



Πολυτεχνείο Κρήτης

Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος

Εργαστήριο Σχεδιασμού Περιβαλλοντικών Διεργασιών

ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΒΙΟΣΤΕΡΕΩΝ ΣΤΗΝ ΚΡΗΤΗ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΣΠΥΡΙΔΩΝ ΛΟΪΖΟΣ

Τριμελής εξεταστική επιτροπή:

Καθηγητής Πέτρος Γκίκας (Επιβλέπων)

Καθηγητής Νικόλαος Καλογεράκης

Καθηγητής Κωνσταντίνος Χρυσικόπουλος

Χανιά, Σεπτέμβριος 2021

«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.»

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Πέτρο Γκίκα, για την ευκαιρία που μου έδωσε και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, ώστε να συνεργαστούμε και να εκπονήσω τη διπλωματική μου εργασία υπό την επίβλεψη του.

Παράλληλα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους βοηθούς του εργαστηρίου και ειδικότερα την Ανθή Μάναλη, για τη βοήθεια την οποία μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων, τους καθηγητές της εξεταστικής επιτροπής κ. Νικόλαο Καλογεράκη και κ. Κωνσταντίνο Κομνίτσα καθώς και τους συμφοιτητές με τους οποίους συνυπήρξαμε στο εργαστήριο το διάστημα αυτό, για την όμορφη συνεργασία μας.

Κλείνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους μηχανικούς και το προσωπικό για κάθε μια από τις Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων που επισκέφθηκα, για την άριστη συνεργασία μας και την προθυμία που έδειξαν ώστε να συλλέξω τα δείγματα που χρειαζόμουν για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σήμερα, η ραγδαία πληθυσμιακή και η παγκόσμια βιομηχανική ανάπτυξη έχουν επιφέρει τεράστια αύξηση των βιοστερεών που παράγονται καθημερινά. Οι ανάγκες τις οποίες δημιουργεί η συνεχόμενη αυξητική τάση της παραγωγής αποβλήτων, δεν μπορούν να καλυφθούν με τις μεθόδους που χρησιμοποιούνταν στο παρελθόν. 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.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να εκτιμηθούν οι δυνατότητες ενεργειακής αξιοποίησης των βιοστερεών στην Κρήτη. Αρχικά, συλλέχθηκαν δείγματα βιοστερεών από συνολικά 7 Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) και από τους 4 Νομούς της Κρήτης. Από το Νομό Χανίων συλλέχθηκαν δείγματα από τις ΕΕΛ των Χανίων και του Πλατανιά, από το Νομό Ρεθύμνου από την ΕΕΛ του Ρεθύμνου, από το Νομό Ηρακλείου από τις ΕΕΛ του Ηρακλείου και των Μαλίων και από το Νομό Λασιθίου από τις ΕΕΛ της Ελούντας και της Ιεράπετρας. Τα δείγματα αυτά συλλέχθηκαν από τη δευτεροβάθμια επεξεργασία, ενώ στις ΕΕΛ όπου πραγματοποιείται πρωτοβάθμια επεξεργασία και η διεργασία της χώνευσης, συλλέχθηκαν και δείγματα πρωτοβάθμιας, ομογενοποιημένης και χωνεμένης ιλύος. Στη συνέχεια, τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε θερμιδόμετρο βόμβας οξυγόνου για να μετρηθεί η θερμογόνο δύναμή τους. Οι μετρήσεις επαναλήφθηκαν 3 φορές για την ελαχιστοποίηση του σφάλματος και την εύρεση μιας αξιόπιστης μέσης τιμής. Παράλληλα, μετρήθηκαν τα ποσοστά σε ολικά στερεά (Total Solids, TS) και πτητικά στερεά (Volatile Solids, VS).

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων, η ανώτερη θερμογόνο δύναμη (Higher Heating Value, HHV) των βιοστερεών της Κρήτης κυμαίνεται από 15,090 MJ/kg έως 24,834 MJ/kg, με τις υψηλότερες τιμές θερμογόνου δύναμης να συναντώνται στα βιοστερεά που συλλέχθηκαν κατά την πρωτοβάθμια επεξεργασία στις ΕΕΛ των Χανίων (24,834 MJ/kg) και του Ηρακλείου (23,649 MJ/kg). Με βάση τις τιμές αυτές, συμπεραίνεται ότι τα βιοστερεά τα οποία συλλέχθηκαν, μπορούν να αποτελέσουν ένα αυτοτελές καύσιμο υλικό για την παραγωγή ενέργειας, αντικαθιστώντας επάξια ευρέως διαδεδομένα καύσιμα υλικά, όπως ο λιγνίτης, το συνθετικό αέριο άνθρακα, η παλέτα, το ξύλο, το χαρτί, το πλαστικό, τα σκουπίδια και ο άνθρακας. Παράλληλα, παρατηρήθηκε ότι στις ΕΕΛ όπου πραγματοποιείται η διεργασία της χώνευσης, η θερμογόνο δύναμη των βιοστερεών τα οποία συλλέχθηκαν από τη δευτεροβάθμια επεξεργασία είναι μεγαλύτερη από αυτή των βιοστερεών που συλλέχθηκαν από τη χώνευση. Οι τιμές της θερμογόνου δύναμης των χωνεμένων βιοστερεών κυμαίνονται από 15,090 MJ/kg έως 16,982 MJ/kg.

Παράλληλα, επιλέχθηκε η μέθοδος της ηλιακής ξήρανσης σε κλειστή εγκατάσταση για μερική ξήρανση της ιλύος και η μέθοδος της αεριοποίησης για την ενεργειακή αξιοποίηση της. Σύμφωνα με τις μετρήσεις, το ενεργειακό περιεχόμενο των βιοστερεών που συλλέχθηκαν ήταν ικανό να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες του συστήματος και να επιτευχθεί αυτόνομη καύση των βιοστερεών για την παραγωγή ενέργειας.

Λέξεις-κλειδιά: βιοστερεά, ενεργειακή αξιοποίηση, ΕΕΛ, πρωτοβάθμια επεξεργασία, δευτεροβάθμια επεξεργασία, αναερόβια χώνευση, θερμογόνο δύναμη, ηλιακή ξήρανση, αεριοποίηση.

ABSTRACT

Nowadays, the rapid population growth and the global industrial development have led to a huge increase in the daily produced biosolids. The needs that have arisen due to ever-increasing trend of waste production, cannot be met by the methods used in the past. The energy utilization of biosolids is the best solution for their management, as it is an environmentally friendly method, which utilizes the huge quantities of the produced biosolids, by exploiting them as a fuel for energy production.

The purpose of the present diploma thesis is to assess the potential for energy utilization of biosolids in Crete. Initially, samples of biosolids were collected from 7 Wastewater Treatment Plants (WWTPs), in the 4 Prefectures of Crete. From the Prefecture of Chania, samples from the WWTPs of Chania and Platanias were collected, from the Prefecture of Rethymnon from the WWTP of Rethymnon, from the Prefecture of Heraklion from the WWTPs of Heraklion and Malia and from the Prefecture of Lasithi from the WWTPs of Elounda and Ierapetra. These samples, were collected from the secondary treatment, while in the WWTPs where the primary treatment and the digestion process takes place, samples of primary, mixed and digested sludge were collected too. Then, the samples were placed in an oxygen bomb calorimeter, in order to measure their calorific value. The measurements were repeated 3 times, to minimize the possibility of error and find a reliable average value. Also, the percentages of Total Solids (TS) and Volatile Solids (VS) were measured.

According to the results of the measurements, the calorific value (Higher Heating Value, HHV) of the biosolids of Crete ranges from 15.090 MJ/kg to 24.834 MJ/kg, with the highest calorific values to be found on the biosolids that were collected from the primary treatment, in WWTPs of Chania (24.834 MJ/kg) and Heraklion (23,649 MJ/kg). Based on these values, it is concluded that those biosolids can be a stand-alone fuel for energy production, worthily replacing widely used fuels such as lignite, synthetic carbon gas, palette, wood, paper, plastic, rubbish and carbon. Furthermore, it is observed that in the WWTPs where the digestion process takes place, the calorific value of the biosolids that were collected from the secondary treatment, is bigger than that of the biosolids collected from the digestion process. The calorific value of the digested biosolids ranges from 15.090 MJ/kg to 16.982 MJ/kg.

At the same time, the solar drying method was selected in a closed installation for partial sludge drying and the gasification method for its energy utilization. According to the measurements, the energy content of the biosolids collected, was capable of covering the energy needs of the system and to achieve autonomous combustion of biosolids for energy production.

Keywords: biosolids; energy utilization; WWTP; primary treatment; secondary treatment; anaerobic digestion; calorific value; solar drying; gasification.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
ABSTRACT	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΒΙΟΣΤΕΡΕΑ.....	10
1.1 Εισαγωγή.....	10
1.2 Παραγωγή υγρών αστικών αποβλήτων.....	10
1.3 Χαρακτηριστικά υγρών αστικών αποβλήτων	11
1.3.1 Φυσικά χαρακτηριστικά	11
1.3.2 Χημικά χαρακτηριστικά	12
1.3.3 Βιολογικά χαρακτηριστικά.....	14
1.4 Διεργασίες διαχείρισης και επεξεργασίας υγρών αποβλήτων.....	15
1.4.1 Προεπεξεργασία υγρών αποβλήτων.....	15
1.4.2 Πρωτοβάθμια επεξεργασία υγρών αποβλήτων.....	17
1.4.3 Δευτεροβάθμια επεξεργασία υγρών αποβλήτων	17
1.4.4 Τριτοβάθμια επεξεργασία υγρών αποβλήτων	19
1.4.5 Απολύμανση	21
1.5 Παραγωγή βιοστερεών.....	22
1.6 Χαρακτηριστικά βιοστερεών	24
1.6.1 Συστατικά με γεωργική αξία.....	24
1.6.2 Επιβλαβή συστατικά για το περιβάλλον	25
1.6.3 Ποιοτικά χαρακτηριστικά των βιοστερεών	26
1.7 Διεργασίες διαχείρισης και επεξεργασίας βιοστερεών	27
1.7.1 Ομογενοποίηση ιλύος	27
1.7.2 Πάχυνση ιλύος.....	27
1.7.3 Σταθεροποίηση ιλύος.....	30
1.7.4 Αφυδάτωση ιλύος	34
1.7.5 Θερμική επεξεργασία ιλύος (ξήρανση, αποτέφρωση και αεριοποίηση)	37
1.8 Διάθεση βιοστερεών.....	38
1.8.1 Γεωργική χρήση	38
1.8.2 Εφαρμογή στο έδαφος και σε δασικές εκτάσεις.....	39
1.8.3 Αποτέφρωση και διάθεση τέφρας	41
1.8.4 Υγειονομική ταφή σε ΧΥΤΑ	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΒΙΟΣΤΕΡΕΩΝ	44
2.1 Αεριοποίηση	44
2.2 Καύση.....	47
2.3 Αναερόβια χώνευση	51
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΕΛ ΚΡΗΤΗΣ	55

3.1 ΕΕΛ Νομού Χανίων.....	55
3.2 ΕΕΛ Νομού Ρεθύμνου	56
3.3 ΕΕΛ Νομού Ηρακλείου	56
3.4 ΕΕΛ Νομού Λασιθίου	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	58
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	59
5.1 Μεθοδολογία.....	59
5.2 Μέτρηση ολικών στερεών (TS) και πτητικών στερεών (VS)	60
5.3 Υπολογισμός δυνατοτήτων ενεργειακής αξιοποίησης με τη χρήση θερμιδόμετρου	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	66
6.1 Αποτελέσματα-Συζήτηση	66
6.1.1 TS-VS	66
6.1.2 Ανώτερη Θερμογόνοος Δύναμη (HHV)	67
6.2 Εκτίμηση της δυνατότητας αξιοποίησης της ύλης για παραγωγή ενέργειας με χρήση θερμικών μεθόδων	73
6.2.1 Ηλιακή ξήρανση ύλης.....	73
6.2.2 Ενεργειακή αξιοποίηση βιοστερεών με τη μέθοδο της αεριοποίησης	75
6.2.3 Υπολογισμός παραγόμενης ενέργειας	77
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	82
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	83
8.1 Ξενόγλωσση βιβλιογραφία	83
8.2 Ελληνική βιβλιογραφία.....	87
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	90
9.1 Παράρτημα υπολογισμού ανώτερης θερμογόνοος δύναμης των βιοστερεών	90
9.2 Παράρτημα υπολογισμού ενεργειακών περιεχομένων των καυσαερίων της μηχανής εσωτερικής καύσης κατά προσέγγιση	92

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

- Πίνακας 1.1 Νομοθετικά όρια για τα επεξεργασμένα λύματα (Ψυλλάκη, 2014)
- Πίνακας 1.2 Συσχετίσεις μεταξύ BOD, COD και TOC (Ψυλλάκη, 2014)
- Πίνακας 1.3 Χαρακτηριστικά υγρών αστικών αποβλήτων και ποσοστά καθαρισμού μετά από κάθε στάδιο επεξεργασίας (Καρπουζάς, 2020)
- Πίνακας 2.1 Τυπική σύνθεση του καύσιμου αερίου που προκύπτει από την αεριοποίηση με αεριοποιητή σταθερής κλίνης καθοδικής ροής (Downdraft Gasifier) (Fytli & Zabaniotou, 2008)
- Πίνακας 2.2 Οριακές τιμές των καυσαερίων από τις μονάδες αποτέφρωσης (μέσες τιμές, αναγόμενες σε θερμοκρασία 273 K, πίεση 101,3 kPa, περιεκτικότητα σε ξηρό οξυγόνο 11% ξηρό αέριο), σύμφωνα με την Οδηγία 2000/76EC (ΤΕΕ, 2005)
- Πίνακας 2.3 Γενικοί όροι χώνευσης της ιλύος (Αγγελάκης και Τσομπάνογλου, 2004)
- Πίνακας 5.1 Δείγμα ιλύος που συλλέχθηκε ανά ΕΕΛ
- Πίνακας 6.1 Ποσοστά TS – VS (%)
- Πίνακας 6.2 Αποτελέσματα τιμών ανώτερης θερμογόνου δύναμης
- Πίνακας 6.3 Τιμές ανώτερης θερμογόνου δύναμης βιοστερεών της Κρήτης
- Πίνακας 6.4 Τιμές θερμογόνου δύναμης άλλων καύσιμων υλικών (Haider et al., 2016; Ευθυμιάδης, 2013)
- Πίνακας 6.5 Ανώτερη θερμογόνος δύναμη ιλύος κατά αύξουσα σειρά από άλλες έρευνες (Zygadlo, 2001; Grabowski & Oleszkiewicz, 1998; Kowalik, 1998; Abbas et al., 2011; Celebi et al., 2021; Huang et al., 2021; Menon et al., 2020; Barber, 2014; Arkadiusz, 2018; Hall, 1999; Fytli & Zabaniotou, 2008)
- Πίνακας 9.1 Υπολογισμός μίγματος τροφοδοσίας της μηχανής εσωτερικής καύσης
- Πίνακας 9.2 Υπολογισμός της σύστασης των καυσαερίων της μηχανής εσωτερικής καύσης

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

- Εικόνα 1.1 Δεξαμενή υποδοχής βοθρολυμάτων
- Εικόνα 1.2 Μηχανική σχάρα
- Εικόνα 1.3 Δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης
- Εικόνα 1.4 Κροκίδωση – Συσσωμάτωση – Καθίζηση
- Εικόνα 1.5 Βαρυτικός παχυντής
- Εικόνα 1.6 Πάχυνση με επίπλευση
- Εικόνα 1.7 Φυγοκεντρικοί παχυντές
- Εικόνα 1.8 Τράπεζα πάχυνσης ιλύος
- Εικόνα 1.9 Εγκαταστάσεις αναερόβια χώνευσης κυλινδρικού τύπου, Δανία
- Εικόνα 1.10 Εγκαταστάσεις αναερόβιας χώνευσης σφαιρικού τύπου, Εσθονία
- Εικόνα 1.11 Εγκαταστάσεις αναερόβιας χώνευσης ωοειδούς τύπου, Γερμανία
- Εικόνα 1.12 Αναμόχλευση κομπόστ σε κλειστό σύστημα
- Εικόνα 1.13 Κλίνες ξήρανσης
- Εικόνα 1.14 Αφυδάτωση ιλύος με ταινιοφιλτρόπρεσα, Ψυττάλεια, Αθήνα
- Εικόνα 1.15 Αφυδάτωση ιλύος με θαλαμοφιλτρόπρεσα, Ψυττάλεια, Αθήνα
- Εικόνα 1.16 Αφυδάτωση ιλύος με φυγοκέντρωση, Ψυττάλεια, Αθήνα
- Εικόνα 2.1 Σύστημα αεριοποίησης
- Εικόνα 2.2 Σύστημα καύσης
- Εικόνα 2.3 Στάδια της αναερόβιας χώνευσης
- Εικόνα 3.1 ΕΕΛ Κρήτης όπου συλλέχθηκε δείγμα ιλύος
- Εικόνα 5.1 Διάγραμμα ροής μιας τυπικής ΕΕΛ
- Εικόνα 5.2 Το θερμιδόμετρο XRY-1A (Oxygen Bomb Calorimeter) που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις.
- Εικόνα 5.3 Κεφαλή του Oxygen Bomb και οι δυο πόλοι όπου τοποθετείται το σύρμα ανάφλεξης
- Εικόνα 5.4 Κυλινδρική συσκευή οξυγόνου όπου έχει τοποθετηθεί το δείγμα
- Εικόνα 5.5 Τοποθέτηση Oxygen Bomb στο θερμιδόμετρο
- Εικόνα 5.6 Ενδείξεις Stir και Reset για την εκκίνηση της διαδικασίας
- Εικόνα 5.7 Ένδειξη Ignite και μια από τις 31 συνολικά αναγραφόμενες τιμές
- Εικόνα 6.1 Κλειστό σύστημα ηλιακής ξήρανσης
- Εικόνα 6.2 Αεριοποιητής καθοδικής ροής
- Εικόνα 6.3 Πολυκυκλώνας συγκράτησης
- Εικόνα 6.4 Πλυντηρίδα για την απομάκρυνση θεικών ενώσεων (Scrubber)

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

- Γράφημα 6.1 Τιμές θερμογόνου δύναμης μετά τη δευτεροβάθμια επεξεργασία
- Γράφημα 6.2 Σύγκριση τιμών για ΕΕΛ που πραγματοποιείται η διεργασία της χώνευσης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΒΙΟΣΤΕΡΕΑ

1.1 Εισαγωγή

Οι Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) στην Ελλάδα, και πιο συγκεκριμένα στην Κρήτη στην οποία επικεντρώνεται η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, παράγουν σημαντική ποσότητα βιοστερεών. Η ενεργειακή αξιοποίησή τους και η επαναχρησιμοποίησή τους, είναι προτιμότερη και φιλικότερη ως προς το περιβάλλον, συγκριτικά με τη διάθεση τους σε Χώρους Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ).

Η ιλύς συναντάται σε ημι-στερεή μορφή και μπορεί να παραχθεί από μια σειρά βιομηχανικών διεργασιών σε μονάδες επεξεργασίας λυμάτων. Πιο συγκεκριμένα θα μπορούσε να οριστεί ως ιλύς, το στερεό υπόλειμμα που προκύπτει από την επεξεργασία λυμάτων, όταν διαχωρίζεται το υγρό και στερεό φορτίο. Το στερεό φορτίο συλλέγεται για περαιτέρω επεξεργασία, ενώ το επεξεργασμένο υγρό εκρέει σε υδάτινους αποδέκτες (Fytli & Zabaniotou, 2008).

Τα συστατικά τα οποία περιέχονται στην ιλύ διαφέρουν ως προς τον τρόπο διαχείρισης και εφαρμογής. Για παράδειγμα, συστατικά όπως το οργανικό φορτίο (μετρούμενο συνήθως ως πτητικά στερεά -VS-) και τα θρεπτικά συστατικά τα οποία περιέχονται στην ιλύ (άζωτο -N-, φώσφορος -P-, κάλιο -K-, ασβέστιο -Ca-) μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν μετά από κατάλληλες διεργασίες. Από την άλλη, συστατικά όπως μέταλλα, τοξικές οργανικές ενώσεις αλλά και παθογόνοι μικροοργανισμοί απαιτούν προσεκτική διαχείριση για την ασφαλή και αποδεκτή διάθεση τους στο περιβάλλον.

Η ιλύς είναι δυνατό να συλλεχθεί από διάφορα τμήματα των ΕΕΛ, ανάλογα με το στάδιο επεξεργασίας στο οποίο βρίσκεται. Οι κατηγορίες ιλύος που προκύπτουν ανάλογα το στάδιο επεξεργασίας των λυμάτων είναι η πρωτοβάθμια ιλύς, η οποία παράγεται κατά την πρωτοβάθμια επεξεργασία των λυμάτων, η βιολογική ιλύς, η οποία παράγεται κατά τη δευτεροβάθμια επεξεργασία των λυμάτων, η μικτή (ομογενοποιημένη) ιλύς, η οποία προκύπτει από την ανάμειξη πρωτοβάθμιας και βιολογικής ιλύος και η τριτοβάθμια ιλύς, η οποία παράγεται κατά την τριτοβάθμια επεξεργασία των λυμάτων. Το τελικό προϊόν που προκύπτει μετά από την πλήρη επεξεργασία της ιλύος είναι ακίνδυνο και μπορεί να διατεθεί δίχως περιβαλλοντικούς κινδύνους στο περιβάλλον. Στη συγκεκριμένη εργασία συλλέχθηκε δείγμα ιλύος, κατά την πρωτοβάθμια επεξεργασία, κατά την δευτεροβάθμια επεξεργασία, κατά την ομογενοποίηση καθώς και τριτοβάθμια ιλύς, η οποία συλλέχθηκε από τη διεργασία της χώνευσης.

1.2 Παραγωγή υγρών αστικών αποβλήτων

Τα υγρά απόβλητα περιλαμβάνουν τα στερεά υπολείμματα τα οποία είναι διαλυμένα ή διασπαρμένα σε αιώρηση σε ένα υγρό μέσο (νερό ή κάποιο οργανικό διαλύτη) και αποτελούν μια από τις κυριότερες πηγές ρύπανσης του περιβάλλοντος παγκοσμίως.

Μια κατηγορία υγρών αστικών αποβλήτων, είναι τα νερά τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί απευθείας από τον άνθρωπο για την κάλυψη των αναγκών του -όπως η αφόδευση, η χρήση του μπάνιου, η προετοιμασία του φαγητού, γενικές καθαριότητες και πλυσίματα- γνωστά και

ως οικιακά απόβλητα (Οδηγία 91/271/ΕΟΚ 21.05.1991). Η ποσότητα των παραγόμενων οικιακών αποβλήτων ανά άτομο διαφέρει όχι μόνο από χώρα σε χώρα, αλλά και μεταξύ των περιοχών της ίδιας χώρας. Για αγροτικές περιοχές της Ελλάδας, της Ιταλίας κ.α. η ημερήσια παροχή ανά άτομο ανέρχεται στα 150 λίτρα, ενώ για αστικές περιοχές του Καναδά, της Ιαπωνίας και των ΗΠΑ ανέρχεται στα 500 λίτρα ανά ημέρα (Λέκκας, 2001). Παράλληλα στα αστικά λύματα συμπεριλαμβάνονται και τα απόβλητα τα οποία προέρχονται από δημόσια και ιδιωτικά κτίρια όπως πανεπιστήμια, σχολεία, εστιατόρια, καταστήματα, νοσοκομεία, χώροι εργασίας και δημόσιες επιχειρήσεις.

Μια άλλη μεγάλη κατηγορία υγρών αστικών αποβλήτων είναι τα βιομηχανικά απόβλητα. Σε αυτήν εμπεριέχονται τα λύματα που απορρίπτονται από κτίρια και χώρους που χρησιμοποιούνται για οποιαδήποτε εμπορική ή βιομηχανική δραστηριότητα και τα οποία δεν είναι οικιακά λύματα ή όμβρια ύδατα (Οδηγία 91/271/ΕΟΚ 21.05.1991). Οι εισροές από τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα επίσης, λόγω της μη απόλυτης στεγνότητας του αποχετευτικού συστήματος αλλά και νερά της βροχής μαζί με τα προϊόντα έκπλυσης των δρόμων μπορούν να θεωρηθούν πηγές προέλευσης των αστικών λυμάτων. Στις περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει παροχή αποχέτευσης από τη Δημοτική Υπηρεσία Ύδρευσης σε κάποια ακίνητα, τα λύματα και τα ακάθαρτα ύδατα συγκεντρώνονται προσωρινά σε υπόγειους χώρους, που είναι γνωστοί ως βόθροι ή σπητικές δεξαμενές. Τα βοθρολύματα μεταφέρονται με βυτιοφόρα οχήματα στο χώρο επεξεργασίας τους. Επεξεργάζονται είτε σε εγκαταστάσεις αποκλειστικής επεξεργασίας βοθρολυμάτων είτε σε ΕΕΛ (Γκίκας, 2020).

Υπό αυτές τις συνθήκες καθίσταται αναπόφευκτη η σημαντική ποιοτική υποβάθμιση των υδάτων. Η υποβάθμιση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι κατά τη χρήση του, το νερό γίνεται αποδέκτης πολλών βιολογικών και χημικών παραπροϊόντων, τα οποία είναι ικανά να προκαλέσουν πολλά περιβαλλοντικά προβλήματα κατά την απόρριψή τους, όπως ρύπανση και μόλυνση. Για τα υγρά απόβλητα τα οποία παράγονται κυρίως σε μεγάλα αστικά κέντρα, λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς τους σε ρυπογόνα συστατικά αλλά και του μεγάλου όγκου τους, κρίνεται αναγκαία η κατάλληλη επεξεργασία τους πριν τη διάθεσή τους στο περιβάλλον. Πρωταρχικός στόχος της επεξεργασίας των αποβλήτων είναι η απομάκρυνση των ρύπων και των παθογόνων μικροοργανισμών και μετέπειτα η εξουδετέρωση, δηλαδή η αδρανοποίησή τους.

1.3 Χαρακτηριστικά υγρών αστικών αποβλήτων

Τα υγρά απόβλητα μπορούν να χαρακτηριστούν από τη φυσική, χημική και βιολογική τους σύσταση.

1.3.1 Φυσικά χαρακτηριστικά

Στα φυσικά χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων περιλαμβάνονται το χρώμα, η θολερότητα, η οσμή, η θερμοκρασία και η περιεκτικότητα σε στερεά (Βλυσίδης, 2007). Το **χρώμα** συνδέεται με την προέλευση και το χρόνο παραμονής των υγρών αστικών αποβλήτων, καθώς τα φρέσκα απόβλητα εμφανίζουν καφέ-γκρι χρώμα. Η διάσπαση των οργανικών ενώσεων, έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του διαλυμένου οξυγόνου και συνεπώς τη μετατροπή του χρώματος αρχικά σε σκούρο γκρι και τελικώς σε μαύρο. Η **θολερότητα** οφείλεται κυρίως στην ύπαρξη αιωρούμενων οργανικών και ανόργανων σωματιδίων και με τον όρο αυτόν

εννοούμε την απουσία διαύγειας σε ένα υγρό δείγμα. Η απολύμανση νερού με υψηλές τιμές θολερότητας δεν είναι αποδοτική διότι πολλοί παθογόνοι οργανισμοί εγκλωβίζονται στα σωματίδια που αιωρούνται και προστατεύονται από το απολυμαντικό. Η **οσμή** προκαλείται από πτητικές ενώσεις που υπάρχουν στα λύματα ή προκύπτουν κατά την αποδόμηση οργανικού υλικού κάτω από αναερόβιες συνθήκες και γίνεται εντονότερη με την πάροδο του χρόνου. Επίσης είναι πιθανό οι οσμές να οφείλονται στις χημικές ενώσεις που χρησιμοποιήθηκαν (χλώριο, χλωροφαινόλες) ή στις δευτερογενείς αντιδράσεις που έλαβαν μέρος. Η **θερμοκρασία** των υγρών αποβλήτων κυμαίνεται μεταξύ 10-25°C (Σαββάκης, 2016) και εξαρτάται από την προέλευση των αποβλήτων. Το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου είναι υψηλότερη από αυτήν του περιβάλλοντος, εξαιρώντας φυσικά το καλοκαίρι. Είναι ένας από τους σημαντικότερους φυσικούς παράγοντες διότι επηρεάζει άμεσα την υδρόβια ζωή, την ταχύτητα των χημικών και βιοχημικών αντιδράσεων καθώς και την καταλληλότητα του νερού για παραγωγικές χρήσεις. Γνωρίζοντας ότι το οξυγόνο είναι λιγότερο διαλυτό στο ζεστό νερό συγκριτικά με το κρύο, η μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας ενός υδάτινου αποδέκτη ενδέχεται να δημιουργήσει μεγάλα προβλήματα μείωσης του οξυγόνου -ειδικότερα κατά τους καλοκαιρινούς μήνες- επηρεάζοντας άμεσα με αρνητικό τρόπο ολόκληρη την υδρόβια ζωή.

Τα υγρά απόβλητα περιέχουν μια ποικιλία **στερεών υλικών** από απορρίμματα έως κολλοειδή υλικά. Τα ολικά στερεά (Total Solids -TS-) είναι το στερεό υπόλειμμα που απομένει σε ένα δοχείο μετά την εξάτμιση του δείγματος και την ακόλουθη ξήρανση του σε φούρνο στους 103-105°C για μια ώρα. Τα ολικά στερεά διακρίνονται σε αιωρούμενα και διαλυμένα. Τα ολικά αιωρούμενα στερεά (Total Suspended Solids -TSS-) είναι το τμήμα των ολικών στερεών τα οποία παραμένουν σε φίλτρο από ίνες γυαλιού με ανοίγματα πόρων 2.0μm ή και λιγότερο. Τα ολικά διαλυμένα στερεά (Total Dissolved Solids -TDS-) είναι τα στερεά τα οποία κατά την ανάλυση των αιωρούμενων στερεών περνάνε το φίλτρο, με μέσο μέγεθος πόρων ίσο με 2.0μm και πάνε στο διήθημα. Τα αιωρούμενα στερεά, διακρίνονται σε στερεά που καθιζάνουν και μη. Τα καθιζάνοντα στερεά (Settleable Solids -SS-) ορίζονται ως η μάζα των αιωρούμενων στερεών που διαχωρίζεται από τον πυθμένα ογκομετρικού κυλίνδρου μετά από καθίζηση λυμάτων για μία ώρα. Οι ομάδες των ολικών στερεών αποτελούνται από δύο επιμέρους υποομάδες. Η μια αντιστοιχεί στο οργανικό υλικό (πτητικά στερεά, Volatile Solids -VS-) και η άλλη στο ανόργανο (μη πτητικά ή σταθερά στερεά, Fixed Solids -FS-) (Ψυλλάκη, 2014).

1.3.2 Χημικά χαρακτηριστικά

Στα χημικά χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων περιλαμβάνονται χημικές ενώσεις και στοιχεία οργανικής και ανόργανης προέλευσης (Ψυλλάκη, 2014). Τα πιο σημαντικά από αυτά είναι πρωτεΐνες, υδατάνθρακες, οργανικά συστατικά, λίπη και έλαια, βαρέα μέταλλα, pH, αλκαλικότητα, βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (Biochemical Oxygen Demand -BOD-), χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (Chemical Oxygen Demand -COD-) και ολικός οργανικός άνθρακας (Total Organic Carbon -TOC-). Οι **πρωτεΐνες** είναι οργανικές ενώσεις που περιέχουν σημαντικά ποσοστά αζώτου και προέρχονται από τροφές φυτικής ή ζωικής προέλευσης. Λόγω της ύπαρξης θείου στα μόρια τους, όταν βρίσκονται σε πολύ μεγάλες συγκεντρώσεις κατά την αποσύνθεση τους εκλύουν δυνατές οσμές. Αποτελούν το 40 έως 60 % (Μελίδης, 2016) του οργανικού υλικού στα αστικά απόβλητα. Οι **υδατάνθρακες** αποτελούνται από άνθρακα, υδρογόνο και οξυγόνο. Μερικοί υδατάνθρακες είναι διαλυτοί στο νερό (απλά σάκχαρα), ενώ άλλοι αδιάλυτοι (άμυλο). Οι διαλυτοί υδατάνθρακες που υπάρχουν στα λύματα αποικοδομούνται με μεγαλύτερη ευκολία συγκριτικά με τους αδιάλυτους. Αποτελούν το 25 έως 50 % (Μελίδης, 2016) του

οργανικού υλικού στα αστικά απόβλητα. Τα **έλαια και λίπη** είναι παρόμοια στη χημική τους σύσταση και αποτελούν εστέρες αλκοολών ή γλυκερίνης με λιπαρά οξέα. Τα γλυκερίδια τα οποία είναι υγρά σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ονομάζονται έλαια, ενώ εκείνα που είναι στερεά ονομάζονται λίπη. Εμφανίζουν μικρή διαλυτότητα στο νερό και χαμηλό ρυθμό βιολογικής αποδόμησης. Η μη απομάκρυνσή τους από τα απόβλητα, πριν αυτά διατεθούν στο περιβάλλον, είναι ικανή να προκαλέσει προβλήματα σε πολλούς ζωντανούς οργανισμούς. Αποτελούν περίπου το 8 έως 12 % (Μελίδης, 2016) του οργανικού υλικού στα αστικά απόβλητα.

Τα **οργανικά συστατικά του άζωτου και του φωσφόρου** είναι απαραίτητα θρεπτικά στοιχεία για την ανάπτυξη πολλών μικροοργανισμών. Σε μικρές ποσότητες είναι αναγκαία η ύπαρξή τους για τη βιολογική επεξεργασία. Όμως, για την αποφυγή φαινομένων, όπως αυτό του ευτροφισμού, η μέτρηση της συγκέντρωσης τους κρίνεται επιβεβλημένη, αφού αποτελούν σημαντική παράμετρο της ποιότητας της επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων. Τα **βαρέα μέταλλα**, είναι στοιχεία όπως ο χαλκός, ο μόλυβδος, το κάδμιο, ο ψευδάργυρος και το νικέλιο, τα οποία έχουν πυκνότητα μεγαλύτερη από 5.0 g/cm³ (Koller & Saleh, 2018) και αντιδρούν με τα μικροβιακά ένζυμα επιβραδύνοντας ή και αναστέλλοντας το μεταβολισμό τους. Η απομάκρυνσή τους από τα απόβλητα πριν αυτά διατεθούν στο περιβάλλον είναι μείζονος σημασίας αφού είναι ικανά να επιφέρουν το θάνατο πολλών οργανισμών σε ένα οικοσύστημα, με τις ανάλογες αρνητικές συνέπειες.

Ως **pH** ορίζεται το μέτρο της οξύτητας ή της αλκαλικότητας των υγρών αποβλήτων. Το εύρος τιμών του pH που είναι περιβαλλοντικά αποδεκτό για τη διατήρηση των περισσότερων μικροοργανισμών κυμαίνεται μεταξύ 6.0 έως 9.0, ενώ για τα επεξεργασμένα υγρά απόβλητα που διατίθενται στο περιβάλλον το αποδεκτό εύρος κυμαίνεται από 6.5 έως 9.5 σύμφωνα με τη Νομοθεσία (ΦΕΚ 32/82/Β/19-9-2017). Απαιτείται συνεχής έλεγχος των τιμών του pH, διότι τα όξινα υδατικά διαλύματα με χαμηλό pH, είναι πολύ πιθανό να προκαλέσουν διάβρωση στους αγωγούς και στο μηχανολογικό εξοπλισμό. Η **αλκαλικότητα** οφείλεται στην παρουσία υδροξειδίων [OH⁻], ανθρακικών ιόντων [CO₃⁻²] και όξινων ανθρακικών ιόντων [HCO₃⁻] όπως το κάλιο, το ασβέστιο, το νάτριο και το μαγνήσιο. Συνήθως εκφράζεται ως mg/l CaCO₃ (Σαββάκης, 2016). Η αλκαλικότητα στα υγρά απόβλητα συνεισφέρει στην αντίσταση ενάντια στις αλλαγές του pH που προκαλούνται από την προσθήκη οξέων. Είναι σημαντικό να γνωρίζουμε την αλκαλικότητα των υγρών αποβλήτων για την ασφαλή χρησιμοποίηση χημικών και βιολογικών διεργασιών επεξεργασίας.

Ως **βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD)**, ορίζεται η ποσότητα του οξυγόνου που καταναλώνεται από τους μικροοργανισμούς, για τη βιοχημική οξείδωση της οργανικής ουσίας που περιέχεται στα απόβλητα στη θερμοκρασία των 20°C (Βλυσίδης, 2007). Η διαδικασία αυτή ολοκληρώνεται πρακτικά σε 20 μέρες – όπου έχει καταναλωθεί το 95-99 % του ολικού BOD- και το προσδιοριζόμενο απαιτούμενο οξυγόνο θεωρείται το τελικό BOD. Βέβαια, επειδή η διαδικασία αυτή είναι αργή σχετικά, έχει επικρατήσει ο προσδιορισμός του BOD σε πέντε ημέρες (BOD₅). Στο διάστημα αυτό έχει επιτευχθεί οξείδωση των απλών οργανικών ουσιών που αντιπροσωπεύουν ένα ποσοστό της τάξεως του 60-70 % των συνολικών οργανικών ουσιών (Σαββάκης, 2016). Σαν **χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD)**, ορίζεται η ποσότητα οξυγόνου που απαιτείται για την πλήρη χημική οξείδωση της οργανικής ύλης ενός αποβλήτου σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό, από ισχυρό οξειδωτικό μέσο (διχρωμικό κάλιο) σε υψηλές θερμοκρασίες και όξινες συνθήκες (Βλυσίδης, 2007). Κατά τον προσδιορισμό του COD οξειδώνονται όλες οι οργανικές ενώσεις που υπάρχουν σε ένα δείγμα ανεξαιρέτως. Το μεγάλο πλεονέκτημά του

έναντι του BOD₅ είναι η ταχύτητα μέτρησης, αφού ολοκληρώνεται σε 2-3 ώρες. Το COD είναι αρκετά μεγαλύτερο από το BOD₅ και για τα αστικά λύματα ο λόγος COD/BOD₅ είναι 1.2-1.5 (Ψυλλάκη, 2014). Τα νομοθετικά όρια για BOD₅, COD και TSS φαίνονται στον Πίνακα 1.1 που ακολουθεί.

Πίνακας 1.1 Νομοθετικά όρια για τα επεξεργασμένα λύματα (Ψυλλάκη, 2014).

