



ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ

«Διαχείριση Αποβλήτων»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΑΝΑΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΣΤΡΑΓΓΙΣΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ
ΑΠΟΔΟΣΗ ΞΗΡΗΣ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑΣ ΧΩΝΕΥΣΗΣ ΟΡΓΑΝΙΚΟΥ
ΚΛΑΣΜΑΤΟΣ ΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ:
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΛΙΜΑΚΑ**

ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΤΟΤΗ

Μηχανικός Περιβάλλοντος, ΠΚ

Επιβλέπουσα Α' Καθηγήτρια : ΓΚΡΙΛΛΑ ΕΛΕΝΗ

Επιβλέπων Β' Καθηγητής : ΚΥΖΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

Αθήνα

Σεπτέμβριος 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΑΝΑΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΣΤΡΑΓΓΙΣΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ
ΑΠΟΔΟΣΗ ΞΗΡΗΣ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑΣ ΧΩΝΕΥΣΗΣ ΟΡΓΑΝΙΚΟΥ ΚΛΑΣΜΑΤΟΣ
ΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ:
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΛΙΜΑΚΑ**

ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΤΟΤΗ

Μηχανικός Περιβάλλοντος, ΠΚ

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

‘Α Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:

Δρ. Γκρίλλα Ελένη

Επίκουρη Καθηγήτρια

Τμήμα Περιβάλλοντος, Ιόνιο
Πανεπιστήμιο

‘Β Επιβλέπων Καθηγητής:

Δρ. Κύζας Γεώργιος

Καθηγητής

Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο
Θράκης

Αθήνα, 2026

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Πρώτα απ' όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, τους συγγενείς μου και τους φίλους μου για τη συνεχή στήριξη, την υπομονή και την ενθάρρυνσή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Η πίστη τους στις δυνατότητές μου ήταν για μένα πολύτιμη και με βοήθησε να ολοκληρώσω αυτή την προσπάθεια.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στην επιβλέπουσα καθηγήτριά μου, **κα Ελένη Γκρίλλα**, για την άριστη συνεργασία, τις εύστοχες παρατηρήσεις και τη συνεχή υποστήριξή της καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών για τις γνώσεις και την εμπειρία που μου μετέδωσαν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου. Ιδιαίτερα ευχαριστώ τον **κ. Γεώργιο Κύζα**, ο οποίος υπήρξε καθηγητής μου στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα και συμμετείχε ως Β' επιβλέπων στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Ένα ιδιαίτερα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στους συναδέλφους και φίλους, οι οποίοι με στήριξαν ουσιαστικά σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας. Οι γνώσεις τους, η εμπειρία τους, η προθυμία τους να μοιραστούν ιδέες και να συζητήσουν ανά πάσα στιγμή κάθε προβληματισμό μου, αλλά και η καθημερινή τους βοήθεια και υπομονή, συνέβαλαν καθοριστικά στην ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Θερμές ευχαριστίες απευθύνω στην **ΜΕΣΟΓΕΙΟΣ AQUA ΜΟΝΟΠΡΟΣΩΠΗ Α.Ε.**, η οποία μου έδωσε την ευκαιρία να εκπονήσω τη διπλωματική αυτή εργασία και να ασχοληθώ ερευνητικά με ένα αντικείμενο άμεσα συνδεδεμένο με την επαγγελματική μου δραστηριότητα. Η συνεχής υποστήριξη της εταιρείας, η εμπιστοσύνη που μου έδειξε και η δυνατότητα να αποκτήσω πολύτιμη εμπειρία σε έργα διαχείρισης αποβλήτων αποτέλεσαν καθοριστικούς παράγοντες για την υλοποίηση της παρούσας έρευνας. Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη **ΔΙΑΑΜΑΘ Α.Α.Ε.** για τη δυνατότητα που μου έδωσε να πραγματοποιήσω τη διπλωματική μου εργασία στη ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης, καθώς και για τη διάθεση των απαραίτητων λειτουργικών στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διαχείριση των Αστικών Στερεών Αποβλήτων (ΑΣΑ) αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά ζητήματα των σύγχρονων κοινωνιών, ιδιαίτερα υπό το πρίσμα της συνεχώς αυξανόμενης παραγωγής τους και της ανάγκης περιορισμού της τελικής τους διάθεσης. Σημαντικό μέρος των παραγόμενων ΑΣΑ αποτελεί το οργανικό κλάσμα, το οποίο, λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς του σε βιοαποδομήσιμη οργανική ύλη, απαιτεί κατάλληλη διαχείριση και μπορεί παράλληλα να αποτελέσει σημαντική πηγή ανάκτησης πόρων και ενέργειας. Στο πλαίσιο της μετάβασης από τη διάθεση των αποβλήτων προς την αξιοποίησή τους, η αναερόβια χώνευση αποτελεί μία από τις βασικές μεθόδους βιολογικής επεξεργασίας του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ. Η εφαρμογή της δεν περιορίζεται στη σταθεροποίηση του οργανικού υλικού, αλλά επιτρέπει παράλληλα την παραγωγή βιοαερίου και την ενεργειακή του αξιοποίηση, συμβάλλοντας έτσι σε μια πιο ολοκληρωμένη προσέγγιση διαχείρισης των οργανικών αποβλήτων.

Μεταξύ των διαφορετικών συστημάτων αναερόβιας χώνευσης, η ξηρή αναερόβια χώνευση παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την επεξεργασία οργανικών αποβλήτων υψηλής περιεκτικότητας σε στερεά. Στα συστήματα ασυνεχούς λειτουργίας, η ανακυκλοφορία των παραγόμενων στραγγισμάτων διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη της διεργασίας, καθώς συμβάλλει στη διατήρηση της απαιτούμενης υγρασίας και στη μεταφορά διαλυμένων οργανικών ενώσεων και μικροοργανισμών εντός της απορριμματικής μάζας. Η αποτελεσματικότητα της ανακυκλοφορίας εξαρτάται, μεταξύ άλλων, από τον τρόπο εφαρμογής της, με τη συχνότητά της να αποτελεί μία από τις παραμέτρους που μπορούν να επηρεάσουν την απόδοση της διεργασίας.

Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία διερευνά την επίδραση της συχνότητας ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων στην απόδοση της ξηρής αναερόβιας χώνευσης του οργανικού κλάσματος των αστικών στερεών αποβλήτων, με εφαρμογή σε βιομηχανική κλίμακα. Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε στη Μονάδα Επεξεργασίας Απορριμμάτων (ΜΕΑ) Αλεξανδρούπολης, όπου εφαρμόζεται ξηρή αναερόβια χώνευση ασυνεχούς λειτουργίας σε αντιδραστήρες τύπου κελιών. Για την πειραματική διερεύνηση χρησιμοποιήθηκαν τρία κελιά, στα οποία εφαρμόστηκαν

διαφορετικές συχνότητες ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων, 10, 35 και 50 φορές ανά ημέρα, με τις υπόλοιπες βασικές συνθήκες λειτουργίας να διατηρούνται κατά το δυνατόν συγκρίσιμες.

Πριν από την κύρια πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε ξεχωριστός κύκλος αναερόβιας χώνευσης για την παραγωγή χωνευμένου υλικού, το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως εμβόλιο στα τρία υπό μελέτη κελιά. Κατά τη διάρκεια του πειράματος καταγράφηκαν η παραγωγή και η σύσταση του παραγόμενου βιοαερίου, ενώ πραγματοποιήθηκε φυσικοχημικός χαρακτηρισμός του οργανικού κλάσματος, του χωνευμένου υλικού και των παραγόμενων στραγγισμάτων.

Τα αποτελέσματα ανέδειξαν διαφοροποιήσεις μεταξύ των τριών συχνοτήτων ανακυκλοφορίας, τόσο ως προς τη συνολική παραγωγή όσο και ως προς τη χρονική εξέλιξη της διεργασίας. Η υψηλότερη σωρευτική παραγωγή βιοαερίου καταγράφηκε στο κελί υψηλής συχνότητας ανακυκλοφορίας και ανήλθε σε 6.416,08 m³, έναντι 6.250,50 m³ και 6.156,50 m³ στα κελιά μέσης και χαμηλής συχνότητας, αντίστοιχα. Η περιεκτικότητα του παραγόμενου βιοαερίου σε μεθάνιο αυξήθηκε σταδιακά κατά τις πρώτες ημέρες της διεργασίας και στη συνέχεια διαμορφώθηκε σε επίπεδα περίπου 50–55% και στα τρία πειραματικά κελιά. Αντίστοιχα, η υψηλότερη σωρευτική παραγωγή μεθανίου καταγράφηκε στο κελί υψηλής συχνότητας και ανήλθε σε 3.482,56 m³, έναντι 3.306,75 m³ και 3.225,92 m³ στα άλλα δύο κελιά. Επιπλέον, στο κελί υψηλής συχνότητας η μέγιστη ημερήσια παραγωγή επιτεύχθηκε ήδη από τη 17η ημέρα, σημαντικά νωρίτερα από τα κελιά μέσης και χαμηλής συχνότητας, όπου καταγράφηκε την 30ή και 31η ημέρα, αντίστοιχα. Ωστόσο, το κελί μέσης συχνότητας παρουσίασε τη μεγαλύτερη μέγιστη ημερήσια παραγωγή, τόσο για το βιοαέριο όσο και για το μεθάνιο.

Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η συχνότητα ανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων αποτελεί κρίσιμη λειτουργική παράμετρο της ξηρής αναερόβιας χώνευσης, καθώς επηρεάζει τόσο τη συνολική απόδοση όσο και τη χρονική εξέλιξη της διεργασίας. Υπό τις συνθήκες της συγκεκριμένης εφαρμογής, η υψηλότερη συχνότητα ανακυκλοφορίας συνδέθηκε με τη μεγαλύτερη σωρευτική παραγωγή βιοαερίου και μεθανίου και με την ταχύτερη επίτευξη της μέγιστης ημερήσιας παραγωγής. Τα αποτελέσματα αυτά αναδεικνύουν τη σημασία της κατάλληλης επιλογής της στρατηγικής ανακυκλοφορίας κατά τη λειτουργία συστημάτων ξηρής αναερόβιας χώνευσης σε βιομηχανική κλίμακα.

ΛΕΞΕΙΣ-ΚΛΕΙΔΙΑ

Αστικά Στερεά Απόβλητα, Ξηρή Αναερόβια Χώνευση, Αντιδραστήρες Batch,
Επίδραση Ανακυκλοφορίας Στραγγισμάτων, Συχνότητα Ανακυκλοφορίας, Βιοαέριο

ABSTRACT

Municipal Solid Waste (MSW) management represents one of the most significant environmental challenges facing modern societies, particularly in view of the continuously increasing generation of waste and the need to reduce its final disposal. The organic fraction constitutes a significant proportion of generated MSW and, due to its high content of biodegradable organic matter, requires appropriate management while also offering considerable potential for resource and energy recovery. In the transition from waste disposal towards waste recovery, anaerobic digestion represents one of the main biological treatment methods for the organic fraction of MSW. Its application is not limited to the stabilization of organic material, but also enables biogas production and energy recovery, thus contributing to a more integrated approach to organic waste management.

Among the different anaerobic digestion systems, dry anaerobic digestion is of particular interest for the treatment of organic waste with a high solids content. In batch systems, the recirculation of the produced leachate plays an important role in the progression of the process, as it contributes to maintaining the required moisture content and facilitates the transfer of dissolved organic compounds and microorganisms throughout the waste mass. The effectiveness of leachate recirculation depends, among other factors, on the way it is applied, with recirculation frequency being one of the parameters that may affect process performance.

Within this context, the present Master's thesis investigates the effect of leachate recirculation frequency on the performance of dry anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste at industrial scale. The experimental study was conducted at the Alexandroupolis Waste Treatment Plant (WTP), where dry anaerobic digestion is carried out in batch-operated cell-type reactors. Three cells were used for the experimental investigation, in which different leachate recirculation frequencies of 10, 35, and 50 times per day were applied, while the other main operating conditions were kept as comparable as possible.

Prior to the main experimental procedure, a separate anaerobic digestion cycle was carried out to produce digestate, which was subsequently used as inoculum in the three experimental cells. During the experiment, biogas production and composition were

monitored, while the organic fraction, digestate, and produced leachate were physicochemically characterized.

The results revealed differences among the three recirculation frequencies in terms of both overall production and the temporal evolution of the process. The highest cumulative biogas production was recorded in the high-frequency recirculation cell, reaching 6,416.08 m³, compared with 6,250.50 m³ and 6,156.50 m³ in the medium- and low-frequency cells, respectively. The methane content of the produced biogas gradually increased during the first days of the process and subsequently stabilized at approximately 50–55% in all three experimental cells. Similarly, the highest cumulative methane production was recorded in the high-frequency cell, reaching 3,482.56 m³, compared with 3,306.75 m³ and 3,225.92 m³ in the medium- and low-frequency cells, respectively. Furthermore, in the high-frequency cell, maximum daily production was reached as early as day 17, considerably earlier than in the medium- and low-frequency cells, where it was recorded on days 30 and 31, respectively. However, the medium-frequency cell exhibited the highest maximum daily production of both biogas and methane.

The results demonstrate that leachate recirculation frequency is a critical operating parameter in dry anaerobic digestion, affecting both the overall process performance and its temporal evolution. Under the conditions examined in this study, the highest recirculation frequency was associated with the greatest cumulative production of both biogas and methane, as well as the earliest attainment of maximum daily production. These findings highlight the importance of selecting an appropriate leachate recirculation strategy for the operation of industrial-scale dry anaerobic digestion systems.

KEYWORDS

Municipal Solid Waste, Dry Anaerobic Digestion, Batch Reactors, Effect of Leachate Recirculation, Recirculation Frequency, Biogas

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
ΛΕΞΕΙΣ-ΚΛΕΙΔΙΑ	6
ABSTRACT.....	7
KEYWORDS.....	8
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ	12
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	13
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	13
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	15
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΟΜΕΥΣΕΩΝ.....	16
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	18
1 ΣΤΕΡΕΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ	20
1.1 <i>Γενικές πληροφορίες.....</i>	<i>20</i>
1.2 <i>Αστικά Στερεά Απόβλητα</i>	<i>23</i>
1.2.1 <i>Ορισμός και σύσταση.....</i>	<i>23</i>
1.2.2 <i>Μεταβλητότητα παραγωγής.....</i>	<i>25</i>
1.3 <i>Θεσμικό πλαίσιο διαχείρισης αποβλήτων στην ΕΕ και στην Ελλάδα.....</i>	<i>27</i>
1.3.1 <i>Γενικά.....</i>	<i>27</i>
1.3.2 <i>Ευρωπαϊκή Ένωση.....</i>	<i>28</i>
1.3.3 <i>Ελλάδα</i>	<i>30</i>
1.4 <i>Περιγραφή και καινοτομία ΜΔΕ</i>	<i>32</i>
2 Αναερόβια χώνευση οργανικού κλάσματος σύμμεικτων ΑΣΑ	33
2.1 <i>Γενικά.....</i>	<i>33</i>
2.2 <i>Στάδια Αναερόβιας Χώνευσης</i>	<i>34</i>
2.2.1 <i>Υδρόλυση</i>	<i>35</i>

2.2.2	Οξεογένεση	36
2.2.3	Οξικογένεση	37
2.2.4	Μεθανιογένεση	38
2.3	<i>Τεχνολογίες Αναερόβιας Χώνευσης</i>	40
2.3.1	Ξηρή και υγρή αναερόβια χώνευση	40
2.3.2	Θερμόφιλη και μεσόφιλη αναερόβια χώνευση	42
2.3.3	Αναερόβια χώνευση ενός σταδίου και δύο σταδίων	43
2.4	<i>Παραγόμενα προϊόντα</i>	44
2.4.1	Υπόλειμμα χώνευσης (χώνευμα τύπου Α)	44
2.4.2	Βιοαέριο	46
3	Ξηρή Αναερόβια Χώνευση	50
3.1	<i>Η ξηρή αναερόβια χώνευση ως κατάλληλη επιλογή για την επεξεργασία στερεών αποβλήτων</i>	50
3.2	<i>Τύποι Αντιδραστήρων</i>	51
3.2.1	Συνεχούς λειτουργίας	51
3.2.2	Ασυνεχούς λειτουργίας (batch)	52
3.3	<i>Εφαρμογές ξηρής αναερόβιας χώνευσης σε οργανικό κλάσμα ΑΣΑ στην Ευρώπη</i> ...	53
3.4	<i>Εφαρμογές στην Ελλάδα</i>	55
3.5	<i>Παράμετροι που επηρεάζουν την απόδοση της ξηρής αναερόβιας χώνευσης</i>	56
3.5.1	Χαρακτηριστικά πρώτης ύλης	56
3.5.2	Λειτουργικές παράμετροι	59
3.5.3	Έλεγχος της διεργασίας	59
4	Μελέτη Περίπτωσης: Μονάδα Επεξεργασίας Απορριμμάτων Αλεξανδρούπολης ...	72
4.1	<i>Υφιστάμενη κατάσταση</i>	72
4.1.1	Περιοχή μελέτης και γενικά στοιχεία έργου	72
4.1.2	Τεχνική περιγραφή επιμέρους μονάδων	77

5	Πειραματικό Μέρος.....	87
5.1	Σκοπός πειραματικής διαδικασίας.....	87
5.2	Προετοιμασία υλικών πειραματικής διαδικασίας	87
5.2.1	Εισερχόμενα ΑΣΑ	87
5.2.2	Προετοιμασία οργανικού κλάσματος 20-70 mm	91
5.2.3	Χαρακτηρισμός του οργανικού κλάσματος 20-70 mm.....	98
5.2.4	Πειραματικός σχεδιασμός	101
5.3	Εργαστηριακές αναλύσεις	109
5.3.1	Φυσικοχημικός χαρακτηρισμός οργανικού κλάσματος και χωνεμένου υλικού	109
5.3.2	Φυσικοχημικός χαρακτηρισμός στραγγισμάτων	113
6	Αποτελέσματα και Συζήτηση.....	117
6.1	Φυσικοχημικός χαρακτηρισμός.....	117
6.1.1	Φυσικοχημικός χαρακτηρισμός οργανικού κλάσματος πριν και μετά την αναερόβια χώνευση.....	117
6.1.2	Στραγγίσματα	117
6.2	Επίδραση της συχνότητας ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων	118
6.2.1	Παραγωγή βιοαερίου.....	118
6.2.2	Παραγωγή μεθανίου.....	121
6.2.3	Συγκριτική αξιολόγηση των διαφορετικών συχνοτήτων ανακυκλοφορίας	124
7	Συμπεράσματα και Προτάσεις.....	127
7.1	Συμπεράσματα	127
7.2	Προτάσεις για βελτιστοποίηση της διεργασίας στη ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης	127
7.3	Κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα	128
8	Βιβλιογραφία	129
8.1	Ξένη Βιβλιογραφία	129
8.2	Ελληνική Βιβλιογραφία	137

Παράρτημα	140
------------------------	------------

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

Γράφημα 1.1.1: Παραγωγή αποβλήτων από οικονομικές δραστηριότητες και νοικοκυριά στην ΕΕ, 2022. Μορφοποίηση/ Τροποποίηση από: (Eurostat, 2024b).	22
Γράφημα 1.1.2: Παραγωγή στερεών αποβλήτων στην Ελλάδα, 2018. Μορφοποίηση/ Τροποποίηση από: (Πράξη 39 της 31.8, 2020).....	23
Γράφημα 1.2.1: Τυπική σύσταση ΑΣΑ σε παγκόσμιο επίπεδο. Μορφοποίηση/ Τροποποίηση από: (Kaza et al., 2018).....	24
Γράφημα 1.2.2: Ποιοτική σύσταση ΑΣΑ στην ΕΕ το 2023. Μορφοποίηση/ Τροποποίηση από: (Eurostat, 2026b).	24
Γράφημα 1.2.3: Ποιοτική σύσταση ΑΣΑ στην Ελλάδα το 2019. Μορφοποίηση/ Τροποποίηση από: (Πράξη 39 της 31.8, 2020).	25
Γράφημα 1.2.4: Παραγωγή ΑΣΑ στις Ευρωπαϊκές χώρες τα έτη 2014 και 2024. (1) Δεδομένα του 2023. Μορφοποίηση/ Τροποποίηση από: (Eurostat, 2026a).....	27
Γράφημα 2.4.1: Συνδυασμένη παραγωγή βιοαερίου και βιομεθανίου στην Ευρώπη. Τροποποιήθηκε από: (ΕΒΑ, 2025).	48

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 5.2.1: Οργανικό κλάσμα 20-70 mm μετά το τελικό στάδιο μαγνητικού διαχωρισμού και πριν από την πλήρωση των κελιών αναερόβιας χώνευσης.....	97
Εικόνα 5.2.2: Παραλαβή από ελαστικοφόρο φορτωτή κλάσματος 20-70 mm προς πλήρωση κελιών αναερόβιας χώνευσης.	98
Εικόνα 5.2.3: Κελί 7 της μονάδας αναερόβιας χώνευσης που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία.	105
Εικόνα 5.2.4: Κελιά 1, 2 και 3 της μονάδας αναερόβιας χώνευσης που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία.....	105
Εικόνα 5.2.5: Εσωτερικό κελιού ξηρής αναερόβιας χώνευσης.	106
Εικόνα 5.2.6: Πλήρωση κελιού αναερόβιας χώνευσης με τη χρήση ελαστικοφόρου φορτωτή.	106
Εικόνα 5.2.7: Πλήρωση κελιού αναερόβιας χώνευσης.....	107
Εικόνα 5.2.8: Πλήρωση κελιού αναερόβιας χώνευσης.....	107
Εικόνα 5.2.9: Φορτωτής κατά τη διαδικασία πλήρωσης κελιού αναερόβιας χώνευσης.	108
Εικόνα 5.3.1: Αναλυτικός ζυγός ακριβείας.	110
Εικόνα 5.3.2: Φούρνος ξήρανσης.	110
Εικόνα 5.3.3: Κλίβανος υψηλής θερμοκρασίας (550 °C).....	111
Εικόνα 5.3.4: Συσκευή απόσταξης.	112
Εικόνα 5.3.5: Ψηφιακό όργανο μέτρησης pH και EC.	113

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.3.1: Τυπικές τιμές σχεδιασμού αντιδραστήρων αναερόβιας χώνευσης βιοαποβλήτων. Τροποποίηση από: (Christensen, 2010).....	40
Πίνακας 2.4.1: Τυπικά χαρακτηριστικά χωνεύματος προερχόμενο από την αναερόβια χώνευση οργανικού κλάσματος ΑΣΑ. Τροποποιήθηκε από: (Logan & Visvanathan, 2019).	44

Πίνακας 2.4.2: Τυπική σύσταση βιοαερίου. Τροποποιήθηκε από: (Κομίλης, 2023).	46
Πίνακας 3.5.1: Επίδραση διαφορετικών στρατηγικών ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων στην απόδοση μεθανίου από ξηρή αναερόβια χώνευση.....	71
Πίνακας 4.1.1: Ανάλυση ποιοτικής σύστασης εισερχόμενων ΑΣΑ στη ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης.	74
Πίνακας 4.1.2: Επιμέρους ρεύματα εισερχόμενων ΑΣΑ στη ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης και ποσοστά υγρασίας αυτών.....	75
Πίνακας 5.2.1: Εισερχόμενες ποσότητες ΑΣΑ στη ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης τους μήνες Φεβρουάριο και Μάρτιο του 2026.....	88
Πίνακας 5.2.2: Εισερχόμενα σύμμεικτα ΑΣΑ στη ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης ανά παραγωγό τους μήνες Φεβρουάριο και Μάρτιο του 2026.	89
Πίνακας 5.2.3: Μέση ποιοτική σύσταση εισερχομένων ΑΣΑ Φεβρουαρίου και Μαρτίου 2026 στη ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης.....	90
Πίνακας 5.2.4: Ημερήσιες ποσότητες εισερχόμενων ΑΣΑ, ακατάλληλων προς επεξεργασία, εισερχόμενων στη γραμμή επεξεργασίας και δυναμικότητα της Μονάδας Μηχανικής Διαλογής στη ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης τον Φεβρουάριο του 2026.	92
Πίνακας 5.2.5: Ημερήσιες ποσότητες εισερχόμενων ΑΣΑ, ακατάλληλων προς επεξεργασία, εισερχόμενων στη γραμμή επεξεργασίας και δυναμικότητα της Μονάδας Μηχανικής Διαλογής στη ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης τον Μάρτιο του 2026.	94
Πίνακας 5.2.6: Ποιοτική σύσταση του οργανικού κλάσματος 20–70 mm κατά τους μήνες Φεβρουάριο και Μάρτιο 2026 και μέση ποιοτική σύσταση δειγματοληψιών Φεβρουαρίου- Μαρτίου.	99
Πίνακας 5.2.7: Μέση σύσταση οργανικού κλάσματος Μαρτίου 2026 των εισερχόμενων σύμμεικτων ΑΣΑ στη ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης.....	100
Πίνακας 5.2.8: Εισερχόμενες ποσότητες οργανικού κλάσματος 20-70 mm και εμβολίου στα κελιά αναερόβιας χώνευσης.....	101
Πίνακας 5.2.9: Συνθήκες ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων στα πειραματικά κελιά αναερόβιας χώνευσης.....	102

Πίνακας 5.2.10: Ημερήσιος όγκος ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων και ημερήσιος όγκος παροχής στραγγισμάτων ανά τόνο υλικού στα πειραματικά κελιά..	102
Πίνακας 6.1.1: Φυσικοχημικός χαρακτηρισμός οργανικού κλάσματος πριν και μετά την αναερόβια χώνευση.....	117
Πίνακας 6.1.2: Φυσικοχημικός χαρακτηρισμός στραγγισμάτων από τη δεξαμενή συλλογής.	118

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.3.1: Εξέλιξη της Διαχείρισης Αποβλήτων στην ΕΕ. Μορφοποίηση/ Τροποποίηση από: (C. Zhang et al., 2022).	30
Σχήμα 2.2.1: Στάδια αποδόμησης στη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης. Τροποποίηση από: (Katheem et al., 2016).....	39
Σχήμα 2.4.1: Απλοποιημένο διάγραμμα αναερόβιας χώνευσης οργανικού κλάσματος ΑΣΑ. Τροποποιήθηκε από (Logan & Visvanathan, 2019).	48

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΟΜΕΥΣΕΩΝ

ΑΧ	Αναερόβια Χώνευση
ΑΣΑ	Αστικά Στερεά Απόβλητα
ΔΕ	Διπλωματική Εργασία
ΕΣΔΑ	Εθνικό Σχέδιο Διαχείρισης Απορριμμάτων
ΜΔΕ	Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία
ΕΕ	Ευρωπαϊκή Ένωση
ΧΥΤΑ	Χώρος Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων
ΜΕΑ	Μονάδα Επεξεργασίας Απορριμμάτων
OFMSW	Organic Fraction of Municipal Solid Waste = οργανικό κλάσμα ΑΣΑ
SSAD	Solid-State Anaerobic Digestion = μονάδα ξηρής αναερόβιας χώνευσης
RDF	Refuse Derived Fuel= απορριμματογενές/δευτερογενές καύσιμο
ΑΗΗΕ	Απόβλητα Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού
HSADB	Hybrid Solid Anaerobic Digestion Batch = υβριδική ξηρή αναερόβια χώνευση παρτίδας
LBR	Leach Bed Reactor = αντιδραστήρες κλίνης έκπλυσης
MBR	Membrane Bio-Reactor = βιοαντιδραστήρας με μεμβράνες
RO	Reverse Osmosis = αντίστροφη όσμωση
ΠΕ	Περιφερειακή Ενότητα
ΚΔΑΥ	Κέντρο Διαλογής Ανακυκλώσιμων Υλικών
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition = σύστημα εποπτικού ελέγχου και συλλογής δεδομένων
TS	Total Solids = ολικά στερεά
VS	Volatile Solids = Πτητικά
TKN	Total Kjeldahl Nitrogen = Ολικό άζωτο κατά Kjeldahl
N-NH ₃ ή NH ₄ -N	Αμμωνιακό Άζωτο

C/N	Carbon/Nitrogen = Άνθρακας/Αζωτο
COD	Chemical Oxygen Demand = χημικά απαιτούμενο οξυγόνο
NVS	Non-Volatile Solids = μη πτητικά στερεά
EC	Electrical Conductivity = ηλεκτρική αγωγιμότητα

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η συνεχής αύξηση της παραγωγής Αστικών Στερεών Αποβλήτων αποτελεί μία από τις σημαντικότερες περιβαλλοντικές προκλήσεις που καλούνται να αντιμετωπίσουν οι σύγχρονες κοινωνίες, καθώς συνδέεται με την πληθυσμιακή αύξηση, την αστικοποίηση και την οικονομική ανάπτυξη, ενώ οι παραγόμενες ποσότητες αναμένεται να συνεχίσουν να αυξάνονται τις επόμενες δεκαετίες (Kaza et al., 2018). Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, η διαχείριση των αποβλήτων βασίζεται στην ιεράρχηση των επιλογών διαχείρισης, με προτεραιότητα στην πρόληψη, ακολουθούμενη από την προετοιμασία για επαναχρησιμοποίηση, την ανακύκλωση και τις λοιπές μορφές ανάκτησης, ενώ η διάθεση αποτελεί την τελευταία επιλογή (Οδηγία 98/EK, 2008). Η κατεύθυνση αυτή ενισχύθηκε περαιτέρω με την αναθεώρηση της Οδηγίας-Πλαίσιο για τα απόβλητα, στο πλαίσιο της μετάβασης προς την κυκλική οικονομία και της ενίσχυσης της επαναχρησιμοποίησης και της ανακύκλωσης των αποβλήτων (Οδηγία 851/EE, 2018).

Ιδιαίτερη σημασία στο πλαίσιο της αξιοποίησης των ΑΣΑ παρουσιάζει το οργανικό τους κλάσμα, το οποίο αποτελεί συνήθως σημαντικό μέρος της συνολικής τους σύστασης και η αξιοποίησή του μπορεί να συμβάλει στην εκτροπή αποβλήτων από την υγειονομική ταφή και στην επίτευξη των στόχων της κυκλικής οικονομίας (Fernández-González et al., 2020). Μεταξύ των διαθέσιμων μεθόδων βιολογικής επεξεργασίας, η αναερόβια χώνευση αποτελεί μία από τις βασικές επιλογές για την επεξεργασία του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ, καθώς συνδυάζει τη σταθεροποίηση της οργανικής ύλης με την ανάκτηση ενέργειας μέσω της παραγωγής βιοαερίου (Campuzano & González-Martínez, 2016).

Η ξηρή αναερόβια χώνευση παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την επεξεργασία υποστρωμάτων υψηλής περιεκτικότητας σε στερεά, όπως το οργανικό κλάσμα των ΑΣΑ, ενώ μεταξύ των πλεονεκτημάτων της συγκαταλέγονται οι μικρότερες απαιτήσεις σε όγκο αντιδραστήρα και η μειωμένη κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση και ανάδευση σε σύγκριση με συστήματα υγρής αναερόβιας χώνευσης (Li et al., 2011a). Ωστόσο, η αύξηση της περιεκτικότητας σε στερεά μπορεί να δημιουργήσει περιορισμούς στη μεταφορά μάζας και να επηρεάσει αρνητικά την παραγωγή μεθανίου (Abbassi-Guendouz et al., 2012). Στα συστήματα ξηρής αναερόβιας χώνευσης ασυνεχούς λειτουργίας, η ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων αποτελεί σημαντική λειτουργική παράμετρο της διεργασίας. Η επίδρασή της εξαρτάται από επιμέρους παραμέτρους, όπως ο λόγος στραγγισμάτων προς υπόστρωμα (L:S), ο όγκος των

ανακυκλοφορούμενων στραγγισμάτων και το χρονικό διάστημα μεταξύ διαδοχικών ανακυκλοφοριών, ενώ οι μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις δεν έχουν ακόμη διερευνηθεί πλήρως (Degueurce et al., 2016). Παράλληλα, τα διαθέσιμα δεδομένα σχετικά με τη λειτουργία συστημάτων ξηρής αναερόβιας χώνευσης σε πλήρη κλίμακα παραμένουν περιορισμένα. Οι (Rocamora, Wagland, Villa, et al., 2022) αναφέρουν ότι, στις μονάδες πλήρους κλίμακας που μελέτησαν, η ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων δεν ήταν βελτιστοποιημένη, αλλά εφαρμοζόταν κατά την κρίση των χειριστών.

Με βάση τα παραπάνω, η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στη διερεύνηση της συχνότητας ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων κατά την ξηρή αναερόβια χώνευση του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Η έρευνα πραγματοποιήθηκε στη ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης και βασίστηκε στη σύγκριση τριών κελιών αναερόβιας χώνευσης, στα οποία εφαρμόστηκαν διαφορετικές συχνότητες ανακυκλοφορίας. Μέσω της παρακολούθησης της παραγωγής βιοαερίου αξιολογήθηκαν οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των τριών συχνοτήτων ανακυκλοφορίας ως προς την απόδοση και την εξέλιξη της αναερόβιας χώνευσης.

1 ΣΤΕΡΕΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ

1.1 Γενικές πληροφορίες

Ως «απόβλητο» χαρακτηρίζεται κάθε ουσία ή αντικείμενο το οποίο απορρίπτει ή προτίθεται ή υποχρεούται να απορρίψει ο κάτοχός του (Οδηγία 98/EK, 2008). Παρά τον δοθέντα ορισμό, είναι σημαντικό να αναφερθεί πως σύμφωνα με έκθεση του Περιβαλλοντικού Προγράμματος των Ηνωμένων Εθνών (United Nations Environment Programme-UNEP) και της Διεθνούς Ένωσης Στερεών Αποβλήτων (International Solid Waste Association-ISWA), είναι δύσκολο να δοθεί ένας καθολικά αποδεκτός ορισμός του όρου «απόβλητο» καθώς η έννοιά του διαφοροποιείται ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες, τα κοινωνικά πλαίσια και τις πρακτικές διαχείρισης. Ο όρος απαντάται στη βιβλιογραφία με διάφορες ονομασίες όπως απορριπτόμενα υλικά, απόρριμμα, σκουπίδια ή σκάρτα και το απόβλητο είναι ουσιαστικά το ακούσιο παραπροϊόν της κατανάλωσης και κατά συνέπεια της παραγωγής (Lenkiewicz, 2024).

Ως «στερεό απόβλητο» θα αναμενόταν να ορίζεται ένα απόβλητο σε στερεή κατάσταση. Ωστόσο, ο όρος περιλαμβάνει στερεά απόβλητα ή υγρά με τη μορφή ιλύος από την επεξεργασία λυμάτων ή υγρά χημικά απόβλητα. Σε αντίθεση με τα αέρια και τα υγρά, δεν διαθέτουν μέσο μεταφοράς που να απαιτεί καθαρισμό. Έτσι, ενώ η απόκτηση καθαρού αέρα και νερού είναι το κύριο μέλημα της επεξεργασίας καυσαερίων και λυμάτων, ο σκοπός της διαχείρισης στερεών αποβλήτων δεν είναι να καθαριστεί το μέσον μεταφοράς τους (κάδοι) αλλά τα απόβλητα που βρίσκονται μέσα σε αυτούς (Christensen, 2010).

