/\text{h}$ , χωρίς την προσθήκη κροκιδωτικών μέσων και με την χρήση του συστήματος ανακυκλοφορίας του νερού πλύσης και των στραγγισμάτων (Διάγραμμα 7.24).



Διάγραμμα 7.22 Συγκεντρωτικό διάγραμμα μετρήσεων συγκέντρωσης TSS εισόδου (μπλε μπάρες) και εξόδου (πορτοκαλί μπάρες) του πιλοτικού μικροκόσκινου.

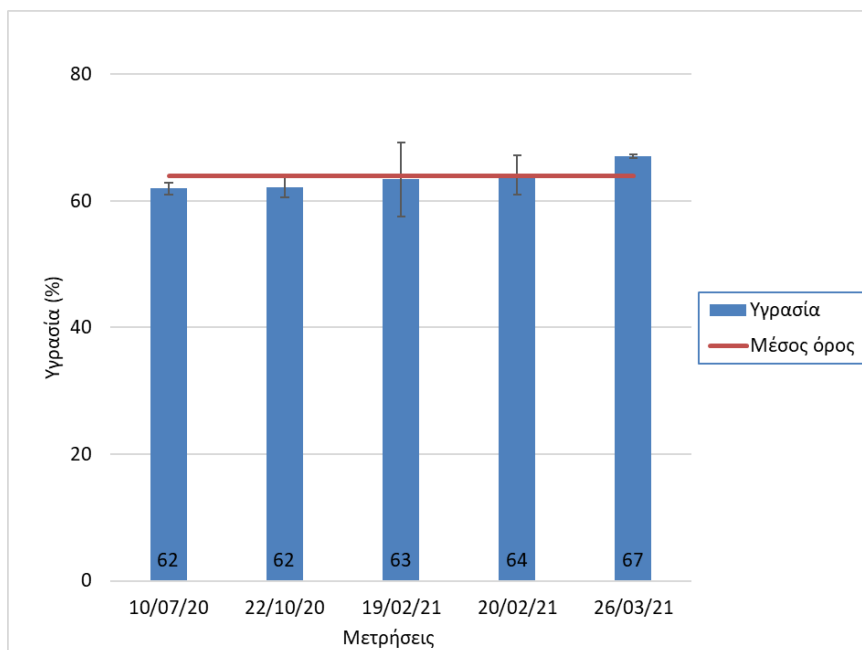


Διάγραμμα 7.23 Συγκεντρωτικό διάγραμμα ποσοστιαίας απομάκρυνσης στερεών από τα λύματα με την χρήση του μικροκόσκινου.



Διάγραμμα 7.24 Συγκεντρωτικό διάγραμμα ωριαίας παραγωγής μικροκοσκινισμένων βιοστερεών (σε ξηρή βάση).

Όπως και στις προκαταρκτικές μετρήσεις του πειραματικού μικροκόσκινου, έτσι και εδώ προσδιορίστηκαν τα χαρακτηριστικά των παραγόμενων βιοστερεών (υγρασία και πτητικά στερεά) εκτός της απομάκρυνσης στερεών. Στο Διάγραμμα 7.25 παρουσιάζονται οι μετρήσεις υγρασίας των μικροκοσκινισμένων βιοστερεών, που βρέθηκε κατά μέσο όρο  $64 \pm 2 \%$ , ενώ στον Πίνακα 7.6 δίνονται τα VS ως ποσοστό των TS, τα οποία βρέθηκαν κατά μέσο όρο  $89,6 \pm 0,69 \%$ . Το υψηλό ποσοστό των οργανικών στερεών, δείχνει ότι είναι κατάλληλα για περαιτέρω ενεργειακή αξιοποίηση.



Διάγραμμα 7.25 Μετρήσεις υγρασίας των μικροκοσκινισμένων βιοστερεών (μπλε μπάρες) με μέσο όρο (κόκκινη γραμμή).

Πίνακας 7.6 Μετρήσεις VS (%) εκ των TS (%) για τα μικροκοσκινισμένα βιοστερεά του πιλοτικού μικροκόσκινου.

| Ημερομηνία      | Μέσος Όρος  | Τυπική Απόκλιση |
|-----------------|-------------|-----------------|
| 10/07/20        | 88,9        | 0,40            |
| 22/10/20        | 89,0        | 1,64            |
| 26/03/21        | 90,9        | 0,04            |
| <b>ΣΥΝΟΛΙΚΑ</b> | <b>89,6</b> | <b>0,69</b>     |

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, ορισμένες σημαντικές διαπιστώσεις σχετικά με το πιλοτικό μικροκόσκινο είναι οι εξής:

- Η προσθήκη κροκιδωτικών μέσων προκάλεσε περιορισμένη μείωση και όχι αύξηση στην απόδοσή απομάκρυνσης στερεών όπως αναμενόταν.
- Παρά την χρήση συστήματος ανακυκλοφορίας του νερού πλύσης και των στραγγισμάτων των βιοστερεών με σκοπό την ανάκτηση χαμένων στερεών και πάλι η θεωρητική παραγωγή βιοστερεών (η διαφορά TSS εισόδου - εξόδου) υπολογίστηκε αρκετά υψηλότερη από την πραγματική (παραγόμενα μικροκοσκινισμένα βιοστερεά), γεγονός που δείχνει ότι το παρόν σύστημα επιδέχεται περαιτέρω βελτίωσης.
- Το εισερχόμενο απόβλητο χαρακτηρίζεται από μεγάλη ποικιλομορφία ως προς την σύστασή του, καθώς εμφανίζει μεγάλη διακύμανση στις τιμές TSS αλλά και λόγω μη επαρκούς προ-επεξεργασίας μπορεί να περιέχει διάφορα στερεά που προκαλούν προβλήματα στην λειτουργία του μικροκόσκινου.
- Το μικροκόσκινο είναι πλήρως λειτουργικό και μπορεί να παράξει περίπου 8 kg/h βιοστερεά σε ξηρή βάση, αναλόγως τις επικρατούσες συνθήκες.



### 7.3.3 Σύγκριση χαρακτηριστικών παραγόμενων βιοστερεών με χρήση διαφορετικών τεχνολογιών κοσκίνισης

Στα πλαίσια της αξιολόγησης της μικροκοσκίνισης σαν μέθοδο επεξεργασίας λυμάτων, συλλέχθηκε δείγμα από το κόσκινο “ANDRITZ S.A.S AQUADRUM - AD-1000-1-B ” (Εικόνα 7.2) που είναι εγκατεστημένο στην ΕΕΛ Ηρακλείου και αντιπροσωπεύει μία παρόμοια τεχνολογία, την λεπτοκοσκίνιση. Πρόκειται για κόσκινο τύπου τυμπάνου με διάκενα 1 mm, το οποίο είναι εγκατεστημένο στην προ-επεξεργασία της ΕΕΛ Ηρακλείου και συγκεκριμένα πριν την εξάμμωση.



Εικόνα 7.2 Το λεπτοκόσκινο «AQUADRUM - AD-1000-1-B» της εταιρίας ANDRITZ S.A.S που είναι εγκατεστημένο στην ΕΕΛ Ηρακλείου.

Στον Πίνακα 7.7, φαίνεται ότι τα παραγόμενα μικροκοσκινισμένα και λεπτοκοσκινισμένα βιοστερεά έχουν παρεμφερή χαρακτηριστικά, με τα μικροκοσκινισμένα να έχουν λίγο καλύτερες τιμές σε όλες τις εξεταζόμενες παραμέτρους. Να σημειωθεί εδώ ότι οι μετρήσεις έγιναν σε διαφορετικές ΕΕΛ, καθώς όπως έχει ήδη αναφερθεί το μικροκόσκινο είναι εγκατεστημένο στην ΕΕΛ Ρεθύμνου, ενώ το λεπτοκόσκινο στην ΕΕΛ Ηρακλείου.

Πίνακας 7.7 Χαρακτηριστικά παραγόμενων βιοστερεών από πιλοτικό μικροκόσκινο της ΕΕΛ Ρεθύμνου συγκριτικά με λεπτοκόσκινο της ΕΕΛ Ηρακλείου.

| Παράμετρος  | Βιοστερεά από μικροκοσκίνιση (ΕΕΛ Ρεθύμνου) | Βιοστερεά από λεπτοκοσκίνιση (ΕΕΛ Ηρακλείου) |
|-------------|---|--|
| TS (%)      | 36,10 ± 2,61                                | 31,94 ± 0,82                                 |
| VS (%)      | 89,65 ± 1,39                                | 84,73 ± 0,46                                 |
| HHV (MJ/kg) | 28,702 ± 1,388                              | 27,470 ± 2,130                               |

### 7.3.4 Σύγκριση μικροκοσκινισμένων βιοστερεών - πρωτοβάθμιας ιλύος

Τα αποτελέσματα της συγκριτικής μελέτης μεταξύ βιοστερεών προερχόμενων από μικροκόσκινο (microsieve, MS) και από πρωτοβάθμια καθίζηση (primary clarifier, PC) για την χρήση τους ως υπόστρωμα αναερόβιας χώνευσης με σκοπό την παραγωγή βιοαερίου παρουσιάζονται αναλυτικά εντός επιστημονικής δημοσίευσης (Odirile et al., 2021).

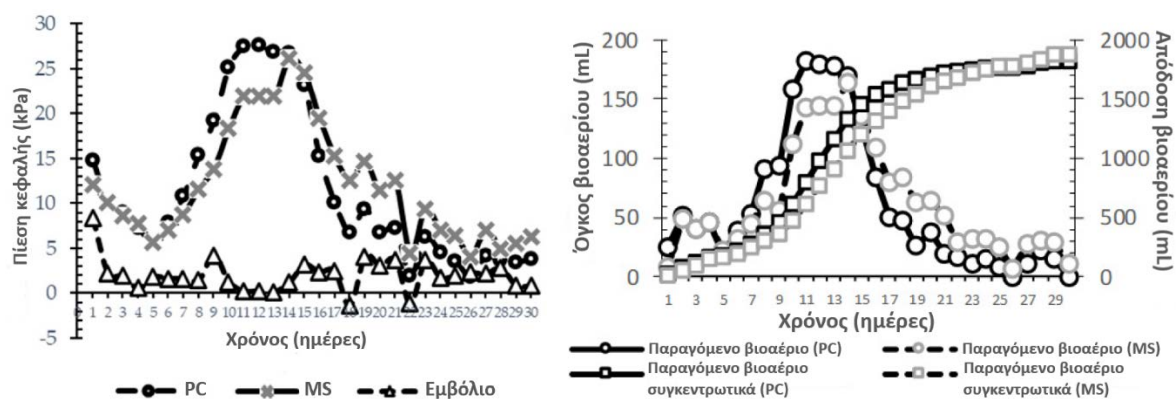
Στα πλαίσια της μελέτης αυτής, προσδιορίστηκαν διάφορα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των δύο ειδών βιοστερεών (Πίνακας 7.8). Από τα αποτελέσματα, φαίνεται ότι η βασική διαφορά μεταξύ μικροκοσκινισμένων βιοστερεών και πρωτοβάθμιας ιλύος είναι το σημαντικά μεγαλύτερο ποσοστό ολικών στερεών (TS) που χαρακτηρίζει τα μικροκοσκινισμένα βιοστερεά, ενώ οι λοιπές παράμετροι είναι παρόμοιες (VS, VS/TS, pH, C/N).

Πίνακας 7.8 Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά μικροκοσκινισμένων βιοστερεών και πρωτοβάθμιας ιλύος.

| Παράμετρος | Μικροκοσκινισμένα βιοστερεά | Πρωτοβάθμια ιλύς |
|------------|-----------------------------|------------------|
| TS (%)     | 37,86 ± 0,08                | 2,61 ± 0,08      |
| VS (%)     | 83,00 ± 0,41                | 78,77 ± 1,91     |
| VS/TS      | 0,83 ± 0,00                 | 0,79 ± 0,02      |
| pH         | 6,67 ± 0,08                 | 6,61 ± 0,10      |
| C/N        | 19,68 ± 0,69                | 14,46 ± 1,23     |

Εκτός αυτών, προσδιορίστηκε και η ημερήσια παραγωγή βιοαερίου για διάστημα 30 ημερών κατόπιν εμβολιασμού με αναερόβια ιλύ, τα αποτελέσματα της οποίας φαίνονται στο παρακάτω Διάγραμμα 7.26. Συγκεκριμένα, η ημερήσια παραγωγή βιοαερίου μεγιστοποιήθηκε στις 11 ημέρες μετά τον εμβολιασμό για την πρωτοβάθμια ιλύ (44,20 mLbiogas/gvsd) και στις 14 ημέρες μετά τον εμβολιασμό για τα μικροκοσκινισμένα βιοστερεά (37,74 mLbiogas/gvsd).

Η συνολική παραγωγή βιοαερίου μετά το πέρας 30 ημερών από τον εμβολιασμό παρατηρήθηκε ότι βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο για τα δύο είδη ιλύος (442,29 mLbiogas/gvs για την πρωτοβάθμια ιλύ έναντι 434,73 mLbiogas/gvs για τα μικροκοσκινισμένα βιοστερεά). Ωστόσο, η πρωτοβάθμια ιλύς παρουσίασε υψηλότερη ημερήσια παραγωγή βιοαερίου συγκριτικά με τα μικροκοσκινισμένα βιοστερεά, ενώ το αντίθετο παρατηρήθηκε για την περίοδο μετά το σημείο αιχμής.



Διάγραμμα 7.26 Ημερήσιες μετρήσεις πίεσης πρωτοβάθμιας ιλύος και μικροκοσκινισμένων βιοστερεών (αριστερά) και μέση ημερήσια απόδοση βιοαερίου και μέση συνολική απόδοση βιοαερίου πρωτοβάθμιας ιλύος και μικροκοσκινισμένων βιοστερεών (δεξιά).

Συμπερασματικά, η μελέτη αυτή συμβάλλει στην πιο σφαιρική και ολοκληρωμένη γνώση της τεχνολογίας της μικροκοσκίνισης, τόσο ανεξάρτητα σαν μέθοδο επεξεργασίας λυμάτων, όσο και συγκριτικά με άλλες συμβατικές μεθόδους, όπως είναι η πρωτοβάθμια επεξεργασία με καθίζηση.

#### 7.4 Ισοζύγια μάζας και ενέργειας της πιλοτικής μονάδας

Προκειμένου να αξιολογηθεί η λειτουργία της πιλοτικής μονάδας, πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί ισοζυγίων μάζας και ενέργειας, με την μεθοδολογία που περιεγράφηκε στο Κεφάλαιο 6.3.2.

Σύμφωνα με θερμοδυναμικούς υπολογισμούς, η ενέργεια που περιέχεται στο παραγόμενο αέριο σύνθεσης είναι αρκετή για να ξηράνει τα βιοστερεά. Ωστόσο, οι πραγματικές ενεργειακές απαιτήσεις εξαρτώνται από την αποδοτικότητα του συστήματος εναλλαγής θερμότητας και από την απόδοση του ξηραντηρίου. Επίσης, η θερμοκρασία και η υγρασία του αέρα του περιβάλλοντος επηρεάζουν την απόδοση της διαδικασίας της ξήρανσης.

Για την μονάδα αεριοποίησης, επιλέχθηκαν μηχανές ψύξης αερίου ως μηχανές αερίου σύνθεσης, ώστε τα καυσάερια της μηχανής να μεταβιβάζονται απευθείας στο ξηραντήριο, αποφεύγοντας έτσι πιθανές ενεργειακές απώλειες λόγω εναλλάκτη θερμότητας. Ακόμη, χρησιμοποιείται ένας επιπλέον εναλλάκτης θερμότητας αερίου - αερίου για ανάκτηση θερμότητας από το ζεστό αέριο σύνθεσης και υπάρχει σύστημα που επιτρέπει την καύση ενός μικρού μέρους του παραγόμενου αερίου σύνθεσης (περίπου 10%), με σκοπό την περαιτέρω παροχή θερμότητας στο ξηραντήριο. Οι υπολογισμοί φαίνονται αναλυτικά παρακάτω (Πίνακας 7.9).

Πίνακας 7.9 Υπολογισμοί ισοζυγίων μάζας και θερμικής ενέργειας της πιλοτικής μονάδας.

| Περιγραφή  | Υπολογισμοί         | Σχόλια           |
|--|---------------------|------------------|
| <b>Θεωρητική απαίτηση θερμικής ενέργειας για ξήρανση</b>               |                     |                  |
| Παραγόμενα βιοστερεά από μικροκόσκινο (kg/d)                           | 920,0               |                  |
| Παραγόμενα βιοστερεά από μικροκόσκινο (kg/h)                           | 38,3                |                  |
| Περιεχόμενη υγρασία (%)  | 70,0                | Εύρος: 60 - 70   |
| Πλήρως ξηρά βιοστερεά (kg/d) (0% υγρασία)                              | 276,0               |                  |
| Πλήρως ξηρά βιοστερεά (kg/h) (0% υγρασία)                              | 11,5                |                  |
| Επιθυμητή περιεχόμενη υγρασία βιοστερεών για αεριοποίηση (%)           | 10,0                | Εύρος: 10 - 15   |
| Ξηραμένα βιοστερεά (kg/h) (10% υγρασία)                                | 12,7                |                  |
| Εξατμισμένο νερό (kg/h)  | 25,7                |                  |
| Απαιτούμενη λανθάνουσα θερμότητα για ξήρανση (MJ)                      | 58,0                | Εξίσωση 6.1      |
| Απαιτούμενη αισθητή θερμότητα για ξήρανση (MJ)                         | 12,8                | Εξίσωση 6.2      |
| Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξήρανση (MJ ή kWh)                  | 70,8 ή <b>19,7</b>  | Εξίσωση 6.3      |
| <b>Χαρακτηριστικά - προδιαγραφές ξηραντηρίου πιλοτικής μονάδας</b>     |                     |                  |
| Παροχή αέρα (m <sup>3</sup> )  | 95,8                |                  |
| Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξήρανση (MJ ή kWh)                  | 105,4 ή <b>29,3</b> |                  |
| <b>Παροχή θερμότητας από μονάδα αεριοποίησης - παραγωγής ενέργειας</b> |                     |                  |
| Θερμογόνος δύναμη βιοστερεών (MJ/kg)                                   | 21,5                | Εύρος: 21 - 22,5 |
| Ενεργειακό περιεχόμενο βιοστερεών (MJ/h)                               | 247,3               | Εξίσωση 6.4      |
| Παραγόμενο αέριο σύνθεσης (m <sup>3</sup> /h)                          | 23,0                |                  |
| Απόδοση αεριοποιητή (%)  | 80                  | Εύρος: 70 - 80   |
| Θερμογόνος δύναμη αερίου σύνθεσης (MJ/m <sup>3</sup> )                 | 8,6                 | Εξίσωση 6.5      |
| Ενεργειακό περιεχόμενο αερίου σύνθεσης (MJ/h)                          | 197,8               | Εξίσωση 6.6      |
| Ποσοστό αερίου σύνθεσης για καύση προς το ξηραντήριο (%)               | 10                  |                  |
| Ενέργεια από το αέριο σύνθεσης προς το ξηραντήριο (MJ)                 | 19,8                |                  |
| Ενέργεια από το αέριο σύνθεσης προς την MEK (MJ)                       | 178,0               |                  |
| Απόδοση MEK (ηλεκτρική ενέργεια, %)                                    | 20                  |                  |

|  |                     |                |
|--|---------------------|----------------|
| Απόδοση MEK (θερμική ενέργεια, %)  | 50                  | Εύρος: 45 - 50 |
| Απόδοση MEK (απώλειες, %)  | 30                  | Εύρος: 30 - 35 |
| Ηλεκτρική ενέργεια από MEK (MJ)  | 35,6                | Εξίσωση 6.7    |
| Θερμική ενέργεια από MEK (MJ)  | 89,0                | Εξίσωση 6.8    |
| Απώλειες από MEK (MJ)  | 53,4                | Εξίσωση 6.9    |
| Θερμική ενέργεια από καυσάερια της MEK (MJ)  | 0,5                 | Εξίσωση 6.11   |
| Θερμική ενέργεια από ψύξη αερίου σύνθεσης (MJ)   | 3,9                 | Εξίσωση 6.12   |
| Θερμική ενέργεια από αεριοποιητή (MJ)  | 9,9                 |                |
| Συνολική παροχή θερμικής ενέργειας (MJ ή kWh)  | 123,1 ή <b>34,2</b> | Εξίσωση 6.10   |
| <b>Ισοζύγιο θερμικής ενέργειας</b>   |                     |                |
| Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξήρανση θεωρητικά (kWh)                             | 19,7                |                |
| Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξηραντήριο (kWh)                                    | 29,3                |                |
| Εκτιμώμενο ποσοστό απωλειών λόγω μεταφοράς θερμότητας (%)                              | 20                  | Εύρος: 15 - 30 |
| Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξηραντήριο, συμπεριλαμβανομένων των απωλειών (kWh)  | 35,1                |                |
| Συνολική παροχή θερμικής ενέργειας από μονάδα αεριοποίησης - παραγωγής ενέργειας (kWh) | 34,2                |                |
| Καθαρή θερμική ενέργεια (kWh)  | <b>- 0,9</b>        |                |

Όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα, η θερμική ενέργεια είναι οριακά μη επαρκής για την κάλυψη αναγκών του συστήματος ξήρανσης. Λόγω του γεγονότος αυτού, κατά τον υπολογισμό των ισοζυγίων, συζητήθηκε η εναλλακτική τροποποίησης του ξηραντηρίου ώστε να λειτουργεί μέσω κενού, γεγονός που θα εξασφάλιζε την απομάκρυνση υγρασίας των βιοστερεών σε χαμηλότερη θερμοκρασία (αφού η θερμοκρασία εξάτμισης του νερού μειώνεται σε συνθήκες υποπίεσης) και με λιγότερη απαιτούμενη ενέργεια. Όμως η λειτουργία του συγκεκριμένου ξηραντηρίου είναι προδιαγεγραμμένη για συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης, επομένως δεν υιοθετήθηκε η προτεινόμενη εναλλακτική. Επομένως, έγινε προσπάθεια να αυξηθεί όσο το δυνατόν περισσότερο η απόδοση του λοιπού συστήματος (με μόνωση, μειωμένη υγρασία υλικού τροφοδοσίας, κ.λπ.), ώστε να προκύπτει μία θετική διεργασία από άποψη θερμικής ενέργειας.

Επίσης, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι το αποτέλεσμα του ισοζυγίου αυτού εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, ορισμένες από τις οποίες δεν είναι σταθερές, όπως:

- Η συγκέντρωση των TSS του εισερχόμενου αποβλήτου (150 - 400 mg/L).
- Η περιεχόμενη υγρασία στα παραγόμενα μικροκοσκινισμένα βιοστερεά (60 - 70 %).
- Η επιθυμητή περιεχόμενη υγρασία των βιοστερεών για αεριοποίηση (10 - 15 %).
- Η ανώτερη θερμογόνος δύναμη των βιοστερεών (21 - 22,5 MJ/kg).
- Η απόδοση του αεριοποιητή (70 - 80 %).
- Η απόδοση της MEK (θερμική ενέργεια 45 - 50 %, απώλειες 30 - 35%).
- Οι εκτιμώμενες απώλειες λόγω μεταφοράς θερμότητας (15 - 30 %).

Μικρές αλλαγές σε αυτές τις παραμέτρους, όπως 65 αντί 70 % υγρασία των μικροκοσκινισμένων βιοστερεών, 22,5 αντί 21,5 MJ/kg ανώτερη θερμογόνος δύναμη βιοστερεών ή 15 αντί 20 % απώλειες λόγω μεταφοράς θερμότητας, μπορούν να οδηγήσουν σε θετικό ισοζύγιο (βλέπε Πίνακες 10.2, 10.3, 10.4 στο [Παράρτημα](#) για αναλυτικούς υπολογισμούς). Αντίστοιχα, αν οι τιμές αυτές τροποποιηθούν προς την αντίθετη κατεύθυνση, το ισοζύγιο που προκύπτει είναι αρνητικό.

Όσον αφορά την γενικότερη ενεργειακή αυτονομία της πιλοτικής μονάδας, πρέπει να επισημανθεί ότι οι απώλειες θερμικής ενέργειας και η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας των κινητήρων είναι παρόμοιες είτε πρόκειται για μικρό σύστημα (όπως το συγκεκριμένο), είτε για μεγαλύτερο (όπως προβλέπεται ότι μπορεί να δημιουργηθούν στο μέλλον). Όμως, τα μεγαλύτερα συστήματα έχουν το πλεονέκτημα της «οικονομίας κλίμακος», δηλαδή καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια ανά μονάδα εισερχόμενης μάζας, επομένως αντισταθμίζουν το έλλειμα ενέργειας που αντιμετωπίζουν τα μικρά συστήματα.

Ως προς την ηλεκτρική ενέργεια, υπολογίστηκε αρχικά το ισοζύγιο για την πιλοτική μονάδα όπως είναι εγκατεστημένη στην ΕΕΛ Ρεθύμνου, δηλαδή με δυναμικότητα 5.000 m<sup>3</sup>/d εισερχόμενου αποβλήτου και υλικό τροφοδοσίας του ξηραντηρίου αποκλειστικά μικροκοσκινισμένα βιοστερεά. Για τους υπολογισμούς, θεωρήθηκε ότι η πιλοτική μονάδα λειτουργεί συνεχώς επί 24ώρου βάσεως, ενώ οι ακόλουθες καταναλώσεις δεν συμπεριλήφθηκαν στο ισοζύγιο:

- **Αντλίες τροφοδοσίας μικροκόσκινου** (εγκατεστημένη ισχύς: 6,9 kW), οι οποίες θεωρούνται μέρος της ΕΕΛ και όχι της πιλοτικής μονάδας.
- **Δοσομετρική αντλία κροκιδωτικού** (εγκατεστημένη ισχύς: 0,18 kW), η οποία δεν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί περαιτέρω, αφού οι δοκιμές κροκίδωσης δεν απέδωσαν (βλέπε Κεφάλαιο 7.3.2).
- **Κλιματισμός οικίσκου** (εγκατεστημένη ισχύς: 1 kW) και **φωτισμός πιλοτικής μονάδας** (εγκατεστημένη ισχύς: 0,60 kW), τα οποία θεωρούνται περιφερειακές προαιρετικές καταναλώσεις και δεν αποτελούν βασικά λειτουργικά μέρη της πιλοτικής μονάδας.
- **Καταναλώσεις έναρξης λειτουργίας** της πιλοτικής μονάδας: (i) κομπρεσέρ αέρα για δημιουργία κενού - 10 min λειτουργίας - 2,50 kW εγκατεστημένη ισχύς, (ii) κομπρεσέρ για αρχική ανάφλεξη αεριοποιητή - 10 min λειτουργίας - 2,60 kW εγκατεστημένη ισχύς, και (iii) ανάφλεξη πυρσού μέχρι την παραγωγή αερίου σύνθεσης - 5 min λειτουργίας - 0,15 kW εγκατεστημένη ισχύς. Οι καταναλώσεις αυτές πραγματοποιούνται μόνο κατά την εκκίνηση λειτουργίας, επομένως είναι αμελητέες συγκριτικά με τις λοιπές καταναλώσεις της πιλοτικής μονάδας σε συνθήκες συνεχούς λειτουργίας.

Επίσης, όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.10, δεν λειτουργούν όλα τα μέρη και τις 24 ώρες της ημέρας:

- Διάταξη πλύσης φίλτρου ιμάντα: λειτουργεί για 10 sec, κάθε 2 min
- Κοχλίας από μικροκόσκινο προς ξηραντήριο: λειτουργεί για 120 sec, 1 φορά / ώρα
- Αναβατήριο τροφοδοσίας ξηραντηρίου: λειτουργεί για 150 sec, 4 φορές / μέρα
- Βαλβίδα μεταξύ γραμμών ξηραντηρίου: λειτουργεί για 1 sec, κάθε 10 min
- Κοχλίας από ξηραντήριο προς μπρικετομηχανή: λειτουργεί για 300 sec, 1 φορά / ώρα
- Αναμικτήρας βιοστερεών αεριοποιητή: λειτουργεί για 60 sec, 2 φορές / ώρα
- Σύστημα απομάκρυνσης τέφρας: λειτουργεί για 10 sec, 6 φορές / ώρα
- Ηλεκτροβάνες: λειτουργούν για 40 sec, 2 φορές / μέρα

Το ισοζύγιο της ηλεκτρικής ενέργειας που προκύπτει σε αυτή την περίπτωση είναι αρνητικό (- 63,03 kWh), αφού η καταναλισκόμενη ενέργεια (300,39 kWh) είναι περισσότερη από την παραγόμενη (237,36 kWh).

Πίνακας 7.10 Υπολογισμοί ισοζυγίου ηλεκτρικής ενέργειας της πιλοτικής μονάδας όπως είναι εγκατεστημένη στην ΕΕΛ Ρεθύμνου (Δυναμικότητα: 5.000 m<sup>3</sup>/d, Υλικό τροφοδοσίας: 100% μικροκοσκινισμένα βιοστερεά).

| Περιγραφή                    | Εγκατεστημένη ισχύς (kW) | Χρόνος (h/d) | Καταναλισκόμενη ενέργεια (kWh) |
|------------------------------|--------------------------|--------------|--------------------------------|
| <b>Μικροκοσκίνηση</b>        |                          |              |                                |
| Σύστημα ανακυκλοφορίας νερού | 1,10                     | 24,00        | 26,40                          |



|   |              |  |               |
|---|--------------|--|---------------|
| Διάταξη πλύσης φίλτρου ιμάντα                 | 0,90         | 2,00                                     | 1,80          |
| Φίλτρο ιμάντα                                 | 0,75         | 24,00                                    | 18,00         |
| Κοχλίας εξόδου                                | 0,25         | 24,00                                    | 6,00          |
| <b>Συνολικά</b>                               | <b>3,00</b>  |  | <b>52,20</b>  |
| <b>Τροφοδοσία ξηραντηρίου</b>                 |              |  |               |
| Κοχλίας από μικροκόσκινο προς ξηραντήριο      | 0,55         | 0,80                                     | 0,44          |
| Αναβατήριο τροφοδοσίας ξηραντηρίου            | 0,55         | 0,17                                     | 0,09          |
| <b>Συνολικά</b>                               | <b>1,10</b>  |  | <b>0,53</b>   |
| <b>Ξήρανση</b>                                |              |  |               |
| Γραμμή αποθήκευσης και ανάμιξης               | 2,20         | 24,00                                    | 52,80         |
| Γραμμή ξήρανσης                               | 2,20         | 24,00                                    | 52,80         |
| Βαλβίδα μεταξύ γραμμών                        | 1,00         | 0,03                                     | 0,03          |
| Ανεμιστήρας (είσοδος αέρα)                    | 2,00         | 24,00                                    | 48,00         |
| Ανεμιστήρας (έξοδος αέρα)                     | 2,00         | 24,00                                    | 48,00         |
| <b>Συνολικά</b>                               | <b>9,40</b>  |  | <b>201,63</b> |
| <b>Τροφοδοσία αεριοποιητή</b>                 |              |  |               |
| Κοχλίας από ξηραντήριο προς μπρικετομηχανή    | 1,20         | 2,00                                     | 2,40          |
| Μπρικετομηχανή                                | 0,80         | 24,00                                    | 19,20         |
| Αναμικτήρας βιοστερεών μπρικετομηχανής        | 0,08         | 24,00                                    | 1,92          |
| <b>Συνολικά</b>                               | <b>2,08</b>  |  | <b>23,52</b>  |
| <b>Αεριοποίηση - παραγωγή ενέργειας</b>       |              |  |               |
| Αναμικτήρας βιοστερεών αεριοποιητή            | 0,25         | 0,80                                     | 0,20          |
| Σύστημα απομάκρυνσης τέφρας                   | 0,55         | 0,40                                     | 0,22          |
| Αντλία πλυντηρίδας                            | 0,35         | 24,00                                    | 8,40          |
| ΜΕΚ   | 0,12         | 24,00                                    | 2,88          |
| PLC και αισθητήρια                            | 0,25         | 24,00                                    | 6,00          |
| Ηλεκτροβάνες                                  | 0,06         | 0,02                                     | 0,00          |
| Η/Υ   | 0,20         | 24,00                                    | 4,80          |
| <b>Συνολικά</b>                               | <b>1,78</b>  |  | <b>22,50</b>  |
| <b>Ισοζύγιο ισχύος - ηλεκτρικής ενέργειας</b> |              |  |               |
| Παραγόμενη ισχύς (kW)                         | 9,89         | Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (kWh)      | 237,36        |
| Καταναλισκόμενη ισχύς (kW)                    | 12,52        | Καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια (kWh) | 300,39        |
| Καθαρή ισχύς (kW)                             | <b>-2,63</b> | Καθαρή ηλεκτρική ενέργεια (kWh)          | <b>-63,03</b> |

Λόγω του αρνητικού αποτελέσματος, στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν εκ νέου οι υπολογισμοί για τις ίδιες συνθήκες, αλλά με διαφορετικό υλικό τροφοδοσίας (50%

μικροκοσκινισμένα βιοστερεά - 50% ηλιακά ξηραμένη δευτεροβάθμια ιλύς). Η αλλαγή αυτή βασίστηκε αφενός στο γεγονός ότι στην ΕΕΛ Ρεθύμνου λειτουργεί ηλιακό ξηραντήριο για την δευτεροβάθμια ιλύ της εγκατάστασης (επομένως είναι διαθέσιμη η πρώτη ύλη) και αφετέρου στο ότι η μελέτη της πιλοτικής μονάδας περιλαμβάνει μεταξύ άλλων και δοκιμές λειτουργίας με μείγμα των δύο αυτών υλικών (βλέπε Κεφάλαιο 5.2). Το ισοζύγιο που προέκυψε αυτή τη φορά είναι θετικό (134,03 kWh) (βλέπε Πίνακα 10.7 στο [Παράρτημα](#)), ενώ για την παραγόμενη ενέργεια χρειάστηκε να γίνουν εκ νέου υπολογισμοί ισοζυγίων μάζας και θερμικής ενέργειας της πιλοτικής μονάδας, με χρήση 50% μικροκοσκινισμένων βιοστερεών - 50% ηλιακά ξηραμένης δευτεροβάθμιας ιλύος (με υγρασία 20% και HHV 17 MJ/kg) (βλέπε Πίνακα 10.5 στο [Παράρτημα](#)). Επίσης, λόγω της χρήσης μείγματος ως υλικό τροφοδοσίας, χρειάστηκε να προστεθεί στις καταναλώσεις του συστήματος τροφοδοσίας του ξηραντηρίου μεταφορικός κοχλίας από το δοχείο δευτεροβάθμιας ιλύος προς το ξηραντήριο (0,55kW εγκατεστημένη ισχύς - λειτουργεί για 60 sec, 1 φορά / ώρα). Αφού το ισοζύγιο βγαίνει θετικό σε αυτή την περίπτωση, η ανάμιξη των δύο υλικών μπορεί να προταθεί ως βιώσιμη λύση για το ενεργειακό έλλειμα της πιλοτικής μονάδας. Βέβαια, αυτό προϋποθέτει είτε να υπάρχει μονάδα ηλιακής ξήρανσης στην ΕΕΛ είτε να υπάρχει πρόθεση από την ΕΕΛ να επενδύσει χρήματα σε ηλιακό ξηραντήριο.

Ενναλλακτικά, το έλλειμα της ηλεκτρικής ενέργειας της πιλοτικής μονάδας θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί με την χρήση ξηραντηρίων διαφορετικού τύπου:

- **Ξηραντήριο κενού**, που όπως προαναφέρθηκε, θα εξασφάλιζε την απομάκρυνση υγρασίας των βιοστερεών σε χαμηλότερη θερμοκρασία λόγω υποπίεσης αλλά και με λιγότερη απαιτούμενη ενέργεια, καθώς θα χρειαζόνταν ανεμιστήρες μικρότερης ισχύος και συνεπώς μικρότερης κατανάλωσης.
- **Ηλιακό ξηραντήριο** με χρήση των θερμών απαερίων από την μονάδα αεριοποίησης, με το οποίο θα γινόταν η αφαίρεση της υγρασίας των βιοστερεών με μειωμένες ενεργειακές απαιτήσεις. Επίσης, το ηλιακό ξηραντήριο λόγω της θερμικής ενίσχυσης από την αεριοποίηση θα μπορούσε να διαστασιοποιηθεί μικρότερο από το συνηθισμένο και ο χρόνος παραμονής του υλικού θα μειωνόταν σημαντικά.

Προκειμένου να υπολογιστεί το κρίσιμο μέγεθος πάνω από το οποίο προκύπτει ένα πλήρως αυτόνομο ενεργειακά σύστημα, έγιναν πρώτα ορισμένες υποθέσεις που αφορούν σε βελτιωμένη διάταξη/τοποθέτηση των μερών της πιλοτικής μονάδας στον χώρο της εκάστοτε ΕΕΛ που πρόκειται να επιλέξει να εγκαταστήσει την παρούσα πιλοτική μονάδα με την χρήση του υπάρχοντος ξηραντηρίου. Συγκεκριμένα, αν τα μέρη της πιλοτικής μονάδας εγκατασταθούν με κατάλληλη υψομετρική διαφορά ώστε να γίνεται η τροφοδοσία του εισερχόμενου αποβλήτου αλλά και των βιοστερεών μέσω βαρύτητας, δεν θα χρειάζονται τα ακόλουθα:

- Αντλίες τροφοδοσίας μικροκόσκινου
- Κοχλίας από μικροκόσκινο προς ξηραντήριο
- Αναβατήριο τροφοδοσίας ξηραντηρίου
- Βαλβίδα μεταξύ γραμμών ξηραντηρίου
- Κοχλίας από ξηραντήριο προς μπρικετομηχανή

Με βάση αυτή την λογική και διατηρώντας τις λοιπές παραμέτρους των αρχικών υπολογισμών σταθερές (δυναμικότητα: 5.000 m<sup>3</sup>/d, υλικό τροφοδοσίας: 100% μικροκοσκινισμένα βιοστερεά), το ισοζύγιο προκύπτει ελάχιστα λιγότερο αρνητικό (- 60,06 αντί του - 63,03 kWh) (για αναλυτικούς υπολογισμούς βλέπε Πίνακα 10.8 στο [Παράρτημα](#)). Διατηρώντας την βελτιωμένη διάταξη στον χώρο και σταθερό το υλικό τροφοδοσίας (100% μικροκοσκινισμένα βιοστερεά), πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί για 2πλάσια (10.000 m<sup>3</sup>/d) και 5πλάσια (25.000 m<sup>3</sup>/d) δυναμικότητα, που οδήγησαν σε θετικό ισοζύγιο ηλεκτρικής ενέργειας (120,30 και 565,38 kWh αντίστοιχα), όπως φαίνεται και στους Πίνακες 10.9 και 10.10 στο [Παράρτημα](#).