Παράμετρος	Όριο
BOD ₅	25mg/L O ₂
COD	125mg/L O ₂
TSS	35mg/L

Ο **ολικός οργανικός άνθρακας (TOC)** είναι ένα μέτρο προσδιορισμού των οργανικών συστατικών για απόβλητα μικρής συγκέντρωσης και εκτός του οξυγόνου (O₂) χρησιμοποιείται και ο άνθρακας (C) (Ψυλλάκη, 2014). Οι μετρήσεις του διοξειδίου του άνθρακα, που παράγεται κατά την πλήρη οξείδωση του άνθρακα των οργανικών ενώσεων γίνονται σε υψηλές θερμοκρασίες και με την παρουσία καταλύτη. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων του ολικού οργανικού άνθρακα (TOC) ολοκληρώνονται σε 5-10 λεπτά, εκφράζονται σε mg/L και σχετίζονται άμεσα με την παραγωγή πόσιμου νερού.

Σε πολλές περιπτώσεις, η μεμονωμένη μέτρηση των παραμέτρων BOD και COD δεν επαρκεί για να συλλεχθούν οι απαιτούμενες πληροφορίες σχετικά με το είδος του οργανικού ρυπαντικού φορτίου των υδάτων και των αποβλήτων. Για τον λόγο αυτό προσδιορίζεται επιπλέον η τιμή του λόγου BOD/COD, ώστε να εξαχθούν συμπληρωματικά στοιχεία για την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου επεξεργασίας. Η μέγιστη τιμή του λόγου BOD/COD ισούται με 1 και αφορά στις περιπτώσεις όπου το σύνολο του οργανικού φορτίου είναι βιοαποικοδομήσιμο (Ψυλλάκη, 2014). Στις περιπτώσεις όπου ο λόγος BOD/COD για ανεπεξέργαστα υγρά απόβλητα είναι ίσος με 0.5 ή μεγαλύτερος, τα απόβλητα θεωρούνται εύκολα επεξεργάσιμα με βιολογικές μεθόδους, ενώ αν ο λόγος BOD/COD είναι μικρότερος από 0.3, τότε τα απόβλητα ενδεχομένως να περιέχουν ορισμένα τοξικά στοιχεία και απαιτούνται προσαρμοσμένοι μικροοργανισμοί για τη σταθεροποίησή τους (Ψυλλάκη, 2014). Στον Πίνακα 1.2 που ακολουθεί φαίνονται οι διάφορες συσχετίσεις μεταξύ BOD, COD και TOC.

Πίνακας 1.2 Συσχετίσεις μεταξύ BOD, COD και TOC (Ψυλλάκη, 2014).

	BOD/COD	BOD/TOC
Ανεπεξέργαστα απόβλητα	0.3-0.8	1.2-2.0
Μετά από πρωτοβάθμια επεξεργασία	0.4-0.6	0.8-1.2
Εκροή	0.1-0.3 ^α	0.2-0.5 ^β

Όπου: α= CBOD/COD και β=CBOD/TOC

1.3.3 Βιολογικά χαρακτηριστικά

Τα βιολογικά χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων είναι ύψιστης σημασίας για τον έλεγχο των ασθενειών που προκαλούνται από παθογόνους μικροοργανισμούς αλλά και για το σημαντικό ρόλο που παίζουν τα βακτήρια και άλλοι μικροοργανισμοί στην αποσύνθεση και τη σταθεροποίηση της οργανικής ύλης (Metcalf & Eddy, 2003). Κύρια πηγή μόλυνσης των υδάτων είναι τα αστικά λύματα, τα κτηνοτροφικά απόβλητα και τα περιττώματα των ζώων και των

ανθρώπων που περιέχουν παθογόνους μικροοργανισμούς. Οι κυριότερες κατηγορίες τέτοιων μικροοργανισμών είναι οι **μύκητες**, τα **βακτήρια**, τα **πρωτόζωα** και οι **ιοί** (Σαββάκης, 2016). Η μεγάλη συγκέντρωση μικροοργανισμών -και ειδικά των παθογόνων- στα φυσικά ύδατα είναι ανεπιθύμητη διότι είναι ικανοί να μολύνουν ή να μεταδώσουν στους ανθρώπους ασθένειες όπως η χολέρα, ο πυρετός, η διάρροια, η δυσεντερία και η ηπατίτιδα. Η ανίχνευση τους όμως είναι πολύ δύσκολη, καθώς συναντώνται σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις στα απόβλητα. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται δείκτες ρύπανσης για τον έλεγχο της μικροβιακής καταλληλότητας των υγρών αποβλήτων, με τους πιο σημαντικούς να είναι τα ολικά κολοβακτηριοειδή, τα κοπρανώδη κολοβακτηριοειδή και οι κοπρανώδεις στρεπτόκοκκοι.

1.4 Διεργασίες διαχείρισης και επεξεργασίας υγρών αποβλήτων

1.4.1 Προεπεξεργασία υγρών αποβλήτων

Αρχικά τα ανεπεξέργαστα αστικά υγρά απόβλητα, οδηγούνται από το τελικό φρεάτιο όπου συγκεντρώνονται όλες οι εκροές των αποχετεύσεων των οικισμών, μέσω αγωγών προσαγωγής, σε ειδικά διαμορφωμένες μονάδες επεξεργασίας στις ΕΕΛ. Κατά την είσοδο των λυμάτων στη μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων -η οποία πραγματοποιείται με αγωγούς-, είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός χώρου υποδοχής των λυμάτων, μετά τον οποίο οδηγούνται στην κύρια γραμμή της επεξεργασίας που ακολουθεί. Επίσης, για τα βοθρολύματα υπάρχει δεξαμενή υποδοχής, η οποία πρέπει να είναι εξοπλισμένη με σύστημα μηχανικής ανάδευσης και να είναι κλεισμένη για την κατά το δυνατόν μικρότερη εκπομπή δυσάρεστων οσμών προς το περιβάλλον και τις γύρω περιοχές (Εικόνα 1.1).



Εικόνα 1.1 Δεξαμενή υποδοχής βοθρολυμάτων.

(Πηγή: Σημειώσεις μαθήματος Σχεδιασμός Περιβαλλοντικών Εγκαταστάσεων και Εκτίμηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων Ι, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος)

Στη συνέχεια συναντάται η διεργασία της **εσχάρωσης**. Οι σχάρες είναι διατάξεις παράλληλων μεταλλικών ράβδων με διάκενα και διακρίνονται σε λεπτές και χοντρές. Τις περισσότερες φορές, το είδος της σχάρας που χρησιμοποιείται είναι χονδρή καθοριζόμενη επίπεδη σχάρα, ενώ ο καθαρισμός τους που απαιτείται ανά τακτά χρονικά διαστήματα γίνεται συνήθως μηχανικά. Στόχος τους είναι η κατακράτηση και η απομάκρυνση των μεγαλύτερων αντικειμένων (χαρτιά, κλαδιά, πλαστικά υλικά) που είναι πιθανό να προκαλέσουν προβλήματα

όπως εμφράξεις των αγωγών, βλάβες των σωληνώσεων και των αντλιών καθώς και δυσλειτουργία των συστημάτων επεξεργασίας που ακολουθούν (Νταρακάς, 2010). Ο σχεδιασμός των χονδρών μηχανικά καθοριζόμενων σχαρών χρησιμοποιείται συνήθως για μεγάλες παροχές και στοχεύει στη μείωση των προβλημάτων λειτουργίας και συντήρησης, ενώ παράλληλα αυξάνει την αποδοτικότητα στην απομάκρυνση των εσχαρισμάτων. Τα ογκώδη στερεά που συγκεντρώνονται στις σχάρες απομακρύνονται συνήθως με μηχανικά μέσα, αποθηκεύονται σε κλειστούς κάδους απορριμμάτων και απορρίπτονται σε ΧΥΤΑ. Για την αποτελεσματική διαχείριση των εσχαρισμάτων, δηλαδή τη μεταφορά, τη διαχείριση και την απομάκρυνσή τους είναι αναγκαίο να λαμβάνονται υπόψιν ο βαθμός απομάκρυνσης που απαιτείται λόγω των ενδεχόμενων επιδράσεων στα επόμενα στάδια επεξεργασίας, η υγιεινή και η ασφάλεια των εργαζομένων (η παρουσία παθογόνων μικροοργανισμών προσελκύει έντομα), η ενδεχόμενη δυσοσμία, οι απαιτήσεις για τη μεταφορά, το χειρισμό και τη διάθεση των οργανικών ουσιών καθώς και οι δυνατότητες διάθεσης. Στις σύγχρονες μεθόδους σχεδιασμού, παρατηρείται η χρησιμοποίηση κατά κύριο λόγο, υλικών ανθεκτικών στη διάβρωση όπως ο ανοξείδωτος χάλυβας (Εικόνα 1.2).



Εικόνα 1.2 Μηχανική σχάρα.

(Πηγή: <https://metropolitanind.com/municipal/mechanical-bar-screens/>)

Μετά τη διαδικασία της εσχάρωσης ακολουθεί αυτή της εξάμμωσης. Οι εξαμμωτές χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση άμμου, χαλικιού, αμμοχάλικου, τέφρας και άλλων βαριών στερεών υλικών μεγέθους $>2\text{mm}$ (Σαββάκης, 2016). Ουσιαστικά πρόκειται για μια δεξαμενή όπου τα βαρύτερα σωματίδια με μεγαλύτερες ταχύτητες καθίζησης, καθιζάνουν στον πυθμένα της δεξαμενής. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ταχύτητα της περιστροφής ή της ανάδευσης παίζει καθοριστικό ρόλο στο μέγεθος των σωματιδίων που θα απομακρυνθούν με δεδομένη σχετική πυκνότητα. Ο ρόλος των εξαμμωτών είναι η προστασία του κινούμενου μηχανικού εξοπλισμού από τριβές και μη φυσική φθορά, η μείωση του σχηματισμού αποθέσεων σε αγωγούς, κανάλια και σωληνώσεις, ενώ παράλληλα επιδιώκεται η μείωση της συχνότητας καθαρισμού των χωνευτών που προκύπτει από υπερβολική συσσώρευση άμμου (Στάμου &

Βογιατζής, 1994). Παράλληλα, στις ΕΕΛ υπάρχουν δυο δεξαμενές σε περίπτωση που η μια χρήζει συντήρησης. Οι δεξαμνωτές για την απομάκρυνση της άμμου διαθέτουν αρπαγές με κλάδους συλλογής οι οποίοι μετακινούνται σε ράγες κεντρικά, πάνω από το σημείο συλλογής και αποθήκευσης της άμμου. Έπειτα, η άμμος και τα υπόλοιπα στερεά που συλλέγονται στο στάδιο αυτό, αφυδατώνονται (στραγγίζονται) και συλλέγονται σε δοχεία, όμοια με αυτά που χρησιμοποιούνται για τη συλλογή των εσχαρισμάτων. Η τελική διάθεση μπορεί να γίνει σε ΧΥΤΑ ή να χρησιμοποιηθεί σε έργα οδοποιίας ως υλικό επίστρωσης. Μέχρι το σημείο αυτό, έχουν απομακρυνθεί από τη μάζα των αποβλήτων τα μεγαλύτερα στερεά, ενώ σχεδόν όλα τα οργανικά και ανόργανα συστατικά τους, καθώς και τα πολύ μικρότερα σωματίδια παραμένουν άθικτα. Στην πρωτοβάθμια επεξεργασία που ακολουθεί, επιτυγχάνεται η απομάκρυνση μικρότερων σωματιδίων.

1.4.2 Πρωτοβάθμια επεξεργασία υγρών αποβλήτων

Η πρωτοβάθμια επεξεργασία αποσκοπεί στην απομάκρυνση των μικρότερων στερεών μεγέθους 0.1-0.01mm (Στάμου & Βογιατζής, 1994) που έχουν απομείνει στα απόβλητα. Αυτό επιτυγχάνεται στις δεξαμενές πρωτοβάθμιας καθίζησης, όπου τα απόβλητα παραμένουν για περίπου δυο με τρεις ώρες σε συνθήκες ηρεμίας και καθιζάνουν λόγω βαρύτητας. Τα καθιζάνοντα στερεά συλλέγονται με μηχανικά ξέστρα και μέσω αντλίας καταλήγουν στην διάταξη επεξεργασίας ιλύος. Έλαια, λίπη και άλλα συστατικά συλλέγονται από την επιφάνεια. Υπό φυσιολογικές συνθήκες απομακρύνεται το 50-70 % των ολικών αιωρούμενων στερεών (TSS) και το 20-40 % του βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου (BOD) (Στάμου & Βογιατζής, 1994). Έτσι το ρεύμα των αποβλήτων απαλλάσσεται από ένα σημαντικό μέρος των στερεών αλλά και από ένα μέρος του οργανικού φορτίου. Οι παράγοντες οι οποίοι μπορούν να επηρεάσουν την απόδοση των δεξαμενών είναι η μεταβολή της πυκνότητας του νερού, οι μηχανισμοί απομάκρυνσης τις ιλύος αλλά και η τυχόν διαταράξεις ηρεμίας της δεξαμενής που μπορούν να προκύψουν κατά την εισροή του νερού ή από ισχυρούς ανέμους (Νταρακάς, 2010). Οι δεξαμενές αυτές μπορεί να είναι είτε κυκλικές είτε ορθογώνιες και ενδείκνυται να υπάρχουν δυο ή περισσότερες, έτσι ώστε η διεργασία να παραμένει σε λειτουργία όταν η μια δεξαμενή έχει αποσυρθεί για επισκευή ή συντήρηση.

1.4.3 Δευτεροβάθμια επεξεργασία υγρών αποβλήτων

Ένα μέρος του οργανικού φορτίου καθώς και ένα μεγάλο μέρος των στερεών από τα απόβλητα που εξέρχονται από την πρωτοβάθμια δεξαμενή καθίζησης, έχει απομακρυνθεί. Η ποιότητα των αποβλήτων όμως, δεν είναι ακόμα ικανοποιητική για διάθεση στον αποδέκτη. Για αυτό το λόγο ακολουθεί η βιολογική αποδόμηση των οργανικών συστατικών, η οποία επιτυγχάνεται στη **δεξαμενή αερισμού**. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος βιολογικής επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων είναι η μέθοδος της ενεργού ιλύος. Η μέθοδος αυτή, επινοήθηκε το 1914 στην Αγγλία από τους Arden και Lockett (Βλυσίδης κ.α., 2018). Το πρώτο σύστημα ενεργού ιλύος με συνεχή τροφοδότηση τέθηκε σε λειτουργία το 1917 στην Αγγλία (Μάντσεστερ) με παροχή 945 m³/day, ενώ την ίδια χρονιά ξεκίνησε τη λειτουργία του ένα παρόμοιο σύστημα μεγαλύτερης δυναμικότητας στις Η.Π.Α (Χιούστον, Τέξας) με ημερήσια παροχή 36.000 m³/day (Τσώνης, 2004). Καθώς παροχετεύεται αέρας στη δεξαμενή αερισμού, οι μικροοργανισμοί που υπάρχουν στα λύματα καταναλώνουν την οργανική ύλη, και ακολούθως συσσωματώνονται και παράγουν μια ενεργή μάζα συσσωματωμάτων, η οποία ονομάζεται ενεργός ιλύς. Το μείγμα της ενεργού ιλύος με τα στερεά των υγρών αποβλήτων στη δεξαμενή αερισμού ονομάζονται

ανάμεικτο υγρό, ενώ τα στερεά ονομάζονται αιωρούμενα στερεά ανάμεικτου υγρού (Mixed Liquor Suspended Solids -MLSS-). Ο αέρας εισάγεται στη δεξαμενή συνήθως με χρήση διαχυτήρων. Η χρησιμοποίηση του οργανικού κλάσματος των αποβλήτων ως τροφή των μικροοργανισμών έχει ως αποτέλεσμα τη μετατροπή ενός μέρους σε απλά τελικά προϊόντα – όπως νερό και διοξείδιο του άνθρακα- ενώ το υπόλοιπο μετατρέπεται σε κυτταρικό υλικό των οργανισμών. Έτσι όχι μόνο ανανεώνεται ο πληθυσμός των μικροοργανισμών, αλλά και επιτυγχάνεται η βιολογική αποικοδόμηση των οργανικών συστατικών.

Παράλληλα με τη μέθοδο της ενεργού ιλύος, αναπτύσσονται δυο βιολογικές διεργασίες για την απομάκρυνση του αζώτου: η **νιτροποίηση** και η **απονιτροποίηση**. Η αμμωνία που περιέχεται στα υγρά απόβλητα είναι ανεπιθύμητη στα επεξεργασμένα λύματα διότι όχι μόνο ενδέχεται να προκαλέσει φαινόμενα αποξυγόνωσης και ευτροφισμού, αλλά είναι και ιδιαίτερα τοξική για διάφορους υδρόβιους οργανισμούς. Η νιτροποίηση πραγματοποιείται κάτω από αερόβιες συνθήκες και αποτελεί βιολογική διεργασία δυο σταδίων. Στο πρώτο στάδιο, αυτό της νιτρώδοποίησης, η αμμωνία οξειδώνεται και μετατρέπεται σε νιτρώδη (NO_2^-), ενώ στο δεύτερο στάδιο, τη νιτρικοποίηση, τα νιτρώδη μετατρέπονται σε νιτρικά (NO_3^-) ιόντα (Metcalf & Eddy, 2003).

Η νιτροποίηση, η μετατροπή δηλαδή του αμμωνιακού αζώτου σε νιτρικά δεν επαρκεί για τη βιολογική απομάκρυνση του αζώτου. Η απομάκρυνση των νιτρικών που παράγονται σε αυτό το στάδιο γίνεται με τη διεργασία της απονιτροποίησης. Η απονιτροποίηση είναι βιολογική διεργασία κατά την οποία τα νιτρικά ιόντα μετατρέπονται σε αέριο άζωτο, το οποίο διαφεύγει στην ατμόσφαιρα και απομακρύνεται από τα λύματα (Σαρηγιάννης, 2015). Λαμβάνει χώρα υπό ανοξικές συνθήκες (απουσία οξυγόνου), ωστόσο είναι πιθανό να παρατηρηθεί και σε περιοχές αερόβιων βιοαντιδραστήρων όπου δεν καλύπτονται από το σύστημα παροχής αέρα.

Οι διεργασίες αυτές είναι ιδιαίτερα αναπτυγμένες καθώς έχουν υψηλό βαθμό απόδοσης και σχετικά χαμηλό κόστος. Για τη βέλτιστη απόδοση των βιολογικών διεργασιών της ενεργού ιλύος και της νιτροποίησης-απονιτροποίησης είναι απαραίτητη η διατήρηση κατάλληλων περιβαλλοντικών συνθηκών που να ευνοούν τη δράση των μικροοργανισμών. Τέτοιες συνθήκες είναι η διατήρηση του pH και της θερμοκρασίας στις επιθυμητές τιμές, αλλά και η επίτευξη υψηλής συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου (Νταρακάς, 2010).

Το μείγμα αποβλήτων και μεικτού υγρού οδηγείται στη **δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης** (Εικόνα 1.3), από το φρεάτιο υπερχείλισης που βρίσκεται κατάντη της δεξαμενής αερισμού. Εκεί σε συνθήκες ηρεμίας τα στερεά καθιζάνουν και διαχωρίζονται από τη μάζα των επεξεργασμένων αποβλήτων. Το ποσοστό βιοαποδόμησης του οργανικού φορτίου BOD μπορεί να ξεπεράσει το 90% (Νταρακάς, 2010). Μέρος της ιλύος ανακυκλοφορεί στη δεξαμενή αερισμού για τη διατήρηση επαρκούς συγκέντρωσης βιομάζας για την αποδόμηση των λυμάτων, ενώ το υπερκείμενο ρέει προς τη δεξαμενή απολύμανσης.



Εικόνα 1.3 Δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης.

(Πηγή: <https://www.watertechonline.com/wastewater/article/15550319/aerated-activated-sludge-treatment-efficiency>)

Η συνηθέστερη μέθοδος απολύμανσης του υπερκείμενου υγρού (όπως θα δούμε αναλυτικά στο κεφάλαιο 1.4.5) πραγματοποιείται στη **δεξαμενή χλωρίωσης**, χρησιμοποιώντας συνήθως υποχλωριώδες νάτριο, με στόχο το θάνατο των παθογόνων βακτηρίων και τη μείωση των δυσάρεστων οσμών. Η δοσομέτρηση του αντιδραστηρίου πραγματοποιείται στο φρεάτιο εισόδου και έρχεται σε επαφή με τη δευτεροβάθμια εκροή στο μαϊάνδρο χλωρίωσης. Η τελική επεξεργασμένη εκροή οδηγείται μέσω του φρεατίου εξόδου στον τελικό υδατικό αποδέκτη που έχει επιλεχθεί. Ακόμα και σε μονάδες επεξεργασίας με μεγάλες αποδόσεις καθαρισμού, η απόρριψη των λυμάτων μετά τη χλωρίωση εξακολουθεί να είναι επικίνδυνη λόγω της πιθανής ύπαρξης παθογόνων μικροοργανισμών και τοξικών ουσιών. Για το λόγο αυτό έχει αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια η χρήση μεθόδων προχωρημένου καθαρισμού των υγρών αποβλήτων, δηλαδή τα συστήματα τριτοβάθμιας επεξεργασίας.

1.4.4 Τριτοβάθμια επεξεργασία υγρών αποβλήτων

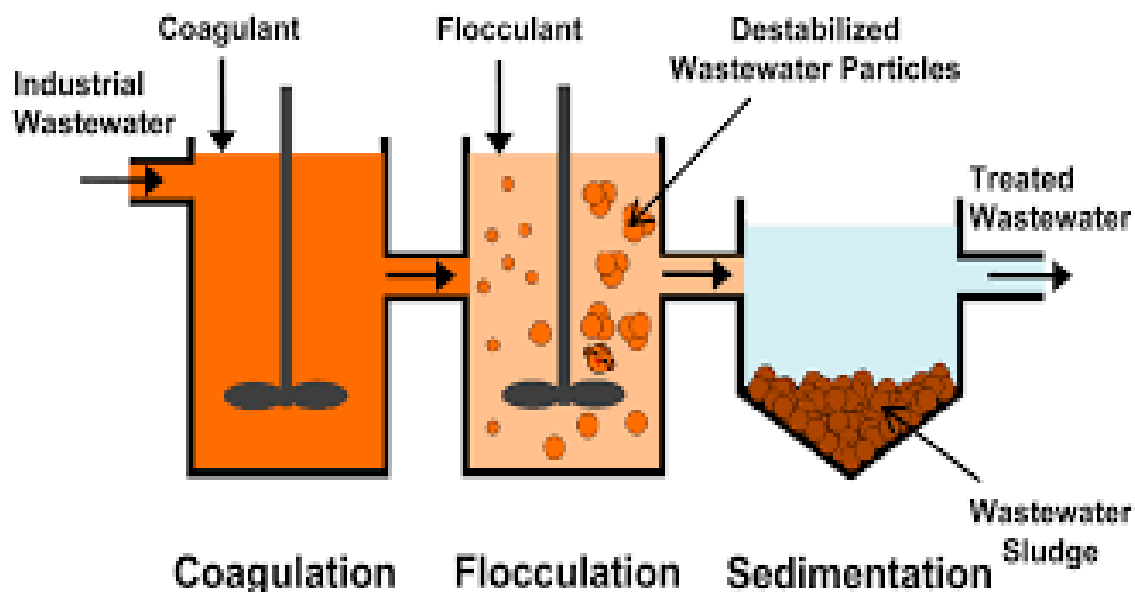
Κατά την τριτοβάθμια επεξεργασία απομακρύνονται όσοι παθογόνοι οργανισμοί, αιωρούμενα στερεά και τοξικές ουσίες έχουν διαφύγει από τη δευτεροβάθμια επεξεργασία. Όπως το άζωτο, έτσι και ο φώσφορος αποτελεί μια ένωση που είναι σημαντικό να απομακρυνθεί, καθώς είναι και αυτός υπεύθυνος για δυσάρεστα περιβαλλοντικά φαινόμενα όπως αυτά του ευτροφισμού και της αποξυγόνωσης. Μετά την απολύμανση την οποία θα έχουν υποστεί τα υγρά απόβλητα κατά την τριτοβάθμια επεξεργασία, θα είναι έτοιμα για την απόθεσή τους χωρίς περιβαλλοντικούς κινδύνους. Οι διεργασίες που είναι πιο αποδοτικές και χρησιμοποιούνται κυρίως στην τριτοβάθμια επεξεργασία είναι χημικές. Θα πρέπει να τονίσουμε ότι οι τεχνικές αυτές είναι αρκετά ακριβές και δεν χρησιμοποιούνται σε όλες τις ΕΕΛ. Συνήθως χρησιμοποιείται η εκροή της δευτεροβάθμιας καθίζησης ως τροφοδοσία του συστήματος τριτοβάθμιας επεξεργασίας.

Στη χημική επεξεργασία η πρώτη διεργασία που συναντάται είναι αυτή της **κροκίδωσης** (Εικόνα 1.4), όπου υλοποιείται η αποσταθεροποίηση των κολλοειδών συστατικών με προσθήκη κροκιδωτικού, με στόχο την απομάκρυνσή τους. Στη δεξαμενή που βρίσκονται τα απόβλητα,

εισάγεται μια χημική ουσία με φορτίο αντίθετο από αυτό των αιωρούμενων σωματιδίων των λυμάτων. Έτσι τα φορτία των αιωρούμενων σωματιδίων εξουδετερώνονται, με αποτέλεσμα αυτά να έλκονται μεταξύ τους και να συσσωματώνονται. Για την επίτευξη καλής κροκίδωσης, είναι απαραίτητη η γρήγορη ανάδευση έτσι ώστε το χημικό να διασπείρεται καλά μέσα στη δεξαμενή και να αντιδράσει με τα σωματίδια των υγρών αποβλήτων. Τα χημικά μέσα που χρησιμοποιούνται ως κροκιδωτικά είναι το θειικό αργίλιο, ο θειικός σίδηρος, ο χλωριούχος σίδηρος, το αργλικό νάτριο, ο υδράσβεστος, το χλωριούχο πολυαργίλιο (PAC) (Λοϊζίδου, 2006) .

Η διεργασία που συνδέεται άμεσα με την κροκίδωση, είναι αυτή της **συσσωμάτωσης** (Εικόνα 1.4). Στοχεύει στη δημιουργία συσσωματωμάτων με μεγάλες διαστάσεις, ώστε να είναι ευκολότερη η αφαίρεση τους με καθίζηση. Η συσσωμάτωση λαμβάνει χώρα σε ξεχωριστή δεξαμενή, όπου δημιουργούνται μεγαλύτερα συσσωματώματα μέσω ειδικού συστήματος βραδείας ανάδευσης και επιτυγχάνεται με την προσθήκη ανιοντικών ή κατιοντικών πολυηλεκτρολυτών σε αποσταθεροποιημένο κολλοειδές σύστημα (Γκίκας, 2020).

Για την καθίζηση των σωματιδίων που έχουν σχηματιστεί κατά τη συσσωμάτωση και για περαιτέρω μείωση της περιεκτικότητας των στερεών στα απόβλητα, μετά τη δεξαμενή συσσωμάτωσης, τα υγρά απόβλητα διοχετεύονται στη **δεξαμενή χημικής καθίζησης** (Εικόνα 1.4). Η δεξαμενή αυτή είναι κυκλική, παρόμοια με αυτήν της πρωτοβάθμιας καθίζησης. Εκεί επιτυγχάνεται και η αποφωσφόριση, καθώς ο φώσφορος δεν έχει αέρια μορφή και πρέπει να μετατραπεί από τη διαλυτή του μορφή σε σωματιδιακή για να απομακρυνθεί.



Εικόνα 1.4 Κροκίδωση – Συσσωμάτωση – Καθίζηση.

(Πηγή: Σημειώσεις μαθήματος Σχεδιασμός Περιβαλλοντικών Εγκαταστάσεων και Εκτίμηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων II, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος)

Το υγρό που υπερχειλίζει από τη δεξαμενή χημικής καθίζησης οδηγείται στο αμμόφιλτρο. Το **αμμόφιλτρο** είναι φίλτρο διαβαθμισμένων χαλικιών και άλλων διηθητικών μέσων και χρησιμοποιείται για την αφαίρεση οργανικών και κολλοειδών από το νερό. Συνήθως δίπλα στο αμμόφιλτρο διαστασιοποιείται μια δεξαμενή αντίστροφης πλύσης έτσι ώστε να καθαρίζεται το διηθητικό μέσο για να συνεχίσει να είναι αποτελεσματική η διήθηση του υπερχειλισμένου υγρού. Το νερό που υπερχειλίζει από τη δεξαμενή χημικής καθίζησης, εισέρχεται στο κάτω μέρος της κλίνης και καθώς ρέει ανοδικά φιλτράρεται και εκρέει από το πάνω μέρος της κλίνης

πηγαίνοντας προς απολύμανση. Τα είδη αμμόφιλτρων που χρησιμοποιούνται είναι τα αμμόφιλτρα βαρύτητας, τα αμμόφιλτρα κλειστού τύπου και τα αυτοκαθαριζόμενα αμμόφιλτρα ανοδικής ροής (Γκίκας, 2020).

Τα τελευταία χρόνια εφαρμόζεται όλο και περισσότερο μια σχετικά νέα τεχνολογία επεξεργασίας λυμάτων, τα **συστήματα Membrane Bioreactor (MBR)**. Τα συστήματα MBR ορίζονται ως 'Συστήματα ολοκληρωμένης βιοαποδόμησης υγρών αποβλήτων με διήθηση διαμέσου μεμβρανών' (Cicek et al., 1998) και πρόκειται για ένα συνδυασμό του συστήματος ενεργού ιλύος και της διύλισης. Στις περισσότερες διεργασίες μεμβρανών παρατηρούνται τρία ρεύματα. Το ρεύμα τροφοδοσίας (feed stream) καθώς ωθείται μέσω αντλίας έναντι της επιφάνειας της μεμβράνης, διαχωρίζεται και προκύπτει ένα ρεύμα προϊόντος (product stream) και ένα ρεύμα απόρριψης (waste steam). Το ρεύμα προϊόντος ή διήθημα (permeate) αποτελείται από τα διαπερατά συστατικά που διέρχονται μέσω της μεμβράνης, ενώ τα μη διαπερατά συστατικά συγκεντρώνονται στο ρεύμα απόρριψης ή κατακράτημα (retentate). Η διήθηση πραγματοποιείται μέσω των μεμβρανών μικροδιήθησης (Microfiltration -MF-), υπερδιήθησης (Ultrafiltration -UF-), νανοδιήθησης (Nanofiltration -NF-) και της αντίστροφης ώσμωσης (Reverse Osmosis) (Hoinkis et al., 2012). Η μέθοδος της μικροδιήθησης είναι η καταλληλότερη για την απομάκρυνση σωματιδίων, η υπερδιήθηση ενδείκνυται για την απομάκρυνση μακρομορίων με διάμετρο $> 0,1 \mu\text{m}$, ενώ η νανοδιήθηση και η αντίστροφη ώσμωση είναι οι καταλληλότερες για την απομάκρυνση διαλυμένων ιόντων από το υγρό (Asano & Levine, 1998). Η βέλτιστη ποιότητα εκροής, προϋποθέτει αρχικά την προεπεξεργασία με τη διεργασία της μικροδιήθησης ή της υπερδιήθησης και στη συνέχεια την επεξεργασία με τη διεργασία της νανοδιήθησης ή της αντίστροφης ώσμωσης.

1.4.5 Απολύμανση

Η απολύμανση αποτελεί το τελευταίο στάδιο της τριτοβάθμιας χημικής επεξεργασίας και στοχεύει στην καταστροφή ή την αδρανοποίηση των παθογόνων μικροοργανισμών των αποβλήτων, ώστε να αποφευχθεί η μόλυνση του αποδέκτη και η διάδοση ασθενειών. Η απολύμανση μπορεί να γίνει με τρεις τρόπους. Είτε με τη χλωρίωση (υποχλωριώδες νάτριο) όπως είδαμε στη δευτεροβάθμια επεξεργασία, είτε με την οζόνωση είτε με τη χρήση ακτινοβολίας UV (Νταρακάς, 2010). Το πιο συνηθισμένο μέσο απολύμανσης είναι το χλώριο καθώς έχει μεγάλη αποτελεσματικότητα στην καταστροφή των παθογόνων μικροοργανισμών, απλή εφαρμογή και χαμηλότερο κόστος συγκριτικά με τις άλλες μεθόδους. Όμως, κατά τη χλωρίωση, σχηματίζονται, όχι μόνο καρκινογόνες ανόργανες και οργανικές ενώσεις, άλλα και υπολείμματα χλωρίου που είναι ιδιαίτερα τοξικά για τους υδρόβιους οργανισμούς (Στάμου & Βογιατζής, 1994). Η δράση του όζοντος (O_3) από την άλλη είναι πολύ πιο γρήγορη και αποτελεσματική και δε δημιουργεί τοξικά κατάλοιπα καθώς διασπάται πολύ γρήγορα μετά την παραγωγή του. Όμως οι υψηλές απαιτήσεις σε ενέργεια, κόστος παραγωγής και λειτουργίας, καθιστούν απαγορευτική τη χρήση του σε πολλές μονάδες επεξεργασίας υγρών αστικών λυμάτων. Η χρήση της ακτινοβολίας με UV, ενδείκνυται να είναι η πιο αποδεκτή περιβαλλοντικά. Αποτελεί μια φυσική τεχνική, αφού δε χρησιμοποιείται κάποιο χημικό μέσο, ο χρόνος έκθεσης είναι σχετικά μικρός και η τυχόν χρησιμοποίηση δόσεων με τιμές μεγαλύτερες από τις ενδεδειγμένες δε δημιουργεί περιβαλλοντικά προβλήματα. Όμως, όπως με τη χρήση του όζοντος, έτσι και με αυτήν της ακτινοβολίας UV το υψηλό κόστος αποτελεί το μεγάλο τους

μειονέκτημα.

Στον Πίνακα 1.3 που ακολουθεί καταγράφονται ορισμένα από τα πιο βασικά χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων και τα ποσοστά απομάκρυνσης μετά από κάθε στάδιο επεξεργασίας (πρωτοβάθμια, δευτεροβάθμια, τριτοβάθμια).

Πίνακας 1.3 Χαρακτηριστικά υγρών αστικών αποβλήτων και ποσοστά καθαρισμού μετά από κάθε στάδιο επεξεργασίας (Καρπουζάς, 2020).

Παράμετρος ανάλυσης	Ακατέργαστα απόβλητα (mg/l)	Πρωτοβάθμια επεξεργασία (%)	Δευτεροβάθμια επεξεργασία (%)	Τριτοβάθμια επεξεργασία (%)
BOD	300	35	90	>95
COD	400	30	80	>95
TSS	300	60	90	>90
Ολικό άζωτο	60	20	50	>90
Ολικό φώσφορο	15	12	30	>90

Όπως βλέπουμε, μετά την απολύμανση στην τριτοβάθμια επεξεργασία τα λύματα είναι έτοιμα να διατεθούν στον υδατικό αποδέκτη ή να επαναχρησιμοποιηθούν για άρδευση αγροτικών καλλιεργειών ή χώρων πρασίνου. Στη συνέχεια θα ασχοληθούμε με την επεξεργασία των βιοστερεών και τον τρόπο διαχείρισης και αξιοποίησής τους.

1.5 Παραγωγή βιοστερεών

Ως βιοστερεά ορίζονται τα οργανικά υπολείμματα (ιλύς) που παράγονται κατά την επεξεργασία των υγρών αστικών λυμάτων από την πρωτοβάθμια και τη δευτεροβάθμια καθίζηση και με την κατάλληλη επεξεργασία τους μπορούν να διατεθούν στο περιβάλλον (Toze & Sidhu, 2011). Η ιλύς ανάλογα με το στάδιο επεξεργασίας από το οποίο θα συλλεχθεί, διαφέρει ως προς τη σύσταση της, συνεπώς αλλάζει και ο βαθμός ευκολίας με τον οποίο αφυδατώνεται. Η ποσότητα παραγωγής της εξαρτάται από το ρυπαντικό φορτίο, τις συνθήκες λειτουργίας που επικρατούν στη μονάδα επεξεργασίας και σαφέστατα από την ποσότητα των υγρών αποβλήτων. Αποτελεί ένα υλικό πλούσιο σε οργανικά συστατικά, το οποίο αφού επεξεργαστεί κατάλληλα είναι ικανό να βελτιώσει την καλλιέργεια των εδαφών. Η ιλύς που παράγεται από τις μονάδες επεξεργασίας αποβλήτων χαρακτηρίζεται από μεγάλο ποσοστό υγρασίας (75-85 %), μικρή συνοχή (δεν επιτρέπει την απόθεση σε μεγάλους σωρούς) και δυσάρεστη οσμή (Βουδούρης, 2014).

Η ιλύς η οποία παράγεται κατά την πρωτοβάθμια καθίζηση των λυμάτων ονομάζεται πρωτοβάθμια ιλύς. Αποτελείται από καθιζάνοντα και αιωρούμενα στερεά (ανόργανα και οργανικά) τα οποία περιέχονται στα ανεπεξέργαστα λύματα. Η πρωτοβάθμια ιλύς εμφανίζεται σε πυκνή μορφή, είναι συνήθως φαιόχρωμη και γλοιώδης, έχει έντονη δυσάρεστη οσμή και αποσυντίθεται πολύ εύκολα (Κελεσιδής, 2010). Μπορεί να αφυδατωθεί ευκολότερα από τη δευτεροβάθμια ιλύ καθώς αποτελείται από σωματίδια μεγαλύτερου μεγέθους. Σε μια τυπική ΕΕΛ που περιλαμβάνει πρωτοβάθμια καθίζηση και δευτεροβάθμια επεξεργασία ενεργού ιλύος, το βάρος της πρωτοβάθμιας ιλύος αποτελεί περίπου το 50 % (επί ξηρού) της συνολικής παραγόμενης ιλύος, ενώ η περιεκτικότητά της σε στερεά κυμαίνεται από 2-7 % (Turonskiy & Mathai, 2006). Σε περιπτώσεις όπου δεν έχει προηγηθεί εξάμμωση των ακατέργαστων λυμάτων

ή όταν τα λύματα περιλαμβάνουν, είτε μεγάλες ποσότητες βιομηχανικών αποβλήτων με υψηλή περιεκτικότητα σε καθιζάνοντα στερεά είτε μεγάλες συγκεντρώσεις από λεπτόκοκκα αδρανή στερεά, είναι πιθανό να παρατηρηθούν μεγαλύτερες συγκεντρώσεις στερεών (Τσόγκας, 1998). Όσον αφορά το μικροβιολογικό περιεχόμενο της πρωτοβάθμιας ιλύος, σε αυτήν περιέχονται περισσότερα από 100 διαφορετικά είδη αναερόβιων επαμφοτεριζόντων και παθογόνων μικροοργανισμών, καθώς και σκουλήκια, αυγά μυγών κλπ. (Κελεσίδης, 2010). Πολλές φορές, στις μικρότερες συνήθως ΕΕΛ, δεν εφαρμόζεται η πρωτοβάθμια καθίζηση, και τα λύματα μετά την προεπεξεργασία τους, οδηγούνται κατευθείαν στη δευτεροβάθμια επεξεργασία.