Τα απόβλητα παράγονται σε όλα τα στάδια παραγωγής, από την εξόρυξη και επεξεργασία των πρώτων υλών. Αφού οι πρώτες ύλες συλλεχθούν, εξορυχθούν, ή αποκτηθούν με οποιοδήποτε τρόπο, στη συνέχεια κατά τη διάρκεια των διαδοχικών διεργασιών παραγωγής αγαθών που προορίζονται για κατανάλωση, παράγεται η μεγαλύτερη ποσότητα αποβλήτων. Επιπλέον, η βελτίωση της ποιότητας ζωής και του βιοτικού επιπέδου συνοδεύεται από αυξημένες καταναλωτικές ανάγκες, οι οποίες οδηγούν σε μεγαλύτερη κατανάλωση αγαθών και, κατ' επέκταση, σε αυξημένη παραγωγή αποβλήτων (Tchobanoglous & Kreith, 2002).

Η κατηγοριοποίηση των αποβλήτων γίνεται με διάφορους τρόπους: με βάση την προέλευσή τους (π.χ. αστικά στερεά απόβλητα), τα χαρακτηριστικά τους (π.χ. επικίνδυνα απόβλητα) και βάσει του τύπου τους (π.χ. απόβλητα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού) (World Health Organization, 2024). Το σύνολο των στερεών αποβλήτων και η κατηγοριοποίησή τους περιλαμβάνεται στον Ευρωπαϊκό Κατάλογο Αποβλήτων (ΕΚΑ) όπου τα στερεά απόβλητα

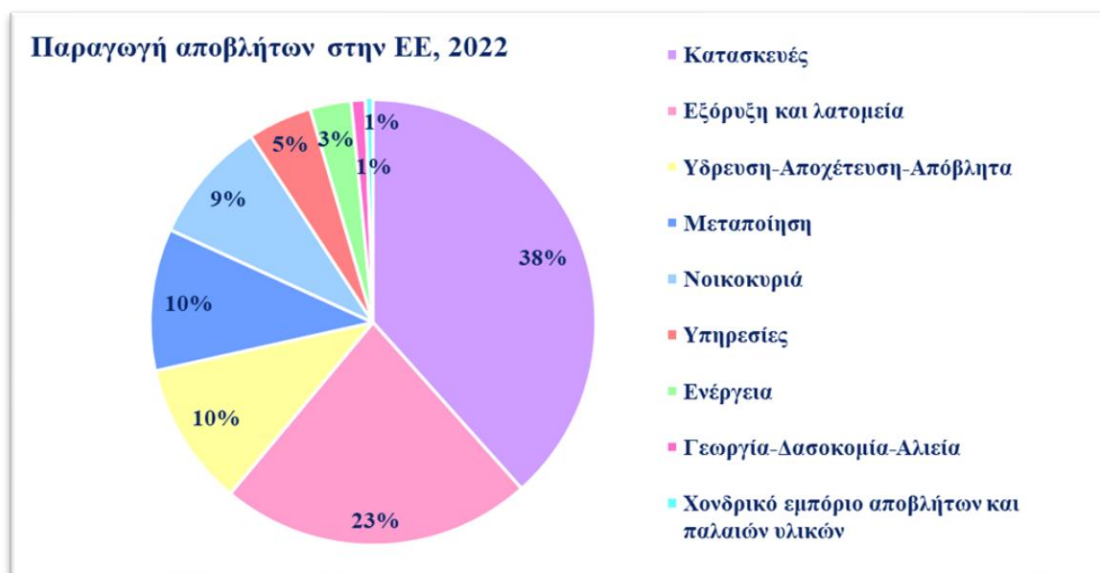
κατατάσσονται σε 20 κατηγορίες, με κάθε κατηγορία να διακρίνεται σε υποκατηγορίες και να φέρει συγκεκριμένο κωδικό (Κομίλης, 2023).

Τα βασικά ζητήματα που συνδέονται έντονα με τα στερεά απόβλητα και «επιβάλλουν» την ανάγκη διαχείρισης των στερεών αποβλήτων είναι τα ακόλουθα:

- Ο όγκος/χώρος που καταλαμβάνουν. Η απομάκρυνσή τους από δημόσιους και ιδιωτικούς χώρους εξακολουθεί έως και σήμερα να αποτελεί κύριο μέλημα όλων των συστημάτων διαχείρισης αποβλήτων παγκοσμίως.
- Η όχληση που μπορεί να προκαλέσει η συσσώρευσή τους με την πάροδο του χρόνου σε περίπτωση καθυστέρησης της συλλογής τους και συγκεκριμένα η εμφάνιση οσμών, εντόμων, αισθητικών προβλημάτων στους γείτονες και την κοινότητα λόγω των διασκορπισμένων απορριμμάτων κ.λπ.
- Η ρύπανση του περιβάλλοντος από τη διάθεση των αποβλήτων λόγω μεταφοράς ουσιών από τα απόβλητα στο έδαφος, το νερό και τον αέρα. Ορισμένα παραδείγματα είναι η ρύπανση των υπογείων υδάτων σε χώρους υγειονομικής ταφής, η συσσώρευση μετάλλων στο έδαφος και τις καλλιέργειες έπειτα από τη χρήση κόμποστ αλλά και η επιβάρυνση του ατμοσφαιρικού αέρα από διεργασίες ανεξέλεγκτης καύσης.
- Τα ζητήματα δημόσιας υγείας που μπορεί να προκληθούν εξαιτίας συσσωρευμένων αποβλήτων, εύκολα προσβάσιμων από ζώα, έντομα, ανθρώπους και κυρίως παιδιά. Υπάρχει ο κίνδυνος μετάδοσης παθογόνων μικροοργανισμών που περιέχονται στα απόβλητα είτε μέσω άμεσης επαφής είτε έμμεσης όπως με τον αέρα, το νερό, τα έντομα και τα μικρά τρωκτικά. Μπορεί επίσης να ενισχυθεί η επιβίωση και εξάπλωση μολυσμένων φορέων που τρέφονται και φωλιάζουν στα απορρίμματα όπως οι αρουραίοι και οι γλάροι. Διάφορες χημικές ουσίες στα απόβλητα μπορούν επίσης μέσω άμεσης ή έμμεσης επαφής με τους ανθρώπους να προκαλέσουν ζητήματα υγείας (Christensen, 2010).
- Η οικονομία διάφορων αστικών περιοχών που πρέπει να διαχειριστούν μεγάλες ποσότητες αποβλήτων και επιβαρύνονται με σημαντικά υψηλά κόστη διαχείρισης καθώς δεν υπάρχουν εύκολες λύσεις διάθεσης σε μικρή απόσταση.
- Τα ζητήματα πόρων που τίθενται λόγω της ολοένα και αυξανόμενης μείωσης των ορυκτών πόρων οδηγούν στην εύρεση εναλλακτικών τρόπων ανάκτησής τους. Τα απόβλητα περιέχουν πόρους που μπορούν και πρέπει να αξιοποιηθούν ώστε να μειωθεί η κατανάλωση των πρωτογενών πόρων. Σε πολλές περιοχές αυτό γίνεται εδώ και πολλά

χρόνια από ρακοσυλλέκτες και μικρής κλίμακας ανακυκλωτές για οικονομικούς κυρίως λόγους. Καλό θα ήταν ωστόσο να γίνεται ανάκτηση αυτών των πόρων και σε άλλα πλαίσια όπως η αποφυγή των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την παραγωγή πρωτογενών υλικών και η αποφυγή ταυτόχρονα της διάθεσης αυτών των αποβλήτων (Christensen, 2010).

Το 2022 στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) παρήχθησαν 2,23 δισεκατομμύρια τόνοι στερεών αποβλήτων ήτοι 5 tn/κάτοικο (Eurostat, 2024a) ενώ σύμφωνα με την Έγκριση του Εθνικού Σχεδίου Διαχείρισης Αποβλήτων (Ε.Σ.Δ.Α.), η παραγωγή αποβλήτων στην Ελλάδα, το 2018, έφτασε τους 30.943.819 tn (Πράξη 39 της 31.8, 2020). Ακολουθώντας, στο *Γράφημα 1.1.1* και στο *Γράφημα 1.1.2* παρουσιάζεται το μερίδιο παραγόμενων αποβλήτων που αντιστοιχεί σε κάθε τομέα όσον αφορά στην παραγωγή αποβλήτων στην ΕΕ το έτος 2022 και αντίστοιχα στην Ελλάδα το 2018. Όπως φαίνεται, στην ΕΕ το μεγαλύτερο μέρος αποβλήτων καταλαμβάνουν οι κατασκευές (38%), τα ορυχεία και λατομεία (23%) καθώς και οι υπηρεσίες αποβλήτων και ύδρευσης (10%), η μεταποίηση (10%) και τα νοικοκυριά (9%), ενώ στην Ελλάδα το μεγαλύτερο μέρος καταλαμβάνεται από τις γεωργοκτηνοτροφικές δραστηριότητες (41%), τις βιομηχανικές (24%) και τα αστικά στερεά απόβλητα (18%).



Γράφημα 1.1.1: Παραγωγή αποβλήτων από οικονομικές δραστηριότητες και νοικοκυριά στην ΕΕ, 2022. Μορφοποίηση/ Τροποποίηση από: (Eurostat, 2024b).



Γράφημα 1.1.2: Παραγωγή στερεών αποβλήτων στην Ελλάδα, 2018. Μορφοποίηση/ Τροποποίηση από: (Πράξη 39 της 31.8, 2020).

1.2 Αστικά Στερεά Απόβλητα

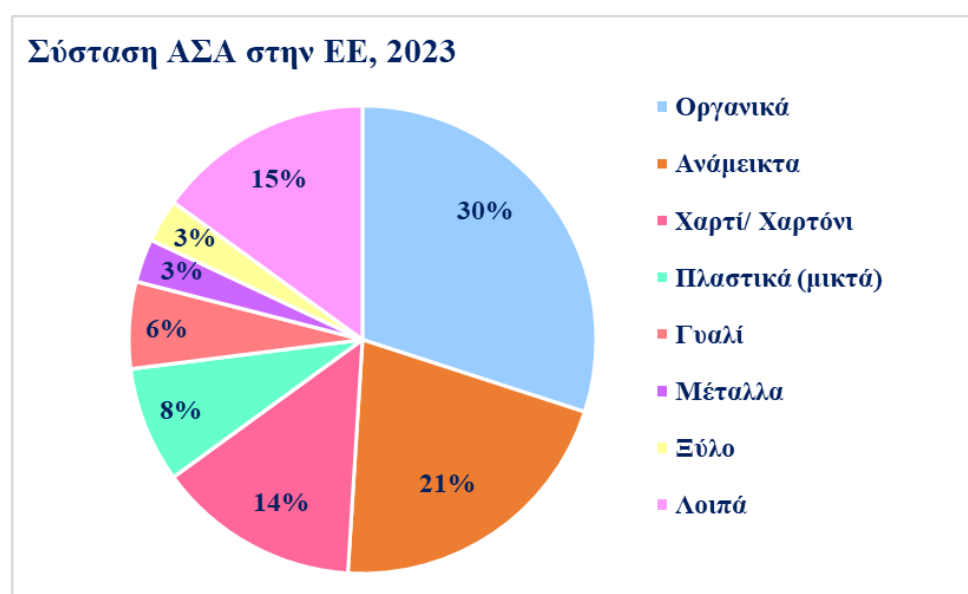
1.2.1 Ορισμός και σύσταση

Οι κατηγορίες των αποβλήτων που περιλαμβάνονται στον όρο «Αστικά Στερεά Απόβλητα» (ΑΣΑ) μπορεί να ποικίλουν και να περικλείουν ένα μεγάλο φάσμα κατηγοριών, ξεκινώντας από αυτά που προέρχονται από τα ιδιωτικά νοικοκυριά έως εκείνα τα απόβλητα που διαχειρίζονται οι τοπικοί φορείς ή οι αρχές από όπου και αν αυτά προέρχονται. Αυτό σημαίνει πως περιλαμβάνουν ένα ποσοστό εμπορικών και μη επικίνδυνων βιομηχανικών αποβλήτων, απόβλητα κατεδαφίσεων ακόμα και ιλύ προερχόμενη από την επεξεργασία λυμάτων. Από χώρα σε χώρα υπάρχουν διακυμάνσεις σχετικά με το ποιες κατηγορίες αποβλήτων μπορεί να περιλαμβάνονται στα ΑΣΑ (Christensen, 2010). Σε ευρωπαϊκά πλαίσια ισχύει ότι στα ΑΣΑ περιλαμβάνονται τα σύμμεικτα/ανάμεικτα και χωριστά συλλεγόμενα απόβλητα από νοικοκυριά που περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων, βιολογικά απόβλητα, χαρτί/ χαρτόνι, μέταλλα, πλαστικά, γυαλί, ξύλο, απόβλητα συσκευασίας, απόβλητα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (ΑΗΗΕ), προϊόντα κλωστοϋφαντουργίας, ηλεκτρικές στήλες και συσσωρευτές και ογκώδη όπως έπιπλα και στρώματα. Στα ΑΣΑ περιλαμβάνονται επίσης ανάμεικτα/ σύμμεικτα και χωριστά συλλεγόμενα απόβλητα από άλλες πηγές, όταν είναι παρόμοια ως προς τη φύση και τη σύνθεσή τους με τα απόβλητα των νοικοκυριών. Ωστόσο, στα ΑΣΑ δεν

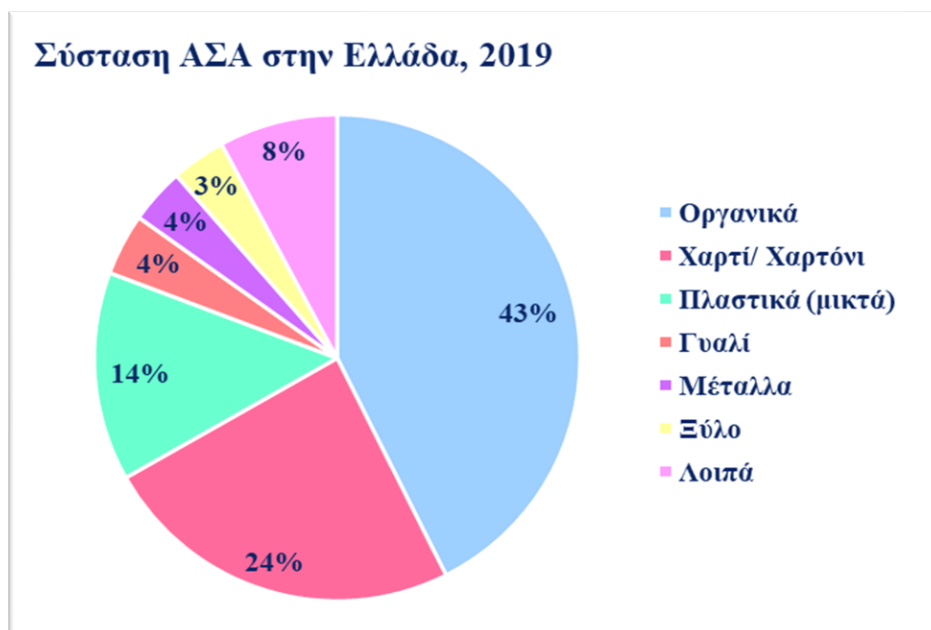
περιλαμβάνονται τα απόβλητα γεωργίας, παραγωγής, αλιείας, δασοκομείας, οχημάτων στο τέλος του κύκλου ζωής τους, απόβλητα σιπητικών δεξαμενών, δικτύων αποχέτευσης, επεξεργασίας λυμάτων, συμπεριλαμβανομένης της ιλύος και απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων (Οδηγία 851/ΕΕ, 2018). Ακολουθώντας, στο *Γράφημα 1.2.1*, *Γράφημα 1.2.2* και *Γράφημα 1.2.3* παρουσιάζεται μία τυπική ποιοτική σύσταση ΑΣΑ σε παγκόσμιο επίπεδο, καθώς και η σύσταση των ΑΣΑ στην ΕΕ και την Ελλάδα το 2023 και το 2019 αντίστοιχα, με την παραγωγή ΑΣΑ στην Ελλάδα να φτάνει τους 5.627.158 τόνους.



Γράφημα 1.2.1: Τυπική σύσταση ΑΣΑ σε παγκόσμιο επίπεδο. Μορφοποίηση/ Τροποποίηση από: (Kaza et al., 2018).



Γράφημα 1.2.2: Ποιοτική σύσταση ΑΣΑ στην ΕΕ το 2023. Μορφοποίηση/ Τροποποίηση από: (Eurostat, 2026b).



Γράφημα 1.2.3: Ποιοτική σύσταση ΑΣΑ στην Ελλάδα το 2019. Μορφοποίηση/ Τροποποίηση από: (Πράξη 39 της 31.8, 2020).

Και στα τρία γραφήματα, παρατηρείται πως τα οργανικά απόβλητα καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής παραγωγής ΑΣΑ σε παγκόσμιο, ευρωπαϊκό και εθνικό επίπεδο. Συγκεκριμένα στην ΕΕ το 2023, τρεις χώρες ξεπέρασαν το 40%, μέσα στις οποίες συγκαταλέγεται και η Ελλάδα με 42,6%, ενώ ακολουθεί η Κύπρος με 41,2% και ξεχωρίζει η Ρουμανία με 58,4% (Eurostat, 2026c).

Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως η σύσταση, δηλαδή η ποσοστιαία συμμετοχή των απορριμμάτων σε ένα μίγμα αστικών απορριμμάτων, αποτελεί σημαντική παράμετρο καθορισμού του τρόπου διαχείρισης τους (επεξεργασία, αξιοποίηση) (Κομίλης, 2023).

1.2.2 Μεταβλητότητα παραγωγής

Τόσο η παραγωγή όσο και η σύσταση των ΑΣΑ επηρεάζεται από πολλούς διαφορετικούς παράγοντες όπως η αστικοποίηση, η βιομηχανοποίηση, το μορφωτικό επίπεδο, ο πληθυσμός, οι ηλικιακές ομάδες, οι συνήθειες των πολιτών, το τοπικό κλίμα, η εποχικότητα των αποβλήτων, η οικονομική κατάσταση των νοικοκυριών, η χωροθέτηση του νοικοκυριού (αστική, αγροτική), ο πολιτισμός, το μηνιαίο εισόδημα και η οικονομική κατάσταση των πολιτών. Σε γενικά πλαίσια ισχύει πως όσο υψηλότερο το οικονομικό επίπεδο, που συνεπώς συνοδεύεται από μεγαλύτερο διαθέσιμο εισόδημα και κατανάλωση, τόσο υψηλότερη η

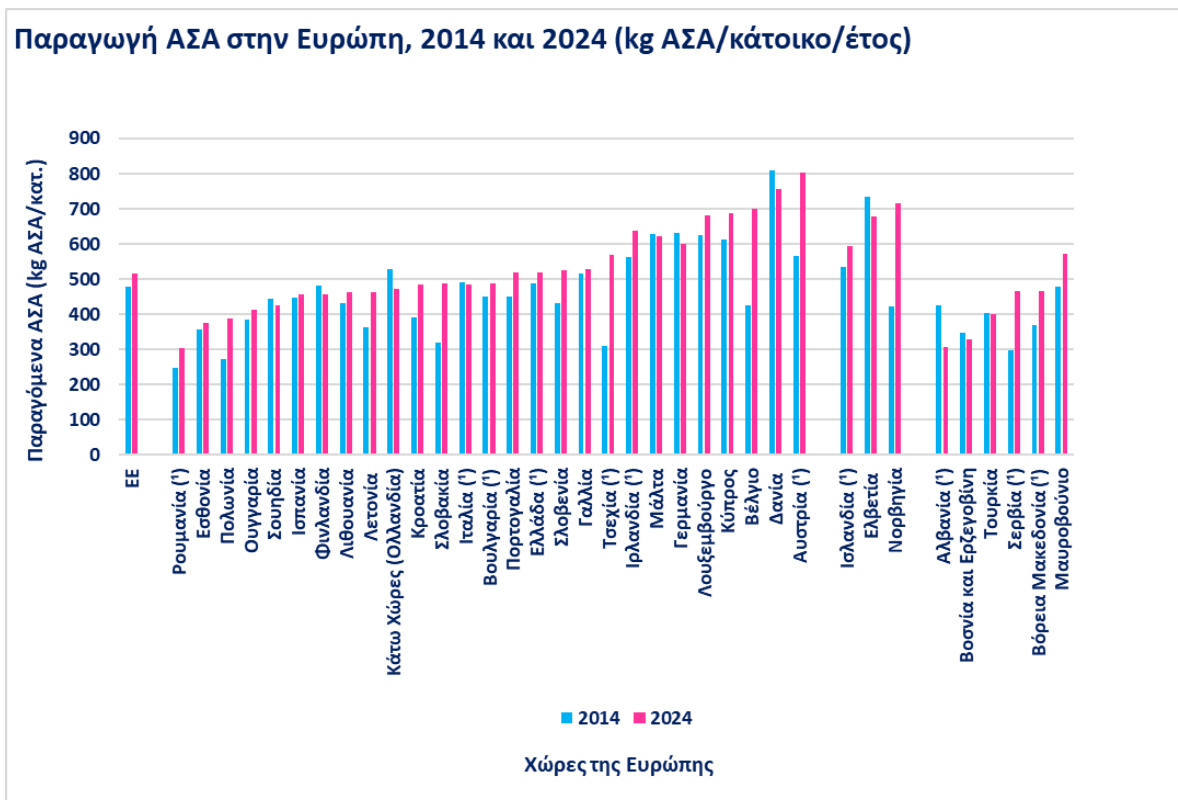
παραγωγή αποβλήτων (Awino & Aritz, 2024). Ακόμη, διαφορές στην παραγωγή αποβλήτων μπορεί να γίνουν αντιληπτές σε σχέση με τον δείκτη για το επίπεδο εισοδήματος, ο οποίος συνδέεται με την οικονομική ανάπτυξη και το ΑΕΠ της χώρας.

Οι χώρες κατατάσσονται από την Παγκόσμια Τράπεζα (World Bank) σε τέσσερις κατηγορίες: 1) χώρες χαμηλού εισοδήματος, 2) κατώτερου μεσαίου εισοδήματος, 3) ανώτερου μεσαίου εισοδήματος και 4) υψηλού εισοδήματος. Στην ΕΕ καμία χώρα δεν ανήκει στην πρώτη κατηγορία, στη δεύτερη κατηγορία ανήκει μόνο η Βουλγαρία, στην τρίτη ανήκουν η Λετονία, η Λιθουανία, η Ρουμανία και η Πολωνία, ενώ οι υπόλοιπες, συμπεριλαμβανομένης και της Ελλάδας, ανήκουν στην τέταρτη κατηγορία (Blagoeva et al., 2023). Στις χώρες υψηλού εισοδήματος, για τη διαχείριση των ΑΣΑ είναι ιδιαίτερα διαδεδομένοι οι Χώροι Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ) και οι μονάδες καύσης. Σε αυτές τις χώρες, σε σύγκριση με τις χώρες χαμηλότερου εισοδήματος, εμφανίζονται τα μεγαλύτερα ποσοστά ανάκτησης και επανένταξης των υλικών μέσω της ανακύκλωσης και της αξιοποίησης των οργανικών αποβλήτων αλλά και της χρήσης υποπροϊόντων, όπως τα καύσιμα προερχόμενα από απορρίμματα (Refuse Derived Fuel-RDF) ή άλλων μορφών ενέργειας από απόβλητα. Αυτές οι χώρες προσπαθούν ιδιαίτερα να ανακτήσουν υλικά από την πηγή, με έμφαση στα ανακυκλώσιμα και στα οργανικά απόβλητα. Ακόμη μεγαλύτερη προσοχή δίνεται στην αξιοποίηση των οργανικών αποβλήτων μέσω διαφόρων τεχνολογιών όπως η κομποστοποίηση, οι τεχνολογίες μετατροπής των αποβλήτων σε υγρά καύσιμα και η αναερόβια χώνευση μέσω της παραγωγής εδαφοβελτιωτικού, υγρού λιπάσματος και βιοαερίου (Kaza et al., 2018).

Καθώς ο κόσμος οδηγείται ραγδαία σε ένα ολοένα και πιο αστικοποιημένο μέλλον, η παραγωγή των ΑΣΑ, ως ένα από τα βασικά υποπροϊόντα αυτού του τρόπου ζωής, αυξάνεται σε ταχύτερους ρυθμούς από αυτόν της αστικοποίησης (Hoornweg & Bhada-Tata, 2012).

Περισσότεροι από δύο δισεκατομμύρια τόνοι αστικών στερεών αποβλήτων (απόβλητα νοικοκυριών ή παρόμοιας φύσης αποβλήτων από τη βιομηχανία, το εμπόριο και τους οργανισμούς) παράγονται κάθε χρόνο σε όλο τον κόσμο με την πρόβλεψη να αυξηθούν στους τέσσερις δισεκατομμύρια τόνους ετησίως έως το 2050 (WHO, 2024). Όσον αφορά στην ΕΕ, το έτος 2024 παρήχθησαν 232.350.000 tn ΑΣΑ ή 517 kg ΑΣΑ/ κάτοικο, με μικρή σχετικά αύξηση από το προηγούμενο έτος, το 2023, όπου παρήχθησαν 229.223.000 tn ΑΣΑ ή 511 kg ΑΣΑ/ κάτοικο, με την Ελλάδα αντίστοιχα να έχει παράξει 5.440.000 tn ή 523 kg ΑΣΑ/ κάτοικο το 2023 (Eurostat, 2026c). Ακολούθως, στο Γράφημα 1.2.4, παρουσιάζεται η παραγωγή ΑΣΑ

(σε kg/ κάτοικο) στις χώρες της ΕΕ καθώς και στην Ελβετία, το Ηνωμένο Βασίλειο, την Ισλανδία, τη Νορβηγία και στις υποψήφιες προς ένταξη χώρες, για τα έτη 2014 και 2024.



Γράφημα 1.2.4: Παραγωγή ΑΣΑ στις Ευρωπαϊκές χώρες τα έτη 2014 και 2024. (1) Δεδομένα του 2023. Μορφοποίηση/ Τροποποίηση από: (Eurostat, 2026a).

Στο Γράφημα 1.2.4 παρατηρούνται σημαντικές διαφορές στην παραγωγή αποβλήτων μεταξύ των χωρών. Για παράδειγμα, το 2024, η παραγωγή αποβλήτων στη Ρουμανία είναι 305 kg ΑΣΑ/ κατ. ενώ στην Αυστρία 782 kg ΑΣΑ/ κατ. Αυτές οι διαφορές αντανακλούν διαφοροποιήσεις στο οικονομικό επίπεδο της κάθε χώρας και στα πρότυπα κατανάλωσης αλλά παράλληλα εξαρτώνται από τον τρόπο συλλογής και διαχείρισης των αποβλήτων, επιβεβαιώνοντας όσα ειπώθηκαν ανωτέρω.

1.3 Θεσμικό πλαίσιο διαχείρισης αποβλήτων στην ΕΕ και στην Ελλάδα

1.3.1 Γενικά

Ως «διαχείριση αποβλήτων» νοείται η συλλογή, μεταφορά, ανάκτηση και τελικά η διάθεση των αποβλήτων, με την παράλληλη εποπτεία αυτών των δράσεων αλλά και της επίβλεψης των

χώρων απόρριψης και των ενεργειών στις οποίες προβαίνουν οι έμποροι ή οι μεσίτες (Οδηγία 98/EK, 2008).

Η διαχείριση αποβλήτων ιστορικά αποτελεί μια σύνθετη διεργασία που περιλαμβάνει ένα σύνολο τεχνολογιών και αρχών που σχετίζονται με τον έλεγχο παραγωγής, αποθήκευσης, συλλογής, μεταφοράς, μεταφόρτωσης, επεξεργασίας και τελικής διάθεσης. Η εξέλιξή της συνδέεται άμεσα με την ανάπτυξη μιας τεχνολογικά προηγμένης κοινωνίας και τα πλεονεκτήματά της μαζικής παραγωγής, η οποία συνεπάγεται τη δημιουργία προβλημάτων διάθεσης των παραγόμενων στερεών αποβλήτων. Η κοινωνία αναζητά συνεχώς ανά τα χρόνια, καλύτερες μεθόδους διαχείρισης αποβλήτων και μείωσης των παραγόμενων που θα οδηγηθούν προς διάθεση. Όλα τα στάδια διαχείρισης των στερεών αποβλήτων θα πρέπει να είναι σύμφωνα με τις υπάρχουσες κοινοτικές και νομικές οδηγίες που διασφαλίζουν την προστασία της δημόσιας υγείας και του περιβάλλοντος αλλά και την οικονομική και αισθητική αποδοχή. Προκειμένου η διεργασία της διάθεσης να είναι οικονομικά και κοινωνικά αποδεκτή, θα πρέπει να υιοθετηθούν νομικές, διοικητικές, βιομηχανικές, οικονομικές, σχεδιαστικές και αρχιτεκτονικές αρχές λειτουργίας. Μεταξύ αυτών των αρχών να υπάρχει επικοινωνία και αλληλεπίδραση με μία θετική διεπιστημονική σχέση ώστε να επιτευχθεί μια ολοκληρωμένη διαχείριση στερεών αποβλήτων. Ως «Ολοκληρωμένη Διαχείριση Αποβλήτων» ορίζεται η επιλογή και εφαρμογή κατάλληλων τεχνολογιών, τεχνικών και διαχειριστικών προγραμμάτων ούτως ώστε να επιτευχθούν οι ειδικοί αντικειμενικοί στόχοι της διαχείρισης αποβλήτων (Tchobanoglous & Kreith, 2002).

1.3.2 Ευρωπαϊκή Ένωση

Στην ΕΕ η διαχείριση των αποβλήτων διέπεται από ένα ολοκληρωμένο θεσμικό πλαίσιο που έχει ως στόχο την εξάλειψη αρνητικών επιπτώσεων στο περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία που μπορεί να προκύψουν από την παραγωγή και διάθεση των αποβλήτων ενώ παράλληλα προωθείται η αποδοτική χρήση των πόρων. Κεντρικός άξονας της πολιτικής της ΕΕ για τη διαχείριση αποβλήτων αποτελεί η Οδηγία 2008/98/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 19ης Νοεμβρίου 2008 η οποία θεσπίζει τις βασικές αρχές για τη διαχείριση των αποβλήτων στα κράτη μέλη της και αποτελεί ορόσημο της σύγχρονης διαχείρισης των αποβλήτων στην ΕΕ με μία από τις σημαντικότερες συνεισφορές της να είναι η καθιέρωση της πενταβάθμιας ιεράρχησης των επιλογών διαχείρισης των αποβλήτων (C. Zhang et al., 2022). Αργότερα, στο πλαίσιο της στρατηγικής της ΕΕ για την κυκλική οικονομία η Οδηγία

2008/98/EK τροποποιήθηκε από την Οδηγία 2018/851 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 30ής Μαΐου 2018. Με βάση αυτή την αρχή θεσπίζεται η σειρά προτεραιότητας μεταξύ των καλύτερων περιβαλλοντικών επιλογών στην πολιτική και τη νομοθεσία σχετικά με τα απόβλητα (Οδηγία 98/EK, 2008).

Ωστόσο, μία από τις πρώτες βασικές κοινοτικές νομοθετικές πράξεις για τα απόβλητα αποτέλεσε η Οδηγία 75/442/ΕΟΚ του Συμβουλίου της 15ης Ιουλίου 1975. Η Οδηγία προέβλεπε τη λήψη κατάλληλων μέτρων για τον περιορισμό της παραγωγής αποβλήτων, την ανακύκλωση και επεξεργασία τους, την ανάκτηση πρώτων υλών και ενδεχομένως ενέργειας, καθώς και την επαναχρησιμοποίησή τους.

Βέβαια, στην οδηγία αυτή δε γίνεται λόγος ιεράρχησης. Αυτό συνέβη πρώτη φορά το 1979 με την «Κλίμακα του Lansink» στο ολλανδικό κοινοβούλιο όπου αποσαφηνίστηκε μια σειρά προτεραιότητας των επιλογών διαχείρισης και διατήρησης πόρων. Στην κορυφή τέθηκε η μείωση της παραγωγής αποβλήτων (reduce) και στη βάση η υγειονομική ταφή (landfill). Αυτή η αρχή εξελίχθηκε σταδιακά στη σημερινή αρχή της ιεραρχίας των αποβλήτων που αποτελεί θεμέλιο τόσο στην ευρωπαϊκή όσο και στην παγκόσμια νομοθεσία της διαχείρισης των αποβλήτων. Το 1991 μέσω της Οδηγίας 91/156/ΕΟΚ του Συμβουλίου της 18ης Μαρτίου 1991, επήλθε τροποποίηση της οδηγίας 75/442/ΕΟΚ ώστε να οριστούν με σαφήνεια οι έννοιες της διάθεσης και ανάκτησης. Εισήχθη ακόμη η προαιρετική προτεραιότητα στην πρόληψη (ή μείωση) και στην ανάκτηση των παραγόμενων αποβλήτων μέσω επαναχρησιμοποίησης, ανακύκλωσης ή αποκατάστασης καθώς και της χρήσης των αποβλήτων ως πηγή ενέργειας (C. Zhang et al., 2022). Τελικά, η πλήρης ιεράρχηση εισήχθη στην ΕΕ, όπως αναφέρθηκε, με την Οδηγία 2008/98/EK που καθόρισε μια ολοκληρωμένη σειρά προτεραιότητας για την πρόληψη και διαχείριση των αποβλήτων, τροποποιούμενη από την Οδηγία 2018/851 που ενίσχυσε σημαντικά τις απαιτήσεις για την πρόληψη. Με την ιεραρχία, η οποία συχνά συγκρίνεται με το πλαίσιο των 3R (Reduce, Reuse, Recycle) της κυκλικής οικονομίας, δίνεται έμφαση στη σειρά προτεραιότητας των ενεργειών διαχείρισης αποβλήτων μέσω μιας ανεστραμμένης πενταβάθμιας πυραμίδας που οδηγούν τη νομοθεσία και την πολιτική των κρατών μελών της ΕΕ (C. Zhang et al., 2022). Ακολουθώς απεικονίζεται σχηματικά η εξέλιξη της ιεραρχίας διαχείρισης των αποβλήτων ως γίνεται αναφορά στις οδηγίες της ΕΕ.



Σχήμα 1.3.1: Εξέλιξη της Διαχείρισης Αποβλήτων στην ΕΕ. Μορφοποίηση/ Τροποποίηση από: (C. Zhang et al., 2022).

1.3.3 Ελλάδα

Το σημείο έναρξης θεμάτων διαχείρισης αποβλήτων στην Ελλάδα αποτέλεσε ο ν. 1650/86 περί διαχείρισης αποβλήτων. Έπειτα ακολούθησαν πολλά νέα και σημαντικότερα νομοθετήματα σχετικά με τη διαχείριση αποβλήτων και την προστασία του περιβάλλοντος, με επίκεντρο τα στερεά απόβλητα ακολουθώντας τις κατευθυντήριες γραμμές τις ΕΕ. Συνήθως πρόκειται για εναρμονίσεις ευρωπαϊκών οδηγιών/ αποφάσεων. Ο ν. 4042/2012 είναι ένα από τα σημαντικότερα νομοθετήματα και αποτελεί εναρμόνιση της προαναφερόμενης οδηγίας-πλαίσιο των στερεών αποβλήτων 2008/98/ΕΚ (Κομίλης, 2023) που μεταξύ άλλων, ιεραρχούνται οι δράσεις διαχείρισης των αποβλήτων σύμφωνα με την ακόλουθη ανεστραμμένη πενταβάθμια πυραμίδα.