Κατόπιν, ακολουθήθηκε η ίδια λογική και υπολογίστηκαν τα ισοζύγια ηλεκτρικής ενέργειας διατηρώντας την βελτιωμένη διάταξη στον χώρο, αλλά έχοντας ως υλικό τροφοδοσίας μείγμα

50% μικροκοσκινισμένα βιοστερεά - 50% ηλιακά ξηραμένη δευτεροβάθμια ιλύς (Πίνακες 10.11, 10.12, 10.13 στο [Παράρτημα](#)). Οι υπολογισμοί αυτοί έγιναν για να αξιολογηθεί πληρέστερα η περίπτωση χρήσης υπάρχοντος ή δημιουργίας νέου ηλιακού ξηραντηρίου από κάποια υποψήφια ΕΕΛ που ενδιαφέρεται να εγκαταστήσει την πιλοτική μονάδα.

Τέλος, υπολογίστηκαν τα ισοζύγια ηλεκτρικής ενέργειας διατηρώντας την βελτιωμένη διάταξη στον χώρο, αλλά έχοντας ως υλικό τροφοδοσίας μείγμα 50% μικροκοσκινισμένα βιοστερεά - 50% αφυδατωμένη δευτεροβάθμια ιλύς (Πίνακες 10.14, 10.15, 10.16 στο [Παράρτημα](#)). Σε αυτή την περίπτωση, για να βρεθεί η παραγόμενη ενέργεια χρειάστηκε να γίνουν εκ νέου υπολογισμοί ισοζυγίων μάζας και θερμικής ενέργειας της πιλοτικής μονάδας, με χρήση 50% μικροκοσκινισμένων βιοστερεών - 50% αφυδατωμένης δευτεροβάθμιας ιλύος (με υγρασία 80% και HHV 17 MJ/kg) (βλέπε Πίνακα 10.6 στο [Παράρτημα](#)). Οι υπολογισμοί αυτοί έγιναν λαμβάνοντας υπόψη το πρόβλημα διαχείρισης - διάθεσης της αφυδατωμένης δευτεροβάθμιας ιλύος που αντιμετωπίζουν οι σύγχρονες συμβατικές ΕΕΛ ενεργού ιλύος, ώστε να προταθεί σαν λύση ακόμα και σε περίπτωση που δεν υπάρχει το στάδιο της ηλιακής ξήρανσης.

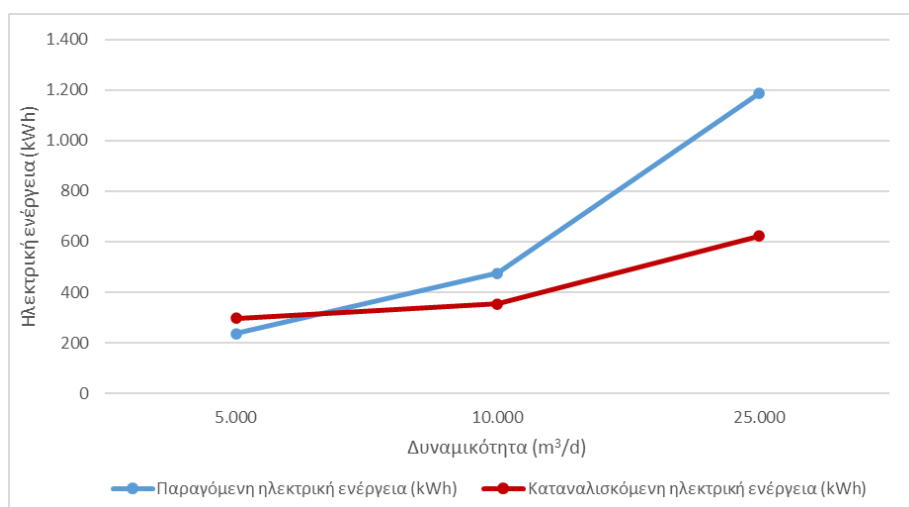
Τα αποτελέσματα όλων των παραπάνω υπολογισμών ισοζυγίων ηλεκτρικής ενέργειας της πιλοτικής μονάδας σε ΕΕΛ με βελτιωμένη διάταξη στον χώρο για διάφορες δυναμικότητες (5.000, 10.000 και 25.000 m<sup>3</sup>/d) και διάφορους συνδυασμούς υλικών τροφοδοσίας (100% μικροκοσκινισμένα βιοστερεά, 50% μικροκοσκινισμένα βιοστερεά - 50% ηλιακά ξηραμένη δευτεροβάθμια ιλύς και 50% μικροκοσκινισμένα βιοστερεά - 50% αφυδατωμένη δευτεροβάθμια ιλύς) δίνονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 7.11 που ακολουθεί, ενώ στα Διαγράμματα 7.27, 7.28 και 7.29 απεικονίζεται γραφικά η συσχέτιση παραγόμενης και καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας συναρτήσει της δυναμικότητας σε κάθε περίπτωση.

Πίνακας 7.11 Υπολογισμοί ισοζυγίων ηλεκτρικής ενέργειας της πιλοτικής μονάδας σε ΕΕΛ με βελτιωμένη διάταξη στον χώρο για διάφορες δυναμικότητες (5.000, 10.000 και 25.000 m<sup>3</sup>/d) και διάφορους συνδυασμούς υλικών τροφοδοσίας (100% μικροκοσκινισμένα βιοστερεά, 50% μικροκοσκινισμένα βιοστερεά - 50% ηλιακά ξηραμένη δευτεροβάθμια ιλύς και 50% μικροκοσκινισμένα βιοστερεά - 50% αφυδατωμένη δευτεροβάθμια ιλύς).

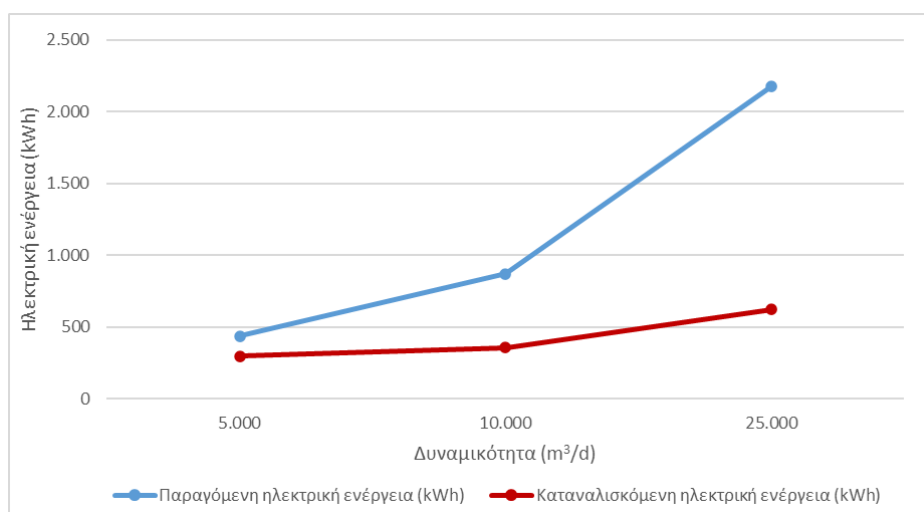
| Δυναμικότητα (m <sup>3</sup> /d)   | Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (kWh) | Καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια (kWh) | Καθαρή ηλεκτρική ενέργεια (kWh) | Καθαρή ηλεκτρική ενέργεια ανά m <sup>3</sup> αποβλήτου (kWh/m <sup>3</sup> ) |
|--|-------------------------------------|--|---------------------------------|--|
| <b>100% μικροκοσκινισμένα βιοστερεά</b>  |                                     |  |                                 |  |
| 5.000  | 237,36                              | 297,42                                   | -60,06                          | -0,012   |
| 10.000   | 474,72                              | 354,42                                   | 120,30                          | 0,012  |
| 25.000   | 1.186,80                            | 621,42                                   | 565,38                          | 0,023  |
| <b>50 % μικροκοσκινισμένα βιοστερεά + 50% ηλιακά ξηραμένη δευτεροβάθμια ιλύς</b> |                                     |  |                                 |  |
| 5.000  | 434,64                              | 297,64                                   | 137,00                          | 0,027  |
| 10.000   | 869,28                              | 354,86                                   | 514,42                          | 0,051  |
| 25.000   | 2.173,20                            | 622,52                                   | 1.550,68                        | 0,062  |
| <b>50 % μικροκοσκινισμένα βιοστερεά + 50% αφυδατωμένη δευτεροβάθμια ιλύς</b>     |                                     |  |                                 |  |
| 5.000  | 197,28                              | 297,64                                   | -100,36                         | -0,020   |
| 10.000   | 394,56                              | 354,86                                   | 39,70                           | 0,004  |
| 25.000   | 986,40                              | 622,52                                   | 363,88                          | 0,015  |

Σύμφωνα με τα διαγράμματα, επιβεβαιώνεται το πλεονέκτημα της «οικονομίας κλίμακος» των συστημάτων μεγάλης δυναμικότητας, συγκριτικά με αντίστοιχα συστήματα μικρότερης δυναμικότητας που προαναφέρθηκε. Συγκεκριμένα, στο Διάγραμμα 7.27 (υλικό τροφοδοσίας: 100% μικροκοσκινισμένα βιοστερεά), ενώ αρχικά υπάρχει έλλειμα ενέργειας, αφού η

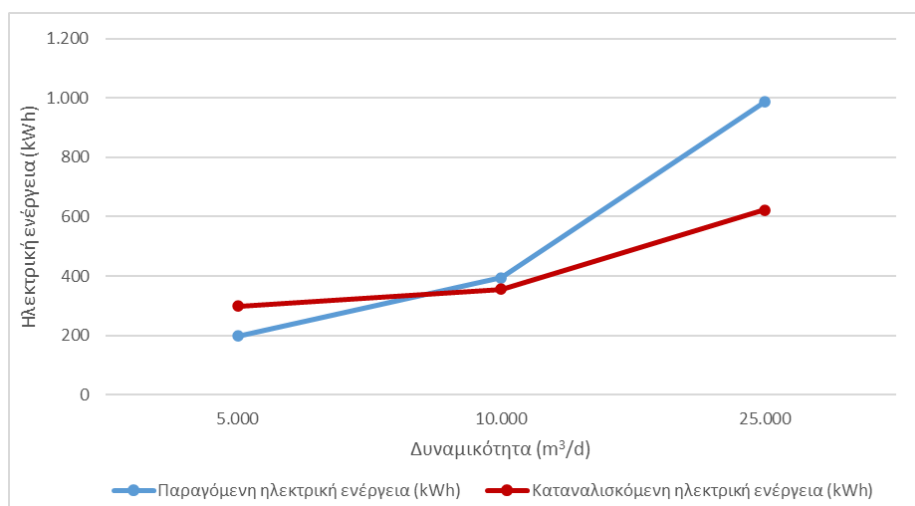
καταναλισκόμενη ενέργεια είναι περισσότερη από την παραγόμενη, φαίνεται ότι από την δυναμικότητα των 7.000 m<sup>3</sup>/d περίπου και μετά η σχέση αυτή αντιστρέφεται, ενώ όσο μεγαλώνει η δυναμικότητα αυξάνεται ακόμα περισσότερο η περίσσεια ενέργειας. Αντίστοιχη συσχέτιση παρατηρείται και στα άλλα δύο διαγράμματα, μόνο που στο Διάγραμμα 7.28 (υλικό τροφοδοσίας: 50% μικροκοσκινισμένα βιοστερεά - 50% ηλιακά ξηραμένη δευτεροβάθμια ιλύς) δεν υπάρχει εξαρχής έλλειμα, αλλά μικρή περίσσεια ενέργειας, ενώ στο Διάγραμμα 7.29 (υλικό τροφοδοσίας: 50% μικροκοσκινισμένα βιοστερεά - 50% αφυδατωμένη δευτεροβάθμια ιλύς) η αντιστάθμιση του ελλείματος γίνεται από την δυναμικότητα των 9.000 m<sup>3</sup>/d περίπου. Αυτό συμβαίνει γιατί για πολλαπλάσιες δυναμικότητες, ναι μεν πολλαπλασιάζεται αναλόγως η παραγόμενη ενέργεια, όμως δεν ισχύει το ίδιο για την καταναλισκόμενη, η οποία για ορισμένα στοιχεία της πιλοτικής μονάδας παραμένει σταθερή ή πολλαπλασιάζεται με μικρότερο συντελεστή (αναλυτικά οι πολλαπλασιασμοί καταναλώσεων για 2πλάσια δυναμικότητα φαίνονται στους Πίνακες 10.9, 10.12, 10.15, και για 5πλάσια δυναμικότητα στους Πίνακες 10.10, 10.13, 10.16 στο [Παράρτημα](#)).



Διάγραμμα 7.27 Παραγόμενη και καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια της πιλοτικής μονάδας σε ΕΕΛ με βελτιωμένη διάταξη στον χώρο συναρτήσεως της δυναμικότητας (Υλικό τροφοδοσίας: 100% μικροκοσκινισμένα βιοστερεά).



Διάγραμμα 7.28 Παραγόμενη και καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια της πιλοτικής μονάδας σε ΕΕΛ με βελτιωμένη διάταξη στον χώρο συναρτήσεως της δυναμικότητας (Υλικό τροφοδοσίας: 50% μικροκοσκινισμένα βιοστερεά - 50% ηλιακά ξηραμένη δευτεροβάθμια ιλύς).



Διάγραμμα 7.29 Παραγόμενη και καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια της πιλοτικής μονάδας σε ΕΕΛ με βελτιωμένη διάταξη στον χώρο συναρτήσεως της δυναμικότητας (Υλικό τροφοδοσίας: 50% μικροκοσκινισμένα βιοστερεά - 50% αφυδατωμένη δευτεροβάθμια ιλύς).

## 7.5 Εισροές - εκροές της πιλοτικής μονάδας και τρόποι διαχείρισης

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 6.3.3. ακολουθήθηκε συγκεκριμένη μεθοδολογία για τον προσδιορισμό των εισροών και εκροών της πιλοτικής μονάδας προ-επεξεργασίας των λυμάτων και αξιοποίησης των παραγόμενων βιοστερεών (Manali et al., 2020; Manali et al., 2021).

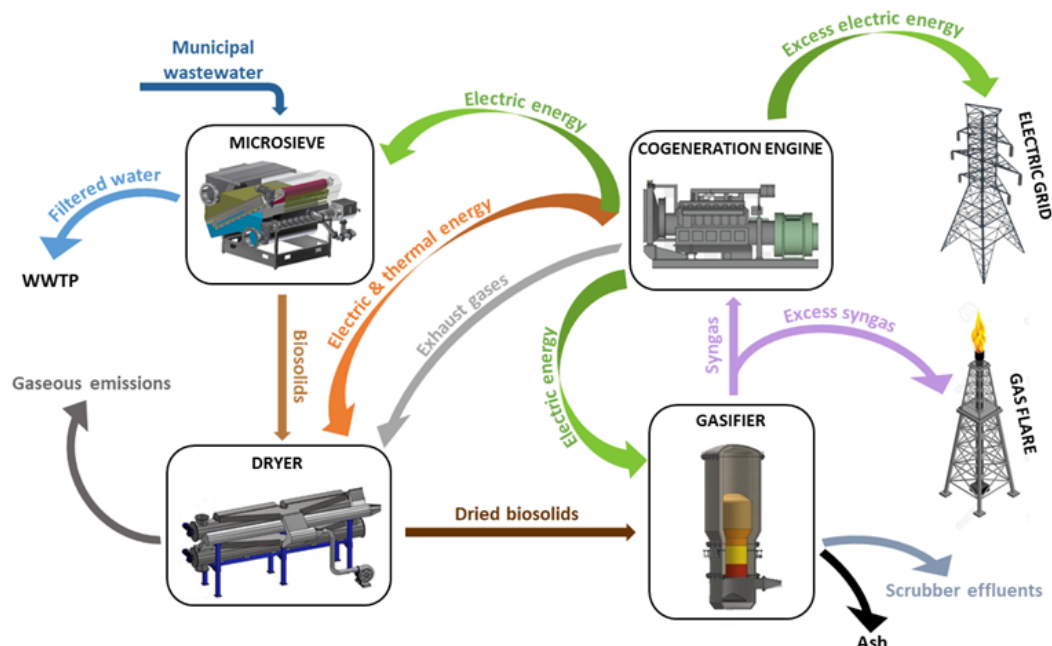
Όπως φαίνεται στο αναλυτικό διάγραμμα ροής, στο οποίο είναι εμφανείς οι ροές μάζας και ενέργειας της πιλοτικής μονάδας (Διάγραμμα 7.30), ως εισροή της πιλοτικής μονάδας θεωρούνται τα πρωτοβάθμια αστικά υγρά απόβλητα (με προσθήκη μικρής ποσότητας βιομηχανικών υγρών αποβλήτων), ενώ σαν εκροές έχουμε τα καυσαέρια της ΜΕΚ μαζί με το εξατμισμένο νερό από το ξηραντήριο, το στερεό υπόλειμμα (τέφρα) από τον αεριοποιητή και την εκροή της πλυντηρίδας καθαρισμού του αερίου σύνθεσης.

Για κάθε ένα παραπροϊόν της διαδικασίας προτάθηκε κατάλληλος τρόπος διαχείρισης σύμφωνα με αυτά που ορίζονται από την νομοθεσία. Συγκεκριμένα:

- Σε περίπτωση δημιουργίας ανεπιθύμητων οσμών από το εξατμισμένο νερό του ξηραντηρίου και από τα καυσαέρια της ΜΕΚ προβλέφθηκε η χρήση φίλτρου ενεργού άνθρακα για να απορροφήσει τις δυσάρεστες οσμές.
- Για το στερεό υπόλειμμα (τέφρα) από τον αεριοποιητή, προτάθηκε η ανάλυσή του, από τα αποτελέσματα της οποίας αν καταταχθεί στα επικίνδυνα απόβλητα θα διαχειριστεί αρμοδίως από ειδική εταιρία διαχείρισης, ενώ αν κριθεί ως μη επικίνδυνο θα αναμειχθεί με την δευτεροβάθμια ιλύ της ΕΕΛ Ρεθύμνου.
- Η εκροή της πλυντηρίδας καθαρισμού του αερίου σύνθεσης θεωρήθηκε βιομηχανικό υγρό απόβλητο και προτάθηκε επεξεργασία εντός της ΕΕΛ Ρεθύμνου, μαζί με τα λοιπά εισερχόμενα υγρά απόβλητα.

Γενικότερα, προβλέφθηκε ένα αυστηρό πρόγραμμα παρακολούθησης και συντήρησης της πιλοτικής μονάδας, ώστε να αναγνωρίζονται έγκαιρα οποιεσδήποτε διαρροές ή αστοχίες, να αντιμετωπίζονται άμεσα και αποτελεσματικά και να διασφαλίζεται η ορθή και ασφαλής λειτουργία του συστήματος.





Διάγραμμα 7.30 Ροές μάζας και ενέργειας της πιλοτικής μονάδας του έργου LIFE B2E4sustainable-WWTP (Manali et al., 2021).

## 7.6 Εκτίμηση περιβαλλοντικού αποτυπώματος της πιλοτικής μονάδας

Σύμφωνα με την μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εκτίμηση περιβαλλοντικού αποτυπώματος της πιλοτικής μονάδας (βλέπε Κεφάλαιο 6.3.4) αξιολογήθηκαν οι επιπτώσεις του έργου στα υφιστάμενα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος και προτάθηκε τρόπος αντιμετώπισής τους, καθώς και κατάλληλη περιβαλλοντική διαχείριση και παρακολούθηση (Μαυράκης, 2018).

### 7.6.1 Εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων

Η εκτίμηση αυτή έγινε πριν την κατασκευή και λειτουργία της πιλοτικής μονάδας, και τα βασικά της σημεία είναι τα ακόλουθα:

- Οι κυριότερες άμεσες επιπτώσεις του έργου είναι η κατανάλωση ενέργειας, η κατανάλωση νερού και η αγορά και κατανάλωση πηγών ενέργειας και πρώτων υλών.
- Όσον αφορά τα μορφολογικά, τοπιολογικά, γεωλογικά, τεκτονικά, και εδαφολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής, αλλά και το φυσικό περιβάλλον, εκτιμήθηκε ότι δεν αναμένονταν επιπτώσεις ούτε κατά την φάση κατασκευής, ούτε κατά την φάση λειτουργίας, καθώς η πιλοτική μονάδα θα εγκαθίστατο εντός των υφιστάμενων κτιριακών υποδομών της ΕΕΛ Ρεθύμνου.
- Οι επιπτώσεις στο ανθρωπογενές περιβάλλον θεωρήθηκαν θετικές, καθώς όλα τα παραγόμενα απόβλητα θα επεξεργάζονταν με μειωμένες ενεργειακές απαιτήσεις.
- Επίσης θετικές κρίθηκαν και οι επιπτώσεις της πιλοτικής μονάδας στην ανάπτυξη και στη κοινωνική φυσιογνωμία της περιοχής, καθώς θα δημιουργούνταν νέες θέσεις εργασίας (εκπαιδευμένο προσωπικό για διαρκή επίβλεψη και μεγιστοποίηση απόδοσης πιλοτικής μονάδας) τόσο κατά την κατασκευή όσο και κατά την λειτουργία, επομένως κατ' επέκταση θα ευνοούνταν και από οικονομική άποψη η περιοχή.
- Επιπλέον, η πιλοτική μονάδα θα αποτελούσε μία ενεργειακά συμφέρουσα λύση προ-επεξεργασίας λυμάτων και αξιοποίησης βιοστερεών με δυνατότητα να αποφέρει μεγάλο οικονομικό όφελος στην τοπική οικονομία, δεδομένου του μεγάλου όγκου λυμάτων που επεξεργάζεται η ΕΕΛ Ρεθύμνου.

- Σχετικά με τις επιπτώσεις στις τεχνικές υποδομές κατά την κατασκευή, εκτιμήθηκε ότι το οδικό δίκτυο και οι θαλάσσιες μεταφορές θα επιφορτίζονταν με ορισμένα παραπάνω δρομολόγια για την μεταφορά του εξιδεικευμένου εξοπλισμού στην ΕΕΛ Ρεθύμνου. Κατά την φάση λειτουργίας βέβαια, το έργο θα είχε θετικές επιπτώσεις στις τεχνικές υποδομές, καθώς θα μπορούσε να αποτελέσει κίνητρο για να αναβαθμιστούν τα δίκτυα αποχέτευσης των γύρω περιοχών, ώστε τα λύματα να καταλήγουν στην ΕΕΛ και να επεξεργάζονται ενεργειακά αποδοτικά.
- Οι ανθρωπογενείς πιέσεις που συσχετίστηκαν με το έργο είναι η εξέλιξη της βιομηχανικής και τουριστικής δραστηριότητας, καθώς τα λύματα θα επεξεργάζονταν με μειωμένες ενεργειακές απαιτήσεις και τα βιοστερεά θα αξιοποιούνταν με στόχο την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Ως προς την ποιότητα του αέρα, κατά την κατασκευή της πιλοτικής μονάδας θα γινόταν, αναπόφευκτα αλλά σε μικρή κλίμακα, εκπομπή ορισμένων αέριων ρύπων και σκόνης, ενώ κατά την λειτουργία θα παράγονταν καυσαέρια από την ΜΕΚ και εξατμισμένο νερό από το ξηραντήριο, τα οποία βέβαια δεν είναι ικανά να προκαλέσουν μεγάλα επίπεδα όχλησης καθώς η ΕΕΛ βρίσκεται μακριά από κατοικίες.
- Επίσης, κατά την λειτουργία της πιλοτικής μονάδας θα παραγόταν τέφρα, η οποία υπήρχε ενδεχόμενο να είναι επικίνδυνη και κρίθηκε απαραίτητη η εργαστηριακή ανάλυσή της και η κατάλληλη διαχείρισή της.
- Σχετικά με τις επιπτώσεις από θόρυβο, εκτιμήθηκε ότι θα υπήρχαν μέτριας έντασης οχλήσεις κατά την κατασκευή, οι οποίες θα είχαν παροδικό και τοπικό χαρακτήρα. Κατά την λειτουργία της πιλοτικής μονάδας αναμενόταν να υπάρχουν μικρές οχλήσεις λόγω του μηχανολογικού εξοπλισμού, που όμως δεν θα επιβάρυναν το ακουστικό περιβάλλον που ήδη επικρατούσε στην ΕΕΛ Ρεθύμνου. Εκτός αυτού, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η ΕΕΛ βρίσκεται σε ικανοποιητική απόσταση από οικισμούς.
- Τέλος, κατά την φάση κατασκευής εκτιμήθηκε ότι δεν θα υπήρχαν επιπτώσεις στα ύδατα της περιοχής, ενώ κατά την λειτουργία θα παραγόταν υγρή εκροή από την πλυντηρίδα καθαρισμού του αερίου σύνθεσης, η οποία θεωρήθηκε βιομηχανικό απόβλητο, επομένως θα μπορούσε να επεξεργαστεί με τα λοιπά υγρά απόβλητα που δέχεται ήδη η ΕΕΛ.

## 7.6.2 Αξιολόγηση αναμενόμενου περιβαλλοντικού αποτυπώματος

Η αξιολόγηση των επιπτώσεων του έργου συνοψίζεται στους Πίνακες 7.12 και 7.13 που ακολουθούν, τόσο για την φάση κατασκευής όσο και για την φάση λειτουργίας της πιλοτικής μονάδας αντίστοιχα.

Πίνακας 7.12 Αξιολόγηση επιπτώσεων κατά την φάση κατασκευής της πιλοτικής μονάδας του έργου LIFE B2E4sustainable-WWTP.

| Τομείς επιπτώσεων | Άμεσες | Έμμεσες | Βραχυχρόνιες | Μακροχρόνιες | Θετικές | Αρνητικές |         |          | Επανορθούμενες | Μη επανορθούμενες |
|-------------------|--------|---------|--------------|--------------|---------|-----------|---------|----------|----------------|-------------------|
|                   |        |         |              |              |         | Ισχυρές   | Μέτριες | Ασθενείς |                |                   |
| Ατμόσφαιρα        | ↙      |         | ↙            |              |         |           |         | ↙        |                | ↙                 |
| Νερά              | ↙      |         | ↙            |              |         |           |         | ↙        | ↙              |                   |

|  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|--|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Μορφολογία - Έδαφος                                | ✓ |   |   | ✓ |   |   |   | ✓ |   | ✓ |
| Χλωρίδα - Πανίδα                                   | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Θόρυβος  | ✓ |   | ✓ |   |   |   |   | ✓ |   | ✓ |
| Κλιματικά - Βιοκλιματικά χαρακτηριστικά            | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Γεωλογικά - Τεκτονικά - Εδαφολογικά χαρακτηριστικά | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Ανθρωπογενές περιβάλλον                            | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Κοινωνικό-οικονομικές επιπτώσεις                   | ✓ |   | ✓ | ✓ | ✓ |   |   |   | - | - |
| Τεχνικές υποδομές                                  | ✓ |   | ✓ | ✓ |   |   |   | ✓ |   | ✓ |
| Συσχέτιση με ανθρωπογενείς πιέσεις στο περιβάλλον  | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

Πίνακας 7.13 Αξιολόγηση επιπτώσεων κατά την φάση λειτουργίας της πιλοτικής μονάδας του έργου LIFE B2E4sustainable-WWTP.

| Τομείς επιπτώσεων                                  | Άμεσες | Έμμεσες | Βραχυχρόνιες | Μακροχρόνιες | Θετικές | Αρνητικές |         |          | Επανορθούμενες | Μη επανορθούμενες |
|--|--------|---------|--------------|--------------|---------|-----------|---------|----------|----------------|-------------------|
|  |        |         |              |              |         | Ισχυρές   | Μέτριες | Ασθενείς |                |                   |
| Ατμόσφαιρα   | ✓      |         |              | ✓            |         |           |         | ✓        |                | ✓                 |
| Νερά   | ✓      |         |              | ✓            |         |           |         | ✓        | ✓              |                   |
| Μορφολογία - Έδαφος                                | ✓      |         |              | ✓            |         |           |         | ✓        |                | ✓                 |
| Χλωρίδα - Πανίδα                                   | -      | -       | -            | -            | -       | -         | -       | -        | -              | -                 |
| Θόρυβος  | ✓      |         |              | ✓            |         |           |         | ✓        |                | ✓                 |
| Κλιματικά - Βιοκλιματικά χαρακτηριστικά            | -      | -       | -            | -            | -       | -         | -       | -        | -              | -                 |
| Γεωλογικά - Τεκτονικά - Εδαφολογικά χαρακτηριστικά | -      | -       | -            | -            | -       | -         | -       | -        | -              | -                 |
| Ανθρωπογενές περιβάλλον                            | ✓      |         | ✓            | ✓            | ✓       |           |         |          |                |                   |
| Κοινωνικό-οικονομικές επιπτώσεις                   | ✓      |         | ✓            | ✓            | ✓       |           |         |          | -              | -                 |
| Τεχνικές υποδομές                                  | ✓      |         |              | ✓            | ✓       |           |         |          |                | ✓                 |
| Συσχέτιση με ανθρωπογενείς πιέσεις στο περιβάλλον  | ✓      |         | -            | -            | ✓       |           |         |          |                | ✓                 |

### 7.6.3 Συσσωρευτικές - συνεργιστικές επιπτώσεις

Εκτός των παραπάνω επιπτώσεων μελετήθηκαν και η συσσωρευτικές - συνεργιστικές επιπτώσεις από την κατασκευή και λειτουργία της πιλοτικής μονάδας με τις εξής λοιπές δραστηριότητες της περιοχής:

- **Γεωργικές και κτηνοτροφικές δραστηριότητες:** Εκτιμήθηκε ότι δεν αναμένονταν αρνητικές επιπτώσεις, δεδομένου ότι η πιλοτική μονάδα θα εγκαθίστατο εντός της υφιστάμενης ΕΕΛ.
- **Συσκευαστήρια - Ελαιοτριβεία - Βιομηχανικές μονάδες:** Εκτιμήθηκε ότι δεν αναμένονταν αρνητικές επιπτώσεις, δεδομένου ότι η πιλοτική μονάδα θα επεξεργαζόταν και λύματα από βυρσοδεψεία, σφαγεία, τυροκομεία.
- **Τουριστικές επιχειρήσεις (ξενοδοχεία - υπηρεσίες - εμπόριο):** Εκτιμήθηκε ότι δεν αναμένονταν αρνητικές επιπτώσεις, δεδομένου ότι η πιλοτική μονάδα θα επεξεργαζόταν και λύματα από τουριστικές επιχειρήσεις της περιοχής.
- **Δραστηριότητες ηλεκτρικής διασύνδεσης:** Εκτιμήθηκε ότι θα υπήρχε θετική συνεργιστική επίπτωση, καθώς η προτεινόμενη μέθοδος περιλαμβάνει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα βιοστερεά.
- **Οδικό δίκτυο:** Εκτιμήθηκε ότι αναμενόταν πολύ μικρή επιβάρυνση από την αύξηση του κυκλοφοριακού φορτίου που θα προκαλούταν από τις μετακινήσεις του εργοταξίου κατά την κατασκευή και από τους επισκέπτες της μονάδας κατά την λειτουργία.
- **Ύδρευση - Αποχέτευση:** Εκτιμήθηκε ότι αναμένονταν θετικές συνεργιστικές επιπτώσεις δεδομένου ότι η ΔΕΥΑ θα μπορούσε να παρέχει αναβαθμισμένες υπηρεσίες ύδρευσης και αποχέτευσης στο εξυπηρετούμενο πληθυσμό και θα ήταν εφικτό να αναπτυχθούν περαιτέρω τα υφιστάμενα δίκτυα αναλογικά με τις διαρκώς αυξανόμενες ανάγκες της περιοχής.

### 7.6.4 Προτεινόμενοι τρόποι αντιμετώπισης επιπτώσεων

Αφού ολοκληρώθηκε η εκτίμηση των επιπτώσεων, προτάθηκαν τρόποι αντιμετώπισής τους ανά κατηγορία:

#### Ατμόσφαιρα

- Κατά την κατασκευή, (i) τα οχήματα που θα μετέφεραν αδρανή υλικά, θα έφεραν κάλυμμα, για την πρόληψη διασποράς αέριων σωματιδίων και σκόνης, (ii) η σκόνη από χωματουργικές εργασίες θα αντιμετωπιζόταν με συστηματική διαβροχή του εργοταξιακού χώρου, και (iii) η εκπομπή καυσαερίων θα ήταν εντός των οριακών τιμών και θα χρησιμοποιούταν εργοταξιακός εξοπλισμός σύγχρονης τεχνολογίας με σήμανση CE.
- Κατά την λειτουργία, θα υπήρχε ετήσιο πρόγραμμα προληπτικής συντήρησης όλου του εξοπλισμού βάσει του οποίου θα πραγματοποιούταν τακτικός έλεγχος όλων των μηχανημάτων σύμφωνα με τις υποδείξεις του υπεύθυνου συντήρησης και του κατασκευαστή.

#### Ύδατα και υγρά απόβλητα

- Κατά την κατασκευή, τα αστικά υγρά απόβλητα από το προσωπικό του εργοταξίου θα κατέληγαν στις τουαλέτες της ΕΕΛ.
- Κατά την λειτουργία, (i) θα γίνονταν συχνοί έλεγχοι συντήρησης για τυχόν διαρροές και απώλειες από την πιλοτική μονάδα, και (ii) η υγρή εκροή από την πλυντηρίδα καθαρισμού του αερίου σύνθεσης θα επεξεργαζόταν με τα λοιπά υγρά απόβλητα που δέχεται ήδη η ΕΕΛ, καθώς θεωρήθηκε βιομηχανικό απόβλητο.

### **Στερεά απορρίμματα**

- Κατά την κατασκευή, (i) τα απορρίμματα του προσωπικού του εργοταξίου καθώς και απόβλητα συσκευασιών του εξοπλισμού της πιλοτικής μονάδας θα συγκεντρώνονταν σε κάδο απορριμμάτων που διαθέτει η ΕΕΛ, και (ii) θα αποφευγόταν η συσσώρευση άχρηστων υλικών, ενώ η διάθεσή τους θα γινόταν σύμφωνα με τις ισχύουσες διατάξεις.
- Κατά την λειτουργία, θα παραγόταν τέφρα, για την οποία θα διενεργούνταν εργαστηριακές αναλύσεις και σε περίπτωση που αποδεικνυόταν επικίνδυνη θα διαχειριζόταν ως επικίνδυνο απόβλητο σε συνεργασία με ειδική εταιρία διαχείρισης επικίνδυνων αποβλήτων, ενώ σε αντίθετη περίπτωση θα αναμιγνυόταν με την δευτεροβάθμια ιλύ της ΕΕΛ Ρεθύμνου.

### **Θόρυβος**

- Κατά την κατασκευή, (i) θα χρησιμοποιούταν εργοταξιακός εξοπλισμός με σήμανση CE και εγγυημένη στάθμη ηχητικής ισχύος, (ii) κατά την διάρκεια των εκσκαφών και των εργασιών διαμόρφωσης χώρου και εγκατάστασης της μονάδας θα τηρούνταν όλες οι σχετικές διατάξεις, (iii) η κατασκευή θα γινόταν με σεβασμό στο ωράριο κοινής ησυχίας και θα ξεκινούσε την χειμερινή περίοδο ώστε να μην προκληθεί όχληση στην περιοχή που είναι τουριστικού χαρακτήρα, (iv) οι οριακές τιμές στάθμης θορύβου και δονήσεων από τα εργοταξιακά μηχανήματα και εξοπλισμό δεν θα υπερέβαιναν το ανώτατο επιτρεπόμενο όριο, και (v) θα γινόταν χρήση προστατευτικών πετασμάτων για ασφάλεια, ηχομόνωση και προστασία του προσωπικού από έκθεση σε συνεχείς θορύβους υψηλής στάθμης πίεσης.
- Κατά την λειτουργία, (i) θα πραγματοποιούνταν τακτική προληπτική συντήρηση του μηχανολογικού εξοπλισμού, και (ii) όλα τα στοιχεία της εγκατάστασης θα κατασκευάζονταν σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία και τους κανονισμούς αντιθορυβικής προστασίας.

### **Ενέργεια**

- Κατά την κατασκευή, θα χρησιμοποιούταν εργοταξιακός εξοπλισμός με σήμανση CE και χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση.
- Κατά την λειτουργία, η ίδια η πιλοτική μονάδα θα αποτελούσε μέτρο μείωσης της καταναλισκόμενης ενέργειας σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση της ΕΕΛ.

### **Φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον**

- Το φυσικό περιβάλλον δεν επρόκειτο να επηρεαστεί, εφόσον η εγκατάσταση θα γινόταν εντός της υφιστάμενης ΕΕΛ.
- Το ανθρωπογενές περιβάλλον επρόκειτο να επηρεαστεί θετικά καθώς η προτεινόμενη πιλοτική μονάδα θα διαχειριζόταν τα λύματα με φιλικό προς το περιβάλλον και τεχνολογικά προηγμένο τρόπο.

Τέλος, προτάθηκε κατάλληλη περιβαλλοντική διαχείριση και παρακολούθηση για την οποία προτάθηκε ο ορισμός ενός Υπεύθυνου Περιβάλλοντος / Υπεύθυνου Περιβαλλοντικής Διαχείρισης, που θα ενημερωνόταν για την πρόοδο υλοποίησης του έργου και θα δρούσε σε κάθε περίπτωση ώστε να αντιμετωπίζονται διάφορα θέματα που μπορεί να δημιουργούνταν.