Η βιολογική ή δευτεροβάθμια ιλύς, παράγεται κατά τις διεργασίες της βιολογικής επεξεργασίας, από τη χρήση ειδικών αποσυνθετικών μικροοργανισμών, οι οποίοι διασπούν το οργανικό υλικό των λυμάτων που έχει απομείνει μετά την πρωτοβάθμια επεξεργασία. Οι μικροοργανισμοί αυτοί είναι συνήθως βακτήρια, τα οποία χρησιμοποιούν το οργανικό υλικό μέσω του μεταβολισμού τους για να αναπτυχθούν. Τα χαρακτηριστικά της δευτεροβάθμιας ιλύος ποικίλλουν ανάλογα με το μεταβολισμό και την ταχύτητα ανάπτυξης των μικροοργανισμών που περιέχει. Η δευτεροβάθμια ιλύς είναι πιο ογκώδης και πιο πλούσια σε οργανικά συστατικά (>90 %) από την πρωτοβάθμια, αλλά αφυδατώνεται πιο δύσκολα και έχει μικρότερη περιεκτικότητα σε στερεά (0.5-1.5 %) (Νταρακάς, 2010). Έχει σκούρο καφέ χρώμα και είναι επίσης δύσοσμη. Βέβαια, τα χαρακτηριστικά της δευτεροβάθμιας ιλύος, εξαρτώνται άμεσα από την ύπαρξη ή μη, της πρωτοβάθμιας επεξεργασίας. Στις περιπτώσεις όπου η ΕΕΛ δε διαθέτει σύστημα πρωτοβάθμιας επεξεργασίας, η δευτεροβάθμια ιλύς ενδέχεται να περιέχει και φερτές ύλες όπως άμμο, χαλίκια και νηματώδη υλικά. Στις περιπτώσεις όπου η ΕΕΛ διαθέτει σύστημα πρωτοβάθμιας επεξεργασίας, κατά τη δευτεροβάθμια επεξεργασία παράγεται μια 'καθαρή' βιολογική ιλύς, ως αποτέλεσμα της κατανάλωσης των διαλυτών και μη διαλυτών οργανικών ενώσεων που περιέχονται στα απόβλητα, από τα βακτηρίδια (Κελεσίδης, 2010). Η ύπαρξη ελαφρών βιοκροκίδων στη δευτεροβάθμια ιλύ, είναι ο λόγος για τον οποίο η αφυδάτωση και η πάχυνσή της είναι δυσκολότερες συγκριτικά με την πρωτοβάθμια ιλύ (Turovskiy & Mathai, 2006).

Στη δεξαμενή χημικής καθίζησης, η ιλύς επηρεάζεται από την προσθήκη αντιδραστηρίων ώστε να κατακρημνιστεί ο φώσφορος ή να γίνει πιο αποτελεσματικός ο ρυθμός απομάκρυνσης των αιωρούμενων στερεών. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ασβέστη ή μεταλλικών αλάτων σε διάφορα σημεία. Η προσθήκη ασβέστη στα λύματα είναι πιθανό να επιφέρει αύξηση των στερεών της ιλύος έως και 200 % ενώ η προσθήκη μεταλλικών αλάτων προκαλεί μικρότερη αύξηση της τάξεως του 25-50 % (Κελεσίδης, 2010). Παράγονται κυρίως ανόργανα συστατικά, ενώ ο βαθμός αφυδάτωσης εξαρτάται από το είδος των χημικών μέσων που χρησιμοποιήθηκαν. Το χρώμα της ιλύος που προκύπτει από τη χημική ιζηματοποίηση είναι σκούρο γκρι-καφέ, με οσμή δυσάρεστη -αλλά όχι τόσο όσο στην πρωτοβάθμια καθίζηση- (Μελίδης, 2016).

Η ιλύς που παράγεται από τις δεξαμενές της πρωτοβάθμιας, της δευτεροβάθμιας και της χημικής καθίζησης συλλέγεται στη δεξαμενή ομογενοποίησης, παράγοντας έτσι ένα νέο τύπο ιλύος, τη μικτή ιλύ. Οι διεργασίες επεξεργασίας των βιοστερεών θα αναπτυχθούν λεπτομερώς στη συνέχεια της εργασίας.

1.6 Χαρακτηριστικά βιοστερεών

Κατά την επεξεργασία των λυμάτων, από την αρχική υγρή τους φάση, μεταφέρεται στην ιλύ μεγάλη ποικιλία ουσιών και μικροοργανισμών σε αιωρούμενη και διαλυμένη μορφή. Συνεπώς, τα χαρακτηριστικά της ιλύος είναι άμεσα εξαρτώμενα από το ρυπαντικό φορτίο των επεξεργασμένων λυμάτων αλλά και από το είδος επεξεργασίας των λυμάτων και της ιλύος. Σε γενικές γραμμές, η παραγόμενη βιολογική ιλύς αποτελείται κατά 10-30 % από ανόργανες ουσίες, κατά 20-50 % από βιομάζα και 20-40 % από άλλα οργανικά (EC, 2007). Ορισμένα συστατικά που περιέχονται στην ιλύ όπως οργανικό φορτίο, άζωτο, φώσφορος, κάλιο και ασβέστιο έχουν γεωργική αξία και μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν, ενώ για άλλα συστατικά όπως οι παθογόνοι μικροοργανισμοί και τα βαρέα μέταλλα, απαιτείται προσεκτική διαχείριση για να εξασφαλιστεί η ασφαλής και περιβαλλοντικά αποδεκτή διάθεσή τους στο περιβάλλον (ΤΕΕ, 2005).

1.6.1 Συστατικά με γεωργική αξία

Τα συστατικά τα οποία έχουν γεωργική αξία και μπορούν να λειτουργήσουν ευεργετικά ως προς το έδαφος είναι η οργανική ύλη, θρεπτικά συστατικά όπως άζωτο, φώσφορος και ασβέστιο αλλά και διάφορες ανόργανες χημικές ουσίες.

Η **οργανική ύλη** των βιοστερεών αποτελείται κυρίως από διαλυτές ουσίες όπως πρωτεΐνες, υδατάνθρακες, αμινοξέα και λίπη (Jimenez et al., 2013). Η περιεκτικότητα οργανικών ουσιών στα αστικά λύματα είναι υψηλή (περίπου πάνω από το 50% των στερεών) και κυμαίνεται ανάλογα με την επεξεργασία την οποία υφίσταται (ΤΕΕ, 2005). Η οργανική ύλη του προϊόντος που παράγεται κατά το τελευταίο στάδιο επεξεργασίας της ιλύος (κομποστοποίηση) έχει πολύπλευρες θετικές επιδράσεις στο έδαφος. Τα στοιχεία της οργανικής ύλης, διασπώνται αργά με αποτέλεσμα να τροφοδοτούν το έδαφος με θρεπτικά στοιχεία τα οποία βελτιώνουν τη δομή και τις φυσικές του ιδιότητες και μειώνουν παράλληλα τις πιθανότητες διάβρωσής του (ΤΕΕ, 2005). Επιπρόσθετα η οργανική ύλη παράγει ενέργεια η οποία βοηθάει στην ανάπτυξη των μικροοργανισμών και στη γονιμότητα του εδαφικού πληθυσμού. Τα σταθερά συσσωματώματα που δημιουργούνται συγκρατούν την υγρασία σε επιθυμητό επίπεδο, μειώνοντας έτσι το κόστος παραγωγής, αφού η αγορά λιπασμάτων κρίνεται μη αναγκαία (Νταρακάς, 2016).

Το **άζωτο** συναντάται στην ιλύ κατά κύριο λόγο σε οργανική μορφή αλλά και σε μικρότερη ποσότητα σε ανόργανη (αμμωνιακή μορφή) (ΤΕΕ, 2005). Τα φυτά έχουν την ικανότητα να αφομοιώνουν μόνο το ανόργανο άζωτο, συνεπώς η γεωργική αξία της ιλύος είναι άμεσα εξαρτώμενη με την τάση του οργανικού αζώτου να μετατρέπεται σε ανόργανο (ΤΕΕ, 2005). Η περιεκτικότητα της ιλύος σε άζωτο τείνει να μειώνεται κατά τα τελικά στάδια της επεξεργασίας και κυμαίνεται από 4-60% (ΤΕΕ, 2005). Βέβαια εξαρτάται και από άλλους παράγοντες όπως η θερμοκρασία, το pH και η υγρασία του εδάφους.

Ο **φώσφορος** συναντάται στην ιλύ σε ανόργανη μορφή (40 %) και σε οργανική μορφή, και όπως και το άζωτο, η ποσότητα της συνολικής συγκέντρωσης του διαφέρει ανάλογα με τα στάδια επεξεργασίας στα οποία βρίσκεται η ιλύς (ΤΕΕ, 2005). Η ποσότητα της συγκέντρωσής του στην ιλύ, είναι μεγαλύτερη όταν έχει προηγηθεί απομάκρυνση του από τα υγρά απόβλητα στην εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων. Η παρουσία του φωσφόρου είναι ιδιαίτερα ευνοϊκή

για τα φυτά καθώς αναπτύσσει ολόκληρο το ριζικό τους σύστημα και αυξάνει τα ποσοστά καρποφορίας τους.

Το **ασβέστιο** από την άλλη, προστίθεται στην ιλύ με στόχο τη σταθεροποίησή και την υγειονομοποίησή της, όπως θα δούμε και πιο αναλυτικά στη συνέχεια. Η επεξεργασμένη με ασβέστη ιλύς έχει θετική επίδραση στα φυτά -όπου δυναμώνει τα κυτταρικά τους τοιχώματα-, αλλά και στη δομή, το pH και τη διαπερατότητα του εδάφους (ΤΕΕ, 2005). Άλλα συστατικά ευεργετικά για την παραγωγή και ανάπτυξη των φυτών είναι το θείο, το κάλιο και το μαγνήσιο.

1.6.2 Επιβλαβή συστατικά για το περιβάλλον

Στα βιοστερεά, εκτός από συστατικά με γεωργική αξία τα οποία χρησιμοποιούνται ως εδαφοβελτιωτικά, βρίσκονται και κάποια συστατικά τα οποία, σε συγκεντρώσεις υψηλότερες από το επιθυμητό στάδιο είναι επιβλαβή για το περιβάλλον. Τέτοια συστατικά είναι τα βαρέα μέταλλα, οι οργανικές τοξικές ενώσεις και οι παθογόνοι μικροοργανισμοί.

Στην ιλύ βρίσκονται **ιχνοστοιχεία** τα οποία, σε χαμηλές συγκεντρώσεις είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη των φυτών. Σε υψηλές συγκεντρώσεις όμως, πολλά από τα ιχνοστοιχεία αυτά, συσσωρεύονται στο περιβάλλον και είναι ιδιαίτερα τοξικά για τον άνθρωπο, τα ζώα, τα φυτά και το έδαφος. Τα ιχνοστοιχεία που είναι επικίνδυνα για το περιβάλλον είναι αυτά με πυκνότητα μεγαλύτερη από 5.0 g/cm^3 (Koller & Saleh, 2018) και αποκαλούνται βαρέα μέταλλα, όπως προαναφέρθηκε. Οι κυριότερες πηγές μετάλλων στην ιλύ είναι τα αστικά λύματα, οι απορροές των δρόμων και τα βιομηχανικά απόβλητα.

Παράλληλα στην ιλύ περιέχονται **τοξικές** και καρκινογόνες **οργανικές ενώσεις** οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά το έδαφος, τα φυτά, το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Οι ενώσεις αυτές μπορούν να σχηματιστούν από (ΤΕΕ, 2005):

- βιομηχανικά απόβλητα,
- καυσαέρια οχημάτων ή βιομηχανικών θερμικών μονάδων που καταλήγουν στο έδαφος μέσω των εδαφικών κατακρημνίσεων,
- ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις και αποθέσεις στα φυτά και στο έδαφος
- επιφανειακές απορροές του οδοστρώματος,
- προϊόντα καθημερινής χρήσης όπως χαρτιά και τροφές,
- φυτοφάρμακα,
- βιομηχανική και οικιακή χρήση απορρυπαντικών.

Οι διάφοροι τύποι ιλύος που παράγονται από την επεξεργασία λυμάτων, περιέχουν ένα πλήθος **παθογόνων μικροοργανισμών**, οι οποίοι είναι ικανοί να προκαλέσουν σοβαρούς κινδύνους στο περιβάλλον και τον άνθρωπο. Τέτοιοι είναι τα βακτήρια, οι ιοί, τα πρωτόζωα και τα παρασιτικά σκουλήκια. Η φύση, η ποικιλότητα και οι συγκεντρώσεις των παθογόνων και παρασιτικών μικροοργανισμών εξαρτώνται από το μέγεθος και την υγεία του πληθυσμού που εξυπηρετείται από το δίκτυο της αποχέτευσης και το είδος της βιομηχανίας στην εκάστοτε περιοχή (ΤΕΕ, 2005). Η ανάπτυξη και επιβίωση των μικροοργανισμών εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, με τους κυριότερους να είναι η θερμοκρασία, η υγρασία, το pH, τα χαρακτηριστικά

των μικροοργανισμών και οι ανταγωνιστικές συνθήκες που επικρατούν μεταξύ τους.

1.6.3 Ποιοτικά χαρακτηριστικά των βιοστερεών

Όπως είδαμε στην ιλύ εμπεριέχονται συστατικά με γεωργική αξία αλλά και συστατικά επιβλαβή για το περιβάλλον. Παράλληλα όμως, υπάρχουν και κάποιες ποιοτικές παράμετροι που μας βοηθάνε να κατανοήσουμε τη σύστασή της. Τέτοιες είναι το pH, η υγρασία, το υπόλειμμα καύσης, οργανικός άνθρακας, η ικανότητα αφυδάτωσης και η θερμική ικανότητα.

Το **pH** επιδρά στην ιλύ, βοηθώντας στην ελαχιστοποίηση του κινδύνου που προκαλείται από παθογόνους μικροοργανισμούς, παράσιτα και ιούς. Η αναστολή της μικροβιολογικής δραστηριότητας και η εξουδετέρωση του μικροβιολογικού φορτίου της ιλύος επιτυγχάνεται με την προσθήκη σβησμένου ή άνυδρου ασβέστη, όπου η τιμή του pH αυξάνεται και διατηρείται, τουλάχιστον στο 12 (ΤΕΕ, 2005).

Με τον όρο **υγρασία**, αναφερόμαστε στην περιεκτικότητα σε νερό που υπάρχει στην ιλύ. Η μέτρηση αυτή επιτυγχάνεται με ξήρανση της ιλύος στους 105°C. Με την παράμετρο του **υπολείμματος της καύσης**, προσδιορίζεται το ποσοστό των ανόργανων συστατικών της ιλύος. Η ξηρά ιλύς καίγεται στους 550°C σε διάστημα μισής ώρας. Μετά την καύση το βάρος του δείγματος έχει μειωθεί αισθητά και το υπόλειμμα είναι ανόργανη ύλη, καθώς οι οργανικές ουσίες έχουν καεί.

Ο άνθρακας αποτελεί το πιο βασικό χημικό στοιχείο σύνθεσης των οργανικών ουσιών και υπάρχει στα υγρά απόβλητα κυρίως με τη μορφή **οργανικού άνθρακα** (Ψυλλάκη, 2014). Ο ολικός οργανικός άνθρακας (TOC) αποτελεί ένα μέτρο κατάλληλο για τις μετρήσεις μικρών συγκεντρώσεων οργανικής ύλης που περιέχεται στα ύδατα και στα απόβλητα. Για τον προσδιορισμό του, ένας αυτόματος αναλυτής TOC απαιτεί ελάχιστη ποσότητα υγρού δείγματος, το οποίο εισάγεται σε ειδική στήλη με καταλύτη, όπου καίγεται σε υψηλή θερμοκρασία προς διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) (Ψυλλάκη, 2014). Τα αποτελέσματα εκφράζονται σε mg/L TOC. Παράλληλα ο οργανικός άνθρακας βοηθάει στην εκτίμηση της ποσότητας του βιοαερίου που θα παραχθεί μετά τη ζύμωση της ιλύος. Με 1 γραμμάριο άνθρακα παράγονται 1.86 λίτρα βιοαερίου, ενώ για κάθε γραμμάριο οργανικής ιλύος που αποδομείται παράγεται 1 λίτρο βιοαερίου (Νταρακάς, 2010).

Η **ικανότητα αφυδάτωσης** της ιλύος προκύπτει έπειτα από την παρακολούθηση του χρόνου που απαιτείται για να σταθεροποιηθεί-αφυδατωθεί μια ποσότητα ιλύος στο φίλτρο διήθησης.

Η **θερμική ικανότητα** της ιλύος, χαρακτηρίζεται από τη θερμική ενέργεια η οποία 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. Η ενέργεια εκλύεται κατά την πλήρη και τέλεια καύση της ιλύος με οξυγόνο, με τα προϊόντα και τα αντιδρώντα να βρίσκονται στους 25°C (YJ 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 H_o (Gross Heat of Combustion) όταν στα προϊόντα καύσης το νερό βρίσκεται σε υγρή κατάσταση και σε κατώτερη θερμογόνο δύναμη H_u (Net Heat of Combustion) όταν στα προϊόντα καύσης το νερό βρίσκεται σε αέρια κατάσταση (υδρατμός). Η ανώτερη θερμογόνο δύναμη των βιοστερεών υπολογίζεται με τη

χρήση θερμιδόμετρου (εκτενέστερη αναφορά στο κεφάλαιο 5.3).

1.7 Διεργασίες διαχείρισης και επεξεργασίας βιοστερεών

Η επεξεργασία των αστικών λυμάτων όπως είδαμε, αποσκοπεί στη μείωση του ρυπαντικού φορτίου πριν αυτά διατεθούν στο περιβάλλον. Ένα μεγάλο μέρος όμως από το ρυπαντικό φορτίο έχει μεταφερθεί στην ιλύ (παθογόνοι μικροοργανισμοί, βαρέα μέταλλα, τοξικές οργανικές ενώσεις), συνεπώς κρίνεται επιβεβλημένη η επεξεργασία της για την απομάκρυνση του. Επιπλέον η αναγκαιότητα της επεξεργασίας, της λάσπης γίνεται άμεσα κατανοητή από το γεγονός ότι αν και ο όγκος της αποτελεί το 1% περίπου του όγκου των αποβλήτων, απαιτεί το 25-50% του συνολικού κόστους κατασκευής και λειτουργίας της εγκατάστασης (Στάμου & Βογιατζής, 1994). Μετά την επεξεργασία της, η ιλύς θα έχει υποστεί σημαντική μείωση στη μάζα, τον όγκο και τα ποσοστά υγρασίας της, ενώ μετά και το τελικό στάδιο επεξεργασίας της (κομποστοποίηση), θα έχει μετατραπεί σε ένα βιολογικά σταθερό, αδρανές και ακίνδυνο σώμα. Στη συνέχεια παρατίθενται οι διεργασίες που πραγματοποιούνται για την επεξεργασία της ιλύος.

1.7.1 Ομογενοποίηση ιλύος

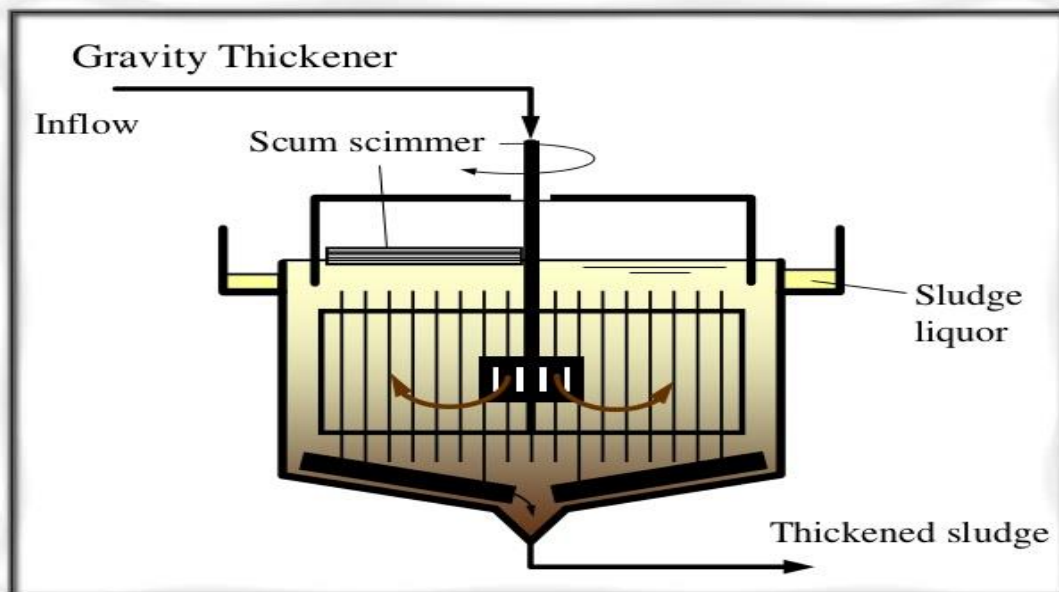
Η ιλύς που αντλείται από τις δεξαμενές πρωτοβάθμιας, δευτεροβάθμιας (ενεργός ιλύς) και χημικής καθίζησης, εισάγεται σε μια δεξαμενή όπου θα αναμειχθεί μέσω αερισμού. Η ανάμειξη αυτή είναι αναγκαία καθώς η σύσταση και η ρευστότητα της ιλύος διαφέρει ανάλογα με το στάδιο επεξεργασίας στο οποίο συλλέχθηκε. Μια ομοιόμορφη και καλά αναμειγμένη ιλύς εξασφαλίζει την ομαλή λειτουργία του συστήματος και την καλή απόδοση των επόμενων διεργασιών στη μονάδα επεξεργασίας. Παράλληλα η αποθήκευση της ιλύος στη δεξαμενή μίξης, αποσκοπεί και 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 & Βογιατζής, 1994).

1.7.2 Πάχυνση ιλύος

Η πάχυνση είναι μια διεργασία που χρησιμοποιείται για τη μείωση του όγκου της ιλύος και επιτυγχάνεται με την αύξηση σε περιεκτικότητα των στερεών και συνεπώς τη μείωση του νερού που εμπεριέχεται στην ιλύ. Για να επιτευχθεί η επιθυμητή συμπίκνωση της ιλύος με τη δημιουργία συσσωματωμάτων μεγάλων διαστάσεων, είναι απαραίτητη η προσθήκη πολυηλεκτρολυτών. Η περιεκτικότητα της παχυμένης ιλύος σε στερεά κυμαίνεται από 2-6%, ώστε η άντληση της να είναι εφικτή (Brandt et al., 2017). Με την πάχυνση επιπρόσθετα, βελτιώνονται τα χαρακτηριστικά της ιλύος και αυξάνεται η αποτελεσματικότητα των επόμενων διεργασιών. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη διεργασία της πάχυνσης είναι με η πάχυνση με βαρύτητα, με επίπλευση και με μηχανικά μέσα (φυγοκέντρηση).

Η **πάχυνση με βαρύτητα** είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος και πραγματοποιείται συνήθως σε δεξαμενές, εξοπλισμένες με μηχανικούς αναμοχλευτήρες για την αποδοτικότερη διαχώριση του νερού από την ιλύ (Εικόνα 1.5). Οι δεξαμενές συνήθως είναι κυκλικές με μεγάλη κλίση του πυθμένα, ώστε λόγω βαρύτητας, να καθιζάνει, να συσσωρεύεται και να συλλέγεται από εκεί η παχυμένη ιλύς. Η πυκνωμένη ιλύς απομακρύνεται από τη δεξαμενή με ειδικά μηχανικά μέσα, ενώ τα υπερκείμενα υγρά οδηγούνται στο δίκτυο στραγγισμάτων της εγκατάστασης. Η ιλύς

παραμένει στους παχυντές για μεγάλο χρονικό διάστημα και επιτυγχάνεται συμπύκνωση σε περιεκτικότητα των στερεών ως και 2-5 % (Νταρακάς, 2010). Βασικά της μειονεκτήματα είναι η μεγάλη απαίτηση χώρου και η σχετικά χαμηλή απόδοση σε βιολογική ιλύ (ΤΕΕ, 2005).



Εικόνα 1.5 Βαρυτικός παχυντής.

(<https://image.slidesharecdn.com/designcriteriaforwastewatertreatment-120411055901-phpapp02-160406032424/95/designcriteriaforwastewatertreatment-120411055901phpapp02-12638.jpg?cb=1459913109>)

Κατά την **πάχυνση με επίπλευση** (Εικόνα 1.6), εισάγεται από τον πυθμένα της δεξαμενής, αέρας με υψηλή πίεση. Με την πτώση της πίεσης, απελευθερώνονται λεπτές φυσαλίδες αέρα, οι οποίες συμπαρασέρνουν τα αιωρούμενα σωματίδια προς την επιφάνεια της δεξαμενής, όπου και συμπυκνώνονται και απομακρύνονται με τη βοήθεια ειδικού ξέστρου. Η αύξηση της περιεκτικότητας σε στερεά με τη μέθοδο της επίπλευσης κυμαίνεται μεταξύ 3-5% και είναι κατά 1-2% αποδοτικότερη από την αντίστοιχη που επιτυγχάνεται κατά την πάχυνση με βαρύτητα (Νταρακάς, 2010). Άλλα πλεονεκτήματα συγκριτικά με τη βαρυτική πάχυνση είναι η μικρότερη απαίτηση χώρου και τα λιγότερα προβλήματα οσμών λόγω του αερισμού. Όμως, το υψηλό κόστος λειτουργίας (μεγάλη κατανάλωση ενέργειας) και η συνεχής απαίτηση για παρακολούθηση της διεργασίας από το προσωπικό, χρήζουν τη λειτουργία της διεργασίας απαγορευτική για τις περισσότερες μονάδες επεξεργασίας (ΤΕΕ, 2005).



Εικόνα 1.6 Πάχυνση με επίπλευση.

(Πηγή: Σημειώσεις μαθήματος Σχεδιασμός Περιβαλλοντικών Εγκαταστάσεων και Εκτίμηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων II, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος)

Η **μηχανική πάχυνση** συνήθως γίνεται με **φυγοκέντρωση** (Εικόνα 1.7). Η ιλύς τοποθετείται σε ένα περιστρεφόμενο κυλινδρικό θάλαμο, όπου λόγω της περιστροφής, τα στερεά συσσωρεύονται και συμπυκνώνονται στις πλευρές του. Η αύξηση της περιεκτικότητας σε στερεά με τη μέθοδο της φυγοκέντρωσης είναι η υψηλότερη συγκριτικά με τις άλλες μεθόδους πάχυνσης και κυμαίνεται μεταξύ 4-6% (Μελίδης, 2016). Η μικρή απαίτηση χώρου και η απουσία προβλημάτων οσμών είναι άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα της μηχανικής πάχυνσης. Όμως οι υψηλές απαιτήσεις λειτουργίας (μεγάλη κατανάλωση ενέργειας) και συντήρησης (χρειάζεται συντήρηση από εξειδικευμένο προσωπικό, καθώς η λειτουργία της επηρεάζεται από την παρουσία άμμου και μεγαλύτερων στερεών που πρέπει να απομακρυνθούν), καθώς και η πιθανή απαίτηση χημικών καθιστούν δύσκολη τη χρήση της (Στάμου & Βογιατζής, 1994).



Εικόνα 1.7 Φυγοκεντρικοί παχυντές.

(Πηγή: Σημειώσεις μαθήματος Σχεδιασμός Περιβαλλοντικών Εγκαταστάσεων και Εκτίμηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων II, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος)

Παράλληλα, η μηχανική πάχυνση μπορεί να πραγματοποιηθεί με τις **τράπεζες πάχυνσης** (Εικόνα 1.8). Πρόκειται για ένα σύστημα περιστρεφόμενου ατέρμονα φιλτρόπανου, το οποίο βρίσκεται προσαρμοσμένο σε οριζοντιωμένη τράπεζα (Γκίκας, 2020). Η ιλύς αναμειγνύεται με πολυηλεκτρολύτη και τροφοδοτείται στο ένα άκρο της τράπεζας. Καθώς το φιλτρόπανο περιστρέφεται, η ιλύς μετακινείται προς το άλλο άκρο, χάνοντας στη διαδρομή μέρος της περιεχόμενης υγρασίας της. Τα στραγγίσματα που συλλέγονται οδηγούνται στην είσοδο της εγκατάστασης. Η μέθοδος αυτή, έχει ικανότητα απομάκρυνσης έως και 98% των εισερχόμενων στερεών, ενώ για κάθε 1kg ξηρής μάζας χρησιμοποιούνται 3-7 mg πολυηλεκτρολύτη (Γκίκας, 2020). Τα μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής, είναι η απαίτηση για συνεχή παρακολούθηση της διεργασίας και οι πολύ υψηλές απαιτήσεις σε ενέργεια (ΤΕΕ, 2005).



Εικόνα 1.8 Τράπεζα πάχυνσης ιλύος.

(Πηγή: Σημειώσεις μαθήματος Σχεδιασμός Περιβαλλοντικών Εγκαταστάσεων και Εκτίμηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων II, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος)

1.7.3 Σταθεροποίηση ιλύος

Η ιλύς περιέχει πολλούς παθογόνους μικροοργανισμούς οι οποίοι έχουν την τάση να πολλαπλασιάζονται με ταχύτατους ρυθμούς και να προκαλούν σήψη της ιλύος και απελευθέρωση δυσάρεστων οσμών προς το περιβάλλον. Για να αποφευχθούν τέτοιου είδους δυσάρεστα φαινόμενα κρίνεται απαραίτητη η σταθεροποίηση της. Η σταθεροποίηση αυτή μπορεί να γίνει με την προσθήκη ασβεστίου (αλκαλική σταθεροποίηση) στην ιλύ, στοχεύοντας σε αύξηση των τιμών του pH και στη δημιουργία ενός εχθρικού περιβάλλοντος για τους μικροοργανισμούς. Πιο συγκεκριμένα στην **ασβεστοποίηση**, όταν προστεθούν επαρκείς τιμές υδρασβέστου $[Ca(OH)_2]$ στην ιλύ και το pH ανέβει στο 12 για 2 ώρες, οι μικροοργανισμοί αδυνατούν να επιβιώσουν κάτω από αυτές τις αντίξοες συνθήκες (Στάμου & Βογιατζής, 1994). Επιπρόσθετα, εκτός από την καταστροφή των παθογόνων μικροοργανισμών και την ελαχιστοποίηση των δυσάρεστων οσμών, κατά τη σταθεροποίηση επιτυγχάνεται μείωση της συγκέντρωσης των στερεών (συνεπώς και της συνολικής ποσότητας της ιλύος), βελτίωση της ικανότητας αφυδάτωσής της αλλά και παραγωγή βιοαερίου.

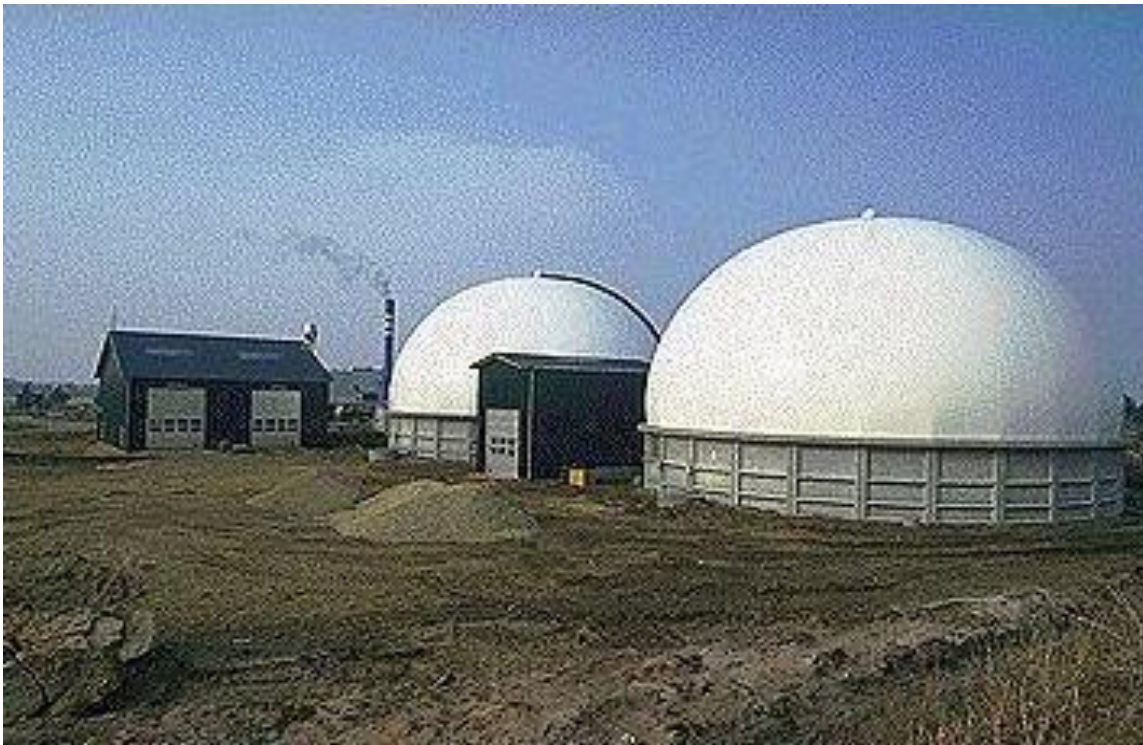
Η παραγωγή βιοαερίου προκύπτει από τη διεργασία της **αναερόβιας χώνευσης**. Η αναερόβια χώνευση πρόκειται για μια βιολογική-βιοχημική διεργασία ευαίσθητη στις διάφορες περιβαλλοντικές μεταπτώσεις, όπου το οργανικό φορτίο παραμένοντας στην ιλύ από

10 ως 20 μέρες, διασπάται αρχικά σε οξέα, και αυτά με τη σειρά τους σε διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και μεθάνιο (CH_4). Το βιοαέριο που παράγεται, χρησιμοποιείται για θέρμανση της ιλύος στις επιθυμητές θερμοκρασίες και για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην εγκατάσταση. Οι εγκαταστάσεις όπου λαμβάνει χώρα η αναερόβια χώνευση είναι κυλινδρικού (Εικόνα 1.9), σφαιρικού (Εικόνα 1.10) ή ωσειδούς τύπου (Εικόνα 1.11) (Γκίκας, 2020). Κατά την αναερόβια χώνευση επιτυγχάνεται μείωση των οργανικών στερεών της ιλύος κατά 30-70% (Gopal et al., 2019) και μείωση των παθογόνων μικροοργανισμών που υπάρχουν στην ιλύ. Το χρώμα της ιλύος μετά την αναερόβια χώνευση είναι μαύρο (λόγω παρουσίας θειικού σιδήρου) και έχει οσμή πίσσας.



Εικόνα 1.9 Εγκαταστάσεις αναερόβια χώνευσης κυλινδρικού τύπου, Δανία.

(Πηγή: Σημειώσεις μαθήματος Σχεδιασμός Περιβαλλοντικών Εγκαταστάσεων και Εκτίμηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων II, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος)



Εικόνα 1.10 Εγκαταστάσεις αναερόβιας χώνευσης σφαιρικού τύπου, Εσθονία.
(Πηγή: Σημειώσεις μαθήματος Σχεδιασμός Περιβαλλοντικών Εγκαταστάσεων και Εκτίμηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων II, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος)



Εικόνα 1.11 Εγκαταστάσεις αναερόβιας χώνευσης ωσειδούς τύπου, Γερμανία.
(Πηγή: Σημειώσεις μαθήματος Σχεδιασμός Περιβαλλοντικών Εγκαταστάσεων και Εκτίμηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων II, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος)

Μία άλλη μέθοδος σταθεροποίησης είναι αυτή της **αερόβιας χώνευσης** όπου η βιολογική μετατροπή της οργανικής ύλης της ιλύος επιτυγχάνεται με τη διοχέτευση αέρα στις δεξαμενές. Κατά την αερόβια χώνευση πραγματοποιείται αερισμός και ανάδευση της ιλύος για 15-20 μέρες

όπου αποδομείται το 40-60% των πτητικών στερεών και παράγεται μια σταθεροποιημένη ιλύς (Νταρακάς, 2010). Καθώς αποσυντίθεται η οργανική ύλη από τους αερόβιους μικροοργανισμούς εκλύεται θερμότητα η οποία μπορεί να φτάσει πάνω από τους 50°C (θερμοφιλική χώνευση) και οι απαιτούμενοι χρόνοι αερισμού μειώνονται σε 5 έως 6 μέρες (ΤΕΕ, 2005). Το χρώμα της ιλύος μετά την αερόβια χώνευση είναι καφέ και έχει οσμή χώματος. Η αερόβια χώνευση έχει μικρότερο κόστος επένδυσης συγκριτικά με την αναερόβια, όμως έχει και πολύ μεγαλύτερες απαιτήσεις σε κατανάλωση ενέργειας.

Η **κομποστοποίηση** (Εικόνα 1.12) αποτελεί επίσης μια αποδοτική και περιβαλλοντικά αποδεκτή εναλλακτική για τη σταθεροποίηση της ιλύος των υγρών αποβλήτων. Πρόκειται για μια διεργασία κατά την οποία η οργανική ιλύς υποβάλλεται σε βιολογική αποδόμηση προς ένα σταθερό προϊόν με αποτέλεσμα την παραγωγή θερμότητας και την ικανοποιητική παστερίωση της ιλύος. Κατά τη διεργασία, περίπου 20-30 % του οργανικού φορτίου μετατρέπεται σε CO₂ και H₂O, ενώ παράλληλα καταστρέφεται σημαντικό μέρος των παθογόνων μικροοργανισμών (Γκίκας, 2020). Η κομποστοποίηση εφαρμόζεται είτε σε ανοιχτά συστήματα (αναδυσόμενα σειράδια, στατικοί αεριζόμενοι σωροί) είτε σε κλειστά συστήματα (βιοαντιδραστήρες) (Νταρακάς, 2010). Στη μέθοδο των αναδυσόμενων σειραδίων -που είναι και η πιο διαδεδομένη- στα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κομποστοποίηση παρέχεται οξυγόνο με φυσικό αερισμό και κατά την περιοδική ανάδευση το οξυγόνο εισχωρεί σε όλη τη σωρό. Στη μέθοδο των στατικών αεριζόμενων σωρών ο αερισμός γίνεται μηχανικά με τροφοδοσία στο σωρό ή με αναρρόφηση του αέρα από το σωρό. Στα κλειστά συστήματα κομποστοποίησης, τα υλικά εισχωρούν στους κλειστούς αντιδραστήρες από την οροφή και καθαρίζουν λόγω βαρύτητας. Εκεί πραγματοποιείται η ανάδευση τους με ειδικούς αναμοχλευτήρες και ο αερισμός τους από το δίκτυο σωληνώσεων. Η τελική ιλύς που προκύπτει μετά την κομποστοποίηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό στη γεωργία ή στην κηπουρική καθώς οι παθογόνοι μικροοργανισμοί και οι δυσάρεστες οσμές έχουν απομακρυνθεί.