Στην πενταβάθμια πυραμίδα της ιεράρχησης των αποβλήτων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.3.1, το σημαντικότερο είναι πως ο όρος «πρόληψη» έχει να κάνει με το προϊόν πριν γίνει απόβλητο, αφορά στην πρόληψη της παραγωγής αποβλήτων (Κομίλης, 2023) και αποτελεί την προτιμητέα επιλογή, σε αντίθεση με τον όρο «διάθεση» που βρίσκεται στη βάση της πυραμίδας (C. Zhang et al., 2022), περιλαμβάνει την ταφή και τη θερμική επεξεργασία χαμηλής ή μηδενικής ανάκτησης ενέργειας και αποτελεί τη λιγότερο επιθυμητή πρακτική (τεχνολογίες D) (Κομίλης, 2023), με την θερμική επεξεργασία να είναι προτιμότερη από την ταφή (C. Zhang et al., 2022). Στη δεύτερη θέση προτίμησης ανήκει η «προετοιμασία για επαναχρησιμοποίηση» και αφορά στα προϊόντα που είτε έχουν γίνει απόβλητα είτε πρόκειται να γίνουν, και υπάρχει δυνατότητα επαναχρησιμοποίησής τους μετά από καθαρισμό, έλεγχο, επισκευή χωρίς να απαιτείται προεπεξεργασία (τεχνολογίες R). Στο επόμενο επίπεδο βρίσκεται η ανακύκλωση, στην οποία εκτός από την ανακύκλωση υλικών, εντάσσεται και η ανακύκλωση οργανικών

υλικών μέσω διεργασιών βιολογικού μετασχηματισμού, όπως η κομποστοποίηση και η αναερόβια χώνευση (τεχνολογίες R). Ακολουθεί η ανάκτηση (άλλου είδους) με την ανάκτηση υψηλού ποσοστού ενέργειας μέσω θερμικής επεξεργασίας να αποτελεί ένα παράδειγμα ανάκτησης (τεχνολογίες R). Με τον όρο ανάκτηση νοείται η αξιοποίηση των αποβλήτων και μέσα σε αυτόν τον όρο περιλαμβάνονται οι διεργασίες ανακύκλωσης των υλικών. Παλαιότερα, ως ανάκτηση ενέργειας (waste to energy) θεωρούνταν μόνο η θερμική επεξεργασία (πυρόλυση, αποτέφρωση, αεριοποίηση). Ωστόσο, σε αυτή την κατηγορία πλέον υπάγεται και η διεργασία της αναερόβιας χώνευσης λόγω της παραγωγής του βιοαερίου που αποτελεί ένα ενεργειακά αξιοποιήσιμο προϊόν (Κομίλης, 2023).

Όπως παρατηρείται στο Γράφημα 1.2.2 και στο Γράφημα 1.2.3 σχετικά με την ποιοτική σύσταση των ΑΣΑ στην ΕΕ και στην Ελλάδα αντίστοιχα, το μεγαλύτερο μέρος των ΑΣΑ αποτελεί το κλάσμα των οργανικών αποβλήτων (βιοαποβλήτων) πράγμα που σημαίνει πως η διαχείρισή τους αποτελεί επιτακτική ανάγκη. Στην Οδηγία 1999/31/ΕΚ προβλέπεται ο περιορισμός της υγειονομικής ταφής των βιοαποδομήσιμων αποβλήτων, μέσω της προώθησης εναλλακτικών τρόπων διαχείρισης, όπως η ανακύκλωση, η κομποστοποίηση, η παραγωγή βιοαερίου μέσω της αναερόβιας χώνευσης και η ανάκτηση υλικών ή/και ενέργειας Οδηγία 31/ΕΚ (1999).

Η αναερόβια χώνευση (ή αναερόβια ζύμωση) είναι μια σημαντική μέθοδος διαχείρισης των βιοαποδομήσιμων οργανικών αποβλήτων και θεωρείται ως «πράσινη» μέθοδος διαχείρισης των απορριμμάτων, καθώς επιτρέπει την ανάκτηση ενέργειας λόγω της παραγωγής βιοαερίου και την παραγωγή ενός τελικού στερεού υπολείμματος (χώνευμα) με λιπασματικά χαρακτηριστικά. Συνεπώς βάσει τις ιεραρχίας διαχείρισης των αποβλήτων, ανήκει στις διεργασίες ανάκτησης σύμφωνα με την ευρωπαϊκή νομοθεσία (Κομίλης, 2023).

Σημαντικό σταθμό στην εξέλιξη του εθνικού θεσμικού πλαισίου αποτέλεσε ο ν. 4042/2012, με τον οποίο ενσωματώθηκε στην ελληνική νομοθεσία η Οδηγία 2008/98/ΕΚ. Μεταγενέστερα, ο ν. 4819/2021 διαμόρφωσε ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για τη διαχείριση των αποβλήτων, ενσωματώνοντας στην εθνική νομοθεσία τις νεότερες απαιτήσεις του ευρωπαϊκού θεσμικού πλαισίου και συγκεκριμένα τις Οδηγίες (ΕΕ) 2018/851 και (ΕΕ) 2018/852. Παράλληλα το Εθνικό Σχέδιο Διαχείρισης Αποβλήτων, που αποτελεί τον πολιτικό και στρατηγικό σχεδιασμό της χώρας και αφορά τη χρονική περίοδο 2020-2030, θέτει κάποιους βασικούς στόχους διαχείρισης. Μεταξύ των βασικών στόχων του ΕΣΔΑ 2020–2030 περιλαμβάνεται η μείωση

της υγειονομικής ταφής των ΑΣΑ σε ποσοστό μικρότερο του 10% έως το 2030, θέτοντας έτσι την επίτευξη του στόχου πέντε χρόνια νωρίτερα από ότι οι αντίστοιχες ευρωπαϊκές διατάξεις. Στους βασικούς στόχους περιλαμβάνεται επίσης η αύξηση της προετοιμασίας για επαναχρησιμοποίηση και ανακύκλωση των παραγόμενων ΑΣΑ σε ποσοστό τουλάχιστον 55% κατά βάρος έως το 2025, 60% έως το 2030 και 65% έως το 2035, καθώς και η επεξεργασία των υπολειπόμενων σύμμεικτων αποβλήτων σε σύγχρονες Μονάδες Επεξεργασίας Αποβλήτων (ΜΕΑ). Οι ΜΕΑ λειτουργούν με βάση την ιεράρχηση των αποβλήτων, στοχεύοντας στην ανάκτηση ανακυκλώσιμων υλικών, στην ενδεχόμενη ανάκτηση ενέργειας μέσω της διεργασίας της ξηρής αναερόβιας χώνευσης και τελικά στη δραστηκή μείωση του υπολείμματος που οδηγείται προς ταφή μέσω της παραγωγής εναλλακτικού καυσίμου ή/και της ενεργειακής αξιοποίησης του υπολείμματος σε άλλες μονάδες (Πράξη 39 της 31.8, 2020). Στο πλαίσιο αυτό, η αξιοποίηση του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ μέσω τεχνολογιών όπως η ξηρή αναερόβια χώνευση αποκτά ιδιαίτερη σημασία καθώς συμβάλει στην παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας, στην αποτροπή εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου, στην παραγωγή χρήσιμων για τη γεωργία προϊόντων αλλά και στη μείωση των αποβλήτων που οδηγούνται προς ταφή. Έτσι, η βελτιστοποίηση της απόδοσης τέτοιων διεργασιών όπως η ξηρή αναερόβια χώνευση, μέσω διαφόρων προσεγγίσεων - όπως η βελτιστοποίηση της ανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων κατά τη διεργασία της αναερόβιας, αποτελεί αντικείμενο έντονου επιστημονικού ενδιαφέροντος και βασικό στόχο της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας, συνεισφέροντας άμεσα στην επίτευξη της ευρωπαϊκής και εθνικής πολιτικής για τη βιώσιμη διαχείριση των αποβλήτων.

1.4 Περιγραφή και καινοτομία ΜΔΕ

Η καινοτομία της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας έγκειται στη μελέτη της ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων ως παράγοντα βελτιστοποίησης της ξηρής αναερόβιας χώνευσης του οργανικού κλάσματος των σύμμεικτων Αστικών Στερεών Αποβλήτων σε συνθήκες πραγματικής λειτουργίας και βιομηχανικής κλίμακας. Σε αντίθεση με τη διεθνή βιβλιογραφία, η οποία επικεντρώνεται κυρίως σε εργαστηριακά ή πιλοτικά συστήματα και σε προδιαλεγμένα οργανικά ρεύματα, η παρούσα εργασία εξετάζει την εφαρμογή διαφορετικών συχνотήτων ανακυκλοφορίας καθώς και όγκων παροχής σε εγκατάσταση επεξεργασίας σύμμεικτων αποβλήτων στην Ελλάδα με σκοπό τη βελτιστοποίηση της διεργασίας. Η προσέγγιση αυτή αντανακλά ρεαλιστικές συνθήκες λειτουργίας ελληνικών ΜΕΑ, όπου η

ετερογένεια των αποβλήτων και οι μεταβολές στη σύστασή τους αποτελούν κρίσιμες προκλήσεις. Επιπλέον, η εργασία συμβάλλει στην αξιολόγηση και βελτιστοποίηση της ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων ως εργαλείου ελέγχου της σταθερότητας της διεργασίας, μέσω της παρακολούθησης βασικών φυσικοχημικών παραμέτρων και της παραγωγής και ποιότητας του παραγόμενου βιοαερίου. Με τον τρόπο αυτό, αναδεικνύεται η δυνατότητα αξιοποίησης των στραγγισμάτων ως εσωτερικού πόρου του συστήματος, ενισχύοντας τη βιωσιμότητα, την ενεργειακή απόδοση και τη συμβολή της ξηρής αναερόβιας χώνευσης στην κυκλική οικονομία.

2 Αναερόβια χώνευση οργανικού κλάσματος σύμμεικτων ΑΣΑ

2.1 Γενικά

Οι συχνότεροι τρόποι διαχείρισης του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ περιλαμβάνουν την κομποστοποίηση, την αναερόβια χώνευση, την αποτέφρωση και την υγειονομική ταφή. Ωστόσο, η υγειονομική ταφή αποτελεί τη λιγότερο επιθυμητή επιλογή, ενώ η αποτέφρωση κρίνεται ακατάλληλη λόγω της υψηλής υγρασίας του κλάσματος (Franca et al., 2022a), αλλά και λόγω των αναγκών διαχείρισης που προκύπτουν για τα υπολειμμάτα τέφρας και τα εκπεμπόμενα τοξικά αέρια (Logan & Visvanathan, 2019). Παράλληλα, η κομποστοποίηση φαίνεται να αποτελεί την καλύτερη επιλογή διαχείρισής του καθώς απαιτεί μεγάλη έκταση, περισσότερο χρόνο για την παραγωγή ποιοτικού προϊόντος (Logan & Visvanathan, 2019) ενώ παράλληλα απαιτείται και μεγάλη κατανάλωση ενέργειας ώστε να επιτυγχάνεται ο απαιτούμενος αερισμός (Franca et al., 2022a). Ακόμη, λόγω του ότι το οργανικό κλάσμα των ΑΣΑ χαρακτηρίζεται από υψηλή υγρασία και βιοαποδομησιμότητα και τα προϊόντα της αναερόβιας χώνευσης είναι ιδιαίτερα χρήσιμα, η αναερόβια χώνευση φαίνεται να αποτελεί την καλύτερη έως τώρα επιλογή (Logan & Visvanathan, 2019).

Η αποδόμηση των οργανικών αποβλήτων μπορεί να συντελεστεί αναερόβια τόσο στο φυσικό περιβάλλον όσο και σε τεχνητά (σχεδιασμένα) συστήματα (Christensen, 2012b). Η διεργασία αυτή συναντάται σε πολλά φυσικά αναερόβια περιβάλλοντα, όπως βάλτοι, έλη, ιζήματα λιμνών και θαλασσών, στον πυθμένα ποταμιών και υδατορευμάτων, καθώς και στο πεπτικό σύστημα μηρυκαστικών και άλλων ζώων (Katheem et al., 2016). Όταν λαμβάνει χώρα σε τεχνητά συστήματα, ονομάζεται βιοαεριοποίηση ή αναερόβια χώνευση (ζύμωση) (Christensen, 2012b). Συγκεκριμένα, ως «αναερόβια χώνευση» ορίζεται η ελεγχόμενη

βιολογική αποδόμηση των οργανικών υλικών απουσία οξυγόνου (αναερόβιες συνθήκες), σε θερμοκρασίες κατάλληλες για την ανάπτυξη μεσόφιλων ή θερμοφίλων βακτηρίων προς παραγωγή βιοαερίου (μίγμα αποτελούμενο κυρίως από μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα) και ενός υδαρούς υπολείμματος που ονομάζεται χώνευμα (ΦΕΚ 3339, 2014). Το υδαρές υπόλειμμα (χώνευμα) είναι λασπώδες και αποτελείται από μία στερεή και μία υγρή φάση (Κομίλης, 2023) και μπορεί να είναι είτε ένα ενιαίο αιώρημα (μίγμα υγρού και στερεού) στην περίπτωση της υγρής αναερόβιας χώνευσης είτε να διαχωρίζεται σε υγρή και στερεή φάση στην είναι ξηρή χώνευση (Christensen, 2012b).

Επιπλέον, ανάλογα με την προέλευση των οργανικών αποβλήτων, υπάρχουν δύο είδη χωνεύματος. Όταν τα οργανικά απόβλητα έχουν συλλεχθεί/ διαχωρισθεί στην πηγή και υποστεί αναερόβια χώνευση, τότε παράγεται ένα υγειονοποιημένο και σταθεροποιημένο στερεό υλικό που ονομάζεται *χώνευμα υψηλής ποιότητας*. Αντίθετα, στην περίπτωση που προέρχεται από την επεξεργασία του οργανικού κλάσματος σύμμεικτων ΑΣΑ και την μετέπειτα αναερόβια χώνευσή τους, όπως εξετάζεται στην παρούσα εργασία, το προϊόν ονομάζεται *χώνευμα τύπου Α* (Κομίλης, 2023). Ως σύμμεικτα ΑΣΑ θεωρούνται τα αστικά στερεά απόβλητα που δεν έχουν διαχωρισθεί στην πηγή ή υποστεί διαδικασία διαχωρισμού (ΦΕΚ 3339, 2014).

Συμπερασματικά, η διεργασία της αναερόβιας χώνευσης φαίνεται να αποτελεί μια περιβαλλοντικά φιλική, βιώσιμη και ενεργειακά αποδοτική επιλογή καθώς εκτός από την αποτροπή εκπομπής των αερίων του θερμοκηπίου, συνεισφέρει ουσιαστικά στην ανάκτηση πόρων μέσω των παραγόμενων προϊόντων της (βιοαέριο και χώνευμα). Συγκεκριμένα, το βιοαέριο μπορεί να αξιοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας ή να χρησιμοποιηθεί ως βιοκαύσιμο αντικαθιστώντας τη χρήση των ορυκτών καυσίμων και στις δύο περιπτώσεις, ενώ το χώνευμα, λόγω των φυσικοχημικών του ιδιοτήτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη γεωργία ως εδαφοβελτιωτικό και λίπασμα αντικαθιστώντας τα χημικά λιπάσματα ή ακόμη και στην αποκατάσταση εδαφών (Pramanik et al., 2019).

2.2 Στάδια Αναερόβιας Χώνευσης

Η αναερόβια χώνευση είναι μια πολυσταδιακή διεργασία που περιλαμβάνει διαδοχικές και παράλληλες αντιδράσεις, όπου τα προϊόντα της μιας φάσης αποτελούν το υπόστρωμα για την επόμενη, με αποτέλεσμα τον μετασχηματισμό της οργανικής ύλης σε ένα μείγμα αποτελούμενο κυρίως από μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα (βιοαέριο) (Parawira, 2012). Η

διεργασία πραγματοποιείται σε τέσσερα διαδοχικά στάδια που αναφέρονται ως: α) υδρόλυση (hydrolysis), β) οξεογένεση (acidogenesis), γ) ακετογένεση ή οξικογένεση (acetogenesis) και δ) μεθανογένεση (methanogenesis).

Η αναερόβια χώνευση είναι μια συνεργιστική διαδικασία που συντελείται χάρη στη συνέργεια διάφορων μικροοργανισμών, οι οποίοι μπορούν να ταξινομηθούν σε ομάδες με βάση τις μεταβολικές διεργασίες στις οποίες συμμετέχουν (Li et al., 2011b).

2.2.1 Υδρόλυση

Η υδρόλυση της σύνθετης οργανικής ύλης (στερεά σωματίδια) σε διαλυτά μόρια αποτελεί το πρώτο στάδιο της αναερόβιας χώνευσης και χρησιμοποιείται συνοπτικά για να περιγράψει τη διαλυτοποίηση των στερεών (Christensen, 2012). Σκοπός της διεργασίας είναι να καταστήσει τα πολύπλοκα οργανικά μακρομόρια προσβάσιμα στα οξεογενετικά βακτήρια, μέσω της μετατροπής τους σε μικρότερα συστατικά, τα οποία μπορούν στη συνέχεια να αξιοποιηθούν από αυτά (Meegoda et al., 2018). Κατά την υδρόλυση, μια ειδική ομάδα υδρολυτικών βακτηρίων εκκρίνει εξωκυτταρικά, ένζυμα (Parawira, 2012). Ειδικότερα, τα πρωτεολυτικά βακτήρια, παράγουν πρωτεάσες, οι οποίες καταλύουν την υδρόλυση των πρωτεϊνών σε αμινοξέα. Αντίστοιχα, τα κυτταρινολυτικά και ξυλανολυτικά βακτήρια εκκρίνουν κυτταρρινάσες ή/και ξυλανάσες που διασπούν την κυτταρίνη και την ξυλάνη (ανήκουν στους υδατάνθρακες) σε γλυκόζη και ξυλόζη αντίστοιχα και τέλος, τα λιπολυτικά βακτήρια που παράγουν λιπάσες, οι οποίες διασπούν τα λιπίδια (λίπη αν πρόκειται για στερεή φάση και έλαια αν πρόκειται για υγρή) σε γλυκερόλη και κυρίως σε λιπαρά οξέα μακράς αλυσίδας (long-chain fatty acids-LCFA) (Christensen, 2012). Η φάση της υδρόλυσης αποτελεί συχνά το πιο περιοριστικό στάδιο για το ρυθμό εξέλιξης της αναερόβιας χώνευσης (Κομίλης, 2023).

Η ομάδα των υδρολυτικών μικροοργανισμών αποτελείται από ένα σύνολο προαιρετικά αναερόβιων βακτηρίων, δηλαδή βακτηρίων που έχουν τη δυνατότητα να αναπτυχθούν τόσο με την παρουσία όσο και με την απουσία οξυγόνου (Botheju et al., 2010). Επίσης, έχουν την ικανότητα έντονης αντίστασης στις περιβαλλοντικές διακυμάνσεις και στις τοξικές ουσίες που μπορεί να υπάρχουν στο υπόστρωμα, ενώ μπορούν να λειτουργήσουν σε ένα ευρύ φάσμα pH (4-11) με τις τιμές pH 6-8 να αναφέρονται συχνά ως βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας για τη διεργασία της υδρόλυσης (P. Zhang et al., 2009).

Κύριο συστατικό των αποβλήτων τροφίμων, του ξύλου και του χαρτιού-χαρτονιού που περιλαμβάνονται στα ΑΣΑ είναι οι υδατάνθρακες, που αποτελούνται από αλυσίδες πολυσακχαριτών, καθιστώντας τους το πιο κοινό οξειδωμένο σωματιδιακό υπόστρωμα στην αναερόβια χώνευση, με συνήθη παραγωγή αερίου περίπου 50% CH₄ και 50% CO₂. Επίσης, βασικά συστατικά των αποβλήτων τροφίμων αποτελούν οι πρωτεΐνες και τα λιπίδια όπου επειδή είναι πιο ανηγμένες ενώσεις σε σχέση με τους υδατάνθρακες, παράγουν μεγαλύτερες ποσότητες CH₄ και CO₂. Ωστόσο, η αποδόμηση των πρωτεϊνών και των λιπιδίων μπορεί να οδηγήσει στον σχηματισμό ενώσεων που, σε υψηλές συγκεντρώσεις, αναστέλλουν τη μεθανογένεση. Συγκεκριμένα, από την αποδόμηση των πρωτεϊνών παράγεται αμμωνιακό άζωτο, ενώ κατά την υδρόλυση των λιπιδίων απελευθερώνονται λιπαρά οξέα μακράς αλυσίδας (LCFAs) (Christensen, 2010).

2.2.2 Οξεογένεση

Οξεογένεση ονομάζεται η πρωτογενής ζύμωση των προϊόντων της υδρόλυσης επειδή παράγονται κυρίως καρβοξυλικά οξέα (Liebetrau et al., 2019). Στα συστήματα αναερόβιας χώνευσης υπάρχει υψηλή ποικιλότητα υδρολυτικών και οξεογενών μικροοργανισμών, περιλαμβάνοντας αρκετές χιλιάδες γένη προαιρετικά και αυστηρά αναερόβιων βακτηρίων από τις κλάσεις *Bacteroidia*, *Bacilli*, *Clostridia*, *Actinobacteria* και *Gammaproteobacteria* (Liebetrau et al., 2019). Οι οξεογενείς μικροοργανισμοί (ζυμωτικά βακτήρια) απορροφούν μέσω των κυτταρικών τους μεμβρανών τα προϊόντα της υδρόλυσης (Meegoda et al., 2018) μετατρέποντάς τα σε ένα μείγμα αποτελούμενο από πτητικά λιπαρά οξέα (Volatile Fatty Acids-VFAs) και άλλα δευτερεύοντα προϊόντα όπως υδρογόνο, διοξείδιο του άνθρακα και αμμωνία (Chen & Neibling, 2014). Τα VFAs αποτελούν μια κατηγορία οργανικών οξέων όπως τα οξικά άλατα (acetates) αλλά και μεγαλύτερα οργανικά οξέα όπως το βουτυρικό και προπιονικό οξύ ενώ παράλληλα μπορεί να περιλαμβάνονται και μικρότερες ποσότητες γαλακτικού οξέος και αλκοολών (συνήθως αιθανόλη) (Meegoda et al., 2018).

Το είδος και οι συγκεντρώσεις των παραγόμενων προϊόντων εξαρτώνται άμεσα από τις συνθήκες που επικρατούν εντός του αντιδραστήρα (χωνευτή). Το οξικό οξύ (CH₃COOH), για παράδειγμα, αποτελεί το κύριο προϊόν όταν γίνεται αποτελεσματική απομάκρυνση του H₂ από τους μικροοργανισμούς που το καταναλώνουν, όπως οι μεθανογόνοι. Σε αντίθεση με την περίπτωση που η μεθανογένεση επιβραδύνεται και προκληθεί συσσώρευση του H₂, ευνοείται η παραγωγή πιο ανηγμένων προϊόντων, όπως το βουτυρικό και το προπιονικό οξύ. Αξίζει να

σημειωθεί ότι το παραγόμενο H_2 , το CO_2 και το CH_3COOH , παρακάμπτουν το επόμενο στάδιο της οξικογένεσης-ακετογένεσης και μεταβολίζονται απευθείας κατά τη μεθανογένεση (Lohani & Havukainen, 2018). Επιπλέον, οι τιμές του pH επηρεάζουν την παραγωγή των VFAs. Σε τιμές pH κάτω του 4, σημειώνεται έντονη αναστολή της μικροβιακής δράσης. Καθώς το pH μεταβάλλεται σταδιακά από 4 σε 8, παρατηρείται μεταβολή των κύριων προϊόντων από βουτυρικό και οξικό οξύ σε οξικό και προπιονικό αντίστοιχα ενώ, ως βέλτιστο εύρος pH αναφέρεται η περιοχή 5,5-6,5 (Van et al., 2020).

Τα βακτήρια που συμμετέχουν στην οξεογένεση, χαρακτηρίζονται από ταχεία ανάπτυξη (Van et al., 2020) και έτσι θεωρείται πως αυτή η φάση προχωρά με ταχύτερο ρυθμό από τις υπόλοιπες φάσεις (Meegoda et al., 2018). Έχοντας υπόψιν την ταχύτητα αυτής της φάσης και παρόλο που δημιουργούνται άμεσοι πρόδρομοι για την τελική φάση (μεθανογένεση), η ταχεία συσσώρευση των VFAs μπορεί να οδηγήσει σε απότομη πτώση του pH (οξίνιση αντιδραστήρα), η οποία αποτελεί κύρια αιτία αστοχίας του συστήματος. Αντίστοιχα, η διεργασία μπορεί να ανασταλεί σημαντικά και σε περιπτώσεις υψηλών συγκεντρώσεων αμμωνίας, οι οποίες προέρχονται από τη διάσπαση των αμινοξέων (Meegoda et al., 2018).

2.2.3 Οξικογένεση

Μέσω του οξικού οξέος που παράγεται κατά την οξεογένεση, ένα μέρος του αρχικού υποστρώματος μετατρέπεται ήδη σε κατάλληλο υπόστρωμα για ακετοκλαστική μεθανογένεση (Fournier & Gogarten, 2008). Αντίθετα, τα ανώτερα VFAs, όπως το βουτυρικό και το προπιονικό οξύ, δεν είναι άμεσα διαθέσιμα στους μεθανογόνους μικροοργανισμούς και έτσι μέσω της ακετογένεσης ή οξικογένεσης, γίνεται η μετατροπή αυτών των ανώτερων VFAs και άλλων ενδιάμεσων προϊόντων (κυρίως αλκοόλες) σε οξικό οξύ με ταυτόχρονη παραγωγή H_2 , και CO_2 από τα ακετογόνα βακτήρια (Hansen & Cheong, 2013).

Υπάρχουν δύο τύποι ακετογόνων βακτηρίων, τα υδρογονοπαραγωγά ακετογόνα και τα ομοακετογόνα βακτήρια (Parawira, 2012). Τα ακετογόνα βακτήρια είναι αυστηρά αναερόβια, που σημαίνει ότι η παρουσία οξειδωτικών παραγόντων, όπως το οξυγόνο και τα νιτρικά, είναι τοξική για αυτά (Krishna & Kalamdhad, 2014) ενώ παράλληλα, λειτουργούν αποδοτικότερα σε ασθενώς όξινες συνθήκες (pH 6,0-6,2) (Ramos-Suárez et al., 2015). Η οξικογένεση εξελίσσεται με βραδύτερο ρυθμό σε σύγκριση με την οξεογένεση (Ramos-Suárez et al., 2015).

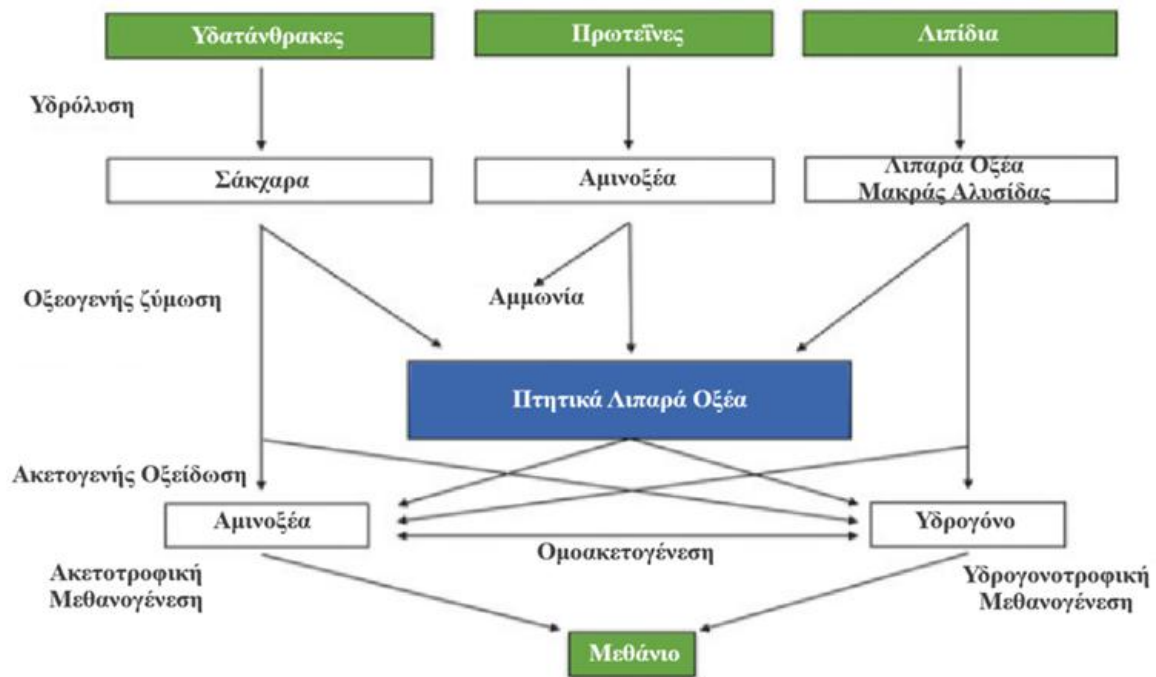
2.2.4 Μεθανιογένεση

Το σημαντικότερο ρόλο στην παραγωγή μεθανίου διαδραματίζει το τέταρτο και τελικό στάδιο, το στάδιο της μεθανογένεσης, όπου το βιοαποδομήσιμο οργανικό υλικό μετατρέπεται σε αέρια μορφή και απομακρύνεται αυτόματα μέσω του συστήματος του αντιδραστήρα (Parawira, 2012). Η παραγωγή μεθανίου βασίζεται σε δύο βασικούς μηχανισμούς: στην ακετοκλαστική μεθανογένεση όπου γίνεται η ζύμωση του οξικού οξέος από τα ακετοτροφικά ή ακετοκλαστικά βακτήρια (ετερότροφοι μικροοργανισμοί) και παράγεται μεθάνιο (CH_4) και διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και την υδρογονοτροφική μεθανογένεση όπου οι υδρογονοτροφικοί μεθανογόνοι (αυτότροφοι μικροοργανισμοί), καταναλώνουν το διαλυμένο H_2 και το CO_2 και παράγουν CH_4 και νερό (H_2O) (Van et al., 2020). Περίπου το 70% του συνολικά παραγόμενου CH_4 προέρχεται από την αποδόμηση του οξικού οξέος, ενώ το υπόλοιπο 30% προκύπτει από την αναγωγή του CO_2 με τη χρήση του H_2 .

Οι μεθανογόνοι μικροοργανισμοί ανήκουν στα είδη των «αρχαίων» (Κομίλης, 2023), είναι αυστηρά αναερόβιοι, και εξαιρετικά ευαίσθητοι στις συνθήκες που επικρατούν μέσα στον αντιδραστήρα όπως το pH, η παρουσία υδρόθειου (H_2S), ελεύθερης αμμωνίας (free ammonia-FAN) και των VFAs. Συγκεκριμένα, δεν μπορούν να λειτουργήσουν σε $\text{pH} < 6,2$ ενώ σε $\text{pH} < 6$ θανατώνονται καθιστώντας το ουδέτερο pH (7,0-7,2) ως την πλέον ιδανική επιλογή (Gerardi H. Michael, 2003). Ωστόσο, πρόσφατες μελέτες αναφέρουν ότι είδη του γένους *Methanosarcina* εμφανίζουν υψηλή ανθεκτικότητα σε συγκεντρώσεις οξικού οξέος, αμμωνίας και νατρίου, καθώς και σε απότομες αλλαγές του pH (Meegoda et al., 2018).

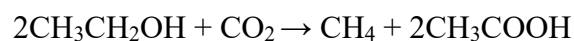
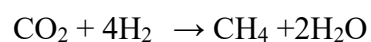
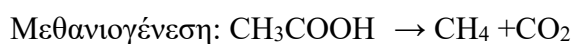
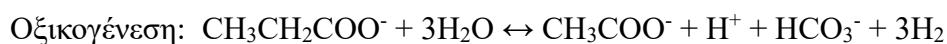
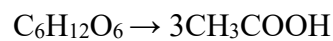
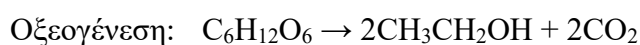
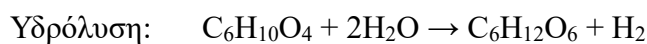
Σε σύγκριση με άλλους μικροοργανισμούς της αναερόβιας χώνευσης, τα μεθανογόνα απαιτούν σημαντικά περισσότερο χρόνο αναγέννησης, ο οποίος κυμαίνεται μεταξύ 5 και 16 ημερών (Deublein & Steinhauser, 2008). Ωστόσο, έχει παρατηρηθεί πως κάποια υδρογονοτροφικά είδη όπως το *Methanococcus maripaludis* μπορούν να διπλασιαστούν μέσα σε 2 ώρες (Richards et al., 2016). Σε αντιδραστήρες διαλείποντος έργου (batch), η ολοκλήρωση της μεθανογένεσης, προσδιορίζεται όταν παύει η παραγωγή βιοαερίου, διεργασία που ενδέχεται να διαρκέσει έως και 40 ημέρες (Meegoda et al., 2018).

Ακολούθως, παρατίθεται το σχετικό διάγραμμα με τα στάδια της αναερόβιας χώνευσης όπως προαναφέρθηκαν (Σχήμα 2.2.1).



Σχήμα 2.2.1: Στάδια αποδόμησης στη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης. Τροποποίηση από: (Katheem et al., 2016).

Τέλος, παρουσιάζονται οι κυριότερες βιοχημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά την αναερόβια χώνευση των στερεών αποβλήτων, με βάση έναν τυπικό υδατάνθρακα που εμφανίζεται στο ρεύμα των στερεών αποβλήτων και υδρολύεται σε γλυκόζη (Κομίλης, 2023).



2.3 Τεχνολογίες Αναερόβιας Χώνευσης

Από τα μέσα της δεκαετίας του 1980, έχουν αναπτυχθεί πολλοί διαφορετικοί τύποι μονάδων αναερόβιας χώνευσης πλήρους κλίμακας για την επεξεργασία του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ στη Δυτική Ευρώπη, με πολλές εταιρείες να δραστηριοποιούνται στο χώρο αυτό και να επεξεργάζονται από εκατοντάδες έως και πάνω από 100.000 τόνους ετησίως. Λόγω των πολλών εταιριών που εμπλέκονται και της μεγάλης ποικιλίας τεχνολογιών, φαίνεται να μην υπάρχουν αυστηρές κατευθύνσεις σχεδιασμού των επιμέρους τμημάτων των εγκαταστάσεων αναερόβιας χώνευσης και κάθε εταιρεία εφαρμόζει τα δικά της κριτήρια και σχεδιασμό. Μια σχετική σύγκλιση φαίνεται ωστόσο να υπάρχει όσον αφορά στην ίδια τη διεργασία σχετικά με τον κατάλληλο χρόνο παραμονής των στερεών εντός του αντιδραστήρα και τις τιμές του οργανικού φορτίου ανάλογα με τον τύπο διεργασίας που επιλέγεται σε κάθε μελέτη περίπτωσης (Christensen, 2010), όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.3.1.

Πίνακας 2.3.1: Τυπικές τιμές σχεδιασμού αντιδραστήρων αναερόβιας χώνευσης βιοαποβλήτων. Τροποποίηση από: (Christensen, 2010).