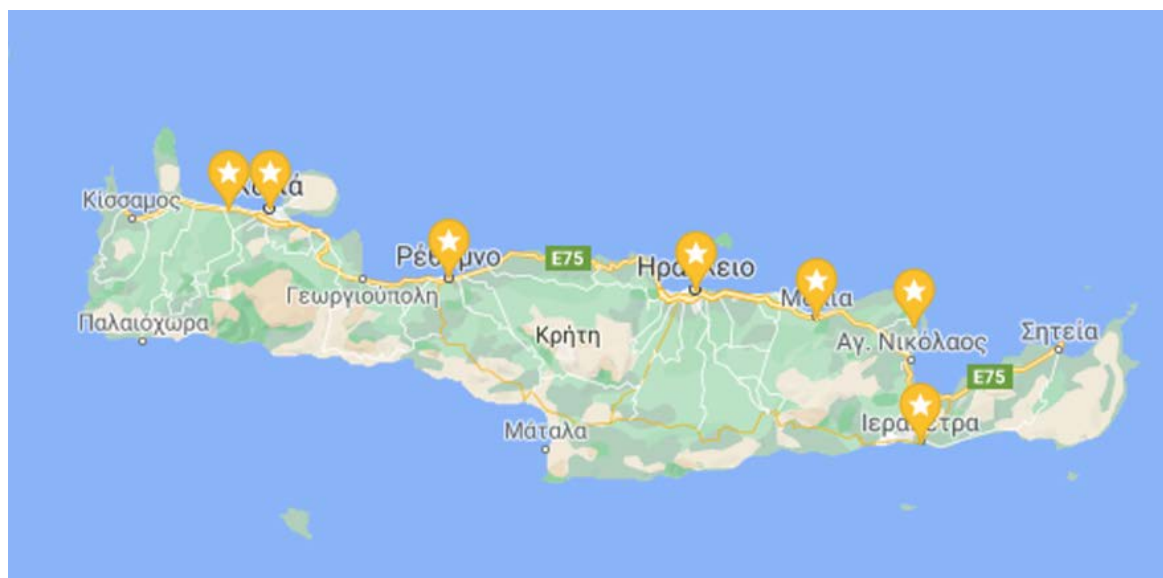
## **7.7 Αξιολόγηση ενεργειακού περιεχομένου βιοστερεών στην Κρήτη**

Η ενεργειακή αξιοποίηση των βιοστερεών αποτελεί τη βέλτιστη λύση διαχείρισής τους, καθώς πρόκειται για μια φιλική προς το περιβάλλον μέθοδο, η οποία αξιοποιεί τις τεράστιες ποσότητες παραγόμενων βιοστερεών με την εκμετάλλευσή τους ως καύσιμο υλικό για την παραγωγή ενέργειας. Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής, πραγματοποιήθηκε μελέτη που περιλάμβανε τον προσδιορισμό θερμογόνου δύναμης διάφορων ειδών ιλύος από τις μεγαλύτερες ΕΕΛ της Κρήτης, με σκοπό την αξιολόγηση του ενεργειακού τους περιεχομένου,



παρέχοντας μία πιο σφαιρική γνώση ως προς την δυνατότητα αξιοποίησης των βιοστερεών, αλλά και την σύγκρισή τους με τα μικροκοσκινισμένα βιοστερεά που αποτελούν βασικό αντικείμενο μελέτης της διατριβής (Λοΐζος, 2021).

Συγκεκριμένα, ελήφθησαν δείγματα πρωτοβάθμιας, δευτεροβάθμιας, ομογενοποιημένης και χωνεμένης ιλύος από τις ΕΕΛ Χανίων, Πλατανιά, Ρεθύμνου, Ηράκλειου, Μάλιας, Ελούντας, και Ιεράπετρας (Εικόνα 7.4).



Εικόνα 7.3 Χάρτης της Κρήτης με σημειωμένες τις ΕΕΛ από τις οποίες έγιναν οι δειγματοληψίες διαφόρων τύπων ιλύος.

Τα δείγματα ελήφθησαν, επεξεργάστηκαν και αναλύθηκαν κατάλληλα (βλέπε Κεφάλαιο 6.1 και 6.2.7). Τα αποτελέσματα δίνονται στον Πίνακα 7.14, από τον οποίο φαίνεται ότι η πρωτοβάθμια ιλύς έχει την υψηλότερη τιμή HHV, με την ομογενοποιημένη να ακολουθεί, και την δευτεροβάθμια μαζί με την χωνεμένη να παρουσιάζουν τις χαμηλότερες τιμές.

Πίνακας 7.14 Αποτελέσματα μετρήσεων θερμोगόνου δύναμης (HHV, MJ/kg) διαφόρων ειδών ιλύων από ΕΕΛ της Κρήτης.

| ΕΕΛ                         | HHV (MJ/kg)    |
|-----------------------------|----------------|
| <b>Πρωτοβάθμια ιλύς</b>     |                |
| Χανιά                       | 24,834 ± 0,535 |
| Ηράκλειο                    | 23,649 ± 0,179 |
| <b>Δευτεροβάθμια ιλύς</b>   |                |
| Χανιά                       | 19,571 ± 0,522 |
| Πλατανιάς                   | 18,483 ± 0,137 |
| Ρέθυμνο                     | 19,447 ± 0,591 |
| Ηράκλειο                    | 17,137 ± 1,203 |
| Μάλια                       | 16,689 ± 0,663 |
| Ελούντα                     | 16,491 ± 1,768 |
| Ιεράπετρα                   | 17,434 ± 1,485 |
| <b>Ομογενοποιημένη ιλύς</b> |                |
| Χανιά                       | 22,048 ± 1,624 |

|                      |                |
|----------------------|----------------|
| Ηράκλειο             | 20,210 ± 1,141 |
| <b>Χωνεμένη ιλύς</b> |                |
| Χανιά                | 16,982 ± 0,536 |
| Ρέθυμνο              | 16,688 ± 0,617 |
| Ηράκλειο             | 15,090 ± 0,849 |

Στον επόμενο Πίνακα 7.15, έχουν συγκεντρωθεί οι τιμές που αναφέρονται βιβλιογραφικά για τα διάφορα είδη ιλύος. Η τιμή της θερμογόνου δύναμης των βιοστερεών όπως φαίνεται και στον παραπάνω Πίνακα 7.14, μεταβάλλεται ανάλογα με τα στάδια επεξεργασίας από τα οποία συλλέγεται το δείγμα που εξετάζεται. Παρατηρείται ότι η θερμογόνος δύναμη τόσο της πρωτοβάθμιας ιλύος (Χανιά, Ηράκλειο), όσο και της χωνεμένης ιλύος (Χανιά, Ρέθυμνο, Ηράκλειο) είναι μεγαλύτερες από τις βιβλιογραφικές. Από την άλλη, η θερμογόνος δύναμη της δευτεροβάθμιας ιλύος για όλες τις ΕΕΛ συνάδει με αυτή των βιβλιογραφικών τιμών. Οι διαφορές των τιμών της θερμογόνου δύναμης μεταξύ της δευτεροβάθμιας και της χωνεμένης ιλύος, κυμαίνονται από 2,047 MJ/kg (ΕΕΛ Ηρακλείου) έως 2,759 MJ/kg (ΕΕΛ Ρεθύμνου). Σε παρόμοια έρευνα η οποία πραγματοποιήθηκε στο Πόζναν της Πολωνίας, η θερμογόνος δύναμη των βιοστερεών της δευτεροβάθμιας ιλύος μετρήθηκε 14,235 MJ/kg, ενώ η θερμογόνος δύναμη της χωνεμένης ιλύος μετρήθηκε 10,467 MJ/kg (Zygadlo, 2001). Παρατηρούμε λοιπόν, ότι παρομοίως η θερμογόνος δύναμη της δευτεροβάθμιας ιλύος είναι μεγαλύτερη από αυτήν της χωνεμένης, με τη διαφορά να ανέρχεται στα 3,768 MJ/kg και να είναι λίγο μεγαλύτερη από τη διαφορά που υπολογίσθηκε στις δικές μας μετρήσεις. Η διαφορά αυτή οφείλεται στη βιολογική διάσπαση που υφίσταται η ιλύς και την απελευθέρωση διοξειδίου του άνθρακα και άνθρακα με τη μορφή μεθανίου, κατά τη χώνευση. Σύμφωνα με τον Kowalik (1998), η θερμογόνος δύναμη της χωνεμένης ιλύος είναι κατά 2 MJ/kg μικρότερη από αυτήν της δευτεροβάθμιας. Στις ΕΕΛ της Κρήτης όπου πραγματοποιείται η διεργασία της χώνευσης, η μέση διαφορά μεταξύ της δευτεροβάθμιας και χωνεμένης ιλύος και για τις 3 ΕΕΛ (Χανίων, Ρεθύμνου, Ηρακλείου) ανέρχεται στα 2,465 MJ/kg, σχεδόν ισόποση δηλαδή με τη βιβλιογραφική τιμή του Kowalik.

Πίνακας 7.15 Τιμές θερμογόνου δύναμης (HHV, MJ/kg) διαφόρων ειδών ιλύων που αναφέρονται βιβλιογραφικά (Abbas et al., 2011; Barber, 2014; Celebi et al., 2021; Fytili and Zabaniotou, 2008; Grabowski and Oleszkiewicz, 1998; Hall, 1999; Huang et al., 2021; Kowalik, 1998; Menon et al., 2020; Ostojski, 2018; Zygadlo, 2001).

| Τύπος ιλύος   | HHV (MJ/kg) | Μέση HHV (MJ/kg) |
|---------------|-------------|------------------|
| Πρωτοβάθμια   | 12,847      | 17,697           |
|               | 14,235      |                  |
|               | 17          |                  |
|               | 17,3        |                  |
|               | 19,3        |                  |
|               | 16-20*      |                  |
|               | 25,5        |                  |
| Δευτεροβάθμια | 14,7        | 16,286           |
|               | 15          |                  |
|               | 16          |                  |
|               | 16,3        |                  |
|               | 14-18*      |                  |

|          |        |        |
|----------|--------|--------|
| Χωνεμένη | 10-20* | 11,496 |
|          | 21     |        |
|          | 10     |        |
|          | 10,467 |        |
|          | 11     |        |
|          | 11     |        |
|          | 11,5   |        |
|          | 11-14* |        |
|          | 12-14* |        |
|          | 10-15* |        |

\* Στις περιπτώσεις όπου αναγράφεται εύρος τιμών, για τη μέτρηση της μέσης θερμογόνου δύναμης λαμβάνεται υπόψιν η διάμεση τιμή.

Συμπερασματικά, καταλήγουμε στο ότι τα μικροκοσκινισμένα βιοστερεά έχουν αρκετά αξιόλογο ενεργειακό περιεχόμενο ( $21,479 \pm 1,434$  MJ/kg), αλλά και ότι τα συγκεκριμένα υλικά παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις ως προς την τιμή της θερμογόνου δύναμής τους.

## 7.8 Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA) της προτεινόμενης μεθόδου προ-επεξεργασίας λυμάτων και αξιοποίησης των παραγόμενων βιοστερεών

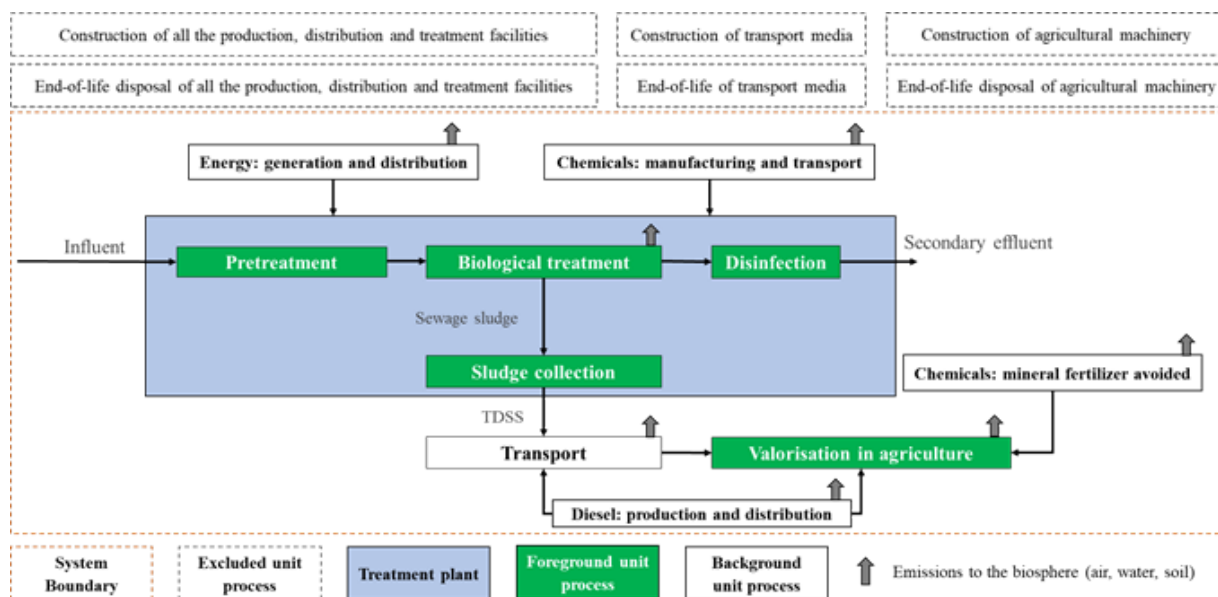
Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 6.3.5. χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο της AKZ προκειμένου να διερευνηθεί γενικότερα κατά πόσο είναι ικανή η καινοτόμα μέθοδος προ-επεξεργασίας λυμάτων (μέσω μικροκοσκίνισης) και αξιοποίησης των παραγόμενων βιοστερεών (μέσω αεριοποίησης) με παράλληλη παραγωγή ενέργειας (μέσω καύσης του αερίου σύνθεσης σε MEK) να αποτελέσει λύση στις περιβαλλοντικές και οικονομικές παθογένειες που χαρακτηρίζουν τις σύγχρονες συμβατικές ΕΕΛ.

Συγκεκριμένα, αξιολογήθηκε η προτεινόμενη μέθοδος - λύση του έργου LIFE B2E4sustainable-WWTP (ή πιο σύντομα B2E) ως προς την δυνατότητα μείωσης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος και του λειτουργικού κόστους των ΕΕΛ, κυρίως αναφορικά με την υψηλή κατανάλωση ενέργειας και την αναποτελεσματική διαχείριση ιλύος. Η B2E λύση προτείνει την ολοκληρωμένη διαχείριση της ιλύος εντός της ΕΕΛ (μικροκοσκίνιση - ξήρανση - αεριοποίηση) και την αξιοποίηση του παραγόμενου αερίου σύνθεσης προς παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι, μειώνονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τα κόστη που προκύπτουν από την εξωτερική επεξεργασία - διάθεση της ιλύος, ενώ παράλληλα εφαρμόζεται μία ενεργειακά αυτόνομη μέθοδος. Το B2E σύστημα έχει σχεδιαστεί και προτείνεται για μεσαίου μεγέθους ΕΕΛ (με εξυπηρετούμενο πληθυσμό από 10.000 έως 100.000 PE) που αποτελούν και την πλειοψηφία των ΕΕΛ της Ευρώπης. Τα βασικά στάδια της AKZ ταυτίζονται με αυτά που περιεγράφηκαν στην μεθοδολογία (Κεφάλαιο 6.3.5) και περιγράφονται συνοπτικά ακολούθως, ενώ αναλυτικά η AKZ παρουσιάζεται σε άρθρο σε διεθνές επιστημονικό περιοδικό (Fernández-Gutiérrez et al., 2023).

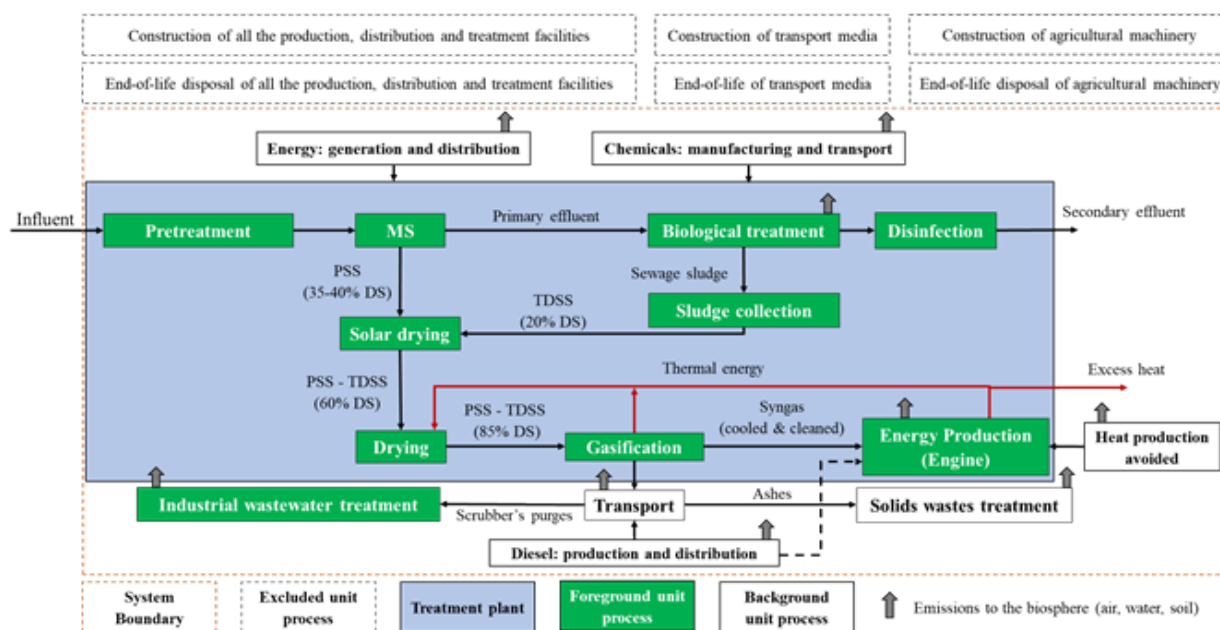
### **Καθορισμός του σκοπού και πλαισίου μελέτης (goal and scope definition)**

Το αντικείμενο της παρούσας AKZ ήταν η αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ΕΕΛ με εξυπηρετούμενο πληθυσμό 10.000 - 100.000 PE αφού εφαρμοστεί σε αυτές η εναλλακτική μέθοδος προ-επεξεργασίας λυμάτων και αξιοποίησης των παραγόμενων βιοστερεών του έργου LIFE B2E4sustainable-WWTP. Προκειμένου να γίνει αυτό, ορίστηκε ως βασικό σενάριο (Baseline, BS) η συνήθης επεξεργασία λυμάτων που ακολουθούν οι συμβατικές ΕΕΛ ενεργού ιλύος και πραγματοποιήθηκε σύγκριση με και χωρίς την εφαρμογή της λύσης B2E (συμπληρωματικά, δηλαδή μόνο BS ή BS + B2E). Τα δύο συγκρινόμενα συστήματα

περιγράφονται σχηματικά στα Διαγράμματα 7.31 και 7.32. Επίσης, ως λειτουργική μονάδα (FU) επιλέχθηκε το 1 PE-γ.



Διάγραμμα 7.31 Σχηματική περιγραφή του συστήματος του βασικού σεναρίου (BS), όπου η Παχυμένη Αφυδατωμένη Δευτεροβάθμια Ιλύς (Thickened Dewatered Secondary Sludge, TDSS) κομποστοποιείται και χρησιμοποιείται στην γεωργία (Fernández-Gutiérrez et al., 2023).



Διάγραμμα 7.32 Σχηματική περιγραφή του συστήματος του βασικού σεναρίου (BS) με εφαρμογή της λύσης B2E, όπου τα Πρωτοβάθμια Μικροκοσκινισμένα Βιοστερεά (Primary Sieved Solids, PSS) και η δευτεροβάθμια ιλύς (TDSS) επεξεργάζονται θερμικά (ξήρανση - αεριοποίηση) οδηγώντας σε παραγωγή ενέργειας (Fernández-Gutiérrez et al., 2023).

### Απογραφή Κύκλου Ζωής (Life Cycle Inventory, LCI)

Για την LCI συλλέχθηκαν δεδομένα και πραγματοποιήθηκαν οι απαραίτητοι υπολογισμοί για την ποσοτικοποίηση των εισροών (ενέργεια και πρώτες ύλες) και των εκροών (εκπομπές σε αέρα, έδαφος και νερό) των υπό μελέτη συστημάτων (BS, BS + B2E). Η συλλογή των

δεδομένων έγινε από το έργο LIFE B2E4sustainable-WWTP, από βιβλιογραφικές πηγές και από την βάση δεδομένων του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση της AKZ (Sphera Solutions GmbH v10.5). Περισσότερες πληροφορίες για την LCI δίνονται εντός της σχετικής επιστημονικής δημοσίευσης (Fernández-Gutiérrez et al., 2023).

### **Ανάλυση Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής (Life Cycle Impact Assessment, LCIA) και ερμηνεία των αποτελεσμάτων (results interpretation)**

Η LCIA πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια της μεθοδολογίας Περιβαλλοντικού Αποτυπώματος (Environmental Footprint, EF) v3.0 του λογισμικού Sphera Solutions GmbH v10.5. Σύμφωνα με την μεθοδολογία αυτή, επιλέχθηκαν οι εξής 6 κατηγορίες επιπτώσεων (από τις 16 διαθέσιμες):

1. Κλιματική αλλαγή (climate change)
2. Οικοτοξικότητα γλυκού νερού (freshwater ecotoxicity)
3. Ευτροφισμός γλυκού νερού (freshwater eutrophication)
4. Ανθρώπινη τοξικότητα - σχετική με καρκίνο (human toxicity - cancer)
5. Ανθρώπινη τοξικότητα - μη σχετική με καρκίνο (human toxicity - non-cancer)
6. Χρήση ορυκτών πόρων (fossils resource use)

Η επιλογή έγινε με βάση τα χαρακτηριστικά της προτεινόμενης B2E λύσης και τους σκοπούς του έργου LIFE B2E4sustainable-WWTP. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η B2E λύση προκαλεί περιβαλλοντική βελτίωση συγκριτικά με το BS σενάριο σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων (Πίνακας 7.16). Μάλιστα, η μεγαλύτερη διαφορά παρατηρήθηκε στις κατηγορίες ανθρώπινης τοξικότητας, όπου βρέθηκε ότι οι επιπτώσεις της B2E λύσης είναι 99% χαμηλότερες σε σχέση με του BS σεναρίου, ενώ στις υπόλοιπες κατηγορίες η μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κυμαίνεται μεταξύ 19 και 48 %. Τα αποτελέσματα της LCIA σε μορφή διαγραμμάτων και πινάκων δίνονται στο [Παράρτημα](#).

Πίνακας 7.16 Σύγκριση περιβαλλοντικών επιπτώσεων των συστημάτων BS και BS + B2E.

| Κατηγορίες επιπτώσεων   | BS                      | BS + B2E                | Διαφορά |
|---|-------------------------|-------------------------|---------|
| Κλιματική αλλαγή (kg CO <sub>2</sub> eq)                          | 38,0                    | 26,1                    | 31,3 %  |
| Οικοτοξικότητα γλυκού νερού (CTU <sub>e</sub> )*                  | 1.943                   | 1.020                   | 47,5 %  |
| Ευτροφισμός γλυκού νερού (kg P <sub>eq</sub> )                    | 0,093                   | 0,063                   | 32,7 %  |
| Ανθρώπινη τοξικότητα - σχετική με καρκίνο (CTU <sub>h</sub> )*    | 1,78 x 10 <sup>-6</sup> | 1,02 x 10 <sup>-8</sup> | 99,4 %  |
| Ανθρώπινη τοξικότητα - μη σχετική με καρκίνο (CTU <sub>h</sub> )* | 1,66 x 10 <sup>-4</sup> | 1,57 x 10 <sup>-6</sup> | 99,1 %  |
| Χρήση ορυκτών πόρων (MJ)  | 378                     | 307                     | 18,7 %  |

\*CTU: Comparative Toxic Units - Συγκριτικές Μονάδες Τοξικότητας

## **7.9 Εκτίμηση της συνεισφοράς της πιλοτικής μονάδας στην διαμόρφωση του νομικού πλαισίου για την διαχείριση αστικών υγρών αποβλήτων**

Όπως προαναφέρθηκε (βλέπε Κεφάλαιο 5.1), οι βασικοί στόχοι της εφαρμογής της προτεινόμενης μεθόδου προ-επεξεργασίας λυμάτων και αξιοποίησης των παραγόμενων βιοστερεών του καινοτομικού συστήματος του έργου LIFE B2E4sustainable-WWTP είναι η βελτίωση απόδοσης του παρατεταμένου αερισμού, η προστασία του υδάτινου περιβάλλοντος καθώς και η μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης των ΕΕΛ ενεργού ιλύος.

Ο σκοπός της συγκεκριμένης μελέτης ήταν η χαρτογράφηση των νομοθεσιών, κανονισμών και οδηγιών, που σχετίζονται με την επεξεργασία λυμάτων και τη διαχείριση υδατικών πόρων, τόσο εθνικό όσο και σε ευρωπαϊκό επίπεδο.



Με την μελέτη αυτή διερευνήθηκε η δυνατότητα ενσωμάτωσης των προτεινόμενων τεχνολογιών του έργου LIFE B2E4sustainable-WWTP σε διάφορες ΕΕΛ ανά την Ελλάδα και την Ευρώπη. Ακόμη, εκτιμήθηκε η συμβολή του συγκεκριμένου καινοτομικού συστήματος μικροοσκίνισης - αεριοποίησης βιοστερεών στη αναθεώρηση/ανανέωση του υπάρχοντος νομικού πλαισίου, καθώς και η συνεισφορά του στην διαμόρφωση νέων κανονισμών για πιο εκσυγχρονισμένη, ενεργειακά αποδοτική και περιβαλλοντικά φιλική διαχείριση λυμάτων.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε συλλογή, καταγραφή και περιγραφή του σχετικού ισχύοντος νομικού πλαισίου στην Ελλάδα και στην Ευρωπαϊκή Ένωση και κατόπιν εξετάστηκε η συνεισφορά του έργου LIFE B2E4sustainable-WWTP στο νομικό πλαίσιο αυτό (Σύρπης, 2023).

### 7.9.1 Το νομικό πλαίσιο στην Ελλάδα

Το νομικό πλαίσιο που ισχύει σε εθνικό επίπεδο σχετικά με την επεξεργασία λυμάτων και τη διαχείριση υδατικών πόρων περιγράφεται συνοπτικά ακολούθως:

- **ΚΥΑ 5673/400/1997 (Β192) - Μέτρα και Όροι για την επεξεργασία των Αστικών Λυμάτων:** Βασική προϋπόθεση διάθεσης των αστικών λυμάτων από τις ΕΕΛ στους υδάτινους αποδέκτες είναι η υποβολή τους σε δευτεροβάθμια ή ισοδύναμη επεξεργασία, με εξαίρεση τα λύματα που οδηγούνται σε νερά ορεινών περιοχών, τα οποία μπορούν να υποβάλλονται σε επεξεργασία με λιγότερο αυστηρά μέτρα, εφόσον η διάθεσή τους δεν προκαλεί αρνητικές επιπτώσεις στη γύρω περιοχή.
- **Νόμος 4042/2012 - Πλαίσιο παραγωγής και διαχείρισης αποβλήτων:** Η διαχείριση αποβλήτων πρέπει να πραγματοποιείται με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να μην τίθενται σε κίνδυνο η ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Για την επίτευξη των στόχων της διαχείρισης αποβλήτων, εκπονούνται Σχέδια Διαχείρισης Αποβλήτων (ΣΔΑ) που αναλύουν την υπάρχουσα κατάσταση διαχείρισης αποβλήτων και τα μέτρα που πρέπει να ληφθούν για την βελτίωση των αποβλήτων για επαναχρησιμοποίηση.
- **Νόμος 4819/2021 - Ολοκληρωμένο πλαίσιο διαχείρισης αποβλήτων:** Αποτελεί αναβάθμιση του Νόμου 4042/2012, με βασικότερη προσθήκη τον «Κατάλογο Αποβλήτων» στον οποίο περιλαμβάνονται τα επικίνδυνα απόβλητα και τα χαρακτηριστικά τους. Επίσης, αναφέρεται ότι η παραγωγή και η διαχείριση επικίνδυνων αποβλήτων (συλλογή, μεταφορά, αποθήκευση, επεξεργασία, τελική διάθεση) πρέπει να διεξάγονται σε συνθήκες οι οποίες προστατεύουν το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία.
- **ΚΥΑ 80568/4225/1991 - Μέθοδοι, όροι και περιορισμοί για την χρησιμοποίηση της ιλύος που προέρχεται από επεξεργασία οικιακών και αστικών λυμάτων στην γεωργία:** Καταγράφονται οι προϋποθέσεις χορήγησης άδειας για την χρήση επεξεργασμένης ιλύος στη γεωργία, καθώς και οι οριακές τιμές των βαρέων μετάλλων που επιτρέπεται να περιέχονται στην ιλύ, ενώ αναφέρεται και ότι ενδέχεται να πραγματοποιούνται έλεγχοι στην περιοχής χρήσης της ιλύος, έτσι ώστε να αποφευχθεί ενδεχόμενη υποβάθμιση των εδαφών καθώς και ρύπανση ή υποβάθμιση των επιφανειακών και υπόγειων νερών.
- **Κανονισμός 741/2020 & ΚΥΑ 145116/2011 - Διατάξεις σχετικές με την επαναχρησιμοποίηση νερού:** Ο Κανονισμός 741/2020 θεσπίζει τις ελάχιστες απαιτήσεις ποιότητας υδάτων, στοχεύει στην διασφάλιση ασφαλούς χρήσης του

ανακτημένου νερού για γεωργική άρδευση και περιλαμβάνει την θέσπιση σχεδίου διαχείρισης κινδύνου επαναχρησιμοποίησης νερού. Η ΚΥΑ 145116/2011 αφορά στην προγραμματισμένη επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων αστικών υγρών αποβλήτων για άρδευση, τροφοδότηση/εμπλουτισμό υπόγειων υδροφορέων, αστική και βιομηχανική χρήση (εξαιρουμένων όσων αποβλήτων έχουν καταστεί ως επικίνδυνα).

## 7.9.2 Το νομικό πλαίσιο στην Ευρωπαϊκή Ένωση

Αρχικά, ως προς την διαδικασία εναρμόνισης με το ευρωπαϊκό δίκαιο, η ενσωμάτωση οδηγιών της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ε.Ε.) στην εθνική έννομη τάξη πραγματοποιείται είτε με τυπικό νόμο είτε με πράξη κανονιστικού περιεχομένου (προεδρικό διάταγμα, υπουργική απόφαση), με συγκεκριμένη προθεσμία. Το βασικό εργαλείο για την ενσωμάτωση οδηγιών αποτελεί ο Νόμος 1338/1983, ο οποίος επιτρέπει την χρήση εξουσιοδοτήσεων της εθνικής νομοθεσίας για την έκδοση υπουργικών αποφάσεων και προεδρικών διαταγμάτων.

Το ευρωπαϊκό νομικό πλαίσιο που σχετίζεται με την επεξεργασία λυμάτων και τη διαχείριση υδατικών πόρων περιγράφεται συνοπτικά ακολούθως:

- **Οδηγία 2000/60/EC - Μείωση της ύφεσης των υδατικών οικοσυστημάτων:** Αποτελεί την πολιτική διαχείρισης των υδατικών πόρων με σκοπό την προστασία τους και την διατήρησή τους σε καλή κατάσταση. Στα πλαίσια αυτά καταρτίζονται σχέδια διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών, ενώ αναλύονται το κόστος και η τιμολόγηση των υπηρεσιών του νερού (λειτουργικό κόστος, κόστος συντήρησης, κόστος επενδύσεων και περιβαλλοντικό κόστος) με βάση θεμελιώδεις οικονομικές αρχές.
- **Οδηγία 91/271/EEC - Επεξεργασία αστικών λυμάτων:** Οι βασικοί στόχοι της οδηγίας είναι η προστασία των υδάτων από τις επιπτώσεις επεξεργασίας των αστικών λυμάτων, καθώς και η θέσπιση κανονισμών που αφορούν στην συλλογή, επεξεργασία και απόρριψη των λυμάτων πριν την διάθεσή τους. Μάλιστα, στην αναθεώρηση της οδηγίας που είναι υπό επεξεργασία, πρόκειται να τεθεί στόχος για ενεργειακή ουδετερότητα των ΕΕΛ άνω των 10.000 PE έως το 2040.
- **Οδηγία 86/278/EEC - Ελαχιστοποίηση παραγωγής ιλύος:** Θεσπίζει τα απαραίτητα όρια για την προστασία του περιβάλλοντος κατά την χρήση ιλύος στη γεωργία, με έμφαση στις συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων στα εδάφη καθώς και στις ανώτατες ετήσιες ποσότητες αυτών των βαρέων μετάλλων που μπορούν να εισάγονται στα προς καλλιέργεια εδάφη. Επίσης, ορίζει κανόνες για τον τρόπο που πρέπει να χρησιμοποιείται η ιλύς.
- **Οδηγία 1999/31/EC - Αποτροπή διάθεσης αποβλήτων:** Βασικό στόχο της οδηγίας αποτελεί η πρόληψη / μείωση αρνητικών επιπτώσεων της υγειονομικής ταφής αποβλήτων στο περιβάλλον. Στα πλαίσια της οδηγίας, ορίζεται ως υποχρέωση των χωρών της Ε.Ε. να εφαρμόζουν στρατηγικές με σκοπό την μείωση των βιοαποδομήσιμων αποβλήτων που καταλήγουν στους Χώρους Υγειονομικής Ταφής (ΧΥΤΑ), ενώ καθορίζονται και τα απόβλητα που επιτρέπεται να διατεθούν προς ταφή. Το 2018 πραγματοποιήθηκε τροποποίηση της οδηγίας, έτσι ώστε να στηρίξει την μετάβαση της Ε.Ε. στην κυκλική οικονομία (Οδηγία EU 2018/850), θεσπίζοντας περαιτέρω περιορισμούς σχετικά με την υγειονομική ταφή.

- **Οδηγία 2012/27/EU - Ενεργειακή Απόδοση:** Θεσπίζεται το πλαίσιο μέτρων για την βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των χωρών της Ε.Ε., με τα κράτη μέλη να υποχρεούνται στην εξοικονόμηση ενέργειας, ενώ τίθενται και στόχοι εξοικονόμησης που πρέπει να επιτευχθούν έως το 2020. Η οδηγία τροποποιήθηκε το 2018 (Οδηγία EU 2018/2002), ανανεώνοντας τα ισχύοντα μέτρα και θέτοντας εκ νέου στόχους βελτίωσης ενεργειακής απόδοσης έως το 2030.
- **European Innovation Partnership on Water - Ευρωπαϊκή Σύμπραξη Καινοτομίας για αντιμετώπιση προκλήσεων σε σχέση με το νερό:** Η Ευρωπαϊκή Σύμπραξη Καινοτομίας αποσκοπεί στην διασφάλιση της σωστής επεξεργασίας και διάθεσης των λυμάτων, με σκοπό την βελτίωση της ποιότητας των υδατικών σωμάτων, ενώ απαιτεί και από τις χώρες να υποβάλουν εκθέσεις σχετικά με την διάθεση λυμάτων και ιλύος.
- **Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τυποποίησης (CEN/TC 165) - Τυποποίηση της μηχανικής λυμάτων στην Ε.Ε. - Έργο Deep Purple:** Η επιτροπή CEN αποτελεί φορέα λήψης αποφάσεων πάνω στον τομέα μηχανικής λυμάτων της Ε.Ε., με βασικό στόχο την ανάπτυξη λειτουργικών προτύπων και συστημάτων. Επίσης, η επιτροπή CEN αποσκοπεί στην εύρεση λύσεων πάνω σε θέματα περιβαλλοντικής πολιτικής, μέσω τυποποίησης προτύπων, ώστε να μειωθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις και να επιτευχθεί βιώσιμη ανάπτυξη. Στα πλαίσια του έργου «Deep Purple», αναλύονται οι διαδικασίες και τα πρότυπα που θεσπίζονται, για διευκόλυνση της αποδοχής και αξιοποίησης τους από την αγορά.

### 7.9.3 Η εκτιμώμενη συνεισφορά του έργου LIFE B2E4sustainable-WWTP

Η διαχείριση των λυμάτων θεωρείται μία δαπανηρή διαδικασία, η οποία εάν γίνεται με ακατάλληλο ή αναποτελεσματικό τρόπο μπορεί να αποτελέσει κίνδυνο για το περιβάλλον και την υγεία, γι' αυτό και ορίζεται από αυστηρό νομικό πλαίσιο, τόσο σε εθνικό όσο και σε ευρωπαϊκό επίπεδο. Η προτεινόμενη μέθοδος προ-επεξεργασίας λυμάτων και αξιοποίησης των παραγόμενων βιοστερεών του καινοτομικού συστήματος του έργου LIFE B2E4sustainable-WWTP συνάδει με το ισχύον νομικό πλαίσιο, ενώ η εφαρμογή της συνεισφέρει στην επίτευξη των στόχων που τίθενται από τις προαναφερθείσες νομοθεσίες αλλά και στην θέσπιση περαιτέρω κανονισμών σχετικά με την διαχείριση λυμάτων και βιοστερεών με γνώμονα την κυκλική οικονομία, με χαμηλές περιβαλλοντικές επιπτώσεις και υψηλή ενεργειακή απόδοση. Στον Πίνακα 7.17 που ακολουθεί, περιγράφεται αναλυτικά η συνεισφορά του έργου LIFE B2E4sustainable-WWTP στο νομικό πλαίσιο επεξεργασίας λυμάτων και διαχείρισης υδατικών πόρων της Ελλάδας και της Ε.Ε.