Εικόνα 1.12 Αναμόχλευση κομπόστ σε κλειστό σύστημα.

(Πηγή: Σημειώσεις μαθήματος Σχεδιασμός Περιβαλλοντικών Εγκαταστάσεων και Εκτίμηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων II, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος)

1.7.4 Αφυδάτωση ιλύος

Η αφυδάτωση στοχεύει στην περαιτέρω απομάκρυνση της υγρασίας της ιλύος και επομένως στην αύξηση της συγκέντρωσης των στερεών της. Η ιλύς μετά την αφυδάτωση βρίσκεται σε μια παχύρρευστη –μη υγρή– κατάσταση με μειωμένο όγκο, καθιστώντας έτσι τη μεταφορά και την τελική της διάθεση φθηνότερη και γρηγορότερη. Η αφυδάτωση της ιλύος γίνεται είτε με φυσικές μεθόδους αποστράγγισης του νερού της ιλύος (κλίνες ξήρανσης), είτε με τεχνητές (ταινιοφιλτρώπρες, φυγοκεντρητές). Η αφυδατωμένη ιλύς, ανάλογα με τη μέθοδο με την οποία αφυδατώθηκε μπορεί να περιέχει ξηρά στερεά μέχρι και 45% (ΤΕΕ, 2005).

Η αφυδάτωση της ιλύος στις **κλίνες ξήρανσης** (Εικόνα 1.13) είναι μια από τις πιο απλές μεθόδους αφυδάτωσης. Η ιλύς κατανέμεται ομοιόμορφα στις κλίνες από στρώματα άμμου και μετά από διήθηση νερού μέσω του στραγγιστηρίου για 1-3 μέρες και επιτυγχάνεται συγκέντρωση ξηρών στερεών 15-25% και απομάκρυνση νερού 20-55% (Στάμου & Βογιατζής, 1994) από το αρχικό, ανάλογα τη συγκέντρωση και τα χαρακτηριστικά της ιλύος. Για τις επόμενες μια με δυο εβδομάδες η αφυδατωμένη ιλύς ξηραίνεται περαιτέρω μέσω της εξάτμισης και η συγκέντρωση των ξηρών στερεών αυξάνεται μέχρι και 40% (ΤΕΕ, 2005) σε εξάρτηση με τη διάρκεια της ξήρανσης και τις κλιματολογικές συνθήκες (θερμοκρασία, υγρασία, ταχύτητα ανέμων της περιοχής) που επικρατούν. Η αφυδάτωση με κλίνες ξήρανσης έχει μικρές απαιτήσεις κόστους λειτουργίας και συντήρησης, δεν απαιτείται η χρήση χημικών μπορούν να επιτύχουν μεγαλύτερες συγκεντρώσεις αφυδατωμένης ιλύος από ότι στις τεχνητές μεθόδους, ωστόσο απαιτούνται μεγάλες εκτάσεις και συχνά παρουσιάζονται φαινόμενα δυσοσμίας.



Εικόνα 1.13 Κλίνες ξήρανσης.

(Πηγή: Σημειώσεις μαθήματος Σχεδιασμός Περιβαλλοντικών Εγκαταστάσεων και Εκτίμηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων II, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος)

Στις **ταινιοφιλτρόπρεςες** (Εικόνα 1.14) η ιλύς, στην οποία έχουν προστεθεί χημικά μέσα (πολυηλεκτρολύτες) οδηγείται ανάμεσα σε δυο κυλιόμενες ταινίες, συμπιέζεται και στραγγίζονται τα νερά της με αποτέλεσμα να αφυδατωθεί. Τα μεγάλα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η απλή εφαρμογή της, το μικρό κόστος λειτουργίας της και ο καλός βαθμός αφυδάτωσης. Τα κυριότερα μειονεκτήματα της είναι η αναγκαία χρήση χημικών, η μεγάλη κατανάλωση νερού που απαιτείται για τον καθαρισμό των ταινιοφίλτρων και η απαραίτητη συνεχής παρακολούθηση του συστήματος.



Εικόνα 1.14 Αφυδάτωση ιλύος με ταινιοφιλτρόπρεσα, Ψυττάλεια, Αθήνα.
(Πηγή: Σημειώσεις μαθήματος Σχεδιασμός Περιβαλλοντικών Εγκαταστάσεων και Εκτίμηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων II, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος)

Οι **θαλαμοφιλτρόπρεςες** (Εικόνα 1.15) αποτελούνται από μια σειρά παράλληλων μεταλλικών πλακών με εσωτερικά πανιά διήθησης οι οποίες συμπιέζουν και αφυδατώνουν την ιλύ. Οι κενοί χώροι που υπάρχουν στο μηχανισμό καλύπτονται από την ιλύ και μέσω της πίεσης που ασκείται στο εσωτερικό της πρέσας, η ιλύς στραγγίζεται και το νερό εξέρχεται από το πάνινο φίλτρο. Με την τεχνική αυτή επιτυγχάνεται υψηλότερη συγκέντρωση αφυδατωμένης ιλύος από τις άλλες μεθόδους –μέχρι 45%- (ΤΕΕ, 2005) όμως απαιτείται υψηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης και συνεχής παρακολούθηση του συστήματος.



Εικόνα 1.15 Αφυδάτωση ιλύος με θαλαμοφιλτρόπρεσα, Ψυττάλεια, Αθήνα.
(Πηγή: Σημειώσεις μαθήματος Σχεδιασμός Περιβαλλοντικών Εγκαταστάσεων και Εκτίμηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων II, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος)

Κατά τη διεργασία της **φυγοκέντρωσης** (Εικόνα 1.16), η παχυμένη ιλύς διαχωρίζεται από το υγρό κλάσμα της με τη βοήθεια της φυγόκεντρου δύναμης. Καθώς περιστρέφεται, τα βαρύτερα σωματίδια ωθούνται στην εσωτερική επιφάνεια του μηχανήματος, διαχωρίζονται από τα νερά και εξέρχονται από αντίθετες πλευρές. Οι φυγοκεντρικές διατάξεις είναι απλές στη λειτουργία τους και η συγκέντρωση στερεών που επιτυγχάνεται φτάνει το 30% (ΤΕΕ, 2005). Στα αρνητικά της λειτουργίας αυτής είναι οι υψηλές απαιτήσεις για την κατανάλωση ενέργειας και κόστους επένδυσης, ο θόρυβος και η αναγκαιότητα παρουσίας εξειδικευμένου προσωπικού για την ομαλή λειτουργία του μηχανισμού.



Εικόνα 1.16 Αφυδάτωση ιλύος με φυγοκέντρωση, Ψυττάλεια, Αθήνα.
(Πηγή: Σημειώσεις μαθήματος Σχεδιασμός Περιβαλλοντικών Εγκαταστάσεων και Εκτίμηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων II, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος)

1.7.5 Θερμική επεξεργασία ιλύος (ξήρανση, αποτέφρωση και αεριοποίηση)

Η **θερμική ξήρανση** της ιλύος αποτελεί μια μέθοδο η οποία στοχεύει στην περαιτέρω απομάκρυνση του νερού από την ιλύ και την αντιμετώπιση της δυσοσμίας που υπάρχει στην αφυδατωμένη ιλύ. Λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 80°C και επιδιώκει τιμή του ποσοστού υγρασίας του τελικού προϊόντος μικρότερη από 10% (Νταρακάς, 2010). Μετά τη θερμική ξήρανση, ο όγκος και η μάζα της ιλύος έχουν μειωθεί αισθητά, οι παθογόνοι μικροοργανισμοί έχουν καταστραφεί ενώ η θερμική αξία του προϊόντος έχει αυξηθεί. Συνεπώς πρόκειται για ένα προϊόν ασφαλές για διοχέτευση στο περιβάλλον και επαναχρησιμοποίηση για γεωργική χρήση. Οι θερμικοί ξηραντές ανάλογα με τον τρόπο μεταφοράς της θερμότητας στην ιλύ, χωρίζονται σε δυο κατηγορίες, τους άμεσους και τους έμμεσους.

Στην πρώτη περίπτωση, των άμεσων ξηραντών, η απαιτούμενη ενέργεια για τη θέρμανση της ιλύος παρέχεται άμεσα και διοχετεύεται θερμότητα στην υγρή ιλύ μέσω θερμού αέρα. Στους έμμεσους ξηραντές από την άλλη, η ενέργεια παρέχεται στην ιλύ με σύστημα ανταλλαγής θερμότητας μέσω λαδιού ή ατμού, ή ερχόμενη σε επαφή με θερμαινόμενες επιφάνειες. Θα πρέπει να τονιστεί ότι κατά τη θερμική άμεση ξήρανση απαιτείται εγκατάσταση συστήματος ελέγχου για την ατμοσφαιρική ρύπανση που είναι πιθανό να προκύψει κατά την απομάκρυνση των σωματιδίων, αλλά και ένας μετακαυστήρας για τον περιορισμό των δυσάρεστων οσμών. Παράλληλα ένα άλλο ζήτημα το οποίο χρήζει ιδιαίτερης προσοχής, είναι ότι η αποθήκευση της ιλύς σε μορφή σκόνης ενδέχεται να προκαλέσει αυτόματη ανάφλεξη. Για το λόγο αυτό επιδιώκεται η διαμόρφωση της ιλύος σε ανθεκτικούς κόκκους πριν την αποθήκευσή της, και η παραγωγή ξηρής ιλύος με λιγότερο από 10% υγρασία (ΤΕΕ, 2005). Μετά από τη θερμική επεξεργασία, ο όγκος και η υγρασία της ιλύος έχουν μειωθεί, ενώ οι παθογόνοι μικροοργανισμοί και οι τοξικές ουσίες έχουν απομακρυνθεί από τη σύστασή της. Επιπρόσθετα, η θερμική ξήρανση, αποτελεί προεπεξεργασία της καύσης που ακολουθεί, συμβάλλοντας και αυτή στην ενεργειακή ανάκτηση. Τα υψηλά κόστη επένδυσης και λειτουργίας της μεθόδου αυτής, αλλά και η απαίτηση για εξειδικευμένο και κατάλληλα εκπαιδευμένο προσωπικό την καθιστά απρόσιτη για πολλές μονάδες επεξεργασίας.

Η **αποτέφρωση (καύση)** που ακολουθεί, οξειδώνει πλήρως τα οργανικά συστατικά της ιλύος και περιορίζει ακόμα περισσότερο τον όγκο της, μειώνοντας έτσι τα κόστη μεταφοράς της. Χρησιμοποιείται κυρίως σε μεγάλου μεγέθους εγκαταστάσεις, όταν η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης της ιλύος είναι αδύνατη ή οικονομικά ασύμφορη. Η καύση της ξηραμένης ιλύος γίνεται σε κάμινους περιστροφικού διαχωρισμού ή σε πολυώροφους κάμινους.

Μια άλλη θερμική διαδικασία η οποία χρησιμοποιείται για την καύση της ιλύος, είναι η **αεριοποίηση**. Κατά την αεριοποίηση, η ιλύς μετατρέπεται με τη βοήθεια αέρα ή οξυγόνου σε ένα εύφλεκτο αέριο και αδρανές υπόλειμμα (ΤΕΕ, 2005). Το αέριο που παράγεται κατά την αεριοποίηση, ονομάζεται αέριο σύνθεσης και αποτελείται κυρίως από υδρογόνο και μονοξείδιο του άνθρακα (Gikas, 2017). Παράλληλα, μπορεί να περιέχονται αξιοσημείωτες ποσότητες μεθανίου και διοξειδίου του άνθρακα, καθώς και ίχνη υδρογονάνθρακα (Gikas, 2017). Σε περίπτωση όπου η αεριοποίηση πραγματοποιείται με αέρα, στο αέριο σύνθεσης περιέχεται και άζωτο. Το μεγάλο πλεονέκτημα τόσο της καύσης, όσο και της αεριοποίησης είναι η δυνατότητα ενεργειακής ανάκτησης και αξιοποίησης, όπως θα αναλυθεί ενδόμυχα στο δεύτερο κεφάλαιο

της εργασίας.

1.8 Διάθεση βιοστερεών

Στα βιοστερεά, περιέχονται ορισμένα συστατικά που λειτουργούν ευεργετικά για τις αγροτικές καλλιέργειες (άζωτο, φώσφορος, κάλιο). Παράλληλα όμως, περιέχονται και επιβλαβή συστατικά, όπως τοξικοί ρυπαντές, βαρέα μέταλλα, και παθογόνοι μικροοργανισμοί (Cherubini et al., 2009). Τα χαρακτηριστικά αυτά εξαρτώνται από το φορτίο των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων αλλά και από τις τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία της ιλύος και έτσι διαχωρίζεται ως ένα ωφέλιμο συστατικό για εκμετάλλευση ή ως ένα απόβλητο το οποίο πρέπει να απομακρυνθεί δίχως αρνητικές περιβαλλοντικές συνέπειες. Είναι πολύ σημαντικό η αξιοποίηση τους να είναι ασφαλής και αβλαβής για το περιβάλλον και για το λόγο αυτό τα τελευταία χρόνια οι νομοθεσίες σε παγκόσμια κλίμακα είναι αυστηρότερες για τη μέθοδο διάθεσης. Για παράδειγμα, στο παρελθόν ήταν συχνό φαινόμενο η διάθεσή τους στη θάλασσα και στα επιφανειακά νερά, όμως λόγω των αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων η μέθοδος αυτή δε θεωρείται αξιόπιστη λύση και έχει απαγορευτεί από τα περισσότερα κράτη (ΤΕΕ, 2005). Στη συνέχεια παρατίθενται οι πιο διαδεδομένοι τρόποι διάθεσης των βιοστερεών σήμερα.

1.8.1 Γεωργική χρήση

Η εφαρμογή της βιολογικής (δευτεροβάθμιας) ιλύος στο έδαφος αποσκοπεί στην ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση της οργανικής ύλης και των θρεπτικών συστατικών που υπάρχουν σε αυτά λειτουργώντας κυρίως ως εδαφοβελτιωτικά. Παράλληλα η αντικατάσταση των χημικών λιπασμάτων με βιοστερεά, έχει ευεργετικές συνέπειες όχι μόνο για τους γεωργούς-αγρότες οι οποίοι προμηθεύονται φθηνότερα ένα προϊόν με υψηλή περιεκτικότητα σε θρεπτικά συστατικά, αλλά και στις εκάστοτε κοινότητες καθώς αποτελεί μια οικονομική λύση διάθεσης, σχετικά ασφαλής για το περιβάλλον. Βέβαια πριν τη χρησιμοποίησή τους για γεωργική χρήση, θα πρέπει να ελεγχθεί η χημική τους σύνθεση και να εξασφαλιστεί η κατά το δυνατόν μικρότερη – ως ελάχιστη- παρουσία παθογόνων μικροοργανισμών, βαρέων μετάλλων και συνθετικών οργανικών ενώσεων, καθώς και ο περιορισμός της δυνατότητας διασποράς τους στα υπόγεια και επιφανειακά ύδατα που ενδέχεται να δημιουργήσουν περιβαλλοντικές οχλήσεις (δυσοσμία). Για το λόγο αυτό κρίνεται επιβεβλημένη η σταθεροποίηση της μέσω της κομποστοποίησης πριν αυτή διατεθεί στο περιβάλλον για αγροτική χρήση. Οι βασικές διαφορές μεταξύ των βιοστερεών που προκύπτουν από τη μονάδα επεξεργασίας υγρών λυμάτων και των βιομηχανικών λιπασμάτων είναι οι εξής (ΤΕΕ, 2005):

- Η ιλύς αποτελεί και πηγή οργανικής ύλης, γιατί περισσότερο από το 50% των στερεών είναι οργανικά. Η παρουσία οργανικών στην ιλύ βελτιώνει τις φυσικοχημικές και βιολογικές ιδιότητες καθώς και τη γονιμότητα των εδαφών στα οποία εφαρμόζεται.
- Η συγκέντρωση αζώτου, φωσφόρου και καλίου είναι μικρότερη στην ιλύ σε σχέση με τα βιομηχανικά λιπάσματα, καθώς τα θρεπτικά αυτά στην ιλύ είναι ενωμένα με το οργανικό κλάσμα. Έτσι είναι αφομοιώσιμα από τα φυτά μόνο μετά την αποικοδόμηση των οργανικών από τους μικροοργανισμούς του εδάφους. Τα θρεπτικά συστατικά της ιλύος βρίσκονται σε μορφή μη διαλυτή στο νερό και η ελευθέρωσή τους είναι μια αργή διαδικασία, σε αντίθεση με τα βιομηχανικά λιπάσματα που είναι συνήθως υδατοδιαλυτά και επομένως τα θρεπτικά συστατικά είναι άμεσα αφομοιώσιμα από τα

φυτά.

Καθώς η παραγωγή ιλύος είναι σταθερή κατά τη διάρκεια του χρόνου, οι γεωργικές απαιτήσεις είναι κυμαινόμενες ανάλογα την περίοδο του χρόνου και των γεωργικών αναγκών. Για το λόγο αυτό είναι αναγκαία η ύπαρξη ενός αποθηκευτικού χώρου στη μονάδα επεξεργασίας λυμάτων. Η μεταφορά της ιλύος για γεωργική χρήση γίνεται με ρυμουλκούμενα και είναι ιδιαίτερα δαπανηρή. Η διάθεσή της στο έδαφος θα πρέπει να γίνεται προσεκτικά και να λαμβάνονται όλα τα απαραίτητα μέτρα προστασίας για το περιβάλλον, ενώ η εφαρμογή της στο έδαφος επηρεάζεται από το είδος της καλλιέργειας, τις μετεωρολογικές συνθήκες και την έκταση που καταλαμβάνεται. Σύμφωνα με την Ελληνική Νομοθεσία (ΚΥΑ 80568/4225/1991, Άρθρο 5), η γεωργική χρήση της ιλύος απαγορεύεται στις περιπτώσεις που ακολουθούν:

- Σε λειμώνες ή εκτάσεις καλλιέργειας ζωοτροφών, εφόσον οι λειμώνες πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για βοσκή ή οι ζωοτροφές πρόκειται να συγκομισθούν πριν από την πάροδο ενός ορισμένου χρονικού διαστήματος. Για τον καθορισμό του χρονικού αυτού διαστήματος λαμβάνονται υπόψη η γεωγραφική και κλιματολογική τους κατάσταση και δεν μπορεί να είναι κατώτερο από τρεις εβδομάδες.
- Σε καλλιέργειες οπωροκηπευτικών κατά την περίοδο της βλάστησης, με εξαίρεση τις καλλιέργειες οπωροφόρων δένδρων.
- Σε εδάφη που προορίζονται για καλλιέργειες οπωροκηπευτικών οι οποίες συνήθως βρίσκονται σε άμεση επαφή με το έδαφος και κανονικά καταναλίσκονται σε νωπή κατάσταση, για περίοδο δέκα μηνών πριν από τη συγκομιδή και κατά τη διάρκεια της συγκομιδής.

Ταυτόχρονα συνιστάται η αποφυγή διάθεσης ιλύος στο έδαφος για αποστάσεις, μικρότερες των 200m από υφιστάμενες κατοικίες και οικιστικές ζώνες, ποταμούς συνεχής ροής και δίκτυα ύδρευσης, μικρότερες των 15m από ρυάκια, χείμαρρους ή άλλες ανοικτές υδατοσυλλογές περιορισμένης έκτασης και μικρότερες των 1000m από ακτές (ΤΕΕ, 2005).

Η γεωργική εφαρμογή της ιλύος έχει ευεργετικές συνέπειες για το περιβάλλον και τους αγρότες. Όμως, εκπέμπονται συχνά ρυπαντές οι οποίοι υπάρχουν στην ιλύ και μέσω διήθησης, απορροής και αεριοποίησης μεταφέρονται στο νερό και τον αέρα, ενώ παράλληλα κατά τη φάση μεταφοράς και διασποράς της ιλύος προκαλούνται αρνητικές επιπτώσεις από τα καυσαέρια. Ταυτόχρονα με τη μέθοδο αυτή, αυξάνεται το κόστος αποθήκευσης και μεταφοράς της ιλύος.

1.8.2 Εφαρμογή στο έδαφος και σε δασικές εκτάσεις

Η διάθεση των βιοστερεών στο περιβάλλον δε γίνεται μόνο για γεωργικούς σκοπούς. Χρησιμοποιείται επίσης για ανάπλαση περιοχών και αποκατάσταση εγκαταλελειμμένων εκτάσεων (λατομεία), καθώς λειτουργεί ως εδαφοβελτιωτικό, εμπλουτίζοντας με θρεπτικά συστατικά και οργανική ύλη το έδαφος, αναπτύσσοντας τις δυνατότητες βλάστησης αλλά και προστατεύοντας το έδαφος από αρνητικά φαινόμενα, όπως αυτό της διάβρωσης. Επίσης μπορεί να υποκαταστήσει τη χρήση λιπασμάτων για την ανάπλαση περιοχών βιομηχανικών εγκαταστάσεων όπου το κατεστραμμένο έδαφος αποτελεί ένα τοξικό περιβάλλον δίχως

δυνατότητες ανάπτυξης της βλάστησης.

Χρησιμοποιούνται κυρίως δυο τεχνικές, όταν η διάθεση των βιοστερεών στο έδαφος γίνεται για την αύξηση της ποσότητας του. Στην πρώτη, η ιλύς εφαρμόζεται πριν γίνει μίξη με το εκάστοτε έδαφος, ενώ στη δεύτερη αναμειγνύεται με το χώμα του εδάφους πριν την εφαρμογή της (ΤΕΕ, 2005). Όπως γίνεται εύκολα κατανοητό, οι κίνδυνοι από τη διάθεση της ιλύος για αποκατάσταση-ανάκτηση των εδαφών είναι πολύ μικρότεροι συγκριτικά με αυτούς που αναμένουμε από τη γεωργική χρήση, καθώς δεν ερχόμαστε σε άμεση επαφή (γεωργικά προϊόντα που καταναλώνουμε) με την εφαρμογή της στο έδαφος. Όμως, επειδή η ποσότητα που απαιτείται για την αποκατάσταση εδαφών είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτήν που απαιτείται για γεωργική χρήση, υπάρχει η πιθανότητα να προκύψουν σχετικά μεγάλες ποσότητες διάφορων ρυπαντών και παθογόνων μικροοργανισμών στο έδαφος. Για το λόγο αυτό, η ιλύς θα πρέπει να βρίσκεται σε μια σταθεροποιημένη, απολυμασμένη μορφή, με περιορισμένο ρυπαντικό φορτίο και δίχως την παρουσία δυσάρεστων οσμών.

Μια άλλη μέθοδος διάθεσης της ιλύος που παράγεται μετά από επεξεργασία των λυμάτων είναι η χρήση της σε δασικές εκτάσεις. Η εφαρμογή αυτή έχει ευεργετικές αποδόσεις, καθώς έχει παρατηρηθεί αύξηση στο ύψος, τη διάμετρο και στην επιφάνεια κάλυψης των δέντρων αν και τα αποτελέσματα είναι άμεσα εξαρτώμενα από τις τοπικές συνθήκες που επικρατούν και τα είδη των δέντρων. Παράλληλα η χρήση της ιλύος μπορεί να γίνει σε διαφορετικές περιόδους κατά τη διάρκεια ανάπτυξης των δέντρων, είτε πριν την εμφύτευση (αναδάσωση) είτε μετά τη φύτευση μιας πυκνής καλλιέργειας, δηλαδή μετά τη σπορά ή την κοπή (ΤΕΕ, 2005).

Από οικονομική σκοπιά η μέθοδος αυτή είναι συμφέρουσα όταν βρίσκονται διαθέσιμες δασικές εκτάσεις κοντά στις μονάδες επεξεργασίας των λυμάτων. Για τη διασπορά της ιλύος όμως σε πιο απομακρυσμένες περιοχές, απαιτούνται υψηλά επίπεδα εφαρμογής και χρησιμοποιείται ειδικός εξοπλισμός διασποράς ενώ σε πολλά δύσβατα δασικά σημεία είναι αδύνατη η εφαρμογή της. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την άνιση κατανομή των θρεπτικών συστατικών στο έδαφος και τη δυσανάλογη ανάπτυξης των δασών.

Όπως ισχύει και στην εφαρμογή της ιλύος για την αποκατάσταση εδαφών, οι κίνδυνοι της εφαρμογής σε δασικές εκτάσεις είναι μικρότεροι από αυτούς που υφίστανται στην εφαρμογή για γεωργική χρήση, καθώς δεν ερχόμαστε σε άμεση επαφή, με εξαίρεση την πιθανή μεταφορά βαρέων μετάλλων σε είδη θηραμάτων και σε κάποια είδη μανιταριών. Άλλωστε έχει παρατηρηθεί, ότι η διάθεση της ιλύος στα δάση αυξάνει την ποσότητα παρασίτων και παθογόνων μικροοργανισμών (ΤΕΕ, 2005). Παράλληλα έχει διαπιστωθεί, ότι η βελτιωμένη απόδοση των δασικών εκτάσεων αυξάνει τη διαθεσιμότητα τροφής για ορισμένα είδη πανίδας, με αποτέλεσμα τη διατάραξη της τροφικής αλυσίδας και την καταστροφή των αναπτυσσόμενων φυτών. Τέλος θα πρέπει να γίνεται έλεγχος, όχι μόνο για την καταλληλότητα της εφαρμογής - διότι είναι πιθανό σε ορισμένες δασικές εκτάσεις να μη είναι αναγκαία η προσθήκη θρεπτικών συστατικών-, αλλά και για τις ποσότητες που χρησιμοποιούνται, διότι η υπερβολική χρήση μπορεί να αποβεί καταστροφική για ολόκληρο το οικοσύστημα, καθώς παρατηρείται αποσύνθεση του ανώτατου επιφανειακού στρώματος του εδάφους και της οργανικής ύλης, αλλά και πιθανή διείσδυση ποσοτήτων αζώτου στα υπόγεια ύδατα.

Σε συμμόρφωση προς τις διατάξεις της Οδηγίας 86/278/ΕΟΚ του Συμβουλίου των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων και την αντικατάσταση της 80568/4225/1991 (Β' 641) Κοινής Υπουργικής Απόφασης, το άρθρο 6 της Κοινής Υπουργικής Απόφασης (2011) για τη δασοπονία

αναφέρει:

- Η χρησιμοποίηση επεξεργασμένης ιλύος σε δασικές εκτάσεις επιτρέπεται για τις καλλιεργούμενες δασικές εκτάσεις (silviculture) για ξυλεία, χαρτί, καλλωπιστικά δένδρα κλπ. Επιτρέπεται επίσης για δασωτές και αναδασωτές εκτάσεις καθώς και για αστικό και περιαστικό πράσινο εφόσον τεκμηριώνεται η αναγκαιότητα προσθήκης οργανικού υλικού.
- Απαγορεύεται η χρησιμοποίηση επεξεργασμένης ιλύος σε φυσικά δάση υπό σταθεροποιημένο καθεστώς (μη αναδασωτέα) και σε ειδικά προστατευόμενες περιοχές που έχουν χαρακτηριστεί ή χαρακτηρίζονται ως Ζώνες Ειδικής Προστασίας σύμφωνα με την υπ. Αριθ. 37338/1807/2010 ΚΥΑ (Β' 1495).

1.8.3 Αποτέφρωση και διάθεση τέφρας

Μετά την καύση της ιλύος στη μονάδα επεξεργασίας των λυμάτων, ο συνολικός της όγκος έχει μειωθεί αισθητά ενώ οι παθογόνοι μικροοργανισμοί και οι οργανικές ενώσεις έχουν καταστραφεί. Στόχος της καύσης, εκτός από τη μείωση του ρυπαντικού φορτίου είναι και η ενεργειακή αξιοποίηση της. Η τέφρα, είναι το στερεό υπόλειμμα που προκύπτει κατά την καύση και είναι ένα σταθερό, σχετικά αδρανές ανόργανο υλικό, αφού τα οργανικά της τέφρας αντιπροσωπεύουν το 1% της μάζας της (TEE, 2005).

Η ιλύς πριν την αποτέφρωση, είναι αναγκαίο να έχει υποστεί αφυδάτωση, όχι όμως και σταθεροποίηση, διότι κατά τη βιολογική διεργασία της χώνευσης για παράδειγμα, είναι πιθανό να μειωθεί η περιεκτικότητα σε στερεά και η διαδικασία της καύσης να γίνει δυσκολότερη. Η αποτέφρωση της ιλύος λαμβάνει χώρα στις παρακάτω κατηγορίες (TEE, 2005):

- Καύση ιλύος σε ειδικές εγκαταστάσεις αποτέφρωσης.
- Καύση της ιλύος μαζί με στερεά απόβλητα, κυρίως οικιακά απορρίμματα.
- Καύση της ιλύος σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις: Η ιλύς χρησιμοποιείται ως καύσιμο σε εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας ή άλλων προϊόντων, όπως είναι οι μονάδες παραγωγής τσιμέντου.

Μετά την αποτέφρωση, η τέφρα διατίθεται ή σε ΧΥΤΑ είτε χρησιμοποιείται για επίστρωση δρόμων (άσφαλτο) και την τσιμεντοβιομηχανία. Η αποτέφρωση χρησιμοποιείται σε μεγάλες εγκαταστάσεις χωρίς πολλές επιλογές διάθεσης και αποτελεί μια λύση όταν η αξιοποίηση της ιλύος στο έδαφος είναι αδύνατη ή οικονομικά ασύμφορη. Η διάθεση της τέφρας στους ΧΥΤΑ, ερχόμενη σε επαφή με τα απορρίμματα, τα αποδομεί και δημιουργούνται οργανικά οξέα τα οποία ενδεχομένως να διαφύγουν στον υπόγειο υδροφόρο (TEE, 2005), ενώ η χρήση της στην τσιμεντοβιομηχανία και την ασφάλτωση είναι πιθανό να μεταφέρει τοξικές ουσίες στο ευρύτερο περιβάλλον.

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της αποτέφρωσης, εκτός από τη μεγάλη μείωση του όγκου της ιλύος - άρα και των απαιτήσεων διάθεσης- είναι η δυνατότητα ανάκτησης ενέργειας. Το τελικό προϊόν όμως δεν έχει πολλές δυνατότητες αξιοποίησης, ενώ το υψηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης (απαιτείται εξειδικευμένο και έμπειρο προσωπικό και εγκαταστάσεις αντιρρύπανσης για τον περιορισμό των αέριων αποβλήτων) αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα για τη λειτουργία της. Παράλληλα η Οδηγία (2000/76/EC) κάνουν τη μέθοδο ακόμα ακριβότερη τόσο στην κατασκευή, όσο και στη λειτουργία. Σύμφωνα λοιπόν με την Οδηγία 2000/76/EC οι

μονάδες καύσης θα πρέπει να λειτουργούν έτσι ώστε:

- Η περιεκτικότητα των σκωριών και της τέφρας πυθμένα σε ολικό οργανικό άνθρακα (TOC) να είναι μικρότερη από 3%.
- Η θερμοκρασία των αερίων που εκλύονται από την διεργασία να αυξάνεται με ελεγχόμενο και ομοιογενή τρόπο και ακόμη κάτω από δυσμενέστερες συνθήκες στους 850°C τουλάχιστον. Εάν αποτεφρώνονται επικίνδυνα απόβλητα που περιέχουν πάνω από 1% αλογονούχες οργανικές ουσίες, η θερμοκρασία πρέπει να αυξάνεται στους 1100°C για δύο δευτερόλεπτα τουλάχιστον.
- Οι εκπομπές στην ατμόσφαιρα να μην προκαλούν σημαντική ατμοσφαιρική ρύπανση στην επιφάνεια του εδάφους, τα καυσαέρια να απάγονται με ελεγχόμενο τρόπο μέσω καπνοδόχου της οποίας ο σχεδιασμός θα πρέπει να εξασφαλίζει την προστασία της υγείας του ανθρώπου και της προστασίας του περιβάλλοντος.

1.8.4 Υγειονομική ταφή σε ΧΥΤΑ

Η υγειονομική ταφή αποτελεί ίσως την πιο διαδεδομένη μέθοδο διάθεσης της ιλύος στη χώρα μας (ΤΕΕ, 2005). Οι ταφές πραγματοποιούνται είτε σε τεχνητές τάφρους και καλύπτονται με χώμα, είτε η ιλύς εναποτίθεται στην επιφάνεια του εδάφους και στη συνέχεια καλύπτεται με χώμα. Αποτελεί την έσχατη λύση, όταν δηλαδή έχουν αποκλειστεί όλες οι υπόλοιπες διαθέσιμες λύσεις, καθώς δεν υπάρχει αξιοποίηση του προϊόντος. Πιο συγκεκριμένα, η λύση της υγειονομικής ταφής επιλέγεται όταν (ΤΕΕ, 2005):

- Η συγκέντρωση της ιλύος σε ρύπους την καθιστά ακατάλληλη για εφαρμογή στο έδαφος.
- Η διάθεση της ιλύος σε γεωργικές ή σε δασικές εκτάσεις, ή ως εδαφοβελτιωτικό δεν είναι εφικτή, εξαιτίας της τοποθεσίας, της τοπογραφίας ή του συνολικού υψηλού κόστους.
- Δεν παρέχεται η δυνατότητα καύσης της ιλύος.

Για το λόγο αυτό, υπάρχει περιορισμός της εφαρμογής αυτής σύμφωνα με τη νομοθεσία. Στην Οδηγία 1999/31/ΕΚ προβλέπεται ότι τα βιοαποδομήσιμα αστικά απόβλητα τα οποία προορίζονται για διάθεση σε ΧΥΤΑ θα πρέπει να μειωθούν ως εξής:

- μέχρι την 16η Ιουλίου 2010 στο 75% της συνολικής ποσότητας αυτών που είχαν παραχθεί το 1995.
- μέχρι την 16η Ιουλίου 2013 στο 50% της συνολικής ποσότητας αυτών που είχαν παραχθεί το 1995.
- μέχρι την 16η Ιουλίου 2020 στο 35% της συνολικής ποσότητας αυτών που είχαν παραχθεί το 1995.

Στους χώρους υγειονομικής ταφής είναι επιβεβλημένος ο σχεδιασμός τους, έτσι ώστε οι εκπομπές στο έδαφος, στα υπόγεια ύδατα και στον αέρα να ελαχιστοποιούνται. Για τον περιορισμό των εκπομπών στα υπόγεια ύδατα και το έδαφος θα πρέπει τα στραγγίσματα τα οποία παράγονται, να συλλέγονται και να επεξεργάζονται μέσα στους ΧΥΤΑ, ενώ για τον περιορισμό των αέριων εκπομπών θα πρέπει να υπάρχει σύστημα αξιοποίησης του

παραγόμενου βιοαερίου. Το βιοαέριο (μεθάνιο-διοξείδιο του άνθρακα) παράγεται από την αναερόβια αποσύνθεση που λαμβάνει χώρα στη χωματερή και αποτελεί αέριο που συμβάλλει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, άρα και την αύξηση της μέσης θερμοκρασίας της γης. Για το λόγο αυτό είναι πολύ σημαντικό η αξιοποίηση του ως ενέργεια, ειδικά αν παράγεται σταθερά και σε μεγάλες ποσότητες.

Το χαμηλό κόστος και η χαμηλή τεχνολογία που απαιτείται το κατατάσσουν ως ένα προσιτό έργο, όμως εκτός από την πιθανή παραγωγή βιοαερίου, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι πολύ περισσότερες από τα οφέλη. Εκτός από τις εκπομπές που προαναφέραμε, εκπέμπεται σκόνη η οποία διοχετεύεται στην ατμόσφαιρα, ενώ οι δυσάρεστες οσμές προσελκύουν διάφορα τρωκτικά και πουλιά. Συνεπώς εάν η εγκατάσταση βρίσκεται σχετικά κοντά σε κατοικημένη περιοχή, δημιουργούνται όχι μόνο προβλήματα ρύπανσης, αλλά και αισθητικής. Παράλληλα προκαλείται πρόσθετη ρύπανση της περιοχής και ενοχλητικοί θόρυβοι από την κυκλοφορία βυτιοφόρων που μεταφέρουν την ιλύ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΒΙΟΣΤΕΡΕΩΝ

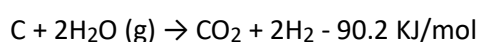
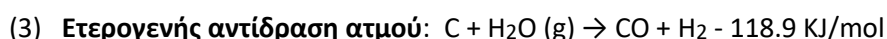
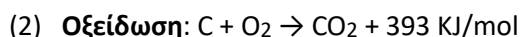
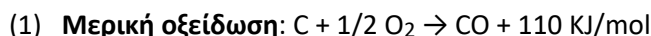
2.1 Αεριοποίηση

Η μέθοδος της αεριοποίησης αποτελεί μια μέθοδο ενεργειακής αξιοποίησης των αποβλήτων ως καύσιμα υλικά, με τη μετατροπή του οργανικού μέρους των βιοστερεών σε ένα εύφλεκτο αέριο προϊόν και ένα στερεό υπόλειμμα (τέφρα). Αποτελεί μια παλιά τεχνολογία, η οποία χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά στα μέσα του 19^{ου} αιώνα στην Αγγλία για την παραγωγή φωταερίου, αλλά αντικαταστάθηκε με την αποτελεσματικότερη -εκείνη την περίοδο- καύση (Karekezi et al., 2004). Η αεριοποίηση επιτυγχάνεται με την παρουσία οξειδωτικού μέσου σε υψηλές θερμοκρασίες και θεωρητικά όλα τα οργανικά απόβλητα με υγρασία της τάξεως από 5-30% μπορούν να υποστούν αεριοποίηση (Fytli & Zabaniotou, 2008). Βέλτιστος στόχος κατά την αεριοποίηση είναι η μετατροπή του ανθρακούχου περιεχομένου της ύλης σε καθαρό αέριο καυσίμου με υψηλή απόδοση (Marrero et al., 2003). Η σταθεροποίηση της ύλης πριν την αεριοποίηση δεν είναι απαραίτητη, καθώς η μη σταθεροποιημένη ύλη έχει μεγαλύτερη θερμική αξία, με τις ιδανικές τιμές περιεκτικότητας σε υγρασία να κυμαίνονται μεταξύ 15-20% (Biosolids2energy, 2017). Η ενεργειακή περιεκτικότητα του αερίου που παράγεται κατά την αεριοποίηση επηρεάζεται από το μέσο με το οποίο γίνεται η αεριοποίηση αλλά και από τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά της καύσιμης ύλης, όπως το σχήμα, το μέγεθος και την περιεκτικότητα σε άνθρακα και υγρασία. Συνήθως, η ενέργεια που παράγεται κατά την καύση του συνθετικού αερίου που προκύπτει από την αεριοποίηση, είναι επαρκής για την ικανοποίηση των ενεργειακών αναγκών της διαδικασίας (Gikas, 2017).