Τύπος Διεργασίας	Ρυθμός οργανικής φόρτισης (kg VS/m ³ *d)	Ελάχιστος χρόνος παραμονής στερεών στον αντιδραστήρα (d)
Μεσόφιλη	4-5	20
Θερμόφιλη	8-10	10

Τα συστήματα αναερόβιας χώνευσης μπορούν να διαχωρισθούν τεχνολογικά σε τρεις κύριες κατηγορίες:

- Ξηρή και υγρή χώνευση
- Θερμόφιλη και μεσόφιλη χώνευση
- Χώνευση ενός σταδίου/ χώνευση δύο σταδίων

2.3.1 Ξηρή και υγρή αναερόβια χώνευση

Η αναερόβια επεξεργασία των βιοαποβλήτων, αναλόγως την συγκέντρωσή τους σε ολικά στερεά (Total Solids-TS), μπορεί να διακριθεί είτε σε υγρή, είτε σε ξηρή χώνευση (Tchobanoglous et al., 1993). Στην υγρή αναερόβια χώνευση, η συγκέντρωση των TS είναι μέτρια έως χαμηλή (<10-20% TS) και απαιτείται αραίωση του υποστρώματος με νερό, ενώ χρησιμοποιούνται αντιδραστήρες πλήρους ανάμιξης (completely mixed tank digesters).

Αντίθετα, στην ξηρή αναερόβια χώνευση, δεν απαιτείται η προεπεξεργασία του υποστρώματος, η συγκέντρωση των TS είναι υψηλή (20-40% TS) και χρησιμοποιούνται αντιδραστήρες πλήρους ανάμιξης, εμβολοειδούς ροής (plug flow) και αντιδραστήρες διαλείποντος έργου (batch) (Angelonidi & Smith, 2015).

Παράλληλα, οι (Christensen, 2012) συμπληρώνουν πως η διάκριση σχετίζεται με την περιεκτικότητα σε υγρασία εντός του αντιδραστήρα, όπου η υγρή διεργασία χαρακτηρίζεται από περιεκτικότητα σε υγρασία >90% και η ξηρή σε <75%, με τη βιομάζα να εμφανίζεται σε υγρή μορφή και μορφή παχύρρευστης ιλύος αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση υγρής αναερόβιας χώνευσης στερεών αποβλήτων, που η περιεκτικότητα σε υγρασία κυμαίνεται μεταξύ 40% και 60% σε υγρή βάση, θα πρέπει να προστίθεται νερό ώστε να μπορέσουν να επιτευχθούν τα επιθυμητά ποσοστά υγρασίας της συγκεκριμένης διεργασίας (Κομίλης, 2023).

Για την επιλογή της διεργασίας που θα χρησιμοποιηθεί σε κάθε συνθήκη, εξετάζεται η αρχική υγρασία των αποβλήτων όπου για παράδειγμα, υγρά βιομηχανικά απόβλητα απαιτούν υγρή αναερόβια χώνευση ενώ απόβλητα κήπου ευνοούνται από την ξηρή αναερόβια χώνευση (Christensen, 2012). Επιπλέον, σημαντική παράμετρο αποτελεί η μετέπειτα διαχείριση του χωνευμένου υπολείμματος, όπου εάν υπάρχει η δυνατότητα χρήσης του υγρού ως λίπασμα, επιλέγεται η υγρή χώνευση ενώ αν δε δίνεται αυτή η δυνατότητα και πρέπει να οδηγηθεί προς επεξεργασία, τότε προτιμάται η ξηρή που παράγει ελάχιστη ποσότητα υγρού υπολείμματος. Ακόμη, εάν τα απόβλητα περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις αζώτου, που θα οδηγήσουν σε υψηλές και συχνά ανασταλτικές συγκεντρώσεις αμμωνίας στον αντιδραστήρα, προτιμάται η υγρή αναερόβια χώνευση έναντι της ξηρής, χάρη στην αραίωση κατά τη διάρκεια της πρώτης με νερό (Christensen, 2012).

Τα σημαντικότερα προβλήματα στη λειτουργία της ξηρής αναερόβιας σε σχέση με την υγρή είναι η αδυναμία ανάδευσης του υλικού και η δυσκολία στην άντληση του υποστρώματος λόγω υψηλού ιξώδους. Ωστόσο, με την εξέλιξη των τεχνολογιών, αυτά τα προβλήματα έχουν μειωθεί σημαντικά. Σε γενικά πλαίσια όμως, τα ξηρά συστήματα είναι ανθεκτικότερα χάρη στη μεγάλη τους σταθερότητα ακόμη και σε συγκεντρώσεις VFAs 23-24 g/L και αμμωνίας 2,5-3 g/L (Van et al., 2020).

Τόσο η υγρή, όσο και η ξηρή αναερόβια χώνευση, παρουσιάζουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, ωστόσο, η ξηρή αναερόβια, φαίνεται να είναι πιο ευέλικτη και ανθεκτική τεχνολογία σε σχέση με την υγρή, να καταναλώνει μικρότερες ποσότητες νερού, να

παρουσιάζει ευνοϊκότερο ενεργειακό ισοζύγιο και να προσφέρει καλύτερη εμπορική αξιοποίηση του παραγόμενου χωνεύματος (Angelonidi & Smith, 2015). Τέλος, σημαντικό πλεονέκτημα της υγρής αναερόβιας χώνευσης αποτελεί ο χαμηλότερος χρόνος παραμονής των αποβλήτων εντός του αντιδραστήρα αφού συνήθως απαιτούνται 10-15 ημέρες σε αντίθεση με την ξηρή που απαιτούνται 20-40 ημέρες (Κομίλης, 2023).

2.3.2 Θερμόφιλη και μεσόφιλη αναερόβια χώνευση

Κρίσιμο ρόλο στη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης διαδραματίζει η επιλογή της θερμοκρασίας λειτουργίας του αναερόβιου αντιδραστήρα (Mata-Alvarez, 2003). Στη μεσόφιλη χώνευση, η θερμοκρασία λειτουργίας του αντιδραστήρα κυμαίνεται μεταξύ 35 °C και 45 °C με βέλτιστη θερμοκρασία τους 37 °C ενώ στη θερμόφιλη οι θερμοκρασίες κυμαίνονται από 50 έως 60 °C, με βέλτιστη τιμή τους 55 °C (Κομίλης, 2023). Οι θερμοκρασίες αυτές προκύπτουν από το γεγονός ότι οι μεσόφιλοι και οι θερμόφιλοι μικροοργανισμοί αναπτύσσονται σε αυτές τις θερμοκρασίες αντίστοιχα. Ανάλογα με την επιλαχούσα θερμοκρασία λειτουργίας του αντιδραστήρα, μεταβάλλεται η αποτελεσματικότητα καταστροφής των παθογόνων μικροοργανισμών και συνεπώς, ο χρόνος παραμονής των αποβλήτων εντός του αντιδραστήρα. Συγκεκριμένα, σε μεσόφιλες συνθήκες, ο τυπικός χρόνος παραμονής εντός του αντιδραστήρα είναι συνήθως 15-30 ημέρες ενώ σε θερμόφιλες είναι 12-14 ημέρες, και με τις δύο συνθήκες να ενδέχεται η μεταβολή των ημερών ανάλογα με το υπόστρωμα και τις υπόλοιπες επικρατούσες συνθήκες εντός του αντιδραστήρα (Mata-Alvarez, 2003).

Η μεσόφιλη αναερόβια χώνευση είναι περισσότερο ανθεκτική και ανεκτική σε διαταραχές σε σχέση με τη θερμόφιλη, κάτι που είναι σημαντικό και για τους μεθανογόνους μικροοργανισμούς καθώς παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία στις μεταβολές της θερμοκρασίας. Η μεγαλύτερη σταθερότητα της μεσόφιλης σε σχέση με τις υψηλές θερμοκρασίες της θερμόφιλης, επιτρέπει πιο εύκολο και καλύτερο έλεγχο της διεργασίας (Erickson et al., 2004). Η θερμόφιλη διεργασία επιτυγχάνει την ίδια παραγωγή βιοαερίου με τη μεσόφιλη σε λιγότερο χρόνο παραμονής και συνεπώς σε μικρότερου όγκου αντιδραστήρες, απαιτώντας όμως παράλληλα, μεγαλύτερη ενέργεια ώστε να φτάσει και να διατηρηθεί η θερμοκρασία στα επιθυμητά επίπεδα. Αξίζει να σημειωθεί πως και στις δύο περιπτώσεις, η θέρμανση των αντιδραστήρων γίνεται από την καύση του παραγόμενου βιοαερίου ενώ η υπόλοιπη παραγόμενη ενέργεια που δεν καταναλώνεται για τον σκοπό αυτό μπορεί να

μετατραπεί σε ηλεκτρική και να πωληθεί στο τοπικό δίκτυο ηλεκτρισμού (Κομίλης, 2023). Τέλος, ένα σημαντικό πλεονέκτημα της θερμόφιλης διεργασίας αποτελεί η αποτελεσματικότερη καταστροφή των παθογόνων μικροοργανισμών, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας, και η παραγωγή ενός ασφαλέστερου προϊόντος για εφαρμογή στο έδαφος (Erickson et al., 2004).

2.3.3 Αναερόβια χώνευση ενός σταδίου και δύο σταδίων

Λόγω του ότι η αναερόβια χώνευση είναι μία σύνθετη και πολυσταδιακή διεργασία, όπου απαιτείται η συνεργασία διαφόρων ομάδων μικροοργανισμών για την αποδόμηση της οργανικής ύλης και την παραγωγή βιοαερίου (Christensen, 2012), μπορεί να διαχωριστεί σε διάφορους αντιδραστήρες ώστε να βελτιστοποιηθούν οι συνθήκες λειτουργίας του κάθε σταδίου (Blumensaat & Keller, 2005). Στα επιμέρους στάδια μπορούν να διατηρούνται για παράδειγμα διαφορετικές τιμές pH και χρόνου παραμονής (Angelidaki et al., 2003). Η έννοια του διαχωρισμού της συμβατικής διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης (αναερόβια χώνευση ενός σταδίου), σε δύο διαφορετικά στάδια, είναι γνωστή ως αναερόβια χώνευση δύο σταδίων ή διφασική (δύο φάσεων), όπου αυτοί οι δύο όροι χρησιμοποιούνται συχνά και ισότιμα για να περιγραφεί η συγκεκριμένη τεχνολογία (Blumensaat & Keller, 2005). Παρόλο που θεωρητικά θα μπορούσαν να εφαρμοστούν περισσότερα από δύο στάδια, συνήθως δε χρησιμοποιούνται παραπάνω (Christensen, 2012).

Κατά την διεργασία αυτή, πραγματοποιείται διαχωρισμός της οξεογενούς και της μεθανογενούς φάσης. Με το τρόπο αυτό, καθίσταται εφικτός ο έλεγχος της ισορροπίας μεταξύ αυτών των δύο φάσεων, σημείο που αποτελεί και το κρίσιμο λειτουργικό στοιχείο της διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης (Κομίλης, 2023), ενώ παράλληλα προσφέρει αυξημένη σταθερότητα στις διαφορετικές ομάδες μικροοργανισμών και καλύτερο έλεγχο της διεργασίας σε σχέση με την αναερόβια χώνευση ενός σταδίου (Nasr et al., 2012). Συγκεκριμένα, ο πρώτος αντιδραστήρας λειτουργεί αποκλειστικά στη φάση της οξεογένεσης. Σε αυτή τη φάση, το pH μπορεί να φτάσει και κάτω του 5, ευνοώντας την παραγωγή οξέων και υδρογόνου, ενώ η παραγωγή βιοαερίου είναι πολύ περιορισμένη έως μηδενική. Έπειτα, έχοντας ελεγχόμενη και σταθερή παροχή, το υπόστρωμα του πρώτου χωνευτή (οξεογενής) μεταφέρεται στο δεύτερο (μεθανογενής) στοχεύοντας στη βέλτιστη παραγωγή βιοαερίου (Κομίλης, 2023).

Για την αναερόβια χώνευση των ΑΣΑ, χρησιμοποιούνται κυρίως συστήματα αντιδραστήρων ενός σταδίου (μονοβάθμια). Η παγκόσμια και μεγάλης κλίμακας εφαρμογή τους, οφείλεται

στο χαμηλό επενδυτικό κόστος και την χαμηλή λειτουργική τους πολυπλοκότητα (Cremonez et al., 2021). Παρόλο που πολλοί ερευνητές έχουν αποδείξει την υπεροχή των διβάθμιων συστημάτων έναντι των συμβατικών μονοβάθμιων (Blumensaat & Keller, 2005), ιδίως ως προς τη βελτιωμένη σταθερότητα της διεργασίας, τους υψηλότερους ρυθμούς φόρτισης και τη μεγαλύτερη ευελιξία τους, τα αποδυναμώνουν το υψηλό κόστος κατασκευής και λειτουργίας (Nasr et al., 2012), η πολυπλοκότητα και η αστάθεια λειτουργίας τους (Blumensaat & Keller, 2005).

2.4 Παραγόμενα προϊόντα

2.4.1 Υπόλειμμα χώνευσης (χώνευμα τύπου Α)

2.4.1.1 Χαρακτηριστικά χωνεύματος και διαχείριση

Η παραγόμενη ποσότητα και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του χωνεμένου υπολείμματος (χώνευμα) από την αναερόβια χώνευση του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ, εξαρτώνται άμεσα από τη σύσταση του υποστρώματος (πρώτη ύλη), τις λειτουργικές συνθήκες και την εξέλιξη της αναερόβιας χώνευσης εντός του χωνευτή, τη μικροβιακή κοινότητα και την μετεπεξεργασία του χωνεύματος (Mata-Alvarez et al., 2014). Η ποσότητα του παραγόμενου χωνεύματος από τη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης, αντιστοιχεί στο 70-90% της εισερχόμενης στον αντιδραστήρα μάζας ή στο 90-95% της εισερχόμενης ογκομετρικής παροχής αναλόγως του αν πρόκειται για ξηρή ή υγρή αναερόβια χώνευση (Czekala et al., 2022). Συγκεκριμένα, κατά τη ξηρή αναερόβια χώνευση του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ, παράγεται χώνευμα με περιεκτικότητα 30-40% σε στερεά (Kim & Oh, 2011) και συνεπώς δεν απαιτείται ο διαχωρισμός στερεής-υγρής φάσης, όπως συμβαίνει στην υγρή χώνευση (Logan & Visvanathan, 2019). Η υγρασία του χωνεύματος κυμαίνεται άνω του 90-95% και περίπου 60-70% όταν πρόκειται για υγρή και ξηρή χώνευση αντίστοιχα (Logan & Visvanathan, 2019). Στον Πίνακα 2.4.1 παρουσιάζονται τα τυπικά χαρακτηριστικά του χωνεύματος προερχόμενο από την αναερόβια χώνευση του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ.

Πίνακας 2.4.1: Τυπικά χαρακτηριστικά χωνεύματος προερχόμενο από την αναερόβια χώνευση οργανικού κλάσματος ΑΣΑ. Τροποποιήθηκε από: (Logan & Visvanathan, 2019).

Τύπος χωνεύματος	pH	TS (%)	VS (% TS)	TKN (% TS)	N-NH ₃ (g/L)	C/N	COD (g/g VS)
Συνολικό (υγρό + στερεό)	8,30	0,72-51,2	62,1	2,79-14	1,7-7,5	1,3-29,8	1,62
Υγρό	8,34-8,80	2,0-19,20	66,4	-	3,84	2,7	-
Στερεό	8,80	7,23-94,78	68,0-71,0	-	-	12,1-20,9	-

TS: Total Solids=Ολικά Στερεά, VS: Volatile Solids=Πτητικά Στερεά, TKN=Total Kjeldahl Nitrogen= Ολικό άζωτο κατά Kjeldahl, N-NH_3 : Αμμωνιακό Άζωτο, C/N: Carbon/Nitrogen=Άνθρακας/Άζωτο, COD: Chemical Oxygen Demand= Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο

Τα κανονιστικά πλαίσια καθιστούν υποχρεωτική την ορθολογική διαχείριση του χωνεύματος. Σύμφωνα με την ΚΥΑ 56366/4351 (ΦΕΚ 3339, 2014) για την παραγωγή χωνεύματος τύπου Α από την αναερόβια χώνευση των ΑΣΑ, θα πρέπει να επιτευχθεί $T \geq 55^\circ\text{C}$ συνεχόμενα για 24 h και το υλικό να παραμείνει τουλάχιστον 20 d στον αντιδραστήρα, ενώ εάν ο χρόνος παραμονής είναι μικρότερος, με κατώτατο όριο τις 14 d, ή η θερμοκρασία είναι χαμηλότερη, τότε θα πρέπει το υλικό να υποστεί θερμική επεξεργασία στους 70°C για 1 h, είτε ως στάδιο προ-επεξεργασίας είτε ως στάδιο μετά-επεξεργασίας. Εναλλακτικά, το προϊόν μπορεί να οδηγηθεί προς αερόβια κομποστοποίηση, καθώς αποτελεί εξαιρετική πρώτη ύλη χάρη στην περιεκτικότητά του σε οργανική ύλη, αλκαλικό pH, αφθονία θρεπτικών, αλλά και στη πορώδη δομή του (Czekala et al., 2023).

Το υγρό κλάσμα του χωνεύματος τύπου Α είναι πλούσιο σε μικροθρεπτικά (Fe, Mn, Cl, B, Ni, Zn, Mo) και μακροθρεπτικά στοιχεία (N, P, Mg, Ca, K, S) και μπορεί είτε να χρησιμοποιηθεί ως υγρό λίπασμα είτε να ανακυκλοφορηθεί στο χωνευτή για να ενισχύσει τη διεργασία της χώνευσης, όπως θα αναλυθεί παρακάτω. Το χώνευμα είναι ιδιαίτερα πλούσιο σε φώσφορο, άζωτο και κάλιο. Το υγρό κλάσμα περιέχει μεγαλύτερες ποσότητες αζώτου ενώ το στερεό μεγαλύτερες ποσότητες φωσφόρου και άνθρακα (οργανική ύλη). Κατά την αναερόβια χώνευση τα θρεπτικά στοιχεία του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ διατηρούνται αλλά παράλληλα μετατρέπονται σε ανόργανες μορφές που είναι εύκολα απορροφήσιμες από τα φυτά μέσω του χωνεύματος (Logan & Visvanathan, 2019).

Σύμφωνα με την ΚΥΑ 56366/4351 (ΦΕΚ 3339, 2014), το κομπόστ τύπου Α, προορίζεται κυρίως για περιβαλλοντικές και τεχνικές εφαρμογές. Ειδικότερα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εργασίες αποκατάστασης εδαφών, σε επιχώσεις, στην αποκατάσταση λατομείων και ΧΑΔΑ, σε έργα πρασίνου και οδοποιίας, καθώς και ως υλικό κάλυψης σε ΧΥΤΑ. Επιπλέον, προβλέπεται η χρήση του σε βιοφίλτρα για τη μείωση οσμών σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας αποβλήτων και λυμάτων.

Παράλληλα, εκτιμάται πως από τον τομέα του βιοαερίου παράγονται συνολικά 26 εκατ. τόνοι ξηρής ουσίας (χωνεύματος) που περιέχει 1,7 εκατ. τόνους ανόργανου αζώτου (TKN), 0,3 εκατ. τόνους φωσφόρου και 0,2 εκατ. τόνους καλίου. Με αυτό τον τρόπο, το χώνευμα που προκύπτει

από την παραγωγή του βιοαερίου, μπορεί να υποκαταστήσει μέρος των συνθετικών λιπασμάτων αζώτου, φωσφόρου και καλίου εντός της ΕΕ. Η συγκεκριμένη πρακτική περιορίζει την εξάρτηση από εισαγόμενα λιπάσματα, θωρακίζοντας τη στρατηγική αυτονομία και ενισχύοντας την επισιτιστική ασφάλεια με πιο βιώσιμες πρακτικές. (European Biogas Association, 2025).

2.4.2 Βιοαέριο

Ο όρος *βιοαέριο* αναφέρεται ως το εύφλεκτο αέριο μίγμα CH_4 και CO_2 , μαζί με ίχνη άλλων αερίων, το οποίο παράγεται μέσω της αναερόβιας αποδόμησης οργανικής ύλης. Πρόκειται για ένα καύσιμο αέριο με αξιόλογη θερμογόνο δύναμη. Εάν αναφλεγεί, καίγεται καθαρά χωρίς να παράγεται αιθάλη ή δυσάρεστες οσμές, παρομοιάζοντας την καύση του υγραερίου (LPG) και του συμπιεσμένου φυσικού αερίου (CNG) (Abbasi et al., 2011).

Η σύσταση του βιοαερίου διαφοροποιείται ανάλογα με το είδος της πρώτης ύλης που χρησιμοποιείται στην αναερόβια χώνευση καθώς με βάση τις συνθήκες λειτουργίας του αντιδραστήρα. Μια τυπική σύσταση βιοαερίου προερχόμενο από την αναερόβια χώνευση ΑΣΑ παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.4.2.

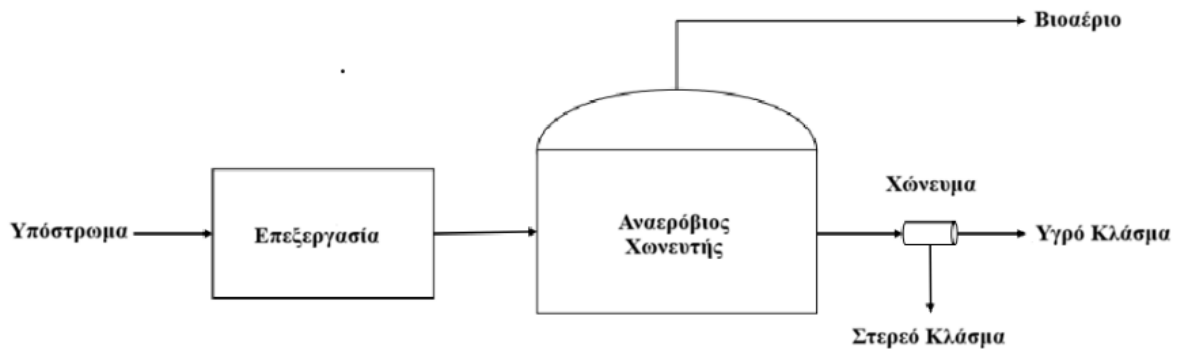
Πίνακας 2.4.2: Τυπική σύσταση βιοαερίου. Τροποποιήθηκε από: (Κομίλης, 2023).

Κύρια αέρια	% κατ' όγκο
Μεθάνιο (CH_4)	45-60
Διοξείδιο του Άνθρακα (CO_2)	40-60
Αζωτο (N_2)	2-5
Οξυγόνο (O_2)	0,1-1,0
Αμμωνία (NH_3)	0,1-1,0
Υδρογόνο (H_2)	0-0,2
Θειούχες οργανικές ενώσεις	0-1,0
Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)	0-0,2
Πτητικές οργανικές ενώσεις	mg/m^3
Τερπένια	2.000
Αλκοόλες	40
Εστέρες	3
Αιθέρες	3
Καρβονυλικές ενώσεις	30

Ανόργανες αέριες ενώσεις	
Οξείδια του αζώτου (NO _x)	20-30 mg/m ³
Διοξείδιο του θείου (SO ₂)	45 mg/m ³
Υδρόθειο (H ₂ O)	20-20.000 ppm
Αμμωνία (NH ₃)	20 mg/m ³
Μέταλλα	
Κάδμιο (Cd)	<0,002
Νικέλιο (Ni)	<0,004
Αρσενικό (As)	<0,008
Υδράργυρος (Hg)	<0,009
Άλλα χαρακτηριστικά	
Θερμογόνος δύναμη CH ₄	39,8 MJ/m ³ (11,06 kWh/m ³)
Ειδικό βάρος	0,85-1,002

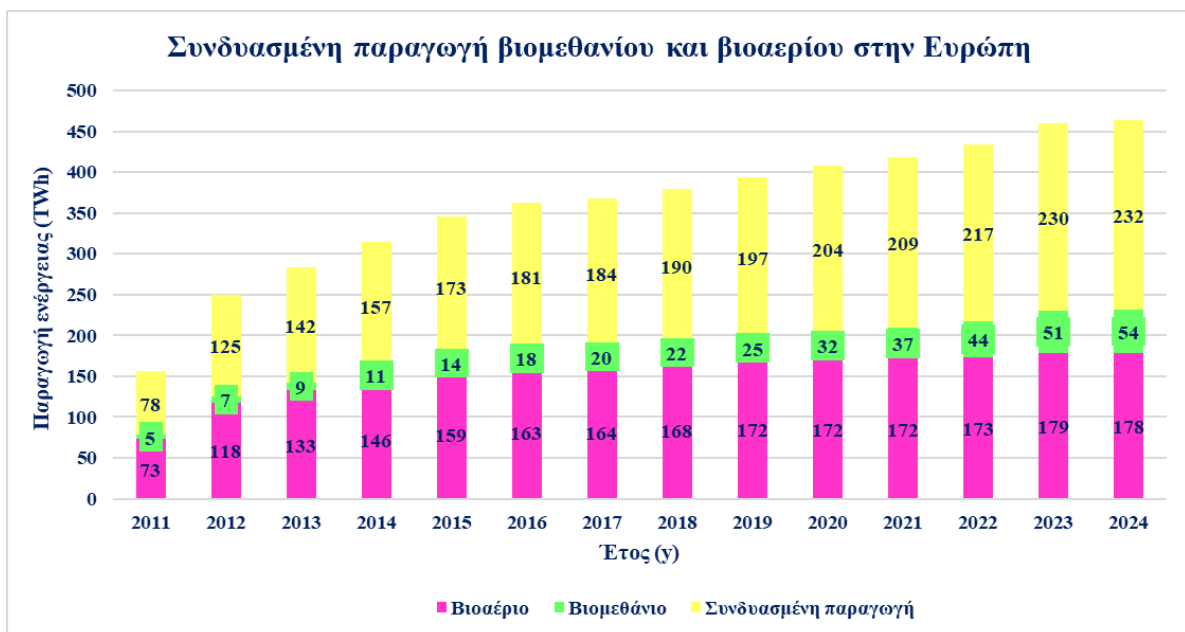
Συγκεκριμένα, το παραγόμενο μεθάνιο μπορεί να αξιοποιηθεί για την παραγωγή θερμότητας, που συνήθως χρησιμοποιείται για να διατηρηθεί ο αντιδραστήρας στις κατάλληλες θερμοκρασίες. Η παραγόμενη θερμότητα μπορεί ακόμη να χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη των θερμικών αναγκών σε γειτονικές βιομηχανικές ή αγροτικές εγκαταστάσεις. Παράλληλα, η χρήση του για ηλεκτροπαραγωγή συμβάλλει στον περιορισμό της κατανάλωσης συμβατικών καυσίμων. Το παραγόμενο ρεύμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ιδιοκατανάλωση, μειώνοντας έτσι το λειτουργικό ενεργειακό κόστος της μονάδας ή να διοχετευθεί προς πώληση στο τοπικό δίκτυο διανομής (Erickson et al., 2004).

Ακολούθως, στο Σχήμα 2.4.1 παρατίθεται ένα απλοποιημένο σχηματικό διάγραμμα αναερόβιας χώνευσης οργανικού κλάσματος ΑΣΑ.



Σχήμα 2.4.1: Απλοποιημένο διάγραμμα αναερόβιας χώνευσης οργανικού κλάσματος ΑΣΑ. Τροποποιήθηκε από (Logan & Visvanathan, 2019).

Στο ακόλουθο Γράφημα 2.4.1, παρουσιάζεται σε TWh η παραγωγή βιοαερίου, βιομεθανίου καθώς και η συνδυασμένη παραγωγή τους για τα έτη 2011 έως 2024. Ως βιομεθάνιο θεωρείται η αναβαθμισμένη μορφή του βιοαερίου (μετά από επεξεργασία), αποτελούμενο σχεδόν κατά 100% από μεθάνιο και έχοντας ποιότητα περίπου ισοδύναμη με αυτή του φυσικού αερίου (EBA, 2025).



Γράφημα 2.4.1: Συνδυασμένη παραγωγή βιοαερίου και βιομεθανίου στην Ευρώπη. Τροποποιήθηκε από: (EBA, 2025).

Όπως φαίνεται στο Γράφημα 2.4.1, η συνδυασμένη παραγωγή βιοαερίου και βιομεθανίου στην Ευρώπη το 2024 ανήλθε σε 232 TWh (περίπου 22 δισεκατομμύρια m^3), ποσότητα που

υπερβαίνει τη συνολική εγχώρια ζήτηση φυσικού αερίου του Βελγίου, της Δανίας και της Ιρλανδίας αθροιστικά, αντιπροσωπεύοντας το 6,6% της συνολικής κατανάλωσης φυσικού αερίου της ΕΕ, γεγονός που αναδεικνύει τη διαρκώς αυξανόμενη συμβολή τους στο ευρωπαϊκό ενεργειακό μείγμα (EBA, 2025).

Η εξέλιξη αυτή αναδεικνύει τη σημασία του βιοαερίου για την ενίσχυση της ενεργειακής αυτάρκειας της ΕΕ, δεδομένου ότι το 58,4% των καυσίμων που καταναλώθηκαν το 2023 προήλθε από εισαγωγές. Υπό αυτές τις συνθήκες, η παραγωγή και εμπορία βιοαερίου εντός της Ευρώπης μπορεί να περιορίσει την εξάρτηση από εξωτερικούς προμηθευτές και να ενισχύσει την ασφάλεια εφοδιασμού. Παράλληλα, ο συνδυασμός της διαχείρισης αποβλήτων με την παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας μέσω βιοαερίου προσφέρει σημαντικά περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη. Αφενός, συμβάλλει στη μείωση των εκπομπών μεθανίου από την ανοιχτή αποθήκευση κοπριάς και τους χώρους υγειονομικής ταφής, οι οποίοι συγκαταλέγονται στις σημαντικότερες πηγές εκπομπών μεθανίου στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Αφετέρου, καθιστά την επεξεργασία των αποβλήτων οικονομικότερη και ενεργειακά αποδοτικότερη (European Biogas Association, 2025).

3 Ξηρή Αναερόβια Χώνευση

3.1 Η ξηρή αναερόβια χώνευση ως κατάλληλη επιλογή για την επεξεργασία στερεών αποβλήτων

Η ξηρή αναερόβια χώνευση, θεωρείται η καταλληλότερη επιλογή για την επεξεργασία ποικίλων στερεών οργανικών αποβλήτων, όπως τα γεωργικά απόβλητα, τα πράσινα απόβλητα κήπων και το οργανικό κλάσμα των ΑΣΑ, είτε μέσω συγχώνευσης είτε ως μοναδικό υπόστρωμα. Τα ρεύματα αυτά παρουσιάζουν έντονη ετερογένεια στη σύσταση και τα χαρακτηριστικά ακόμα και όταν πρόκειται για το ίδιο είδος οργανικών αποβλήτων, γεγονός που επηρεάζει τις συνθήκες της διεργασίας και το παραγόμενο βιοαέριο (Rocamora et al., 2020).

Η ξηρή μονοσταδιακή χώνευση αποτελεί σημαντικό ορόσημο στην τεχνολογία της αναερόβιας χώνευσης καθώς μπορεί να επεξεργάζεται πρώτες ύλες με υψηλή περιεκτικότητα σε ολικά στερεά (TS=30-35%) και υψηλό οργανικό φορτίο (Organic Loading Rate-OLR), το οποίο μπορεί να φτάσει έως και $15 \text{ kgVS/m}^3\text{d}^{-1}$. Για τον λόγο αυτό, θεωρείται ιδιαίτερα κατάλληλη τεχνολογία για τη διαχείριση του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ και εφαρμόζεται ευρέως στην Ευρώπη (Van et al., 2020). Οι Li et al., 2011 επισημαίνουν ότι ένα βελτιστοποιημένο σύστημα ξηρής αναερόβιας χώνευσης μπορεί να επεξεργαστεί μεγαλύτερη ποσότητα αποβλήτων, ως προς την ξηρή μάζα, από ότι μια διεργασία υγρής χώνευσης αντίστοιχου μεγέθους. Επιπλέον, η ξηρή αναερόβια χώνευση χαρακτηρίζεται από αυξημένη λειτουργική ανθεκτικότητα κατά την επεξεργασία υποστρωμάτων υψηλής περιεκτικότητας σε στερεά και ανομοιογενούς σύστασης, καθώς απαιτεί μικρότερη αραίωση και μπορεί να διαχειριστεί αποτελεσματικότερα στερεά οργανικά απόβλητα (Luning et al., 2003; Hayyat et al., 2024). Παράλληλα, παράγονται μικρότερες ποσότητες υπολειμματικών υγρών αποβλήτων, ενώ η λειτουργία της σε υψηλό OLR επιτρέπει τη χρήση μικρότερων αντιδραστήρων (Van et al., 2020). Επίσης, χάρη στην τεχνική της απλότητας, τις περιορισμένες απαιτήσεις σε νερό αλλά και την ικανότητά της να επιτυγχάνει υψηλή και αποδοτική παραγωγή βιοαερίου, παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα στην επεξεργασία ιδιαίτερα βιοαποδομήσιμων αποβλήτων (Karthikeyan & Visvanathan, 2013).

3.2 Τύποι Αντιδραστήρων

Τα συστήματα ξηρής αναερόβιας χώνευσης μπορούν να διακριθούν σε συστήματα συνεχούς και ασυνεχούς λειτουργίας ή διαλείποντος έργου (batch) (Van et al., 2020). Οι πλέον πιο διαδεδομένες τεχνολογίες την Ευρώπη που έχουν εφαρμοστεί είναι τα συστήματα Kompogas, Valorga, Dranco (Li et al., 2011b) και Biocell (βιοκελιά) (Van et al., 2020), οι οποίες επεξεργάζονται κυρίως ΑΣΑ, πράσινα απόβλητα και απόβλητα κουζίνας (Li et al., 2011b).

3.2.1 Συνεχούς λειτουργίας

Οι αντιδραστήρες συνεχούς λειτουργίας βασίζονται στην τακτική εισαγωγής αποβλήτων και παράλληλης απομάκρυνσης αντίστοιχης ποσότητας χωνεμένου υποστρώματος. Τα συστήματα αυτά διαμορφώνονται κατά κανόνα ως αντιδραστήρες εμβολοειδούς ροής (plug-flow reactors-PFR), όπου το υλικό στο εσωτερικό του χωνευτήρα δεν υφίσταται πλήρη ανάδευση, αλλά προωθείται σταδιακά από την είσοδο προς την έξοδο ως συνεκτική μάζα. Η συγκεκριμένη αρχή λειτουργίας προϋποθέτει τη χρήση ανθεκτικού μηχανολογικού εξοπλισμού, ο οποίος να μπορεί να επεξεργάζεται ξηρά υποστρώματα υψηλού ιξώδους και χαμηλής ρευστότητας (Li et al., 2011b).

Οι αντιδραστήρες συνεχούς ξηρής αναερόβιας χώνευσης, σε αντίθεση με τους υγρούς αναερόβιους αντιδραστήρες, δε διαθέτουν σύστημα ανάδευσης στο εσωτερικό τους. Πριν την τροφοδοσία, το νέο υπόστρωμα αναμιγνύεται εκτός του αντιδραστήρα με το ήδη χωνευμένο υλικό (Rocamora et al., 2022). Οι αντιδραστήρες αυτού του είδους λειτουργούν συνήθως με περιεκτικότητα στερεών μεγαλύτερη από 20%, επειδή σε μικρότερες συγκεντρώσεις εμφανίζεται συχνά καθίζηση και συσσώρευση ιζημάτων στο εσωτερικό τους (Li et al., 2011b). Τα συστήματα Kompogas, Valorga και Dranco λειτουργούν συνήθως ως μονοβάθμια συστήματα συνεχούς λειτουργίας σε θερμοφίλες ή μεσόφιλες θερμοκρασίες, με περιεκτικότητα TS 20-40% και απόδοση βιοαερίου 0,3-0,5 m³/kgVS (Li et al., 2011b).