Πίνακας 7.17 Συνεισφορά του έργου LIFE B2E4sustainable-WWTP στο νομικό πλαίσιο επεξεργασίας λυμάτων και διαχείρισης υδατικών πόρων της Ελλάδας και της Ε.Ε.

| Νομικό πλαίσιο    | Συνεισφορά του έργου LIFE B2E4sustainable-WWTP  |
|-------------------|---|
| <b>Ελλάδα</b>     |   |
| KYA 5673/400/1997 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Αποτελεσματικότερη απομάκρυνση φορτίου TSS και BOD μέσω μικροκοσκίνισης σε σχέση με μία παραδοσιακή ΔΠΚ, με αποτέλεσμα να απαιτείται λιγότερη βιολογική επεξεργασία και να βελτιώνεται η απόδοση της δευτεροβάθμιας επεξεργασίας (αερισμού).</li> <li>- Μείωση των επιπτώσεων στο περιβάλλον από την διαχείριση της ιλύος, καθώς μετατρέπεται κυρίως σε ενέργεια για την εγκατάσταση και ελάχιστα απόβλητα (τέφρα).</li> </ul> |

|                                       |  |
|---------------------------------------|--|
|                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Αντιμετώπιση κυριότερων προβλημάτων των κλασσικών ΔΔΚ, όπως η δημιουργία μικρών κροκίδων βιομάζας και ο αφρισμός της ιλύος λόγω νηματοειδών μικροοργανισμών.</li> </ul>   |
| Νόμος 4042/2012 & 4819/2021           | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Βελτίωση απόδοσης αερισμού λόγω της αφαίρεσης σημαντικού μέρους των TSS μέσω της μικροκοσκίνισης, που οδηγεί σε καλύτερη ποιότητα υδάτων στην περιοχή, σύμφωνα με τις αρχές των ΣΔΑ.</li> <li>- Μείωση αποτυπώματος αερίων του θερμοκηπίου, χάρη στην μείωση ενεργειακών απαιτήσεων.</li> <li>- Μεγάλο μέρος της ιλύος που θα παραγόταν υπό κανονικές συνθήκες και θα έπρεπε να διατεθεί σε κάποιον ΧΥΤΑ, τώρα μετατρέπεται σε ενέργεια και σε ανόργανο υπόλειμμα - τέφρα, το οποίο έχει σημαντικά μικρότερο όγκο και είναι ευκολότερα διαχειρίσιμο.</li> <li>- Μείωση των ποσών ενέργειας που απαιτούν οι βιολογικές διεργασίες της ΕΕΛ.</li> <li>- Ανάκτηση πράσινης ενέργειας από τα βιοστερεά, με τελικό αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χάρη στην αεριοποίηση του οργανικού άνθρακα.</li> </ul> |
| KYA 80568/4225/1991                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Παρά το ότι η χρήση ιλύος στην γεωργία ρυθμίζεται από την νομοθεσία, τα τελευταία χρόνια υπάρχει τάση προς απαγόρευση της συγκεκριμένης πρακτικής, λόγω κινδύνου υποβάθμισης των εδαφών, σε περιπτώσεις που γίνεται επαναελημμένα και μη ακολουθώντας τον ενδεδειγμένο τρόπο.</li> <li>- Ακολουθώντας αυτή την τάση προς απαγόρευση, το έργο LIFE προτείνει την ολοκληρωμένη διαχείριση της ιλύος εντός της ΕΕΛ με αποτέλεσμα την παραγωγή ενέργειας και ανόργανου υπολείμματος - τέφρας.</li> <li>- Η τέφρα, εφόσον κριθεί κατάλληλη και τηρεί συγκεκριμένες προϋποθέσεις/προδιαγραφές, ενδέχεται να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε γεωργικές εκτάσεις, για την ενίσχυση / λίπανση καλλιεργειών.</li> </ul>   |
| Κανονισμός 741/2020 & KYA 145116/2011 | <p>Η επαναχρησιμοποίηση νερού δεν είναι βασικός στόχος του έργου, όμως παράγει επεξεργασμένο απόβλητο με μικρότερο κόστος λόγω αποφόρτισης του αερισμού, συμβάλλοντας στην ευκολότερη και οικονομικότερη διαδικασία ανάκτησης του νερού.</p>   |
| <b>Ευρωπαϊκή Ένωση</b>                |  |
| Οδηγία 2000/60/EC                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Βελτίωση της ποιότητας υδάτινων συστημάτων με ενίσχυση της απόδοσης του αερισμού.</li> <li>- Αύξηση αποτελεσματικότητας διαχείρισης των λυμάτων.</li> <li>- Μείωση επιπτώσεων λόγω της προτεινόμενης διαχείρισης ιλύος, κατά την οποία το μεγαλύτερο μέρος της ιλύος μετατρέπεται σε ενέργεια και όχι σε στερεά αδρανή απόβλητα (όπως στις συμβατικές ΕΕΛ).</li> </ul>  |
| Οδηγία 91/271/EEC                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Απομάκρυνση φορτίου TSS και BOD μέσω μικροκοσκίνισης πριν την διεργασία του αερισμού, λύνοντας το πρόβλημα μη επαρκούς δευτεροβάθμιας επεξεργασίας των κλασσικών ΕΕΛ.</li> <li>- Μετατροπή του μεγαλύτερου μέρους της επεξεργασμένης ιλύος σε ενέργεια, επιτυγχάνοντας μείωση των ενεργειακών αναγκών και αύξηση της αποδοτικότητας.</li> </ul>   |
| Οδηγία 86/278/EEC                     | <p>Πρόταση ολοκληρωμένης διαχείρισης της ιλύος με τελικά προϊόντα ενέργεια και τέφρα, αποτελώντας μία οικονομικά συμφέρουσα και καινοτόμα λύση στην ολοένα και αυξανόμενη παραγόμενη ποσότητα ιλύος, αλλά και ακολουθώντας την τάση αυστηροποίησης των νομοθεσιών περί επεξεργασίας και διάθεσης της ιλύος στο περιβάλλον.</p>   |
| Οδηγία 1999/31/EC                     | <p>Η υγειονομική ταφή αποβλήτων δεν αποτελεί βασικό αντικείμενο του έργου, όμως συμβάλει στην αποφυγή διάθεσης της ιλύος στους ΧΥΤΑ που ακολουθούν οι συμβατικές ΕΕΛ, καθώς πραγματοποιείται ολοκληρωμένη διαχείριση της ιλύος με ανάκτηση πράσινης ενέργειας από τα βιοστερεά, παράγοντας ανόργανο υπόλειμμα-τέφρα.</p>   |
| Οδηγία 2012/27/EU                     | <p>Το έργο αποτελεί εργαλείο βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης των ΕΕΛ στις οποίες εγκαθίσταται, λόγω αποφόρτισης του αερισμού, ολοκληρωμένης διαχείρισης της ιλύος και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της αεριοποίησης οργανικού άνθρακα που περιέχεται στα βιοστερεά. Έτσι,</p>  |

|                                |   |
|--------------------------------|---|
|                                | ανακτάται πράσινη ενέργεια που μπορεί να χρησιμοποιηθεί εντός της ΕΕΛ, οδηγώντας στην μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων της.  |
| Ευρωπαϊκή Σύμπραξη Καινοτομίας | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Αντιμετώπιση προβλημάτων κλασσικών ΕΕΛ, προτείνοντας καινοτόμες και φιλικές προς το περιβάλλον μεθόδους επεξεργασίας λυμάτων, οδηγώντας στην μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων.</li> <li>- Βελτίωση της ποιότητας εκροών των ΕΕΛ, επομένως και του υδάτινου περιβάλλοντος, λόγω αύξησης απόδοσης της διεργασίας του αερισμού.</li> <li>- Μείωση των επιπτώσεων επεξεργασίας ιλύος (λόγω της μετατροπής της ιλύος κατά το μεγαλύτερο ποσοστό σε ενέργεια) και μείωση αποτυπώματος άνθρακα και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (χάρη στην ανάκτηση ενέργειας από βιοστερεά με χρήση της αεριοποίησης).</li> <li>- Ανάκτηση πράσινης ενέργειας από τα βιοστερεά και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω αεριοποίησης.</li> </ul> |
| Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τυποποίησης | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Συμβολή στην ανανέωση υπαρχόντων προτύπων για τον χαρακτηρισμό της ιλύος (CEN/TC 308), καθώς αναδεικνύεται η παράμετρος της θερμογόνου δύναμης, ως καθοριστική για την περαιτέρω αξιοποίηση της ιλύος.</li> <li>- Παράδειγμα ενεργειακά και περιβαλλοντικά αποδοτικής λύσης σχετικά με την ανάκτηση, ανακύκλωση, επεξεργασία και διάθεση ιλύος (ISO/TC 275) και την μηχανική λυμάτων (CEN/TC 165),</li> <li>- Το έργο δίνει κίνητρο στον νομοθέτη να μεταβεί στην θέσπιση νόμων/προτύπων που να υποχρεώνουν τις ΕΕΛ να διαχειρίζονται με παρόμοιες τεχνικές την ιλύ τους.</li> </ul>   |

Συμπερασματικά, κρίνεται απαραίτητη η εφαρμογή τεχνολογιών ευέλικτων και απλών στην ενσωμάτωσή τους στις υφιστάμενες ΕΕΛ, έτσι ώστε να βελτιωθεί η απόδοσή τους και να μετριαστεί η απόρριψη ρύπων στα υδάτινα σώματα. Το έργο LIFE B2E4sustainable-WWTP προτείνει μία καινοτομική μέθοδο προ-επεξεργασίας λυμάτων και αξιοποίησης των παραγόμενων βιοστερεών, σε βιομηχανική κλίμακα, η οποία δύναται να βελτιώσει την λειτουργία των συμβατικών ΕΕΛ, ακολουθώντας τα θεσπισμένα περιβαλλοντικά πρότυπα και συνεισφέροντας στην επίτευξη των στόχων της Ευρωπαϊκής Σύμπραξης Καινοτομίας, που αφορούν στην αντιμετώπιση των προβλημάτων των παραδοσιακών ΕΕΛ. Ακόμα, η αξιοποίηση του ενεργειακού περιεχομένου των βιοστερεών μπορεί να αποτελέσει λύση για την αποδοτικότερη διαχείριση των λυμάτων στις σύγχρονες ΕΕΛ, αλλά και για την μείωση της ενεργειακής τους κατανάλωσης, στόχοι που είναι ήδη θεσμοθετημένοι στο ισχύον νομικό πλαίσιο. Επιπλέον, το έργο LIFE B2E4sustainable-WWTP συνεισφέρει και στην τυποποίηση μηχανικής λυμάτων της Ε.Ε (έργο Deep Purple), στον τομέα που αφορά στην ποιότητα των υδατικών συστημάτων, καθώς επιτυγχάνεται αποτελεσματικότερη απομάκρυνση των TSS και BOD συγκριτικά με τις κλασσικές ΕΕΛ. Τέλος, συμβάλει στην ανανέωση των υπαρχουσών αλλά και στην θέσπιση νέων νομοθεσιών, καθώς αποτελεί παράδειγμα και θέτει τις βάσεις για τον εκσυγχρονισμό των κλασσικών ΕΕΛ και την αποδοτικότερη διαχείριση λυμάτων. Μάλιστα, η περαιτέρω εφαρμογή της πιλοτικής μονάδας σε διάφορες ΕΕΛ ανά την Ελλάδα και την Ευρώπη, θα δώσει επιπλέον πληροφορίες και δύναται να ενσωματώσει την προτεινόμενη μέθοδο στις ΕΕΛ ενεργού ιλύος, ως λύση αναβάθμισής τους.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. Συμπεράσματα - Προτάσεις

Ακολουθώντας, παρατίθεται μία σύνοψη των σημαντικότερων ευρημάτων - συμπερασμάτων που εξάχθηκαν από τις θεωρητικές και πρακτικές μελέτες που πραγματοποιήθηκαν, καθώς και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Αρχικά, από την μελέτη του ενεργειακού προφίλ των ΕΕΛ της Ελλάδος προσδιορίστηκε μεταξύ άλλων η ενεργειακή κατανομή των βασικών διεργασιών των συμβατικών ΕΕΛ ενεργού ιλύος, από την οποία φάνηκε ότι ο αερισμός είναι ο κύριος καταναλωτής ηλεκτρικής ενέργειας με μέσο ποσοστό 67,2% (0,618 kWh/m<sup>3</sup>). Επίσης, διαπιστώθηκε ότι υπάρχει μεγάλη διακύμανση των ενεργειακών απαιτήσεων ανά μονάδα όγκου εισροής και ανά εξυπηρετούμενο κάτοικο, γεγονός που αναδεικνύει ότι η απόδοση των ΕΕΛ επιδέχεται μεγάλης βελτίωσης αναφορικά με την κατανάλωση ενέργειας. Οι διακύμανση αυτή σε συνδυασμό με την υψηλή ενεργειακή κατανάλωση του αερισμού, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι κρίνεται αναγκαία η ανάπτυξη ενεργειακά αποδοτικών μεθόδων επεξεργασίας αποβλήτων, όπως η προτεινόμενη πιλοτική μονάδα μικροκοσκίνησης - αεριοποίησης.

Σχετικά με τα χαρακτηριστικά εισερχόμενου - εξερχόμενου αποβλήτου και δευτεροβάθμιας ιλύος της ΕΕΛ Ρεθύμνου, τα σημαντικότερα για την λειτουργία της πιλοτικής μονάδας είναι ότι η συγκέντρωση των TSS εισόδου βρέθηκε κατά μέσο όρο  $243 \pm 107$  mg/L, καθώς και ότι η ηλιακά ξηραμένη δευτεροβάθμια ιλύς είναι ένα αρκετά ξηρό υλικό ( $87,01 \pm 0,16$  % στερεά) με σχετικά καλό ενεργειακό περιεχόμενο ( $16,445 \pm 0,719$  MJ/kg θερμογόνο δύναμη).

Όσον αφορά τις διάφορες δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν σχετικά με την μικροκοσκίνηση, οι προκαταρκτικές μετρήσεις στο πειραματικό μικροκόσκινο έδειξαν ότι η απόδοση της μικροκοσκίνησης είναι ικανοποιητική, με ποσοστά απομάκρυνσης  $29,2 \pm 9\%$  για TSS,  $14 \pm 6\%$  για BOD<sub>5</sub>, και  $16,5 \pm 6\%$  για COD. Επιπλέον, από τον προσδιορισμό της κατανομής μεγέθους των σωματιδίων του εισερχόμενου - εξερχόμενου αποβλήτου, εξάχθηκε το συμπέρασμα ότι χαρακτηριστικό της λειτουργίας του μικροκόσκινου δεν είναι απλώς η απομάκρυνση των στερεών σωματιδίων, αλλά η επιλεκτική αφαίρεση των πιο ογκωδών. Η μέση ημερήσια παραγωγή βιοστερεών μετρήθηκε κατά μέσο όρο 276 kg/d (σε ξηρή βάση), ενώ η προσθήκη κροκιδωτικών δεν έδειξε κάποια σημαντική αύξηση στην παραγωγή αυτή. Επίσης, προσδιορίστηκαν τα σχετικότερα με την λειτουργία της πιλοτικής μονάδας χαρακτηριστικά των παραγόμενων μικροκοσκινισμένων βιοστερεών (TS  $32,7 \pm 7,6$  %, VS  $84,5 \pm 1,3$  % των TS, HHV  $21,479 \pm 1,434$  MJ/kg) και πραγματοποιήθηκαν επιτυχώς δοκιμές μπρικετοποίησης. Λαμβάνοντας υπόψη την θερμογόνο δύναμη, φάνηκε ότι τα μικροκοσκινισμένα βιοστερεά έχουν πολύ αξιόλογο ενεργειακό περιεχόμενο και μάλιστα ανώτερο από άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως σαν καύσιμα, γεγονός που τα καθιστά ιδανικά για υλικό τροφοδοσίας θερμικών μεθόδων επεξεργασίας.

Τα σημαντικότερα ευρήματα από τις δοκιμές στο πιλοτικό μικροκόσκινο που ακολούθησαν, είναι ότι η μέση απομάκρυνση στερεών που μπορεί να επιτευχθεί από το μικροκόσκινο είναι περίπου 30% και ότι η ωριαία παραγωγή βιοστερεών σε ξηρή βάση είναι κατά μέσο όρο 7,7 kg/h (με φίλτρο ιμάντα ανοίγματος πόρων 350 μm, εισερχόμενη παροχή λυμάτων 200 m<sup>3</sup>/h, χωρίς την προσθήκη κροκιδωτικών μέσων και με την χρήση του συστήματος ανακυκλοφορίας του νερού πλύσης και των στραγγισμάτων). Επίσης, τα TS βρέθηκαν  $36 \pm 2$  % και τα VS  $89,6 \pm 0,69$  % των TS, επομένως υπάρχει υψηλό ποσοστό των οργανικών στερεών, που δείχνει ότι είναι κατάλληλα για περαιτέρω ενεργειακή αξιοποίηση. Γενικότερα, από τις πιλοτικές δοκιμές μικροκοσκίνησης έγιναν οι εξής σημαντικές διαπιστώσεις: (i) η προσθήκη κροκιδωτικών δεν προκάλεσε την αναμενόμενη αύξηση στην απόδοσή απομάκρυνσης στερεών, (ii) παρά την χρήση συστήματος ανακυκλοφορίας με σκοπό την ανάκτηση χαμένων στερεών και πάλι η θεωρητική παραγωγή βιοστερεών υπολογίστηκε αρκετά υψηλότερη από την πραγματική, γεγονός που δείχνει ότι το παρόν σύστημα επιδέχεται περαιτέρω βελτίωσης, και (iii) το εισερχόμενο απόβλητο χαρακτηρίζεται από μεγάλη ποικιλομορφία ως προς την σύστασή του (μεγάλη διακύμανση TSS, ύπαρξη στερεών λόγω μη επαρκούς προ-επεξεργασίας που προκαλούν λειτουργικά προβλήματα).

Κλείνοντας με τις δοκιμές μικροκοσκίνισης, πραγματοποιήθηκαν συγκριτικές μελέτες με την πρωτοβάθμια ιλύ καθώς και την τεχνολογία της λεπτοκοσκίνισης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η βασική διαφορά μεταξύ μικροκοσκινισμένων βιοστερεών και πρωτοβάθμιας ιλύος είναι το σημαντικά μεγαλύτερο ποσοστό TS που χαρακτηρίζει τα μικροκοσκινισμένα βιοστερεά, ενώ οι λοιπές παράμετροι που μετρήθηκαν είναι παρόμοιες (VS, VS/TS, pH, C/N). Σχετικά με την τεχνολογία της λεπτοκοσκίνισης, τα μικροκοσκινισμένα και λεπτοκοσκινισμένα βιοστερεά έχουν παρεμφερή χαρακτηριστικά, με τα μικροκοσκινισμένα να έχουν λίγο καλύτερες τιμές σε όλες τις εξεταζόμενες παραμέτρους (TS, VS, HHV).

Όσον αφορά τα ισοζύγια μάζας και θερμικής ενέργειας της πιλοτικής μονάδας, από τους υπολογισμούς φάνηκε ότι η θερμική ενέργεια είναι οριακά μη επαρκής για την κάλυψη αναγκών του συστήματος ξήρανσης (καθαρή θερμική ενέργεια -0,9 kWh), γι' αυτό και έγινε προσπάθεια να αυξηθεί όσο το δυνατόν περισσότερο η απόδοση του λοιπού συστήματος, στοχεύοντας σε μία θετική διεργασία από άποψη θερμικής ενέργειας. Βέβαια, μικρές αλλαγές σε μεταβλητές παραμέτρους που επηρεάζουν το αποτέλεσμα του ισοζυγίου (συγκέντρωση TSS εισροής, περιεχόμενη υγρασία μικροκοσκινισμένων βιοστερεών, επιθυμητή περιεχόμενη υγρασία βιοστερεών για αεριοποίηση, HHV βιοστερεών, απόδοση αεριοποιητή και MEK, εκτιμώμενες απώλειες λόγω μεταφοράς θερμότητας) μπορούν να οδηγήσουν σε θετικό αποτέλεσμα.

Ως προς την ηλεκτρική ενέργεια, το ισοζύγιο για την πιλοτική μονάδα όπως είναι εγκατεστημένη στην ΕΕΛ Ρεθύμνου προέκυψε αρνητικό (-63,03 kWh), γι' αυτό και προτάθηκαν οι εξής εναλλακτικές: χρήση μείγματος μικροκοσκινισμένων βιοστερεών και ηλιακά ξηραμένης δευτεροβάθμιας ιλύος ως υλικό τροφοδοσίας, που έδωσε θετικό αποτέλεσμα (134,03 kWh) ή χρήση ξηραντηρίου διαφορετικού τύπου (κενού ή ηλιακό με χρήση των θερμών απαερίων από την μονάδα αεριοποίησης) με χαμηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις.

Για τον υπολογισμό του κρίσιμου μεγέθους πάνω από το οποίο προκύπτει ένα πλήρως αυτόνομο ενεργειακά σύστημα, έγιναν εκ νέου οι υπολογισμοί των ισοζυγίων (υιοθετώντας βελτιωμένη διάταξη στον χώρο που μπορεί να γίνει σε μελλοντικές εγκαταστάσεις) για διάφορες δυναμικότητες (5.000, 10.000 και 25.000 m<sup>3</sup>/d) και διάφορους συνδυασμούς υλικών τροφοδοσίας (μικροκοσκινισμένα βιοστερεά, μείγμα μικροκοσκινισμένων βιοστερεών και ηλιακά ξηραμένης δευτεροβάθμιας ιλύος και μείγμα μικροκοσκινισμένων βιοστερεών και αφυδατωμένης δευτεροβάθμιας ιλύος). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι υπάρχει όντως η λεγόμενη «οικονομία κλίμακος», δηλαδή η αύξηση της δυναμικότητας αντισταθμίζει το έλλειμμα ενέργειας, καθώς για πολλαπλάσιες δυναμικότητες, ναι μεν πολλαπλασιάζεται αναλόγως η παραγόμενη ενέργεια, όμως δεν ισχύει το ίδιο για την καταναλισκόμενη, η οποία για ορισμένα στοιχεία της πιλοτικής μονάδας παραμένει σταθερή ή πολλαπλασιάζεται με μικρότερο συντελεστή.

Στα πλαίσια μελέτης της πιλοτικής μονάδας, προσδιορίστηκαν οι εισροές και οι εκροές, ενώ προτάθηκαν και τρόποι διαχείρισης τους σύμφωνα με το ισχύον νομικό πλαίσιο. Ως εισροή θεωρούνται τα πρωτοβάθμια αστικά υγρά απόβλητα (με προσθήκη μικρής ποσότητας βιομηχανικών υγρών αποβλήτων), ενώ οι εκροές είναι οι εξής: (i) τα καυσαέρια της MEK μαζί με το εξατμισμένο νερό από το ξηραντήριο (προτάθηκε χρήση φίλτρου ενεργού άνθρακα για απορρόφηση τυχόν δυσάρεστων οσμών), (iii) το στερεό υπόλειμμα (τέφρα) από τον αεριοποιητή (προτάθηκε η ανάλυσή του, από τα αποτελέσματα της οποίας αν καταταχθεί στα επικίνδυνα απόβλητα θα διαχειριστεί αρμοδίως από ειδική εταιρία διαχείρισης, ενώ αν κριθεί ως μη επικίνδυνο θα αναμειχθεί με την δευτεροβάθμια ιλύ της ΕΕΛ), και (iii) η εκροή της πλυντηρίδας καθαρισμού του αερίου σύνθεσης (θεωρήθηκε βιομηχανικό απόβλητο και προτάθηκε επεξεργασία εντός της ΕΕΛ Ρεθύμνου, μαζί με τα λοιπά εισερχόμενα υγρά απόβλητα).

Για την εκτίμηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της πιλοτικής μονάδας, αξιολογήθηκαν οι επιπτώσεις του έργου στα υφιστάμενα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος και προτάθηκε τρόπος αντιμετώπισής τους, καθώς και κατάλληλη περιβαλλοντική διαχείριση και παρακολούθηση.

Προκειμένου να διερευνηθεί διεξοδικότερα η δυνατότητα αξιοποίησης των βιοστερεών, πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση του ενεργειακού περιεχομένου τους, με τον προσδιορισμό της θερμογόνου δύναμης διαφόρων ειδών ιλύος από τις μεγαλύτερες ΕΕΛ της Κρήτης. Τα πειραματικά αποτελέσματα σε συνδυασμό με βιβλιογραφική έρευνα, έδειξαν ότι η τιμή της θερμογόνου δύναμης είναι αξιόλογη, παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις και μεταβάλλεται ανάλογα με τα στάδια επεξεργασίας από τα οποία έχει περάσει, με την πρωτοβάθμια να έχει την υψηλότερη τιμή και να ακολουθούν κατά σειρά η ομογενοποιημένη, η δευτεροβάθμια, και η χωνεμένη.

Για την γενικότερη διερεύνηση ως προς το κατά πόσο είναι ικανή η προτεινόμενη μέθοδος προ-επεξεργασίας λυμάτων και αξιοποίησης των παραγόμενων βιοστερεών να αποτελέσει λύση στις παθογένειες των σύγχρονων συμβατικών ΕΕΛ πραγματοποιήθηκε ΑΚΖ, με εστίαση στην δυνατότητα μείωσης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος και του λειτουργικού κόστους των ΕΕΛ, κυρίως αναφορικά με την υψηλή κατανάλωση ενέργειας και την αναποτελεσματική διαχείριση ιλύος. Μελετήθηκαν οι πιο σχετικές με το αντικείμενο κατηγορίες επιπτώσεων (κλιματική αλλαγή, οικοτοξικότητα γλυκού νερού, ευτροφισμός γλυκού νερού, ανθρώπινη τοξικότητα - σχετική και μη με καρκίνο, χρήση ορυκτών πόρων) και τα αποτελέσματα οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου προκαλεί περιβαλλοντική βελτίωση σε όλες τις κατηγορίες συγκριτικά με τις μεθόδους που εφαρμόζονται ευρέως στις συμβατικές ΕΕΛ. Μάλιστα, η μεγαλύτερη διαφορά παρατηρήθηκε στις κατηγορίες ανθρώπινης τοξικότητας (99 % χαμηλότερη επίπτωση), ενώ στις υπόλοιπες κατηγορίες η μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κυμάνθηκε μεταξύ 19 και 48 %.

Τέλος, εκτιμήθηκε η συνεισφορά της πιλοτικής μονάδας στην διαμόρφωση του νομικού πλαισίου για την διαχείριση αστικών υγρών αποβλήτων, αφού πρώτα καταγράφηκαν οι ισχύουσες σχετικές νομοθεσίες / οδηγίες / κανονισμοί στην Ελλάδα και στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Το συμπέρασμα της μελέτης αυτής ήταν ότι η προτεινόμενη μέθοδος συνάδει με το ισχύον νομικό πλαίσιο, ενώ η εφαρμογή της συνεισφέρει στην επίτευξη των στόχων που τίθενται από τις νομοθεσίες αλλά και στην θέσπιση περαιτέρω κανονισμών σχετικά με την διαχείριση λυμάτων και βιοστερεών με γνώμονα την κυκλική οικονομία, με χαμηλές περιβαλλοντικές επιπτώσεις και υψηλή ενεργειακή απόδοση.

Κλείνοντας την παρούσα διδακτορική διατριβή, προτείνεται η διεξαγωγή περαιτέρω δοκιμών στην μονάδα αεριοποίησης - παραγωγής ενέργειας αλλά και σε όλη την πιλοτική μονάδα συνολικά, ώστε να συλλεχθούν περισσότερα δεδομένα, να εξαχθούν πιο αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα και να προκύψουν ασφαλέστερα συμπεράσματα σχετικά με την αποτελεσματικότητά της. Ακόμη, για να αξιολογηθούν σφαιρικότερα οι τεχνολογίες της μικροκοσκίνισης και της αεριοποίησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν ήδη υπάρχοντα ή να αναπτυχθούν νέα μοντέλα, τα οποία θα περιλαμβάνουν όλες τις καθοριστικές παραμέτρους λειτουργίας και θα παρέχουν την δυνατότητα διεξαγωγής υπολογισμών και προβλέψεων σχετικά με την εφαρμογή των τεχνολογιών αυτών, τόσο ανεξάρτητα όσο και συνδυαστικά μεταξύ τους. Τέλος, θα ήταν ενδιαφέρουσα η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου προ-επεξεργασίας λυμάτων και αξιοποίησης των παραγόμενων βιοστερεών σε άλλες ΕΕΛ ενεργού ιλύος, με τις τροποποιήσεις που έχουν ήδη προταθεί, ώστε να διαπιστωθεί κατά πόσο αυτές οι αλλαγές θα επιφέρουν όντως βελτίωση στην ενεργειακή αποδοτικότητα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. Βιβλιογραφία

### 9.1 Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

- Abbas, A.H., Ibrahim, A.B.A., Nor, M.F.M. and Aris, M.S., 2011. Characterization of Malaysian domestic sewage sludge for conversion into fuels for energy recovery plants, *National Postgraduate Conference*, 19-20 September, Perak, Malaysia.
- Abu El-Rub, Z., Bramer, E.A. and Brem, G., 2004. Review of Catalysts for Tar Elimination in Biomass Gasification Processes. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 43, 6911-6919.
- Adar, E., Ince, M., Bilgili, M.S., 2019. Characteristics of Liquid Products in Supercritical Water Gasification of Municipal Sewage Sludge by Continuous Flow Tubular Reactor. *Waste Biomass Valorization*, 11, 6321-6335.
- Adar, E., Ince, M. and Bilgili, M.S., 2020. Supercritical water gasification of sewage sludge by continuous flow tubular reactor: A pilot scale study. *Chem. Eng. J.*, 391, 123499.
- Adar, E., Karatop, B., Ince, M. and Bilgili, M.S., 2016. Comparison of methods for sustainable energy management with sewage sludge in Turkey based on SWOT-FAHP analysis. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 62, 429-440.
- Akmehmet Balcioglu, I., Bilgin Oncu, N. and Mercan, N., 2017. Beneficial effects of treating waste secondary sludge with thermally activated persulfate. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 92, 1192-1202.
- Alattabi, W., 2017. An investigation into the effect of MLSS on the effluent quality and sludge settleability in an aerobic-anoxic sequencing batch reactor (AASBR). *J. Water Process Eng.*, 30, 100479.
- Ali, M. and Okabe, S., 2015. Anammox-based technologies for nitrogen removal: advances in process start-up and remaining issues. *Chemosphere*, 141, 144-153.
- APHA, 2017. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 23<sup>rd</sup> ed.; American Public Health Association: Washington DC, USA.
- Appels, L., Baeyens, J., Degreè, J. and Dewil, R., 2008. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 34, 755-781.
- Arjhar, W., Hinsui, T., Liplap, P. and Raghavan, G.S.V., 2013. Evaluation of an energy production system from sewage sludge using a pilot-scale downdraft gasifier. *Energy Fuel.*, 27, 229-236.
- Arnold, M.E. and Merta, E.S., 2011. Towards energy self-sufficiency in wastewater treatment by optimized sludge treatment. *Water Pract. Technol.*, 6.
- Awe, O.W., Liu R. and Zhao, Y., 2016. Analysis of Energy Consumption and Saving in Wastewater Treatment Plant: Case Study from Ireland. *J. Water Sustain.*, 6, 63-76.
- Babel, S. and Del Mundo Dacera, D., 2006. Heavy metal removal from contaminated sludge for land application: a review. *Waste Manag.*, 26, 988-1004.
- Barber W., 2014. Influence of sludge production and processing on power demand of wastewater treatment, *Asia Water*, May-June, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Basu, P., 2010. *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory*, 1<sup>st</sup> ed.; Academic Press: Cambridge, Massachusetts, USA.

- Beenackers, A.A.C.M., 1999. Biomass gasification in moving beds, a review of European technologies. *Renew Energy*, 16, 1180-1186.
- Behera, C., Santoro, D., Gernaey, K., and Sin, G., 2018. Organic carbon recovery modeling for a rotating belt filter and its impact assessment on a plant-wide scale. *Chem. Eng. J.*, 334, 1965-1976.
- Bermudez, J.M. and Fidalgo, B., 2016. Production of bio-syngas and bio-hydrogen via gasification. In: *Handbook of Biofuels Production*, 2<sup>nd</sup> ed.; 431-494, Woodhead Publishing: Sawston, Cambridge, UK.
- Bodzek, D., Janoszka, B., Dobosz, C., Warzecha, L. and Bodzek, M., 1997. Determination of polycyclic aromatic compounds and heavy metals in sludges from biological sewage treatment plants. *J. Chromatogr. A.*, 774, 177-192.
- Bourgeois, K., Riess, J., Tchobanoglous, G. and Darby, J., 2003. Performance Evaluation of a Cloth-Media Disk Filter for Wastewater Reclamation. *Water Environ. Res.*, 75, 532-538.
- Brandt, M.J., Johnson, M., Elphinston, A.J. and Ratnayaka, D.D., 2017. Energy Use, Sustainability and Waste Treatment. In: *Twort's Water Supply*, 7<sup>th</sup> ed; 553-580, Butterworth-Heinemann: Oxford, UK.
- Bridgwater, A.V., Meier, D. and Radlein, D., 1999. An overview of fast pyrolysis of biomass. *Org. Geochem.*, 30, 1479-1493.
- Buragohain, B., Mahanta, P. and Moholkar, V.S., 2010. Thermodynamic optimization of biomass gasification for decentralized power generation and Fischer-Tropsch synthesis. *Energy*, 35, 2557-2579.
- Burbano, H.J., Pareja, J. and Amell, A.A., 2011. Laminar burning velocities and flame stability analysis of H<sub>2</sub>/CO/air mixtures with dilution of N<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>. *Int. J. Hydrogen Energy*, 36, 3232-3242.
- Calvo, L.F., García, A.I., Otero, M., 2013. An experimental investigation of sewage sludge gasification in a fluidized bed reactor. *Sci. World J.*, 2013, 479403.
- Cantinho, P., Matos, M., Trancoso, M.A. and dos Santos, M.M.C., 2016. Behaviour and fate of metals in urban wastewater treatment plants: a review. *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 13, 359-386.
- Cao, Y. and Pawłowski, A., 2012. Sewage sludge-to-energy approaches based on anaerobic digestion and pyrolysis: Brief overview and energy efficiency assessment. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 16, 1657-1665.
- Cao, Y. S., 2011. *Mass Flow and Energy Efficiency of Municipal Wastewater Treatment Plants*. IWA Publishing: London, UK.
- Carl, E. and Adams, J., 1997. Wastewater Treatment. In: *Environmental Engineers' Handbook*, 2<sup>nd</sup> ed.; 517-923, CRC Press: Boca Raton.
- Carles, P., Petter, O., and Pille, K., 2015. *www.powerstep.eu*. Horizon 2020 Framework Programme: Westewitz, Sjölanda.
- Celebi, E-B., Aksoy, A. and Sanin, F-D., 2021. Maximizing the energy potential of urban sludge treatment: An experimental study and a scenario-based energy analysis focusing on anaerobic digestion with ultrasound pretreatment and sludge combustion. *Energy*, 221, 119876.



- Cengel, Y. and Boles, M., 2014. *Thermodynamics: An Engineering Approach*, 8<sup>th</sup> ed.; McGraw Hill Education: Singapore.
- Chacartegui, R., Sánchez, D., de Escalona, J.M.M., Monje, B. and Sánchez, T., 2012. On the effects of running existing combined cycle power plants on syngas fuel. *Fuel Process. Technol.*, 103, 97-109.
- Chan, C., Guisasola, A. and Baeza, J.A., 2017. Enhanced biological phosphorus removal at low sludge retention time in view of its integration in A-stage systems, *Water Res.*, 118, 217-226.
- Chen, S. and Cheng, Y., 2019. Effects of sulfur dosage and inoculum size on pilot-scale thermophilic bioleaching of heavy metals from sewage sludge. *Chemosphere*, 234, 346-355.
- Chen, S., Sun, Z., Zhang, Q., Hu, J. and Xiang, W., 2017. Steam gasification of sewage sludge with CaO as CO<sub>2</sub> sorbent for hydrogen-rich syngas production. *Biomass Bioenergy*, 107, 52-62.
- Chen, Y., Yi, L., Wei, W., Jin, H., Guo, L., 2022a. Hydrogen production by sewage sludge gasification in supercritical water with high heating rate batch reactor. *Energy*, 238, 121740.
- Chen, Y., Yi, L., Yin, J., Jin, H., Guo, L., 2022b. Sewage sludge gasification in supercritical water with fluidized bed reactor: Reaction and product characteristics. *Energy*, 239, 122115.
- Choi, Y.K., Ko, J.H., Kim, J.S., 2017. A new type three-stage gasification of dried sewage sludge: Effects of equivalence ratio, weight ratio of activated carbon to feed, and feed rate on gas composition and tar, NH<sub>3</sub>, and H<sub>2</sub>S removal and results of approximately 5 h gasification. *Energy*, 118, 139-146.
- Choi, Y.K., Ko, J.H. and Kim, J.S., 2018. Gasification of dried sewage sludge using an innovative three-stage gasifier: Clean and H<sub>2</sub>-rich gas production using condensers as the only secondary tar removal apparatus. *Fuel*, 216, 810-817.
- Chollom, M., 2014. *Treatment and reuse of reactive dye effluent from textile industry using membrane technology*, Master Thesis; Durban University of Technology: Durban.
- Christodoulou, A. and Stamatelatou, K., 2016. Overview of legislation on sewage sludge management in developed countries worldwide. *Water Sci. Technol.*, 73, 453-462.
- Conidi, C., Castro-Muñoz, R. and Cassano, A., 2020. Membrane-Based Operations in the Fruit Juice Processing Industry: A Review. *Beverages*, 6, 18.
- Courson, C. and Gallucci, K., 2019. Gas cleaning for waste applications (syngas cleaning for catalytic synthetic natural gas synthesis). In: *Substitute Natural Gas from Waste*, 161-220, Academic Press: Cambridge, Massachusetts, USA.
- Daw, J., Hallett, K., DeWolfe, J. and Venner, I., 2012. *Energy Efficiency Strategies for Municipal Wastewater Treatment Facilities*, Technical Report; National Renewable Energy Laboratory: Golden, CO, USA.
- de Andrés, J.M., Narros, A. and Rodríguez, M.E., 2011a. Air-steam gasification of sewage sludge in a bubbling bed reactor: Effect of alumina as a primary catalyst. *Fuel Process. Technol.*, 92, 433-440.
- de Andrés, J.M., Narros, A. and Rodríguez, M.E., 2011b. Behaviour of dolomite, olivine and alumina as primary catalysts in air-steam gasification of sewage sludge. *Fuel*, 90, 521-527.