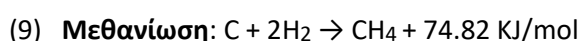
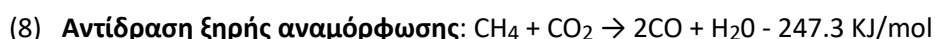
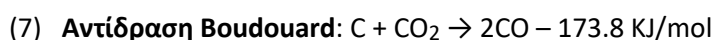
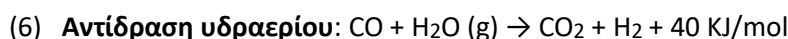
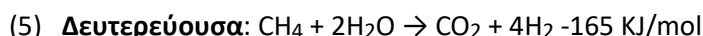
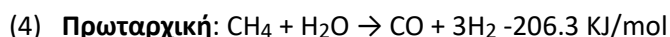
Η διαδικασία της αεριοποίησης μπορεί να θεωρηθεί μια παραλλαγή της διαδικασίας της πυρόλυσης, αλλά με παρουσία οξυγόνου. Συχνά όμως, οι δυο αυτές μέθοδοι συνδυάζονται μεταξύ τους. Η πυρόλυση αποτελεί μια θερμική επεξεργασία που πραγματοποιείται δίχως την παρουσία οξυγόνου. Η ύλη εισέρχεται σε θάλαμο με θερμοκρασία από 300-900°C (Natthakich & Chakkawan, 2005) με αποτέλεσμα τη μετατροπή της ύλης σε αέριο, υγρό και στερεό κλάσμα. Το αέριο μέρος περιέχει κυρίως υδρογόνο, μεθάνιο, διοξείδιο του άνθρακα και μονοξείδιο του άνθρακα, το υγρό, πίσσα και πετρέλαιο ενώ το στερεό αποτελεί ένα μείγμα καθαρού άνθρακα με μικρές ποσότητες αδρανών υλικών. Η αεριοποίηση λοιπόν, μπορεί να εφαρμοστεί στο στερεό υπόλειμμα της πυρόλυσης, με στόχο την αξιοποίηση του άνθρακα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και την ανάκτηση και επαναχρησιμοποίηση της θερμικής ενέργειας για τη ξήρανση των βιοστερεών.

Στο θάλαμο που λαμβάνει χώρα η αεριοποίηση, η παραγωγή αερίου επιτυγχάνεται είτε με τη χρήση αέρα σε θερμοκρασίες από 900-1100°C (Hansen & Cheong, 2019), είτε με τη χρήση οξυγόνου ή ατμού σε θερμοκρασίες από 1000-1400°C (TEE, 2005). Για την εκκίνηση της διαδικασίας απαιτείται υψηλή θερμοκρασία (περίπου 500°C) και η θερμότητα προστίθεται με ηλεκτρικές αντιστάσεις στα τοιχώματα του αντιδραστήρα. Παράλληλα μπορεί να προστίθεται θερμότητα και στο οξειδωτικό μέσο ώστε να εισέλθει στην εγκατάσταση κατάλληλα προθερμασμένο. Κατά την αεριοποίηση με αέρα, η οποία είναι και η πιο συνήθης και οικονομική επιλογή, η θερμαντική αξία του παραγόμενου αερίου είναι 6 MJ/Nm³ ενώ όταν χρησιμοποιείται καθαρό οξυγόνο ή ατμός η θερμογόνος δύναμη είναι μεγαλύτερη από 14

MJ/Nm³, αλλά η διαδικασία είναι πιο πολύπλοκη (Campoy et al., 2009). Το οξυγόνο οξειδώνει το καύσιμο και έτσι πραγματοποιούνται εξώθερμες αντιδράσεις που παράγουν θερμότητα. Η θερμότητα που παράγεται είναι αρκετή για τη διατήρηση της θερμοκρασίας σε υψηλά επίπεδα, και τη συνέχιση της διεργασίας δίχως την ανάγκη παροχής εξωτερικής θερμότητας. Η αεριοποίηση θεωρείται πλήρης, όταν έχει επιτευχθεί ολική μετατροπή του άνθρακα και όλα τα στοιχεία της οργανικής ύλης βρίσκονται στην αέρια φάση. Οι εξισώσεις που λαμβάνουν χώρα κατά την αεριοποίηση του άνθρακα είναι οι εξής (Knoef, 2005):



Αντιδράσεις αναμόρφωσης μεθανίου:



Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.1, το καύσιμο αέριο στο οποίο μετατρέπεται η ιλύς έπεται από τη θερμική επεξεργασία που υφίσταται αποτελείται κυρίως μονοξείδιο του άνθρακα, υδρογόνο, μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα.

Πίνακας 2.1 Τυπική σύνθεση του καύσιμου αερίου που προκύπτει από την αεριοποίηση με αεριοποιητή σταθερής κλίνης καθοδικής ροής (Downdraft Gasifier) (Fytli & Zabaniotou, 2008).

Συστατικά αερίου	Περιεκτικότητα %
Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)	6.28-10.77
Υδρογόνο (H ₂)	8.89-11.17
Μεθάνιο (CH ₄)	1.26-2.09
Αιθάνιο (C ₂ H ₆)	0.15-0.27
Αιθίνιο (C ₂ H ₂)	0.62-0.95

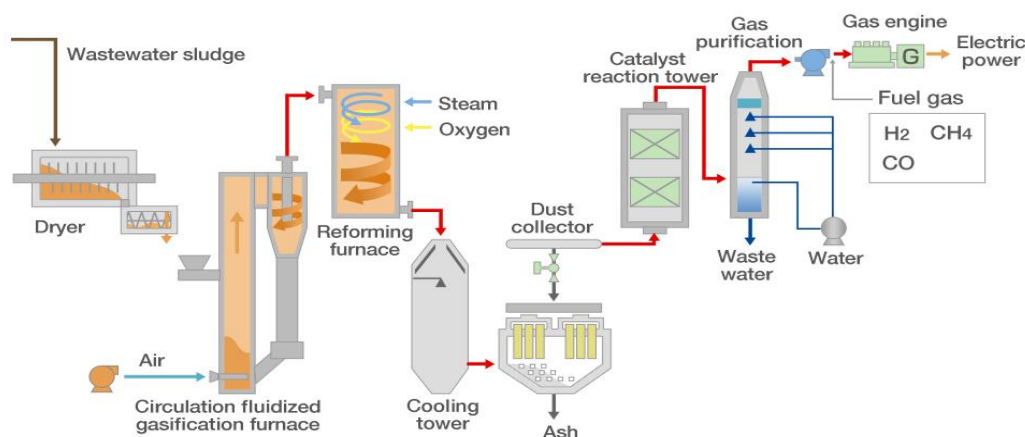
Οι δυνατότητες αξιοποίησης του παραγόμενου αερίου είναι πολύπλευρες. Αρχικά μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί για θερμικές διεργασίες όχι μόνο για την καύση των βιοστερεών, αλλά

και για διάφορες συσκευές που λειτουργούν με καύσιμο αέριο. Το αέριο που προκύπτει από την ιλύ, αποτελεί μια από τις διαδεδομένες πρώτες ύλες για την παραγωγή υδρογόνου (Fytilli & Zabaniotou, 2007), το οποίο μπορεί πρακτικά να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε κυψέλες καυσίμου. Παράλληλα αποτελεί μια πολύ αποτελεσματική διεργασία για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με το βαθμό απόδοσης να ξεπερνάει το 40%. Τέλος, υπάρχουν δυνατότητες, παραγωγής ατμού -μέσω της καύσης του αερίου- ή διοχέτευσης του στο δίκτυο αερίου της εκάστοτε περιοχής, εφόσον έχει ελεγχθεί η ποιότητα του.

Η μέθοδος της αεριοποίησης είναι μια καινούργια μέθοδος ενεργειακής αξιοποίησης, όχι με τόση αναγνωρισιμότητα όσο η καύση. Η καύση σήμερα -όπως θα αναφερθούμε εκτενέστερα στο κεφάλαιο 2.2- είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος, έχει μελετηθεί περισσότερο και εξασφαλίζει εγκαταστάσεις υψηλής απόδοσης με μικρότερο επενδυτικό ρίσκο. Αποτελεί μια παλιά, γνωστή στην αγορά και αποδεδειγμένη τεχνολογία όμως τα τελευταία χρόνια, η ανάπτυξη των ερευνών για αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των πηγών ενέργειας και των πρώτων υλών, έχει αναβαθμίσει τη μέθοδο της αεριοποίησης. Συγκριτικά με την καύση, πρόκειται για μια μέθοδο φιλικότερη προς το περιβάλλον καθώς το παραγόμενο αέριο μπορεί να επεξεργαστεί και να καθαριστεί πριν χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας και αποτελεί παράλληλα μια χημικώς καθαρή αναγωγική διαδικασία. Παράλληλα, οι εκπομπές οξειδίου του θείου, οξειδίων του αζώτου, τέφρας και άλλων ρυπαντικών φορτίων όπως τα βαρέα μέταλλα, είναι μικρότερες συγκριτικά με την καύση, βοηθώντας στην ανάγκη για μείωση των εκπομπών που συνδέονται άμεσα με το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Συγκριτικά με τη μέθοδο της αναερόβιας χώνευσης -θα αναφερθούμε εκτενώς στο κεφάλαιο 2.3- η αεριοποίηση αποδίδει περίπου το 190% της ενέργειας που θα μπορούσε να παραχθεί κατά την αναερόβια χώνευση, αξιοποιώντας το 100% του άνθρακα της ιλύος, την ώρα που η αναερόβια χώνευση εκμεταλλεύεται το 50-60% (Biosolids2energy, 2017).

Οι πιο συνηθισμένοι και ευρέως χρησιμοποιημένοι τύποι αντιδραστήρων αεριοποίησης είναι ενός σταδίου, δηλαδή χρησιμοποιείται ένας αντιδραστήρας για τη μετατροπή των καυσίμων στερεών σε αέριο. Είναι απλοί στην εφαρμογή τους και δίχως μεγάλες οικονομικές απαιτήσεις για την κατασκευή και τη λειτουργία τους. Οι αντιδραστήρες αυτοί είναι είτε πυκνής μορφής (σταθερής κλίνης) είτε αραιής μορφής. Η κύρια διαφορά τους είναι ότι στους αντιδραστήρες πυκνής μορφής η καύσιμη ύλη καλύπτει σχεδόν ολόκληρο το χώρο του αεριοποιητή, ενώ στους αντιδραστήρες αραιής μορφής μόνο ένα μικρό μέρος του αεριοποιητή. Η ποιότητα όμως του παραγόμενου αερίου από αντιδραστήρες ενός σταδίου δεν είναι η καλύτερη δυνατή. Για το λόγο αυτό τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο αντιδραστήρες πολλαπλών σταδίων, όπου αρχικά πραγματοποιείται η διεργασία της πυρόλυσης και στο επόμενο στάδιο η αεριοποίηση του προϊόντος που παράχθηκε (Εικόνα 2.1).

Wastewater sludge gasification power generation system Flow Example



Εικόνα 2.1 Σύστημα αεριοποίησης.

(Πηγή: <https://www.metawater.co.jp/eng/solution/product/sewer/gasconvert/>)

Εκτιμάται ότι στο άμεσο μέλλον η εφαρμογή της αεριοποίησης θα κερδίζει όλο και περισσότερους υποστηρικτές. Ο μεγάλος βαθμός απόδοσης σε ηλεκτρική ενέργεια, η ευρεία δυνατότητα χρήσης του παραγόμενου αερίου, η δυνατότητα επεξεργασίας μεγάλων ποσοτήτων αστικών αποβλήτων αλλά και η μείωση των δυσάρεστων εκπομπών κατά την αεριοποίηση αποτελούν σαφέστατα σημαντικά πλεονεκτήματα. Όμως, θα πρέπει να γίνει εκτενέστερη έρευνα για να αποδεχτεί η οικονομική βιωσιμότητα της για τις βιομηχανίες και να βρεθούν βέλτιστες επιλογές διάθεσης της παραγόμενης πίσσας και τέφρας.

2.2 Καύση

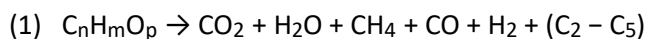
Η καύση εκτός από τη μείωση του όγκου και του ρυπαντικού φορτίου των βιοστερεών, χρησιμοποιείται παράλληλα για την εκμετάλλευση της ενέργειας που βρίσκεται σε αυτά, ως θέρμανση, ατμό, ηλεκτρικό ρεύμα και καύσιμο υλικό (ΤΕΕ, 2005). Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για ένα σύνολο εξώθερμων χημικών αντιδράσεων κατά τη διάρκεια των οποίων, η χημική ενέργεια των βιοστερεών που έχει παραχθεί κατά τη διάρκεια της φωτοσύνθεσης με τη βοήθεια της ηλιακής ενέργειας, μετατρέπεται σε θερμική. Αποτελεί την παλαιότερη και πιο διαδεδομένη μέθοδο παραγωγής ενέργειας και σήμερα, εκτιμάται ότι συνεισφέρει κατά 85% στην παραγωγή ενέργειας (Tillman, 2000). Θα μπορούσε να οριστεί ως καύση, κάθε ταχεία οξείδωση από την οποία μπορεί να παραχθεί θερμότητα και για να γίνει αυτό είναι απαραίτητη η σωστή αναλογία μεταξύ οξυγόνου, θερμότητας και καύσιμου υλικού (Φλιτρής, 2013).

Στη διεργασία της καύσης, αρχικά λαμβάνει χώρα η ξήρανση της ιλύος. Ακόμα και η αφυδατωμένη ιλύς, περιέχει ορισμένες ποσότητες υδάτων τα οποία πρέπει να εξατμιστούν πριν την καύση. Κατά τη διάρκεια της ξήρανσης, η περιεχόμενη υγρασία της ιλύος απορροφάται από τη θερμότητα, μετατρέπεται σε υδρατμούς και απομακρύνεται από την ιλύ. Η θερμική ξήρανση της ιλύος πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 80°C και η περιεκτικότητα σε στερεά ανέρχεται στο 90% (ΤΕΕ, 2005). Μετά τη θερμική ξήρανση έχει απομακρυνθεί το υγρό φορτίο της ιλύος, έχει μειωθεί ο όγκος και η μάζα της και το προϊόν είναι έτοιμο να περάσει στην επόμενη φάση αφού έχει αυξηθεί η θερμική του αξία. Στη συνέχεια ακολουθεί η θερμική αποδόμηση της ιλύος όπου επιτυγχάνεται η απελευθέρωση των πτητικών αερίων μέσω της πυρόλυσης. Η αποδοτική καύση της ιλύος είναι άμεσα εξαρτώμενη από τα

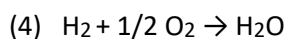
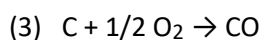
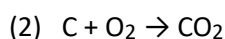
πτητικά στερεά που περιέχονται σε αυτή και την προεπεξεργασία την οποία έχει υποστεί.

Η ξηραμένη ιλύς είναι πλέον έτοιμη να περάσει στο επόμενο στάδιο, αυτό της καύσης (αποτέφρωσης) όπου οξειδώνονται πλήρως τα οργανικά συστατικά της και παράγεται τελικό προϊόν διοξειδίου του άνθρακα, ατμού και μικρής ποσότητας αδρανής τέφρας. Για την επίτευξη καύσης της ιλύος με συγκέντρωση στερεών μέχρι και 30% χρησιμοποιούνται πρόσθετα καύσιμα ενώ για συγκεντρώσεις στερεών μεγαλύτερες από 30-35% -ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της ιλύος και την περίσσεια αέρα- η καύση μπορεί να είναι αυτογενής (TEE, 2005). Κατά την αποτέφρωση, η θερμότητα που παράγεται από την οξείδωση των οργανικών ουσιών, είναι ικανή να συντηρήσει την καύση, εφόσον η υγρασία της ιλύος δεν υπερβαίνει το 65-70% και τα πτητικά αποτελούν το 65-75% των στερεών (Κελεσίδης, 2010). Σε διαφορετική περίπτωση η λειτουργία της διεργασίας απαιτεί συμπληρωματικό καύσιμο, ενώ μια εξωτερική πηγή θερμότητας, είναι απαραίτητη για την έναρξη και τον έλεγχο της λειτουργίας του αποτεφρωτήρα. Οι αντυπροσωπευτικές χημικές αντιδράσεις για την καύση είναι (Oladejo et al., 2018):

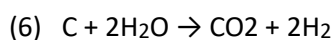
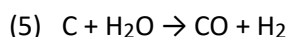
Πυρόλυση (Αδρανής ατμόσφαιρα – N₂, 350-700°C):



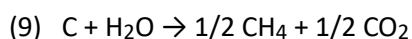
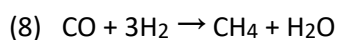
Μερική Οξείδωση (Ατμόσφαιρα χωρίς οξυγόνο):



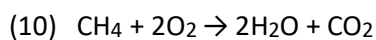
Αεριοποίηση (Ατμόσφαιρα χωρίς οξυγόνο – CO₂, H₂O, 800-1100°C, 1-33 bar):



Μεθανοποίηση (Περαιτέρω αντίδραση):



Καύση (Πλούσιο σε οξυγόνο περιβάλλον, αέρας ή οξυγόνο):



Τα περισσότερα συστήματα καύσης (Εικόνα 2.2) επιτυγχάνουν χαμηλές αποδόσεις της τάξεως του 15%, ενώ σε μεγαλύτερες και πιο αποδοτικές μονάδες μπορούν να φτάσουν το 35% (Σκουλού, 2009). Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί τεχνολογίες για τη βελτίωση της

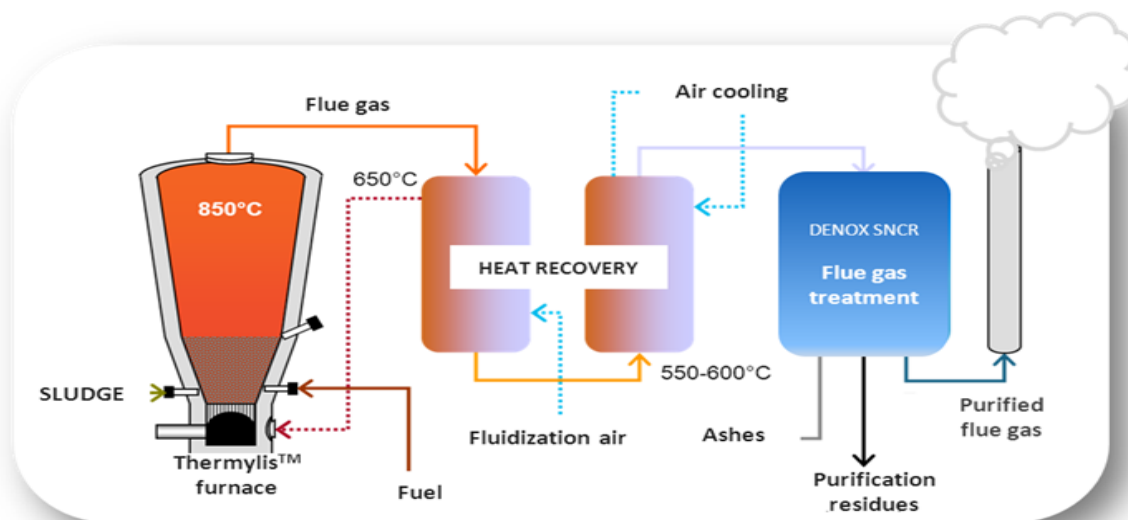
απόδοσης της καύσης, όπου η υλός καίγεται μαζί με άλλα ορυκτά καύσιμα (συνήθως αστικά απορρίμματα). Τα αέρια όμως που παράγονται από την αντίδραση αυτής της καύσης, αποτελούν σημαντικούς ρυπαντές για το περιβάλλον και είναι πιθανό να υπερβαίνουν τα εκάστοτε νομοθετικά πλαίσια. Επίσης η καύση της υλός για την παραγωγή ενέργειας μπορεί να πραγματοποιηθεί σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις που λειτουργούν με άνθρακα (λιγνίτη), όπου η καύσιμη υλός αντικαθιστά τον ορυκτό άνθρακα. Η καύση της υλός στις εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας βοηθά στην αντιμετώπιση του φαινομένου του θερμοκηπίου, αφού περιορίζει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και μεθανίου (CH_4), λειτουργώντας ως υποκατάστατο φυσικών ορυκτών καυσίμων (ΤΕΕ, 2005). Στον Πίνακα 2.2 που ακολουθεί φαίνονται οι οριακές τιμές των καυσαερίων από τις μονάδες αποτέφρωσης (μέσες τιμές, αναγόμενες σε θερμοκρασία 273 K, πίεση 101,3 kPa, περιεκτικότητα σε ξηρό οξυγόνο 11% ξηρό αέριο), σύμφωνα με την Οδηγία 2000/76EC (ΤΕΕ, 2005).

Πίνακας 2.2 Οριακές τιμές των καυσαερίων από τις μονάδες αποτέφρωσης (μέσες τιμές, αναγόμενες σε θερμοκρασία 273 K, πίεση 101,3 kPa, περιεκτικότητα σε ξηρό οξυγόνο 11% ξηρό αέριο), σύμφωνα με την Οδηγία 2000/76EC (ΤΕΕ, 2005).

Ρύποι	Μονάδες	Οριακή τιμή
Κονιόρτος	Mg/m^3	10
TOC	Mg/m^3	10
HCl	Mg/m^3	10
HF	Mg/m^3	1
SO_2	Mg/m^3	50
NO_x	Mg/m^3	200
CO	Mg/m^3	50
Διοξίνες και φουράνια	Mg/m^3	0.10
Hg	Mg/m^3	0.05
Cd+Ti	Mg/m^3	0.05
Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V	Mg/m^3	0.50

- TOC = Ολικός οργανικός άνθρακας
- HCl = Υδροχλωρικό οξύ
- HF = Υδροφθόριο
- SO_2 = Διοξείδιο του θείου
- NO_x = Οξείδιο του αζώτου
- CO = Μονοξείδιο του άνθρακα
- Hg = Υδράργυρος
- Cd + Ti = Κάδμιο + Τιτάνιο
- Sb + As + Pb + Cr + Co + Cu + Mn + Ni + V = Αντιμόνιο + Αρσενικό + Μόλυβδος + Χρώμιο + Μονοξείδιο του άνθρακα + Χαλκός + Μαγγάνιο + Νικέλιο + Βανάδιο

Οι κλίβανοι (καυστήρες) πολλαπλών εστιών και οι αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης είναι οι πιο ευρέως διαδεδομένες τεχνολογίες καύσης. Οι καυστήρες πολλαπλών εστιών αποτελούν μια παλιά τεχνολογία και περιλαμβάνει τρεις ζώνες (ξήρανσης, καύσης, ψύξης) με μέση απόδοση 15-35% (Σκουλού, 2009). Τα τελευταία χρόνια η χρήση τους έχει μειωθεί αισθητά κυρίως λόγω της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, των δυσάρεστων οσμών που εκπέμπονται, την πολυπλοκότητα της λειτουργίας τους και των υψηλών απαιτήσεων σε ενέργεια -άρα και σε κόστος- (TEE, 2005). Πιο συγκεκριμένα, τα αέρια που εξέρχονται από τους καυστήρες πολλαπλών εστιών, με θερμοκρασίες της τάξεως των 315-480°C, ατμοποιούν αρκετές πτητικές ουσίες της ιλύος όπως βενζίνη, τολουόλη, μερικώς οξειδωμένοι υδρογονάνθρακες, μονοξείδιο του άνθρακα και χλωριωμένα στοιχεία. Για την ελαχιστοποίηση των εκπομπών αυτών των οργανικών, δυσάρεστων οσμών και υδρογονανθράκων στην ατμόσφαιρα, αυξάνεται η θερμοκρασία των καυσαερίων στους 850°C (TEE, 2005). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αυξανόμενη κατανάλωση ενέργειας για την περαιτέρω καύσιμη ύλη που χρησιμοποιήθηκε. Οι αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης αποτελούν σήμερα την πιο διαδεδομένη μέθοδο καύσης καθώς, όπως προαναφέρθηκε, καθώς έχουν καλύτερη απόδοση – μεγαλύτερη από 40%- (Vamvuka & Zografos, 2004), οι απαιτήσεις για κατανάλωση ενέργειας για καύση είναι μικρότερες (οι θερμοκρασίες καύσης στους αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης είναι κατά 100-200°C χαμηλότερες από αυτές που έχουμε στους καυστήρες πολλαπλών εστιών) και οι εκπομπές απαερίων που παράγονται είναι καλύτερης ποιότητας (Νταρακάς, 2010). Άλλα πλεονεκτήματα των καυστήρων ρευστοποιημένης κλίνης είναι η καλή ομογενοποίηση καυσίμου, η δυνατότητα καύσης ιλύος με υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία και τέφρα, η δυνατότητα διακοπτόμενης λειτουργίας, το χαμηλότερο κόστος συντήρησης και η επίτευξη σχεδόν τέλει καύσης άνω του 99% (TEE, 2005). Σε κάθε μια από τις δυο περιπτώσεις βέβαια, οι αέριες εκπομπές από τις μονάδες αποτέφρωσης πρέπει να μην ξεπερνούν τα όρια εκπομπών που προβλέπονται από τη σχετική νομοθεσία.



Εικόνα 2.2 Σύστημα καύσης.

(Πηγή: <https://www.suezwaterhandbook.com/degremont-R-technologies/sludge-treatment/incineration/sludge-incineration-Thermylis>)

Η καύση αποτελεί την παλαιότερη και πιο διαδεδομένη μέθοδο αξιοποίησης ενέργειας από τα βιοστερεά. Εφαρμόζεται πολλά περισσότερα χρόνια σε σύγκριση με την αεριοποίηση, συνεπώς την εμπιστεύονται περισσότερο οι βιομηχανίες αφού γνωρίζουν τις δυνατότητες παραγωγής θερμικής ή ηλεκτρικής ενέργειας από αυτήν καθώς και τις οικονομικές της

απαιτήσεις. Η αξιοποίηση και ασφαλής διάθεση της παραγόμενης τέφρας στο περιβάλλον αλλά και η μείωση των εκπομπών αέριων ρύπων και δυσάρεστων οσμών αποτελούν τα σημαντικότερα ζητήματα που προκύπτουν από αυτή τη μέθοδο ενεργειακής αξιοποίησης των βιοστερεών.

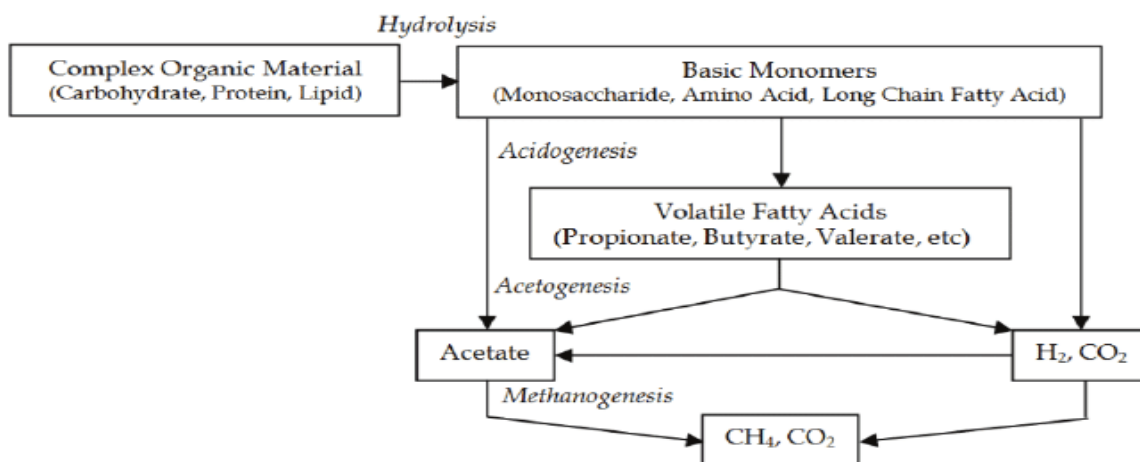
2.3 Αναερόβια χώνευση

Η αναερόβια χώνευση είναι μια τελείως διαφορετική μέθοδος αξιοποίησης της ιλύος για την παραγωγή ενέργειας συγκριτικά με την αεριοποίηση και την καύση, καθώς δεν πρόκειται για θερμοχημική μέθοδο, αλλά για βιοχημική. Αποτελεί ουσιαστικά μια βιοχημική-βιολογική διεργασία σταθεροποίησης και μερικής απολύμανσης της παχυμένης ιλύος και πραγματοποιείται χωρίς την παρουσία οξυγόνου σε κλειστού τύπου δεξαμενές. Εκεί επιτυγχάνεται μείωση των οργανικών των στερεών κατά 40-60%, ενώ και η ιλύς απαλλάσσεται αισθητά από τους περισσότερους παθογόνους μικροοργανισμούς (ΤΕΕ, 2005). Παράλληλα κατά την αναερόβια επεξεργασία, το οργανικό φορτίο διασπάται σε οξέα, τα οποία με τη σειρά τους μετατρέπονται σε μεθάνιο (CH_4) και διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), ενώσεις οι οποίες συνθέτουν μια χρήσιμη πηγή ενέργειας, το βιοαέριο. Η χρήση αναερόβιων διεργασιών για την αξιοποίηση των ανθρωπίνων αποβλήτων επινοήθηκε το 1860 από τον Γάλλο ερευνητή Jean-Louis Mouras στην πόλη Βεσούλ της Γαλλίας (Gikas, 2008). Ο Jean-Louis Mouras βραβεύτηκε το 1881 με το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας, ενώ το ίδιο δίπλωμα απονεμήθηκε το 1897 στον Donald Cameron, ο οποίος σχεδίασε και κατασκεύασε την πρώτη δεξαμενή αναερόβιας χώνευσης στην πόλη του Έξτερ στο Ηνωμένο Βασίλειο (Gikas, 2008).

Η αναερόβια επεξεργασία αποτελεί μια αργή και ευαίσθητη στις αλλαγές του περιβάλλοντος διαδικασία, στην οποία συμμετέχουν αναερόβιοι μικροοργανισμοί. Η βέλτιστη θερμοκρασία ανάπτυξης των αναερόβιων βακτηριδίων είναι η μεσοφιλική περιοχή ($30-35^\circ\text{C}$) ή η θερμοφιλική περιοχή ($55-60^\circ\text{C}$) (ΤΕΕ, 2005), ενώ δεν υπάρχει περιορισμός ως προς τη μέγιστη συγκέντρωση του οργανικού φορτίου και των στερεών που εισέρχονται στον αντιδραστήρα. Στις κλειστές κυλινδρικές δεξαμενές πραγματοποιείται συνεχής ανάμειξη της ιλύος μέσω της ανακυκλοφορίας του βιοαερίου ή με μηχανική ανάμειξη και η ιλύς θερμαίνεται με εναλλάκτες για τη διατήρηση της θερμοκρασίας στα επιθυμητά επίπεδα ($33-37^\circ\text{C}$) (Νταρακάς, 2010). Τα στερεά παραμένουν κατά μέσο όρο στις δεξαμενές από 10 έως 20 μέρες και ελέγχονται κατά τη διάρκεια της διεργασίας, ενώ η ιλύς συλλέγεται από τον πυθμένα της δεξαμενής.

Η αναερόβια χώνευση ως διεργασία αποτελείται από διάφορα στάδια (Εικόνα 2.3). Το πρώτο στάδιο είναι αυτό της υδρόλυσης (όξινη ζύμωση) όπου ενώσεις με υψηλά μοριακά βάρη (λιπίδια, πολυσακχαρίτες, πρωτεΐνες, νουκλεϊκά οξέα) υδρολύονται σε απλά μονομερή (λιπαρά οξέα, μονοσακχαρίτες, αμινοξέα, πουρίνες, πυριμιδίνες) (Νταρακάς, 2010). Οι ενώσεις αυτές είναι υδατοδιαλυτές και αποτελούν κατάλληλο υπόστρωμα βιολογικής αύξησης. Στη συνέχεια λαμβάνει χώρα η οξεογένεση, όπου το υδρολυμένο πλέον οργανικό φορτίο υπό τη μορφή μονομερών μετατρέπεται σε λιπαρά πτητικά οξέα, αλκοόλες, διοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο μέσω διάφορων διεργασιών ζύμωσης (Μαντζιούρας, 2010). Μετά το στάδιο της οξεογένεσης, ακολουθεί αυτό της οξικογένεσης όπου τα πτητικά λιπαρά οξέα μετατρέπονται σε οξικά με αναγωγή διοξειδίου του άνθρακα. Οι συνηθέστερες μικρομοριακές οργανικές ενώσεις που σχηματίζονται κατά την οξικογένεση είναι το οξικό οξύ (CH_3COOH), το προπιονικό οξύ ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}$), το βουτυρικό οξύ ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$), το γαλακτικό οξύ και οι κετόνες

(Νταρακάς, 2010). Το τελικό στάδιο της διεργασίας αποτελεί η μεθανογένεση (αλκαλική ζύμωση), όπου με τη δράση των μεθανογόνων μικροοργανισμών, τα οξέα μετατρέπονται σε μεθάνιο (CH₄) και διοξείδιο του άνθρακα (CO₂).



Εικόνα 2.3 Στάδια της αναερόβιας χώνευσης.

(Πηγή: https://www.researchgate.net/publication/221911432_Anaerobic_Treatment_of_Industrial_Effluents_An_Overview_of_Applications/figures?lo=1)

Οι βασικές αντιδράσεις παραγωγής μεθανίου κατά το στάδιο της μεθανογένεσης είναι οι εξής (Μαντζιούρας, 2010):

- (1) $\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$
- (2) $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$
- (3) $4\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_4 + 3\text{CO}_2$
- (4) $4\text{CH}_3\text{OH} \rightarrow 3\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$
- (5) $2\text{HCOOH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$

Απαραίτητη προϋπόθεση για την ομαλή λειτουργία της αναερόβιας χώνευσης είναι η ύπαρξη ισορροπίας των δυο φάσεων, απαιτείται δηλαδή ισορροπία μεταξύ όξινης και αλκαλικής ζύμωσης ώστε ο ρυθμός σχηματισμού των οργανικών οξέων να είναι ίδιος με το ρυθμό μετατροπή τους σε μεθάνιο. Αυτό επιτυγχάνεται όταν οι τιμές του pH κυμαίνονται από 7.0-7.5. Γενικά οι μικροοργανισμοί που παράγουν το μεθάνιο είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι στις μεταβολές του pH. Για όξινες τιμές με $\text{pH} < 6.2$ η παραγωγή μεθανίου διακόπτεται (Νταρακάς, 2010). Ο ρυθμός με τον οποίο εκτελείται η διεργασία αυτή, εξαρτάται επίσης από τη θερμοκρασία, το χρόνο παρακράτησης των στερεών αλλά και την παρουσία τοξικών συστατικών που παρεμποδίζουν τη χώνευση.

Οι βασικοί τύποι αναερόβιας χώνευσης είναι δύο: χαμηλής φόρτισης και υψηλής φόρτισης. Η μέθοδος της χαμηλής φόρτισης αποτελεί μια παλαιά μέθοδο, όχι τόσο αποτελεσματική και αποδοτική όσο της υψηλής φόρτισης. Η μέθοδος υψηλής φόρτισης απαιτεί θέρμανση, ομοιόμορφη και συνεχή τροφοδοσία της ιλύος και πλήρη ανάμιξη της ιλύος που βρίσκεται μέσα στο χωνευτή, σε αντίθεση με αυτή της χαμηλής φόρτισης όπου πρακτικά λειτουργεί μόνο ως

αποθηκευτικός χώρος, καθώς δεν απαιτείται θέρμανση και ανάμειξη της ιλύος. Παράλληλα ο μέσος χρόνος παραμονής της ιλύος στον χωνευτή υψηλής φόρτισης κυμαίνεται από 10-25 ημέρες, ενώ στον χωνευτή χαμηλής φόρτισης 30-60. Συνεπώς η μέθοδος χαμηλής φόρτισης χρησιμοποιείται σπάνια, συνήθως σε μικρές εγκαταστάσεις.

Το παραγόμενο βιοαέριο, λόγω της ύπαρξης μεθανίου αποτελεί χρήσιμη πηγή ενέργειας και φυλάσσεται μέσα σε αεριοφυλάκιο. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε καυστήρες για τη θέρμανση της ιλύος στην επιθυμητή θερμοκρασία, ενώ συχνά χρησιμοποιείται και για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην εγκατάσταση (ΤΕΕ, 2005). Η σύσταση του παραγόμενου βιοαερίου αποτελείται από 55-70% μεθάνιο (CH_4), 30-45% διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), 1-2% υδρόθειο (H_2S), 0-1% άζωτο (N_2), 0-1% υδρογόνο (H_2) και ίχνη μονοξειδίου του άνθρακα (CO) (Νταρακάς, 2010). Ο παραγόμενος όγκος βιοαερίου είναι $0.8-1.2 \text{ m}^3/\text{kg}$ πτητικών στερεών που καταστρέφονται, ενώ το παραγόμενο βιοαέριο ($400-500 \text{ lt/kg}$ οργανικών ουσιών) ισοδυναμεί περίπου με $25 \text{ L/κατ}\cdot\text{d}$ (Andreoli et al., 2017) και έχει συνολική θερμική δύναμη $28.03-38.92 \text{ MJ/Nm}^3$ (Oladejo et al., 2018). Οι διάφορες συνθήκες-αποδόσεις χώνευσης ιλύος παρατίθενται στον Πίνακα 2.3.