Σημαντικά πλεονεκτήματα των συστημάτων συνεχούς λειτουργίας είναι η χαμηλή κατανάλωση νερού, η πολύ μικρή παραγωγή υγρών αποβλήτων, η οικονομική προεπεξεργασία, ο μικρός όγκος αντιδραστήρα, η δυνατότητα αξιοποίησης των υπολειμμάτων για τη διεργασία της κομποστοποίησης και οι σχετικά χαμηλές απαιτήσεις σε θερμότητα (Van et al., 2020).

3.2.2 Ασυνεχούς λειτουργίας (batch)

Σήμερα, η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη τεχνολογία για τη διεργασία της ξηρής αναερόβιας χώνευσης είναι η λειτουργία batch. Η ευρεία χρήση της αποδίδεται κυρίως στην απλούστερη λειτουργία της έναντι των συστημάτων συνεχούς λειτουργίας και στην ομοιότητά της με τη διεργασία της κομποστοποίησης εντός κλειστού θαλάμου (in-vessel composting), της οποίας η τεχνογνωσία είναι γνωστή και οικεία στους διαχειριστές αποβλήτων και στους αγρότες (Karthikeyan & Visvanathan, 2013). Οι αντιδραστήρες batch λειτουργούν συνήθως σε υψηλές συγκεντρώσεις TS, οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ 30–40%, παρουσιάζοντας αποδόσεις παραγωγής μεθανίου της τάξης των 0,2–0,5 m³/ kgVS (Rocamora et al., 2022).

Στους αντιδραστήρες batch, όλα τα απόβλητα εισάγονται ταυτόχρονα (Meegoda et al., 2018), όπου συνήθως με τη χρήση φορτωτή εμπρόσθιας φόρτωσης, το εισερχόμενο υλικό συνήθως εμβολιάζεται με χωνευμένο υλικό (inoculum=εμβόλιο) προερχόμενο από προηγούμενη παρτίδα (Rocamora et al., 2022), διασφαλίζοντας ότι το νέο υπόστρωμα (substrate) να εφοδιαστεί με τους απαραίτητους μικροβιακούς πληθυσμούς. Στη συνέχεια, ο αντιδραστήρας κλείνει αεροστεγώς και οι τέσσερις διεργασίες παραγωγής βιοαερίου λαμβάνουν χώρα διαδοχικά μέσα στον ίδιο αντιδραστήρα. Με την ολοκλήρωση μιας ορισμένης περιόδου ή με τη διακοπή της παραγωγής βιοαερίου, ο αντιδραστήρας θα ανοίξει και το χωνευμένο υλικό θα απομακρυνθεί (Meegoda et al., 2018). Για να αντισταθμιστεί η απουσία ανάδευσης του υλικού, το στραγγισμένο υγρό του στερεού μίγματος (διήθημα/ στράγγισμα) που συλλέγεται από τον αντιδραστήρα, μπορεί να προστεθεί/ ανακυκλοφορηθεί στην κορυφή του μίγματος (εμβόλιο και υπόστρωμα). Αυτό θα βοηθήσει να βελτιωθεί η ομογενοποίηση του συστήματος και να μειωθεί η αρχική απαιτούμενη ποσότητα στερεού εμβολίου μέσω της αναερόβιας μικροβιακής βιομάζας που περιέχει (Rocamora et al., 2022). Τα συστήματα ασυνεχούς λειτουργίας, σε σχέση με τα συνεχούς, έχουν χαμηλότερο επενδυτικό και λειτουργικό κόστος. Ωστόσο, απαιτούν πολύ μεγαλύτερο χώρο και η παραγωγή βιοαερίου είναι μεταβαλλόμενη (Van et al., 2020).

Σήμερα, το επικρατέστερο σύστημα λειτουργίας batch στην Ευρώπη είναι ο χωνευτής τύπου “garage”, ο οποίος λειτουργεί με ανακυκλοφορία του διηθήματος/ στραγγίσματος. Στο συγκεκριμένο σύστημα, το στράγγισμα διαπερνά τη μάζα του υποστρώματος και συλλέγεται μέσω δικτύου αποστράγγισης που βρίσκεται στο δάπεδο του αντιδραστήρα. Έπειτα, αποθηκεύεται σε ξεχωριστή δεξαμενή και επαναδιοχετεύεται μέσω του δικτύου

ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων που βρίσκεται στην οροφή του χωνευτή, όπου ψεκάζεται πάνω στο υλικό χώνευσης όποτε απαιτείται, με στόχο τη διατήρηση κατάλληλων συνθηκών υγρασίας και τη βελτίωση της διεργασίας (Rocamora, 2020).

Σήμερα, η παγκόσμια αγορά προσφέρει διάφορα συστήματα τόσο συνεχούς λειτουργίας, όπως τα συστήματα Kompogas, Valorga και Dranco, όσο και ασυνεχούς, όπως τα Bekon, Bioferm και Sebac. Τα συστήματα αυτά λειτουργούν σε εύρος περιεκτικότητας TS που κυμαίνεται από 20 έως 60%, και OLR που μπορεί να φτάσει έως και 15 kgVS/m³·d, με την απόδοση παραγωγής μεθανίου να διαφοροποιείται ανάλογα με το είδος του υποστρώματος τροφοδοσίας και τις συνθήκες λειτουργίας (Rocamora, 2020).

3.3 Εφαρμογές ξηρής αναερόβιας χώνευσης σε οργανικό κλάσμα ΑΣΑ στην Ευρώπη

Στην Ευρώπη, έχουν πραγματοποιηθεί ανά τα χρόνια πολλές εφαρμογές ξηρής αναερόβιας χώνευσης για την επεξεργασία του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ. Οι πρώτες εφαρμογές επικεντρώθηκαν κυρίως στη διερεύνηση της λειτουργικής σταθερότητας της διεργασίας υπό συνθήκες υψηλής περιεκτικότητας στερεών, καθώς και στην αξιολόγηση της δυνατότητας παραγωγής βιοαερίου από οργανικά αστικά απόβλητα. Για παράδειγμα οι Bolzonella et al., 2003 μελέτησαν θερμοφίλη ημι-ξηρή αναερόβια χώνευση OFMSW στους 55 °C κατά τη φάση εκκίνησης της διεργασίας. Η λειτουργία του συστήματος παρουσίασε σταδιακή σταθεροποίηση μετά την περίοδο προσαρμογής των μικροοργανισμών, ενώ η μέγιστη παραγωγή μεθανίου έφτασε περίπου τα 0,32 m³ CH₄/kgVS, επιβεβαιώνοντας τη δυνατότητα εφαρμογής της θερμοφίλης αναερόβιας χώνευσης για την ενεργειακή αξιοποίηση οργανικών αστικών αποβλήτων. Αντίστοιχα, οι Forster-Carneiro et al., 2008, αξιολόγησαν batch θερμοφίλη ξηρή αναερόβια χώνευση οργανικού κλάσματος ΑΣΑ σε αντιδραστήρες χωρητικότητας των 5 L και συνθήκες 20% TS και θερμοκρασία λειτουργίας 55 °C, χρησιμοποιώντας τόσο προδιαλεγμένο οργανικό κλάσμα όσο και οργανικό υλικό από μηχανική διαλογή σύμμεικτων αποβλήτων. Η μελέτη έδειξε ότι η απομάκρυνση πτητικών στερεών έφτασε έως 56%, ενώ η συνολική παραγωγή βιοαερίου κυμάνθηκε μεταξύ 82 και 120 L. Οι διεργασίες και των δύο υποστρωμάτων ολοκληρώθηκαν επιτυχώς σε λιγότερο από 60 d, με υψηλή αθροιστική παραγωγή μεθανίου (25-30 L). Το μηχανικά διαχωρισμένο οργανικό κλάσμα παρουσίασε μεγαλύτερη βιοαποδόμηση παρόλο που παρήγαγε μικρότερο όγκο

βιοαερίου (82 L έναντι 120 L του προδιαλεγμένου οργανικού), αναδεικνύοντας τη σημαντική επίδραση της ποιότητας του υποστρώματος στην απόδοση της διεργασίας. Ακόμη, σε επίπεδο συνεχούς ξηρής αναερόβιας χώνευσης, οι De Baere & Mattheeuws, 2013 μελέτησαν τη λειτουργία βιομηχανικών μονάδων τεχνολογίας Dranco και Kompogas στην Ευρώπη για την επεξεργασία οργανικού κλάσματος ΑΣΑ με περιεκτικότητα στερεών 20–40%. Οι μονάδες αυτές λειτουργούσαν με υψηλά οργανικά φορτία και παρήγαγαν περίπου 100–200 m³ biogas/tn οργ. αποβλ., ενώ οι αποδόσεις μεθανίου κυμαίνονταν μεταξύ 0,20 και 0,35 m³ CH₄/kgVS, επιβεβαιώνοντας τη δυνατότητα εφαρμογής της συνεχούς ξηρής αναερόβιας χώνευσης σε μεγάλη κλίμακα για ενεργειακή αξιοποίηση του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ.

Από την άλλη, οι πιο πρόσφατες ερευνητικές εφαρμογές ξηρής αναερόβιας χώνευσης του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ, εστιάζουν κυρίως στη βελτιστοποίηση της παραγωγής μεθανίου και στη βελτίωση της αποδοτικότητας της διεργασίας μέσω ελέγχου διαφόρων παραμέτρων της διεργασίας, όπως η θερμοκρασία λειτουργίας, ο λόγος C/N, το υπόστρωμα, ο λόγος I/S, η αναστολή από αμμωνία και VFAs, ο λόγος L/S και η ανακυκλοφορία στραγγισμάτων. Οι Rossi et al., 2022 στην Ιταλία, μελέτησαν τη θερμοφιλή ξηρή αναερόβια χώνευση του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ σε αντιδραστήρα συνεχούς τύπου plug-flow, με περιεκτικότητα ολικών στερεών περίπου 42% και οργανικό φορτίο έως 12,7 kgVS/m³·d. Οι ερευνητές εξέτασαν διαφορετικές στρατηγικές τροφοδοσίας για τη μείωση της αναστολής από NH₃ και διαπίστωσαν ότι η βελτιστοποίηση του λόγου C/N οδήγησε σε μείωση της συγκέντρωσης αμμωνίας κατά 72% και σε αυξημένη παραγωγή βιοαερίου, επιτυγχάνοντας ειδική παραγωγή 0,361 Nm³/kgVS. Επιπλέον, οι Basinas et al., 2021 μελέτησαν τη μεσόφιλη και θερμοφιλή ξηρή αναερόβια χώνευση μηχανικά διαχωρισμένου οργανικού κλάσματος ΑΣΑ σε συστήματα υψηλής περιεκτικότητας στερεών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η θερμοφιλή λειτουργία παρουσίασε υψηλότερη παραγωγή μεθανίου, φτάνοντας έως 0,29 m³ CH₄/kgVS, συγκριτικά με τη μεσόφιλη διεργασία, ενώ παράλληλα εμφάνισε αυξημένη ευαισθησία σε συσσώρευση πτητικών λιπαρών οξέων σε υψηλά οργανικά φορτία, με τους ερευνητές να καταλήγουν στο ότι η θερμοκρασία λειτουργίας και το οργανικό φορτίο επηρεάζουν σημαντικά τη σταθερότητα και την αποδοτικότητα της ξηρής αναερόβιας χώνευσης του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ.

3.4 Εφαρμογές στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα, η εφαρμογή της ξηρής αναερόβιας χώνευσης του οργανικού κλάσματος αστικών στερεών αποβλήτων παραμένει ακόμη περιορισμένη τόσο σε ερευνητικό όσο και σε βιομηχανικό επίπεδο συγκριτικά με άλλες ευρωπαϊκές χώρες. Η σημαντικότερη εφαρμογή αφορά τη Μονάδα Επεξεργασίας Απορριμμάτων (ΜΕΑ) Ηπείρου, όπου εφαρμόστηκε για πρώτη φορά στην Ελλάδα ξηρή αναερόβια χώνευση του οργανικού κλάσματος ΑΣΑ με χρήση αντιδραστήρα εμβολοειδούς ροής (plug-flow reactor). Οι αντιδραστήρες λειτουργούν με μέση φόρτιση περίπου 37 tn/d έκαστος και χρόνο παραμονής περίπου 34 d, ο οποίος κρίθηκε ευνοϊκός για τη βελτίωση της χώνευσης δύσκολα βιοδιασπώμενων υλικών και την αύξηση της παραγωγής βιοαερίου. Επιπλέον, η ετήσια δυναμικότητα ενεργειακής αξιοποίησης του παραγόμενου βιοαερίου ανέρχεται περίπου σε 12,362 MWh ηλεκτρικής ενέργειας, αναδεικνύοντας τη δυνατότητα εφαρμογής της ξηρής αναερόβιας χώνευσης OFMSW σε βιομηχανική κλίμακα υπό ελληνικές συνθήκες (Χαραλαμπίδης, 2021).

Παράλληλα, στην ελληνική βιβλιογραφία συναντώνται κυρίως τεχνοοικονομικές μελέτες και αξιολογήσεις δυναμικού εφαρμογής της ξηρής αναερόβιας χώνευσης. Για παράδειγμα, η Tsachidou, 2023 διερεύνησε τον ρόλο της αναερόβιας χώνευσης στη διαχείριση οργανικών αποβλήτων στην Ελλάδα, παρουσιάζοντας εφαρμογές παραγωγής βιοαερίου και βιολιπάσματος από οργανικά απόβλητα στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας. Η μελέτη ανέδειξε τη συμβολή της αναερόβιας χώνευσης στη μείωση της ταφής βιοαποβλήτων και στην ενεργειακή αξιοποίησή τους, επισημαίνοντας παράλληλα την ανάγκη περαιτέρω ανάπτυξης αντίστοιχων εγκαταστάσεων στη χώρα. Ακόμη, η Karalis, 2021, διερεύνησε τη δυνατότητα εφαρμογής θερμοφίλης ξηρής αναερόβιας χώνευσης προδιαλεγμένου οργανικού κλάσματος ΑΣΑ στην Αττική μέσω τεχνοοικονομικής μελέτης μεγάλης κλίμακας. Η διεργασία σχεδιάστηκε να λειτουργεί στους 55 °C με 35% TS και HRT 16 d, παρουσιάζοντας οργανικό φορτίο 11,7 kgVS/m³·d. Τα αποτελέσματα έδειξαν μέση παραγωγή βιοαερίου περίπου 194 m³/t νωπού υποστρώματος και απόδοση μεθανίου 0,424 m³CH₄/kgVS ενώ παράλληλα, η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εκτιμήθηκε περίπου στις 13,147 MWh καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι η θερμοφίλη ξηρή αναερόβια χώνευση μπορεί να αποτελέσει αποδοτική λύση ενεργειακής αξιοποίησης του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ για τα ελληνικά δεδομένα.

3.5 Παράμετροι που επηρεάζουν την απόδοση της ξηρής αναερόβιας χώνευσης

3.5.1 Χαρακτηριστικά πρώτης ύλης

3.5.1.1 Σύσταση

Η πραγματική απόδοση της διεργασίας και τελικά, η παραγωγή βιοαερίου στηρίζεται σημαντικά στη σύσταση του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ (Rapport et al., 2012). Όπως έχει ήδη αναφερθεί, παρά την εύκολη διαθεσιμότητα του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ και την αυξητική του τάση, το εν λόγω ρεύμα παρουσιάζει μεγάλη ετερογένεια, με σημαντικές διακυμάνσεις στη σύστασή του ανάλογα με την περιοχή συλλογής των αποβλήτων και την εποχή του έτους. Η σύστασή του ακόμη επηρεάζεται από τον τρόπο συλλογής των αποβλήτων, όπου τα οργανικά απόβλητα που διαχωρίζονται στην πηγή (Προδιαλεγμένα Οργανικά Απόβλητα-ΠΟΑ), διαφέρουν στα χαρακτηριστικά τους από εκείνα που διαχωρίζονται με μηχανικά μέσα και τα οποία περιέχουν περισσότερους ρύπους και αδρανή υλικά όπως πέτρες, πλαστικά και γυαλί (Rocamora et al., 2020).

Σε σχετική μελέτη, οι Forster-Carneiro et al., 2008 συνέκριναν σε εργαστηριακούς αντιδραστήρες την αναερόβια χώνευση μηχανικά διαχωρισμένου οργανικού κλάσματος ΑΣΑ προερχόμενο από μονάδα διαχείρισης αποβλήτων στην Ισπανία και προδιαλεγμένου οργανικού κλάσματος προερχόμενο από εστιατόριο. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το μηχανικά διαχωρισμένο οργανικό κλάσμα παρουσίασε χαμηλότερο λόγο C/N που είναι απαραίτητος για την ανάπτυξη και διατήρηση της βιομάζας, συμβάλλοντας στη διατήρηση σταθερότερου pH και δημιουργώντας ευνοϊκότερες συνθήκες για τη μικροβιακή δραστηριότητα. Παράλληλα, το μηχανικά διαχωρισμένο είχε υψηλότερη βιοαποδομησιμότητα χάρη στην χαμηλότερη περιεκτικότητα σε διαλυμένο οργανικό άνθρακα. Επίσης, το μηχανικά διαχωρισμένο παρουσίασε μεθανογόνο συμπεριφορά καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος, χωρίς εμφανή διάκριση των φάσεων της αναερόβιας χώνευσης, σε αντίθεση με το προδιαλεγμένο κλάσμα που παρουσίασε μεγαλύτερη περίοδο εκκίνησης και ακολούθησε το κλασικό πρότυπο διαδοχικών σταδίων αποδόμησης.

Ωστόσο, αν και το προδιαλεγμένο οργανικό κλάσμα θεωρείται παραδοσιακά καταλληλότερο υπόστρωμα για αναερόβια χώνευση λόγω της υψηλότερης καθαρότητας του υλικού, οι Bolzonella et al., 2006 έδειξαν ότι και το μηχανικά διαχωρισμένο οργανικό κλάσμα μπορεί να αξιοποιηθεί αποτελεσματικά, παρά την παρουσία μεγαλύτερου ποσοστού προσμίξεων και αδρανών υλικών. Το εύρημα αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για περιοχές όπου η διαλογή στην

πηγή δεν εφαρμόζεται εκτεταμένα και η ανάκτηση οργανικού κλάσματος πραγματοποιείται κυρίως μέσω μηχανικών συστημάτων διαχωρισμού.

Προκειμένου το οργανικό κλάσμα των σύμμεικτων ΑΣΑ να καταστεί κατάλληλο για βιολογική επεξεργασία, κρίνεται απαραίτητη η εφαρμογή μιας σειράς σταδίων προετοιμασίας και διαλογής, όπως απομάκρυνση ογκωδών αντικειμένων και μηχανική επεξεργασία του υλικού. Οι τεχνολογίες διαχωρισμού εκμεταλλεύονται τις διαφορές στις φυσικές ιδιότητες των υλικών που περιέχονται στα απόβλητα, όπως το μέγεθος, το σχήμα, η πυκνότητα, το βάρος, ο μαγνητισμός και η ηλεκτρική αγωγιμότητα. Η αξιοποίηση των χαρακτηριστικών αυτών επιτρέπει τον αποτελεσματικό διαχωρισμό των διαφόρων κλασμάτων και την ανάκτηση υλικών ή του οργανικού κλάσματος για περαιτέρω επεξεργασία και διαφέρει ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε εγκατάστασης (Defra, 2013).

Ακόμη, η σύσταση των ΑΣΑ, μπορεί να διαφέρει σημαντικά τόσο μεταξύ χωρών όσο και μεταξύ περιοχών της ίδιας χώρας. Σε αστικές και πυκνοδομημένες περιοχές, η σύσταση των ΑΣΑ περιέχει λιγότερο οργανικό κλάσμα σε σχέση με τις αγροτικές περιοχές ενώ σημαντικό ρόλο στη μεταβολή της σύστασής τους διαδραματίζει το κοινωνικό επίπεδο της περιοχής (Angelidaki et al., 2003). Επίσης, οι Denafas et al., 2014 διερεύνησαν την παραγωγή και τη σύσταση των αστικών στερεών αποβλήτων σε τέσσερις πόλεις της Ανατολικής Ευρώπης κατά τη διάρκεια διαφορετικών εποχών του έτους και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ποσοστιαία συμμετοχή των επιμέρους κλασμάτων των αποβλήτων μεταβαλλόταν εποχικά, με διαφοροποιήσεις να καταγράφονται στα οργανικά υλικά, στο χαρτί, στα πλαστικά και σε άλλα ρεύματα αποβλήτων. Οι συγγραφείς κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τόσο η παραγωγή όσο και η σύσταση των ΑΣΑ παρουσιάζουν εποχική μεταβλητότητα.

Η απόδοση σε βιοαέριο από το οργανικό κλάσμα των ΑΣΑ, κυμαίνεται από 60 έως 200 m³/tn, ενώ η παραγωγή CH₄ κυμαίνεται από 0,13 έως 0,4 m³/kg VS, με τα ΠΟΑ να παρουσιάζουν υψηλότερη απόδοση βιοαερίου από το διαχωριζόμενο με μηχανικά μέσα κλάσμα των ΑΣΑ (Li et al., 2011b). Το εύρος του δυναμικού μεθανίου δείχνει τη σημασία της σωστής χαρακτηριστικοποίησης της πρώτης ύλης για τη βελτιστοποίηση της διεργασίας (αποδόμηση στερεών και παραγωγή μεθανίου), με τη γνώση της σύστασης του υποστρώματος και την επιλογή κατάλληλων υλικών για συγχώνευση να βοηθούν σε προβλήματα αναστολής και τελικά στη βελτιστοποίηση της διεργασίας (Rocamora et al., 2020). Για παράδειγμα, οι André et al., 2019, αύξησαν την απόδοση μεθανίου από 0,20 m³/kg VS και 0,17 m³/kg VS σε 0,23

m³/kg VS όταν έβαλαν για συγχώνευση σε πιλοτικό αντιδραστήρα με ανακυκλοφορία στραγγισμάτων, 60% κοπριά βοοειδών και 40% χόρτα από παρυφές δρόμων αντίστοιχα.

3.5.1.2 Αναλογία C/N

Ο ολικός οργανικός άνθρακας (Total Organic Carbon-TOC), το ολικό άζωτο (Total Nitrogen-TN) και ο μεταξύ τους λόγος, είναι κρίσιμες παράμετροι για την ομαλή διεργασία της αναερόβιας χώνευσης και απαιτείται ένας βέλτιστος λόγος C/N (Kothari et al., 2014). Ο λόγος C/N επηρεάζεται σημαντικά η σταθερότητα της διεργασίας, καθώς συμβάλλει τόσο στη διατήρηση κατάλληλου περιβάλλοντος όσο και στη σωστή θρεπτική ισορροπία για να μπορέσουν να αναπτυχθούν οι μικροοργανισμοί (C. Zhang et al., 2014). Το άζωτο προέρχεται κυρίως από τις πρωτεΐνες και είναι απαραίτητο για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών (Rocamora et al., 2020) με την ανάπτυξή τους να επιβραδύνεται όταν η ποσότητά του είναι χαμηλή και να απαιτείται περισσότερος χρόνος για την αποδόμηση του υποστρώματος, οδηγώντας σε χαμηλότερη παραγωγή μεθανίου. Σε μεγαλύτερες ποσότητες αζώτου από αυτές που απαιτούν οι μικροοργανισμοί (μ.ο.), μπορεί να προκληθεί αναστολή λόγω αμμωνίας και να εμποδιστεί και πάλι η μικροβιακή ανάπτυξη (Kothari et al., 2014; Leung & Wang, 2016). Έχει διαπιστωθεί πως οι μ.ο. καταναλώνουν 25-35 φορές πιο γρήγορα τον άνθρακα από ότι το άζωτο κατά τη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης και για αυτό, ο βέλτιστος C/N του υποστρώματος προτείνεται να κυμαίνεται μεταξύ 20:1 και 35:1, με πιο συχνά αποδεκτό το εύρος 20-30:1 (Pramanik et al., 2019). Συνήθη πρακτική αποτελεί η προσθήκη υποστρωμάτων για συγχώνευση, με σκοπό την επίτευξη σταθερότητας (Karthikeyan & Visvanathan, 2013) και βέλτιστων λόγων C/N 20-30:1 (Bouallagui et al., 2009). Για τη βελτίωση του C/N προτείνεται η προσθήκη για συγχώνευση υποστρωμάτων όπως η λιγνοκυτταρινούχα βιομάζα, η ιλύς λυμάτων και η ζωική κοπριά (Khalid et al., 2011) όπως και απορρίμματα χαρτιού και γεωργικά απόβλητα (Li et al., 2011b). Για παράδειγμα, οι Zeshan et al. κατάφεραν να μειώσουν την αμμωνία στο χωνευμένο υπόλειμμα κατά 30% με μίγμα πράσινων αποβλήτων και χαρτιού, απόβλητα τροφίμων, σε πιλοτικό θερμόφιλο αναερόβιο χωνευτή, καθώς ο λόγος C/N αυξήθηκε από 27 σε 32 (Zeshan et al., 2012).

3.5.1.3 Ολικά στερεά

Το γεγονός ότι η ξηρή αναερόβια χώνευση λειτουργεί σε υψηλότερη περιεκτικότητα TS σε σχέση με την υγρή επιτρέπει την επεξεργασία μεγαλύτερης ποσότητας αποβλήτων ανά μονάδα

όγκου αντιδραστήρα. Ωστόσο, λόγω της υψηλής συγκέντρωσης στερεών στο σύστημα της ξηρής, εμφανίζονται συχνά ορισμένοι περιορισμοί που αφορούν στη χαμηλότερη παραγωγή CH_4/kgVS σε σχέση με την υγρή και τη συσσώρευση ανασταλτικών ενώσεων. Παράλληλα, η χαμηλή περιεκτικότητα σε νερό, δημιουργεί προβλήματα διάχυσης αερίων και υγρών. Πολλές μελέτες δείχνουν πως η αύξηση της περιεκτικότητας σε νερό βοηθά την αύξηση παραγωγής μεθανίου καθώς βελτιώνεται η ομογενοποίηση του περιεχομένου του αντιδραστήρα, ενισχύεται η αλληλεπίδραση των μ.ο. με τα θρεπτικά συστατικά, μειώνονται τα προβλήματα διάχυσης και αραιώνονται οι πιθανοί αναστολείς που μειώνουν τη διαθεσιμότητα του υποστρώματος στους μ.ο. (Rocamora et al., 2020).

3.5.2 Λειτουργικές παράμετροι

Οι διάφορες ομάδες μ.ο. που συμμετέχουν στην αναερόβια χώνευση, απαιτούν για την ανάπτυξή τους ένα σταθερό και ισορροπημένο περιβάλλον, όπου αυτό συμβαίνει όταν βρίσκονται υπό κατάλληλες συνθήκες ανάπτυξης. Αντίθετα, διάφορες μεταβολές στο περιβάλλον τους εντός του αντιδραστήρα μπορούν να μειώσουν την απόδοσή τους ή ακόμα και να οδηγήσουν σε παύση της διεργασίας. Για αυτό το λόγο, λειτουργικές παράμετροι της ξηρής αναερόβιας χώνευσης, όπως η θερμοκρασία, το pH αλλά και η συγκέντρωση αναστολέων, όπως τα VFAs και η αμμωνία, στα οποία έχει γίνει ήδη αναφορά ανωτέρω, πρέπει να παρακολουθούνται συστηματικά και να διατηρούνται εντός των βέλτιστων ορίων λειτουργίας (Pramanik et al., 2019). Επίσης, ορισμένες από τις τυπικές παραμέτρους που ενδέχεται να επηρεάσουν την αναερόβια χώνευση είναι η περιεκτικότητα σε πτητικά στερεά (VS), το μέγεθος των σωματιδίων του προς χώνευση υλικού, οι τοξικές ουσίες, ο χρόνος παραμονής του υλικού εντός του αντιδραστήρα κ.ά. (Leung & Wang, 2016).

3.5.3 Έλεγχος της διεργασίας

Οι κρίσιμες παράμετροι που επηρεάζουν μια διεργασία αναερόβιας χώνευσης διαφέρουν ανάλογα με το αν η διεργασία είναι συνεχής ή ασυνεχής. Για παράδειγμα, για τη συνεχή διεργασία, οι παράμετροι που εξετάζονται συνήθως είναι ο OLR και η ανάδευση καθώς θεωρούνται οι βασικές αρχές σχεδιασμού των συνεχών διεργασιών. Από την άλλη, στην ασυνεχή διεργασία, η οποία αποτελεί το επίκεντρο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, εξετάζεται το εμβόλιο, τα χαρακτηριστικά της κλίνης και η ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων αφού η εκκίνηση της διεργασίας επηρεάζεται καθοριστικά από τον λόγο

εμβόλιο/υπόστρωμα (inoculum/ substrate-I/S), ενώ παράλληλα η δομή της κλίνης και η ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους για τη βελτίωση της ομοιογένειας (Rocamora et al., 2020).

3.5.3.1 Διεργασία παρτίδας (batch)

3.5.3.1.1 Εμβόλιο

Στην αρχή της ασυνεχούς διεργασίας αναερόβιας χώνευσης, γίνεται προσθήκη «εμβολίου» ώστε να παροχετευθεί στο νέο υπόστρωμα ο απαραίτητος μικροβιακός πληθυσμός και να επιταχυνθεί η περίοδος εκκίνησης της διεργασίας (Rocamora et al., 2020). Ωστόσο, πέρα από την παροχή των απαραίτητων μικροοργανισμών, παρέχει επιπλέον μικροθρεπτικά συστατικά, ενισχύει τη ρυθμιστική ικανότητα του συστήματος και περιορίζει τα φαινόμενα αναστολής που προκαλούνται από διάφορες τοξικές για τη διεργασία ενώσεις, όπως η συσσώρευση των VFAs και η αμμωνία (Franca et al., 2022b). Ως εμβόλιο συνήθως χρησιμοποιείται το χωνευμένο υπόλειμμα από προηγούμενη παρτίδα, του οποίου τα χαρακτηριστικά μεταβάλλονται ανάλογα με το χρόνο και τις συνθήκες λειτουργίας (Rocamora et al., 2020) και περιέχεται ένας μικτός πληθυσμός βακτηρίων και αρχαίων που ονομάζεται προσαρμοσμένη καλλιέργεια. Βέβαια, ως εμβόλιο μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλα υλικά όπως χωνευμένη κοπριά από εγκαταστάσεις υγρής αναερόβιας χώνευσης και ιλύς λυμάτων από εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων (Karthikeyan & Visvanathan, 2013). Συγκεκριμένα, στους αντιδραστήρες batch τύπου γκαράζ, συμβατικά, αναμιγνύεται ένα ποσοστό στερεού χωνευμένου υπολείμματος ως εμβόλιο, με σκοπό να δημιουργηθούν οι βέλτιστες συνθήκες για τα μεθανογόνα βακτήρια, να συντομεύσει η διαδικασία εκκίνησης και να μειωθεί η αναστολή που προκαλείται από τη συσσώρευση VFAs (Qian et al., 2017).

Η προσθήκη εμβολίου και συγκεκριμένα η παροχή επαρκούς λόγου υποστρώμα/εμβόλιο (S/I) παίζει καθοριστικό ρόλο καθώς μπορεί να βελτιώσει τον έλεγχο του χρόνου παραμονής στερεών (Solids Retention Time-SRT) και να ενισχύσει την απόδοση βιοαερίου (Karthikeyan & Visvanathan, 2013), ωστόσο περιορίζει τον ωφέλιμο όγκο που είναι διαθέσιμος για την επεξεργασία νέας πρώτης ύλης. Οι Rocamora et al., 2020 αναφέρουν πως έρευνες έχουν δείξει την αύξηση της παραγωγής βιοαερίου με την αύξηση της προστιθέμενης ποσότητας χωνεύματος σε διεργασίες διαφορετικών υλικών όπως τα γεωργικά απόβλητα, τα πράσινα απόβλητα, τα υπολείμματα τροφών και το οργανικό κλάσμα των ΑΣΑ, πιθανόν λόγω της παρουσίας μ.ο. που είναι υπεύθυνοι για την αναερόβια χώνευση και ιδιαίτερα των

μεθανογόνων αρχαίων (Rocamora et al., 2020). Αντίθετα με την προσθήκη εμβολίου, η μείωση της αρχικής ποσότητας εμβολίου αυξάνει την ικανότητα επεξεργασίας αποβλήτων, αλλά ενδέχεται να έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερους χρόνους παραμονής και χαμηλότερες αποδόσεις σε βιοαέριο και μεθάνιο, εξαιτίας πιθανών φαινομένων αναστολής (Karthikeyan & Visvanathan, 2013).

Παρόλο που ο λόγος I/S θεωρείται μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους στην ασυνεχή ξηρή αναερόβια χώνευση, δεν έχει καθοριστεί ένα γενικά αποδεκτό βέλτιστο ποσοστό, καθώς αυτό εξαρτάται από τον τύπο του συστήματος, τις λειτουργικές συνθήκες και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του υποστρώματος (Rocamora et al., 2020). Ωστόσο, η ανάλυση της βιβλιογραφίας υποδεικνύει, ανάλογα με το είδος του υποστρώματος, μεγάλη διακύμανση του λόγου I/S, που κυμαίνεται από 1:2 έως 5:1 (κατά βάση TS) (Qian et al., 2017). Διάφοροι ερευνητές έχουν αναφερθεί σε διαφορετικούς λόγους προσθήκης χωνεύματος ως εμβόλιο, ανάλογα με το υπόστρωμα και τον τύπο της διεργασίας. Για παράδειγμα οι Di Maria et al., 2012, πρότειναν λόγους υποστρώματος προς εμβόλιο μεταξύ 1:1,5 και 1:2,5 (w/w) για μονάδα ξηρής αναερόβιας χώνευσης πλήρους κλίμακας με ανακυκλοφορία διηθήματος, ενώ οι Kusch et al., 2008 ανέφεραν τιμές μεταξύ 20% και 50% κ.β. για χώνευση κοπριάς αλόγων. Ακόμη, διάφορες τιμές έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία και από εταιρείες που αναπτύσσουν σχετική τεχνολογία, γεγονός που δείχνει ότι δεν υπάρχει ενιαία πρακτική ως προς την απαιτούμενη ποσότητα εμβολίου (Rocamora et al., 2020). Ενδεικτικά, η εταιρεία εφαρμογής της τεχνολογίας Bekon, εφαρμόζει τη χρήση εμβολίου σε ποσοστό 50% για την εκκίνηση της διεργασίας batch στους αντιδραστήρες τύπου γκαράζ που χρησιμοποιεί (Karthikeyan & Visvanathan, 2013).

3.5.3.1.2 Δομή κλίνης

Στη διεργασία της ξηρής αναερόβιας σε παρτίδες, η χρήση ανακυκλοφορίας διηθήματος φαίνεται να επηρεάζεται από την υδροδυναμική του συστήματος και συγκεκριμένα από το μακρο- και μικροπορώδες, τη δομή της κλίνης και το βαθμό συμπίεσης. Ακόμη, η ανάπτυξη βιοφίλμ στη στερεή μάζα ενδέχεται να φράξει μέρος των πόρων, μειώνοντας το πορώδες και τη διαπερατότητα του προς χώνευση υλικού (André et al., 2018). Η χρήση διογκωτικών υλικών αναμεμιγμένων με το χωνευμένο υπόλειμμα και το υπόστρωμα αποτελεί συνήθη πρακτική σε μονάδες πλήρους κλίμακας για τη μείωση της συμπίεσης της κλίνης και της

καλύτερης επαφής υγρής και στερεής φάσης (Rocamora et al., 2020). Για παράδειγμα, λιγνοκυτταρινούχα υλικά, όπως ξυλώδη υπολείμματα και απόβλητα κλαδεμάτων, έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία ως πιθανά υλικά δομής, λόγω της ικανότητάς τους να βελτιώνουν το πορώδες και τις φυσικές ιδιότητες του υποστρώματος (Kamperidou & Terzopoulou, 2021). Αντίστοιχα, οι (Carvajal et al., 2024) έδειξαν ότι λιγνοκυτταρινούχα υλικά μπορούν να συμβάλουν στη διατήρηση της δομικής σταθερότητας της κλίνης, λειτουργώντας ως φυσικά υλικά δομής και περιορίζοντας προβλήματα συμπίεσης σε συστήματα ξηρής αναερόβιας χώνευσης.