- Demirbas, A., 2001. Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Energy Convers. Manag.*, 42, 1357-1378.
- Doherty, W., Reynolds, A. and Kennedy, D., 2015. Process simulation of biomass gasification integrated with a solid oxide fuel cell stack. *J. Power Sources*, 277, 292-303.
- Dou, B., Chen, B., Gao, J. and Sha, X., 2006. HCl Removal and Chlorine Distribution in the Mass Transfer Zone of a Fixed-Bed Reactor at High Temperature. *Energy Fuels*, 20, 959-963.
- Edwards, J., Othman, M., Crossin, E. and Burn, S., 2017. Anaerobic co-digestion of municipal food waste and sewage sludge: A comparative life cycle assessment in the context of a waste service provision. *Bioresour. Technol.*, 223, 237-249.
- Energy Solutions, 2009. *Energy Efficiency and GHG Reduction in Wastewater Facilities*, EPA: Washington, DC, USA.
- ENOX Sp. z o.o., 2023. <https://enox.tech/en/sludge-drying/>.
- Eyvaz, M. and Yüksel, E., 2018. *Desalination and Water Treatment*, 1<sup>st</sup> ed.; Intechopen: London, UK.
- Farazaki, M. and Gikas, P., 2019. Nitrification-Denitrification of Municipal Wastewater without Recirculation, Using Encapsulated Microorganisms, *J. Environ. Manage.*, 242, 258-265.
- Fernández-Gutiérrez, D., Manali, A., Tsamoutsoglou, K., Gikas, P. and Lara-Guillén, A., 2023. Environmental life cycle assessment of an integrated biosolids microsieving-drying-gasification pilot plant. *Green Energy Sustain.*
- Fontmorin, J.M., and Sillanpaa, M., 2017. Dewatering and removal of metals from urban anaerobically digested sludge by Fenton's oxidation. *Environ. Technol.*, 38, 495-505.
- Franchi, A. and Santoro, D., 2015. Current status of the rotating belt filtration (RBF) technology for municipal wastewater treatment. *Water Pract. Technol.*, 10, 319-327.
- Franchi, A., Stedman, K. and Gikas, P., 2012. Enhanced primary solids removal from municipal wastewater by two steps filtration, *IWA Regional Conference on Wastewater Purification & Reuse*, 28-30 March, Heraklion, Greece.
- Fredlund, D., Rahardjo, H. and Fredlund, M., 2012. *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*, 1<sup>st</sup> ed.; John Wiley & Sons, Inc: Hoboken, New Jersey, USA.
- Fu, R., Wen, D., Xia, X., Zhang, W. and Gu, Y., 2017. Electrokinetic remediation of chromium (Cr)-contaminated soil with citric acid (CA) and polyaspartic acid (PASP) as electrolytes. *Chem. Eng. J.*, 316, 601-608.
- Fytili, D. and Zabaniotou, A., 2008. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods-A review. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 12, 116-140.
- Gabbar, H.A., Lisi, D., Aboughaly, M., Damideh, V. and Hassen, I., 2020. Modeling of a plasma-based waste gasification system for solid waste generated onboard of typical cruiser vessels used as a feedstock. *Designs*, 4, 1-19.
- Gandiglio, M., Lanzini, A., Soto A., Leone, P. and Santarelli, M., 2017. Enhancing the energy efficiency of wastewater treatment plants through co-digestion and fuel cell systems, *Front. Environ. Sci.*, 5, 70.

- Gao, J., Luo, Q., Zhu, J., Zhang, C. and Li, B., 2013. Effects of electrokinetic treatment of contaminated sludge on migration and transformation of Cd, Ni and Zn in various bonding states. *Chemosphere*, 93, 2869-2876.
- Garrido-Baserba, M., Molinos-Senante, M., Abelleira-Pereira, J.M., Fdez-Güelfo, L.A., Poch, M. and Hernández-Sancho, F., 2015. Selecting sewage sludge treatment alternatives in modern wastewater treatment plants using environmental decision support systems. *J. Clean. Prod.*, 107, 410-419.
- Gautam, G., Sushil, A., Suchithra, T.-G., Brodbeck, C., Sushil, B. and Taylor, S., 2011. Tar analysis in syngas derived from pelletized biomass in a commercial stratified downdraft gasifier. *Bio Resources*, 6, 4652-4661.
- Geng, H., Xu, Y., Zheng, L., Gong, H., Dai, L. and Dai, X., 2020. An overview of removing heavy metals from sewage sludge: Achievements and perspectives, *Environ. Pollut.*, 266, 115375.
- Gheju, M., Pode, R. and Manea, F., 2011. Comparative heavy metal chemical extraction from anaerobically digested biosolids. *Hydrometallurgy*, 108, 115-121.
- Gikas, P., 2017a. Towards energy positive wastewater treatment plants. *J. Environ. Manage.*, 203, 621-629.
- Gikas, P., 2017b. Ultra-high temperature gasification of municipal wastewater primary biosolids in a rotary kiln reactor for the production of synthesis gas. *J. Environ. Manage.*, 203, 688-694.
- Gil-Lalaguna, N., Sánchez, J.L., Murillo, M.B., Atienza-Martínez, M. and Gea, G., 2014. Energetic assessment of air-steam gasification of sewage sludge and of the integration of sewage sludge pyrolysis and air-steam gasification of char. *Energy*, 76, 652-662.
- Gokal, J., 2017. *Determining the efficiency of the ANAMMOX process for the treatment of high-ammonia influent wastewater*, Master Thesis; Faculty of Applied Sciences at the Durban University of Technology: Durban.
- Grabbe, U., Seyfried, C. and Rosenwinkel, K., 1998. Upgrading of wastewater treatment plants by cloth-filtration using an improved type of filter-cloth. *Water Sci. Technol.*, 37, 143-150.
- Grabowski, Z. and Oleszkiewicz, J.A., 1998. Combustion of Sewage Sludge, *Basics and Prevention of Sludge Processing and Management, International Training Seminar*, 11-12 May, Krakow.
- GSSB (Gateway Structure Sdn Bhd), 2023. <https://gssb.com.my/geotextile-dewatering-bags-used-for-desludging-wastewater-ponds>.
- Gu, T., Rastegar, S.O., Mousavi, S.M., Li, M. and Zhou, M., 2018. Advances in bioleaching for recovery of metals and bioremediation of fuel ash and sewage sludge. *Bioresour. Technol.*, 261, 428-440.
- Gu, X.Y., Wong, J.W.C. and Tyagi, R.D., 2017. Bioleaching of heavy metals from sewage sludge for land application. *In: Current Developments in Biotechnology and Bioengineering, Solid Waste Management*, 241-265, Elsevier: Amsterdam.
- Gu, Y., Li, Y., Li, X., Luo, P., Wang, H., Wang, X. and Li, F., 2017. Energy self-sufficient wastewater treatment plants: feasibilities and challenges. *Energy Procedia*, 105, 3741-3751.
- Guimet, V., Kelly, R., Doung, F., Rosina, M., Audic, M. and Terry, M., 2010. Green energy resource: Research and learning experiences from wastewater treatment plants, *IWA WorldWater Congress*, 19-24 September, Montreal, QC, Canada.

- Guinée, J. and Lindeijer, E., 2002. *Handbook on life cycle assessment: operational guide to the ISO standards*, 1<sup>st</sup> ed.; Springer Science & Business Media: Dordrecht.
- Gupta, M., 2018. *Microsieving as a primary treatment for biological nitrogen removal from municipal wastewater*, Doctoral Thesis; The University of Western Ontario: Ontario.
- Hall, J., 1999. Ecological and Economical Balance for Sludge Management Options, *Workshop on Problems around Sludge*, International Water Association, 18-19 November, Stresa, Italy.
- Harrison, E.Z., Oakes, S.R., Hysell, M. and Hay, A., 2006. Organic chemicals in sewage sludges. *Sci. Total Environ.*, 367, 481-497.
- Heidenreich, S. and Foscolo, P.U., 2015. New concepts in biomass gasification. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 46, 72-95.
- Hernández-Sancho, F., Molinos-Senante, M. and Sala-Garrido, R., 2011. Energy efficiency in Spanish wastewater treatment plants: A non-radial DEA approach. *Sci. Total Environ.*, 409, 2693-2699.
- Hirohata, O., Wakabayashi, T., Tasaka, K., Fushimi, C., Furusawa, T., Kuchonthara, P. and Tsutsumi, A., 2008. Release behavior of alkali and alkaline earth metals during biomass steam gasification. *Energy Fuels*, 22, 4235-4239.
- Huang, H.J., Yuan, X.Z., 2016. The migration and transformation behaviors of heavy metals during the hydrothermal treatment of sewage sludge. *Bioresour. Technol.*, 200, 991-998.
- Huang, Y-F., Chiueh, P-T. and Lo, S-L., 2021. Energy recovery from sewage sludge: Product characteristics, heating value prediction and relation kinetics, *Chemosphere*, 268, 128783.
- ISO, 1997. *ISO 14040: Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and Framework*. International Standards Organization: Geneva.
- Kacprzak, M., Neczaj, E., Fijałkowski, K., Grobelak, A., Grosser, A., Worwag, M., Rorat, A., Brattebo, H., Almås, Å. and Singh, B.R., 2017. Sewage sludge disposal strategies for sustainable development. *Environ. Res.*, 156, 39-46.
- Kelessidis, A. and Stasinakis, A.S., 2012. Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries. *Waste Manage.*, 32, 1186-1195.
- Khan, M.A., Naqvi, S.R., Taqvi, S.A.A., Shahbaz, M., Ali, I., Mehran, M.T., Khoja, A.H. and Juchelková, D., 2021. Air gasification of high-ash sewage sludge for hydrogen production: Experimental, sensitivity and predictive analysis. *Int. J. Hydrogen Energy*, 47, 37374-37384.
- Kim Y-J., Kang H-O. and Qureshi, T., 2005. Heating value characteristics of sewage sludge: A comparative study of different sludge types, *J. Chem. Soc. Pak.*, 27, 124-129.
- Kishore, V.V.N., 2009. *Renewable energy engineering and technology: a knowledge compendium*. The Energy and Resources Institute: New Delhi, India.
- Koliopoulos, G. and Gikas, P., 2013. Fine Mesh Sieving of Raw Municipal Wastewater for TSS and COD removal, *13<sup>th</sup> International Conference on Environmental Science and Technology*, 5-7 September, Athens, Greece.
- Koros, W., Ma, Y. and Shimidzu, T., 1996. Terminology for membranes and membrane processes (IUPAC Recommendations 1996). *Pure Appl. Chem.*, 68, 1479-1489.
- Kosstrin, H.M., 2017. Wet scrubbing and gas filtration of syngas in IGCC systems. *In: Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) Technologies*, 375-383, Elsevier: Amsterdam.

- Kowalik, P., 1998. Energy Production from Sewage Sludge in Wastewater Treatment Plants in Swarzewo, *VII Conference: Wastewater Sludge in Practice*, Bienia, Czestochowa.
- Kreith, F. and Krumdieck, S., 2014. *Principles of sustainable energy systems*, 1<sup>st</sup> ed.; CRC Press: Boca Raton.
- Lee, I.H., Kuan, Y. and Chern, J., 2006. Factorial experimental design for recovering heavy metals from sludge with ion-exchange resin. *J. Hazard Mater.*, 138, 549-559.
- Lema, J. and Martinez, S., 2017. *Innovative wastewater treatment & resource recovery technologies: impacts on energy, economy and environment*, 1<sup>st</sup> ed.; IWA publishing: London.
- Lewis, D.L. and Gattie, D.K., 2002. Pathogen Risks From Applying Sewage Sludge to Land. *Environ. Sci. Technol.*, 36, 286-293.
- Lin, F., Liu, D., Maiti Das, S., Prempeh, N., Hua, Y. and Lu, J., 2014. Recent progress in heavy metal extraction by supercritical CO<sub>2</sub> fluids. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 53, 1866-1877.
- Liu, Y., Zhu, H., Zhang, M., Chen, R., Chen, X., Zheng, X. and Jin, Y., 2018. Cr(VI) recovery from chromite ore processing residual using an enhanced electrokinetic process by bipolar membranes. *J. Membr. Sci.*, 566, 190-196.
- Longo, S., d'Antoni, B., Bongards, M., Chaparro, A., Cronrath, A., Fatone, F. and Hospido, A., 2016. Monitoring and diagnosis of energy consumption in wastewater treatment plants. A state of the art and proposals for improvement. *Appl. Energy*, 179, 1251-1268.
- Luque, R., de La Osa, A.R., Campelo, J.M., Romero, A.A., Valverde, J.L. and Sanchez, P., 2012. Design and development of catalysts for Biomass-To-Liquid-Fischer-Tropsch (BTL-FT) processes for biofuels production. *Energy Environ. Sci.*, 5, 5186-5202.
- Lv, P., Yuan, Z., Wu, C., Ma, L., Chen, Y. and Tsubaki, N., 2007. Bio-syngas production from biomass catalytic gasification. *Energy Convers. Manag.*, 48, 1132-1139.
- Mamais, D., Noutsopoulos, C., Dimopoulou, A., Stasinakis, A. and Lekkas, T., 2015. Wastewater treatment process impact on energy savings and greenhouse gas emissions. *Water Sci. Technol.*, 71, 303-308.
- Manali, A. and Gikas, P., 2019a. Thermal and electric energy production using primary sieved solids from municipal wastewater, as gasification feedstock, *5<sup>th</sup> distance education e-learning International Summer School and Workshop on "Wastewater and Biosolids Management" (WWSS19)*, 22-27 July, Patras, Greece.
- Manali, A. and Gikas, P., 2019b, Utilization Of Primary Sieved Solids For Gasification And Energy Production, *17<sup>th</sup> International Waste Management and Landfill Symposium*, 30 September-4 October, Cagliari, Sardinia.
- Manali, A. and Gikas, P., 2022. Energy production from microsieved solids at the wastewater treatment plant of Rethymno, Greece, through the gasification process, *2<sup>nd</sup> International Conference on Pollution Prevention and Clean Technologies (ICPPCT)*, 1-2 December, Warsaw, Poland.
- Manali, A., Mavrakis, N. and Gikas, P., 2020. Environmental Impact Assessment for a biosolids gasification pilot plant in Rethymno, Greece, *6<sup>th</sup> International Symposium on Green Chemistry, Development and Circular Economy*, 20-23 September, Thessaloniki, Greece.
- Manali, A., Mavrakis, N. and Gikas, P., 2021. Environmental Impact Assessment for an integrated microsieving-drying-gasification pilot plant for biosolids to electric energy in Rethymno,



Greece, 8<sup>th</sup> *International Conference on Sustainable Solid Waste Management*, 23-25 June, Thessaloniki, Greece.

Manali, A., Kampourakis, C. and Gikas, P., 2022b. Microsieving of raw sewage at the wastewater treatment plant of Rethymno: Yield and energy content of produced biosolids, 1<sup>st</sup> *International Conference on Sustainable Chemical and Environmental Engineering (SUSTENG 2022)*, 31 August-4 September, Rethymno, Greece.

Manali, A., Tsamoutsoglou, K. and Gikas, P., 2022a. Gasification of wastewater primary sieved solids for the production of electric and thermal energy, 9<sup>th</sup> *International Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorisation (WasteEng2022)*, 27-30 June, Copenhagen, Denmark.

Manara, P. and Zabaniotou, A., 2012. Towards sewage sludge based biofuels via thermochemical conversion - A review. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 16, 2566-2582.

Marrero, T.W., McAuley, B.P., Sutterlin, W.R., Morris, J.S. and Manahan, S.E., 2004. Fate of heavy metals and radioactive metals in gasification of sewage sludge. *Waste Manage.*, 24, 193-198.

Martínez, J.D., Mahkamov, K., Andrade, R. V. and Lora, E.E.S., 2012. Syngas production in downdraft biomass gasifiers and its application using internal combustion engines. *Renew. Energy*, 38, 1-9.

Martins das Neves, L.C., Converti, A. and Penna, T.C.V., 2009. Biogas production: New trends for alternative energy sources in rural and urban zones. *Chem. Eng. Technol.*, 32, 1147-1153.

Mason, C. A., Häner, A. and Hamer, G., 1992. Aerobic thermophilic waste sludge treatment. *Water Sci. Technol.*, 25, 113-118.

McCarty, P.L., Bae, J. and Kim, J., 2011. Domestic wastewater treatment as a net energy producer-can this be achieved? *Environ. Sci. Technol.*, 45, 7100-7106.

Menon, U., Suresh, N., George, G., Ealias, N-M. and Saravanakumar, M-P., 2020. A study on combined effect on Fenton and Free Nitrous Acid treatment on sludge dewaterability with ultrasonic assistance: Preliminary investigation on improved calorific value. *Chem. Eng. J.*, 382, 123035.

Metcalf and Eddy, 2003. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*, 4<sup>th</sup> ed.; McGraw-Hill: Boston.

Migliaccio, R., Brachi, P., Montagnaro, F., Papa, S., Tavano, A., Montesarchio, P., Ruoppolo, G. and Urciuolo, M., 2021. Sewage Sludge Gasification in a Fluidized Bed: Experimental Investigation and Modeling. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 60, 5034-5047.

Mizuta, K. and Shimada, M., 2010. Benchmarking energy consumption in municipal wastewater treatment plants in Japan. *Water Sci. Technol.*, 62, 2256-2262.

Modeling Gasifier Mass Balance, 2010. <http://wiki.gekgasifier.com/w/page/6123718/FrontPage>.

Morling, S., 2019. Swedish Experience and Excellence in Wastewater Treatment Demonstrated Especially in Phosphorus Removal. *J. Water Resource Prot.*, 11, 333-347.

Muralikrishna, I. and Manickam, V., 2017. Wastewater Treatment Technologies. In: *Environmental Management Science and Engineering for Industry*, 1<sup>st</sup> ed.; 249-293, Butterworth-Heinemann: Oxford, UK.

- Nguyen, T.A.H., Ngo, H.H., Guo, W.S., Zhang, J., Liang, S., Yue, Q.Y., Li, Q. and Nguyen, T.V., 2013. Applicability of agricultural waste and by-products for adsorptive removal of heavy metals from wastewater. *Bioresour. Technol.*, 148, 574-585.
- Nipattummakul, N., Ahmed, I.I., Kerdsuwan, S., Gupta, A.K., 2010. Hydrogen and syngas production from sewage sludge via steam gasification. *Int. J. Hydrogen Energy*, 35, 11738-11745.
- Odirile, P., Marumoloa, P., Manali, A. and Gikas, P., 2021. Anaerobic Digestion for Biogas Production from Municipal Sewage Sludge: A Comparative Study between Fine Mesh Sieved Primary Sludge and Sedimented Primary Sludge, *Water*, 13, 3532.
- Oladejo, J., Shi, K., Luo, X., Yang, G. and Wu, T., 2019. A review of sludge-to-energy recovery methods. *Energies*, 12, 1-38.
- Oncu, N.B. and Balcioglu, I.A., 2013. Microwave-assisted chemical oxidation of biological waste sludge: simultaneous micropollutant degradation and sludge solubilization. *Bioresour. Technol.*, 146, 126-134.
- Ostojski, A., 2018. Elementary analysis and energetic potential of the municipal sewage sludges from the Gdansk and Kosciierzyna WWTPs, *Seminary on Geomatics, Civil and Environmental Engineering, E3S Web of Conferences*, 05 January, Gdansk, Poland.
- Pathak, A., Dastidar, M.G. and Sreekrishnan, T.R., 2009. Bioleaching of heavy metals from sewage sludge: a review. *J. Environ. Manag.*, 90, 2343-2353.
- Paulsrud, B., Rusten, B. and Aas, B., 2014. Increasing the sludge energy potential of wastewater treatment plants by introducing fine mesh sieves for primary treatment. *Water Sci. Technol.*, 69, 560-565.
- Pfeifer, C. and Hofbauer, H., 2008. Development of catalytic tar decomposition downstream from a dual fluidized bed biomass steam gasifier. *Powder. Technol.*, 180, 9-16.
- Ponsa, S., Bolzonella, D., Colon, J., Deshusses, M.A., Fonts, I., Gil-Lalaguna, N., Komilis, D., Lyberatos, G., Pérez-Elvira, S.I. and Sánchez, J.L., 2017. Recovering energy from sludge. *In: Innovative Wastewater Treatment & Resource Recovery Technologies*, 1<sup>st</sup> ed.; IWA Publishing: London, UK.
- Pothoulaki, A., Manali, A. and Gikas, P., 2022. Gasification-energy production system for the management of wastewater primary sieved solids, *1<sup>st</sup> International Conference on Sustainable Chemical and Environmental Engineering (SUSTENG 2022)*, 31 August-4 September, Rethymno, Greece.
- Praspaliauskas, M. and Pedišius, N., 2017. A review of sludge characteristics in Lithuania's wastewater treatment plants and perspectives of its usage in thermal processes. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 67, 899-907.
- Puig-Arnabat, M., Bruno, J.C. and Coronas, A., 2010. Review and analysis of biomass gasification models. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 14, 2841-2851.
- Pütz, P., 2012. Laboratory analysis and systems for continuous measurement of N-nutrients, Technical Report; Hach Lange: Colorado, USA.
- Raheem, A., Sikarwar, V.S., He, J., Dastyar, W., Dionysiou, D.D., Wang, W. and Zhao, M., 2018. Opportunities and challenges in sustainable treatment and resource reuse of sewage sludge: A review. *Chem. Eng. J.*, 337, 616-641.

- Rajvanshi, A., 1986. Biomass gasification. *In: Alternative Energy in Agriculture*, 83-102, CRC Press: Boca Raton.
- Rastegar, S.O., Mousavi, S.M. and Shojaosadati, S.A., 2014. Cr and Ni recovery during bioleaching of dewatered metal-plating sludge using *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *Bioresour. Technol.*, 167, 61-68.
- Reed, T. and Das, A., 1988. *Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems*, Biomass Energy Foundation: Pine Ridge.
- Richardson, Y., Drobek, M., Julbe, A., Blin, J. and Pinta, F., 2015. Biomass Gasification to Produce Syngas, *In: Recent Advances in Thermochemical Conversion of Biomass*, 213-250, Elsevier: Amsterdam.
- Roche, E., de Andrés, J.M., Narros, A., Rodríguez, M.E., 2014. Air and air-steam gasification of sewage sludge. The influence of dolomite and throughput in tar production and composition. *Fuel*, 115, 54-61.
- Rostrup-Nielsen, J. and Christiansen, L.J., 2011. Routes to Syngas, *In: Concepts in Syngas Manufacture*, 3-71, Imperial College Press: London, UK.
- Ruiken, C., Breuer, G., Klaversma, E., Santiago, T. and van Loosdrecht, M., 2013. Sieving wastewater–Cellulose recovery, economic and energy evaluation. *Water Res.*, 47, 43-48.
- Samiran, N.A., Jaafar, M.N.M., Ng, J.H., Lam, S.S. and Chong, C.T., 2016. Progress in biomass gasification technique - With focus on Malaysian palm biomass for syngas production. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 62, 1047-1062.
- Samolada, M.C. and Zabaniotou, A.A., 2014. Comparative assessment of municipal sewage sludge incineration, gasification and pyrolysis for a sustainable sludge-to-energy management in Greece. *Waste Manage.*, 34, 411-420.
- Sanaye, S., Alizadeh, P. and Yazdani, M., 2022. Thermo-economic analysis of syngas production from wet digested sewage sludge by gasification process. *Renew. Energy*, 190, 524-539.
- Sansaniwal, S.K., Pal, K., Rosen, M.A. and Tyagi, S.K., 2017a. Recent advances in the development of biomass gasification technology: A comprehensive review. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 72, 363-384.
- Sansaniwal, S.K., Rosen, M.A. and Tyagi, S.K., 2017b. Global challenges in the sustainable development of biomass gasification: An overview. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 80, 23-43.
- Schmid, M., Beirrow, M., Schweitzer, D., Waizmann, G., Spörl, R., Scheffknecht, G., 2018. Product gas composition for steam-oxygen fluidized bed gasification of dried sewage sludge, straw pellets and wood pellets and the influence of limestone as bed material. *Biomass Bioenergy*, 117, 71-77.
- Schmid, M., Hafner, S., Scheffknecht, G., 2021. Experimental Parameter Study on Synthesis Gas Production by Steam-Oxygen Fluidized Bed Gasification of Sewage Sludge. *Appl. Sci.*, 11, 579.
- Shen, Y. and Yoshikawa, K., 2013. Recent progresses in catalytic tar elimination during biomass gasification or pyrolysis - A review. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 21, 371-392.

- Shi, T., Liu, Y., Yang, A., Sun, S., Shen, W. and Ren, J., 2022. Developing a novel gasification-based sludge-to-methanol utilization process and exergy-economic-environmental (3E) analysis. *Energy Convers. Manag.*, 260, 115600.
- Siatou, A., Manali, A. and Gikas, P., 2020. Energy Consumption and Internal Distribution in Activated Sludge Wastewater Treatment Plants of Greece. *Water*, 2, 1204.
- Siatou, A., Manali, A. and Gikas, P., 2021. Energy requirements by municipal wastewater treatment plants of Greece, 6<sup>th</sup> distance education e-learning International Summer School on “Wastewater and Biosolids Management” (WWSS21), 26-31 July, Patras, Greece.
- Sikarwar, V.S., Zhao, M., Clough, P., Yao, J., Zhong, X., Memon, M.Z., Shah, N., Anthony, E.J. and Fennell, P.S., 2016. An overview of advances in biomass gasification. *Energy Environ. Sci.*, 9, 2939-2977.
- Sikarwar, V.S., Zhao, M., Fennell, P.S., Shah, N. and Anthony, E.J., 2017. Progress in biofuel production from gasification. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 61, 189-248.
- Singh, J. and Gu, S., 2010. Biomass conversion to energy in India-A critique. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 14, 1367-1378.
- Soares, R., Memelli, M., Roque, R. and Gonçalves, R., 2017. Comparative analysis of the energy consumption of different wastewater treatment plants, *International Journal of Architecture, Arts and Applications*, 3, 79-86.
- Song, Y.C., Kwon, S.J. and Woo, J.H., 2004. Mesophilic and thermophilic temperature co-phase anaerobic digestion compared with single-stage mesophilic- and thermophilic digestion of sewage sludge. *Water Res.*, 38, 1653-1662.
- Spellman, F. R., 2013. *Handbook of water and wastewater treatment plant operations*, CRC Press: Boca Raton.
- Syed-Hassan, S.S.A., Wang, Y., Hu, S., Su, S. and Xiang, J., 2017. Thermochemical processing of sewage sludge to energy and fuel: Fundamentals, challenges and considerations. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 80, 888-913.
- Tandukar, M. and Pavlostathis, S.G., 2015. Co-digestion of municipal sludge and external organic wastes for enhanced biogas production under realistic plant constraints. *Water Res.*, 87, 432–445.
- Tang, J., He, J., Liu, T., Xin, X. and Hu, H., 2017. Removal of heavy metal from sludge by the combined application of a biodegradable biosurfactant and complexing agent in enhanced electrokinetic treatment. *Chemosphere*, 189, 599-608.
- Thamavithya, M. and Dutta, A., 2008. An investigation of MSW gasification in a spout-fluid bed reactor. *Fuel Process. Technol.*, 89, 949-957.
- Turovskiy, I. S. and Mathai, P. K., 2006. *Wastewater sludge processing*, John Wiley & Sons, Inc: Hoboken, New Jersey, USA.
- Tyagi, V.K. and Lo, S.L., 2013. Sludge: A waste or renewable source for energy and resources recovery? *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 25, 708-728.
- Valderrama Rios, M.L., González, A.M., Lora, E.E.S. and Almazán del Olmo, O.A., 2018. Reduction of tar generated during biomass gasification: A review. *Biomass Bioenergy*, 108, 345-370.

- Valdez, B., 2012. *Food Industrial Processes: Methods and Equipment*, 1<sup>st</sup> ed.; Intechopen: London, UK.
- Van der Star, W., Abma, W., Blommers, D., Mulder, J., Tokutomi, T., Strous, M. and van Loosdrecht, M., 2007. Startup of reactors for anoxic ammonium oxidation: experiences from the first full-scale anammox reactor in Rotterdam. *Water research*, 41, 4149-4163.
- Van Oers, L., De Koning, A., Guinée, J. and Huppes, G., 2002. Abiotic resource depletion in LCA. *Road and Hydraulic Engineering Institute, Ministry of Transport and Water, Amsterdam*.
- Varzakas, T. and Tzia, C., 2014. *Food Engineering Handbook*, 1<sup>st</sup> ed.; CRC Press: Boca Raton.
- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L.K. and Vassileva, C.G., 2010. An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, 89, 913-933.
- Verlicchi, P. and Zambello, E., 2015. Pharmaceuticals and personal care products in untreated and treated sewage sludge: Occurrence and environmental risk in the case of application on soil - A critical review. *Sci. Total Environ.*, 538, 750-767.
- Vijay, V., Bhat, A., Shetty, S., Gurudatta, N. and Sequeira, R., 2016. Design and fabrication of heat exchanger for waste heat recovery from exhaust gas of diesel engine. *J. Mech. Eng. Autom.*, 6, 131-137.
- Viswanathan, K., Abbas, S. and Wu, W., 2022. Syngas analysis by hybrid modeling of sewage sludge gasification in downdraft reactor: Validation and optimization. *Waste Manage.*, 144, 132-143.
- Wang, K., Zheng, Y., Zhu, X., Brewer, C.E. and Brown, R.C., 2017. Ex-situ catalytic pyrolysis of wastewater sewage sludge – A micro-pyrolysis study. *Bioresour. Technol.*, 232, 229-234.
- Wang, Q., Ye, L., Jiang, G., Jensen, P.D., Batstone, D.J. and Yuan, Z., 2013. Free nitrous acid (FNA)-based pretreatment enhances methane production from waste activated sludge. *Environ. Sci. Technol.*, 47, 11897-11904.
- Wang, X., Chen, J., Yan, X., Wang, X., Zhang, J., Huang, J. and Zhao, J., 2015. Heavy metal chemical extraction from industrial and municipal mixed sludge by ultrasound assisted citric acid. *J. Ind. Eng. Chem.*, 27, 368-372.
- Watson, J., Zhang, Y., Si, B., Chen, W.T. and de Souza, R., 2018. Gasification of biowaste: A critical review and outlooks. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 83, 1-17.
- WERF, 2010. *Energy Efficiency in Wastewater Treatment in North America: A Compendium of Best Practices and Case Studies of Novel Approaches*, Technical Report; IWA Publishing: London, UK.
- Werle, S. and Wilk, R.K., 2010. A review of methods for the thermal utilization of sewage sludge: The Polish perspective. *Renew. Energy*, 35, 1914-1919.
- Wisniowska, E., Grobelak, A., Kokot, P. and Kacprzak, M., 2019. Sludge legislation-comparison between different countries, *In: Industrial and Municipal Sludge, Emerging Concerns and Scope for Resource Recovery*, 201-224, Butterworth-Heinemann: Oxford, UK.
- Wnukowski, M., Kordylewski, W., Łuszkiewicz, D., Leśniewicz, A., Ociepa, M., Michalski, J., 2020. Sewage Sludge-Derived Producer Gas Valorization with the Use of Atmospheric Microwave Plasma. *Waste Biomass Valorization*, 11, 4289-4303.



- Woolcock, P.J. and Brown, R.C., 2013. A review of cleaning technologies for biomass-derived syngas. *Biomass Bioenergy*, 52, 54-84.
- Xu, C.C. and Lancaster, J., 2009. Treatment of Secondary Sludge for Energy Recovery. *Energy Recover. Nov. Sci. Publ. Inc*, 187-211.
- Xu, G., Murakami, T., Suda, T., Tani, H. and Mito, Y., 2008. Efficient gasification of wet biomass residue to produce middle caloric gas. *Particuology*, 6, 376-382.
- Xu, X., Yang, Y., Wang, G., Zhang, S., Cheng, Z., Li, T., Yang, Z., Xian, J., Yang, Y. and Zhou, W., 2020a. Removal of heavy metals from industrial sludge with new plant-based washing agents. *Chemosphere*, 246, 125816.
- Xu, Y., Lu, Y., Dai, X. and Dong, B., 2017a. The influence of organic-binding metals on the biogas conversion of sewage sludge. *Water Res.*, 126, 329-341.
- Xu, Y., Lu, Y., Zheng, L., Wang, Z. and Dai, X., 2020b. Perspective on enhancing the anaerobic digestion of waste activated sludge. *J. Hazard Mater.*, 389, 121847.
- Xu, Y., Zhang, C., Zhao, M., Rong, H., Zhang, K., and Chen, Q., 2017b. Comparison of bioleaching and electrokinetic remediation processes for removal of heavy metals from wastewater treatment sludge. *Chemosphere*, 168, 1152-1157.
- Yan, M., Feng, H., Zheng, R., Yu, C., Hantoko, D., Zhou, Z., Zhang, Y., Kanchanatip, E., 2021. Sulfur conversion and distribution during supercritical water gasification of sewage sludge. *J. Energy Inst.*, 95, 61-68.
- Yang, W., Song, W., Li, J. and Zhang, X., 2020. Bioleaching of heavy metals from wastewater sludge with the aim of land application. *Chemosphere*, 249, 126134.
- Yeo, T.Y., Ashok, J. and Kawi, S., 2019. Recent developments in sulphur-resilient catalytic systems for syngas production. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 100, 52-70.
- Youssef, E.A., Nakhla, G. and Charpentier, P.A., 2011. Oleic acid gasification over supported metal catalysts in supercritical water: Hydrogen production and product distribution. *Int. J. Hydrogen Energy*, 36, 4830-4842.
- Zaccariello, L. and Mastellone, M.L., 2020. Gasification of sewage sludge in a bench-scale reactor. *Chem. Eng. Trans.*, 80, 175-180.
- Zhai, Y., Wang, C., Chen, H., Li, C., Zeng, G., Pang, D. and Lu, P., 2013. Digested sewage sludge gasification in supercritical water. *Waste Manage. Res.*, 31, 393-400.
- Zhang, F., Wang, S., Li, Y., Chen, W. and Qian, L., 2021. Thermodynamic analysis of a supercritical water gasification – oxidation combined system for sewage sludge treatment with cool wall reactor. *Energy. Convers. Manag.*, 247, 114708.
- Zhang, L., Xu, C., Champagne, P. and Mabee, W., 2014. Overview of current biological and thermo-chemical treatment technologies for sustainable sludge management. *Waste Manage. Res.*, 32, 586-600.
- Zhang, Q., Hu, J., Lee, D.J., Chang, Y. and Lee, Y.J., 2017. Sludge treatment: Current research trends. *Bioresour. Technol.*, 243, 1159-1172.
- Zygadlo, M., 2001. *Municipal waste management strategy: collective work*, Polish Association of Sanitary Engineers and Technicians: Poznan.