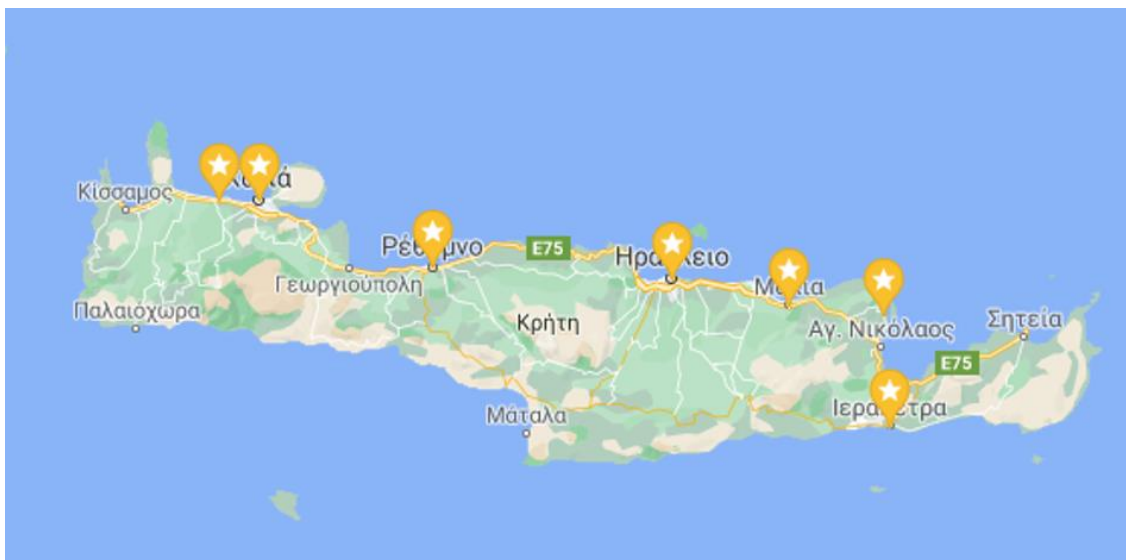
Πίνακας 2.3 Γενικοί όροι χώνευσης της ιλύος (Αγγελάκης και Τσομπάνογλου, 2004).

Παράμετρος	Τιμή
Θερμοκρασία	
Άριστη	37°C
Κανονική	$33-35^\circ\text{C}$
pH	
Άριστο	7.0-7.1
Κανονικό	6.7-7.4
Παραγωγή αερίων	
Ανά kg προστιθέμενων πτητικών αερίων	$0.37-0.5 \text{ m}^3$
Ανά kg αποδομούμενων πτητικών αερίων	$1.0-1.12 \text{ m}^3$
Σύνθεση αερίου	
Μεθάνιο	65-69%
Διοξείδιο του άνθρακα	31-35%
Υδρόθειο	Ίχνη
Συγκέντρωση πτητικών οξέων, ως οξικό οξύ	
Κανονική λειτουργία	200-800 mg/L
Μέγιστη	2000 mg/L
Συγκέντρωση αλκαλικότητας ως CaCO_3	
Κανονική λειτουργία	2000-3000 mg/L

Η μέθοδος της αναερόβιας χώνευσης αποτελεί τη βέλτιστη μέθοδο σταθεροποίησης της ιλύος. Το κύριο πλεονέκτημά της, εκτός από την αδρανοποίηση της ιλύος, τη σημαντική μείωση των στερεών που υπάρχουν σε αυτήν και το υψηλό ποσοστό καταστροφής των μικροοργανισμών, είναι η παραγωγή και αξιοποίηση του βιοαερίου, που καλύπτει της ενεργειακές ανάγκες της χώνευσης (θερμική και ηλεκτρική ενέργεια). Παράλληλα στις κλειστές δεξαμενές που λαμβάνει χώρα η αναερόβια χώνευση, ελαχιστοποιείται η όχληση λόγω οσμών και εντόμων. Επειδή πρόκειται όμως για μια αργή και ευαίσθητη στις συνθήκες λειτουργίας διεργασία, απαιτείται συνεχής έλεγχος για την ομαλή λειτουργία της. Η διεργασία αυτή εφαρμόζεται σε σχετικά μεγάλες εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, καθώς το υψηλό κόστος επένδυσης την καθιστά απαγορευτική για μικρές μονάδες επεξεργασίας λυμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΕΛ ΚΡΗΤΗΣ

Στο νησί της Κρήτης υπάρχουν πολλές εγκαταστάσεις επεξεργασίας αστικών λυμάτων. Στην παρούσα εργασία συλλέχθηκε ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα ιλύος από συνολικά 7 εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων και στους 4 Νομούς του νησιού (Εικόνα 3.1). Στις περισσότερες εγκαταστάσεις, η ιλύς που παράγεται, διατίθεται σε ΧΥΤΑ ενώ τα επεξεργασμένα λύματα εκρέουν σε υδάτινους αποδέκτες. Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται στοιχεία από τις ΕΕΛ που συλλέχθηκε δείγμα ιλύος. Τα στοιχεία που ακολουθούν βρίσκονται στο επίσημο site των ΕΕΛ (<http://astikalimata.ypeka.gr/>).



Εικόνα 3.1 ΕΕΛ Κρήτης όπου συλλέχθηκε δείγμα ιλύος.

3.1 ΕΕΛ Νομού Χανίων

Στο Δήμο Χανίων, η Δ.Ε.Υ.Α.Χ (Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης Αποχέτευσης Χανίων) λειτουργεί την ΕΕΛ Χανίων από το 1995. Επεξεργάζεται αστικά λύματα από τις Δημοτικές Ενότητες Χανίων, Ελευθερίου Βενιζέλου, Σούδας, Θερίσου και Ακρωτηρίου, βοθρολύματα από περιοχές που δεν διαθέτουν δίκτυο αποχέτευσης και βιομηχανικά απόβλητα με ίδια σύσταση με αυτήν των αστικών λυμάτων. Εξυπηρετεί 126.500 κατοίκους, με δυναμικότητα 170.000 ισοδύναμων κατοίκων, μέσο συνολικό εισερχόμενο φορτίο 8.084 KgBOD₅/day και μέγιστο 8.749 KgBOD₅/day. Η συνολική μέση εισερχόμενη παροχή είναι 19.020 m³/day και η μέγιστη 21.841 m³/day. Τα επεξεργασμένα λύματα, διατίθενται στον κόλπο των Χανίων μέσω υποθαλάσσιου αγωγού που εκβάλλει σε βάθος 20 μέτρων, ενώ ένα ποσοστό τους υφίσταται τριτοβάθμια επεξεργασία και χρησιμοποιείται ως νερό άρδευσης του πρασίνου των 35 στρεμμάτων της ΕΕΛ. Τα αστικά λύματα υφίστανται πρωτοβάθμια και δευτεροβάθμια επεξεργασία και η διάθεση των 790.000 Kg DS/year ξηρής αφυδατωμένης και ασβεστοποιημένης ιλύος που παράγονται πραγματοποιείται στο Χ.Υ.Τ. Κορακιάς μαζί με άλλα στερεά παραπροϊόντα της ΕΕΛ όπως άμμος και εσχαρίσματα. Το ποσοστό στερεών της αφυδατωμένης λάσπης ισούται με 18%. Παράλληλα πραγματοποιείται η διεργασία της αναερόβιας χώνευσης και το παραγόμενο βιοαέριο αξιοποιείται για την παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας, καλύπτοντας με τον τρόπο αυτό έως το 20% των καθημερινών ενεργειακών αναγκών της εγκατάστασης. Από αυτήν την εγκατάσταση συλλέχθηκε ιλύς μετά την πρωτοβάθμια επεξεργασία των λυμάτων, μετά τη δευτεροβάθμια επεξεργασία των λυμάτων, ομογενοποιημένη ιλύς και ιλύς που προκύπτει από

τη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης.

Επίσημο site εγκατάστασης: <https://www.deyach.gr/index.php?lang=el>

Στο χωριό Γεράνι του Δήμου Πλατανιά βρίσκεται η Δ.Ε.Υ.Α.Β.Α (Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης Αποχέτευσης Βόρειου Άξονα) και εξυπηρετεί τη Δημοτική Ενότητα Νέας Κυδωνίας του Δήμου Χανίων και τις Δημοτικές Ενότητες Πλατανιά, Βουκολιών και Κολυμβαρίου του Δήμου Πλατανιά. Η λειτουργία αυτής της ΕΕΛ ξεκίνησε το 2007 με δυνατότητες εξυπηρέτησης 60.000 ισοδύναμων κατοίκων. Το χειμώνα εξυπηρετεί περίπου 30.000 κατοίκους, ενώ τους καλοκαιρινούς μήνες, λόγω του τουρισμού ενδέχεται να εξυπηρετήσει έως 80.000 ανθρώπους. Έχει μέσο συνολικό εισερχόμενο φορτίο 2.255 KgBOD₅/day και μέγιστο 5.263 KgBOD₅/day. Η συνολική μέση εισερχόμενη παροχή ισοδυναμεί με 9.109 m³/day και η μέγιστη με 12.367 m³/day. Ο τελικός αποδέκτης των επεξεργασμένων λυμάτων εκρέεται μέσω υποθαλάσσιου αγωγού μήκους 1.120 μέτρων, στη θαλάσσια περιοχή του Γερανίου. Η ξηραμένη ασβεστοποιημένη ιλύς που προκύπτει μετά την αφυδάτωση έχει ποσοστό στερεών 17% και τα 307.000 Kg DS/year που παράγονται, αξιοποιούνται για γεωργικές και εδαφικές χρήσεις. Τα αστικά λύματα υφίστανται δευτεροβάθμια επεξεργασία και η ιλύς συλλέχθηκε κατά την έξοδο της από αυτήν την επεξεργασία (δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης).

Επίσημο site εγκατάστασης: <http://www.deyaba.gr/index.php/el/>

3.2 ΕΕΛ Νομού Ρεθύμνου

Στο Δήμο Ρεθύμνου, η Δ.Ε.Υ.Α.Ρ (Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης Αποχέτευσης Ρεθύμνου) λειτουργεί την ΕΕΛ Ρεθύμνου από το 1995. Εξυπηρετεί 58.000 κατοίκους, με δυνατότητες εξυπηρέτησης 90.000 ισοδύναμου πληθυσμού. Εκτός της πόλης του Ρεθύμνου, η Δ.Ε.Υ.Α.Ρ εξυπηρετεί και 86 οικισμούς. Το συνολικό μέσο εισερχόμενο φορτίο ισούται με 2.800 KgBOD₅/day και το μέγιστο με 4.200 KgBOD₅/day. Η μέση εισερχόμενη παροχή ανέρχεται στα 12.100 m³/day και μέγιστη στα 13.700 m³/day. Τα επεξεργασμένα λύματα απορρίπτονται στη θάλασσα μέσω υποθαλάσσιου αγωγού, ενώ τα 1.100.000 Kg DS/year ξηράς αφυδατωμένης λάσπης που παράγονται έχουν ποσοστό σε στερεά 20% και διατίθενται σε ΧΥΤΑ. Τα λύματα υφίστανται δευτεροβάθμια επεξεργασία και η ιλύς συλλέχθηκε μετά τη δευτεροβάθμια επεξεργασία των λυμάτων και μετά την αερόβια χώνευση της ιλύος.

Επίσημο site εγκατάστασης: <https://deyar.eu/>

3.3 ΕΕΛ Νομού Ηρακλείου

Η Δ.Ε.Υ.Α.Η (Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης Αποχέτευσης Ηρακλείου) ξεκίνησε τη λειτουργία της ΕΕΛ Ηρακλείου το 1996 και εξυπηρετεί εκτός του Δήμου του Ηρακλείου και το Γάζι που ανήκει στο Δήμο Μαλεβιζίου. Είναι η μεγαλύτερη ΕΕΛ του νησιού και εξυπηρετεί 191.500 κατοίκους, με τη δυναμικότητα της εγκατάστασης να ανέρχεται πλέον στους 230.000 μετά και την τελευταία αναβάθμιση που υπέστη. Έχει συνολικό μέσο εισερχόμενο φορτίο 11.120 KgBOD₅/day και συνολική μέση εισερχόμενη παροχή 32.960 m³/day. Τα λύματα υφίστανται πρωτοβάθμια και δευτεροβάθμια επεξεργασία, ενώ με τη νέα επέκταση της εγκατάστασης, στην ΕΕΛ πραγματοποιείται και τριτοβάθμια επεξεργασία (MBR System). Με τη νέα αυτή αναβάθμιση, η ΕΕΛ μπορεί να δεχτεί επιπλέον 6.000 m³/day τα οποία εξυπηρετούν 30.000 ισοδύναμους κατοίκους. Η επεξεργασία τους γίνεται με τη μέθοδο των βιολογικών αντιδραστήρων μεμβρανών (MBR System), ώστε να επιτυγχάνεται επεξεργασμένη ροή

τριτοβάθμιας ποιότητας, κατάλληλη για άρδευση πρασίνου ή καλλιεργειών. Τα επεξεργασμένα λύματα εκρέουν με χειρσαίο και υποθαλάσσιο αγωγό διάθεσης, ενώ τα 2.906.000 Kg DS/year ξηράς αφυδατωμένης λάσπης που παράγονται έχουν ποσοστό σε στερεά 22% και διατίθενται σε ΧΥΤΑ. Από την εγκατάσταση συλλέχθηκε δείγμα, κατά την έξοδο της ιλύος από την πρωτοβάθμια επεξεργασία, τη δευτεροβάθμια επεξεργασία, ομογενοποιημένη ιλύς και ιλύς που προκύπτει από τη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης.

Επίσημο site εγκατάστασης: <https://www.deyah.gr/>

Στο Δήμο Χερσονήσου, στην κωμόπολη των Μαλίων λειτουργεί από το 2009 η ΕΕΛ Μαλίων. Εξυπηρετεί 26.336 κατοίκους, με δυνατότητες εξυπηρέτησης 26.500 ισοδύναμου πληθυσμού, και ενσωματώνει εκτός από τα Μάλια και την Σταλίδα. Το μέσο συνολικό εισερχόμενο φορτίο ανέρχεται στα 420 KgBOD₅/day, το μέγιστο συνολικό εισερχόμενο φορτίο στα 1.860 KgBOD₅/day, η μέση συνολική εισερχόμενη παροχή στα 2.600 m³/day και η μέγιστη συνολική εισερχόμενη παροχή στα 6.000 m³/day. Τα λύματα υφίστανται δευτεροβάθμια επεξεργασία και 950.000 m³/year επεξεργασμένα λύματα, επαναχρησιμοποιούνται για άρδευση. Τα 540.000 Kg DS/year ξηράς αφυδατωμένης λάσπης που παράγονται διατίθενται σε ΧΥΤΑ και το ποσοστό τους σε στερεά ανέρχεται στο 14%. Η ιλύς συλλέχθηκε κατά την έξοδο της από τη δευτεροβάθμια επεξεργασία.

Επίσημο site εγκαταστάσεων: <https://www.hersonisos.gr/municipal/deyax>

3.4 ΕΕΛ Νομού Λασιθίου

Στο Δήμο Αγίου Νικολάου, στην πόλη της Ελούντας λειτουργεί ΕΕΛ από το 2000. Ενσωματώνει εκτός της Ελούντας, τα χωριά Μαυρικιανό και Πλάκα. Εξυπηρετεί 4.181 κατοίκους με τη δυναμικότητα της εγκατάστασης να ανέρχεται στους 5.000 ισοδύναμους κατοίκους. Έχει μέσο συνολικό εισερχόμενο φορτίο 290 KgBOD₅/day, μέγιστο συνολικό εισερχόμενο φορτίο 470 KgBOD₅/day, μέση συνολική εισερχόμενη παροχή 700 m³/day και μέγιστη συνολική εισερχόμενη παροχή 1.300 m³/day. Τα λύματα υφίστανται δευτεροβάθμια επεξεργασία, αποτίθενται επεξεργασμένα στο έδαφος, τα 24.200 Kg DS/year ξηράς αφυδατωμένης ιλύος που παράγονται διατίθενται σε ΧΥΤΑ και έχουν ποσοστό στερεών 20%. Η ιλύς συλλέχθηκε κατά την έξοδο της από τη δευτεροβάθμια επεξεργασία.

Επίσημο site εγκαταστάσεων: <https://www.deyaan.gr/apoxeteusi.html>

Στο Δήμο Ιεράπετρας, στην ομώνυμη πόλη, λειτουργεί από το 2003 ΕΕΛ. Ενσωματώνει παράλληλα τα χωριά Κουτσουνάρι, Φέρμα και Μύθοι. Εξυπηρετεί 20.250 κατοίκους, με τη δυναμικότητα της εγκατάστασης να ανέρχεται στους 25.700 ισοδύναμους κατοίκους. Το μέσο συνολικό εισερχόμενο φορτίο ανέρχεται στα 403 KgBOD₅/day, το μέγιστο συνολικό εισερχόμενο φορτίο στα 521 KgBOD₅/day, η μέση συνολική εισερχόμενη παροχή στα 1.600 m³/day και η μέγιστη συνολική εισερχόμενη παροχή στα 2.250 m³/day. Τα λύματα υφίστανται δευτεροβάθμια επεξεργασία, εκρέουν επεξεργασμένα στη θάλασσα, τα 300.000 Kg DS/year ξηράς αφυδατωμένης ιλύος που παράγονται διατίθενται σε ΧΥΤΑ και έχουν ποσοστό στερεών 15%. Η ιλύς συλλέχθηκε κατά την έξοδο της από τη δευτεροβάθμια επεξεργασία.

Επίσημο site εγκατάστασης: <http://www.ierapetra.gov.gr/>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

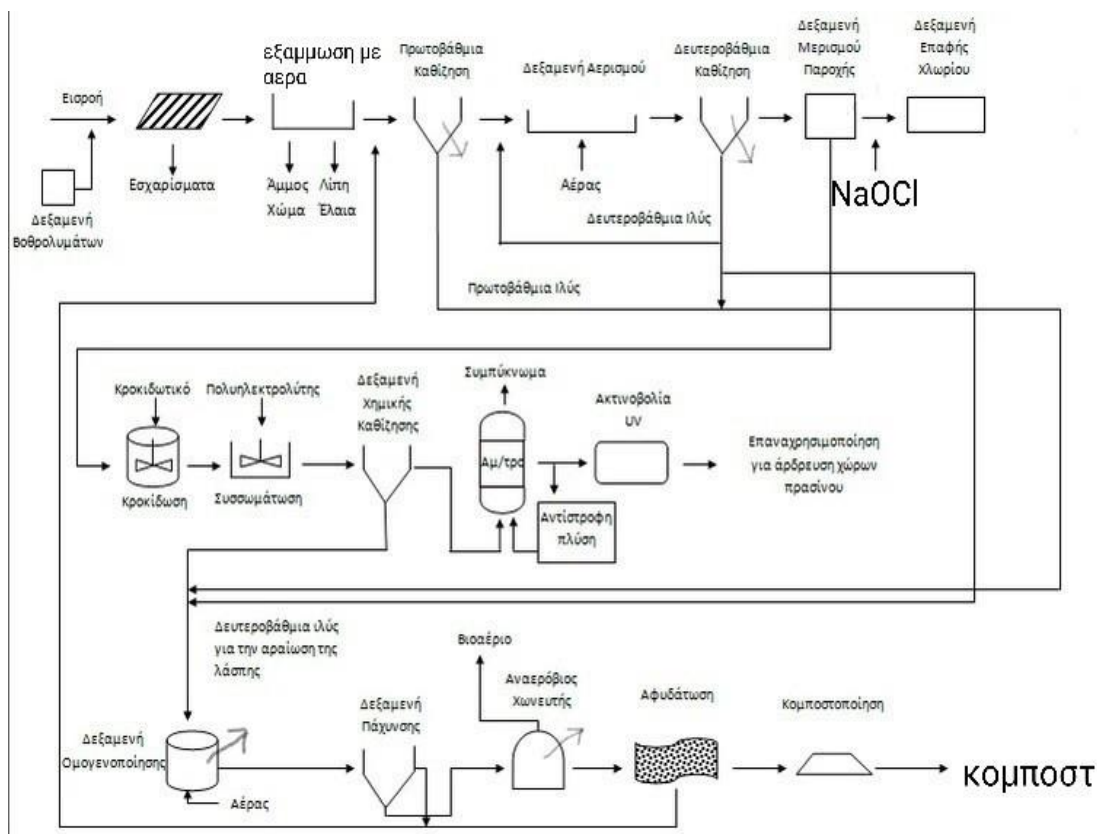
Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να εκτιμηθούν οι δυνατότητες ενεργειακής αξιοποίησης των βιοστερεών στην Κρήτη. Συλλέχθηκε ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα ιλύος από 7 ΕΕΛ που είναι εγκατεστημένες όλους τους Νομούς της Κρήτης. Συλλέχθηκαν δείγματα δευτεροβάθμιας ιλύος, ενώ σε ορισμένες εγκαταστάσεις όπου υπήρχε η δυνατότητα συλλέχθηκαν δείγματα πρωτοβάθμιας ιλύος, ομογενοποιημένης ιλύος και χωνεμένης ιλύος. Τα δείγματα αυτά επεξεργάστηκαν στο Εργαστήριο Σχεδιασμού Περιβαλλοντικών Διεργασιών της Σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, όπου με τη χρήση θερμιδόμετρου βόμβας υπολογίσθηκε η θερμογόνος δύναμη και συνεπώς οι ενεργειακές δυνατότητες αξιοποίησης για κάθε δείγμα ξεχωριστά. Παράλληλα, μετρήθηκε η υγρασία και η περιεκτικότητα σε TS και VS του εκάστοτε δείγματος ιλύος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

5.1 Μεθοδολογία

Τα δείγματα, με τη βοήθεια του εργαζόμενου προσωπικού των ΕΕΛ, συλλέχθηκαν σε πλαστικά μπουκάλια των 500mL. Στη συνέχεια τα δείγματα τα οποία επρόκειτο να επεξεργασθούν εντός μικρού χρονικού διαστήματος, αποθηκεύτηκαν στο ψυγείο, στους 4°C. Ο μέγιστος χρόνος αποθήκευσης για τα δείγματα αυτά, μέχρι και την ανάλυσή τους, ήταν οι 5 μέρες. Τα συλλεγόμενα δείγματα τα οποία επεξεργάστηκαν μετά από μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, αποθηκεύτηκαν στην κατάψυξη, στους -15°C. Ο μέγιστος χρόνος αποθήκευσης των δειγμάτων αυτών, μέχρι και την ανάλυσή τους ανέρχεται στις 15 μέρες.

Στην Εικόνα 5.1 απεικονίζεται μία τυπική ΕΕΛ, καθώς και τα σημεία δειγματοληψίας με βέλη. Τα σημεία αυτά είναι κατά την έξοδο της πρωτοβάθμιας καθίζησης, της δευτεροβάθμιας καθίζησης, της δεξαμενής ομογενοποίησης και του αναερόβιου χωνευτή.



Εικόνα 5.1 Διάγραμμα ροής μιας τυπικής ΕΕΛ.

Στον Πίνακα 5.1 που ακολουθεί αναφέρονται αναλυτικά τα δείγματα που συλλέχθηκαν από κάθε ΕΕΛ.

Πίνακας 5.1 Δείγμα ιλύος που συλλέχθηκε ανά ΕΕΛ.

ΕΕΛ	Δείγμα ιλύος
Χανιά	<ul style="list-style-type: none"> • Πρωτοβάθμια ιλύς • Δευτεροβάθμια ιλύς • Ομογενοποιημένη ιλύς • Χωνεμένη ιλύς
Πλατανιάς	<ul style="list-style-type: none"> • Δευτεροβάθμια ιλύς
Ρέθυμνο	<ul style="list-style-type: none"> • Δευτεροβάθμια ιλύς • Χωνεμένη ιλύς
Ηράκλειο	<ul style="list-style-type: none"> • Πρωτοβάθμια ιλύς • Δευτεροβάθμια ιλύς • Ομογενοποιημένη ιλύς • Χωνεμένη ιλύς
Μάλια	<ul style="list-style-type: none"> • Δευτεροβάθμια ιλύς
Ελούντα	<ul style="list-style-type: none"> • Δευτεροβάθμια ιλύς
Ιεράπετρα	<ul style="list-style-type: none"> • Δευτεροβάθμια ιλύς

5.2 Μέτρηση ολικών στερεών (TS) και πτητικών στερεών (VS)

Καθώς τα δείγματα της ιλύος βρίσκονταν αρχικά σε υγρή κατάσταση, μετατράπηκαν σε μια πιο παχύρρευστη μορφή που θα διευκόλυνε στη διεξαγωγή του πειράματος, με τη μέθοδο της φυγοκέντρησης για 15 λεπτά. Στη συνέχεια ζυγίστηκαν και τοποθετήθηκαν στον ειδικό φούρνο στους 105°C για περίπου μια μέρα, ώστε να αποξηραθούν και να γίνει παράλληλα ο υπολογισμός των TS. Μετά το πέρας της 1 μέρας, το υπόλειμμα από το αποξηραμένο πλέον δείγμα ζυγίστηκε εκ νέου και υπολογίστηκε η περιεκτικότητα επί της % των ολικών στερεών (TS) επί του αρχικού δείγματος, συνεπώς και η υγρασία.

Στη συνέχεια, το αποξηραμένο δείγμα τοποθετήθηκε στο φούρνο σε ειδικό πυρίμαχο σκεύος για τη μέτρηση των πτητικών στερεών (VS). Εκεί παρέμεινε για 3 ώρες στους 600°C. Μετά την πάροδο των τριών ωρών και αφού ήρθε σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, ζυγίστηκε το δείγμα που είχε απομείνει και υπολογίστηκε η επί της % περιεκτικότητας σε VS.

Μέρος της αποξηραμένης λάσπης, και πιο συγκεκριμένα 3g χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση της θερμογόνου δυνάμεως με τη χρήση του θερμιδόμετρου.

5.3 Υπολογισμός δυνατοτήτων ενεργειακής αξιοποίησης με τη χρήση θερμιδόμετρου

Το θερμιδόμετρο είναι μια συσκευή, η οποία μετράει τη θερμογόνο δύναμη, δηλαδή την ικανότητα παραγωγής θερμικής ενέργειας ενός υλικού (ρευστού ή στερεού) κατά την καύση του. Η θερμογόνος δύναμη διακρίνεται σε ανώτερη και κατώτερη. Όταν στα προϊόντα καύσης το νερό βρίσκεται σε υγρή κατάσταση, η θερμογόνος δύναμη ονομάζεται ανώτερη, καθώς δεν έχει απορροφηθεί ενέργεια. Όταν στα προϊόντα καύσης το νερό βρίσκεται σε αέρια κατάσταση (υδρατμοί), η θερμογόνος δύναμη ονομάζεται κατώτερη, αφού το νερό έχει απορροφήσει ενέργεια και η θερμογόνος δύναμη έχει μικρότερη τιμή. Στο πείραμα που πραγματοποιήθηκε, μετρήθηκε η ανώτερη θερμογόνος δύναμη και εκφράζεται σε τιμές MJ/kg. Το θερμιδόμετρο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το XRY-1A Oxygen Bomb Calorimeter (Εικόνα 5.2).



Εικόνα 5.2 Το θερμιδόμετρο XRY-1A (Oxygen Bomb Calorimeter) που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις.

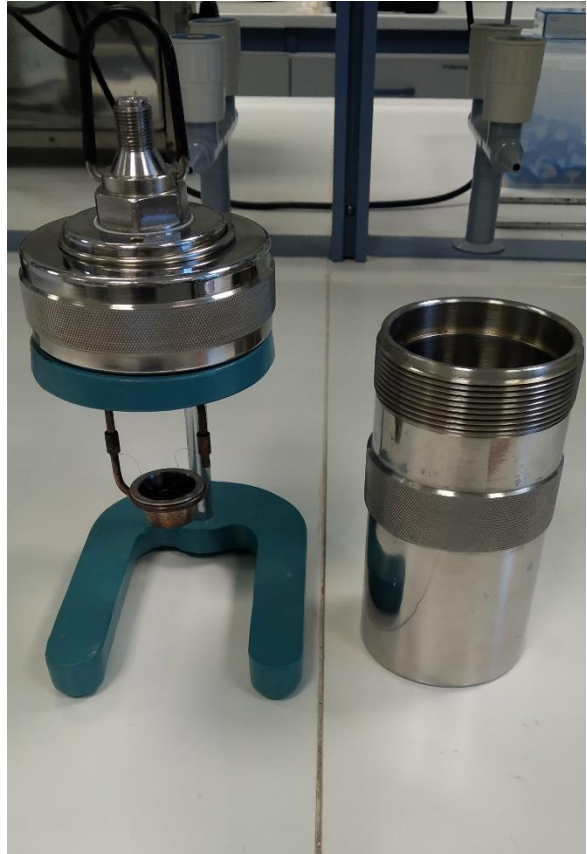
Διαδικασία μέτρησης:

- Αρχικά, καθώς ανοίγει το θερμιδόμετρο και βγαίνει η κεφαλή του Oxygen Bomb, τοποθετείται 1g από το δείγμα μας και περίπου 10cm σύρμα (διαμέτρου 0,1 mm, φτιαγμένο από Ni-Cr, με θερμογόνο δύναμη 6000 J/g) το οποίο χρησιμοποιείται για ανάφλεξη. Το σύρμα ανάφλεξης στερεώνεται στους δυο πόλους υποδοχής που υπάρχουν στις άκρες του μηχανήματος και πρέπει να βρίσκεται όσο το δυνατόν πιο κοντά στο δείγμα, χωρίς όμως να έρχονται σε επαφή μεταξύ τους (Εικόνα 5.3).



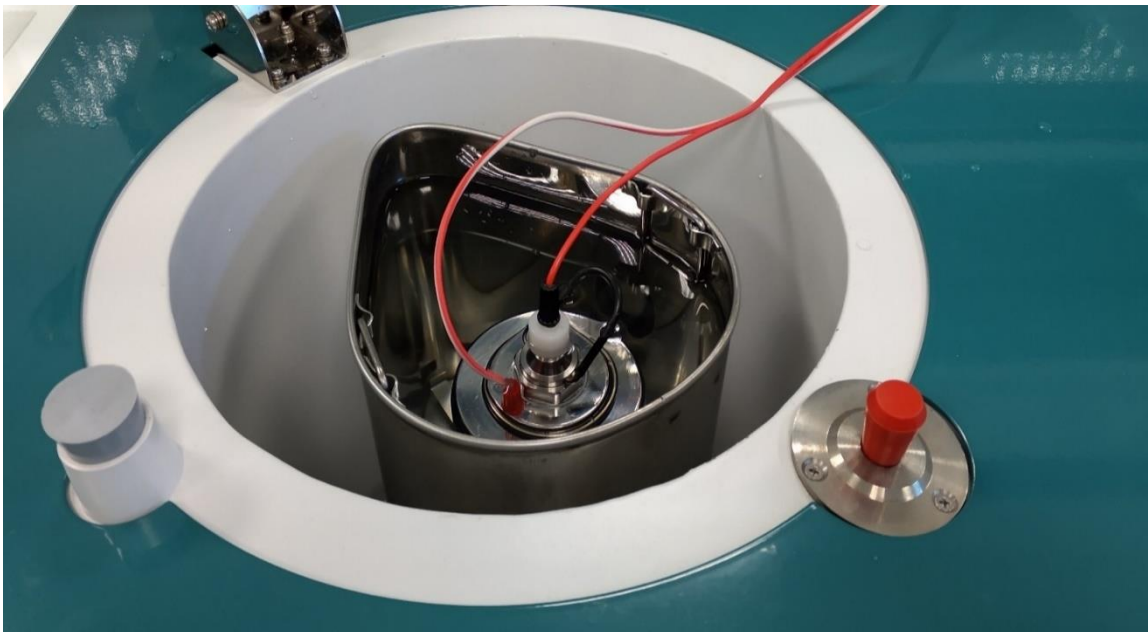
Εικόνα 5.3 Κεφαλή του Oxygen Bomb και οι δυο πόλοι όπου τοποθετείται το σύρμα ανάφλεξης.

- Στη συνέχεια η κυλινδρική κεφαλή οξυγόνου (Εικόνα 5.4) όπου τοποθετείται το δείγμα, συνδέεται με τη φιάλη οξυγόνου, αφού προηγουμένως προστεθούν 10mL απιονισμένου νερού εντός της συσκευής. Έπειτα, περιστρέφεται η λαβή της φιάλης μέχρι η ένδειξη του μετρητή πίεσης να φτάσει μεταξύ 2.5-3.0 mPa.



Εικόνα 5.4 Κυλινδρική κεφαλή οξυγόνου όπου έχει τοποθετηθεί το δείγμα και το νερό.

- Αφού ελέγχεται η θερμοκρασία του απιονισμένου νερού (νερό απαλλαγμένο από ιόντα αλάτων και ιχνοστοιχείων) στο εξωτερικό μέρος του θερμιδόμετρου να είναι κατά 0.2-0.5°C υψηλότερη σε σχέση με τον εσωτερικό θάλαμο, τοποθετείται η κεφαλή του Oxygen Bomb με το δείγμα στην ειδικά διαμορφωμένη θέση (Εικόνα 5.5).



Εικόνα 5.5 Τοποθέτηση Oxygen Bomb στο θερμιδόμετρο.

- Κλείνοντας προσεκτικά την οροφή, τοποθετείται ο αισθητήρας θερμοκρασίας στην ειδική υποδοχή, συνδέεται το θερμιδόμετρο στην πρίζα, ανοίγει από το κουμπί on-off που υπάρχει στο πίσω μέρος του οργάνου και αναμένεται σταθεροποίηση θερμοκρασίας.
- Όταν σταθεροποιηθεί η θερμοκρασία,, πατιέται αρχικά το κουμπί με την ένδειξη Stir και στη συνέχεια αυτό με την ένδειξη Reset (Εικόνα 5.6).



Εικόνα 5.6 Ενδείξεις Stir και Reset για την εκκίνηση της διαδικασίας.

- Καθώς καταγράφονται οι μετρήσεις της θερμοκρασίας, όταν φτάνει η 10^η μέτρηση πατιέται το κουμπί με την ένδειξη Ignite και οι μετρήσεις μηδενίζονται αυτόματα. Το μηχάνημα ξεκινάει να αποθηκεύει την τιμή της θερμοκρασίας κάθε μισό λεπτό και τη στιγμή που αναγράφεται η 31^η μέτρηση πατιέται το κουμπί με την ένδειξη End για να σταματήσει η λειτουργία του μηχανήματος (Εικόνα 5.7).



Εικόνα 5.7 Ένδειξη Ignite και μια από τις 31 συνολικά αναγραφόμενες τιμές.

- Στη συνέχεια πατιέται το κουμπί με την ένδειξη Stir για να ολοκληρωθεί η διαδικασία και το κουμπί με την ένδειξη Data για να εμφανιστούν οι τιμές των θερμοκρασιών που καταγράφηκαν. Έπειτα αφαιρείται από το θερμιδόμετρο το Oxygen Bomb το οποίο και καθαρίζεται για να επαναληφθεί η ίδια διαδικασία τρεις φορές συνολικά για κάθε δείγμα, όσες απαιτούνται για την αξιοπιστία των μετρήσεων.

Περαιτέρω λεπτομέρειες και ακριβείς οδηγίες δίνονται στο εγχειρίδιο χρήσης που συνοδεύει το όργανο. Επίσης, ο τρόπος υπολογισμού της θερμογόνου δύναμης, με βάση τις μετρήσεις που λαμβάνονται από το όργανο, παρατίθεται στο Παράρτημα (Κεφάλαιο 9.1).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

6.1 Αποτελέσματα-Συζήτηση

6.1.1 TS-VS

Στη συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων της θερμογόνου δύναμης των δειγμάτων που συλλέχθηκαν και επεξεργάστηκαν -όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 5-, καθώς και οι μετρήσεις των TS και VS του εκάστοτε δείγματος. Στον Πίνακα 6.1 που ακολουθεί, παρατίθενται τα ποσοστά επί της % των TS και VS που μετρήθηκαν στα δείγματα.

Πίνακας 6.1 Ποσοστά TS – VS (%).

ΕΕΛ	TS (%)	VS (%)
Πρωτοβάθμια ιλύς		
Χανιά	3,6	80,3
Ηράκλειο	2,1	77,4
Δευτεροβάθμια ιλύς		
Χανιά	0,7	73,6
Πλατανιάς	0,8	74,9
Ρέθυμνο	1,3	74,5
Ηράκλειο	0,9	73,2
Μάλια	1,7	73,5
Ελούντα	1,1	71,4
Ιεράπετρα	1,9	67,6
Ομογενοποιημένη ιλύς		
Χανιά	2,1	76,4
Ηράκλειο	1,3	75,6
Χωνεμένη ιλύς		
Χανιά (αναερόβια)	2,2	66,5
Ρέθυμνο (αερόβια)	1,7	63,6
Ηράκλειο (αναερόβια)	1,9	64,9

Όπως παρατηρείται στον παραπάνω πίνακα, τα ποσοστά των TS της πρωτοβάθμιας ιλύος κυμαίνονται από 2,1 – 3,6 % ενώ αυτά της δευτεροβάθμιας ιλύος από 0,7 – 1,9 %. Τα μεγαλύτερα ποσοστά των TS της δευτεροβάθμιας ιλύος συναντώνται στις ΕΕΛ της Ιεράπετρας και των Μαλίων, ενώ τα μικρότερα στις ΕΕΛ των Χανίων, του Πλατανιά και του Ηρακλείου.

Τα ποσοστά των VS της πρωτοβάθμιας ιλύος κυμαίνονται από 77,4 – 80,3 % ενώ αυτά της δευτεροβάθμιας ιλύος από 67,6 – 74,9 %. Τα μεγαλύτερα ποσοστά συναντώνται στις ΕΕΛ του Πλατανιά και των Μαλίων, ενώ τα μικρότερα στις ΕΕΛ της της Ιεράπετρας και της Ελούντας. Τα ποσοστά των VS της δευτεροβάθμιας ιλύος στις ΕΕΛ των Χανίων και του Ηρακλείου είναι ελαφρώς μικρότερα σε σχέση με αυτά της πρωτοβάθμιας.

Στις ΕΕΛ όπου πραγματοποιείται η διεργασία της πρωτοβάθμιας επεξεργασίας (Ηράκλειο, Χανιά) τα ποσοστά των TS της πρωτοβάθμιας ιλύος είναι μεγαλύτερα συγκριτικά με αυτά της δευτεροβάθμιας, της ομογενοποιημένης και της χωνεμένης ιλύος. Παράλληλα, τα ποσοστά των VS της πρωτοβάθμιας ιλύος είναι μεγαλύτερα από αυτά της δευτεροβάθμιας και της ομογενοποιημένης ιλύος, έχοντας μικρές αποκλίσεις. Αντιθέτως, η διαφορά τους με τα ποσοστά των VS της αναερόβια χωνεμένης ιλύος, είναι εμφανώς μεγαλύτερη.

Στην ΕΕΛ του Ρεθύμνου όπου πραγματοποιείται η διεργασία της αερόβιας χώνευσης, τα ποσοστά των TS της χωνεμένης ιλύος είναι κατά 0,4 % μεγαλύτερα από αυτά της δευτεροβάθμιας ιλύος, ενώ τα ποσοστά των VS της χωνεμένης ιλύος είναι κατά 10,9 % μεγαλύτερα από αυτά της δευτεροβάθμιας ιλύος.