3.5.3.1.3 Ανακυκλοφορία στραγγισμάτων

Λόγω της μειωμένης χωρητικότητας των αντιδραστήρων με τη χρήση στερεού εμβολίου, έχει μελετηθεί η χρήση της ανακυκλοφορίας του στραγγίσματος, η οποία δεν καταλαμβάνει χώρο από τον αντιδραστήρα, συμβάλει στην αύξηση της υγρασίας του υποστρώματος και στον εμβολιασμό του ενώ παράλληλα, βελτιώνει τη μεταφορά μάζας και συνεπώς οδηγεί σε υψηλότερη απόδοση βιοαερίου σε σχέση με το στερεό εμβόλιο (Qian et al., 2017). Οι (Wilson et al., 2016) χρησιμοποιώντας αντιδραστήρες κλίνης διήθησης (leach bed reactors-LBRs) διαπίστωσαν ότι μετά την αρχική φάση εκκίνησης, η οποία συνήθως απαιτεί σχετικά υψηλό ποσοστό στερεού εμβολίου (40–60%), ανακυκλοφορώντας το στράγγισμα της διεργασίας, μπορούσε να μειωθεί το ποσοστό του προστιθέμενου εμβολίου από 40% σε 10%, χωρίς να μειωθεί το παραγόμενο μεθάνιο. Η πρακτική αυτή συμβάλει στη μείωση της απαιτούμενης ποσότητας εμβολίου χωρίς ουσιαστική επίπτωση στην απόδοση της διεργασίας ενώ παράλληλα, διατηρεί την σταθερότητα του συστήματος, ακόμη και σε συνθήκες αυξημένων συγκεντρώσεων αμμωνίας και αλατότητας.

Η ανακυκλοφορία του στραγγίσματος, πέραν της δυνατότητας επεξεργασίας μεγαλύτερου όγκου υποστρώματος που παρέχει, βελτιώνει και βασικές συνθήκες της διεργασίας, όπως την περιεκτικότητα σε υγρασία, την ομοιόμορφη κατανομή της υγρασίας και της θερμοκρασίας εντός του αντιδραστήρα, την επαφή μεταξύ μικροοργανισμών (κυρίως των μεθανογόνων αρχαίων) και των θρεπτικών συστατικών, καθώς και τη γενικότερη ομοιογένεια στο εσωτερικό του αντιδραστήρα. Οι επιδράσεις αυτές μπορούν να επιταχύνουν την εξέλιξη της αναερόβιας χώνευσης και να ενισχύσουν τη συνολική παραγωγή μεθανίου (Rocamora et al., 2020). Οι Franca et al., 2022b αναφέρουν πως διάφορες μελέτες διαπιστώνουν ότι η ανακυκλοφορία του

διηθήματος εξασφαλίζει τη σταθερότητα του pH ενώ παράλληλα λειτουργεί ως ρυθμιστικό μέσο της διεργασίας. Επισημάνθηκε ωστόσο, ότι υπάρχει ενδεχόμενο αναστολής της βιολογικής διεργασίας, εξαιτίας της κατανάλωσης υδρολυμένης οργανικής ύλης και της διαλυτοποίησης αζωτούχων ενώσεων. Η συσσώρευση των ενώσεων αυτών μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία τοξικών συνθηκών για τη μικροβιακή κοινότητα, διαταράσσοντας τη σταθερότητα του pH εντός της μονάδας και επηρεάζοντας αρνητικά την παραγωγή βιοαερίου. Σε μια άλλη έρευνα, οι Pezzolla et al., 2017, έδειξαν ότι η αύξηση της συχνότητας ανακυκλοφορίας του διηθήματος οδήγησε σε σημαντική μείωση των συγκεντρώσεων VFA και του Ολικού Αμμωνιακού Αζώτου (Total Ammonia Nitrogen-TAN) στο σύστημα, γεγονός που υποδηλώνει ότι η ανακυκλοφορία μπορεί να συμβάλλει στην αραίωση ή απομάκρυνση ανασταλτικών ενώσεων αλλά και στη βελτίωση της σταθερότητας της διεργασίας.

Ωστόσο, η υπερβολικά συχνή ή εντατική ανακυκλοφορία ενδέχεται να παρεμποδίσει τη μικροβιακή ανάπτυξη, εξαιτίας της συσσώρευσης VFA ή αμμωνίας και για το λόγο αυτό προτείνεται η εφαρμογή διακοπτόμενης ανακυκλοφορίας αντί της συνεχούς (Degueurce et al., 2016), όπως επιβεβαιώνεται και από την ακόλουθη έρευνα. Οι Kusch et al., 2012 μελέτησαν, σε εργαστηριακής κλίμακας αντιδραστήρες batch αναερόβιας χώνευσης στερεής φάσης ενός σταδίου την επίδραση διαφορετικών στρατηγικών ανακυκλοφορίας διηθήματος. Ως υπόστρωμα χρησιμοποιήθηκε ενσιρωμένο καλαμπόκι αναμεμειγμένο με στερεό εμβόλιο (προχωνεμένη βιομάζα με πράσινα υπολείμματα), σε δύο διαφορετικές συστάσεις. Στο πρώτο πείραμα εφαρμόστηκε διαλείπουσα ανακυκλοφορία (2 φορές/d για 15 min/φορά), συνεχής ανακυκλοφορία, καθώς και απουσία ανακυκλοφορίας μετά από αρχική πλήρη διαβροχή του υποστρώματος. Στο δεύτερο πείραμα εξετάστηκαν διαλείπουσα ανακυκλοφορία, συνεχής ανακυκλοφορία και μια μεταβαλλόμενη στρατηγική, όπου εφαρμόστηκε συνεχής ανακυκλοφορία για τις πρώτες 6 d και στη συνέχεια διαλείπουσα (2 x 15 min/d). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η συνεχής ανακυκλοφορία δεν βελτίωσε την απόδοση της διεργασίας αντίθετα, κατά την εκκίνηση προκάλεσε μεγαλύτερη συσσώρευση πτητικών λιπαρών οξέων (VFA) και καθυστέρηση της μεθανογένεσης, ενώ η διαλείπουσα ανακυκλοφορία εξασφάλισε σταθερή λειτουργία και υψηλές αποδόσεις μεθανίου.

Ένα ακόμη παράδειγμα αποτελεί η μελέτη των Fernández-Rodríguez et al., 2013, σχετικά με την επεξεργασία του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ. Οι ερευνητές μελέτησαν τη χρήση αντιδραστήρων batch τύπου garage με ανακυκλοφορία στραγγισμάτων. Οι αντιδραστήρες

λειτουργήσαν σε θερμοφίλες συνθήκες, η περιεκτικότητα σε TS ήταν περίπου 30% και στόχος ήταν να εξεταστεί η επίδραση διαφορετικών ρυθμών ανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων βελτίωσε την ομογενοποίηση του υποστρώματος και αύξησε την παραγωγή μεθανίου, μειώνοντας παράλληλα το χρόνο παραμονής του αποβλήτου εντός του αντιδραστήρα.

Στη βιβλιογραφία έχουν αναφερθεί τόσο συνεχείς όσο και διαλείπουσες στρατηγικές ανακυκλοφορίας διηθήματος, οι οποίες στις περισσότερες περιπτώσεις έχουν συσχετιστεί με βελτίωση της απόδοσης της αναερόβιας χώνευσης σε σχέση με την απουσία ανακυκλοφορίας για τους λόγους που προαναφέρθηκαν. Ωστόσο, παρά το γεγονός της ευρείας εφαρμογής της ανακυκλοφορίας σε βιομηχανική κλίμακα με θετικά αποτελέσματα, ορισμένοι συγγραφείς έχουν αναφερθεί και σε αρνητικές επιδράσεις της όταν εφαρμόζεται σε υπερβολική ποσότητα. Αυτό υποδεικνύει την ανάγκη βαθύτερης κατανόησης της σύστασης του διηθήματος και της εξέλιξής της στη διάρκεια της αναερόβιας διεργασίας, ιδίως όταν πρόκειται για υποστρώματα όπως τα απόβλητα τροφίμων και το οργανικό κλάσμα των ΑΣΑ που είναι πλούσια σε άζωτο και μπορούν να συσσωρεύσουν ανασταλτικές ενώσεις όπως το TAN (Rocamora et al., 2020). Για τον λόγο αυτό, η στρατηγική ανακυκλοφορίας του διηθήματος πρέπει να προσαρμόζεται στα χαρακτηριστικά του υποστρώματος και στις συνθήκες της διεργασίας. Αναδεικνύεται λοιπόν η ανάγκη βελτιστοποίησης της ανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων, με στόχο τη βαθύτερη κατανόηση της στρατηγικής ανακυκλοφορίας.

Η σε βάθος κατανόηση της εξέλιξης της σύστασης του ανακυκλοφορούμενου στραγγίσματος κατά τη διάρκεια της ξηρής αναερόβιας χώνευσης σε σύστημα batch είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς μπορεί να συμβάλει στον καθορισμό κατάλληλων στρατηγικών ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων, με στόχο τη διατήρηση της μικροβιακής δραστηριότητας, την αποφυγή συσσώρευσης ανασταλτικών ενώσεων και τη βελτίωση της απόδοσης της διεργασίας. Η γνώση αυτή αποτελεί βασική προϋπόθεση για τον σχεδιασμό αποδοτικών στρατηγικών ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων, ως προς τη συχνότητα και τον όγκο εφαρμογής τους, με στόχο τη βελτίωση της λειτουργικής απόδοσης μονάδων ξηρής αναερόβιας χώνευσης σε βιομηχανική κλίμακα (Rocamora et al., 2022). Για τον λόγο αυτό, η παρούσα ΜΔΕ εστιάζει στη μελέτη της επίδρασης της συχνότητας ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων στην απόδοση της ξηρής αναερόβιας χώνευσης του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ, με εφαρμογή σε βιομηχανική κλίμακα και συγκεκριμένα στη ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, υπάρχουν τρεις παράμετροι ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων που είναι δυνατόν να επηρεάσουν την παραγωγή βιοαερίου: ο όγκος των ανακυκλοφορούμενων στραγγισμάτων, ο λόγος των στραγγισμάτων προς το υπόστρωμα (leachate/substrate-L/S) και η συχνότητα/περιοδικότητα της ανακυκλοφορίας. Ωστόσο, η επίδραση των παραμέτρων αυτών και ιδιαίτερα οι μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις δεν είχαν αποσαφηνιστεί πλήρως καθώς προηγούμενες μελέτες εξέταζαν συνήθως μεμονωμένα τον λόγο L/S, τον όγκο ανακυκλοφορίας ή τη συχνότητα εφαρμογής, χωρίς να διαχωρίζεται με σαφήνεια η επίδραση κάθε παράγοντα, ενώ οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους παρέμεναν σε μεγάλο βαθμό ανεξερεύνητες. Επιπλέον, στη βιβλιογραφία αναφέρονται διαφορετικές πρακτικές ανακυκλοφορίας, π.χ. ανά δύο ώρες και μία φορά την εβδομάδα, χωρίς επαρκή αιτιολόγηση ή συγκρίσιμα αποτελέσματα, γεγονός που δυσχέραινε την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων σχετικά με τη βέλτιστη στρατηγική λειτουργίας (Degueurce et al., 2016). Για τον λόγο αυτό, οι Degueurce et al., 2016 διερεύνησαν συστηματικά την επίδραση των τριών αυτών παραμέτρων στην παραγωγή μεθανίου και κατέληξαν ότι η περιοδικότητα της ανακυκλοφορίας αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα, καθώς επηρεάζει τη συνολική παραγωγή μεθανίου, αλλά και τα χαρακτηριστικά της κινητικής της διεργασίας. Συγκεκριμένα, έδειξαν ότι μεγάλα χρονικά διαστήματα χωρίς ανακυκλοφορία οδηγούν σε μείωση της υγρασίας του υποστρώματος και σε δυσμενείς συνθήκες για τη μικροβιακή δραστηριότητα, με αποτέλεσμα χαμηλότερες αποδόσεις. Αν και ο όγκος ανακυκλοφορίας και ο λόγος L/S επηρεάζουν επίσης τη διεργασία, η επίδρασή τους φάνηκε να εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από την περιοδικότητα.

Με βάση τα παραπάνω, στην παρούσα μελέτη επιλέγεται να διερευνηθεί ειδικότερα η περιοδικότητα ανακυκλοφορίας, καθώς αναδεικνύεται ως η πλέον καθοριστική παράμετρος για τη βελτιστοποίηση της παραγωγής βιοαερίου.

3.5.3.1.3.1 Συχνότητα ανακυκλοφορίας: βιβλιογραφικά δεδομένα

Οι Feng et al., 2019 μελέτησαν την ανακυκλοφορία στραγγισμάτων διαφορετικού οργανικού φορτίου (COD: 3.000, 6.000 και 9.000 mg/L) σε εργαστηριακούς αντιδραστήρες αναερόβιας χώνευσης αστικών στερεών αποβλήτων. Κάθε αντιδραστήρας τροφοδοτήθηκε με 600 g αποβλήτων και 400 g αναερόβιας κοκκώδους ιλύος ενώ η ανακυκλοφορία πραγματοποιούνταν ανά 3 d με όγκο 100 mL και συνολικό όγκο 2 L για 60 ημέρες στους 35°C. Η βέλτιστη απόδοση παρατηρήθηκε με την ανακυκλοφορία στραγγίσματος με COD = 6.000 mg/L, όπου η

σωρευτική παραγωγή μεθανίου έφτασε τα 49,449 mL, που αντιστοιχεί περίπου σε 0,33 m³ CH₄/kg VS, παρουσιάζοντας σημαντική βελτίωση σε σχέση με το control. Αντίθετα, το στράγγισμα με COD = 9.000 mg/L παρατηρήθηκε αναστολή της διεργασίας λόγω συσσώρευσης VFAs και NH₄⁺-N.

Οι Kusch et al., 2012 διερεύνησαν την επίδραση διαφορετικών στρατηγικών ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων σε εργαστηριακούς αντιδραστήρες ξηρής αναερόβιας χώνευσης χωρητικότητας περίπου 50 L, οι οποίοι λειτουργούσαν στους 35°C χωρίς ανάδευση. Πραγματοποιήθηκαν δύο πειραματικές σειρές με διαφορετική σύσταση υποστρώματος, 5,3 kg ενσιρωμένου καλαμποκιού και 12,8 kg στερεού (χωνευμένου) εμβολίου στην πρώτη περίπτωση και 4,0 kg και 16,3 kg στη δεύτερη περίπτωση αντίστοιχα, με προσθήκη 10 L υγρού εμβολίου σε κάθε αντιδραστήρα. Συγκρίθηκαν η συνεχής και η διακοπτόμενη ανακυκλοφορία στραγγισμάτων (2 φορές/d για 15 min/φορά), καθώς και η λειτουργία χωρίς ανακυκλοφορία. Η υψηλότερη απόδοση μεθανίου καταγράφηκε στο δεύτερο μείγμα, με διακοπτόμενη ανακυκλοφορία και ανήλθε σε 0,401 m³ CH₄/kgVS, ενώ στο πρώτο μίγμα υποστρώματος η αντίστοιχη απόδοση ήταν 0,389 m³ CH₄/kgVS. Επιπλέον, οι συγγραφείς κατέληξαν ότι η συνεχής ανακυκλοφορία δεν προσέφερε πλεονέκτημα έναντι της διακοπτόμενης ως προς την παραγωγή μεθανίου.

Οι Di Maria et al., 2013, διερεύνησαν την εφαρμογή υβριδικής ξηρής αναερόβιας χώνευσης παρτίδας (hybrid solid anaerobic digestion batch-HSADB) για την επεξεργασία του οργανικού κλάσματος ΑΣΑ. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε αντιδραστήρα όγκου 100 L υπό μεσοφιλικές συνθήκες (35 ± 2°C), χρησιμοποιώντας μίγμα οργανικού κλάσματος ΑΣΑ και εμβολίου σε αναλογία 1:1 κ.β. Η ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων πραγματοποιούνταν με διαβροχή του υποστρώματος 3 φορές/d, με συνολική παροχή 0,18 m³/tn/d. Η μέγιστη απόδοση μεθανίου ανήλθε σε 0,212 m³ CH₄/kgVS, ενώ οι ερευνητές συμπέραναν ότι η ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων συνέβαλε στη βελτίωση της σταθερότητας της διεργασίας και στην αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των VFAs.

Οι Degueurce et al., 2016 διερεύνησαν τον βιοτικό (παρουσία και μεταφορά μικροοργανισμών) και τον αβιοτικό ρόλο (παροχή θρεπτικών συστατικών, αλκαλικότητας, υγρασίας και κατάλληλου pH) της ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων κατά την ξηρή αναερόβια χώνευση βοοειδούς κοπριάς σε εργαστηριακούς αντιδραστήρες τύπου κλίνης έκπλυσης (leach bed reactor-LBR). Οι αντιδραστήρες είχαν συνολικό όγκο 7,7 L και λειτουργούσαν στους 35

°C για 28 d. Σε κάθε αντιδραστήρα τροφοδοτήθηκαν 1,5 kg κοπριάς και 1,7 L στραγγίσματος, ενώ η ανακυκλοφορία πραγματοποιούνταν κάθε ώρα για 20 s με επαναφορά 500 mL στραγγίσματος, το οποίο ανακυκλοφορούσε καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος. Η υψηλότερη απόδοση μεθανίου καταγράφηκε με βιολογικά ενεργό στράγγισμα προερχόμενο από μονάδα ξηρής αναερόβιας χώνευσης (Solid-State Anaerobic Digestion-SSAD), φθάνοντας τα 0,115 m³ CH₄/kgVS, ενώ παρόμοια απόδοση παρατηρήθηκε και με βιολογικά ενεργό στράγγισμα από αναερόβια χώνευση ιλύος αστικών λυμάτων (0,100 m³ CH₄/kgVS). Αντίθετα, η χρήση αδρανών ή αποστειρωμένων στραγγισμάτων οδήγησε σε περίπου 50% χαμηλότερες αποδόσεις μεθανίου. Ωστόσο, η ανάλυση των μικροβιακών κοινοτήτων έδειξε περιορισμένη μεταφορά μικροοργανισμών μεταξύ υγρής και στερεής φάσης, γεγονός που οδήγησε τους συγγραφείς στο συμπέρασμα ότι η βελτίωση της διεργασίας αποδίδεται κυρίως στα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του στραγγίσματος και όχι τόσο στον άμεσο εμβολιασμό της κοπριάς με μικροοργανισμούς λόγω του γεγονότος ότι το βιολογικά ενεργό στράγγισμα, λόγω της παρουσίας μικροοργανισμών, παρέχει ένα ευνοϊκό χημικό περιβάλλον στο υπόστρωμα (pH, αλκαλικότητα, θρεπτικά συστατικά) για τους μικροοργανισμούς που ήδη υπάρχουν σε αυτό.

Οι Qian et al., 2017 διερεύνησαν την επίδραση του δείκτη ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων (Frequency of Percolate Recirculation, FPR), ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος του ημερήσιου όγκου ανακυκλοφορίας προς τον συνολικό όγκο του στραγγίσματος, στην ξηρή συγχώνευση του OFMSW με άχυρο καλαμποκιού σε εργαστηριακούς αντιδραστήρες ξηρής χώνευσης τύπου γκαράζ. Οι αντιδραστήρες λειτουργούσαν στους 37°C για 45 ημέρες και τροφοδοτήθηκαν με 120 g OFMSW και 30 g άχυρου καλαμποκιού, δηλαδή μίγμα σε αναλογία 4:1 κατά νωπό βάρος. Εξετάστηκαν πέντε επίπεδα FPR (0,3, 0,6, 1,2, 2,4, 4,8), τα οποία αντιστοιχούσαν σε ημερήσιους όγκους ανακυκλοφορίας 150, 300, 600, 1.200 και 2.400 mL, αντίστοιχα, για συνολικό όγκο στραγγίσματος 500 mL. Η ανακυκλοφορία πραγματοποιούνταν μέσω περισταλτικής αντλίας για 4 min/h και συνολικά για 8 h ημερησίως (άρα 8 φορές/d). Η υψηλότερη απόδοση μεθανίου καταγράφηκε στην περίπτωση FPR = 0,3 και ανήλθε σε 0,166 m³CH₄/kgVS. Αντίθετα, η αύξηση του FPR οδήγησε σε μεγαλύτερη συσσώρευση πτητικών λιπαρών οξέων (VFAs) και σε μείωση της παραγωγής μεθανίου. Οι συγγραφείς κατέληξαν ότι η ανακυκλοφορία του στραγγίσματος ενισχύει την υδρόλυση και την οξεογένεση, ωστόσο οι υψηλές τιμές FPR μπορούν να προκαλέσουν οξίνιση του συστήματος και να επηρεάσουν αρνητικά τη μεθανογένεση.

Οι Massaccesi et al., 2013 μελέτησαν ένα υβριδικό σύστημα ξηρής αναερόβιας χώνευσης με ανακυκλοφορία στραγγισμάτων. Η ανακυκλοφορία συνέβαλε στη μείωση της συγκέντρωσης VFAs και στη διατήρηση επαρκούς αλκαλικότητας αυξάνοντας το pH από 5,2 σε 8,08, οδηγώντας σε σταθερή λειτουργία του συστήματος και παραγωγή βιοαερίου με περιεκτικότητα μεθανίου έως 64,3%.

Οι Rocamora et al., 2022 διερεύνησαν την επίδραση του λόγου εμβολίου προς υπόστρωμα (I:S), της προσθήκης νερού και της προσθήκης στραγγίσματος στη ξηρή αναερόβια χώνευση του OFMSW, με στόχο την αποφυγή της οξίνισης και της αναστολής της διεργασίας. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε εργαστηριακούς αντιδραστήρες παρτίδας τύπου γκαράζ, στους 38°C. Εξετάστηκαν λόγοι I:S από 1:2 έως 1:16, καθώς και διαφορετικές περιεκτικότητες TS μέσω προσθήκης νερού ή στραγγίσματος. Η προσθήκη στραγγίσματος αποδείχθηκε η αποτελεσματικότερη στρατηγική για τη σταθεροποίηση της διεργασίας, καθώς παρείχε αλκαλικότητα και ρυθμιστική ικανότητα pH, αποτρέποντας τη συσσώρευση VFAs. Η υψηλότερη απόδοση μεθανίου καταγράφηκε σε περιεκτικότητα TS = 27% με προσθήκη στραγγίσματος και ανήλθε σε 0,199 m³CH₄/kgVS, ενώ η μέγιστη παραγωγή βιοαερίου έφθασε τα 0,362m³βιοαερίου/kgVS. Οι συγγραφείς κατέληξαν ότι το στράγγισμα μπορεί να λειτουργήσει ως αποτελεσματικό μέσο ελέγχου της οξίνισης και βελτίωσης της παραγωγής μεθανίου σε συστήματα ξηρής αναερόβιας χώνευσης OFMSW.

Οι Pezzolla et al., 2017 διερεύνησαν την επίδραση της ανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων στην ξηρή αναερόβια χώνευση μίγματος χοιρολυμάτων, άχυρου και στερεού εμβολίου από προηγούμενη χώνευση σε εργαστηριακούς αντιδραστήρες χωρητικότητας 15 L. Οι αντιδραστήρες λειτούργησαν στους 35 ± 2°C για 50 d και εξετάστηκαν τέσσερις συνθήκες λειτουργίας: χωρίς ανακυκλοφορία, καθώς και ανακυκλοφορία 1, 2 και 4 φορές/d. Κάθε κύκλος ανακυκλοφορίας είχε διάρκεια 45 min. Η μεγαλύτερη παραγωγή βιοαερίου καταγράφηκε στην περίπτωση των 4 ανακυκλοφοριών/d, φθάνοντας τα 0,241 m³βιοαερίου/kgVS. Οι συγγραφείς διαπίστωσαν ότι η συχνότερη ανακυκλοφορία βελτίωσε τη σταθερότητα της διεργασίας, περιόρισε τη συσσώρευση VFAs και ενίσχυσε τη βιοαποδόμηση της οργανικής ύλης.

Παρά τη σημαντική ανάπτυξη της ξηρής αναερόβιας χώνευσης του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ στην Ευρώπη, η διαθέσιμη βιβλιογραφία εξακολουθεί να περιλαμβάνει περιορισμένο αριθμό ερευνών πλήρους κλίμακας, καθώς η πλειονότητα των μελετών πραγματοποιείται σε

εργαστηριακή ή πιλοτική κλίμακα. Ωστόσο, οι full-scale εφαρμογές παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς οι πραγματικές συνθήκες λειτουργίας διαφοροποιούνται σημαντικά λόγω της υψηλής περιεκτικότητας στερεών, της ετερογένειας του υποστρώματος και της παρουσίας προσμίξεων, παράγοντες που επηρεάζουν άμεσα τη σταθερότητα και την αποδοτικότητα της διεργασίας (Musluoglu et al., 2025).

Οι Rocamora et al., 2022 αξιολόγησαν τη λειτουργία δύο μονάδων ξηρής αναερόβιας χώνευσης πλήρους κλίμακας στο Ηνωμένο Βασίλειο, οι οποίες επεξεργάζονταν OFMSW, με στόχο τη διερεύνηση της επίδρασης διαφορετικών λειτουργικών στρατηγικών στην παραγωγή μεθανίου και στη συσσώρευση ανασταλτικών ενώσεων. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε μία ημισυνεχής μονάδα στη Βορειοανατολική Αγγλία και μία μονάδα batch τύπου γκαράζ στην Κεντρική Αγγλία. Για το batch σύστημα εξετάστηκε ειδικότερα η επίδραση της ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων σε αντιδραστήρες που λειτουργούσαν σε θερμοκρασίες 35–40°C και χρόνο παραμονής 28 d. Το παραγόμενο στράγγισμα συλλεγόταν από τον πυθμένα των αντιδραστήρων και ανακυκλοφορούσε περιοδικά στην κορυφή της βιομάζας κατά τη διάρκεια της χώνευσης. Η ανάλυση έδειξε ότι η αύξηση της ανακυκλοφορίας βελτίωνε την παραγωγή μεθανίου έως ένα βέλτιστο εύρος συνολικού όγκου ανακυκλοφορίας 182–197 m³ στραγγισμάτων ανά παρτίδα (0,342–0,363 m³/t μίγματος βιομάζας). Στο εύρος αυτό καταγράφηκαν οι υψηλότερες αποδόσεις μεθανίου, καθώς η ανακυκλοφορία βελτίωνε την ομογενοποίηση του υποστρώματος, τη μεταφορά θρεπτικών συστατικών και τη διασπορά των μικροβιακών πληθυσμών. Αντίθετα, μεγαλύτεροι όγκοι ανακυκλοφορίας οδήγησαν σε μείωση της παραγωγής μεθανίου, πιθανώς λόγω συμπίεσης της βιομάζας, μείωσης της διαπερατότητας του σωρού και συσσώρευσης ανασταλτικών ενώσεων. Οι συγγραφείς κατέληξαν ότι η ανακυκλοφορία στραγγισμάτων αποτελεί κρίσιμο λειτουργικό παράγοντα για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης της ξηρής αναερόβιας χώνευσης σε βιομηχανική κλίμακα, ενώ η υπερβολική ανακυκλοφορία μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τη διεργασία και να μειώσει την παραγωγή μεθανίου. Επίσης, οι Musluoglu et al., 2025, μελετώντας τη λειτουργία πλήρους κλίμακας μονάδας συνεχούς ξηρής αναερόβιας χώνευσης μηχανικά διαχωρισμένου οργανικού κλάσματος ΑΣΑ στην Τουρκία, ανέφεραν ότι η διεργασία παρουσίασε σταθερή λειτουργία σε οργανικά φορτία 10,5–12 kg TVS/m³·d και χρόνο υδραυλικής παραμονής 16–18 d, επιτυγχάνοντας παραγωγή βιοαερίου 5–6,6 m³ biogas/m³αντιδραστήρα·d. Αντίστοιχα, οι Seruga et al., 2020 έδειξαν ότι η ποιότητα και ο τρόπος συλλογής του οργανικού κλάσματος

των ΑΣΑ επηρεάζουν σημαντικά τόσο την παραγωγή βιοαερίου όσο και την ενεργειακή απόδοση της διεργασίας σε βιομηχανική μονάδα που κάνει χρήση του συστήματος Kompogas. Ωστόσο, οι Musluoglu et al., 2025 υπογράμμισαν ότι η προσομοίωση των συνθηκών λειτουργίας των βιομηχανικών χωνευτών σε εργαστηριακή κλίμακα είναι ιδιαίτερα δύσκολη, λόγω της υψηλής περιεκτικότητας στερεών, της παρουσίας μεγάλων προσμίξεων και των διαφοροποιημένων χαρακτηριστικών του υποστρώματος. Τα παραπάνω καταδεικνύουν την ανάγκη περαιτέρω διερεύνησης των παραμέτρων της ξηρής αναερόβιας χώνευσης σε βιομηχανική κλίμακα, ιδιαίτερα σε ό,τι αφορά τη βελτιστοποίηση της σταθερότητας και της απόδοσης της διεργασίας υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στη μελέτη της επίδρασης της ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων στην απόδοση της ξηρής αναερόβιας χώνευσης του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ μέσω της διερεύνησης στρατηγικών συχνότητας ανακυκλοφορίας σε βιομηχανική κλίμακα και συγκεκριμένα στη ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης, συμβάλλοντας στην καλύτερη κατανόηση των παραμέτρων που επηρεάζουν την παραγωγή βιοαερίου και τη σταθερότητα της διεργασίας.

Τα κύρια χαρακτηριστικά των πειραματικών διατάξεων και οι αντίστοιχες αποδόσεις μεθανίου των μελετών που εξετάστηκαν συνοψίζονται στον ακόλουθο Πίνακα 3.5.1, προκειμένου να διευκολυνθεί η συγκριτική αξιολόγηση των διαφορετικών στρατηγικών ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων.

Πίνακας 3.5.1: Επίδραση διαφορετικών στρατηγικών ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων στην απόδοση μεθανίου από ξηρή αναερόβια χώνευση.

Προς χώνευση υλικό	Θερμοκρασία (°C)	HRT (d)	Όγκος παροχής στραγγισμάτων (L/tn*d)	Συχνότητα ανακυκλοφορίας (φορά/d)	Απόδοση μεθανίου (m ³ CH ₄ /kg VS)	Βιβλ/κή Αναφορά
ΑΣΑ + ιλύς (εργαστηριακός SSAD αντιδραστήρας)	35	60	33	0,331	0,331	(Feng et al., 2019)
5,3 kg ενσιρωμένο καλαμπόκι +12,8 kg εμβόλιο (εργαστηριακός SSAD αντιδραστήρας)	35	56	7.790	2	0,389	(Kusch et al., 2012)
4,0 kg ενσιρωμένο καλαμπόκι + 16,3 kg εμβόλιο (εργαστηριακός SSAD αντιδραστήρας)	35	42	6.946	2	0,401	(Kusch et al., 2012)
Οργανικό κλάσμα ΑΣΑ + εμβόλιο (εργαστηριακό σύστημα HSADB αντιδραστήρα)	35 ± 2	74	49	3	0,212	(Di Maria et al., 2013)
Κοπριά βοοειδών + βιολογικά ενεργό στράγγισμα από μονάδα SSAD (LBR)	35	28	8.000	24	0,115	(Degueurce et al., 2016)
Οργανικό κλάσμα ΑΣΑ + άχυρο καλαμποκιού (εργαστηριακός SSAD αντιδραστήρας τύπου γκαράζ)	37	45	1.000	8	0,166	(Qian et al., 2017)
Χοιρολύματα + άχυρο + στερεό εμβόλιο (εργαστηριακός SSAD αντιδραστήρας)	35 ± 2	50	-	4	0,241 m ³ βιοαερίου/kgVS	(Pezzolla et al., 2017)
OFMSW (αντιδραστήρες batch τύπου γκαράζ πλήρους κλίμακας)	35-40	28	182–197 m ³ στραγγισμάτων/παρτίδα (342– 363 L/t μίγματος)	-	Σημειώθηκε η μέγιστη παραγωγή μεθανίου σε αυτόν τον όγκο	(Rocamora, Wagland, Rivas Casado, et al., 2022)

4 Μελέτη Περίπτωσης: Μονάδα Επεξεργασίας Απορριμμάτων

Αλεξανδρούπολης

Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως βασικό στοιχείο καινοτομίας της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας αποτελεί η μελέτη της ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων ως παράγοντα βελτιστοποίησης της ξηρής αναερόβιας χώνευσης του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ σε συνθήκες πραγματικής λειτουργίας και βιομηχανικής κλίμακας. Σε αντίθεση με τη διεθνή βιβλιογραφία, η οποία επικεντρώνεται κυρίως σε εργαστηριακά ή πιλοτικά συστήματα και σε προδιαλεγμένα οργανικά ρεύματα, η παρούσα εργασία εξετάζει την εφαρμογή διαφορετικών λόγων ανακυκλοφορίας στραγγίσματος / υποστρώματος σε εγκατάσταση επεξεργασίας σύμμεικτων αποβλήτων στην Ελλάδα. Η προσέγγιση αυτή αντανάκλα ρεαλιστικές συνθήκες λειτουργίας ελληνικών ΜΕΑ, και συγκεκριμένα της ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης, όπου η ετερογένεια των αποβλήτων και οι μεταβολές στη σύστασή τους αποτελούν κρίσιμες προκλήσεις. Επιπλέον, η εργασία συμβάλλει στην αξιολόγηση της ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων εφαρμόζοντας διαφορετικές στρατηγικές συχνότητας ανακυκλοφορίας, ως εργαλείο ελέγχου της σταθερότητας της διεργασίας, μέσω της παρακολούθησης βασικών φυσικοχημικών παραμέτρων και της παραγωγής και ποιότητας του παραγόμενου βιοαερίου. Με τον τρόπο αυτό, αναδεικνύεται η δυνατότητα αξιοποίησης των στραγγισμάτων ως εσωτερικού πόρου του συστήματος, ενισχύοντας τη βιωσιμότητα, την ενεργειακή απόδοση και τη συμβολή της ξηρής αναερόβιας χώνευσης στην κυκλική οικονομία.

4.1 Υφιστάμενη κατάσταση

4.1.1 Περιοχή μελέτης και γενικά στοιχεία έργου

Η παρούσα μελέτη εκπονήθηκε με αντικείμενο τη Μονάδα Επεξεργασίας Απορριμμάτων (ΜΕΑ) Αλεξανδρούπολης, η οποία αποτελεί τμήμα της Ολοκληρωμένης Εγκατάστασης Διαχείρισης Αποβλήτων (ΟΕΔΑ) Ανατολικού Τομέα της Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης (ΠΑΜΘ). Η εγκατάσταση βρίσκεται εντός των διοικητικών ορίων του Δήμου Αλεξανδρούπολης στην Περιφερειακή Ενότητα (Π.Ε.) Έβρου και συγκεκριμένα στη θέση του αποκατεστημένου πρώην Χώρου Ανεξέλεγκτης Διάθεσης Αποβλήτων (ΧΑΔΑ) Αλεξανδρούπολης, βόρεια της πόλης.