## 9.2 Ελληνική βιβλιογραφία

- ΑΕΠΟ, 2014. Απόφαση Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων της ΕΕΛ Ρεθύμνου: Α.Π. οικ.175133/26-09-2014. <http://astikalimata.ypeka.gr>
- Αντωνιάδης, Α., 2006. *Φωτοκαταλυτικές μέθοδοι επεξεργασίας αστικών λυμάτων*. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Χημείας, Σχολή Θετικών Επιστημών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.
- Γκίκας, Π., 2013. Ενεργειακή Αξιοποίηση Στερεών Αστικών Απορριμμάτων με την Μέθοδο της Αεριοποίησης, *Ημερίδα για την Διαχείριση Αστικών Στερεών Απορριμμάτων*, 26 Απριλίου, Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας, Θεσσαλονίκη.
- Γκίκας, Π., 2018. *Προηγμένες μέθοδοι επεξεργασίας νερού και υγρών αποβλήτων (σημειώσεις μαθήματος)*. Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Γκίκας, Π., 2020. *Σχεδιασμός Χημικών και Περιβαλλοντικών Εγκαταστάσεων - Εκτίμηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (σημειώσεις μαθήματος)*. Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Δανδόλου, Ε., 2010. *Έλεγχος και αξιολόγηση λειτουργίας Μονάδας Επεξεργασίας Λυμάτων Ρεθύμνου*. Διπλωματική Εργασία, Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Δημοπούλου, Α., 2011. *Συγκριτική Αξιολόγηση Ενεργειακής κατανάλωσης και εκπομπών αερίων θερμοκηπίου σε Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ)*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Ζαφειράκου, Α., 2014. *Τεχνική Περιβάλλοντος (σημειώσεις μαθήματος)*. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.
- Καμπουράκης, Χ., 2023. *Μικροκοσκίνιση πρωτογενών λυμάτων στην εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων Ρεθύμνου: Απόδοση και ενεργειακό περιεχόμενο παραγόμενων βιοστερεών*. Διπλωματική Εργασία, Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Κατσιμαντού, Κ., 2007. *Ξήρανση Ιλύος Αστικών και Βιομηχανικών Αποβλήτων με τη βοήθεια της Ηλιακής Ενέργειας*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.
- Κεχαγιαδάκη, Δ., 2019. *Τοξικές ουσίες στην Ιλύ της Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων Ρεθύμνου*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Διαχείρισης Αποβλήτων, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάτρα.
- Κούγκολος, Α., 2005. *Εισαγωγή στην Περιβαλλοντική Μηχανική*, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.
- Κουϊμτζής, Θ., Σαμαρά-Κωνσταντίνου, Κ., Φυτιανός, Κ. και Βουτσά, Δ., 1994. *Έλεγχος ρύπανσης περιβάλλοντος*, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Λοΐζος, Σ., 2021. *Δυνατότητα ενεργειακής αξιοποίησης των βιοστερεών στην Κρήτη*. Διπλωματική Εργασία, Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Ματσούκα, Β., 2003. *Σχεδιασμός και προσομοίωση Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων*. Διπλωματική Εργασία, Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

- Μαυράκης, Ν., 2018. *Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων για το έργο «Πilotική Διάταξη Αεριοποίησης στην Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων Ρεθύμνου»*. Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης Αποχέτευσης Ρεθύμνου (ΔΕΥΑΡ), Ρέθυμνο.
- Νταρακάς, Ε., 2010. *Διεργασίες Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων (σημειώσεις μαθήματος)*. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.
- Ξεκουκουλωτάκης, Ν., 2023. *Προηγμένες Διεργασίες Οξειδωσης για την Επεξεργασία Νερού και Υγρών Αποβλήτων (σημειώσεις μαθήματος)*. Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Παντίδου, Α. και Αντέλλη, Κ., 2019. *Έλεγχος ρύπανσης νερών (σημειώσεις εργαστηριακών ασκήσεων)*. Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Σαββάκης, Ν., 2016. *Περιβαλλοντική Διαχείριση (σημειώσεις μαθήματος)*. Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε., Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, ΤΕΙ Κρήτης, Χανιά.
- Σαρηγιάννης, Δ., 2015. *Διαχείριση Υγρών Αποβλήτων (σημειώσεις μαθήματος)*. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.
- Στάμου, Α. και Βογιατζής, Ζ., 1994. *Βασικές αρχές και σχεδιασμός συστημάτων επεξεργασίας αποβλήτων (2<sup>η</sup> εκδ.)*. Έκδοση Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος, Αθήνα.
- Στούπας, Χ. και Κοτσανίδης, Σ., 2009. *Ξήρανση Ιλύος Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων με Ηλιακή Ενέργεια*. Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανολογίας, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, ΤΕΙ Καβάλας, Καβάλα.
- Σύρπη, Α., 2023. *Εκτίμηση της συνεισφοράς καινοτομικού συστήματος μικροκοσκίνισης - αεριοποίησης βιοστερεών στην διαμόρφωση του νομικού πλαισίου για την διαχείριση υγρών αποβλήτων*. Διπλωματική Εργασία, Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Τσαμουτσόγλου, Κ., 2020. *Ισοζύγια μάζας και ενέργειας του καινοτομικού συστήματος ενεργειακής αξιοποίησης βιοστερεών με τη μέθοδο της αεριοποίησης*. Διπλωματική Εργασία, Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10. Παραρτήματα

### 10.1 Συγκριτικός πίνακας με οφέλη και περιορισμούς αεριοποίησης - πυρόλυσης - αποτέφρωσης

Πίνακας 10.1 Οφέλη και περιορισμοί της αεριοποίησης, της πυρόλυσης και της αποτέφρωσης.

| ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ  |  |
|--|--|
| Οφέλη  | Περιορισμοί  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>-Υψηλή αποδοτικότητα ανάκτησης ενέργειας</li> <li>-Χαμηλή απαίτηση για παροχή ενέργειας</li> <li>-Δυνατότητα για συν-τροφοδοσία με βιομάζα</li> <li>-Δεν χρειάζεται συμπληρωματικό καύσιμο</li> <li>-Παραγωγή υψηλής ποιότητας αερίου σύνθεσης, πλούσιου σε ενέργεια, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές</li> <li>-Μειωμένες περιβαλλοντικές εκπομπές</li> <li>-Υπάρχουσα νομοθεσία</li> <li>-Αποδεδειγμένη τεχνολογία</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Απαραίτητη μερική ξήρανση των βιοστερεών</li> <li>-Χρειάζεται ομογενή πρώτη ύλη</li> <li>-Απαιτούμενη επεξεργασία αερίου σύνθεσης πριν την χρήση</li> <li>-Εκπομπές CO και CO<sub>2</sub></li> <li>-Προβλήματα διάθεσης στάχτης λόγω τοξικότητας</li> <li>-Πιθανά βούλωμα/διάβρωση και θέματα ασφαλείας εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών και πιέσεων</li> <li>-Τεχνολογική πολυπλοκότητα</li> <li>-Περιορισμένες εμπορικές εφαρμογές</li> <li>-Υψηλό κόστος επένδυσης</li> </ul>   |
| ΠΥΡΟΛΥΣΗ   |  |
| Οφέλη  | Περιορισμοί  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>-Υψηλή αποδοτικότητα ανάκτησης ενέργειας</li> <li>-Παραγωγή αερίου, ελαίου και εξανθρακώματος, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορες εφαρμογές</li> <li>-Περιορισμένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών και της απουσίας οξυγόνου.</li> <li>-Απουσία βαρέων μετάλλων στο αέριο πυρόλυσης λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών</li> <li>-Περιορισμένη απαιτούμενη επεξεργασία του αερίου πυρόλυσης για να υπακούει στα όρια εκπομπών</li> <li>-Συμπαγείς μονάδες</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Απαραίτητη μερική ξήρανση των βιοστερεών</li> <li>-Όχι καλά εδραιωμένη αγορά για τα προϊόντα πυρόλυσης</li> <li>-Περιορισμένοι τύποι αποβλήτων είναι αποδεκτοί</li> <li>-Το έλαιο περιέχει συστατικά με N, άρα είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθεί σαν καύσιμο</li> <li>-Το εξανθράκωμα περιέχει βαρέα μέταλλα, άρα απαιτεί κοστοβόρα επεξεργασία πριν την υγειονομική ταφή του</li> <li>-Εκπομπές CO και CO<sub>2</sub></li> <li>-Χαμηλή οικονομική αξία του παραγόμενου ελαίου</li> <li>-Ασταθής σύνθεση και αποδοτικότητα των προϊόντων, εξαρτώμενη από συνθήκες λειτουργίας</li> <li>-Αποδεδειγμένη βιωσιμότητα μόνο σε μονάδες μεγάλης κλίμακας</li> <li>-Ανεπαρκής νομοθεσία</li> <li>-Περιορισμένες εμπορικές εφαρμογές</li> <li>-Υψηλό κόστος επένδυσης</li> </ul> |
| ΑΠΟΤΕΦΡΩΣΗ   |  |
| Οφέλη  | Περιορισμοί  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>-Μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα είδη αποβλήτων</li> <li>-Δυνατότητα για συν-τροφοδοσία με συμβατικά καύσιμα</li> <li>-Πιθανή αξιοποίηση της παραγόμενης στάχτης</li> <li>-Ελαχιστοποίηση παραγωγής οσμών</li> <li>-Δεν εκπέμπεται μεθάνιο</li> <li>-Υπάρχοντα συστήματα ελέγχου εκπομπών</li> <li>-Σχεδόν πλήρης καταστροφή των τοξικών οργανικών συστατικών και των παθογόνων</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Χαμηλή αποδοτικότητα σε ενέργεια</li> <li>-Χρειάζεται επιπλέον καύσιμο</li> <li>-Απαραίτητη μερική ξήρανση των βιοστερεών</li> <li>-Παραγωγή μεγάλου όγκου παραπροϊόντων</li> <li>-Προβλήματα ρύπανσης αέρα λόγω βλαβερών εκπομπών (αέρια θερμοκηπίου, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, διοξίνες, φουράνια)</li> <li>-Εκπομπές χλωριωμένων συστατικών</li> <li>-Κοστοβόρος έλεγχος εκπομπών λόγω της αυξημένης απαίτησης για επεξεργασία του αερίου και της στάχτης που παράγονται</li> </ul>   |

|   |   |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"><li>-Διαθέσιμη για χρήση στα υπάρχοντα συστήματα καύσης</li><li>-Εδραιωμένη και εμπορικά διαθέσιμη τεχνολογία</li><li>-Καλά ανεπτυγμένο νομικό πλαίσιο</li><li>-Χαμηλό κόστος επένδυσης και λειτουργίας</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>-Επικουρική τεχνολογία</li><li>-Οικονομικά ελκυστική μόνο για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας</li><li>-Ισχυρή εναντίωση του κοινού</li></ul> |
|---|---|

## 10.2 Φωτογραφίες του συστήματος κροκίδωσης στην ΕΕΛ Ρεθύμνου



Εικόνα 10.1 Δοσομετρική αντλία (αριστερά) και δεξαμενή κροκίδωσης συνδεδεμένη με το πιλοτικό μικροκόσκινο (δεξιά).

## 10.3 Ερωτηματολόγιο της μελέτης για το ενεργειακό προφίλ των ΕΕΛ της Ελλάδος

### Α. Γενικά στοιχεία

Ονομασία της ΕΕΛ:

ΔΕΥΑ στην οποία ανήκει:

Λειτουργός της εγκατάστασης:

Υπεύθυνος επικοινωνίας:

1. Έχει υλοποιηθεί ενεργειακή αξιολόγηση της εγκατάστασης στο παρελθόν;

Ναι ☐ Όχι ☐



**Β. Τεχνικό μέρος - Σχετικά με την συνολική ενεργειακή απαίτηση της εγκατάστασης**

Παρακαλώ συμπληρώστε τα στοιχεία στον παρακάτω πίνακα.

| Έτος     | 2. Συνολική κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος* (kWh/year) | 3. Συνολικό ετήσιο κόστος ηλεκτρικού ρεύματος* (€/year) | 4. Ετήσια παροχή (m <sup>3</sup> /year) |
|----------|--|---|---|
| 1. 2016  |  |   |   |
| 2. 2015  |  |   |   |
| 3. 2014  |  |   |   |
| 4. 2013  |  |   |   |
| 5. 2012  |  |   |   |
| 6. 2011  |  |   |   |
| 7. 2010  |  |   |   |
| 8. 2009  |  |   |   |
| 9. 2008  |  |   |   |
| 10. 2007 |  |   |   |
| 11. 2006 |  |   |   |

\* χωρίς τα αντλιοστάσια

5. Γίνεται χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την κάλυψη έστω μέρους της απαιτούμενης ενέργειας;  
 Ναι ☐ Όχι ☐
- 5.1. Αν ναι, ποιās μορφής;
6. Γίνεται χρήση καυσίμων (όπως πετρέλαιο, φυσικό αέριο);      Ναι ☐ Όχι ☐
- 6.1. Σε τι ποσότητες και για τι είδους χρήση;

**Γ. Τεχνικό μέρος – Σχετικά με την εγκατάσταση**

7. Πόσα χρόνια λειτουργεί η ΕΕΛ;
8. Ποιο είναι το συνολικό εμβαδό της ΕΕΛ;

|             | 9. Μέση ημερήσια παροχή εισόδου (m <sup>3</sup> ) | 10. Εξυπηρετούμενος ισοδύναμος πληθυσμός (ΙΠ) |
|-------------|---|---|
| 1. Θέρος    |   |   |
| 2. Χειμώνας |   |   |

11. Δέχεται η ΕΕΛ βοθρολύματα;    Ναι ☐ Όχι ☐
- 11.1. Πόσα βυτία ανά ημέρα κατά μέσο όρο;
12. Ποιός είναι ο μέσος χρόνος υδραυλικής παραμονής;
- 12.1. στο σύνολο της εγκατάστασης;
- 12.2. στη δεξαμενή αερισμού;

13. Ποιά τα ποιοτικά χαρακτηριστικά εισόδου και εξόδου για το 2016 (mg/L);

|         | BOD <sub>5</sub> | COD | TSS | T-N | T-P | pH |
|---------|------------------|-----|-----|-----|-----|----|
| Είσοδος |                  |     |     |     |     |    |
| Εξοδος  |                  |     |     |     |     |    |

Πίνακας 1. Ποιοτικά χαρακτηριστικά εισόδου και εξόδου της ΕΕΛ.

### Γ.1. Compact τεχνολογίες

14. Απαρτίζεται η ΕΕΛ από Compact τεχνολογίες; Ναι ☐ Όχι ☐  
Εξηγήστε:

### Γ.2. Προεπεξεργασία και Πρωτοβάθμια επεξεργασία

15. Διαθέτει η ΕΕΛ αντλιοστάσιο ανύψωσης; Ναι ☐ Όχι ☐

- 15.1. Είδος:  
15.2. Αριθμός αντλιών:  
15.3. Συνολική εγκατεστημένη ισχύς (kW):  
15.4. Καταναλισκόμενη ισχύς (kW ή kWh/ημέρα):  
15.5. Ώρες λειτουργίας ανά 24ωρο:

16. Διαθέτει η ΕΕΛ εσχάρωση; Ναι ☐ Όχι ☐

- 16.1. Τύπος σχάρας:  
16.2. Συνολική εγκατεστημένη ισχύς (kW):  
16.3. Καταναλισκόμενη ισχύς (kW ή kWh/ημέρα):  
16.4. Ώρες λειτουργίας ανά 24ωρο:

17. Διαθέτει η ΕΕΛ εξάμμωση; Ναι ☐ Όχι ☐

- 17.1. Τύπος εξαμμωτή:  
17.2. Παροχή αέρα:  
17.3. Συνολική εγκατεστημένη ισχύς (kW):  
17.4. Καταναλισκόμενη ισχύς (kW ή kWh/ημέρα):  
17.5. Ώρες λειτουργίας ανά 24ωρο:

18. Διαθέτει η ΕΕΛ απολίπανση; Ναι ☐ Όχι ☐

- 18.1. Τύπος απολιπαντή:

19. Διαθέτει η ΕΕΛ δεξαμενή εξισορρόπησης; Ναι ☐ Όχι ☐

- 19.1. Όγκος δεξαμενής:

20. Διαθέτει η ΕΕΛ δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης; Ναι ☐ Όχι ☐

- 20.1. Πλήθος δεξαμενών:  
20.2. Όγκος έκαστης:  
20.3. Συνολική εγκατεστημένη ισχύς (kW):  
20.4. Καταναλισκόμενη ισχύς (kW ή kWh/ημέρα):

### Γ.3. Δευτεροβάθμια, Τριτοβάθμια επεξεργασία & Επαναχρησιμοποίηση νερού

21. Διαθέτει η ΕΕΛ δεξαμενή αερισμού; Ναι ☐ Όχι ☐

- 21.1. Γίνεται νιτροποίηση; Ναι ☐ Όχι ☐  
21.2. Γίνεται απονιτροποίηση; Ναι ☐ Όχι ☐  
21.3. Είδος δεξαμενής:  
21.4. Πλήθος δεξαμενών:  
21.5. Όγκος και ύψος έκαστης:  
21.6. Σύστημα βιολ. επεξεργασίας: Πλήρους μείξης ☐ Εμβολικής ροής ☐ Οξειδωτική τάφρος ☐ Άλλο ☐  
21.7. Μέσος Υδραυλικός χρόνος παραμονής:  
21.8. Ρυθμός επανακυκλοφορίας:  
21.9. Ηλικία ιλύος:  
21.10. MLSS (mg/l):  
21.11. Τυπική τιμή F/M:  
21.12. Συνολική εγκατεστημένη ισχύς (kW):  
21.13. Καταναλισκόμενη ισχύς (kW ή kWh/ημέρα):  
21.14. Ώρες λειτουργίας φυσητήρων/επιφανειακών αεριστήρων ανά 24ωρο: /  
21.15. Ώρες λειτουργίας αναδευτήρων ανά 24ωρο:

Σχόλια:

**22. Διαθέτει η ΕΕΛ αποφωσφόρωση;**Ναι ☐ Όχι ☐

- 22.1. Πλήθος Δεξαμενών:  
 22.2. Όγκος έκαστης:  
 22.3. Συνολική εγκατεστημένη ισχύς (kW):  
 22.4. Καταναλισκόμενη ισχύς (kW ή kWh/ημέρα):  
 22.5. Ώρες λειτουργίας αναμεικτάρων ανά 24ωρο:

**23. Διαθέτει η ΕΕΛ δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης;**Ναι ☐ Όχι ☐

- 23.1. Είδος δεξαμενής:  
 23.2. Πλήθος δεξαμενών:  
 23.3. Όγκος έκαστης:  
 23.4. Συνολική εγκατεστημένη ισχύς (kW):  
 23.5. Καταναλισκόμενη ισχύς (kW ή kWh/ημέρα):

**24. Διαθέτει η ΕΕΛ απολύμανση;**Ναι ☐ Όχι ☐

- 24.1. Είδος απολύμανσης:  
 24.2. Συνολική εγκατεστημένη ισχύς (kW):  
 24.3. Καταναλισκόμενη ισχύς (kW ή kWh/ημέρα):

**25. Γίνεται ανάκτηση νερού για επαναχρησιμοποίηση;**Ναι ☐ Όχι ☐

- 25.1. Ποια διεργασία χρησιμοποιείται;  
 25.2. Τι είδους καλλιέργεια αρδεύεται;  
 25.3. Συνολική εγκατεστημένη ισχύς (kW):  
 25.4. Καταναλισκόμενη ισχύς (kW ή kWh/ημέρα):  
 25.5. Ποια η ποιότητα του νερού επαναχρησιμοποίησης;

|          |  |          |  |     |  |    |  |   |  |      |  |
|----------|--|----------|--|-----|--|----|--|---|--|------|--|
| TC/100ml |  | FC/100ml |  | BOD |  | TN |  | P |  | άλλα |  |
|----------|--|----------|--|-----|--|----|--|---|--|------|--|

**Γ.4. Επεξεργασία υλός****26. Ποια είναι η ποσότητα παραγόμενης υλός και η υγρασία στην είσοδο και έξοδο του συστήματος επεξεργασίας;**

|         | 26.1 Ίλός | 26.2 Υγρασία |
|---------|-----------|--------------|
| Είσοδος |           |              |
| Έξοδος  |           |              |

**27. Ποια είναι η ημερήσια ποσότητα πρωτοβάθμιας υλός;****28. Στερεά % πρωτοβάθμιας;****29. Ποια είναι η ημερήσια ποσότητα δευτεροβάθμιας υλός;****30. Στερεά % δευτεροβάθμιας;****31. Διαθέτει η ΕΕΛ πάχυνση;**Ναι ☐ Όχι ☐

- 31.1. Τύπος παχυντή:  
 31.2. Ποσοστό στερεών στην είσοδο και στην έξοδο: /  
 31.3. Συνολική εγκατεστημένη ισχύς (kW):  
 31.4. Καταναλισκόμενη ισχύς (kW ή kWh/ημέρα):  
 31.5. Ώρες λειτουργίας ανά 24ωρο:

**31.6. Γίνεται χρήση κροκιδωτικών;**Ναι ☐ Όχι ☐**31.6.1. Είδος:****31.6.2. Ποσότητα:**

**32. Διαθέτει η ΕΕΛ αφυδάτωση;** Ναι ☐ Όχι ☐

32.1. Τύπος αφυδατωτή:

32.2. Ποσοστό στερεών στην είσοδο και στην έξοδο: /

32.3. Συνολική εγκατεστημένη ισχύς (kW):

32.4. Καταναλισκόμενη ισχύς (kW ή kWh/ημέρα):

32.5. Ώρες λειτουργίας ανά 24ωρο:

32.6. Γίνεται χρήση κροκιδωτικών; Ναι ☐ Όχι ☐

32.6.1. Είδος:

32.6.2. Ποσότητα:

**33. Διαθέτει η ΕΕΛ αναερόβια χώνευση;** Ναι ☐ Όχι ☐

33.1. Αριθμός χωνευτών:

33.2. Όγκος έκαστου:

33.3. Συνολική εγκατεστημένη ισχύς (kW):

33.4. Καταναλισκόμενη ισχύς (kW ή kWh/ημέρα):

33.5. Χρόνος παραμονής υλός:

33.6. Ποσοστό στερεών στην είσοδο και στην έξοδο: /

33.7. Πτητικά στερεά στην είσοδο και στην έξοδο: /

33.8. Παραγόμενος όγκος βιοαερίου ανά ημέρα:

33.9. Παραγόμενη ισχύς (kW):

33.10. Γίνεται αξιοποίηση του βιοαερίου; Ναι ☐ Όχι ☐

33.10.1. Τι είδους;

**34. Διαθέτει η ΕΕΛ ξήρανση;** Ναι ☐ Όχι ☐

34.1. Τι είδους;

34.2. Ποσοστό υγρασίας στην είσοδο και στην έξοδο: /

**35. Διαθέτει η ΕΕΛ κομποστοποίηση;** Ναι ☐ Όχι ☐

35.1. Τι είδους;

35.2. Ποσότητα παραγόμενου κόμποστ:

35.3. Συνολική εγκατεστημένη ισχύς (kW):

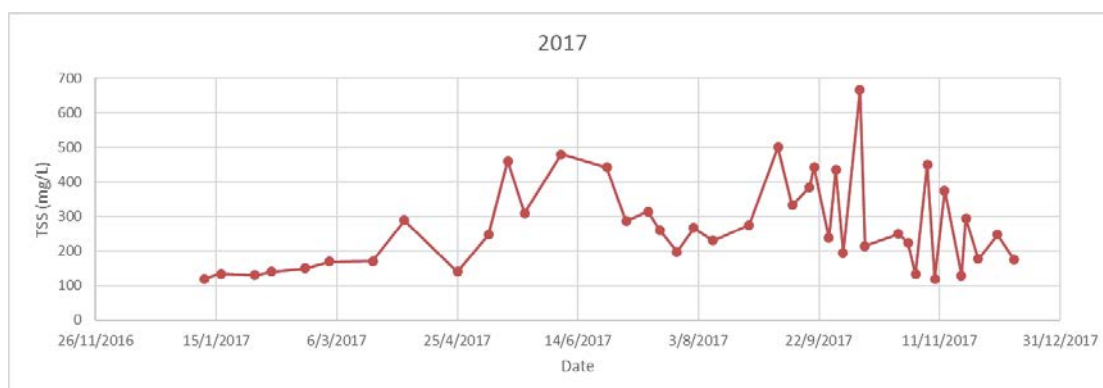
35.4. Καταναλισκόμενη ισχύς (kW ή kWh/ημέρα):

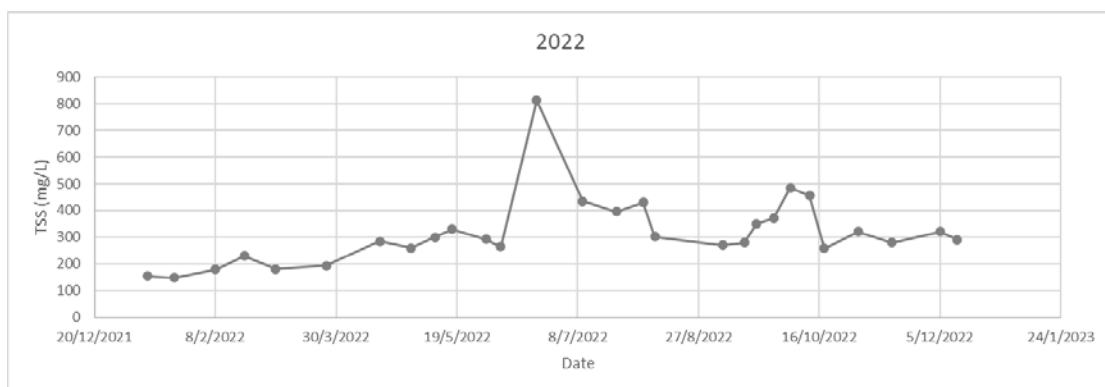
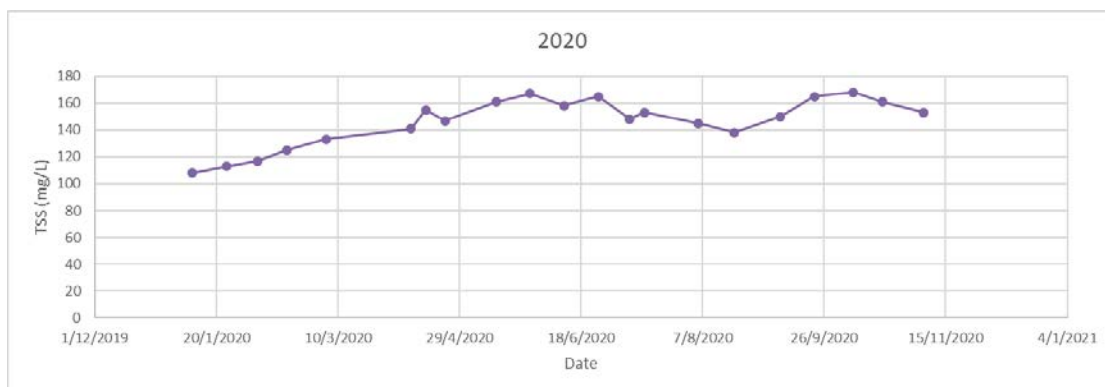
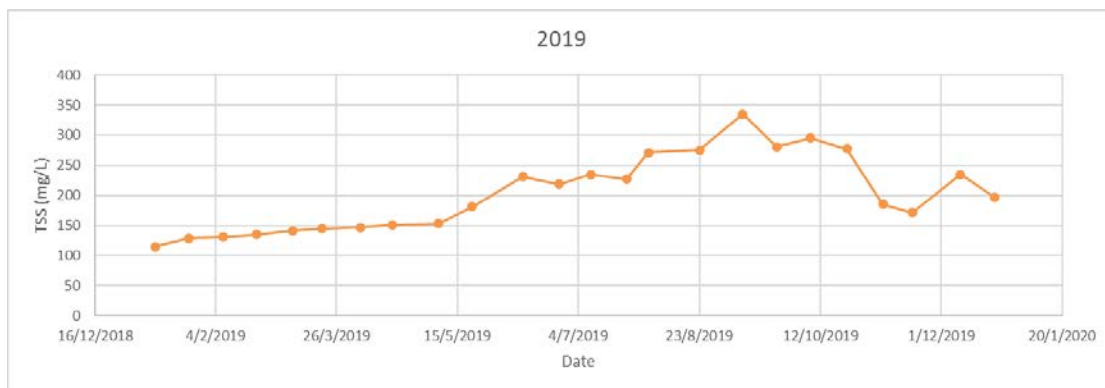
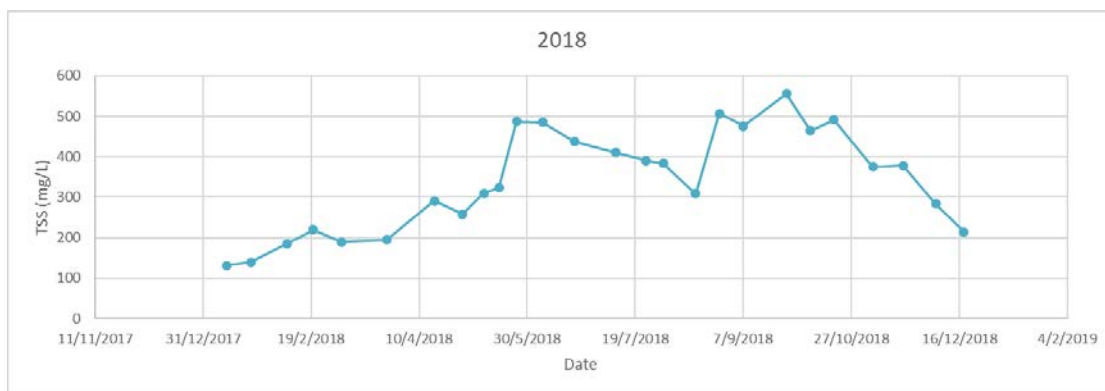
**36. Γίνεται ασβεστοποίηση;** Ναι ☐ Όχι ☐

36.1. Ποσότητα ασβεστίου ανά υλός:

**Δ. Γενικά σχόλια και παρατηρήσεις**

**10.4 Διαγράμματα συγκέντρωσης TSS εισερχόμενου αποβλήτου της ΕΕΛ Ρεθύμνου**

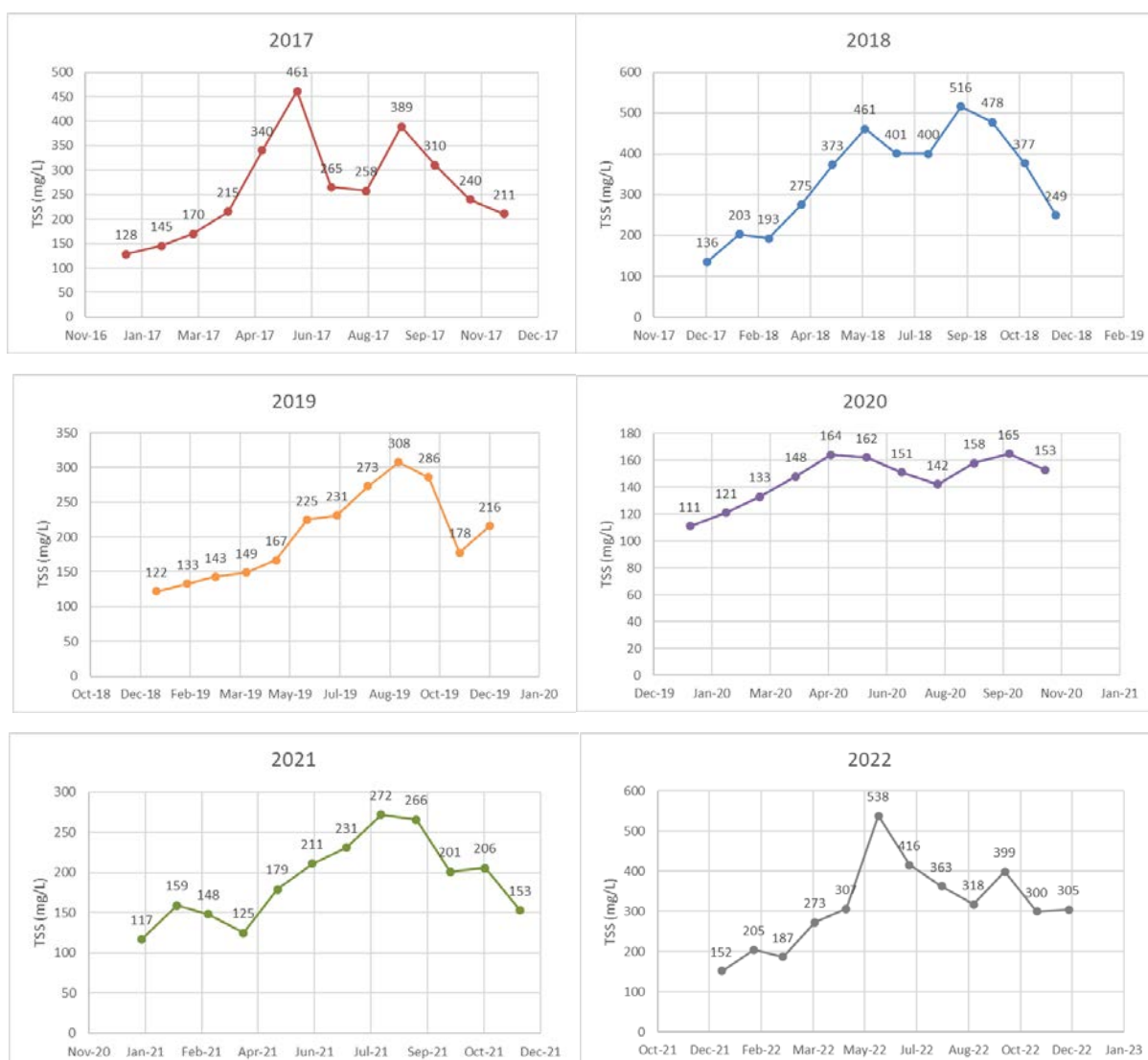




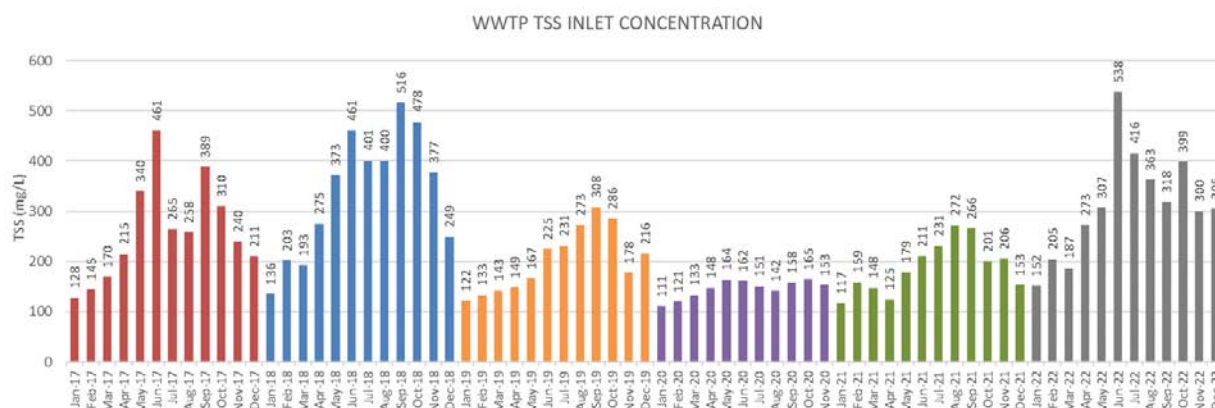




Διάγραμμα 10.1 Συγκεντρώσεις TSS εισόδου της ΕΕΛ Ρεθύμνου σε ημερήσια βάση ανά έτος (από 2017 έως 2022).



Διάγραμμα 10.2 Συγκεντρώσεις TSS εισόδου της ΕΕΛ Ρεθύμνου σε μηνιαία βάση ανά έτος (από 2017 έως 2022).

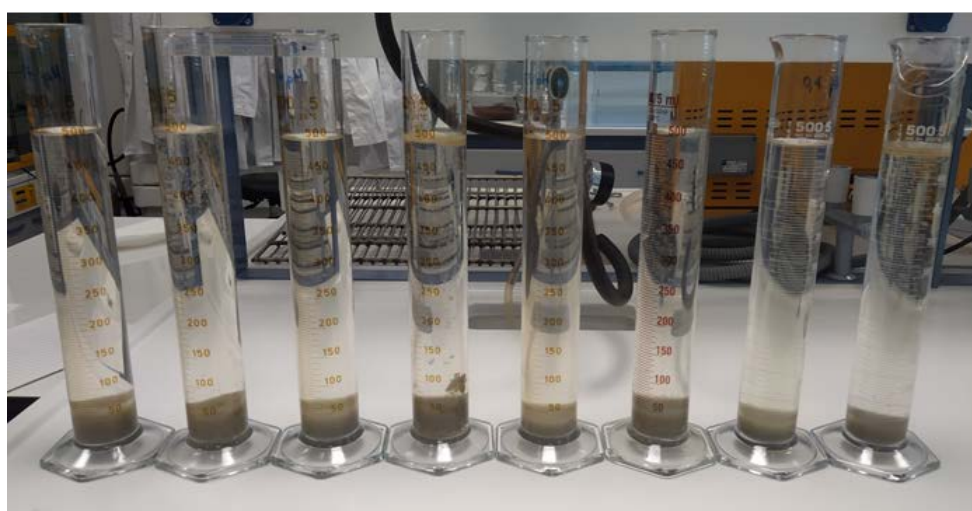


Διάγραμμα 10.3 Συγκεντρώσεις TSS εισόδου της ΕΕΛ Ρεθύμνου σε μηνιαία βάση συγκεντρωτικά για τα έτη από 2017 έως 2022.

## 10.5 Φωτογραφίες από τις προκαταρκτικές δοκιμές κροκίδωσης



Εικόνα 10.2 Πειραματική διάταξη για δοκιμές κροκίδωσης στο εργαστήριο.



Εικόνα 10.3 Ενδεικτική φωτογραφία με κροκιδωμένα υγρά απόβλητα υπό διάφορες συνθήκες pH (6 ή 8) και δοσολογίες κροκιδωτικού μέσου (0,4 - 0,7 mg PAC / L αποβλήτου).

## 10.6 Φωτογραφίες του σκισμένου φίλτρου του πιλοτικού μικροκόσκινου από χαλίκια



Εικόνα 10.4 Φωτογραφίες του φίλτρου του μικροκόσκινου που έχει σκιστεί λόγω των χαλικιών που υπήρχαν στο εισερχόμενο απόβλητο.

## 10.7 Φωτογραφίες από τις δοκιμές κροκίδωσης του πιλοτικού μικροκόσκινου



Εικόνα 10.5 Έντονη δημιουργία αφρού στο απόβλητο κατά τις δοκιμές κροκίδωσης του πιλοτικού μικροκόσκινου.