6.1.2 Ανώτερη Θερμογόνος Δύναμη (HHV)

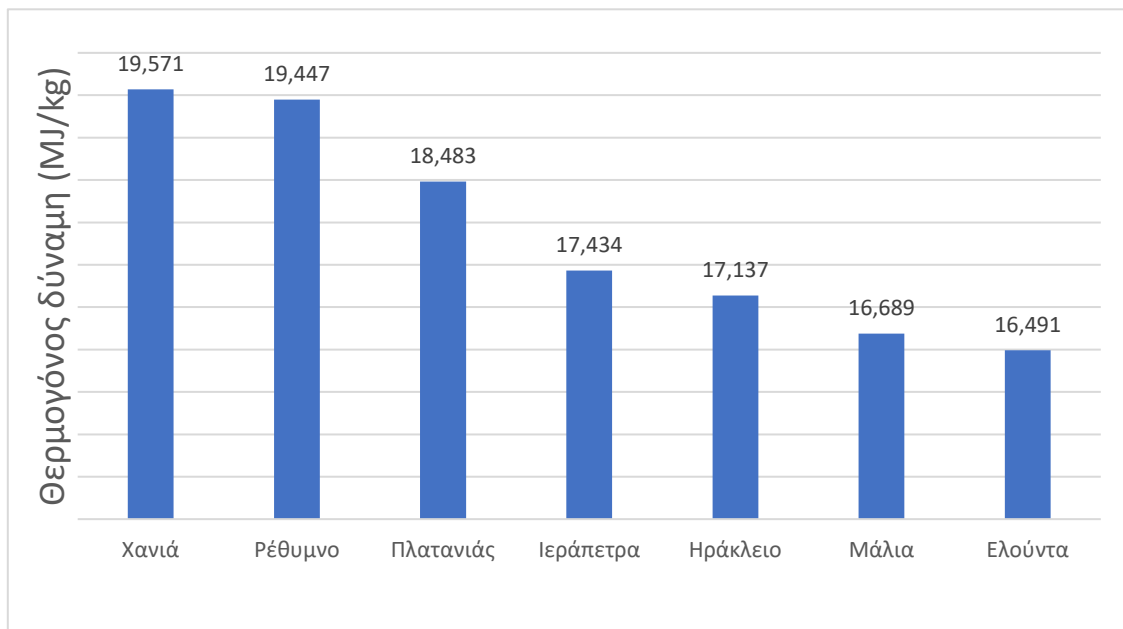
Στον Πίνακα 6.2 παρατίθενται οι τιμές της ανωτέρας θερμογόνου δύναμης συγκεντρωτικά, για κάθε στάδιο επεξεργασίας όπου συλλέχθηκαν δείγματα. Οι μετρήσεις προέκυψαν από υπολογισμούς που φαίνονται στο κεφάλαιο 9.1 (Παράρτημα υπολογισμού ανώτερης θερμογόνου δύναμης των βιοστερεών).

Πίνακας 6.2 Αποτελέσματα τιμών ανώτερης θερμογόνου δύναμης.

ΕΕΛ	HHV (MJ/kg)
Πρωτοβάθμια ιλύς	
Χανιά	24,834 ± 0,535
Ηράκλειο	23,649 ± 0,179
Δευτεροβάθμια ιλύς	
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
Ομογενοποιημένη ιλύς	
Χανιά	22,048 ± 1,624
Ηράκλειο	20,210 ± 1,141

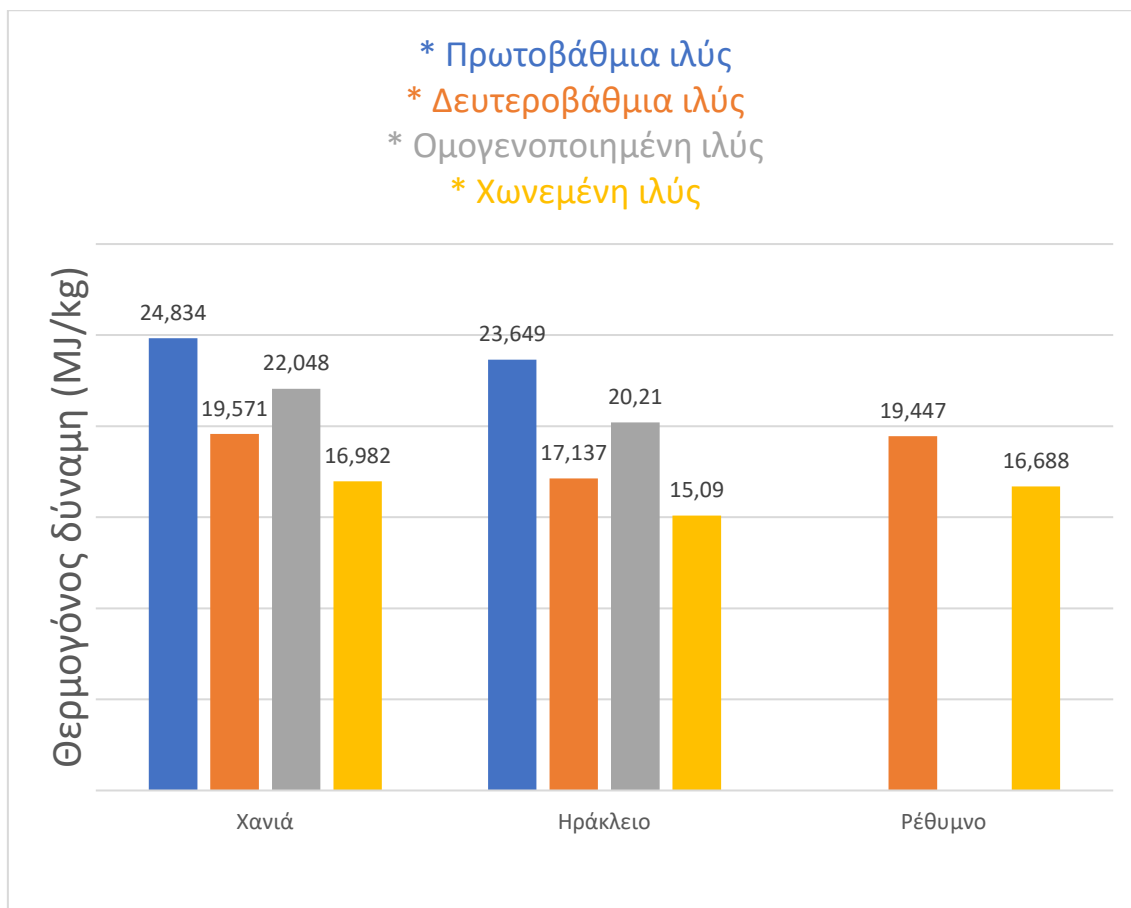
Χωνεμένη ιλύς	
Χανιά	16,982 ± 0,536
Ρέθυμνο	16,688 ± 0,617
Ηράκλειο	15,090 ± 0,849

Στα γραφήματα 6.1 και 6.2 πραγματοποιείται μια σύγκριση των τιμών για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Στο γράφημα 6.1 παρατίθενται κατά φθίνουσα σειρά τα αποτελέσματα των μετρήσεων της θερμογόνου δύναμης της δευτεροβάθμιας ιλύος, ενώ στο γράφημα 6.2 παρατίθενται συγκεντρωμένες για τις ΕΕΛ όπου λαμβάνει χώρα η διεργασία της χώνευσης (Χανιά, Ηράκλειο, Ρέθυμνο), οι τιμές των μετρήσεων της πρωτοβάθμιας (Χανιά, Ηράκλειο), της δευτεροβάθμιας, της ομογενοποιημένης (Χανιά, Ηράκλειο) και της χωνεμένης ιλύος.



Γράφημα 6.1 Τιμές ανώτερης θερμογόνου δύναμης μετά τη δευτεροβάθμια επεξεργασία.

Όπως παρατηρούμε από το γράφημα 6.1, η υψηλότερη θερμογόνος δύναμη των δευτεροβάθμιων ιλύων συναντάται στις ΕΕΛ των Χανίων, του Ρεθύμνου και του Πλατανιά, ενώ οι μικρότερες στις ΕΕΛ της Ελούντας, των Μαλίων και του Ηρακλείου. Η θερμογόνος δύναμη της δευτεροβάθμιας ιλύος στις ΕΕΛ των Χανίων και του Ηρακλείου, είναι μικρότερη από αυτήν της πρωτοβάθμιας κατά 5,263 MJ/kg και 6,512 MJ/kg αντίστοιχα.



Γράφημα 6.2 Σύγκριση τιμών για ΕΕΛ που πραγματοποιείται η διεργασία της χώνευσης.

Όπως παρατηρούμε από το γράφημα 6.2 στις ΕΕΛ του Ηρακλείου, του Ρεθύμνου και των Χανίων, η θερμογόνος δύναμη των βιοστερεών μειώνεται σταδιακά όσο προχωράμε στα στάδια επεξεργασίας. Η θερμογόνος δύναμη της πρωτοβάθμιας ιλύος είναι μεγαλύτερη από αυτήν της δευτεροβάθμιας, ενώ η χωνεμένη ιλύς έχει τη μικρότερη θερμογόνο δύναμη από όλα τα στάδια επεξεργασίας όπου συλλέχθηκαν δείγματα. Η θερμογόνος δύναμη της ομογενοποιημένης ιλύος (η οποία αποτελεί μια μίξη της δευτεροβάθμιας, με την υψηλή σε θερμογόνο δύναμη πρωτοβάθμια), είναι αναμενόμενα μικρότερη από αυτήν της πρωτοβάθμιας και μεγαλύτερη από αυτήν της δευτεροβάθμιας. Στις ΕΕΛ των Χανίων και του Ηρακλείου όπου πραγματοποιείται αναερόβια χώνευση, καταγράφεται παρόμοια απόκλιση των τιμών μεταξύ δευτεροβάθμιας και χωνεμένης ιλύος, συγκριτικά με την ΕΕΛ του Ρεθύμνου, όπου πραγματοποιείται αερόβια χώνευση. Οι τιμές της δευτεροβάθμιας ιλύος για όλες τις ΕΕΛ κυμαίνονται από 16,491 MJ/kg (Ελούντα) έως 19,571 MJ/kg (Χανιά), ενώ της χωνεμένης από 15,090 MJ/kg (Ηράκλειο) έως 16,982 MJ/kg (Χανιά).

Στον Πίνακα 6.3 αναγράφεται κατά φθίνουσα σειρά, η θερμογόνος δύναμη όλων των βιοστερεών που μετρήθηκαν, ενώ στον Πίνακα 6.4 αναγράφεται κατά φθίνουσα σειρά, η θερμογόνος δύναμη ευρέως διαδεδομένων καύσιμων υλικών.

Πίνακας 6.3 Τιμές ανώτερης θερμογόνου δύναμης βιοστερεών της Κρήτης.

Βιοστερεά	HHV (MJ/kg)
ΕΕΛ Χανίων - Πρωτοβάθμια ιλύς	24,834 ± 0,535
ΕΕΛ Ηρακλείου - Πρωτοβάθμια ιλύς	23,649 ± 0,179
ΕΕΛ Χανίων – Ομογενοποιημένη ιλύς	22,048 ± 1,624
ΕΕΛ Ηρακλείου - Ομογενοποιημένη ιλύς	20,210 ± 1,141
ΕΕΛ Χανίων - Δευτεροβάθμια ιλύς	19,571 ± 0,522
ΕΕΛ Ρεθύμνου - Δευτεροβάθμια ιλύς	19,447 ± 0,591
ΕΕΛ Πλατανιά - Δευτεροβάθμια ιλύς	18,483 ± 0,137
ΕΕΛ Ιεράπετρας - Δευτεροβάθμια ιλύς	17,434 ± 1,485
ΕΕΛ Ηρακλείου – Δευτεροβάθμια ιλύς	17,137± 1,203
ΕΕΛ Χανίων - Αναερόβια χωνεμένη ιλύς	16,982 ± 0,536
ΕΕΛ Μαλίων - Δευτεροβάθμια ιλύς	16,689 ± 0,663
ΕΕΛ Ρεθύμνου – Αερόβια Χωνεμένη ιλύς	16,688 ± 0,617
ΕΕΛ Ελούντας - Δευτεροβάθμια ιλύς	16,491 ± 1,768
ΕΕΛ Ηρακλείου - Αναερόβια χωνεμένη ιλύς	15,090 ± 0,849

Πίνακας 6.4 Τιμές θερμογόνου δύναμης άλλων καύσιμων υλικών (Haider et al., 2016; Ευθυμιάδης, 2013).

Υλικό	Θερμογόνος δύναμη (MJ/kg)
Φυσικό αέριο	42-55
Πετρέλαιο	46-51
Βενζίνη	44-46
Ντίζελ	42-46
Προπάνιο – Βουτάνιο	43
Άνθρακας	14,6-26,7
Πλαστικά – Χαρτί – Κουρέλια – Σκουπίδια	17,6-20
Ξύλο	16-20
Παλέτα	17,6
Πυρηνόξυλο	15,5
Πυρήνα	13,4
Λιγνίτης	12,6
Συνθετικό αέριο άνθρακα	10,8

Όπως συμπεραίνεται από τους Πίνακες 6.3 και 6.4, η θερμογόνος δύναμη της πρωτοβάθμιας ιλύος στην ΕΕΛ του Ηρακλείου, αλλά και αυτή των ομογενοποιημένων βιοστερεών στις ΕΕΛ των Χανίων και του Ηρακλείου, είναι μεγαλύτερη από αυτήν του συνθετικού αερίου άνθρακα, του λιγνίτη, του πυρήνα, του πυρηνόξυλου, της παλέτας, του ξύλου και των πλαστικών-χαρτιών-κουρελιών-σκουπιδιών και κυμαίνεται μέσα στα εύρη τιμών της θερμογόνου δύναμης του άνθρακα, ενώ στην ΕΕΛ Χανίων η θερμογόνος δύναμη της πρωτοβάθμιας ιλύος είναι μεγαλύτερη και από αυτήν του άνθρακα. Η θερμογόνος δύναμη της δευτεροβάθμιας ιλύος για όλες τις ΕΕΛ, είναι μεγαλύτερη από αυτήν του συνθετικού αερίου άνθρακα, του λιγνίτη, του πυρήνα, του πυρηνόξυλου και κυμαίνεται μέσα στα εύρη τιμών της παλέτας, του ξύλου, των πλαστικών-χαρτιών-κουρελιών-σκουπιδιών και του άνθρακα. Παράλληλα, παρατηρείται ότι η θερμογόνος δύναμη των αναερόβιων χωνεμένων βιοστερεών στην ΕΕΛ των Χανίων και των αερόβιων χωνεμένων βιοστερεών στην ΕΕΛ του Ρεθύμνου, είναι μεγαλύτερη από αυτήν του συνθετικού αερίου άνθρακα, του λιγνίτη, του πυρήνα, του πυρηνόξυλου και κυμαίνεται μέσα στα εύρη τιμών του ξύλου και του άνθρακα. Τέλος, η θερμογόνος δύναμη των χωνεμένων βιοστερεών στην ΕΕΛ του Ηρακλείου είναι μεγαλύτερη από αυτήν του συνθετικού αερίου άνθρακα, του λιγνίτη, του πυρήνα και οριακά μικρότερη από αυτήν του πυρηνόξυλου. Παρατηρείται λοιπόν, ότι η θερμογόνος δύναμη των βιοστερεών που συλλέχθηκαν και εξετάστηκαν, κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα με τη θερμογόνο δύναμη ευρέως διαδεδομένων καύσιμων υλικών.

Στον πίνακα 6.5 που ακολουθεί, παρατίθενται βιβλιογραφικές τιμές θερμογόνου δύναμης βιοστερεών και τιμές που έχουν μετρηθεί από άλλες εργασίες.

Πίνακας 6.5 Ανώτερη θερμογόνος δύναμη ιλύος κατά αύξουσα σειρά από άλλες έρευνες (Zygadlo, 2001; Grabowski & Oleszkiewicz, 1998; Kowalik, 1998; Abbas et al., 2011; Celebi et al., 2021; Huang et al., 2021; Menon et al., 2020; Barber, 2014; Arkadiusz, 2018; Hall, 1999; Fytli & Zabaniotou, 2008).

Τύπος Ιλύος	Θερμογόνος δύναμη (MJ/kg)	Μέση θερμογόνος δύναμη (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*	
	10-20*	
	21	
Χωνεμένη	10	11,496
	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.

Η τιμή της θερμογόνου δύναμης των βιοστερεών όπως είδαμε, 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

6.2 Εκτίμηση της δυνατότητας αξιοποίησης της ιλύος για παραγωγή ενέργειας με χρήση θερμικών μεθόδων

Με βάση τη θερμογόνο δύναμη των βιοστερεών που μετρήθηκε στην παρούσα εργασία, θα μπορούσαν να κατηγοριοποιηθούν τα βιοστερεά αυτά, σε δυο κατηγορίες. Στην πρώτη, ανήκουν τα βιοστερεά με υψηλή θερμογόνο δύναμη που συλλέχθηκαν κατά την πρωτοβάθμια επεξεργασία και από τη δεξαμενή ομογενοποίησης (20,21 – 24,834 MJ/kg), ενώ στη δεύτερη κατηγορία, ανήκουν τα βιοστερεά που συλλέχθηκαν κατά τη δευτεροβάθμια επεξεργασία και κατά τη διεργασία της χώνευσης, όπου η θερμογόνο δύναμη είναι λίγο μικρότερη (15,090 – 19,571 MJ/kg). Για την ενεργειακή αξιοποίηση και την αυτόνομη καύση της ιλύος όμως, είναι απαραίτητη η προεπεξεργασία της με συστήματα μερικής ξήρανσης.

6.2.1 Ηλιακή ξήρανση ιλύος

Μια καινοτόμος, οικονομική και φιλική προς το περιβάλλον μέθοδος ξήρανσης της ιλύος είναι η ηλιακή ξήρανση, η οποία βασίζεται στην ηλιακή ενέργεια. Στις ΕΕΛ, οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) αξιοποιούνται όχι μόνο για την παραγωγή ενέργειας για τη λειτουργία των μηχανημάτων, αλλά και για την ξήρανση της ιλύος (Nathan & Clarke, 2000). Η χρήση της ευνοείται στην Ελλάδα - και ειδικότερα στην Κρήτη - λόγω του εύκρατου κλίματος και της μεγάλης ηλιοφάνειας που εμφανίζεται τις περισσότερες μέρες του έτους. Η ηλιακή ξήρανση, έχει χαμηλό λειτουργικό κόστος και αποτελεί την κατάλληλη μέθοδο για τη σταθεροποίηση και την υγειονομοποίηση της βιολογικής ιλύος για ΕΕΛ μικρής δυναμικότητας, που παράγουν έως 5.000 τόνους ετησίως (Στούπας & Κοτσανίδης, 2009). Η ιλύς διαστρώνεται σε ειδικά διαμορφωμένα θερμοκήπια και καθώς ξηραίνεται μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας, αναδύεται μηχανικά. Κατά τη ξήρανση, τα μόρια του νερού μετατρέπονται από την υγρή τους μορφή σε αέρια, δηλαδή εξατμίζονται. Για να επιτευχθεί αυτό όμως, απαιτείται διαφορά στην πίεση των υδρατμών μεταξύ της ιλύος και του αέρα, συνεπώς είναι απαραίτητη η αφαίρεση αέρα. Στις ανοιχτές εγκαταστάσεις ξήρανσης της ιλύος οι οποίες αποτελούνται από ένα στεγανό δάπεδο σκυροδέματος, ο αερισμός επιτυγχάνεται φυσικά, με την επίδραση του αέρα και η ιλύς θερμαίνεται άμεσα από την έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία. Όμως όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, σε περιοχές με τακτικές βροχοπτώσεις η χρήση των ανοικτών δεξαμενών ξηράνσεως κρίνεται ασύμφορη. Επιπλέον, στις ανοιχτές εγκαταστάσεις ξήρανσης της ιλύος έχουν παρουσιασθεί σοβαρά προβλήματα όπως άσχημες οσμές, μόλυνση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα και προβλήματα υγιεινής του προσωπικού που εργάζεται στις εγκαταστάσεις αυτές (Κατσιμαντού, 2007).

Στην παρούσα εργασία επιλέγεται κλειστή εγκατάσταση ξήρανσης της ιλύος, η οποία είναι και η πλέον διαδεδομένη (Εικόνα 6.1). Αρχικά επιλέγεται η χωνεμένη ιλύς που συλλέχθηκε από την ΕΕΛ του Ηρακλείου, με τιμή ανώτερης θερμογόνο δύναμης ίση με 15,090 MJ/kg που είναι η μικρότερη από τα υπόλοιπα δείγματα. Η ιλύς τοποθετείται σε διάφανες κατασκευές, μορφής θερμοκηπίου, διαστάσεων 58 x 10 m². Παράλληλα, τοποθετείται στο κέντρο της εγκατάστασης ένας αεραγωγός εξατμίσης, ενώ οι μπροστινές πλευρές του κτιρίου παραμένουν ανοιχτές. Περιλαμβάνει επίσης ένα ασφαλτικό δάπεδο και πλευρικούς τοίχους λίθινου υποστρώματος με στεγανό υλικό επίστρωσης (σκυροδεμα) επιφάνειας 10 m². Η εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας γίνεται συνήθως μέσω του επίπεδου ηλιακού συλλέκτη. Οι περισσότεροι επίτεδοι

ηλιακοί συλλέκτες σήμερα συλλέγουν υγρό, ενώ τα τελευταία χρόνια αναπτύσσονται και συλλέκτες αέρα (Κατσιμαντού, 2007). Ο ηλιακός συλλέκτης περιλαμβάνει μια μαύρη - συνήθως μεταλλική - επιφάνεια η οποία θερμαίνεται απορροφώντας την ηλιακή ακτινοβολία. Πάνω από τη μεταλλική απορροφητική επιφάνεια, βρίσκεται ένα διαφανές κάλυμμα μορφής θερμοκηπίου - συνήθως από γυαλί ή πλαστικό - το οποίο παγιδεύει τη θερμότητα (φαινόμενο θερμοκηπίου). 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). Ο αερισμός μπορεί να είναι είτε φυσικός, είτε τεχνητός. Ο φυσικός αερισμός -ο οποίος και επιλέγεται- επιτυγχάνεται μέσω ανοιγμάτων του θερμοκηπίου (παράθυρα). Το άνοιγμα και το κλείσιμο των παραθύρων γίνεται αυτόματα μέσω συστημάτων αυτοματισμού, τα οποία μετράνε τη θερμοκρασία (Στούπας & Κοτσανίδης, 2009). Ο τεχνητός αερισμός (εξαερισμός), γίνεται συνήθως με ανεμιστήρες, 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 χειρωνακτική ή μηχανική ανάμιξη δύο φορές την ημέρα. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος μηχανικής ανάδευσης, πραγματοποιείται με τη χρήση ενός περιστρεφόμενου άξονα, στον οποίο είναι τοποθετημένα ειδικά διαμορφωμένα συστήματα που τεμαχίζουν την ιλύ, εξασφαλίζοντας έτσι τον επαρκή αερισμό της. Για την αντιμετώπιση δυσάρεστων οσμών και τη διαχείριση του αέρα χρησιμοποιούνται βιο-φίλτρα, ενώ ελέγχεται με προγραμματισμένο ελεγκτή (PLC) η υγρασία και η εσωτερική θερμοκρασία του συστήματος για να μειωθούν οι ενεργειακές δαπάνες και να βελτιστοποιηθεί η απόδοση ξήρανσης (Στούπας & Κοτσανίδης, 2009). Η ιλύς αποθηκεύεται προσωρινά στις κλειστές εγκαταστάσεις ξήρανσης, πριν την αξιοποίησή της.



Εικόνα 6.1 Κλειστό σύστημα ηλιακής ξήρανσης.

(Πηγή: [https://enox.tech/en/sludge-drying/#iLightbox\[suszarnie\]/1](https://enox.tech/en/sludge-drying/#iLightbox[suszarnie]/1))

Με τη μέθοδο της ηλιακής ξήρανσης, επιτυγχάνεται ξήρανση της ιλύος σε ποσοστό από 70-90%, συνεπώς μειώνεται σημαντικά ο όγκος των προς διάθεση βιοστερεών. Λόγω της ανάπτυξης υψηλών θερμοκρασιών, η ιλύς υγιεινοποιείται και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό. Επιπλέον, τα βιοστερεά που παράγονται από την ηλιακή ξήρανση παρουσιάζουν μεγάλη θερμογόνο δύναμη και η θερμική τους αξιοποίηση ως καύσιμο υλικό κρίνεται συμφέρουσα (Στούπας & Κοτσανίδης, 2009). Η ενέργεια που απαιτείται για τη λειτουργία της κλειστής εγκατάστασης ξήρανσης με φυσικό αερισμό εκτιμάται στα 20 kWh (Kurt, 2014).

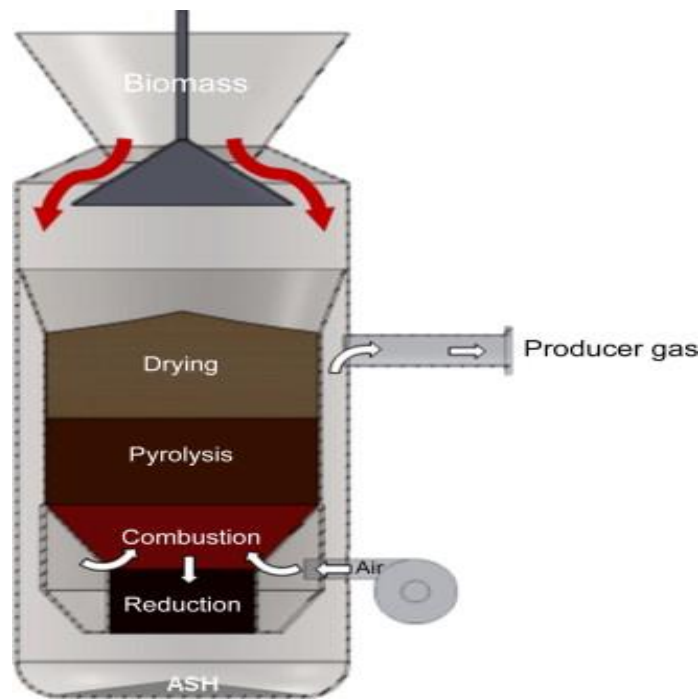
6.2.2 Ενεργειακή αξιοποίηση βιοστερεών με τη μέθοδο της αεριοποίησης

Μετά την ηλιακή ξήρανση των βιοστερεών, προτείνεται και η μέθοδος της ενεργειακής αξιοποίησης τους. Όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2, η αναερόβια χώνευση σταθεροποιεί εν μέρει τα βιοστερεά, όμως η μείωση όγκου των βιοστερεών μέσω της χώνευσης δεν επαρκεί (Gikas, 2017). Παράλληλα, δεν αξιοποιείται πλήρως το ενεργειακό περιεχόμενο των βιοστερεών, απαιτείται περαιτέρω επεξεργασία για την ασφαλή διάθεσή τους στο περιβάλλον (ασβεστοποίηση, κομποστοποίηση, ξήρανση) ενώ η απόρριψη τους σε ΧΥΤΑ δεν αποτελεί βιώσιμη επιλογή σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Νομοθεσία (European Community, 1999).

Η μέθοδος της καύσης, πραγματοποιείται πολλές φορές με τη μεικτή καύση βιοστερεών και αστικών στερεών απορριμμάτων. Η εφαρμογή αυτή λαμβάνει χώρα κυρίως στην κεντρική και βόρεια Ευρώπη (Kelessidis & Stasinakis, 2012). Όμως, η μεικτή καύση προαπαιτεί την ύπαρξη εγκαταστάσεων επεξεργασίας αστικών απορριμμάτων σε κοντινό σημείο με τις ΕΕΛ ενώ πρωταρχικός στόχος της μεθόδου αυτής είναι η απόρριψη των βιοστερεών και όχι η ενεργειακή αξιοποίησή τους (Gikas, 2017). Παράλληλα λαμβάνονται υπόψιν και τα ιδιαίτερα ρυπογόνα αέρια (διοξείδιο του άνθρακα, οξείδια του αζώτου, διοξείδιο του θείου) τα οποία προκύπτουν ως παραπροϊόντα της καύσης (Oladejo et al., 2018).

Με τη μέθοδο της αεριοποίησης από την άλλη, οι εκπομπές οξειδίου του θείου, οξειδίων του αζώτου, τέφρας και άλλων ρυπαντικών φορτίων όπως τα βαρέα μέταλλα, είναι μικρότερες συγκριτικά με την καύση. Επιπρόσθετα, η αεριοποίηση αποτελεί μια χημικώς καθαρή αναγωγική διαδικασία, καθώς το παραγόμενο αέριο (αέριο σύνθεσης) μπορεί να επεξεργαστεί και να καθαριστεί πριν χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας. Το αέριο σύνθεσης αποτελείται κυρίως από υδρογόνο και μονοξείδιο του άνθρακα - συχνά περιέχει και διοξείδιο του άνθρακα - και μπορεί να αξιοποιηθεί ως καύσιμο σε μηχανές εσωτερικής καύσης για την παραγωγή θέρμανσης, ηλεκτρισμού αλλά και για τη σύνθεση καθαρών υγρών καυσίμων και χημικών (Oladejo et al., 2018). Συνεπώς, ως βέλτιστη μέθοδο και φιλικότερη ως προς το περιβάλλον για την παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας επιλέγουμε την αεριοποίηση.

Ο αεριοποιητής που επιλέγεται λειτουργεί με σύστημα αεριοποίησης καθοδικού ρεύματος (downdraft gasifier) (Εικόνα 6.2). Το συγκεκριμένο σύστημα αεριοποίησης θεωρείται περιβαλλοντικά ευνοϊκό, καθώς περιορίζει την εισχώρηση μεγάλων ποσοτήτων αιωρούμενων σωματιδίων από πίσσα και τέφρα στο παραγόμενο αέριο (syngas), που αυτομάτως θα περιορίζε τις ενεργειακές του δυνατότητες. Το ξηραμένο προϊόν μπρικετοποιείται σε ειδικό μηχάνημα μπρικετοποίησης και αποθηκεύεται σε δοχείο. Ο αεριοποιητής έχει απόδοση 70-90% (Kreith & Krumdieck, 2014), μπορεί να τροφοδοτηθεί με έως και 15 kg/h βιομάζας, έχει θερμική απόδοση 50 kW και ηλεκτρική απόδοση από 12-15 kW.



Εικόνα 6.2 Αεριοποιητής καθοδικής ροής.

(Πηγή: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/downdraft>)

Τα βιοστερεά διασπώνται σταδιακά όσο αυξάνεται και η θερμοκρασία. Όταν η θερμοκρασία φτάσει τους 600°C πραγματοποιείται η πυρόλυση, ενώ η αεριοποίηση λαμβάνει χώρα στους 800°-1200°C. Η θερμοκρασία του αερίου (syngas) που παράγεται από αυτήν τη διαδικασία καθώς εξέρχεται από τον αεριοποιητή, κυμαίνεται από 400 έως 500°C. Ως υπόλειμμα της διαδικασίας, παράγεται κατά την καύση των βιοστερεών, τέφρα (στάχτη) η οποία συσσωρεύεται σε ειδική στεγανή μεταλλική δεξαμενή (ash container). Η δεξαμενή αυτή βρίσκεται στη βάση του αεριοποιητή, καθιστώντας την απομάκρυνση της ευκολότερη.

Στο παραγόμενο αέριο βρίσκονται ανεπιθύμητα σωματίδια και υπολείμματα πίσσας και η απομάκρυνσή τους πραγματοποιείται μέσω ενός πολυκυκλώνα συγκράτησης (Εικόνα 6.3). Στο κάτω μέρος του κυκλώνα τοποθετείται φιάλη όπου συλλέγει την πίσσα και τις ακαθαρσίες που εξέρχονται από το μηχάνημα.



Εικόνα 6.3 Πολυκυκλώνας συγκράτησης.

(Πηγή: <https://www.senotay.com/dust-collector/cyclone-separation-dust-collector/>)

Στη συνέχεια, το αέριο εισέρχεται στο φίλτρο βιομάζας όπου φιλτράρονται η πίσσα και άλλες ακαθαρσίες, αποτρέποντας έναν ενδεχόμενο σχηματισμό πίσσας στο εσωτερικό του κινητήρα. Στο φίλτρο υπάρχουν σίτες και ροκανίδια πολλαπλών μεγεθών ώστε να αποτραπεί η είσοδος κόκκων στη ροή του αερίου. Η μέγιστη θερμοκρασία του αερίου δεν πρέπει να ξεπερνά τους 180-200°C, καθώς χρησιμοποιείται βιομάζα για φιλτράρισμα και είναι ορατός ο κίνδυνος πυρόλυσης. Επιπρόσθετα, στο φίλτρο βιομάζας υπάρχει πυρσός για την καύση περισσευούμενου ή ακατάλληλου αερίου. Για την απομάκρυνση των ενώσεων θείου που αναμένονται στη σύνθεση του αερίου χρησιμοποιείται κατάλληλα σχεδιασμένη πλυντηρίδα αποθείωσης (Εικόνα 6.4).



Εικόνα 6.4 Πλυντηρίδα για την απομάκρυνση θειικών ενώσεων (Scrubber).

(Πηγή: <https://www.emerson.com/pl-ee/automation/solenoids-pneumatics/asco/so2-scrubbers>)

Το αέριο -αφού έχει καθαριστεί και ψυχθεί- οδηγείται στο σύστημα ελέγχου ρύπων για να ελεγχθεί η καταλληλότητά του και να οδηγηθεί στη συνέχεια στη μηχανή εσωτερικής καύσης ώστε να παραχθεί ενέργεια. Στην εγκατάσταση είναι τοποθετημένο ένα σύστημα αυτόματου ελέγχου για την εξασφάλιση της ομαλής λειτουργίας του συστήματος. Αισθητήρες μέτρησης της πίεσης, της θερμοκρασίας, της έντασης του ρεύματος και του οξυγόνου παρακολουθούνται καθ' όλη τη διάρκεια από τη Μονάδα Ελέγχου Ισχύος (Power Control Unit, PCU). Οι λειτουργίες που ελέγχει αυτόματα η PCU περιλαμβάνουν (Τσαμουτσόγλου, 2020):

- Ενεργοποίηση του μηχανισμού απομάκρυνσης της τέφρας από τον αεριοποιητή.
- Αύξηση της τροφοδοσίας βιομάζας του αεριοποιητή όταν απαιτείται.
- Ρύθμιση του μείγματος αέρα-syngas του κινητήρα ώστε να διασφαλιστεί πλήρης καύση
- Ενεργοποίηση του πυρσού σε περίπτωση ακατάλληλου ή περισσευούμενου αερίου.
- Ενεργοποίηση συναγερμού σε περίπτωση δυσλειτουργίας ή όταν οι μετρήσεις είναι πάνω από προκαθορισμένα όρια.

6.2.3 Υπολογισμός παραγόμενης ενέργειας

Η υγρασία των ξηραμένων βιοστερεών μετά την ηλιακή ξήρανση, κυμαίνεται -όπως προαναφέρθηκε- από 10 έως 30%. Στο ενεργειακό περιεχόμενο των βιοστερεών υπολογίζουμε τη μέση τιμή υγρασίας (20%), η οποία κυμαίνεται και στις βέλτιστες τιμές περιεκτικότητας σε υγρασία για την αεριοποίηση (15-20%) (Biosolids2energy, 2017). Ως βαθμό απόδοσης του αεριοποιητή επιλέγουμε το μέσο βαθμό απόδοσης (80%) (Kreith & Krumdieck, 2014). Επίσης γνωρίζουμε εμπειρικά, ότι από 1 kg εισερχόμενης βιομάζας παράγονται 2 m³ syngas (Modeling Gasifier Mass, 2010). Η ποσότητα των βιοστερεών που εισέρχονται στον αεριοποιητή ισούται

με 15 kg/h.