Η ΟΕΔΑ καταλαμβάνει έκταση περίπου 550 στρεμμάτων, με υψόμετρο που κυμαίνεται από 64 έως 136 m, ενώ η πρόσβαση στην εγκατάσταση πραγματοποιείται μέσω της επαρχιακής

οδού Αλεξανδρούπολης–Άβαντα. Η ευρύτερη περιοχή χαρακτηρίζεται κυρίως από γεωργικές εκτάσεις και φυσική βλάστηση, χωρίς να γειτνιάζει με προστατευόμενες περιοχές ή κηρυγμένους αρχαιολογικούς χώρους. Επιπλέον, εντός του χώρου της εγκατάστασης δεν αναπτύσσονται άλλες παραγωγικές δραστηριότητες, καθώς η περιοχή χρησιμοποιούνταν στο παρελθόν για τη λειτουργία του ΧΑΔΑ Αλεξανδρούπολης, ο οποίος έχει πλέον αποκατασταθεί. Κύριος του έργου είναι η ΔΙ.Α.Α.ΜΑ.Θ. Α.Α.Ε., η οποία αποτελεί τον αρμόδιο Φορέα Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων της Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης. Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας, παραχωρήθηκαν από τη ΔΙ.Α.Α.ΜΑ.Θ. Α.Α.Ε. λειτουργικά και τεχνικά στοιχεία της μονάδας, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά για ερευνητικούς σκοπούς και αποτέλεσαν τη βάση για την αξιολόγηση της επίδρασης της ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων στη λειτουργία της ξηρής αναερόβιας χώνευσης.

Η περιβαλλοντική αδειοδότηση του έργου περιλαμβάνει σειρά διαδοχικών ΑΕΠΟ, οι οποίες εκδόθηκαν κατά τα διάφορα στάδια ανάπτυξης της εγκατάστασης. Ειδικότερα, για το έργο έχουν εκδοθεί οι ακόλουθες ΑΕΠΟ:

- **Υπ' αριθ. οικ. 196552/01-03-2012 ΑΕΠΟ (ΑΔΑ: Β44Ξ0-4ΙΒ)** της Ειδικής Υπηρεσίας Περιβάλλοντος, με την οποία εγκρίθηκαν οι περιβαλλοντικοί όροι για το έργο «Μονάδα Επεξεργασίας Απορριμμάτων και Χώρος Υγειονομικής Ταφής Υπολειμμάτων στο Νομό Έβρου (ΟΕΔΑ Ανατολικού Τομέα της Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης)» (ΑΕΠΟ, 2012).
- **Υπ' αριθ. 3801/13-11-2017 Απόφαση (ΑΔΑ: Ω348ΟΡ1Υ-ΓΟ3)** της Διεύθυνσης ΠΕΧΩ Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης, με την οποία τροποποιήθηκαν οι περιβαλλοντικοί όροι της υπ' αριθ. οικ. 196552/01-03-2012 ΑΕΠΟ, επικαιροποιώντας το πλαίσιο λειτουργίας της εγκατάστασης (ΑΕΠΟ, 2017).
- **Υπ' αριθ. 109417/7677/09-10-2024 Απόφαση** της Διεύθυνσης Περιβάλλοντος και Χωρικού Σχεδιασμού Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης, με την οποία τροποποιήθηκαν εκ νέου οι περιβαλλοντικοί όροι της υπ' αριθ. οικ. 196552/01-03-2012 ΑΕΠΟ, όπως αυτή είχε ήδη τροποποιηθεί με την υπ' αριθ. 3801/13-11-2017 Απόφαση.

Τα στοιχεία των ανωτέρω αποφάσεων, σε συνδυασμό με τα σχεδιαστικά και λειτουργικά δεδομένα που παραχωρήθηκαν από τη ΔΙ.Α.Α.ΜΑ.Θ. Α.Α.Ε., αποτέλεσαν τη βάση για την περιγραφή της εγκατάστασης. Παράλληλα, στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιήθηκαν επιτόπιες πειραματικές δοκιμές στα κελιά ξηρής

αναερόβιας χώνευσης της ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης, μέσω των οποίων διερευνήθηκε η επίδραση διαφορετικών συχνοτήτων ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων στην απόδοση της διεργασίας σε βιομηχανική κλίμακα.

Σύμφωνα με τη μελέτη επικαιροποίησης του Περιφερειακού Σχεδίου Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων της Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας Θράκης (ΠΕΣΔΑ, 2016), η δυναμικότητα της μονάδας επεξεργασίας σύμμεικτων ΑΣΑ Αλεξανδρούπολης ορίζεται σε 38.855 tn/y ενώ αντίστοιχα η μονάδα επεξεργασίας προδιαλεγμένων οργανικών αποβλήτων σε 5.971 tn/y. Παράλληλα με τη ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης, είχε προβλεφθεί ο σχεδιασμός και η κατασκευή πρόσθετων μονάδων επεξεργασίας αποβλήτων. Ωστόσο, λόγω της μη ολοκλήρωσής τους και της περιορισμένης εφαρμογής συστημάτων διαλογής στην πηγή, στη ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης οδηγούνται περίπου 90.000 τόνοι σύμμεικτων ΑΣΑ ετησίως, με την απαιτούμενη δυναμικότητά της να εκτιμάται σε 96.600 τόνους ανά έτος, μετά την εφαρμογή συντελεστή ασφαλείας 7%. Η ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης έχει αδειοδοτηθεί, κατασκευαστεί και βρίσκεται σε λειτουργία από τα μέσα του 2022. Η Μονάδα Υποδοχής των σύμμεικτων ΑΣΑ λειτουργεί 312 d/y, σε μία βάρδια των 7,5 h/d και με συντελεστή διαθεσιμότητας 90%. Στην παρούσα περίοδο, η μονάδα εξυπηρετεί τους Δήμους Αρριανών, Κομοτηνής, Ιάσμου και Μαρωνείας-Σαπών της Π.Ε. Ροδόπης, καθώς και τους Δήμους Ορεστιάδας, Διδυμοτείχου, Σαμοθράκης, Αλεξανδρούπολης και Σουφλίου της Π.Ε. Έβρου για τη διαχείριση των ΑΣΑ συγκεκριμένων δήμων της Π.Ε. Έβρου και των υπολειμμάτων των Κέντρων Διαλογής Ανακυκλώσιμων Υλικών (ΚΔΑΥ) των Π.Ε. Έβρου και Ροδόπης.

Με βάση τη μελέτη επικαιροποίησης του ΠΕΣΔΑ της Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης (ΠΕΣΔΑ, 2016) και λαμβάνοντας υπόψη τη μέση ποιοτική σύσταση των παραγόμενων ΑΣΑ και τους στόχους των προγραμμάτων διαλογής στην πηγή, υπολογίστηκε κατά τον σχεδιασμό της ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης η σύσταση του σύμμεικτου ρεύματος που οδηγείται προς επεξεργασία στη μονάδα. Η εκτιμώμενη σύσταση των εισερχόμενων ΑΣΑ παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.1.1.

Πίνακας 4.1.1: Ανάλυση ποιοτικής σύστασης εισερχόμενων ΑΣΑ στη ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης.

Υλικό	% (κ.β.)
Οργανικό κλάσμα	42,55
Χαρτί – Χαρτόνι	9,61

Πλαστικά	9,96
Μέταλλα	2,18
Γυαλί	2,71
Ξύλο	10,43
Λοιπά	22,55
Σύνολο	100,00

Επιπλέον, υπολογίστηκαν τα επιμέρους ρεύματα των εισερχόμενων στην εγκατάσταση ρευμάτων ΑΣΑ καθώς και τα αντίστοιχα ποσοστά υγρασίας αυτών, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.2.

Πίνακας 4.1.2: Επιμέρους ρεύματα εισερχόμενων ΑΣΑ στη ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης και ποσοστά υγρασίας αυτών.

Ρεύμα	Σύνθεση % κ.β.	Υγρασία % κ.β.
Οργανικά	42,55%	74,00%
Χαρτί	6,43%	69,00%
Χαρτόνι	3,18%	69,00%
HDPE	0,46%	16,00%
PET	0,94%	16,00%
LDPE	7,66%	16,00%
PVC	0,90%	16,00%
Ανάμικτο πλαστικό	2,71%	4,00%
Γυαλί	1,35%	17,00%
Σίδηρος	0,83%	17,00%
Αλουμίνιο	4,20%	49,00%
Ύφασμα, δέρμα, ξύλο, λάστιχο	10,43%	49,00%
Αδρανή	2,94%	49,00%
Λοιπά	15,41%	46,00%
ΣΥΝΟΛΟ	100,00%	55,9%

Βασικοί στόχοι του σχεδιασμού της ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης αποτελούν:

- i. η μείωση του μεγέθους των εισερχόμενων αποβλήτων,
- ii. ο περιορισμός και η υγειονοποίηση του βιοαποδομήσιμου κλάσματός τους και
- iii. η ανάκτηση ανακυκλώσιμων υλικών και άλλων αξιοποιήσιμων προϊόντων.

Η ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης περιλαμβάνει τις ακόλουθες μονάδες:

- Μονάδα Υποδοχής
- Μονάδα Μηχανικής Επεξεργασίας σύμμεικτων ΑΣΑ
- Μονάδα Μηχανικής Επεξεργασίας προδιαλεγμένων οργανικών
- Μονάδα Βιολογικής Επεξεργασίας
 - i. Μονάδα Αναερόβιας Χώνευσης
 - ii. Μονάδα Κομποστοποίησης-Ωρίμανσης
- Μονάδα Παραγωγής Ενέργειας
- Μονάδα Ραφιναρίας
- Χώρος Ελέγχου & Ρύθμισης Διεργασιών (Control Room)
- Κτίριο Εξυπηρέτησης Μονάδας Επεξεργασίας Απορριμμάτων
- Μονάδα Επεξεργασίας Στραγγισμάτων
- Λοιπά Έργα Υποδομής
 - i. Υποσταθμός ηλεκτρικής ενέργειας
 - ii. Δεξαμενή πυρόσβεσης
 - iii. Έργα διαμόρφωσης περιβάλλοντος χώρου
 - iv. Έργα εσωτερικής οδοποιίας
 - v. Έργα περιμετρικής περίφραξης και πύλης εισόδου
 - vi. Αντιτυρική ζώνη
 - vii. Έργα αντιπλημμυρικής προστασίας
 - viii. Δίκτυο συλλογής στραγγιδίων και λοιπών αποβλήτων
 - ix. Έργα πρασίνου και άρδευσης
 - x. Ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις
 - xi. Δίκτυα ύδρευσης, βιομηχανικού νερού και πυρόσβεσης
 - xii. Ηλεκτρολογικό δίκτυο, δίκτυο εξωτερικού φωτισμού, έργα αντικεραυνικής προστασίας

xiii. Έργα κεντρικού ελέγχου και αυτοματισμών

Τέλος, τα αξιοποιήσιμα προϊόντα που προκύπτουν από τη λειτουργία της ΜΕΑ

Αλεξανδρούπολης την παρούσα περίοδο, περιλαμβάνουν:

- Ανακτώμενα ανακυκλώσιμα υλικά, όπως σιδηρούχα και μη σιδηρούχα μέταλλα (αλουμίνιο), χαρτί/χαρτόνι και πλαστικά.
- Κόμποστ Τύπου Α
- Ηλεκτρική και θερμική ενέργεια, η οποία παράγεται μέσω της αξιοποίησης του βιοαερίου.

4.1.2 Τεχνική περιγραφή επιμέρους μονάδων

4.1.2.1 Μονάδα υποδοχής

Κατά την είσοδό τους στη ΜΕΑ, τα απορριμματοφόρα διέρχονται από τον οικίσκο ελέγχου και ζυγίζονται στις γεφυροπλάστιγγες, ενώ καταγράφονται η προέλευση και η ποσότητα των μεταφερόμενων αποβλήτων. Πριν από την έξοδό τους, τα οχήματα διέρχονται από τη γεφυροπλάστιγγα εξόδου και από εγκατάσταση καθαρισμού τροχών, ώστε να αποτρέπεται η μεταφορά λάσπης και μικροαπορριμμάτων εκτός της Μονάδας.

Μετά τη ζύγιση, τα οχήματα κατευθύνονται στις τέσσερις θέσεις εκκένωσης, από τις οποίες οι τρεις προορίζονται για σύμμεικτα ΑΣΑ και η μία για προδιαλεγμένα οργανικά. Τα απόβλητα εκφορτώνονται σε δεξαμενές προσωρινής αποθήκευσης, συνολικής χωρητικότητας περίπου δύο ημερών, οι οποίες διαθέτουν σύστημα συλλογής των παραγόμενων στραγγισμάτων που προκύπτουν από την αυτοσυμπίεση των απορριμμάτων.

Η εκφόρτωση πραγματοποιείται εντός του κτιρίου μηχανικής επεξεργασίας, σε συνθήκες υποπίεσης, με αυτόματες θύρες και σύστημα επεξεργασίας του απαγόμενου αέρα για τον περιορισμό οσμών και σκόνης. Τέλος, μέσω συστήματος γερανογέφυρας-αρπάγης, που ελέγχεται από την καμπίνα χειριστή που έχει άμεση οπτική επαφή με τις τάφρους εκκένωσης, τα απόβλητα μεταφέρονται ελεγχόμενα προς τις διατάξεις τροφοδοσίας της Μονάδας Μηχανικής Επεξεργασίας.

4.1.2.2 Μονάδα μηχανικής επεξεργασίας σύμμεικτων αστικών απορριμμάτων

Η αρπάγη εναποθέτει τα απόβλητα στη χοάνη τροφοδοσίας του σχίστη σάκων όπου πραγματοποιείται η διάνοιξη των σάκων χωρίς έντονο τεμαχισμό του περιεχομένου τους, ώστε να διατηρούνται αναγνωρίσιμα τα ανακυκλώσιμα υλικά και να διευκολύνεται ο διαχωρισμός

τους στα επόμενα στάδια. Έπειτα, λαμβάνει χώρα οπτικός έλεγχος για την απομάκρυνση επικίνδυνων, μη αποδεκτών ή ογκωδών αντικειμένων που ενδέχεται να προκαλέσουν βλάβες στον κατάντη εξοπλισμό.

Στη συνέχεια, τα απόβλητα οδηγούνται σε πρωτοβάθμιο περιστροφικό κόσκινο, όπου διαχωρίζονται με βάση το μέγεθός τους σε τρία κλάσματα:

- λεπτόκοκκο (<130 mm),
- ενδιάμεσο (130-250 mm) και
- ευμέγεθες (>250 mm)

Το ευμέγεθες κλάσμα (>250 mm) οδηγείται σε καμπίνα χειροδιαλογής τεσσάρων θέσεων, στην οποία ανακτώνται κυρίως πλαστικό φιλμ, χαρτί, χαρτόνι και μεταλλικά αντικείμενα. Το μη αξιοποιήσιμο υπόλειμμα του συγκεκριμένου ρεύματος οδηγείται απευθείας προς τελική διάθεση.

Το λεπτόκοκκο κλάσμα (<130 mm) υποβάλλεται σε δευτεροβάθμια κοσκίνιση μέσω δονητικού κόσκινου και διαχωρίζεται στα κλάσματα:

- 0–20 mm,
- 20–70 mm και
- 70–130 mm.

Από το λεπτόκοκκο κλάσμα 0–20 mm απομακρύνονται μικρά σιδηρούχα αντικείμενα με μαγνητικό τύμπανο και το υπόλοιπο υλικό οδηγείται στον χώρο κομποστοποίησης και ωρίμανσης, όπου αναμιγνύεται με το χωνεμένο υλικό. Το οργανικό κλάσμα 20–70 mm διέρχεται από μαγνητικό διαχωριστή και στη συνέχεια οδηγείται προς αναερόβια χώνευση. Τα κλάσματα 70–130 mm και 130–250 mm που προκύπτουν από τα δύο κόσκινα, οδηγούνται από κοινού στον βαλλιστικό διαχωριστή όπου διαχωρίζονται βάσει σχήματος και βάρους σε τρία κλάσματα. Συγκεκριμένα, διαχωρίζονται στο ελαφρύ (2D) και το βαρύ (3D) κλάσμα που προκύπτουν από την μετακίνηση του υλικού και σε αυτό που διέρχεται από τις οπές του διαχωριστή (κοσκίνιση) που είναι ίσες με 60 mm και αποτελεί το λεπτόκοκκο κλάσμα (fine). Η μετακίνηση του υλικού γίνεται από την ταλάντωση των διαμηκών δοκών ώθησης (paddles), οπότε και το υλικό ωθείται σε διαφορετικές κατευθύνσεις ανάλογα με το σχήμα και το βάρος του. Με τον τρόπο αυτό περιορίζεται η παρουσία οργανικού υλικού στα ανακυκλώσιμα και βελτιώνεται η απόδοση των επόμενων σταδίων διαχωρισμού.

Το τρισδιάστατο κλάσμα οδηγείται σε οπτικούς διαχωριστές, όπου ανακτώνται διαδοχικά PET, HDPE και PP. Αντίστοιχα, από το δισδιάστατο κλάσμα ανακτώνται πλαστικό φιλμ, κυρίως LDPE, καθώς και χαρτί και χαρτόνι. Τα ανακτώμενα υλικά διέρχονται από καμπίνες χειροδιαλογής για ποιοτικό έλεγχο και απομάκρυνση των υπολειπόμενων προσμίξεων.

Τα υπολείμματα των δισδιάστατων και τρισδιάστατων ρευμάτων συγκεντρώνονται σε κοινή γραμμή και διέρχονται από μαγνητικό και επαγωγικό διαχωριστή για την ανάκτηση σιδηρούχων μετάλλων και αλουμινίου, αντίστοιχα. Τα ανακυκλώσιμα υλικά μεταφέρονται σε χώρους προσωρινής αποθήκευσης, συμπιέζονται σε δέματα και αποθηκεύονται μέχρι την παραλαβή τους, ενώ το τελικό μη αξιοποιήσιμο υπόλειμμα οδηγείται στον ΧΥΤΥ.

Τέλος, η μηχανική επεξεργασία πραγματοποιείται εξ ολοκλήρου σε κλειστό κτίριο υπό συνθήκες υποπίεσης. Ο αέρας αναρροφάται από επιλεγμένα σημεία και υφίσταται απόσπηση και αποκονίωση πριν από την έκλυσή του στην ατμόσφαιρα. Οι επιμέρους διεργασίες και οι μεταφορικές ταινίες ελέγχονται μέσω αυτοματοποιημένου συστήματος, εξασφαλίζοντας τη συνεχή και συντονισμένη λειτουργία της εγκατάστασης.

4.1.2.3 Μονάδα μηχανικής επεξεργασίας προδιαλεγμένων οργανικών

Σκοπός της Μονάδας είναι η απομάκρυνση ξένων προσμίξεων από τα προδιαλεγμένα οργανικά απόβλητα και η κατάλληλη προετοιμασία τους για την επακόλουθη βιολογική επεξεργασία. Από τη διαδικασία προκύπτει ένα οργανικό κλάσμα προς αναερόβια χώνευση και ένα ρεύμα ανεπιθύμητων προσμίξεων, το οποίο οδηγείται προς τελική διάθεση στον ΧΥΤΥ.

Αρχικά, τα οργανικά απόβλητα τροφοδοτούνται σε σχίστη σάκων, ο οποίος διανοίγει τους σάκους και απελευθερώνει το περιεχόμενό τους χωρίς να προκαλεί έντονο τεμαχισμό του υλικού. Στη συνέχεια, το υλικό διέρχεται από μαγνητικό διαχωριστή, όπου απομακρύνονται τα σιδηρούχα αντικείμενα και συλλέγονται σε ανεξάρτητο κάδο. Τα διερχόμενα του μαγνήτη απόβλητα οδηγούνται σε περιστροφικό κόσκινο μεγέθους οπών 80 mm. Από την κοσκίνιση παράγονται δύο κλάσματα:

- το λεπτόκοκκο κλάσμα (0-80 mm) και
- το ευμέγεθες κλάσμα (>80 mm)

Το ευμέγεθες κλάσμα, το οποίο περιλαμβάνει κυρίως ανεπιθύμητες προσμίξεις, συλλέγεται σε οδηγείται προς τελική διάθεση στον ΧΥΤΥ. Ωστόσο, το λεπτόκοκκο οργανικό κλάσμα

μεταφέρεται σε κατάλληλα διαμορφωμένο χώρο προσωρινής αποθήκευσης όπου αναμιγνύεται, με τη χρήση φορτωτή, με τεμαχισμένα πράσινα απόβλητα. Το παραγόμενο μείγμα μεταφέρεται στα επιμέρους κελιά ξηρής αναερόβιας χώνευσης για τη βιολογική του επεξεργασία.

Το σύνολο των διεργασιών πραγματοποιείται μηχανικά εντός κλειστού χώρου. Η εγκατάσταση διαθέτει συστήματα εξαερισμού, αναρρόφησης αέρα και αποκονίωσης, ώστε να περιορίζονται η διασπορά υλικών, η σκόνη και οι οσμές ενώ οι κύριες διεργασίες είναι αυτοματοποιημένες και παρακολουθούνται μέσω κεντρικού συστήματος ελέγχου.

4.1.2.4 Μονάδα βιολογικής επεξεργασίας

4.1.2.4.1 Γενικά

Στην οριστική μελέτη του έργου προβλεπόταν η κατασκευή δώδεκα (12) αντιδραστήρων για τη βιολογική επεξεργασία του οργανικού κλάσματος των εισερχόμενων ΑΣΑ και των προδιαλεγμένων οργανικών αποβλήτων. Συγκεκριμένα, ο αρχικός σχεδιασμός προέβλεπε τη χρήση οκτώ (8) αντιδραστήρων για τη διεργασία της ξηρής αναερόβιας χώνευσης και τεσσάρων (4) για τη διεργασία της κομποστοποίησης, ενώ η φάση της ωρίμανσης προβλεπόταν να πραγματοποιείται σε σωρούς ανοιχτού τύπου. Ωστόσο, στην παρούσα φάση, δεδομένου ότι δεν έχει ακόμη αναπτυχθεί το Δίκτυο Διαλογής στην Πηγή των βιοαποβλήτων, το σύνολο των 12 κατασκευασμένων κελιών χρησιμοποιείται για την επεξεργασία του οργανικού κλάσματος που ανακτάται από τη μηχανική διαλογή των σύμμεικτων ΑΣΑ.

4.1.2.4.2 Αναερόβια χώνευση

Η μονάδα ξηρής αναερόβιας χώνευσης της ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης, αποτελεί το βασικό στάδιο βιολογικής επεξεργασίας του οργανικού κλάσματος που ανακτάται κατά τη μηχανική διαλογή των σύμμεικτων ΑΣΑ και παράλληλα επιτρέπει την ενεργειακή αξιοποίηση του οργανικού κλάσματος μέσω της παραγωγής βιοαερίου. Η συγκεκριμένη διεργασία επιλέγεται καθώς επιτυγχάνει αφενός σημαντική μείωση της βιοαποδομήσιμης οργανικής ύλης και αφετέρου αξιοποίηση του παραγόμενου μεθανίου για ενεργειακή χρήση, συμβάλλοντας στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της εγκατάστασης.

Η διεργασία εφαρμόζεται σε κλειστούς αντιδραστήρες παρτίδας (batch) τύπου γκαράζ οι οποίοι βασίζονται στην τεχνολογία MAD (MESOGEOS Anaerobic Digestion™), μία τεχνολογία ξηράς αναερόβιας χώνευσης που έχει αναπτυχθεί από τη ΜΕΣΟΓΕΙΟΣ Α.Ε. σε

συνεργασία με Ευρωπαίους εμπειρογνώμονες. Οι αντιδραστήρες είναι διατεταγμένοι σε δύο παράλληλες γραμμές επεξεργασίας, οι οποίες διαχωρίζονται από το διάδρομο φόρτωσης-εκφόρτωσης των μηχανημάτων, ενώ η διεργασία που λαμβάνει χώρα σε κάθε αντιδραστήρα περιλαμβάνει τρεις διακριτές φάσεις.

Κατά την αρχική φάση πραγματοποιείται περιορισμένος αερισμός του υλικού με στόχο τη δημιουργία κατάλληλων συνθηκών για την ανάπτυξη της μικροβιακής κοινότητας και την ομαλή έναρξη της αναερόβιας αποδόμησης. Ακολουθεί η κύρια αναερόβια φάση, κατά την οποία λαμβάνει χώρα η βιοαποδόμηση του οργανικού υλικού και η παραγωγή βιοαερίου πλούσιου σε μεθάνιο, ενώ στο τελικό στάδιο εφαρμόζεται εκ νέου αερισμός προκειμένου να ολοκληρωθεί η διεργασία και να προετοιμαστεί το χωνεμένο υπόλειμμα για τα επόμενα στάδια επεξεργασίας.

Η συνολική διάρκεια παραμονής του υλικού εντός των αντιδραστήρων ανέρχεται σε 21 ημέρες, χρονικό διάστημα το οποίο μετράται από τη σφράγιση της αεροστεγούς θύρας έως την ολοκλήρωση της αναερόβιας επεξεργασίας. Η τροφοδοσία πραγματοποιείται μέσω αεροστεγών θυρών με τη χρήση φορτωτή, ενώ είναι δυνατή η επανακυκλοφορία χωνευμένου υλικού από προηγούμενο κύκλο επεξεργασίας σε ποσοστό έως 25%, ώστε να επιτυγχάνεται εμβολιασμός της νέας απορριμματικής μάζας με ενεργή μικροβιακή βιομάζα.

Για τη διατήρηση των κατάλληλων συνθηκών λειτουργίας εντός του αναερόβιου αντιδραστήρα, κάθε αντιδραστήρας διαθέτει δίκτυο συλλογής και ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων, σύστημα διαβροχής, δίκτυο αερισμού καθώς και ενσωματωμένο σύστημα θέρμανσης. Το δίκτυο σωληνώσεων για τον αερισμό του υλικού βρίσκεται στο δάπεδο του κάθε αντιδραστήρα και πραγματοποιείται στην αρχή και στο τέλος της διεργασίας όπου γίνεται εμφύσηση του αέρα στην απορριμματική μάζα μέσω ανεμιστήρων. Σε κάθε κελί αντιστοιχεί ένας ανεμιστήρας ο οποίος μέσω αεραγωγού θα διοχετεύει αέρα στο σύστημα σωληνώσεων του κελιού. Η έξοδος του αέρα επιτυγχάνεται μέσω κατάλληλα διαμορφωμένων εξόδων ώστε να εξασφαλίζεται η ομοιόμορφη κατανομή του αέρα και η αποφυγή φραξίματος των αγωγών με μικροαπορρίμματα. Ο αέρας απομακρύνεται με έναν ανεμιστήρα κοινό για όλα τα κελιά και οδηγείται για απόσπηση στο σύστημα επεξεργασίας αέριων εκπομπών. Τα παραγόμενα στραγγίσματα από τη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης, συλλέγονται μέσω δικτύου και οδηγούνται προς αποθήκευση σε υπόγεια δεξαμενή. Έπειτα είτε γίνεται η ανακυκλοφορία τους στο σώμα της απορριμματικής μάζας των κελιών είτε οδηγούνται προς επεξεργασία στη

Μονάδα Επεξεργασίας Στραγγισμάτων (ΜΕΣ). Τα στραγγίσματα ανακυκλοφορούνται στην απορριμματική μάζα μέσω του συστήματος διαβροχής που είναι εγκατεστημένο στην οροφή του αντιδραστήρα. Η ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων συμβάλλει στη διατήρηση της απαιτούμενης υγρασίας εντός της απορριμματικής μάζας και στη μεταφορά θερμότητας εντός του αντιδραστήρα, αντισταθμίζοντας τις θερμικές απώλειες και διατηρώντας ομοιόμορφες συνθήκες κατά τη διάρκεια της διεργασίας, ευνοώντας έτσι την ομαλή εξέλιξη της διεργασίας και τη σταθερή παραγωγή βιοαερίου. Η θερμοκρασία της διεργασίας διατηρείται σε μεσοφιλικά επίπεδα (37–40°C) μέσω κυκλοφορίας θερμού νερού σε αγωγούς που είναι εγκιβωτισμένοι στο δάπεδο των κελιών. Το ζεστό νερό που κυκλοφορεί στους αγωγούς διοχετεύεται από τη μηχανή συμπαραγωγής θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας.

Το παραγόμενο βιοαέριο συλλέγεται μέσω ειδικού δικτύου απαγωγής και οδηγείται είτε προς ενεργειακή αξιοποίηση στη μονάδα συμπαραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας είτε, σε περιπτώσεις πλεονάζουσας παραγωγής ή έκτακτης ανάγκης, προς καύση στον πυρσό ασφαλείας. Για την προσωρινή αποθήκευση του παραγόμενου βιοαερίου και την εξομάλυνση των διακυμάνσεων της παραγωγής, έχει εγκατασταθεί αεριοφυλάκιο επί της οροφής των αντιδραστήρων.

Επειδή το βιοαέριο περιέχει σημαντικές συγκεντρώσεις μεθανίου, παρουσιάζει υψηλή αναφλεξιμότητα και μπορεί να δημιουργήσει εκρηκτικά μίγματα παρουσία αέρα. Για τον λόγο αυτό, το σύστημα έχει σχεδιαστεί με κατάλληλες προδιαγραφές στεγανότητας, εξοπλισμό αντεκρηκτικής προστασίας (ATEX), διατάξεις ελέγχου διαρροών, βαλβίδες ασφαλείας και σύστημα ελεγχόμενης εκκένωσης του υπολειπόμενου βιοαερίου μετά την ολοκλήρωση κάθε κύκλου λειτουργίας. Με τον τρόπο αυτό αποτρέπεται τόσο η δημιουργία εκρηκτικών συνθηκών όσο και η ανεξέλεγκτη έκλυση μεθανίου στην ατμόσφαιρα.

Η αρχική μελέτη του έργου προέβλεπε μέγιστη δυναμικότητα επεξεργασίας περίπου 33.000 τόνων οργανικού κλάσματος ετησίως. Ωστόσο, από την εμπειρία της λειτουργίας της εγκατάστασης η μέγιστη θεωρητική δυναμικότητα της υφιστάμενης μονάδας αναερόβιας χώνευσης επαναπροσδιορίζεται σε περίπου 43.000 tn/y με ύψος πλήρωσης των σωρών τα 3,0 m και με το ειδικό βάρος των εισερχόμενων βιοαποβλήτων να ανέρχεται σε περίπου 0,60 t/m³. Σύμφωνα με το ισοζύγιο μάζας της της μονάδας, τα ρεύματα που προκύπτουν από τη μηχανική επεξεργασία και οδηγούνται στη βιολογική επεξεργασία διακρίνονται στα εξής:

- **Κλάσμα 20–70 mm:** αντιστοιχεί στο 42,6% της συνολικής εισόδου στη ΜΕΑ, δηλαδή σε 41.151,60 tn/y. Το συγκεκριμένο ρεύμα οδηγείται προς αναερόβια χώνευση. Με βάση τη δυναμικότητα των δώδεκα υφιστάμενων κελιών, η μονάδα επαρκεί για την πλήρη επεξεργασία της ποσότητας αυτής.
- **Κλάσμα 0–20 mm:** αντιστοιχεί στο 9,5% της συνολικής εισόδου στη ΜΕΑ, δηλαδή σε 9.177,00 tn/y. Το ρεύμα αυτό δεν οδηγείται στην αναερόβια χώνευση, αλλά προστίθεται στο χωνεμένο υπόλειμμα και κατευθύνεται στη μονάδα κομποστοποίησης–ωρίμανσης.

Συνολικά, η ποσότητα οργανικού υλικού που ανακτάται από τη μηχανική επεξεργασία ανέρχεται σε 50.328,60 tn/y. Από την αναερόβια χώνευση του κλάσματος 20–70 mm προκύπτουν απώλειες μάζας (υγρασία και πτητικά στερεά) 18,95%, με αποτέλεσμα η ποσότητα του χωνεμένου υπολείμματος που οδηγείται προς ωρίμανση να ανέρχεται σε 33.352,89 tn/y. Με την προσθήκη του κλάσματος 0–20 mm, η συνολική ποσότητα που κατευθύνεται στη φάση της ωρίμανσης ανέρχεται σε περίπου 42.530 tn/y.

4.1.2.4.3 Μονάδα Κομποστοποίησης - Ωρίμανσης

Μετά την ολοκλήρωση της αναερόβιας χώνευσης, το χωνεμένο υλικό μεταφέρεται στη μονάδα κομποστοποίησης–ωρίμανσης, όπου παραμένει για περίπου 35 ημέρες προκειμένου να ολοκληρωθεί η αερόβια σταθεροποίηση και η υγιεινοποίηση του τελικού προϊόντος, κομπόστ Τύπου Α. Το υλικό διαμορφώνεται σε επιμήκεις σωρούς, οι οποίοι αναστρέφονται περιοδικά ώστε να εξασφαλίζεται ο απαραίτητος αερισμός και η ομαλή εξέλιξη της βιολογικής διεργασίας. Κατά τη διάρκεια της ωρίμανσης, οι σωροί καλύπτονται με ειδική διαπνέουσα μεμβράνη, η οποία συμβάλλει στον περιορισμό των οσμών, στη διατήρηση της απαιτούμενης υγρασίας και στην προστασία του υλικού από τις καιρικές συνθήκες.

4.1.2.5 Μονάδα Παραγωγής Ενέργειας

Το παραγόμενο από την αναερόβια χώνευση βιοαέριο, αξιοποιείται ενεργειακά. Συγκεκριμένα, μετά την προσωρινή αποθήκευσή του στο αεριοφυλάκιο, υφίσταται την απαραίτητη επεξεργασία (καθαρισμό και προσαρμογή των χαρακτηριστικών του) ώστε να πληροί τις απαιτήσεις λειτουργίας της μονάδας συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (CHP). Στη συνέχεια χρησιμοποιείται ως καύσιμο για την παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής

ενέργειας, συμβάλλοντας στην ενεργειακή αυτάρκεια και στη βελτίωση της συνολικής ενεργειακής απόδοσης της εγκατάστασης.

4.1.2.6 Μονάδα Ραφιναρίας

Μετά την ολοκλήρωση της κομποστοποίησης–ωρίμανσης, το παραγόμενο υλικό οδηγείται στη μονάδα ραφιναρίας, όπου υφίσταται τελική επεξεργασία με σκοπό την απομάκρυνση ανεπιθύμητων προσμίξεων και τη βελτίωση της ποιότητάς του. Η διεργασία περιλαμβάνει κοσκίνιση και βαρυμετρικό διαχωρισμό, μέσω των οποίων απομακρύνονται αδρανή υλικά, πλαστικά και μη πλήρως βιοαποδομημένα οργανικά.

Η ίδια γραμμή επεξεργασίας χρησιμοποιείται τόσο για το υλικό που προέρχεται από το οργανικό κλάσμα των σύμμεικτων ΑΣΑ όσο και για τα προδιαλεγμένα βιοαπόβλητα, με διαδοχική λειτουργία και καθαρισμό μεταξύ των δύο ρευμάτων, ώστε να διασφαλίζεται η ποιότητα του τελικού προϊόντος. Το εξευγενισμένο υλικό αποτελεί το παραγόμενο κόμποστ, ενώ το υπόλειμμα της διεργασίας οδηγείται προς τελική διάθεση.