## 10.8 Υπολογισμοί ισοζυγίων μάζας και θερμικής ενέργειας της πιλοτικής μονάδας με θετικό αποτέλεσμα

Πίνακας 10.2 Υπολογισμός ισοζυγίων μάζας και ενέργειας της πιλοτικής μονάδας με 65 αντί 70 % υγρασία των μικροκοσκινισμένων βιοστερεών.

| Περιγραφή  | Υπολογισμοί | Σχόλια           |
|--|-------------|------------------|
| <b>Θεωρητική απαίτηση θερμικής ενέργειας για ξήρανση</b>               |             |                  |
| Παραγόμενα βιοστερεά από μικροκόσκινο (kg/d)                           | 920,0       |                  |
| Παραγόμενα βιοστερεά από μικροκόσκινο (kg/h)                           | 38,3        |                  |
| Περιεχόμενη υγρασία (%)  | 65,0        | Εύρος: 60 - 70   |
| Πλήρως ξηρά βιοστερεά (kg/d) (0% υγρασία)                              | 276,0       |                  |
| Πλήρως ξηρά βιοστερεά (kg/h) (0% υγρασία)                              | 13,4        |                  |
| Επιθυμητή περιεχόμενη υγρασία βιοστερεών για αεριοποίηση (%)           | 10,0        | Εύρος: 10 - 15   |
| Ξηραμένα βιοστερεά (kg/h) (10% υγρασία)                                | 14,7        |                  |
| Εξατμισμένο νερό (kg/h)  | 23,6        |                  |
| Απαιτούμενη λανθάνουσα θερμότητα για ξήρανση (MJ)                      | 53,2        | Εξίσωση 6.1      |
| Απαιτούμενη αισθητή θερμότητα για ξήρανση (MJ)                         | 12,8        | Εξίσωση 6.2      |
| Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξήρανση (MJ ή kWh)                  | 66,0 ή 18,3 | Εξίσωση 6.3      |
| <b>Χαρακτηριστικά - προδιαγραφές ξηραντηρίου πιλοτικής μονάδας</b>     |             |                  |
| Παροχή αέρα (m <sup>3</sup> )  | 95,8        |                  |
| Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξήρανση (MJ ή kWh)                  | 96,6 ή 26,8 |                  |
| <b>Παροχή θερμότητας από μονάδα αεριοποίησης - παραγωγής ενέργειας</b> |             |                  |
| Θερμογόνος δύναμη βιοστερεών (MJ/kg)                                   | 21,5        | Εύρος: 21 - 22,5 |
| Ενεργειακό περιεχόμενο βιοστερεών (MJ/h)                               | 288,2       | Εξίσωση 6.4      |
| Παραγόμενο αέριο σύνθεσης (m <sup>3</sup> /h)                          | 26,8        |                  |
| Απόδοση αεριοποιητή (%)  | 80          | Εύρος: 70 - 80   |
| Θερμογόνος δύναμη αερίου σύνθεσης (MJ/m <sup>3</sup> )                 | 8,6         | Εξίσωση 6.5      |
| Ενεργειακό περιεχόμενο αερίου σύνθεσης (MJ/h)                          | 230,6       | Εξίσωση 6.6      |
| Ποσοστό αερίου σύνθεσης για καύση προς το ξηραντήριο (%)               | 10          |                  |
| Ενέργεια από το αέριο σύνθεσης προς το ξηραντήριο (MJ)                 | 23,1        |                  |
| Ενέργεια από το αέριο σύνθεσης προς την MEK (MJ)                       | 207,5       |                  |
| Απόδοση MEK (ηλεκτρική ενέργεια, %)                                    | 20          |                  |
| Απόδοση MEK (θερμική ενέργεια, %)                                      | 50          | Εύρος: 45 - 50   |
| Απόδοση MEK (απώλειες, %)  | 30          | Εύρος: 30 - 35   |
| Ηλεκτρική ενέργεια από MEK (MJ)  | 41,5        | Εξίσωση 6.7      |
| Θερμική ενέργεια από MEK (MJ)  | 103,8       | Εξίσωση 6.8      |
| Απώλειες από MEK (MJ)  | 62,3        | Εξίσωση 6.9      |
| Θερμική ενέργεια από καυσαέρια της MEK (MJ)                            | 0,6         | Εξίσωση 6.11     |
| Θερμική ενέργεια από ψύξη αερίου σύνθεσης (MJ)                         | 4,6         | Εξίσωση 6.12     |
| Θερμική ενέργεια από αεριοποιητή (MJ)                                  | 11,5        |                  |

|  |                     |                |
|--|---------------------|----------------|
| Συνολική παροχή θερμικής ενέργειας (MJ ή kWh)  | 143,5 ή <b>39,9</b> | Εξίσωση 6.10   |
| <b>Ισοζύγιο θερμικής ενέργειας</b>   |                     |                |
| Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξήρανση θεωρητικά (kWh)                             | 18,3                |                |
| Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξηραντήριο (kWh)                                    | 26,8                |                |
| Εκτιμώμενο ποσοστό απωλειών λόγω μεταφοράς θερμότητας (%)                              | 20                  | Εύρος: 15 - 30 |
| Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξηραντήριο, συμπεριλαμβανομένων των απωλειών (kWh)  | 32,2                |                |
| Συνολική παροχή θερμικής ενέργειας από μονάδα αεριοποίησης - παραγωγής ενέργειας (kWh) | 39,9                |                |
| Καθαρή θερμική ενέργεια (kWh)  | <b>7,7</b>          | ΘΕΤΙΚΟ         |

Πίνακας 10.3 Υπολογισμός ισοζυγίων μάζας και ενέργειας της πιλοτικής μονάδας με 22,5 αντί 21,5 MJ/kg ανώτερη θερμογόνο δύναμη βιοστερεών.

| Περιγραφή  | Υπολογισμοί         | Σχόλια           |
|--|---------------------|------------------|
| <b>Θεωρητική απαίτηση θερμικής ενέργειας για ξήρανση</b>               |                     |                  |
| Παραγόμενα βιοστερεά από μικροκόσκινο (kg/d)                           | 920,0               |                  |
| Παραγόμενα βιοστερεά από μικροκόσκινο (kg/h)                           | 38,3                |                  |
| Περιεχόμενη υγρασία (%)  | 70,0                | Εύρος: 60 - 70   |
| Πλήρως ξηρά βιοστερεά (kg/d) (0% υγρασία)                              | 276,0               |                  |
| Πλήρως ξηρά βιοστερεά (kg/h) (0% υγρασία)                              | 11,5                |                  |
| Επιθυμητή περιεχόμενη υγρασία βιοστερεών για αεριοποίηση (%)           | 10,0                | Εύρος: 10 - 15   |
| Ξηραμένα βιοστερεά (kg/h) (10% υγρασία)                                | 12,7                |                  |
| Εξατμισμένο νερό (kg/h)  | 25,7                |                  |
| Απαιτούμενη λανθάνουσα θερμότητα για ξήρανση (MJ)                      | 58,0                | Εξίσωση 6.1      |
| Απαιτούμενη αισθητή θερμότητα για ξήρανση (MJ)                         | 12,8                | Εξίσωση 6.2      |
| Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξήρανση (MJ ή kWh)                  | 70,8 ή <b>19,7</b>  | Εξίσωση 6.3      |
| <b>Χαρακτηριστικά - προδιαγραφές ξηραντηρίου πιλοτικής μονάδας</b>     |                     |                  |
| Παροχή αέρα (m <sup>3</sup> )  | 95,8                |                  |
| Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξήρανση (MJ ή kWh)                  | 105,4 ή <b>29,3</b> |                  |
| <b>Παροχή θερμότητας από μονάδα αεριοποίησης - παραγωγής ενέργειας</b> |                     |                  |
| Θερμογόνο δύναμη βιοστερεών (MJ/kg)                                    | 22,5                | Εύρος: 21 - 22,5 |
| Ενεργειακό περιεχόμενο βιοστερεών (MJ/h)                               | 258,5               | Εξίσωση 6.4      |
| Παραγόμενο αέριο σύνθεσης (m <sup>3</sup> /h)                          | 23,0                |                  |
| Απόδοση αεριοποιητή (%)  | 80                  | Εύρος: 70 - 80   |
| Θερμογόνο δύναμη αερίου σύνθεσης (MJ/m <sup>3</sup> )                  | 9,0                 | Εξίσωση 6.5      |
| Ενεργειακό περιεχόμενο αερίου σύνθεσης (MJ/h)                          | 206,8               | Εξίσωση 6.6      |
| Ποσοστό αερίου σύνθεσης για καύση προς το ξηραντήριο (%)               | 10                  |                  |
| Ενέργεια από το αέριο σύνθεσης προς το ξηραντήριο (MJ)                 | 20,7                |                  |
| Ενέργεια από το αέριο σύνθεσης προς την MEK (MJ)                       | 186,1               |                  |



|  |                     |                |
|--|---------------------|----------------|
| Απόδοση MEK (ηλεκτρική ενέργεια, %)  | 20                  |                |
| Απόδοση MEK (θερμική ενέργεια, %)  | 50                  | Εύρος: 45 - 50 |
| Απόδοση MEK (απώλειες, %)  | 30                  | Εύρος: 30 - 35 |
| Ηλεκτρική ενέργεια από MEK (MJ)  | 37,2                | Εξίσωση 6.7    |
| Θερμική ενέργεια από MEK (MJ)  | 93,1                | Εξίσωση 6.8    |
| Απώλειες από MEK (MJ)  | 55,8                | Εξίσωση 6.9    |
| Θερμική ενέργεια από καυσαέρια της MEK (MJ)  | 0,5                 | Εξίσωση 6.11   |
| Θερμική ενέργεια από ψύξη αερίου σύνθεσης (MJ)   | 3,9                 | Εξίσωση 6.12   |
| Θερμική ενέργεια από αεριοποιητή (MJ)  | 10,3                |                |
| Συνολική παροχή θερμικής ενέργειας (MJ ή kWh)  | 128,5 ή <b>35,7</b> | Εξίσωση 6.10   |
| <b>Ισοζύγιο θερμικής ενέργειας</b>   |                     |                |
| Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξήρανση θεωρητικά (kWh)                             | 19,7                |                |
| Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξηραντήριο (kWh)                                    | 29,3                |                |
| Εκτιμώμενο ποσοστό απωλειών λόγω μεταφοράς θερμότητας (%)                              | 20                  | Εύρος: 15 - 30 |
| Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξηραντήριο, συμπεριλαμβανομένων των απωλειών (kWh)  | 35,1                |                |
| Συνολική παροχή θερμικής ενέργειας από μονάδα αεριοποίησης - παραγωγής ενέργειας (kWh) | 35,7                |                |
| Καθαρή θερμική ενέργεια (kWh)  | <b>0,6</b>          | ΘΕΤΙΚΟ         |

Πίνακας 10.4 Υπολογισμός ισοζυγίων μάζας και ενέργειας της πιλοτικής μονάδας με 15 αντί 20 % απώλειες λόγω μεταφοράς θερμότητας.

| Περιγραφή  | Υπολογισμοί         | Σχόλια           |
|--|---------------------|------------------|
| <b>Θεωρητική απαίτηση θερμικής ενέργειας για ξήρανση</b>               |                     |                  |
| Παραγόμενα βιοστερεά από μικροκόσκινο (kg/d)                           | 920,0               |                  |
| Παραγόμενα βιοστερεά από μικροκόσκινο (kg/h)                           | 38,3                |                  |
| Περιεχόμενη υγρασία (%)  | 70,0                | Εύρος: 60 - 70   |
| Πλήρως ξηρά βιοστερεά (kg/d) (0% υγρασία)                              | 276,0               |                  |
| Πλήρως ξηρά βιοστερεά (kg/h) (0% υγρασία)                              | 11,5                |                  |
| Επιθυμητή περιεχόμενη υγρασία βιοστερεών για αεριοποίηση (%)           | 10,0                | Εύρος: 10 - 15   |
| Ξηραμένα βιοστερεά (kg/h) (10% υγρασία)                                | 12,7                |                  |
| Εξατμισμένο νερό (kg/h)  | 25,7                |                  |
| Απαιτούμενη λανθάνουσα θερμότητα για ξήρανση (MJ)                      | 58,0                | Εξίσωση 6.1      |
| Απαιτούμενη αισθητή θερμότητα για ξήρανση (MJ)                         | 12,8                | Εξίσωση 6.2      |
| Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξήρανση (MJ ή kWh)                  | 70,8 ή <b>19,7</b>  | Εξίσωση 6.3      |
| <b>Χαρακτηριστικά - προδιαγραφές ξηραντηρίου πιλοτικής μονάδας</b>     |                     |                  |
| Παροχή αέρα (m <sup>3</sup> )  | 95,8                |                  |
| Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξήρανση (MJ ή kWh)                  | 105,4 ή <b>29,3</b> |                  |
| <b>Παροχή θερμότητας από μονάδα αεριοποίησης - παραγωγής ενέργειας</b> |                     |                  |
| Θερμογόνος δύναμη βιοστερεών (MJ/kg)                                   | 21,5                | Εύρος: 21 - 22,5 |

|  |                     |                |
|--|---------------------|----------------|
| Ενεργειακό περιεχόμενο βιοστερεών (MJ/h)   | 247,3               | Εξίσωση 6.4    |
| Παραγόμενο αέριο σύνθεσης (m <sup>3</sup> /h)  | 23,0                |                |
| Απόδοση αεριοποιητή (%)  | 80                  | Εύρος: 70 - 80 |
| Θερμογόνος δύναμη αερίου σύνθεσης (MJ/m <sup>3</sup> )                                 | 8,6                 | Εξίσωση 6.5    |
| Ενεργειακό περιεχόμενο αερίου σύνθεσης (MJ/h)  | 197,8               | Εξίσωση 6.6    |
| Ποσοστό αερίου σύνθεσης για καύση προς το ξηραντήριο (%)                               | 10                  |                |
| Ενέργεια από το αέριο σύνθεσης προς το ξηραντήριο (MJ)                                 | 19,8                |                |
| Ενέργεια από το αέριο σύνθεσης προς την MEK (MJ)                                       | 178,0               |                |
| Απόδοση MEK (ηλεκτρική ενέργεια, %)  | 20                  |                |
| Απόδοση MEK (θερμική ενέργεια, %)  | 50                  | Εύρος: 45 - 50 |
| Απόδοση MEK (απώλειες, %)  | 30                  | Εύρος: 30 - 35 |
| Ηλεκτρική ενέργεια από MEK (MJ)  | 35,6                | Εξίσωση 6.7    |
| Θερμική ενέργεια από MEK (MJ)  | 89,0                | Εξίσωση 6.8    |
| Απώλειες από MEK (MJ)  | 53,4                | Εξίσωση 6.9    |
| Θερμική ενέργεια από καυσάδια της MEK (MJ)   | 0,5                 | Εξίσωση 6.11   |
| Θερμική ενέργεια από ψύξη αερίου σύνθεσης (MJ)   | 3,9                 | Εξίσωση 6.12   |
| Θερμική ενέργεια από αεριοποιητή (MJ)  | 9,9                 |                |
| Συνολική παροχή θερμικής ενέργειας (MJ ή kWh)  | 123,1 ή <b>34,2</b> | Εξίσωση 6.10   |
| <b>Ισοζύγιο θερμικής ενέργειας</b>   |                     |                |
| Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξήρανση θεωρητικά (kWh)                             | 19,7                |                |
| Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξηραντήριο (kWh)                                    | 29,3                |                |
| Εκτιμώμενο ποσοστό απωλειών λόγω μεταφοράς θερμότητας (%)                              | 15                  | Εύρος: 15 - 30 |
| Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξηραντήριο, συμπεριλαμβανομένων των απωλειών (kWh)  | 33,6                |                |
| Συνολική παροχή θερμικής ενέργειας από μονάδα αεριοποίησης - παραγωγής ενέργειας (kWh) | 34,2                |                |
| Καθαρή θερμική ενέργεια (kWh)  | <b>0,6</b>          | ΘΕΤΙΚΟ         |

## 10.9 Υπολογισμοί ισοζυγίων μάζας και θερμικής ενέργειας της πιλοτικής μονάδας με χρήση μικροκοσκινισμένων βιοστερεών - δευτεροβάθμιας ιλύος

Πίνακας 10.5 Υπολογισμοί ισοζυγίων μάζας και θερμικής ενέργειας της πιλοτικής μονάδας με χρήση μείγματος 50% μικροκοσκινισμένων βιοστερεών και 50% ηλιακά ξηραμένης δευτεροβάθμιας ιλύος.

| Περιγραφή  | Υπολογισμοί | Σχόλια         |
|--|-------------|----------------|
| <b>Θεωρητική απαίτηση θερμικής ενέργειας για ξήρανση</b> |             |                |
| Παραγόμενα βιοστερεά (kg/d)                              | 920,0       |                |
| Παραγόμενα βιοστερεά από μικροκόσκινο (kg/h)             | 19,2        |                |
| Περιεχόμενη υγρασία (%)                                  | 70,0        | Εύρος: 60 - 70 |

|  |              |                  |
|--|--------------|------------------|
| Ηλιακά ξηραμένη δευτεροβάθμια ιλύς (kg/h)                              | 19,2         |                  |
| Περιεχόμενη υγρασία (%)  | 20           |                  |
| Πλήρως ξηρά βιοστερεά (kg/d) (0% υγρασία)                              | 276,0        |                  |
| Πλήρως ξηρά βιοστερεά (kg/h) (0% υγρασία)                              | 21,1         |                  |
| Επιθυμητή περιεχόμενη υγρασία βιοστερεών για αεριοποίηση (%)           | 10,0         | Εύρος: 10 - 15   |
| Ξηραμένα βιοστερεά (kg/h) (10% υγρασία)                                | 23,2         |                  |
| Εξατμισμένο νερό (kg/h)  | 15,1         |                  |
| Απαιτούμενη λανθάνουσα θερμότητα για ξήρανση (MJ)                      | 34,1         | Εξίσωση 6.1      |
| Απαιτούμενη αισθητή θερμότητα για ξήρανση (MJ)                         | 6,4          | Εξίσωση 6.2      |
| Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξήρανση (MJ ή kWh)                  | 40,6 ή 11,3  | Εξίσωση 6.3      |
| <b>Χαρακτηριστικά - προδιαγραφές ξηραντηρίου πιλοτικής μονάδας</b>     |              |                  |
| Παροχή αέρα (m <sup>3</sup> )  | 47,9         |                  |
| Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξήρανση (MJ ή kWh)                  | 62,1 ή 17,2  |                  |
| <b>Παροχή θερμότητας από μονάδα αεριοποίησης - παραγωγής ενέργειας</b> |              |                  |
| Θερμογόνος δύναμη βιοστερεών (MJ/kg)                                   | 21,5         | Εύρος: 21 - 22,5 |
| Θερμογόνος δύναμη βιοστερεών (MJ/kg)                                   | 17           |                  |
| Ενεργειακό περιεχόμενο βιοστερεών (MJ/h)                               | 405,5        | Εξίσωση 6.4      |
| Παραγόμενο αέριο σύνθεσης (m <sup>3</sup> /h)                          | 42,1         |                  |
| Απόδοση αεριοποιητή (%)  | 80           | Εύρος: 70 - 80   |
| Θερμογόνος δύναμη αερίου σύνθεσης (MJ/m <sup>3</sup> )                 | 8,6          | Εξίσωση 6.5      |
| Ενεργειακό περιεχόμενο αερίου σύνθεσης (MJ/h)                          | 362,3        | Εξίσωση 6.6      |
| Ποσοστό αερίου σύνθεσης για καύση προς το ξηραντήριο (%)               | 10           |                  |
| Ενέργεια από το αέριο σύνθεσης προς το ξηραντήριο (MJ)                 | 36,2         |                  |
| Ενέργεια από το αέριο σύνθεσης προς την MEK (MJ)                       | 326,1        |                  |
| Απόδοση MEK (ηλεκτρική ενέργεια, %)                                    | 20           |                  |
| Απόδοση MEK (θερμική ενέργεια, %)                                      | 50           | Εύρος: 45 - 50   |
| Απόδοση MEK (απώλειες, %)  | 30           | Εύρος: 30 - 35   |
| Ηλεκτρική ενέργεια από MEK (MJ)  | 65,2         | Εξίσωση 6.7      |
| Θερμική ενέργεια από MEK (MJ)  | 163,0        | Εξίσωση 6.8      |
| Απώλειες από MEK (MJ)  | 97,8         | Εξίσωση 6.9      |
| Θερμική ενέργεια από καυσάερια της MEK (MJ)                            | 0,9          | Εξίσωση 6.11     |
| Θερμική ενέργεια από ψύξη αερίου σύνθεσης (MJ)                         | 7,2          | Εξίσωση 6.12     |
| Θερμική ενέργεια από αεριοποιητή (MJ)                                  | 18,1         |                  |
| Συνολική παροχή θερμικής ενέργειας (MJ ή kWh)                          | 225,5 ή 62,6 | Εξίσωση 6.10     |
| <b>Ισοζύγιο θερμικής ενέργειας</b>                                     |              |                  |
| Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξήρανση θεωρητικά (kWh)             | 11,3         |                  |
| Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξηραντήριο (kWh)                    | 17,2         |                  |
| Εκτιμώμενο ποσοστό απωλειών λόγω μεταφοράς θερμότητας (%)              | 20           | Εύρος: 15 - 30   |

|  |             |  |
|--|-------------|--|
| Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξηραντήριο, συμπεριλαμβανομένων των απωλειών (kWh)  | 20,7        |  |
| Συνολική παροχή θερμικής ενέργειας από μονάδα αεριοποίησης - παραγωγής ενέργειας (kWh) | 62,6        |  |
| Καθαρή θερμική ενέργεια (kWh)  | <b>42,0</b> |  |

Πίνακας 10.6 Υπολογισμοί ισοζυγίων μάζας και θερμικής ενέργειας της πιλοτικής μονάδας με χρήση μείγματος 50% μικροκοσκινισμένων βιοστερεών και 50% αφυδατωμένης δευτεροβάθμιας ιλύος.

| Περιγραφή  | Υπολογισμοί         | Σχόλια           |
|--|---------------------|------------------|
| <b>Θεωρητική απαίτηση θερμικής ενέργειας για ξήρανση</b>               |                     |                  |
| Παραγόμενα βιοστερεά (kg/d)  | 920,0               |                  |
| Παραγόμενα βιοστερεά από μικροκόσκινο (kg/h)                           | 19,2                |                  |
| Περιεχόμενη υγρασία (%)  | 70,0                | Εύρος: 60 - 70   |
| Αφυδατωμένη δευτεροβάθμια ιλύς (kg/h)                                  | 19,2                |                  |
| Περιεχόμενη υγρασία (%)  | 80                  |                  |
| Πλήρως ξηρά βιοστερεά (kg/d) (0% υγρασία)                              | 276,0               |                  |
| Πλήρως ξηρά βιοστερεά (kg/h) (0% υγρασία)                              | 9,6                 |                  |
| Επιθυμητή περιεχόμενη υγρασία βιοστερεών για αεριοποίηση (%)           | 10,0                | Εύρος: 10 - 15   |
| Ξηραμένα βιοστερεά (kg/h) (10% υγρασία)                                | 10,5                |                  |
| Εξατμισμένο νερό (kg/h)  | 27,8                |                  |
| Απαιτούμενη λανθάνουσα θερμότητα για ξήρανση (MJ)                      | 62,7                | Εξίσωση 6.1      |
| Απαιτούμενη αισθητή θερμότητα για ξήρανση (MJ)                         | 6,4                 | Εξίσωση 6.2      |
| Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξήρανση (MJ ή kWh)                  | 69,1 ή <b>19,2</b>  | Εξίσωση 6.3      |
| <b>Χαρακτηριστικά - προδιαγραφές ξηραντηρίου πιλοτικής μονάδας</b>     |                     |                  |
| Παροχή αέρα (m <sup>3</sup> )  | 47,9                |                  |
| Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξήρανση (MJ ή kWh)                  | 113,9 ή <b>31,6</b> |                  |
| <b>Παροχή θερμότητας από μονάδα αεριοποίησης - παραγωγής ενέργειας</b> |                     |                  |
| Θερμογόνος δύναμη βιοστερεών (MJ/kg)                                   | 21,5                | Εύρος: 21 - 22,5 |
| Θερμογόνος δύναμη βιοστερεών (MJ/kg)                                   | 17                  |                  |
| Ενεργειακό περιεχόμενο βιοστερεών (MJ/h)                               | 184,3               | Εξίσωση 6.4      |
| Παραγόμενο αέριο σύνθεσης (m <sup>3</sup> /h)                          | 19,2                |                  |
| Απόδοση αεριοποιητή (%)  | 80                  | Εύρος: 70 - 80   |
| Θερμογόνος δύναμη αερίου σύνθεσης (MJ/m <sup>3</sup> )                 | 8,6                 | Εξίσωση 6.5      |
| Ενεργειακό περιεχόμενο αερίου σύνθεσης (MJ/h)                          | 164,7               | Εξίσωση 6.6      |
| Ποσοστό αερίου σύνθεσης για καύση προς το ξηραντήριο (%)               | 10                  |                  |
| Ενέργεια από το αέριο σύνθεσης προς το ξηραντήριο (MJ)                 | 16,5                |                  |
| Ενέργεια από το αέριο σύνθεσης προς την MEK (MJ)                       | 148,2               |                  |
| Απόδοση MEK (ηλεκτρική ενέργεια, %)                                    | 20                  |                  |
| Απόδοση MEK (θερμική ενέργεια, %)                                      | 50                  | Εύρος: 45 - 50   |
| Απόδοση MEK (απώλειες, %)  | 30                  | Εύρος: 30 - 35   |

|  |                     |                |
|--|---------------------|----------------|
| Ηλεκτρική ενέργεια από MEK (MJ)  | 29,6                | Εξίσωση 6.7    |
| Θερμική ενέργεια από MEK (MJ)  | 74,1                | Εξίσωση 6.8    |
| Απώλειες από MEK (MJ)  | 44,5                | Εξίσωση 6.9    |
| Θερμική ενέργεια από καυσάερια της MEK (MJ)  | 0,4                 | Εξίσωση 6.11   |
| Θερμική ενέργεια από ψύξη αερίου σύνθεσης (MJ)   | 3,3                 | Εξίσωση 6.12   |
| Θερμική ενέργεια από αεριοποιητή (MJ)  | 8,2                 |                |
| Συνολική παροχή θερμικής ενέργειας (MJ ή kWh)  | 102,5 ή <b>28,5</b> | Εξίσωση 6.10   |
| <b>Ισοζύγιο θερμικής ενέργειας</b>   |                     |                |
| Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξήρανση θεωρητικά (kWh)                             | 19,2                |                |
| Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξηραντήριο (kWh)                                    | 31,6                |                |
| Εκτιμώμενο ποσοστό απωλειών λόγω μεταφοράς θερμότητας (%)                              | 20                  | Εύρος: 15 - 30 |
| Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξηραντήριο, συμπεριλαμβανομένων των απωλειών (kWh)  | 38,0                |                |
| Συνολική παροχή θερμικής ενέργειας από μονάδα αεριοποίησης - παραγωγής ενέργειας (kWh) | 28,5                |                |
| Καθαρή θερμική ενέργεια (kWh)  | <b>- 9,5</b>        |                |

## 10.10 Υπολογισμοί ισοζυγίου ηλεκτρικής ενέργειας της πιλοτικής μονάδας

Πίνακας 10.7 Υπολογισμοί ισοζυγίου ηλεκτρικής ενέργειας της πιλοτικής μονάδας όπως είναι εγκατεστημένη στην ΕΕΛ Ρεθύμνου (Δυναμικότητα: 5.000 m<sup>3</sup>/d, Υλικό τροφοδοσίας: 50% μικροκοσκινισμένα βιοστερεά - 50% ηλιακά ξηραμένα δευτεροβάθμια ιλύς).

| Περιγραφή   | Εγκατεστημένη ισχύς (kW) | Χρόνος (h/d) | Καταναλισκόμενη ενέργεια (kWh) |
|---|--------------------------|--------------|--------------------------------|
| <b>Μικροκοσκίνιση</b>                                   |                          |              |                                |
| Σύστημα ανακυκλοφορίας νερού                            | 1,10                     | 24,00        | 26,40                          |
| Διάταξη πλύσης φίλτρου ιμάντα                           | 0,90                     | 2,00         | 1,80                           |
| Φίλτρο ιμάντα   | 0,75                     | 24,00        | 18,00                          |
| Κοχλίας εξόδου  | 0,25                     | 24,00        | 6,00                           |
| <b>Συνολικά</b>   | <b>3,00</b>              |              | <b>52,20</b>                   |
| <b>Τροφοδοσία ξηραντηρίου</b>                           |                          |              |                                |
| Κοχλίας από μικροκόσκινο προς ξηραντήριο                | 0,55                     | 0,80         | 0,44                           |
| Κοχλίας από δοχείο δευτεροβάθμιας ιλύος προς ξηραντήριο | 0,55                     | 0,40         | 0,22                           |
| Αναβατήριο τροφοδοσίας ξηραντηρίου                      | 0,55                     | 0,17         | 0,09                           |
| <b>Συνολικά</b>   | <b>1,65</b>              |              | <b>0,75</b>                    |
| <b>Ξήρανση</b>  |                          |              |                                |
| Γραμμή αποθήκευσης και ανάμιξης                         | 2,20                     | 24,00        | 52,80                          |
| Γραμμή ξήρανσης   | 2,20                     | 24,00        | 52,80                          |



|   |             |  |               |
|---|-------------|--|---------------|
| Βαλβίδα μεταξύ γραμμών                        | 1,00        | 0,03                                     | 0,03          |
| Ανεμιστήρας (είσοδος αέρα)                    | 2,00        | 24,00                                    | 48,00         |
| Ανεμιστήρας (έξοδος αέρα)                     | 2,00        | 24,00                                    | 48,00         |
| <b>Συνολικά</b>                               | <b>9,40</b> |  | <b>201,63</b> |
| <b>Τροφοδοσία αεριοποιητή</b>                 |             |  |               |
| Κοχλίας από ξηραντήριο προς μπρικετομηχανή    | 1,20        | 2,00                                     | 2,40          |
| Μπρικετομηχανή                                | 0,80        | 24,00                                    | 19,20         |
| Αναμικτήρας βιοστερεών μπρικετομηχανής        | 0,08        | 24,00                                    | 1,92          |
| <b>Συνολικά</b>                               | <b>2,08</b> |  | <b>23,52</b>  |
| <b>Αεριοποίηση - παραγωγή ενέργειας</b>       |             |  |               |
| Αναμικτήρας βιοστερεών αεριοποιητή            | 0,25        | 0,80                                     | 0,20          |
| Σύστημα απομάκρυνσης τέφρας                   | 0,55        | 0,40                                     | 0,22          |
| Αντλία πλυντηρίδας                            | 0,35        | 24,00                                    | 8,40          |
| MEK   | 0,12        | 24,00                                    | 2,88          |
| PLC και αισθητήρια                            | 0,25        | 24,00                                    | 6,00          |
| Ηλεκτροβάνες                                  | 0,06        | 0,02                                     | 0,00          |
| H/Y   | 0,20        | 24,00                                    | 4,80          |
| <b>Συνολικά</b>                               | <b>1,78</b> |  | <b>22,50</b>  |
| <b>Ισοζύγιο ισχύος - ηλεκτρικής ενέργειας</b> |             |  |               |
| Παραγόμενη ισχύς (kW)                         | 18,11       | Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (kWh)      | 434,64        |
| Καταναλισκόμενη ισχύς (kW)                    | 12,53       | Καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια (kWh) | 300,61        |
| Καθαρή ισχύς (kW)                             | <b>5,58</b> | Καθαρή ηλεκτρική ενέργεια (kWh)          | <b>134,03</b> |

Πίνακας 10.8 Υπολογισμοί ισοζυγίου ηλεκτρικής ενέργειας της πιλοτικής μονάδας σε ΕΕΛ με βελτιωμένη διάταξη στον χώρο (Δυναμικότητα: 5.000 m<sup>3</sup>/d, Υλικό τροφοδοσίας: 100% μικροκοσκινισμένα βιοστερεά).

| Περιγραφή                     | Εγκατεστημένη ισχύς (kW) | Χρόνος (h/d) | Καταναλισκόμενη ενέργεια (kWh) |
|-------------------------------|--------------------------|--------------|--------------------------------|
| <b>Μικροκοσκίνιση</b>         |                          |              |                                |
| Σύστημα ανακυκλοφορίας νερού  | 1,10                     | 24,00        | 26,40                          |
| Διάταξη πλύσης φίλτρου ιμάντα | 0,90                     | 2,00         | 1,80                           |
| Φίλτρο ιμάντα                 | 0,75                     | 24,00        | 18,00                          |
| Κοχλίας εξόδου                | 0,25                     | 24,00        | 6,00                           |
| <b>Συνολικά</b>               | <b>3,00</b>              |              | <b>52,20</b>                   |
| <b>Ξήρανση</b>                |                          |              |                                |
| Γραμμή ξήρανσης #1            | 2,20                     | 24,00        | 52,80                          |
| Γραμμή ξήρανσης #2            | 2,20                     | 24,00        | 52,80                          |

|   |              |   |               |
|---|--------------|---|---------------|
| Ανεμιστήρας (είσοδος αέρα)                    | 2,00         | 24,00                                       | 48,00         |
| Ανεμιστήρας (έξοδος αέρα)                     | 2,00         | 24,00                                       | 48,00         |
| <b>Συνολικά</b>                               | <b>8,40</b>  |   | <b>201,60</b> |
| <b>Τροφοδοσία αεριοποιητή</b>                 |              |   |               |
| Μπρικετομηχανή                                | 0,80         | 24,00                                       | 19,20         |
| Αναμικτήρας βιοστερεών<br>μπρικετομηχανής     | 0,08         | 24,00                                       | 1,92          |
| <b>Συνολικά</b>                               | <b>0,88</b>  |   | <b>21,12</b>  |
| <b>Αεριοποίηση - παραγωγή ενέργειας</b>       |              |   |               |
| Αναμικτήρας βιοστερεών<br>αεριοποιητή         | 0,25         | 0,80  | 0,20          |
| Σύστημα απομάκρυνσης<br>τέφρας                | 0,55         | 0,40  | 0,22          |
| Αντλία πλυντηρίδας                            | 0,35         | 24,00                                       | 8,40          |
| ΜΕΚ   | 0,12         | 24,00                                       | 2,88          |
| PLC και αισθητήρια                            | 0,25         | 24,00                                       | 6,00          |
| Ηλεκτροβάνες                                  | 0,06         | 0,02  | 0,00          |
| Η/Υ   | 0,20         | 24,00                                       | 4,80          |
| <b>Συνολικά</b>                               | <b>1,78</b>  |   | <b>22,50</b>  |
| <b>Ισοζύγιο ισχύος - ηλεκτρικής ενέργειας</b> |              |   |               |
| Παραγόμενη ισχύς (kW)                         | 9,89         | Παραγόμενη ηλεκτρική<br>ενέργεια (kWh)      | 237,36        |
| Καταναλισκόμενη ισχύς (kW)                    | 12,39        | Καταναλισκόμενη ηλεκτρική<br>ενέργεια (kWh) | 297,42        |
| Καθαρή ισχύς (kW)                             | <b>-2,50</b> | Καθαρή ηλεκτρική ενέργεια<br>(kWh)          | <b>-60,06</b> |

Πίνακας 10.9 Υπολογισμοί ισοζυγίου ηλεκτρικής ενέργειας της πιλοτικής μονάδας σε ΕΕΛ με βελτιωμένη διάταξη στον χώρο (Δυναμικότητα: 10.000 m<sup>3</sup>/d, Υλικό τροφοδοσίας: 100% μικροκοσκινισμένα βιοστερεά).

| Περιγραφή                        | Εγκατεστημένη<br>ισχύς (kW) | Πολ/σμός για<br>2πλάσια<br>δυναμικότητα | Χρόνος (h/d) | Καταναλισκόμενη<br>ενέργεια (kWh) |
|----------------------------------|-----------------------------|---|--------------|-----------------------------------|
| <b>Μικροκοσκίνιση</b>            |                             |   |              |                                   |
| Σύστημα ανακυκλοφορίας<br>νερού  | 1,10                        | 2,00                                    | 24,00        | 52,80                             |
| Διάταξη πλύσης φίλτρου<br>ιμάντα | 0,90                        | 2,00                                    | 2,00         | 3,60                              |
| Φίλτρο ιμάντα                    | 0,75                        | 2,00                                    | 24,00        | 36,00                             |
| Κοχλίας εξόδου                   | 0,25                        | 2,00                                    | 24,00        | 12,00                             |
| <b>Συνολικά</b>                  | <b>3,00</b>                 |   |              | <b>104,40</b>                     |
| <b>Ξήρανση</b>                   |                             |   |              |                                   |
| Γραμμή ξήρανσης #1               | 2,20                        | 1,00                                    | 24,00        | 52,80                             |
| Γραμμή ξήρανσης #2               | 2,20                        | 1,00                                    | 24,00        | 52,80                             |
| Ανεμιστήρας (είσοδος αέρα)       | 2,00                        | 1,00                                    | 24,00        | 48,00                             |
| Ανεμιστήρας (έξοδος αέρα)        | 2,00                        | 1,00                                    | 24,00        | 48,00                             |

|   |             |                              |  |               |
|---|-------------|------------------------------|--|---------------|
| <b>Συνολικά</b>                               | <b>8,40</b> |                              |  | <b>201,60</b> |
| <b>Τροφοδοσία αεριοποιητή</b>                 |             |                              |  |               |
| Μπρικετομηχανή                                | 0,80        | 1,00                         | 24,00                                    | 19,20         |
| Αναμικτήρας βιοστερεών μπρικετομηχανής        | 0,08        | 2,00                         | 24,00                                    | 3,84          |
| <b>Συνολικά</b>                               | <b>0,88</b> |                              |  | <b>23,04</b>  |
| <b>Αεριοποίηση - παραγωγή ενέργειας</b>       |             |                              |  |               |
| Αναμικτήρας βιοστερεών αεριοποιητή            | 0,25        | 1,00                         | 0,80                                     | 0,20          |
| Σύστημα απομάκρυνσης τέφρας                   | 0,55        | 1,00                         | 0,40                                     | 0,22          |
| Αντλία πλυντηρίδας                            | 0,35        | 1,00                         | 24,00                                    | 8,40          |
| ΜΕΚ   | 0,12        | 2,00                         | 24,00                                    | 5,76          |
| PLC και αισθητήρια                            | 0,25        | 1,00                         | 24,00                                    | 6,00          |
| Ηλεκτροβάνες                                  | 0,06        | 1,00                         | 0,02                                     | 0,00          |
| Η/Υ   | 0,20        | 1,00                         | 24,00                                    | 4,80          |
| <b>Συνολικά</b>                               | <b>1,78</b> |                              |  | <b>25,38</b>  |
| <b>Ισοζύγιο ισχύος - ηλεκτρικής ενέργειας</b> |             |                              |  |               |
| Παραγόμενη ισχύς (kW)                         | 19,78       | <b>Πολλαπλασιασμός επί 2</b> | Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (kWh)      | 474,72        |
| Καταναλισκόμενη ισχύς (kW)                    | 14,77       |                              | Καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια (kWh) | 354,42        |
| Καθαρή ισχύς (kW)                             | <b>5,01</b> |                              | Καθαρή ηλεκτρική ενέργεια (kWh)          | <b>120,30</b> |

Πίνακας 10.10 Υπολογισμοί ισοζυγίου ηλεκτρικής ενέργειας της πιλοτικής μονάδας σε ΕΕΛ με βελτιωμένη διάταξη στον χώρο (Δυναμικότητα: 25.000 m<sup>3</sup>/d, Υλικό τροφοδοσίας: 100% μικροκοσκινισμένα βιοστερεά).