Ενεργειακό περιεχόμενο των παραγόμενων βιοστερεών του Ηρακλείου:

Η ποσότητα των βιοστερεών που εισέρχονται στον αεριοποιητή ισούται με 15 kg/h (με 20% υγρασία), ενώ παράλληλα η HHV των χωνεμένων βιοστερεών του Ηρακλείου μετρήθηκε 15,090 MJ/kg. Συνεπώς το ενεργειακό περιεχόμενο των παραγόμενων βιοστερεών υπολογίζεται από τη σχέση 1:

$$Q_{bs} = m_{bs} * HHV_{bs} \Rightarrow Q_{bs} = 15 \text{ kg/h} * 15,090 \text{ MJ/kg} \Rightarrow Q_{bs} = 226,35 \text{ MJ/h} \quad (1)$$

Όπου:

- Q_{bs} = ενεργειακό περιεχόμενο βιοστερεών
- m_{bs} = παροχή τροφοδοτούμενων βιοστερεών στον αεριοποιητή
- HHV_{bs} = ανώτερη θερμογόνο δύναμη βιοστερεών

Ενεργειακό περιεχόμενο του παραγόμενου αερίου σύνθεσης (syngas):

Εφόσον εμπειρικά γνωρίζουμε ότι από 1 kg εισερχόμενης βιομάζας παράγονται 2 m³ syngas, τότε για 15 kg βιομάζας θα παραχθούν 30 m³ syngas. Για απόδοση αεριοποιητή (n) 80% ο υπολογισμός της HHV του syngas υπολογίζεται από τη σχέση 2:

$$n = \frac{HHV_{syngas} \left(\frac{MJ}{m^3} \right) * 2 \text{ m}^3}{HHV_{bs} \left(\frac{MJ}{kg} \right) * 1 \text{ kg}} \Rightarrow HHV_{syngas} = \left(\frac{n * HHV_{bs}}{2} \right) \Rightarrow HHV_{syngas} = \left(\frac{0,8 * 15,090 \frac{MJ}{kg}}{2 \text{ m}^3} * 1 \text{ kg} \right) \Rightarrow$$
$$HHV_{syngas} = 6,036 \text{ MJ/ m}^3 \quad (2)$$

Όπου:

- n = βαθμός απόδοσης αεριοποιητή
- HHV_{syngas} = ανώτερη θερμογόνο δύναμη syngas

Αφού υπολογίσαμε την HHV του syngas, το ενεργειακό περιεχόμενο του syngas υπολογίζεται από τη σχέση 3:

$$Q_{syngas} = V_{syngas} * HHV_{syngas} \Rightarrow Q_{syngas} = 30 \text{ m}^3/\text{h} * 6,036 \text{ MJ/m}^3 \Rightarrow Q_{syngas} = 181,08 \text{ MJ/h} \quad (3)$$

Όπου:

- Q_{syngas} = ενεργειακό περιεχόμενο syngas
- V_{syngas} = ογκομετρική παροχή syngas

Παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας:

Το αέριο αφού έχει υποστεί τη διαδικασία καθαρισμού που αναλύεται στο υποκεφάλαιο 6.2.2 τροφοδοτεί τη μηχανή εσωτερικής καύσης και την ηλεκτρογεννήτρια. Λαμβάνοντας υπόψιν ότι ο βαθμός απόδοσης σε ηλεκτρική ενέργεια είναι 20 %, σε θερμική ενέργεια 30% και 50 % είναι οι απώλειες καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα:

Η ανακτώμενη ηλεκτρική ενέργεια που προκύπτει από το θερμικό περιεχόμενο του syngas υπολογίζεται από την εξίσωση 4:

$$P_{el.engine} = \eta_{electric} * Q_{syngas} \Rightarrow P_{el.engine} = 0,2 * 181,08 \text{ MJ/h} \Rightarrow P_{el.engine} = 36,216 \text{ MJ/h} = 10,06 \text{ kW}$$

(4)

Όπου:

- $P_{el.engine}$ = ανακτώμενη ηλεκτρική ενέργεια
- $\eta_{electric}$ = βαθμός απόδοσης ηλεκτροπαραγωγικού ζεύγους

Η ανακτώμενη θερμική ενέργεια που προκύπτει από το θερμικό περιεχόμενο του syngas υπολογίζεται από τη σχέση 5:

$$Q_{useful.thermal} = \eta_{thermal} * Q_{syngas} \Rightarrow Q_{useful.thermal} = 0,3 * 181,08 \text{ MJ/h} \Rightarrow Q_{useful.thermal} = 54,324 \text{ MJ/h}$$

(5)

Όπου:

- $Q_{useful.thermal}$ = ανακτώμενη θερμική ενέργεια
- $\eta_{thermal}$ = βαθμός απόδοσης ηλεκτροπαραγωγικού ζεύγους

Η γεννήτρια θα παράγει από το σύστημα υδρόψυξης 54,324 MJ/h εκμεταλλεύσιμη θερμική ενέργεια σε μορφή θερμού νερού στους 90°C, ενώ οι απώλειες που προκύπτουν υπολογίζονται στην εξίσωση 6:

$$Q_{losses} = \eta_{losses} * Q_{syngas} \Rightarrow Q_{losses} = 0,5 * 181,08 \text{ MJ/h} \Rightarrow Q_{losses} = 90,54 \text{ MJ/h}$$
 (6)

Όπου:

- Q_{losses} = ενεργειακές απώλειες
- η_{losses} = βαθμός απόδοσης ηλεκτροπαραγωγικού ζεύγους

Ανακτώμενη ενέργεια από την ψύξη του syngas και από τα καυσάερια της μηχανικής εσωτερικής καύσης:

Για τον υπολογισμό της ανακτώμενης θερμικής ενέργειας από τη ψύξη του syngas λαμβάνουμε υπόψιν τις εξής παραμέτρους:

- ρ_{syngas} = πυκνότητα του syngas: 0,44 kg/m³ στους 400°C (Dogru et al., 2002)
- V_{syngas} = όγκος του syngas: 30 m³ από τα 15 kg βιομάζας από τον εμπειρικό τύπο 1:2 syngas (Modeling Gasifier Mass, 2010)
- $C_{p,syngas}$ = ειδική θερμοχωρητικότητα syngas: 1,34 kJ/kg*K στους 400°C (Dogru et al., 2002)
- T_f = θερμοκρασία syngas μετά τη ψύξη του: 150°C
- T_i = θερμοκρασία syngas στην έξοδο του αεριοποιητή: 400°C

Έτσι η ανακτώμενη θερμική ενέργεια κατά τη ψύξη του syngas υπολογίστηκε από την εξίσωση 7:

$Q_{\text{cooling-syngas}} = \rho_{\text{syngas}} * V_{\text{syngas}} * C_{p_{\text{syngas}}} * (T_f - T_i) \text{ } ^\circ\text{C} \Rightarrow Q_{\text{cooling-syngas}} = 0,44 \text{ kg/m}^3 * 30 \text{ m}^3 * 1,34 \text{ kJ/kg}^*\text{K} * (150-400) \text{ } ^\circ\text{C} \Rightarrow Q_{\text{cooling-syngas}} = -4.422 \text{ KJ/h} \Rightarrow Q_{\text{cooling-syngas}} = -4,422 \text{ MJ/h}$ (το αρνητικό πρόσημο υποδηλώνει απελευθέρωση) (7)

Όπου:

- $Q_{\text{cooling-syngas}}$ = ανακτώμενη θερμική ενέργεια κατά τη ψύξη του syngas

Για τον υπολογισμό της ανακτώμενης θερμικής ενέργειας από τα καυσαέρια της μηχανής λαμβάνουμε υπόψιν τις εξής παραμέτρους:

- ρ_k = πυκνότητα καυσαερίων: $0,56 \text{ kg/m}^3$ (πίνακας 9.1 και 9.2 του παραρτήματος)
- V_k = ογκομετρική παροχή καυσαερίων: Δεδομένου ότι η αναλογία air/syngas είναι 1:1:
 $V_k = V_{\text{syngas}} + V_{\text{air}} \Rightarrow 30 \text{ m}^3 + 30 \text{ m}^3 \Rightarrow V_k = 60 \text{ m}^3$ (Reed & Das, 1988)
- C_{p_k} = ειδική θερμοχωρητικότητα καυσαερίων: $1,1 \text{ kJ/kg}^*\text{K}$ (Jadhao & Thombare, 2013)
- T_f = θερμοκρασία καυσαερίων μετά τη ψύξη τους: 100°C
- T_i = θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από τη μηχανή 400°C

Έτσι η ανακτώμενη θερμική ενέργεια που θα προκύψει με την εκμετάλλευση των απαερίων της μηχανής υπολογίζεται από την εξίσωση 8:

$Q_{\text{exhaust-fumes}} = \rho_k * V_k * C_{p_k} * (T_f - T_i) \text{ } ^\circ\text{C} \Rightarrow Q_{\text{exhaust-fumes}} = 0,56 \text{ kg/m}^3 * 60 \text{ m}^3 * 1,1 \text{ kJ/kg}^*\text{K} * (100-400) \text{ } ^\circ\text{C} \Rightarrow Q_{\text{exhaust-fumes}} = -11.088 \text{ KJ/h} \Rightarrow Q_{\text{exhaust-fumes}} = -11,088 \text{ MJ/h}$ (το αρνητικό πρόσημο υποδηλώνει απελευθέρωση) (8)

Όπου:

- $Q_{\text{exhaust-fumes}}$ = ανακτώμενη θερμική ενέργεια από τα καυσαέρια της μηχανής

Άρα η συνολική ανακτώμενη θερμική ενέργεια υπολογίζεται από την εξίσωση 9:

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

Όπου:

- $Q_{\text{heat-recovery}}$ = συνολική ανακτώμενη θερμική ενέργεια

Η κατανάλωση ενέργειας του αεριοποιητή ανέρχεται στα 1 kWh (Τσαμουτσόγλου, 2020). Παράλληλα, η κατανάλωση ενέργειας της κλειστής εγκατάστασης ηλιακής ξήρανσης κυμαίνεται κατά μέσο όρο από $20 - 30 \text{ kWh}$ (WREC, 1998). Επιλέγεται η μέση τιμή (25 kWh). Συνεπώς η συνολική κατανάλωση ενέργειας της κλειστής εγκατάστασης ηλιακής ξήρανσης και του αεριοποιητή ανέρχεται στα: $25 \text{ kWh} + 1 \text{ kWh} = 26 \text{ kWh}$, δηλαδή $93,6 \text{ MJ/h}$. Η συνολική παραγόμενη θερμική ενέργεια είναι: $Q_{\text{useful-totalthermal}} = Q_{\text{useful.thermal}} + Q_{\text{heat-recovery}} = 54,324 \text{ MJ/h} + 15,510 \text{ MJ/h} = 69,834 \text{ MJ/h}$. Συνεπώς για την ενεργειακά αυτόνομη λειτουργία της κλειστής εγκατάστασης ξήρανσης και του αεριοποιητή απαιτείται και η εκμετάλλευση της ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο προϋποθέτει την ύπαρξη αντιστάσεων στην κλειστή εγκατάσταση ηλιακής ξήρανσης, ώστε να μπορεί να δέχεται εκτός από θερμική ενέργεια και ηλεκτρική. Η ηλεκτρική ενέργεια ανέρχεται στα $36,216 \text{ MJ/h}$ συνεπώς η συνολική παραγόμενη ενέργεια είναι:

$$Q_{\text{total}} = 69,834 \text{ MJ/h} + 36,216 \text{ MJ/h} = 106,05 \text{ MJ/h}$$

Συνεπώς, το σύστημα μπορεί να λειτουργήσει αυτόνομα. Η μικρή περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας θα χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των υπόλοιπων τμημάτων της μονάδας, διατηρώντας την ενεργειακή αυτονομία της. Η παραγόμενη τέφρα που συλλέγεται στη δεξαμενή, στη βάση του αεριοποιητή, μπορεί να αξιοποιηθεί για κατασκευαστικές εφαρμογές ή να απορριφθεί σε ΧΥΤΑ. Παράλληλα, η περαιτέρω επεξεργασία του αερίου σύνθεσης, δεν αποσκοπεί μόνο στην παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας. Περιορίζει τις εκπομπές ρυπαντικών σωματιδίων, διοξινών, πίσσας και ενώσεων χλωρίου, αζώτου και θείου.

Ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία-διαδικασία μπορούν να γίνουν αντίστοιχοι υπολογισμοί και για τα υπόλοιπα βιοστερεά που συλλέχθηκαν. Είναι σημαντικό να αναφερθεί βέβαια ότι οι υπολογισμοί αυτοί προέκυψαν, επιλέγοντας τις μέσες τιμές για τα ποσοστά υγρασίας των ξηραμένων βιοστερεών, το βαθμό απόδοσης του αεριοποιητή και τις ενεργειακές ανάγκες του κλειστού συστήματος ηλιακής ξήρανσης, επομένως μπορούν να τροποποιηθούν τα αποτελέσματα αναλόγως την επιλογή τιμών αυτών των κυμαινόμενων παραμέτρων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Η συνεχόμενη αυξητική ροή των παραγόμενων βιοστερεών είναι ένα παγκόσμιο πρόβλημα, το οποίο δεν θα μπορούσε να αφήσει και την Ελλάδα ανεπηρέαστη. Ενδεικτικά, στην Ελλάδα η παραγωγή βιοστερεών το 1995 ανερχόταν στους 51,624 tn DS/έτος, το 2000 στους 66,335 tn DS/έτος, το 2002 στους 79,76 tn DS/έτος και το 2010 στους 196,2 tn DS/έτος (EC, 2010). Σήμερα, η ανοδική τάση της παραγωγής βιοστερεών συνεχίζεται. Συνεπώς, είναι πρακτικά αδύνατη η διάθεση όλων αυτών των αποβλήτων σε ΧΥΤΑ. Η μετατροπή των βιοστερεών σε ενέργεια, αφενός είναι μια λύση για τη διαχείριση και διάθεση των βιοστερεών και αφετέρου αποτελεί μια νέα πηγή ενέργειας.

Οι δυνατότητες ενεργειακής αξιοποίησης των βιοστερεών είναι άμεσα εξαρτώμενες από τη θερμογόνο τους δύναμη. Οι διαφορές στις τιμές της θερμογόνου δύναμης που εντοπίζονται μεταξύ των βιοστερεών, οφείλονται στα διαφορετικά συστατικά που εμπεριέχονται στην ιλύ, καθώς και στην περιεκτικότητα τους σε στερεά. Όπως είδαμε, η θερμογόνος δύναμη των βιοστερεών που συλλέχθηκαν κατά την πρωτοβάθμια επεξεργασία είναι μεγαλύτερη από αυτή των βιοστερεών που συλλέχθηκαν κατά τη δευτεροβάθμια επεξεργασία, ενώ η θερμογόνος δύναμη των βιοστερεών που συλλέχθηκαν κατά τη δευτεροβάθμια επεξεργασία είναι μεγαλύτερη από αυτή των χωνεμένων βιοστερεών.

Σε περιπτώσεις όπου η θερμογόνος δύναμη των βιοστερεών κυμαίνεται σε υψηλά επίπεδα (15-30 MJ/kg), μπορεί να αντικαταστήσει πολλά καύσιμα υλικά όπως το πυρηνόξυλο, την παλέτα, το ξύλο, το χαρτί, το πλαστικό, τα σκουπίδια και τον άνθρακα. Για τιμές θερμογόνου δύναμης κοντά στα 10 MJ/kg ή και μεγαλύτερες, τα βιοστερεά αποτελούν ένα αυτόνομο καύσιμο υλικό το οποίο μπορεί να αντικαταστήσει επάξια καύσιμα υλικά όπως το συνθετικό αέριο άνθρακα, το λιγνίτη και τα πυρήνα. Σε περιπτώσεις όπου η τιμή της θερμογόνου δύναμης των βιοστερεών είναι μικρότερη, μπορεί να πραγματοποιηθεί μεικτή καύση των βιοστερεών - συνήθως με άνθρακα- για την παραγωγή ενέργειας.

Με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων της θερμογόνου δύναμης των βιοστερεών που συλλέχθηκαν στην παρούσα εργασία από τις ΕΕΛ της Κρήτης, παρατηρείται ότι τα βιοστερεά αυτά έχουν υψηλές δυνατότητες ενεργειακής αξιοποίησης και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμα υλικά για την παραγωγή ενέργειας. Επιπρόσθετα όπως είδαμε στο κεφάλαιο 6.2, η ηλιακή ξήρανση σε κλειστό σύστημα, σε συνδυασμό με την ενεργειακή αξιοποίηση των βιοστερεών με τη μέθοδο της αεριοποίησης, αποτελούν όχι μόνο μια φιλική προς το περιβάλλον λύση αλλά και οικονομική. Το ενεργειακό περιεχόμενο των βιοστερεών που συλλέχθηκαν, όχι μόνο επαρκεί για την αυτόνομη λειτουργία του συστήματος, αλλά προκύπτει και περίσσεια ενέργειας που μπορεί να αξιοποιηθεί για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών άλλων τμημάτων της μονάδας.

Η ενεργειακή αξιοποίηση των βιοστερεών σήμερα, αποτελεί μονόδρομο καθώς όχι μόνο παράγεται ενέργεια με σχεδόν μηδαμινό περιβαλλοντικό κόστος, αλλά προσφέρεται παράλληλα μια επιπλέον λύση για τη διάθεση του συνεχώς αυξανόμενου όγκου των παραγόμενων βιοστερεών. Είτε οι δυνατότητες ενεργειακής αξιοποίησης των βιοστερεών είναι μεγάλες και μπορούν να αποτελέσουν από μόνα τους ένα επαρκές καύσιμο υλικό, είτε είναι μικρότερες και η μεικτή καύση με άλλο υλικό θεωρείται επιβεβλημένη για την παραγωγή ενέργειας, η ενεργειακή αξιοποίησή τους κρίνεται απαραίτητη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

8.1 Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

- Abbas A.H., Ibrahim A.A., Nor F. and Aris M. (2011), "Characterization of Malaysian domestic sewage sludge for conversion into fuels for energy recovery plants", Conf. (NPC), pp.3-6, IEEE Publishing.
- Andreoli C. V., Von Sperling M., Fernandes F. and Ronteltap M. (2007), "Sludge Treatment and Disposal", Biological Wastewater Treatment Series, vol.6, IWA Publishing.
- Arkadiusz O. (1998), "Elementary analysis and energetic potential of the municipal sewage sludges from the Gdansk and Koscierzyna WWTPs", Seminary on Geomatics, Civil and Environmental Engineering, E3S Web of Conferences, vol.26, 05 January.
- Asano T. and Levine A. (1998), "Wastewater Reclamation, Recycling and Reuse: An Introduction", CRC Press, pp.1-56.
- Assanee N. and Boonwan C. (2011), "State of The Art of Biomass Gasification Plants in Thailand", Energy Procedia, vol.9, pp.299-305.
- Barber W. (2014), "Influence of sludge production and processing on power demand of wastewater treatment", Asian Water, May-June.
- Brandt M.J., Johnson M., Elphinston A.J. and Ratnayaka D.D. (2017), "Twort's Water Supply (Seventh Edition)", Chapter 13 – Energy Use, Sustainability and Waste Treatment, pp.553-580.
- Campoy M., Gomez-Barea A., Vidal F.B, Ollero P. (2009), "Air-steam gasification of biomass in a fluidized bed: Process optimisation by enriched air" Fuel Processing Technology, vol.90, Issue 5, pp.677-685.
- 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, vol.221.
- Cherubini F., Bargigli S. and Ulgiati S. (2009), "Life cycle assessment (LCA) of waste management strategies: Landfilling, sorting plant and incineration" Energy, vol.34, Issue 12, pp.2116-2123.
- Cicek N., Franco J.P., Suidan M.T. and Urbain V. (1998), "Using a membrane bioreactor to reclaim wastewater: The membrane bioreactor is an emerging technology for the reclamation of municipal wastewater", Journal of American Water Works Association, vol.90, Issue 11, pp.105-113.
- Conly H. and Dae Yeol C. (2019), "Handbook of Farm, Dairy and Food Machinery Engineering (Third Edition)", Chapter 26 – Agricultural Waste Management in Food

Processing, pp.673-716.

- Dogru M., Midilli A. and Howarth S. (2002), "Gasification of sewage sludge using a throated downdraft gasifier and uncertainty analysis", *Fuel Processing Technology*, vol.75, Issue 1, pp.55-82.
- Egorov V.P. and Karpushkin L.T. (1988), "Determination of air humidity over evaporating surface inside a leaf by a compensation method", *Photosynthetica*, vol.22, pp.394-404.
- European Commission (2007), "Comparative evaluation of sludge reduction routes", ISBN: 1-84-339-123-6, IWA Publishing, London.
- European Commission (2010), "Environmental, economic and social impacts of the use of sewage sludge on land", DG Environment, 10 February.
- European Communities (1999), "Council Directive on The Landfill of Waste", 1999/31/EC, Official Journal of the European Parliament, L182, pp.1-19.
- Fytili D. and Zabaniotou A. (2008), "Utilization of Sewage Sludge in EU Application of Old and New Methods- A Review", *Renewable and sustainable energy reviews*, vol.12, Issue 1, pp.116-140.
- Gikas P. (2008), "Commissioning of the Gigantic Anaerobic Sludge Digesters at the Wastewater Treatment Plant of Athens", *Environmental Technology*, vol. 29, pp. 131-139.
- Gikas P. (2017), "Ultra high temperature gasification of municipal wastewater primary biosolids in a rotary kiln reactor for the production of synthetic gas", *Journal of Environmental Management*, vol.203, Issue 2, pp.688-694.
- Gikas P. (2018), "Commissioning of the Gigantic Anaerobic Sludge Digesters at the Wastewater Treatment Plant of Athens", *Environmental Technology*, vol.29, pp. 131-139.
- Gopal P.M., Sivaram N.M. and Barik D. (2019), "Energy from Toxic Organic Waste for Heat and Power Generation", Chapter 7 – Paper Industry Wastes and Energy Generation from Wastes, pp.83-97.
- Grabowski Z. and Oleszkiewicz J.A. (1998), "Combustion of Sewage Sludge", Basics and Prevention of Sludge Processing and Management, International Training Seminar, Krakow, 11-12 May.
- Haider N., Ar Rafie S.A. and Islam N. (2016), "Assessing the Energy Values of Sewage Sludge from Pagla Sewage Treatment Plant", Project: Energy Generation and Waste Management through the Co-combustion of Sewage Sludge and Coal in Bangladesh.
- Hall J. (1999), "Ecological and economical balance for sludge management options", Session 3 – Technology and innovative options related to sludge management, WRc plc, Medmenham, Marlow, 18-19 November.
- Hoinkis J., Deowan S.A., Panten V., Figoli A., Huang R.R. and Drioli E. (2012), "Membrane

Bioreactor (MBR) Technology – a Promising Approach for Industrial Water Reuse”, *Procedia Engineering*, vol.33, pp.234-241.

- 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*, vol.268.
- Jadhao J. and Thombare D. (2013), “Review on Exhaust Gas Heat Recovery for IC Engine”, *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, vol.2, Issue 12.
- Jimenez J., Vedrenne F., Denis C., Mottet A., Deleris S., Steyer J-P. and Cacho Rivero J.A. (2013), “A statistical comparison of protein and carbohydrate characterisation methodology applied on sewage sludge samples”, *Water Research*, vol.47, Issue 5, pp.1751-1762.
- Karekezi S., Lata K. and Coelho S. T. (2004), “Traditional Biomass Energy: Improving Its Use and Moving to Modern Energy Use”, *Renewable Energy, International Conference for Renewable Energies, Bonn*, 1-4 June.
- 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 Management*, vol.32, Issue 16, pp.1186-1195.
- Kim Y-J., Kang H-O. and Qureshi T. (2005), “Heating value characteristics of sewage sludge: A comparative study of different sludge types”, vol.27, Issue 2, pp.124-129.
- Knoef H. (2005), “Handbook Biomass Gasification”, *Biomass Technology Group, Enschede, Netherlands*.
- Koller M. and Saleh H.M. (2018), “Heavy Metals”, Chapter 1 - Introductory Chapter: Introducing Heavy Metals, *IntechOpen*.
- Kowalik P. (1998), “Energy Production from Sewage Sludge in Wastewater Treatment Plants in Swarzewo”, *Materials of VII Konf: Wastewater Sludge in Practice, Bienia, Czestochowa*.
- Kreith F. and Krumdieck S. (2014), “Principles of Sustainable Energy Systems”, 1st Edition, *Boca Raton: CRC press*.
- Kurt M. (2014), Diploma thesis, “Evaluation of solar sludge drying alternatives on costs and area requirements”, *Middle East Technical University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Environmental Engineering*.
- Marrero T.W., McAuley B.P., Sutterlin W.R., Morris J.S. and Manahan S.E (2003), “Fate of heavy metals and radioactive metals in gasification of sewage sludge”, *Waste Management*, vol.24, Issue 2, pp.193-198.
- 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”,

- Metcalf and Eddy (2003), "Wastewater Engineering: Treatment and Reuse", McGraw- Hill, 4th edition.
- Modeling Gasifier Mass (2010), "Modeling Gasifier Mass Flow", (<http://wiki.gekgasifier.com/w/page/6123785/Modelling%20Gasifier%20Mass%20Balance>).
- Nathan S. and Clarke B. (2000), "'Solar Mix' – Innovation in Drying Technology".
- Oladejo J., Shi K., Luo X., Yang G. and Wu T. (2018), "A Review of Sludge-to-Energy Recovery Methods", The 6th International Conference on Sustainable Solid Waste Management, Energies, vol.12, Issue 1, pp.60.
- Reed T. and Das A. (1988), "Handbook of biomass gasifier engine systems", Pine Ridge: Biomass Energy Foundation.
- Tillman D. (2000), "Biomass co-firing: The technology, the experience, the combustion consequences", Biomass and Bioenergy, vol.19, Issue 6, pp.365-384.
- Toze S. and Sidhu J. (2011), "Biosolids: Human Health Impacts", Encyclopedia of Environmental Health, Elsevier, pp.394-402.
- Turovskiy I.S. and Mathai P.K. (2006), "Wastewater Sludge Processing", Wiley - Interscience.
- Vamvuka D. and Zografos D. (2004), "Predicting the behavior of ash from agricultural wastes using combustion", Vol.83, Issues 14-15, pp.2051-2057.
- WREC (1998), "5th World Renewable Energy Congress", vol.1, pp.1-609, Florence, Italy, 20-25 September.
- Zygodlo M. (2001), "Municipal Solid Waste Strategies", Polish Association of Sanitary Engineers and Technicians, Wyd. PZITS, Poznan.

8.2 Ελληνική βιβλιογραφία

- Αγγελάκης Α. και Τσομπάνογλου Γ. (2004), “Υγρά απόβλητα”, Φυσικά Συστήματα Επεξεργασίας και Ανάκτηση, Επαναχρησιμοποίηση και Διάθεση Εκρών, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.
- Biosolids2energy (2017), “Νέα Μέθοδος για την Ενεργειακά Αυτόνομη Επεξεργασία Υγρών Αποβλήτων και Διαχείριση Βιοστερεών”, από <https://www.biosolids2energy.eu/archiki.html>, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, Design of Environmental Processes Lab.
- Βλυσίδης Α. (2007), Σημειώσεις μαθήματος Διαχείριση Βιομηχανικών Αποβλήτων, “Χαρακτηριστικά Υγρών Αποβλήτων και Νερών”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Χημικών Μηχανικών.
- Βλυσίδης Α., Γρηγοροπούλου Ε. και Λυμπεράτος Γ. (2018), Σημειώσεις μαθήματος Περιβαλλοντική Μηχανική, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Χημικών Μηχανικών.
- Βουδούρης Κ. (2014), Σημειώσεις μαθήματος Χώροι Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων, “Εδαφική διάθεση υγρών αποβλήτων”, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Γεωλογίας.
- Γκίκας Π. (2020), Σημειώσεις μαθήματος Σχεδιασμός Περιβαλλοντικών Εγκαταστάσεων και Εκτίμηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων II, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος.
- Ευθυμιάδης Α. (2013), “Ρύπανση από αιθαλομίχλη - Το χρονικό άστοχων επιλογών: Τα λάθη – οι επιπτώσεις – οι λύσεις”, Τεχνολογίες Θερμάνσεως, Αίθουσα Εκδηλώσεων του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, Αθήνα, 27 Μαρτίου.
- Καρπουζάς Δ. (2020), Σημειώσεις μαθήματος Τεχνολογία Επεξεργασίας Αποβλήτων, “Εισαγωγή στην Επεξεργασία Υγρών Αποβλήτων”, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Βιοχημείας και Βιοτεχνολογίας.
- Κατσιμαντού Κ. (2007), Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία “Ξήρανση Ιλύος Αστικών και Βιομηχανικών Αποβλήτων με τη βοήθεια της Ηλιακής Ενέργειας”, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών.
- Κελεσίδης Α. (2010), Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία “Διερεύνηση των Μεθόδων Επεξεργασίας και Τελικής Διάθεσης της Ιλύος στις Χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης”, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας, Τμήμα Διαχείρισης Αποβλήτων.
- Κοινή Υπουργική Απόφαση Αριθμ. Γ1(δ)/ ΓΠ οικ.67322/2017, “ ΦΕΚ 3282/Β/19-9-2017” , Ποιότητα νερού ανθρώπινης κατανάλωσης σε συμμόρφωση προς τις διατάξεις της Οδηγίας 98/83/ΕΚ του Συμβουλίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης, της 3^{ης} Νοεμβρίου 1998 όπως τροποποιήθηκε με την Οδηγία (ΕΕ) 2015/1787 (L260, 7.10.2015).

- Κοινή Υπουργική Απόφαση (2011), “Μέτρα, όροι και διαδικασίες για τη χρησιμοποίηση της ιλύος που προέρχεται από επεξεργασία οικιακών και αστικών λυμάτων καθώς και ορισμένων υγρών αποβλήτων, σε συμμόρφωση προς τις διατάξεις της οδηγίας 86/278/ΕΟΚ του Συμβουλίου των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων. Αντικατάσταση της 80568/4225/1991 (Β’641) κοινής Υπουργικής απόφασης”, Χρησιμοποίηση στη δασοπονία, Άρθρο 6, Αθήνα.
- Κυβερνητική Υπουργική Απόφαση 80568/4225/91 στις 22^{ης} Μαρτίου 1991, “Μέθοδοι, όροι και περιορισμοί για την χρησιμοποίηση στη γεωργία της ιλύος που προέρχεται από επεξεργασία οικιακών και αστικών λυμάτων”, Άρθρο 5.
- Λέκκας Θ. (2001), “Περιβαλλοντική Μηχανική II – Διαχείριση Υγρών Αποβλήτων”, Εκδόσεις Λέκκας Θεμιστοκλής, Αθήνα.
- Λοϊζίδου Μ. (2006), Σημειώσεις εργαστηριακής μονάδας “Περιβαλλοντική Επιστήμη και Τεχνολογία”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Χημικών Μηχανικών.
- Μαντζιούρας Η. (2010), Σημειώσεις μεταπτυχιακού μαθήματος Επιστήμη και Τεχνολογία Υδάτινων Πόρων “Βελτιστοποίηση Διβαθμιών Συστημάτων Αναερόβιας Χώνευσης Ιλύος με Προσθήκη Μετάλλων”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Μελίδης Π. (2016), Εργαστηριακές σημειώσεις Διαχείρισης και Τεχνολογίας Υγρών Αποβλήτων, “Χαρακτηριστικά υγρών αποβλήτων”, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος.
- Νταρακάς Ε. (2010), Σημειώσεις μαθήματος “Διεργασίες Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων”, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδραυλικής και Τεχνικής Περιβάλλοντος.
- Νταρακάς Ε. (2016), “Τεχνικές Περιβάλλοντος”, Διεργασίες Επεξεργασίας Νερού και Υγρών Αποβλήτων, Εκδόσεις Σοφία, Θεσσαλονίκη.
- “Οδηγία 1999/31/ΕΚ του Συμβουλίου της 26ης Απριλίου 1999 περί υγειονομικής ταφής των αποβλήτων”.
- “Οδηγία 2000/76/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 4ης Δεκεμβρίου 2000, για την αποτέφρωση των αποβλήτων”.
- “Οδηγία 91/271/ΕΟΚ του Συμβουλίου της 21^{ης} Μαΐου 1991 για την επεξεργασία των αστικών λυμάτων”.
- Σαββάκης Ν. (2016), Σημειώσεις μαθήματος Περιβαλλοντική Διαχείριση “Διάλεξη 3^η - Υγρά Απόβλητα”, ΤΕΙ Κρήτης, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε.
- Σαρηγιάννης Δ. (2015), Σημειώσεις μαθήματος Διαχείριση Υγρών Αποβλήτων “Τριτοβάθμια Επεξεργασία”, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Χημικών Μηχανικών.

- Σκουλού Β. (2009), Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία “Σχεδιασμός και Ανάπτυξη Αντιδραστήρα Αεριοποίησης για την Ενεργειακή Αξιοποίηση Βιομάζας”, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Χημικών Μηχανικών.
- Στάμου Α. και Βογιατζής Ζ. (1994), “Βασικές Αρχές και Σχεδιασμός Συστημάτων Επεξεργασίας Αποβλήτων”, Έκδοση Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας.
- Στούπας Χ. και Κοτσανίδης Σ. (2009), Διπλωματική εργασία “Ξήρανση Ιλύος Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων με Ηλιακή Ενέργεια”, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Καβάλας, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Μηχανολογίας.
- Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος (2005), “Εναλλακτικοί Τρόποι Διαχείρισης των Παραπροϊόντων από Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων”, Αθήνα, Απρίλιος.
- Τσαμουτσόγλου Κ. (2020), Διπλωματική εργασία “Ισοζύγια μάζας και ενέργειας του καινοτομικού συστήματος ενεργειακής αξιοποίησης βιοστερεών με τη μέθοδο της αεριοποίησης”, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος.
- Τσώνης Σ. (2004), “Επεξεργασία Λυμάτων”, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.
- Τσόγκας Χ. (1998), “Δίκτυα αποχέτευσης και επεξεργασία λυμάτων”, Εκδόσεις ΙΩΝ.
- Φλιτρής Ε. (2013), Διπλωματική εργασία “Μονάδες Ενεργειακής Αξιοποίησης Βιομάζας για Παραγωγή Ηλεκτρισμού”, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Θερμοδυναμικής.
- Ψυλλάκη Ε. (2014), Σημειώσεις μαθήματος Έλεγχος Ρύπανσης Νερών “Σημειώσεις Θεωρίας 2014”, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

9.1 Παράρτημα υπολογισμού ανώτερης θερμογόνου δύναμης των βιοστερεών

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο υπολογίσθηκαν οι μετρήσεις της θερμογόνου δύναμης των βιοστερεών με το πρόγραμμα Excel. Εκεί, καταγράφονται όλες οι τιμές θερμοκρασίας (πριν και μετά το ignite) που μετρήθηκαν με το θερμιδόμετρο. Με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται η 10^η μέτρηση όπου αρχίζουν να καταγράφονται οι μετρήσεις μετά το πάτημα του κουμπιού ignite, έως και τη μέγιστη θερμοκρασία που καταγράφεται στο θερμιδόμετρο. Στη συνέχεια, καταγράφεται η μέγιστη θερμοκρασία στις εξισώσεις υπολογισμού και προκύπτει η ανώτερη θερμογόνος δύναμη. Η συγκεκριμένη μέτρηση είναι των βιοστερεών που συλλέχθηκαν από την ΕΕΛ των Χανίων κατά την πρωτοβάθμια επεξεργασία. Ομοίως υπολογίσθηκε η θερμογόνος δύναμη όλων των δειγμάτων που συλλέχθηκαν.

Υπολογισμοί	Συμβολισμοί	Σχόλια
1.777	ΔT - The temperature increase of calorimeter system after correction, °C	ΤΥΠΟΣ 2
28.100	t_n - The final temperature of main period, °C	Η επόμενη από την μέγιστη θερμοκρασία
26.474	t_0 - The initial temperature of main period, °C	Η αρχική θερμοκρασία
0.151190344	$\Delta\theta$ - The modified value of heat exchange between calorimeter-environment, °C	ΤΥΠΟΣ 3
0.007875	V_n - The temperature change rate in the final period, °C/30s	Μέσος όρος διαφορών "final period"
-0.002333333	V_0 - The temperature change rate in the initial period, °C/30s	Μέσος όρος διαφορών "initial period"
28.098	θ_n - The average temperature in the final period, °C	Μέσος όρος θερμοκρασιών "final period"
26.469	θ_0 - The average temperature in the initial period, °C	Μέσος όρος θερμοκρασιών "initial period"
22	n - Times to record temperatures in the main period	Αριθμός μετρήσεων "main period"
587.355	Σt_i - The temperature readings in sequence in the main period	Το άθροισμα των μετρήσεων "main period" χωρίς την t_0
27822.93896	Q - Calorific value of sample, J/g	ΤΥΠΟΣ 4
42.18	ΣG_d - the total heat produced by the additive, J	Θερμογόνος δύναμη (σταθερό = 6000)*Μάζα σύρματος
1.0059	G - Weight of sample, g	Μάζα δείγματος (1g)

ΤΥΠΟΣ 2	$\Delta T = (t_n - t_0) + \Delta\theta$
ΤΥΠΟΣ 3	$\Delta\theta = \frac{V_n - V_0}{\theta_n - \theta_0} \left(\frac{t_n + t_0}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} t_i - n \cdot \theta_1 \right) + n \cdot V_1$
ΤΥΠΟΣ 4	$Q = \frac{E \cdot \Delta T - \Sigma(G \cdot d)}{G}$

No	Μέτρηση (°C)	Περίοδος
0	26.453	initial (οι μετρήσεις πριν το ignite)
1	26.461	
2	26.467	
3	26.472	
4	26.471	
5	26.474	
6	26.471	
7	26.472	
8	26.473	
9	26.474	
10	26.697	main (από το ignite μέχρι την μέγιστη θερμοκρασία)
11	27.247	
12	27.552	
13	27.723	
14	27.832	
15	27.905	
16	27.958	
17	27.993	
18	28.019	
19	28.042	
20	28.056	
21	28.071	
22	28.081	
23	28.086	
24	28.093	
25	28.094	
26	28.097	
27	28.101	
28	28.102	
29	28.099	
30	28.101	
31	28.103	final (από την μέγιστη θερμοκρασία μέχρι το τέλος)
32	28.1	
33	28.101	
34	28.101	
35	28.098	
36	28.099	
37	28.101	
38	28.095	
39	28.097	
40	28.093	

9.2 Παράρτημα υπολογισμού ενεργειακών περιεχομένων των καυσαερίων της μηχανής εσωτερικής καύσης κατά προσέγγιση

Στους Πίνακες 9.1 και 9.2 παρουσιάζεται η μεθοδολογία υπολογισμού της πυκνότητας των καυσαερίων της μηχανής εσωτερικής καύσης.

Στον Πίνακα 9.1 υπολογίστηκε το μίγμα τροφοδοσίας (syngas-air) στη μηχανή εσωτερικής καύσης, θεωρώντας ότι η αναλογία syngas/air είναι 1:1 και γνωρίζοντας τα κύρια συστατικά του syngas και του αέρα (Reed & Das, 1988).

Πίνακας 9.1 Υπολογισμός μίγματος τροφοδοσίας της μηχανής εσωτερικής καύσης.

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

Στη συνέχεια υπολογίστηκε η πυκνότητα των καυσαερίων της μηχανής εσωτερικής καύσης. Οι υπολογισμοί του Πίνακα 9.2 βασίστηκαν στην παραδοχή ότι το syngas είναι ιδανικό αέριο και ακολουθεί την καταστατική εξίσωση. Το νερό, αν και αποτελεί περίπου το 7% της σύστασης των καυσαερίων δε λήφθηκε υπόψιν για τον υπολογισμό της πυκνότητας των καυσαερίων, καθώς δε θεωρείται ιδανικό αέριο.

Κατά τη λειτουργία της μηχανής εσωτερικής καύσης λαμβάνουν χώρα οι παρακάτω αντιδράσεις καύσης:

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

Συνεπώς η σύσταση των καυσαερίων στον Πίνακα 9.2 που ακολουθεί, υπολογίστηκε από τη στοιχειομετρία των αντιδράσεων 1 και 2 για το μίγμα τροφοδοσίας του Πίνακα 9.1.

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

Κύρια συστατικά καυσαερίων	Σύσταση καυσαερίων (%v/v)	Σύσταση καυσαερίων (%v/v) στο 100%	Μοριακό βάρος (g/mol)	Μάζα (g)	Σύσταση καυσαερίων (%w/w)	Κλάσμα μάζας	Πυκνότητα στους 400°C (kg/m ³)
H ₂	0	0	2	0	0	0	0
CO	0	0	28	0	0	0	0
O ₂	5,88	6,18	32	197,6	7,1	0,071	0,6
N ₂	71,5	75,16	28	2104,6	75,2	0,752	0,5
CO ₂	10,75	11,3	44	497,2	17,8	0,178	0,8
H ₂ O	7	7,36	18	0	0	0	0
Σύνολο	95,13	100		2799,5	100	1	0,56

Θεωρώντας ότι η αναλογία των όγκων είναι ίδια με αυτή των moles, υπολογίστηκε το γινόμενο του μοριακού βάρους του κάθε συστατικού και της σύστασης των καυσαερίων (%v/v) στο 100%, η μάζα των συστατικών του καυσαερίου (%w/w). Από το γινόμενο του κλάσματος της μάζας και της πυκνότητας στους 400°C του κάθε συστατικού των καυσαερίων, υπολογίστηκε ότι η πυκνότητα των καυσαερίων ισούται με 0,56 kg/m³.