| Περιγραφή                     | Εγκατεστημένη ισχύς (kW) | Πολ/σμός για 5πλάσια δυναμικότητα | Χρόνος (h/d) | Καταναλισκόμενη ενέργεια (kWh) |
|-------------------------------|--------------------------|-----------------------------------|--------------|--------------------------------|
| <b>Μικροκοσκίνιση</b>         |                          |                                   |              |                                |
| Σύστημα ανακυκλοφορίας νερού  | 1,10                     | 5,00                              | 24,00        | 132,00                         |
| Διάταξη πλύσης φίλτρου ιμάντα | 0,90                     | 5,00                              | 2,00         | 9,00                           |
| Φίλτρο ιμάντα                 | 0,75                     | 5,00                              | 24,00        | 90,00                          |
| Κοχλίας εξόδου                | 0,25                     | 5,00                              | 24,00        | 30,00                          |
| <b>Συνολικά</b>               | <b>3,00</b>              |                                   |              | <b>261,00</b>                  |
| <b>Ξήρανση</b>                |                          |                                   |              |                                |
| Γραμμή ξήρανσης #1            | 2,20                     | 1,00                              | 24,00        | 52,80                          |
| Γραμμή ξήρανσης #2 #3         | 2,20                     | 2,00                              | 24,00        | 105,60                         |
| Ανεμιστήρας (είσοδος αέρα)    | 2,00                     | 1,25                              | 24,00        | 60,00                          |
| Ανεμιστήρας (έξοδος αέρα)     | 2,00                     | 1,25                              | 24,00        | 60,00                          |

|   |              |                              |  |               |
|---|--------------|------------------------------|--|---------------|
| <b>Συνολικά</b>                               | <b>8,40</b>  |                              |  | <b>278,40</b> |
| <b>Τροφοδοσία αεριοποιητή</b>                 |              |                              |  |               |
| Μπρικετομηχανή                                | 0,80         | 2,00                         | 24,00                                    | 38,40         |
| Αναμικτήρας βιοστερεών μπρικετομηχανής        | 0,08         | 5,00                         | 24,00                                    | 9,60          |
| <b>Συνολικά</b>                               | <b>0,88</b>  |                              |  | <b>48,00</b>  |
| <b>Αεριοποίηση - παραγωγή ενέργειας</b>       |              |                              |  |               |
| Αναμικτήρας βιοστερεών αεριοποιητή            | 0,25         | 1,00                         | 0,80                                     | 0,20          |
| Σύστημα απομάκρυνσης τέφρας                   | 0,55         | 1,00                         | 0,40                                     | 0,22          |
| Αντλία πλυντηρίδας                            | 0,35         | 1,00                         | 24,00                                    | 8,40          |
| ΜΕΚ   | 0,12         | 5,00                         | 24,00                                    | 14,40         |
| PLC και αισθητήρια                            | 0,25         | 1,00                         | 24,00                                    | 6,00          |
| Ηλεκτροβάνες                                  | 0,06         | 1,00                         | 0,02                                     | 0,00          |
| Η/Υ   | 0,20         | 1,00                         | 24,00                                    | 4,80          |
| <b>Συνολικά</b>                               | <b>1,78</b>  |                              |  | <b>34,02</b>  |
| <b>Ισοζύγιο ισχύος - ηλεκτρικής ενέργειας</b> |              |                              |  |               |
| Παραγόμενη ισχύς (kW)                         | 49,45        | <b>Πολλαπλασιασμός επί 5</b> | Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (kWh)      | 1186,80       |
| Καταναλισκόμενη ισχύς (kW)                    | 25,89        |                              | Καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια (kWh) | 621,42        |
| Καθαρή ισχύς (kW)                             | <b>23,56</b> |                              | Καθαρή ηλεκτρική ενέργεια (kWh)          | <b>565,38</b> |

Πίνακας 10.11 Υπολογισμοί ισοζυγίου ηλεκτρικής ενέργειας της πιλοτικής μονάδας σε ΕΕΛ με βελτιωμένη διάταξη στον χώρο (Δυναμικότητα: 5.000 m<sup>3</sup>/d, Υλικό τροφοδοσίας: 50% μικροκοσκινισμένα βιοστερεά - 50% ηλιακά ξηραμένα δευτεροβάθμια ιλύς).

| Περιγραφή   | Εγκατεστημένη ισχύς (kW) | Χρόνος (h/d) | Καταναλισκόμενη ενέργεια (kWh) |
|---|--------------------------|--------------|--------------------------------|
| <b>Μικροκοσκίνιση</b>                                   |                          |              |                                |
| Σύστημα ανακυκλοφορίας νερού                            | 1,10                     | 24,00        | 26,40                          |
| Διάταξη πλύσης φίλτρου ιμάντα                           | 0,90                     | 2,00         | 1,80                           |
| Φίλτρο ιμάντα   | 0,75                     | 24,00        | 18,00                          |
| Κοχλίας εξόδου  | 0,25                     | 24,00        | 6,00                           |
| <b>Συνολικά</b>   | <b>3,00</b>              |              | <b>52,20</b>                   |
| <b>Τροφοδοσία ξηραντηρίου</b>                           |                          |              |                                |
| Κοχλίας από δοχείο δευτεροβάθμιας ιλύος προς ξηραντήριο | 0,55                     | 0,40         | 0,22                           |
| <b>Συνολικά</b>   | <b>0,55</b>              |              | <b>0,22</b>                    |
| <b>Ξήρανση</b>  |                          |              |                                |

|   |             |  |               |
|---|-------------|--|---------------|
| Γραμμή ξήρανσης #1                            | 2,20        | 24,00                                    | 52,80         |
| Γραμμή ξήρανσης #2                            | 2,20        | 24,00                                    | 52,80         |
| Ανεμιστήρας (είσοδος αέρα)                    | 2,00        | 24,00                                    | 48,00         |
| Ανεμιστήρας (έξοδος αέρα)                     | 2,00        | 24,00                                    | 48,00         |
| <b>Συνολικά</b>                               | <b>8,40</b> |  | <b>201,60</b> |
| <b>Τροφοδοσία αεριοποιητή</b>                 |             |  |               |
| Μπρικετομηχανή                                | 0,80        | 24,00                                    | 19,20         |
| Αναμικτήρας βιοστερεών μπρικετομηχανής        | 0,08        | 24,00                                    | 1,92          |
| <b>Συνολικά</b>                               | <b>0,88</b> |  | <b>21,12</b>  |
| <b>Αεριοποίηση - παραγωγή ενέργειας</b>       |             |  |               |
| Αναμικτήρας βιοστερεών αεριοποιητή            | 0,25        | 0,80                                     | 0,20          |
| Σύστημα απομάκρυνσης τέφρας                   | 0,55        | 0,40                                     | 0,22          |
| Αντλία πλυντηρίδας                            | 0,35        | 24,00                                    | 8,40          |
| ΜΕΚ   | 0,12        | 24,00                                    | 2,88          |
| PLC και αισθητήρια                            | 0,25        | 24,00                                    | 6,00          |
| Ηλεκτροβάνες                                  | 0,06        | 0,02                                     | 0,00          |
| H/Y   | 0,20        | 24,00                                    | 4,80          |
| <b>Συνολικά</b>                               | <b>1,78</b> |  | <b>22,50</b>  |
| <b>Ισοζύγιο ισχύος - ηλεκτρικής ενέργειας</b> |             |  |               |
| Παραγόμενη ισχύς (kW)                         | 18,11       | Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (kWh)      | 434,64        |
| Καταναλισκόμενη ισχύς (kW)                    | 12,40       | Καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια (kWh) | 297,64        |
| Καθαρή ισχύς (kW)                             | <b>5,71</b> | Καθαρή ηλεκτρική ενέργεια (kWh)          | <b>137,00</b> |

Πίνακας 10.12 Υπολογισμοί ισοζυγίου ηλεκτρικής ενέργειας της πιλοτικής μονάδας σε ΕΕΛ με βελτιωμένη διάταξη στον χώρο (Δυναμικότητα: 10.000 m<sup>3</sup>/d, Υλικό τροφοδοσίας: 50% μικροκοσκινισμένα βιοστερεά - 50% ηλιακά ξηραμένα δευτεροβάθμια ιλύς).

| Περιγραφή   | Εγκατεστημένη ισχύς (kW) | Πο/σμός για 2πλάσια δυναμικότητα | Χρόνος (h/d) | Καταναλισκόμενη ενέργεια (kWh) |
|---|--------------------------|----------------------------------|--------------|--------------------------------|
| <b>Μικροκοσκίνιση</b>                                   |                          |                                  |              |                                |
| Σύστημα ανακυκλοφορίας νερού                            | 1,10                     | 2,00                             | 24,00        | 52,80                          |
| Διάταξη πλύσης φίλτρου ιμάντα                           | 0,90                     | 2,00                             | 2,00         | 3,60                           |
| Φίλτρο ιμάντα   | 0,75                     | 2,00                             | 24,00        | 36,00                          |
| Κοχλίας εξόδου  | 0,25                     | 2,00                             | 24,00        | 12,00                          |
| <b>Συνολικά</b>   | <b>3,00</b>              |                                  |              | <b>104,40</b>                  |
| <b>Τροφοδοσία ξηραντηρίου</b>                           |                          |                                  |              |                                |
| Κοχλίας από δοχείο δευτεροβάθμιας ιλύος προς ξηραντήριο | 0,55                     | 2,00                             | 0,40         | 0,44                           |



|   |              |                              |  |               |
|---|--------------|------------------------------|--|---------------|
| <b>Συνολικά</b>                               | <b>0,55</b>  |                              |  | <b>0,44</b>   |
| <b>Ξήρανση</b>                                |              |                              |  |               |
| Γραμμή ξήρανσης #1                            | 2,20         | 1,00                         | 24,00                                    | 52,80         |
| Γραμμή ξήρανσης #2                            | 2,20         | 1,00                         | 24,00                                    | 52,80         |
| Ανεμιστήρας (είσοδος αέρα)                    | 2,00         | 1,00                         | 24,00                                    | 48,00         |
| Ανεμιστήρας (έξοδος αέρα)                     | 2,00         | 1,00                         | 24,00                                    | 48,00         |
| <b>Συνολικά</b>                               | <b>8,40</b>  |                              |  | <b>201,60</b> |
| <b>Τροφοδοσία αεριοποιητή</b>                 |              |                              |  |               |
| Μπρικετομηχανή                                | 0,80         | 1,00                         | 24,00                                    | 19,20         |
| Αναμικτήρας βιοστερεών μπρικετομηχανής        | 0,08         | 2,00                         | 24,00                                    | 3,84          |
| <b>Συνολικά</b>                               | <b>0,88</b>  |                              |  | <b>23,04</b>  |
| <b>Αεριοποίηση - παραγωγή ενέργειας</b>       |              |                              |  |               |
| Αναμικτήρας βιοστερεών αεριοποιητή            | 0,25         | 1,00                         | 0,80                                     | 0,20          |
| Σύστημα απομάκρυνσης τέφρας                   | 0,55         | 1,00                         | 0,40                                     | 0,22          |
| Αντλία πλυντηρίδας                            | 0,35         | 1,00                         | 24,00                                    | 8,40          |
| ΜΕΚ   | 0,12         | 2,00                         | 24,00                                    | 5,76          |
| PLC και αισθητήρια                            | 0,25         | 1,00                         | 24,00                                    | 6,00          |
| Ηλεκτροβάνες                                  | 0,06         | 1,00                         | 0,02                                     | 0,00          |
| Η/Υ   | 0,20         | 1,00                         | 24,00                                    | 4,80          |
| <b>Συνολικά</b>                               | <b>1,78</b>  |                              |  | <b>25,38</b>  |
| <b>Ισοζύγιο ισχύος - ηλεκτρικής ενέργειας</b> |              |                              |  |               |
| Παραγόμενη ισχύς (kW)                         | 36,22        | <b>Πολλαπλασιασμός επί 2</b> | Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (kWh)      | 869,28        |
| Καταναλισκόμενη ισχύς (kW)                    | 14,79        |                              | Καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια (kWh) | 354,86        |
| Καθαρή ισχύς (kW)                             | <b>21,43</b> |                              | Καθαρή ηλεκτρική ενέργεια (kWh)          | <b>514,42</b> |

Πίνακας 10.13 Υπολογισμοί ισοζυγίου ηλεκτρικής ενέργειας της πιλοτικής μονάδας σε ΕΕΛ με βελτιωμένη διάταξη στον χώρο (Δυναμικότητα: 25.000 m<sup>3</sup>/d, Υλικό τροφοδοσίας: 50% μικροκοσκινισμένα βιοστερεά - 50% ηλιακά ξηραμένα δευτεροβάθμια ιλύς).

| Περιγραφή                     | Εγκατεστημένη ισχύς (kW) | Πολ/σμός για 5πλάσια δυναμικότητα | Χρόνος (h/d) | Καταναλισκόμενη ενέργεια (kWh) |
|-------------------------------|--------------------------|-----------------------------------|--------------|--------------------------------|
| <b>Μικροκοσκίνιση</b>         |                          |                                   |              |                                |
| Σύστημα ανακυκλοφορίας νερού  | 1,10                     | 5,00                              | 24,00        | 132,00                         |
| Διάταξη πλύσης φίλτρου ιμάντα | 0,90                     | 5,00                              | 2,00         | 9,00                           |
| Φίλτρο ιμάντα                 | 0,75                     | 5,00                              | 24,00        | 90,00                          |
| Κοχλίας εξόδου                | 0,25                     | 5,00                              | 24,00        | 30,00                          |

|   |              |                              |  |                 |
|---|--------------|------------------------------|--|-----------------|
| <b>Συνολικά</b>   | <b>3,00</b>  |                              |  | <b>261,00</b>   |
| <b>Τροφοδοσία ξηραντηρίου</b>                           |              |                              |  |                 |
| Κοχλίας από δοχείο δευτεροβάθμιας ιλύος προς ξηραντήριο | 0,55         | 5,00                         | 0,40                                     | 1,10            |
| <b>Συνολικά</b>   | <b>0,55</b>  |                              |  | <b>1,10</b>     |
| <b>Ξήρανση</b>  |              |                              |  |                 |
| Γραμμή ξήρανσης #1                                      | 2,20         | 1,00                         | 24,00                                    | 52,80           |
| Γραμμή ξήρανσης #2 #3                                   | 2,20         | 2,00                         | 24,00                                    | 105,60          |
| Ανεμιστήρας (είσοδος αέρα)                              | 2,00         | 1,25                         | 24,00                                    | 60,00           |
| Ανεμιστήρας (έξοδος αέρα)                               | 2,00         | 1,25                         | 24,00                                    | 60,00           |
| <b>Συνολικά</b>   | <b>8,40</b>  |                              |  | <b>278,40</b>   |
| <b>Τροφοδοσία αεριοποιητή</b>                           |              |                              |  |                 |
| Μπρικετομηχανή  | 0,80         | 2,00                         | 24,00                                    | 38,40           |
| Αναμικτήρας βιοστερεών μπρικετομηχανής                  | 0,08         | 5,00                         | 24,00                                    | 9,60            |
| <b>Συνολικά</b>   | <b>0,88</b>  |                              |  | <b>48,00</b>    |
| <b>Αεριοποίηση - παραγωγή ενέργειας</b>                 |              |                              |  |                 |
| Αναμικτήρας βιοστερεών αεριοποιητή                      | 0,25         | 1,00                         | 0,80                                     | 0,20            |
| Σύστημα απομάκρυνσης τέφρας                             | 0,55         | 1,00                         | 0,40                                     | 0,22            |
| Αντλία πλυντηρίδας                                      | 0,35         | 1,00                         | 24,00                                    | 8,40            |
| ΜΕΚ   | 0,12         | 5,00                         | 24,00                                    | 14,40           |
| PLC και αισθητήρια                                      | 0,25         | 1,00                         | 24,00                                    | 6,00            |
| Ηλεκτροβάνες  | 0,06         | 1,00                         | 0,02                                     | 0,00            |
| Η/Υ   | 0,20         | 1,00                         | 24,00                                    | 4,80            |
| <b>Συνολικά</b>   | <b>1,78</b>  |                              |  | <b>34,02</b>    |
| <b>Ισοζύγιο ισχύος - ηλεκτρικής ενέργειας</b>           |              |                              |  |                 |
| Παραγόμενη ισχύς (kW)                                   | 90,55        | <b>Πολλαπλασιασμός επί 5</b> | Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (kWh)      | 2173,20         |
| Καταναλισκόμενη ισχύς (kW)                              | 25,94        |                              | Καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια (kWh) | 622,52          |
| Καθαρή ισχύς (kW)                                       | <b>64,61</b> |                              | Καθαρή ηλεκτρική ενέργεια (kWh)          | <b>1.550,68</b> |

Πίνακας 10.14 Υπολογισμοί ισοζυγίου ηλεκτρικής ενέργειας της πιλοτικής μονάδας σε ΕΕΛ με βελτιωμένη διάταξη στον χώρο (Δυναμικότητα: 5.000 m<sup>3</sup>/d, Υλικό τροφοδοσίας: 50% μικροκοσκινισμένα βιοστερεά - 50% αφυδατωμένη δευτεροβάθμια ιλύς).

| Περιγραφή                     | Εγκατεστημένη ισχύς (kW) | Χρόνος (h/d) | Καταναλισκόμενη ενέργεια (kWh) |
|-------------------------------|--------------------------|--------------|--------------------------------|
| <b>Μικροκοσκίνιση</b>         |                          |              |                                |
| Σύστημα ανακυκλοφορίας νερού  | 1,10                     | 24,00        | 26,40                          |
| Διάταξη πλύσης φίλτρου ιμάντα | 0,90                     | 2,00         | 1,80                           |
| Φίλτρο ιμάντα                 | 0,75                     | 24,00        | 18,00                          |

|   |              |  |                |
|---|--------------|--|----------------|
| Κοχλίας εξόδου  | 0,25         | 24,00                                    | 6,00           |
| <b>Συνολικά</b>   | <b>3,00</b>  |  | <b>52,20</b>   |
| <b>Τροφοδοσία ξηραντηρίου</b>                           |              |  |                |
| Κοχλίας από δοχείο δευτεροβάθμιας ιλύος προς ξηραντήριο | 0,55         | 0,40                                     | 0,22           |
| <b>Συνολικά</b>   | <b>0,55</b>  |  | <b>0,22</b>    |
| <b>Ξήρανση</b>  |              |  |                |
| Γραμμή ξήρανσης #1                                      | 2,20         | 24,00                                    | 52,80          |
| Γραμμή ξήρανσης #2                                      | 2,20         | 24,00                                    | 52,80          |
| Ανεμιστήρας (είσοδος αέρα)                              | 2,00         | 24,00                                    | 48,00          |
| Ανεμιστήρας (έξοδος αέρα)                               | 2,00         | 24,00                                    | 48,00          |
| <b>Συνολικά</b>   | <b>8,40</b>  |  | <b>201,60</b>  |
| <b>Τροφοδοσία αεριοποιητή</b>                           |              |  |                |
| Μπρικετομηχανή  | 0,80         | 24,00                                    | 19,20          |
| Αναμικτήρας βιοστερεών μπρικετομηχανής                  | 0,08         | 24,00                                    | 1,92           |
| <b>Συνολικά</b>   | <b>0,88</b>  |  | <b>21,12</b>   |
| <b>Αεριοποίηση - παραγωγή ενέργειας</b>                 |              |  |                |
| Αναμικτήρας βιοστερεών αεριοποιητή                      | 0,25         | 0,80                                     | 0,20           |
| Σύστημα απομάκρυνσης τέφρας                             | 0,55         | 0,40                                     | 0,22           |
| Αντλία πλυντηρίδας                                      | 0,35         | 24,00                                    | 8,40           |
| ΜΕΚ   | 0,12         | 24,00                                    | 2,88           |
| PLC και αισθητήρια                                      | 0,25         | 24,00                                    | 6,00           |
| Ηλεκτροβάνες  | 0,06         | 0,02                                     | 0,00           |
| Η/Υ   | 0,20         | 24,00                                    | 4,80           |
| <b>Συνολικά</b>   | <b>1,78</b>  |  | <b>22,50</b>   |
| <b>Ισοζύγιο ισχύος - ηλεκτρικής ενέργειας</b>           |              |  |                |
| Παραγόμενη ισχύς (kW)                                   | 8,22         | Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (kWh)      | 197,28         |
| Καταναλισκόμενη ισχύς (kW)                              | 12,40        | Καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια (kWh) | 297,64         |
| Καθαρή ισχύς (kW)                                       | <b>-4,18</b> | Καθαρή ηλεκτρική ενέργεια (kWh)          | <b>-100,36</b> |

Πίνακας 10.15 Υπολογισμοί ισοζυγίου ηλεκτρικής ενέργειας της πιλοτικής μονάδας σε ΕΕΛ με βελτιωμένη διάταξη στον χώρο (Δυναμικότητα: 10.000 m<sup>3</sup>/d, Υλικό τροφοδοσίας: 50% μικροκοσκινισμένα βιοστερεά - 50% αφυδατωμένη δευτεροβάθμια ιλύς).

| Περιγραφή                    | Εγκατεστημένη ισχύς (kW) | Πολ/σμός για 2πλάσια δυναμικότητα | Χρόνος (h/d) | Καταναλισκόμενη ενέργεια (kWh) |
|------------------------------|--------------------------|-----------------------------------|--------------|--------------------------------|
| <b>Μικροκοσκίνιση</b>        |                          |                                   |              |                                |
| Σύστημα ανακυκλοφορίας νερού | 1,10                     | 2,00                              | 24,00        | 52,80                          |

|   |             |                              |  |               |
|---|-------------|------------------------------|--|---------------|
| Διάταξη πλύσης φίλτρου ιμάντα                           | 0,90        | 2,00                         | 2,00                                     | 3,60          |
| Φίλτρο ιμάντα   | 0,75        | 2,00                         | 24,00                                    | 36,00         |
| Κοχλίας εξόδου  | 0,25        | 2,00                         | 24,00                                    | 12,00         |
| <b>Συνολικά</b>   | <b>3,00</b> |                              |  | <b>104,40</b> |
| <b>Τροφοδοσία ξηραντηρίου</b>                           |             |                              |  |               |
| Κοχλίας από δοχείο δευτεροβάθμιας ιλύος προς ξηραντήριο | 0,55        | 2,00                         | 0,40                                     | 0,44          |
| <b>Συνολικά</b>   | <b>0,55</b> |                              |  | <b>0,44</b>   |
| <b>Ξήρανση</b>  |             |                              |  |               |
| Γραμμή ξήρανσης #1                                      | 2,20        | 1,00                         | 24,00                                    | 52,80         |
| Γραμμή ξήρανσης #2                                      | 2,20        | 1,00                         | 24,00                                    | 52,80         |
| Ανεμιστήρας (είσοδος αέρα)                              | 2,00        | 1,00                         | 24,00                                    | 48,00         |
| Ανεμιστήρας (έξοδος αέρα)                               | 2,00        | 1,00                         | 24,00                                    | 48,00         |
| <b>Συνολικά</b>   | <b>8,40</b> |                              |  | <b>201,60</b> |
| <b>Τροφοδοσία αεριοποιητή</b>                           |             |                              |  |               |
| Μπρικετομηχανή  | 0,80        | 1,00                         | 24,00                                    | 19,20         |
| Αναμικτήρας βιοστερεών μπρικετομηχανής                  | 0,08        | 2,00                         | 24,00                                    | 3,84          |
| <b>Συνολικά</b>   | <b>0,88</b> |                              |  | <b>23,04</b>  |
| <b>Αεριοποίηση - παραγωγή ενέργειας</b>                 |             |                              |  |               |
| Αναμικτήρας βιοστερεών αεριοποιητή                      | 0,25        | 1,00                         | 0,80                                     | 0,20          |
| Σύστημα απομάκρυνσης τέφρας                             | 0,55        | 1,00                         | 0,40                                     | 0,22          |
| Αντλία πλυντηρίδας                                      | 0,35        | 1,00                         | 24,00                                    | 8,40          |
| ΜΕΚ   | 0,12        | 2,00                         | 24,00                                    | 5,76          |
| PLC και αισθητήρια                                      | 0,25        | 1,00                         | 24,00                                    | 6,00          |
| Ηλεκτροβάνες  | 0,06        | 1,00                         | 0,02                                     | 0,00          |
| Η/Υ   | 0,20        | 1,00                         | 24,00                                    | 4,80          |
| <b>Συνολικά</b>   | <b>1,78</b> |                              |  | <b>25,38</b>  |
| <b>Ισοζύγιο ισχύος - ηλεκτρικής ενέργειας</b>           |             |                              |  |               |
| Παραγόμενη ισχύς (kW)                                   | 16,44       | <b>Πολλαπλασιασμός επί 2</b> | Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (kWh)      | 394,56        |
| Καταναλισκόμενη ισχύς (kW)                              | 14,79       |                              | Καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια (kWh) | 354,86        |
| Καθαρή ισχύς (kW)                                       | <b>1,65</b> |                              | Καθαρή ηλεκτρική ενέργεια (kWh)          | <b>39,70</b>  |

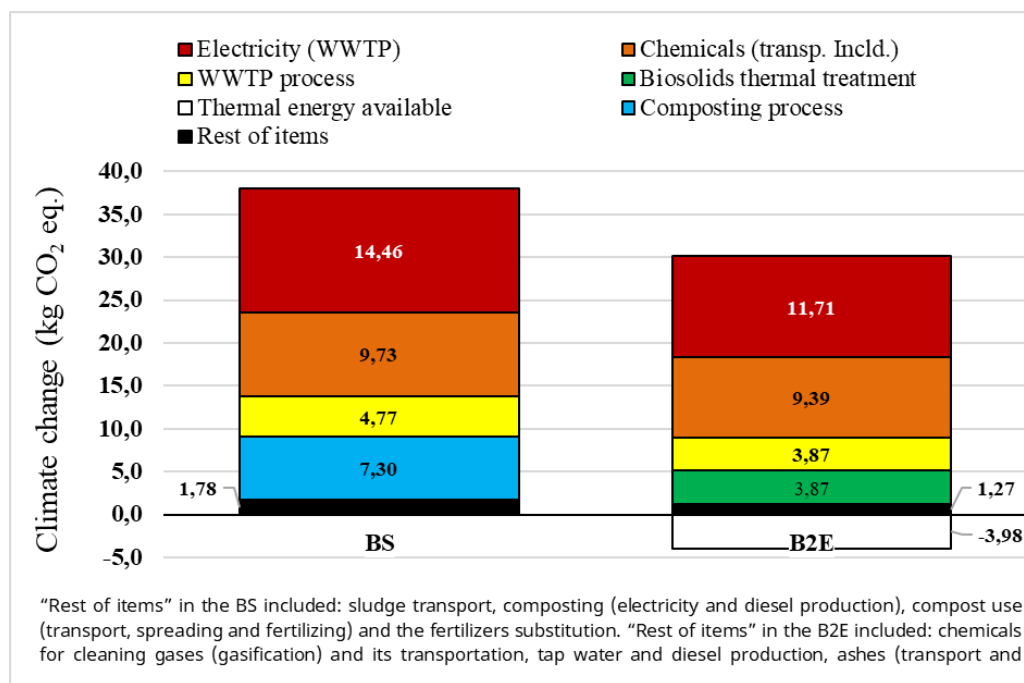
Πίνακας 10.16 Υπολογισμοί ισοζυγίου ηλεκτρικής ενέργειας της πιλοτικής μονάδας σε ΕΕΛ με βελτιωμένη διάταξη στον χώρο (Δυναμικότητα: 25.000 m<sup>3</sup>/d, Υλικό τροφοδοσίας: 50% μικροκοσκινισμένα βιοστερεά - 50% αφυδατωμένη δευτεροβάθμια ιλύς).

| Περιγραφή   | Εγκατεστημένη ισχύς (kW) | Πολ/σμός για 5πλάσια δυναμικότητα | Χρόνος (h/d)                        | Καταναλισκόμενη ενέργεια (kWh) |
|---|--------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| <b>Μικροκοσκίνιση</b>                                   |                          |                                   |                                     |                                |
| Σύστημα ανακυκλοφορίας νερού                            | 1,10                     | 5,00                              | 24,00                               | 132,00                         |
| Διάταξη πλύσης φίλτρου ιμάντα                           | 0,90                     | 5,00                              | 2,00                                | 9,00                           |
| Φίλτρο ιμάντα   | 0,75                     | 5,00                              | 24,00                               | 90,00                          |
| Κοχλίας εξόδου  | 0,25                     | 5,00                              | 24,00                               | 30,00                          |
| <b>Συνολικά</b>   | <b>3,00</b>              |                                   |                                     | <b>261,00</b>                  |
| <b>Τροφοδοσία ξηραντηρίου</b>                           |                          |                                   |                                     |                                |
| Κοχλίας από δοχείο δευτεροβάθμιας ιλύος προς ξηραντήριο | 0,55                     | 5,00                              | 0,40                                | 1,10                           |
| <b>Συνολικά</b>   | <b>0,55</b>              |                                   |                                     | <b>1,10</b>                    |
| <b>Ξήρανση</b>  |                          |                                   |                                     |                                |
| Γραμμή ξήρανσης #1                                      | 2,20                     | 1,00                              | 24,00                               | 52,80                          |
| Γραμμή ξήρανσης #2 #3                                   | 2,20                     | 2,00                              | 24,00                               | 105,60                         |
| Ανεμιστήρας (είσοδος αέρα)                              | 2,00                     | 1,25                              | 24,00                               | 60,00                          |
| Ανεμιστήρας (έξοδος αέρα)                               | 2,00                     | 1,25                              | 24,00                               | 60,00                          |
| <b>Συνολικά</b>   | <b>8,40</b>              |                                   |                                     | <b>278,40</b>                  |
| <b>Τροφοδοσία αεριοποιητή</b>                           |                          |                                   |                                     |                                |
| Μπρικετομηχανή  | 0,80                     | 2,00                              | 24,00                               | 38,40                          |
| Αναμικτήρας βιοστερεών μπρικετομηχανής                  | 0,08                     | 5,00                              | 24,00                               | 9,60                           |
| <b>Συνολικά</b>   | <b>0,88</b>              |                                   |                                     | <b>48,00</b>                   |
| <b>Αεριοποίηση - παραγωγή ενέργειας</b>                 |                          |                                   |                                     |                                |
| Αναμικτήρας βιοστερεών αεριοποιητή                      | 0,25                     | 1,00                              | 0,80                                | 0,20                           |
| Σύστημα απομάκρυνσης τέφρας                             | 0,55                     | 1,00                              | 0,40                                | 0,22                           |
| Αντλία πλυντηρίδας                                      | 0,35                     | 1,00                              | 24,00                               | 8,40                           |
| ΜΕΚ   | 0,12                     | 5,00                              | 24,00                               | 14,40                          |
| PLC και αισθητήρια                                      | 0,25                     | 1,00                              | 24,00                               | 6,00                           |
| Ηλεκτροβάνες  | 0,06                     | 1,00                              | 0,02                                | 0,00                           |
| Η/Υ   | 0,20                     | 1,00                              | 24,00                               | 4,80                           |
| <b>Συνολικά</b>   | <b>1,78</b>              |                                   |                                     | <b>34,02</b>                   |
| <b>Ισοζύγιο ισχύος - ηλεκτρικής ενέργειας</b>           |                          |                                   |                                     |                                |
| Παραγόμενη ισχύς (kW)                                   | 41,10                    | Πολλαπλασιασμός επί 5             | Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (kWh) | 986,40                         |

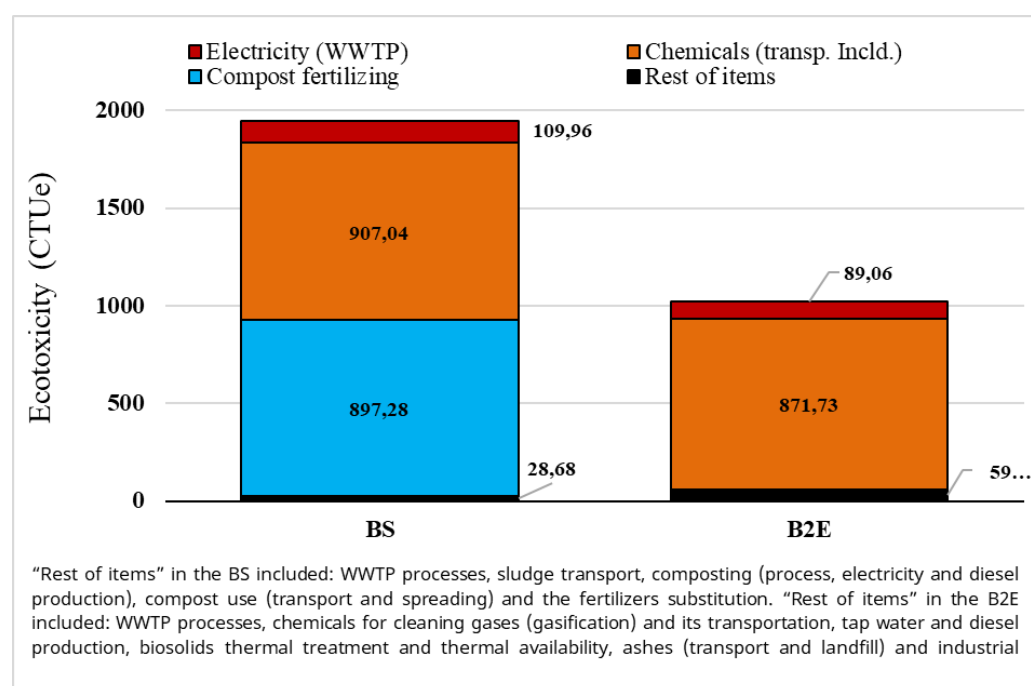


|                            |              |  |               |
|----------------------------|--------------|--|---------------|
| Καταναλισκόμενη ισχύς (kW) | 25,94        | Καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια (kWh) | 622,52        |
| Καθαρή ισχύς (kW)          | <b>15,16</b> | Καθαρή ηλεκτρική ενέργεια (kWh)          | <b>363,88</b> |

## 10.11 Διαγράμματα και πίνακες αποτελεσμάτων ΑΚΖ



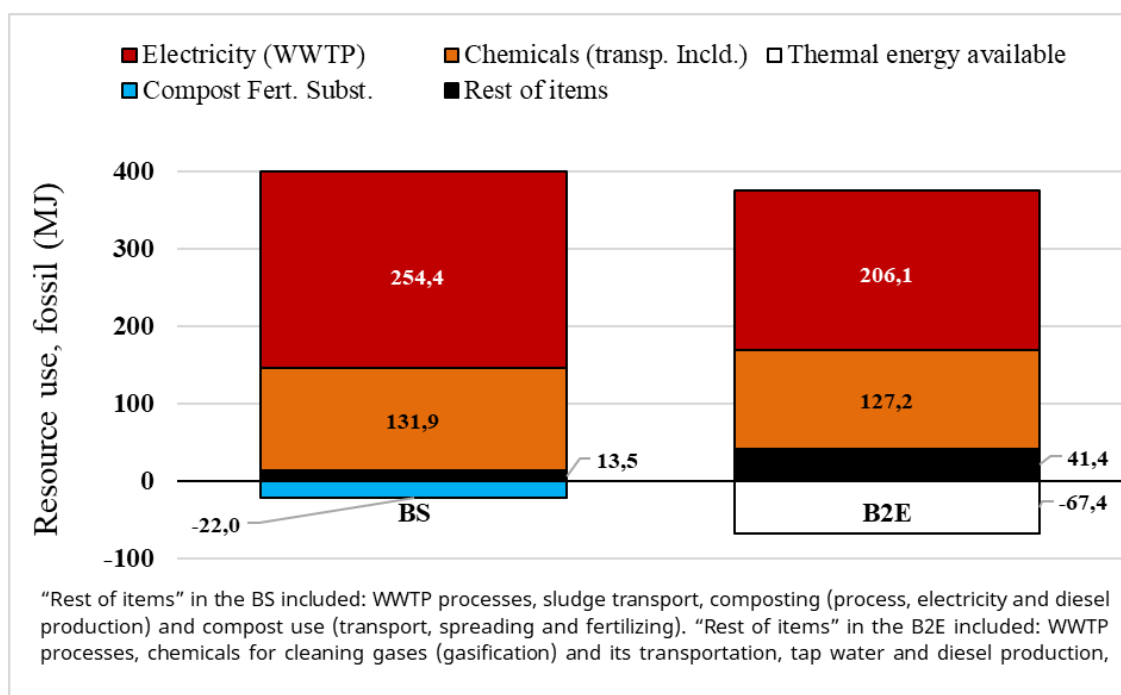
Διάγραμμα 10.4 Συνεισφορά των πιο σχετικών στοιχείων των συστημάτων BS και B2E αναφορικά με την κατηγορία επίπτωσης «κλιματική αλλαγή».



Διάγραμμα 10.5 Συνεισφορά των πιο σχετικών στοιχείων των συστημάτων BS και B2E αναφορικά με την κατηγορία επίπτωσης «οικοτοξικότητα γλυκού νερού».

Πίνακας 10.17 Συνεισφορά των πιο σχετικών παραγόντων των συστημάτων BS και B2E αναφορικά με τις κατηγορίες επίπτωσης «ανθρώπινη τοξικότητα - σχετική με καρκίνο» και «ανθρώπινη τοξικότητα - μη σχετική με καρκίνο».

| Ανθρώπινη τοξικότητα - σχετική με καρκίνο (CTU <sub>h</sub> )    |                         |                |                         |                 |
|--|-------------------------|----------------|-------------------------|-----------------|
| Παράγοντας   | Τιμή για BS             | Ποσοστό για BS | Τιμή για B2E            | Ποσοστό για B2E |
| Ηλεκτρική ενέργεια ΕΕΛ   | 5,12 x 10 <sup>-9</sup> | 0,29 %         | 4,15 x 10 <sup>-9</sup> | 36,97 %         |
| Χημικά στην ΕΕΛ (μεταφορά & διανομή)                             | 5,47 x 10 <sup>-9</sup> | 0,31 %         | 5,41 x 10 <sup>-9</sup> | 48,19 %         |
| Λίπανση με κομπόστ   | 1,77 x 10 <sup>-6</sup> | 99,34 %        | 0,00                    | 0,00 %          |
| Ανθρώπινη τοξικότητα - μη σχετική με καρκίνο (CTU <sub>h</sub> ) |                         |                |                         |                 |
| Παράγοντας   | Τιμή για BS             | Ποσοστό για BS | Τιμή για B2E            | Ποσοστό για B2E |
| Χημικά στην ΕΕΛ (μεταφορά & διανομή)                             | 9,57 x 10 <sup>-7</sup> | 0,58 %         | 9,36 x 10 <sup>-7</sup> | 58,04 %         |
| Θερμική επεξεργασία ιλύος  | 0,00                    | 0,00 %         | 4,92 x 10 <sup>-7</sup> | 30,50 %         |
| Λίπανση με κομπόστ   | 1,65 x 10 <sup>-4</sup> | 99,36 %        | 0,00                    | 0,00 %          |



Διάγραμμα 10.6 Συνεισφορά των πιο σχετικών στοιχείων των συστημάτων BS και B2E αναφορικά με την κατηγορία επίπτωσης «χρήση ορυκτών πόρων».