4.1.2.7 Χώρος ελέγχου και ρύθμισης διεργασιών (Control Room)

Η λειτουργία της ΜΕΑ παρακολουθείται και ελέγχεται από τον κεντρικό χώρο ελέγχου (Control Room), όπου είναι εγκατεστημένα τα συστήματα αυτοματισμού και ελέγχου της εγκατάστασης. Μέσω του κεντρικού συστήματος παρακολουθούνται και ρυθμίζονται όλες οι βασικές διεργασίες της μονάδας, ενώ το προσωπικό έχει τη δυνατότητα εποπτείας των κύριων χώρων λειτουργίας τόσο με άμεση οπτική επαφή όσο και μέσω συστημάτων επιτήρησης κλειστού κυκλώματος (CCTV).

4.1.2.8 Κτίριο εξυπηρέτησης της Μονάδας Επεξεργασίας Αποβλήτων

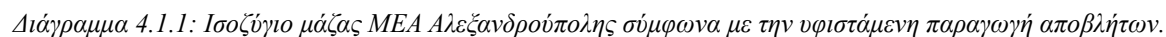
Το κτίριο εξυπηρέτησης στεγάζει τους βασικούς υποστηρικτικούς χώρους της ΜΕΑ. Περιλαμβάνει χώρους υγιεινής και αποδυτήρια για το προσωπικό, καθώς και τους χώρους διοίκησης, το εργαστήριο, τα γραφεία, το λογιστήριο και τον χώρο διαλείμματος των εργαζομένων. Η διάταξη του κτιρίου εξασφαλίζει την εύρυθμη λειτουργία της εγκατάστασης και την υποστήριξη των καθημερινών λειτουργικών και διοικητικών αναγκών της μονάδας.

4.1.2.9 Μονάδα επεξεργασίας στραγγισμάτων

Η μονάδα επεξεργασίας στραγγισμάτων έχει ως σκοπό την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων που παράγονται στις επιμέρους διεργασίες της ΜΕΑ, ώστε να επιτυγχάνονται τα απαιτούμενα ποιοτικά χαρακτηριστικά της εκροής. Το σύστημα περιλαμβάνει στάδια εξισορρόπησης, προεπεξεργασίας, βιολογικής επεξεργασίας με τεχνολογία βιοαντιδραστήρα με μεμβράνες (Membrane Bio-Reactor - MBR), καθώς και τελική επεξεργασία με αντίστροφη όσμωση (Reverse Osmosis - RO). Το επεξεργασμένο νερό οδηγείται σε δεξαμενή αποθήκευσης και μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί για ανάγκες της εγκατάστασης, όπως η άρδευση, ενώ τα παραγόμενα συμπυκνώματα και η περίσσεια ιλύος συλλέγονται και απομακρύνονται προς κατάλληλη διαχείριση.

Τέλος, η μονάδα της ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης συμπληρώνεται από σειρά υποστηρικτικών έργων υποδομής και ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων, όπως αναφέρθηκαν συνοπτικά ανωτέρω, τα οποία εξασφαλίζουν την εύρυθμη και ασφαλή λειτουργία της ΜΕΑ. Καθώς οι υποδομές αυτές δεν αποτελούν αντικείμενο της παρούσας εργασίας, δεν παρουσιάζονται αναλυτικά στις επόμενες ενότητες.

Στο Διάγραμμα 4.1.1 παρουσιάζεται το ισοζύγιο της ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης, όπως αυτή λειτουργεί κατά την παρούσα περίοδο.



5 Πειραματικό Μέρος

5.1 Σκοπός πειραματικής διαδικασίας

Στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας σχεδιάστηκαν και εφαρμόστηκαν πειραματικές δοκιμές στη μονάδα ξηρής αναερόβιας χώνευσης της ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης, με σκοπό τη διερεύνηση της επίδρασης της συχνότητας ανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων στην απόδοση της διεργασίας. Ειδικότερα, διερευνήθηκε η επίδραση διαφορετικών συχνοτήτων ανακυκλοφορίας στην παραγωγή και τη σύσταση του παραγόμενου βιοαερίου, καθώς και στα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του υποστρώματος και των στραγγισμάτων κατά τη διάρκεια της αναερόβιας χώνευσης.

Η αξιολόγηση των διαφορετικών συνθηκών λειτουργίας πραγματοποιήθηκε μέσω της σύγκρισης των πειραματικών αποτελεσμάτων, με στόχο την εκτίμηση της επίδρασης της ανακυκλοφορίας στην απόδοση της διεργασίας και την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την εφαρμογή της σε εγκαταστάσεις ξηρής αναερόβιας χώνευσης πλήρους κλίμακας. Τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας μπορούν να αξιοποιηθούν για την αξιολόγηση και τη βελτιστοποίηση της στρατηγικής ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων στη ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης, ενώ παράλληλα παρέχουν χρήσιμα στοιχεία για την εφαρμογή αντίστοιχων πρακτικών σε άλλες μονάδες επεξεργασίας οργανικού κλάσματος αστικών στερεών αποβλήτων.

5.2 Προετοιμασία υλικών πειραματικής διαδικασίας

Για τις ανάγκες της πειραματικής διαδικασίας χρησιμοποιήθηκε το οργανικό κλάσμα των ΑΣΑ μεγέθους 20–70 mm, το οποίο παράγεται στη γραμμή μηχανικής επεξεργασίας της ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης. Στην παρούσα ενότητα περιγράφεται η διαδικασία παραγωγής του συγκεκριμένου κλάσματος, καθώς και τα βασικά χαρακτηριστικά του.

5.2.1 Εισερχόμενα ΑΣΑ

Για την υλοποίηση της πειραματικής διαδικασίας χρησιμοποιήθηκε το οργανικό κλάσμα που προέκυψε από την επεξεργασία των εισερχόμενων σύμμεικτων ΑΣΑ στη ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης κατά τους μήνες Φεβρουάριο και Μάρτιο του 2026. Το οργανικό κλάσμα που παρήχθη από τα εισερχόμενα ΑΣΑ του Φεβρουαρίου χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή του χωνευμένου υλικού (digestate), το οποίο αξιοποιήθηκε στη συνέχεια ως εμβόλιο, ενώ το

οργανικό κλάσμα που προέκυψε από τα εισερχόμενα ΑΣΑ του Μαρτίου χρησιμοποιήθηκε ως φρέσκο υπόστρωμα. Στον Πίνακα 5.2.1 παρουσιάζονται οι ημερήσιες εισερχόμενες ποσότητες ΑΣΑ στη ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης για τους μήνες Φεβρουάριο και Μάρτιο του 2026.

Πίνακας 5.2.1: Εισερχόμενες ποσότητες ΑΣΑ στη ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης τους μήνες Φεβρουάριο και Μάρτιο του 2026.

A/A	Ημερομηνία	Ποσότητα εισ/νων Φεβρ. (tn)	Ημερομηνία	Ποσότητα εισερχ. Μαρτίου (tn)
1	Κυριακή 01/02/2026	100,20	Κυριακή 01/03/2026	63,26
2	Δευτέρα 02/02/2026	276,00	Δευτέρα 02/03/2026	302,16
3	Τρίτη 03/02/2026	285,52	Τρίτη 03/03/2026	250,14
4	Τετάρτη 04/02/2026	252,52	Τετάρτη 04/03/2026	251,62
5	Πέμπτη 05/02/2026	203,4	Πέμπτη 05/03/2026	232,9
6	Παρασκευή 06/02/2026	262,12	Παρασκευή 06/03/2026	292,8
7	Σάββατο 07/23/2026	213,44	Σάββατο 07/03/2026	120,26
8	Κυριακή 08/02/2026	64,1	Κυριακή 08/03/2026	102,84
9	Δευτέρα 09/02/2026	286,06	Δευτέρα 09/03/2026	324,92
10	Τρίτη 10/02/2026	281,8	Τρίτη 10/03/2026	318,42
11	Τετάρτη 11/02/2026	360,78	Τετάρτη 11/03/2026	243,92
12	Πέμπτη 12/02/2026	214,12	Πέμπτη 12/03/2026	304,7
13	Παρασκευή 13/02/2026	185,74	Παρασκευή 13/03/2026	296,92
14	Σάββατο 14/02/2026	102,22	Σάββατο 14/03/2026	91,12
15	Κυριακή 15/02/2026	80,42	Κυριακή 15/03/2026	54,64
16	Δευτέρα 16/02/2026	313,18	Δευτέρα 16/03/2026	337,62
17	Τρίτη 17/02/2026	291,28	Τρίτη 17/03/2026	348,08
18	Τετάρτη 18/02/2026	307,32	Τετάρτη 18/03/2026	270,66
19	Πέμπτη 19/02/2026	251,74	Πέμπτη 19/03/2026	327,96
20	Παρασκευή 20/02/2026	291,9	Παρασκευή 20/03/2026	305,7
21	Σάββατο 21/02/2026	70,1	Σάββατο 21/03/2026	48,78
22	Κυριακή 22/02/2026	93,36	Κυριακή 22/03/2026	48,56
23	Δευτέρα 23/02/2026	69,76	Δευτέρα 23/03/2026	306,06
24	Τρίτη 24/03/2026	395,2	Τρίτη 24/03/2026	299,34
25	Τετάρτη 25/02/2026	305,84	Τετάρτη 25/03/2026	29,06
26	Πέμπτη 26/02/2026	319,94	Πέμπτη 26/03/2026	315,48
27	Παρασκευή 27/02/2026	271,98	Παρασκευή 27/03/2026	303,66

A/A	Ημερομηνία	Ποσότητα εισ/νων Φεβρ. (tn)	Ημερομηνία	Ποσότητα εισερχ. Μαρτίου (tn)
28	Σάββατο 28/02/2026	95,38	Σάββατο 28/03/2026	70,36
29			Κυριακή 29/03/2026	54,52
30			Δευτέρα 30/03/2026	357,56
31			Τρίτη 31/03/2026	315,8
Συνολική ποσότητα εισερχομένων (tn)		6.245,42		6.989,82

Επιπλέον, στον Πίνακα 5.2.2. παρουσιάζονται οι εισερχόμενες ποσότητες σύμμεικτων ΑΣΑ στη ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης ανά φορέα προέλευσης (Δήμους και Ιδιώτες) των Π.Ε. Έβρου, Ροδόπης και Ξάνθης.

Πίνακας 5.2.2: Εισερχόμενα σύμμεικτα ΑΣΑ στη ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης ανά παραγωγό τους μήνες Φεβρουάριο και Μάρτιο του 2026.

A/A	Παραγωγός	Ποσότητα εισ/νων ΑΣΑ Φεβρ. (tn)	Ποσότητα εισ/νων ΑΣΑ Μαρτίου (tn)
1	ΣΜΑ Κομοτηνής	2.442,14	2.612,82
2	Δήμος Αλεξανδρούπολης	1.983,14	2.271,2
3	Δήμος Ορεστιάδας	695,5	810,24
4	ΣΜΑ Ξάνθης	386,18	520,98
5	Δήμος Διδυμότειχου	359,9	394,6
6	Δήμος Σουφλίου	233,58	242,46
7	Δήμος Σαμοθράκης	64,82	69,18
8	Ελληνικός Στρατός	34,86	27,96
9	ΒΙΠΕ Κομοτηνής	32,18	27,7
10	Οργανισμός Λιμένος Αλεξανδρούπολης	6,8	9,26
11	Ηλεκτροπαραγωγή Αλεξανδρούπολης Μονοπρόσωπη Α.Ε.	2,24	2
12	FSRU Alexandroupolis	2,46	0,9
13	VESTAS HELLAS AE	0,98	-
14	Πρίσμα ηλεκτρονικά ABEE	0,64	0,52

A/A	Παραγωγός	Ποσότητα εισ/νων ΑΣΑ Φεβρ. (tn)	Ποσότητα εισ/νων ΑΣΑ Μαρτίου (tn)
Συνολική ποσότητα εισερχομένων (tn)		6.245,42	6.989,82

Από το Τμήμα Ποιοτικού Ελέγχου της ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης προσδιορίστηκε η ποιοτική σύσταση των εισερχόμενων ΑΣΑ σύμφωνα με τη διεθνή πρότυπη μέθοδο ASTM D5231-92 *Standard Test Method for Determination of the Composition of Unprocessed Municipal Solid Waste*. Η διαδικασία δειγματοληψίας και ανάλυσης πραγματοποιήθηκε με τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται η αντιπροσωπευτικότητα των δειγμάτων και η στατιστική αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Για τον σκοπό αυτό, το αρχικό σύμμεκτο δείγμα, συνολικής μάζας 1.000–2.000 kg, υποβλήθηκε σε διαδοχικό τετραμερισμό μέχρι την παραλαβή τελικού δείγματος μάζας 400–500 kg, το οποίο στη συνέχεια υποβλήθηκε σε χειροδιαλογή και ποιοτική ανάλυση. Στον Πίνακα 5.2.3. παρουσιάζεται η μέση ποιοτική σύσταση των εισερχόμενων σύμμεκτων ΑΣΑ της ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης, όπως προέκυψε από δειγματοληψίες που πραγματοποιήθηκαν από το Τμήμα Ποιοτικού Ελέγχου της μονάδας κατά τους μήνες Φεβρουάριο και Μάρτιο του 2026.

Πίνακας 5.2.3: Μέση ποιοτική σύσταση εισερχομένων ΑΣΑ Φεβρουαρίου και Μαρτίου 2026 στη ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης.

Ημερομηνία δειγματοληψίας	02/02/26	25/02/26	Μ.Ο. Φεβρ.	02/03/26	23/03/26	Μ.Ο. Μαρτίου	Μ.Ο. Φεβρ.-Μαρ.
Ρεύματα υλικών	Ποσοστό (%)	Ποσοστό (%)	Ποσοστό (%)	Ποσοστό (%)	Ποσοστό (%)	Ποσοστό (%)	Ποσοστό (%)
Οργανικό κλάσμα (συνολικά)	38,4	38,6	38,5	30,5	40,8	35,6	37,1
PET	2,7	2,5	2,6	3,2	2,3	2,7	2,7
HDPE/PE	0,5	0,5	0,5	0,2	0,3	0,2	0,4
PP/PS	1,7	1,4	1,5	1,6	1,7	1,7	1,6
Ευμέγεθες πλαστικό Film	3,4	1,6	2,5	5,6	2,0	3,8	3,2
Film	2,2	1,2	1,7	1,6	0,8	1,2	1,5
Μη εμπορεύσιμο Film	3,0	1,6	2,3	2,2	4,0	3,1	2,7
Διάφορα πλαστικά	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0

Ημερομηνία δειγματοληψίας	02/02/26	25/02/26	Μ.Ο. Φεβρ.	02/03/26	23/03/26	Μ.Ο. Μαρτίου	Μ.Ο. Φεβρ.-Μαρ.
Ρεύματα υλικών	Ποσοστό (%)	Ποσοστό (%)	Ποσοστό (%)	Ποσοστό (%)	Ποσοστό (%)	Ποσοστό (%)	Ποσοστό (%)
Σιδηρούχα μέταλλα	1,4	1,3	1,4	1,2	0,9	1,1	1,3
Λοιπά μέταλλα	0,3	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1
Αλουμίνιο	0,4	0,6	0,5	0,4	0,2	0,3	0,4
Χαρτί έντυπο	0,8	0,5	0,6	1,0	0,5	0,8	0,7
Χαρτόνι	4,8	3,4	4,1	4,9	3,2	4,0	4,1
Μη εμπορεύσιμο χαρτί	6,1	3,3	4,7	6,9	8,3	7,6	6,2
Ύφασμα/δέρμα/λάσ τιχο	2,0	9,2	5,6	4,6	1,8	3,2	4,4
Ξύλο	0,0	0,6	0,3	0,2	3,6	1,9	1,1
Γυαλί	2,9	2,5	2,7	5,1	5,4	5,3	4,0
Αδρανή	0,0	0,3	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2
Σύνθετα (ηλεκτρολογικός εξοπλισμός)	0,1	1,5	0,8	0,1	0,0	0,1	0,5
Πολυστρωματικά	11,1	5,6	8,4	16,1	9,3	12,7	10,6
Τετραπάκ	0,9	0,8	0,9	0,9	0,4	0,7	0,8
Ιατρικά	2,3	0,2	1,3	0,6	0,2	0,4	0,9
Λοιπά (πάνες, απορροφητικά κλπ.)	14,9	22,6	18,8	12,8	14,0	13,4	16,1
Σύνολο	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

5.2.2 Προετοιμασία οργανικού κλάσματος 20-70 mm

Μετά την είσοδο των σύμμεικτων ΑΣΑ στη ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης, τα απόβλητα αποτέθηκαν αρχικά στην τάφρο Υποδοχής ΑΣΑ, όπου το Τμήμα Ποιοτικού Ελέγχου της Μονάδας αξιολόγησε την καταλληλότητά τους για επεξεργασία. Τα απόβλητα που κρίθηκαν ακατάλληλα απομακρύνθηκαν και οδηγήθηκαν απευθείας στον Χώρο Υγειονομικής Ταφής Υπολειμμάτων (Χ.Υ.Τ.Υ.), χωρίς να εισέλθουν στη γραμμή μηχανικής επεξεργασίας. Στους Πίνακες 5.2.4 και 5.2.5 παρουσιάζεται η ημερήσια εισερχόμενη ποσότητα αποβλήτων, η ποσότητα που οδηγήθηκε προς επεξεργασία, καθώς και η ποσότητα των αποβλήτων που

απορρίφθηκαν ως μη αποδεκτά για επεξεργασία τον Φεβρουάριο και Μάρτιο του 2026 αντίστοιχα.

Πίνακας 5.2.4: Ημερήσιες ποσότητες εισερχόμενων ΑΣΑ, ακατάλληλων προς επεξεργασία, εισερχόμενων στη γραμμή επεξεργασίας και δυναμικότητα της Μονάδας Μηχανικής Διαλογής στη ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης τον Φεβρουάριο του 2026.

A/A	Ημερομηνία	Ποσότητα εισ/νων (tn)	Ακατάλληλα προς επεξεργασία (tn)	Εισ/να στη γραμμή επεξεργασίας (tn)	Δυναμικότητα ΜΜΔ (tn/h)
1	Κυριακή 01/02/2026	100,20	9,72	0,00	0,00
2	Δευτέρα 02/02/2026	276,00	10,12	285,33	23,80
3	Τρίτη 03/02/2026	285,52	11,50	231,4	21,00
4	Τετάρτη 04/02/2026	252,52	7,88	248,80	22,60
5	Πέμπτη 05/02/2026	203,40	7,42	257,30	19,80
6	Παρασκευή 06/02/2026	262,12	4,76	262,95	21,90
7	Σάββατο 07/02/2026	213,44	0,00	258,85	25,90
8	Κυριακή 08/02/2026	64,10	16,50	0,00	0,00
9	Δευτέρα 09/02/2026	286,06	13,74	283,60	21,80
10	Τρίτη 10/02/2026	281,80	10,94	277,70	23,10
11	Τετάρτη 11/02/2026	360,78	11,88	274,35	24,90

A/A	Ημερομηνία	Ποσότητα εισ/νων (tn)	Ακατάλληλα προς επεξεργασία (tn)	Εισ/να στη γραμμή επεξεργασίας (tn)	Δυναμικότητα ΜΜΔ (tn/h)
12	Πέμπτη 12/02/2026	214,12	10,88	246,80	22,40
13	Παρασκευή 13/02/2026	185,74	0,00	253,54	19,50
14	Σάββατο 14/02/2026	102,22	0,00	83,82	16,80
15	Κυριακή 15/02/2026	80,42	11,68	0,00	0,00
16	Δευτέρα 16/02/2026	313,18	18,66	284,25	21,90
17	Τρίτη 17/02/2026	291,28	9,70	290,1	22,30
18	Τετάρτη 18/02/2026	307,32	5,68	291,45	24,30
19	Πέμπτη 19/02/2026	251,74	14,54	287,95	22,20
20	Παρασκευή 20/02/2026	291,90	0,00	289,40	22,30
21	Σάββατο 21/02/2026	70,10	0,00	169,95	21,20
22	Κυριακή 22/02/2026	93,36	0,00	0,00	0,00
23	Δευτέρα 23/02/2026	69,76	13,96	0,00	0,00
24	Τρίτη 24/02/2026	395,20	5,50	322,60	24,80

A/A	Ημερομηνία	Ποσότητα εισ/νων (tn)	Ακατάλληλα προς επεξεργασία (tn)	Εισ/να στη γραμμή επεξεργασίας (tn)	Δυναμικότητα ΜΜΑ (tn/h)
25	Τετάρτη 25/02/2026	305,84	12,28	338,55	26,0
26	Πέμπτη 26/02/2026	319,94	17,52	303,10	25,30
27	Παρασκευή 27/02/2026	271,98	0,00	305,90	23,50
28	Σάββατο 28/02/2026	95,38	9,72	128,10	21,40
ΣΥΝΟΛΟ (tn)		6.245,42	224,86	5.975,59	-

Πίνακας 5.2.5: Ημερήσιες ποσότητες εισερχόμενων ΑΣΑ, ακατάλληλων προς επεξεργασία, εισερχόμενων στη γραμμή επεξεργασίας και δυναμικότητα της Μονάδας Μηχανικής Διαλογής στη ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης τον Μάρτιο του 2026.

A/A	Ημερομηνία	Ποσότητα εισ/νων (tn)	Ακατάλληλα προς επεξεργασία (tn)	Εισ/να στη γραμμή επεξεργασίας (tn)	Δυναμικότητα ΜΜΑ (tn/h)
1	Κυριακή 01/03/2026	63,26	0	0	0
2	Δευτέρα 02/03/2026	302,16	7,7	272,6	20,9
3	Τρίτη 03/03/2026	250,14	17,32	263,9	21,4
4	Τετάρτη 04/03/2026	251,62	19,32	275,2	20,5
5	Πέμπτη 05/03/2026	232,9	16,4	235	18,2
6	Παρασκευή 06/03/2026	292,8	12,34	250,85	18,5

A/A	Ημερομηνία	Ποσότητα εισ/νων (tn)	Ακατάλληλα προς επεξεργασία (tn)	Εισ/να στη γραμμή επεξεργασίας (tn)	Δυναμικότητα MMA (tn/h)
7	Σάββατο 07/03/2026	120,26	5,44	98,2	15,1
8	Κυριακή 08/03/2026	102,84	0	0	0
9	Δευτέρα 09/03/2026	324,92	17,52	274,58	21,3
10	Τρίτη 10/03/2026	318,42	14,14	281,1	21,8
11	Τετάρτη 11/03/2026	243,92	14,88	304,15	22,4
12	Πέμπτη 12/03/2026	304,7	19,26	230,9	22,2
13	Παρασκευή 13/03/2026	296,92	13,8	275,34	20,9
14	Σάββατο 14/03/2026	91,12	7,08	177,6	19,6
15	Κυριακή 15/03/2026	54,64	0	0	0
16	Δευτέρα 16/03/2026	337,62	16,86	201,8	22,5
17	Τρίτη 17/03/2026	348,08	21,78	305,1	23,7
18	Τετάρτη 18/03/2026	270,66	14,62	278,1	22,4
19	Πέμπτη 19/03/2026	327,96	15,12	316,7	23,8

A/A	Ημερομηνία	Ποσότητα εισ/νων (tn)	Ακατάλληλα προς επεξεργασία (tn)	Εισ/να στη γραμμή επεξεργασίας (tn)	Δυναμικότητα MMA (tn/h)
20	Παρασκευή 20/03/2026	305,7	17,18	254,5	22,3
21	Σάββατο 21/03/2026	48,75	1,94	209,7	23
22	Κυριακή 22/03/2026	48,56	0	0	0
23	Δευτέρα 23/03/2026	306,96	6,9	314,1	23,1
24	Τρίτη 24/03/2026	299,34	4,68	282,64	21
25	Τετάρτη 25/03/2026	29,06	0	0	0
26	Πέμπτη 26/03/2026	315,48	15,04	314,8	23,46
27	Παρασκευή 27/03/2026	303,66	9,66	272,15	23,06
28	Σάββατο 28/03/2026	70,36	0	176,3	15,84
29	Κυριακή 29/03/2026	54,52	0	0	0
30	Δευτέρα 30/03/2026	357,56	9,64	301,16	22,1
31	Τρίτη 31/03/2026	315,8	10	307,53	23
ΣΥΝΟΛΟ (tn)		6.989,82	307,72	6.474,00	-

Τα αποδεκτά προς επεξεργασία ΑΣΑ προωθήθηκαν στη συνέχεια στη γραμμή μηχανικής επεξεργασίας της ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης, όπου πραγματοποιήθηκε ο διαχωρισμός τους και η παραγωγή του οργανικού κλάσματος μεγέθους 20–70 mm.

Αρχικά τροφοδοτήθηκαν στον σχίστη σάκων, όπου πραγματοποιήθηκε η διάνοιξη των σάκων. Στη συνέχεια οδηγήθηκαν σε πρωτοβάθμιο περιστροφικό κόσκινο, όπου διαχωρίστηκαν στα κλάσματα <130 mm, 130–250 mm και >250 mm. Το λεπτόκοκκο κλάσμα (<130 mm) υποβλήθηκε σε δευτεροβάθμια κοσκίνιση, από την οποία προέκυψαν τα κλάσματα 0–20 mm, 20–70 mm και 70–130 mm. Το οργανικό κλάσμα 20–70 mm διήλθε από μαγνητικό διαχωριστή για την απομάκρυνση των σιδηρούχων υλικών και αποτέλεσε το οργανικό κλάσμα που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη.

Στις Εικόνες 5.2.1 και 5.2.2 παρουσιάζονται το οργανικό κλάσμα 20-70 mm μετά το τελικό στάδιο μαγνητικού διαχωρισμού και η παραλαβή του από το φορτωτή για την μετέπειτα πλήρωση των κελιών της αναερόβιας χώνευσης, αντίστοιχα.



Εικόνα 5.2.1: Οργανικό κλάσμα 20-70 mm μετά το τελικό στάδιο μαγνητικού διαχωρισμού και πριν από την πλήρωση των κελιών αναερόβιας χώνευσης.



Εικόνα 5.2.2: Παραλαβή από ελαστιχοφόρο φορτωτή κλάσματος 20-70 mm προς πλήρωση κελιών αναερόβιας χώνευσης.

5.2.3 Χαρακτηρισμός του οργανικού κλάσματος 20-70 mm

Για τον προσδιορισμό της σύστασης του οργανικού κλάσματος 20–70 mm πραγματοποιήθηκαν από το προσωπικό της μονάδας συνολικά τέσσερις δειγματοληψίες, όπως παρατίθενται στον Πίνακα 5.2.6. Οι δύο πρώτες πραγματοποιήθηκαν τον Φεβρουάριο του 2026 και αφορούσαν το οργανικό κλάσμα που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή του εμβολίου, ενώ οι άλλες δύο πραγματοποιήθηκαν τον Μάρτιο του 2026 και αφορούσαν το οργανικό κλάσμα που χρησιμοποιήθηκε ως φρέσκο υπόστρωμα. Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε η μέση σύσταση που προέκυψε από τις τέσσερις δειγματοληψίες.

Πίνακας 5.2.6: Ποιοτική σύσταση του οργανικού κλάσματος 20–70 mm κατά τους μήνες Φεβρουάριο και Μάρτιο 2026 και μέση ποιοτική σύσταση δειγματοληψιών Φεβρουαρίου-Μαρτίου.

Σημείο δειγματοληψίας	Οργανικό κλάσμα 20-70 mm	Οργανικό κλάσμα 20-70 mm	Οργανικό κλάσμα 20-70 mm	Οργανικό κλάσμα 20-70 mm	M.O.
Ημερομηνία	5/2/2026	23/2/2026	12/3/2026	25/3/2026	Φεβρουάριος-Μάρτιος
Κιλά δείγματος	426,7	451,1	406,42	430,94	428,79
Ρεύματα υλικών	Ποσοστό (%)	Ποσοστό (%)	Ποσοστό (%)	Ποσοστό (%)	Ποσοστό (%)
Οργανικό κλάσμα	61,90	63,80	63,30	64,72	63,43
PET	0,22	0,42	0,38	0,62	0,41
HDPE/PE	0,00	0,06	0,08	0,18	0,08
PP/PS	0,14	0,34	0,24	0,42	0,29
Ευμέγεθες πλαστικό Film	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Film	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Μη εμπορεύσιμο Film	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Διάφορα πλαστικά	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Σιδηρούχα μέταλλα	0,00	0,00	0,02	0,08	0,03
Λοιπά μέταλλα	0,03	0,13	0,08	0,18	0,11
Αλουμίνιο	0,05	0,19	0,16	0,28	0,17
Χαρτί έντυπο	00,00	0,04	0,03	0,09	0,04
Χαρτόνι	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Μη εμπορεύσιμο χαρτί	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ύφασμα/δέρμα/λάστιχο	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ξύλο	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Γυαλί	4,20	5,50	3,60	4,36	4,42
Αδρανή	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Σύνθετα (ηλεκτρολογικός εξοπλισμός)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Πολυστρωματικά	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Τετραπάκ	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ιατρικά	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Λοιπά (πάνες, απορροφητικά κλπ.)	30,60	32,38	29,90	31,24	31,03
Σύνολο	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Επιπλέον, για τον μήνα Μάρτιο, πραγματοποιήθηκε ποιοτική ανάλυση του οργανικού κλάσματος που περιέχεται στα σύμμεικτα ΑΣΑ, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2.7.

Πίνακας 5.2.7: Μέση σύσταση οργανικού κλάσματος Μαρτίου 2026 των εισερχόμενων σύμμεικτων ΑΣΑ στη ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΡΓΑΝΙΚΟΥ ΚΛΑΣΜΑΤΟΣ

	Μάρτιος
0-20 mm	35,46 kg
Ποσοστό επί του συνόλου του οργανικού κλάσματος	24,20 %
Ποσοστό επί του συνόλου του δείγματος	8,20 %
20-70 mm	120,35 kg
Ποσοστό επί του συνόλου του οργανικού κλάσματος	75,20 %
Ποσοστό επί του συνόλου του δείγματος	22,72 %
>70 mm	0,91 kg
Ποσοστό επί του συνόλου του οργανικού κλάσματος	0,59 %
Ποσοστό επί του συνόλου του δείγματος	0,20 %
Οργανικό κλάσμα (συνολικά)	156,72 kg
Ποσοστό συνολικού οργανικού κλάσματος επί του συνόλου του οργανικού κλάσματος	100,00 %
Ποσοστό επί του συνόλου του δείγματος	35,63 %

Αξίζει να σημειωθεί ότι η ποιοτική σύσταση του οργανικού κλάσματος 20–70 mm που παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.2.7 αφορά αποκλειστικά το συγκεκριμένο κλάσμα. Σύμφωνα με τα στοιχεία λειτουργίας της μονάδας, μαζί με το κλάσμα 20-70 οδηγείται στους αντιδραστήρες ξηρής αναερόβιας χώνευσης μέρος του υπολειμματικού χαρτιού όπου αξιοποιείται λόγω του

υψηλού δυναμικού του για παραγωγή βιοαερίου. Επιπλέον, αναφέρεται πως χρησιμοποιείται καθώς λειτουργεί ως πληρωτικό υλικό κατά τη διεργασία, ενώ συμβάλλει παράλληλα στη μείωση της συγκέντρωσης H_2S . Μετά την ολοκλήρωση της διεργασίας, ενσωματώνεται στο παραγόμενο CLO.

5.2.4 Πειραματικός σχεδιασμός

Μετά την παραγωγή και τον χαρακτηρισμό του οργανικού κλάσματος 20–70 mm ακολούθησε η πειραματική διαδικασία, η οποία πραγματοποιήθηκε σε κελιά ξηρής αναερόβιας χώνευσης πλήρους κλίμακας της ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης. Η πειραματική διάταξη περιλάμβανε δύο διαδοχικά στάδια. Αρχικά, στο Κελί 7 της μονάδας τροφοδοτήθηκε μίγμα οργανικού κλάσματος μεγέθους 20–70 mm και εμβολίου, το οποίο προερχόταν από προηγούμενη παρτίδα χωνεμένου υλικού της ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης. Το μίγμα υποβλήθηκε σε αναερόβια χώνευση για την παραγωγή χωνεμένου υλικού (digestate). Με την ολοκλήρωση της διεργασίας, το χωνεμένο υλικό επιμερίστηκε σε τρεις ποσότητες και χρησιμοποιήθηκε ως εμβόλιο για την τροφοδοσία τριών νέων κελιών αναερόβιας χώνευσης (Κελιά 1, 2 και 3). Σε κάθε κελί προστέθηκε φρέσκο οργανικό κλάσμα μεγέθους 20–70 mm και η αντίστοιχη ποσότητα εμβολίου, σύμφωνα με τον σχεδιασμό της μονάδας, ο οποίος προβλέπει την επανακυκλοφορία έως και 25% χωνεμένου υλικού για τον εμβολιασμό της νέας απορριμματικής μάζας. Οι πραγματικές ποσότητες φρέσκου οργανικού κλάσματος και εμβολίου που χρησιμοποιήθηκαν για την τροφοδοσία κάθε κελιού παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2.8.

Πίνακας 5.2.8: Εισερχόμενες ποσότητες οργανικού κλάσματος 20-70 mm και εμβολίου στα κελιά αναερόβιας χώνευσης.

Κελί	Φρέσκο οργανικό κλάσμα 20-70 mm (tn)	Εμβόλιο (tn)	Συνολική ποσότητα πλήρωσης (tn)
1	265	82,5	347,5
2	277	80,8	357,8
3	284	78,0	362,0

Με σκοπό τη διερεύνηση της επίδρασης της συχνότητας ανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων στη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης, εξετάστηκαν τρεις διαφορετικές συχνότητες ανακυκλοφορίας, με σταθερή διάρκεια κύκλου 1 min, οι οποίες αντιστοιχούσαν σε χαμηλή, μέση και υψηλή συχνότητα. Τα παραγόμενα στραγγίσματα από τα τρία κελιά συλλέγονταν σε

κοινή δεξαμενή στραγγισμάτων και επανακυκλοφορούνταν στα αντίστοιχα κελιά μέσω του εγκατεστημένου συστήματος διαβροχής. Στον ακόλουθο Πίνακα 5.2.9 παρουσιάζονται οι συνθήκες λειτουργίας των τριών κελιών.

Πίνακας 5.2.9: Συνθήκες ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων στα πειραματικά κελιά αναερόβιας χώνευσης.

Κελί	Συχνότητα	Διάρκεια κύκλου	Επανάληψη	Συχνότητα ανακυκλοφορίας
1	Χαμηλή	1 min	Κάθε 150 min (2,5 h)	10 φ/d
2	Μέση	1 min	Κάθε 41 min	35 φ/d
3	Υψηλή	1 min	Κάθε 29 min	50 φ/d

Οι τιμές της συχνότητας ανακυκλοφορίας (10, 35 και 50 φ/d) είναι στρογγυλοποιημένες. Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκαν οι πραγματικές συχνότητες λειτουργίας των 9,60, 35,12 και 49,66 κύκλων/ημέρα, οι οποίες αντιστοιχούν σε επανάληψη του κύκλου κάθε 150, 41 και 29 min, αντίστοιχα.

Η παροχή της αντλίας ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων ήταν 200 m³/h, ενώ η διάρκεια κάθε κύκλου λειτουργίας ορίστηκε σε 1 min. Με βάση τις παραμέτρους ανακυκλοφορίας που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2.9, υπολογίστηκαν ο ημερήσιος όγκος στραγγισμάτων που ανακυκλοφορούσε σε κάθε πειραματικό κελί, καθώς και ο αντίστοιχος ημερήσιος όγκος ανακυκλοφορίας ανά τόνο υλικού, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2.10.

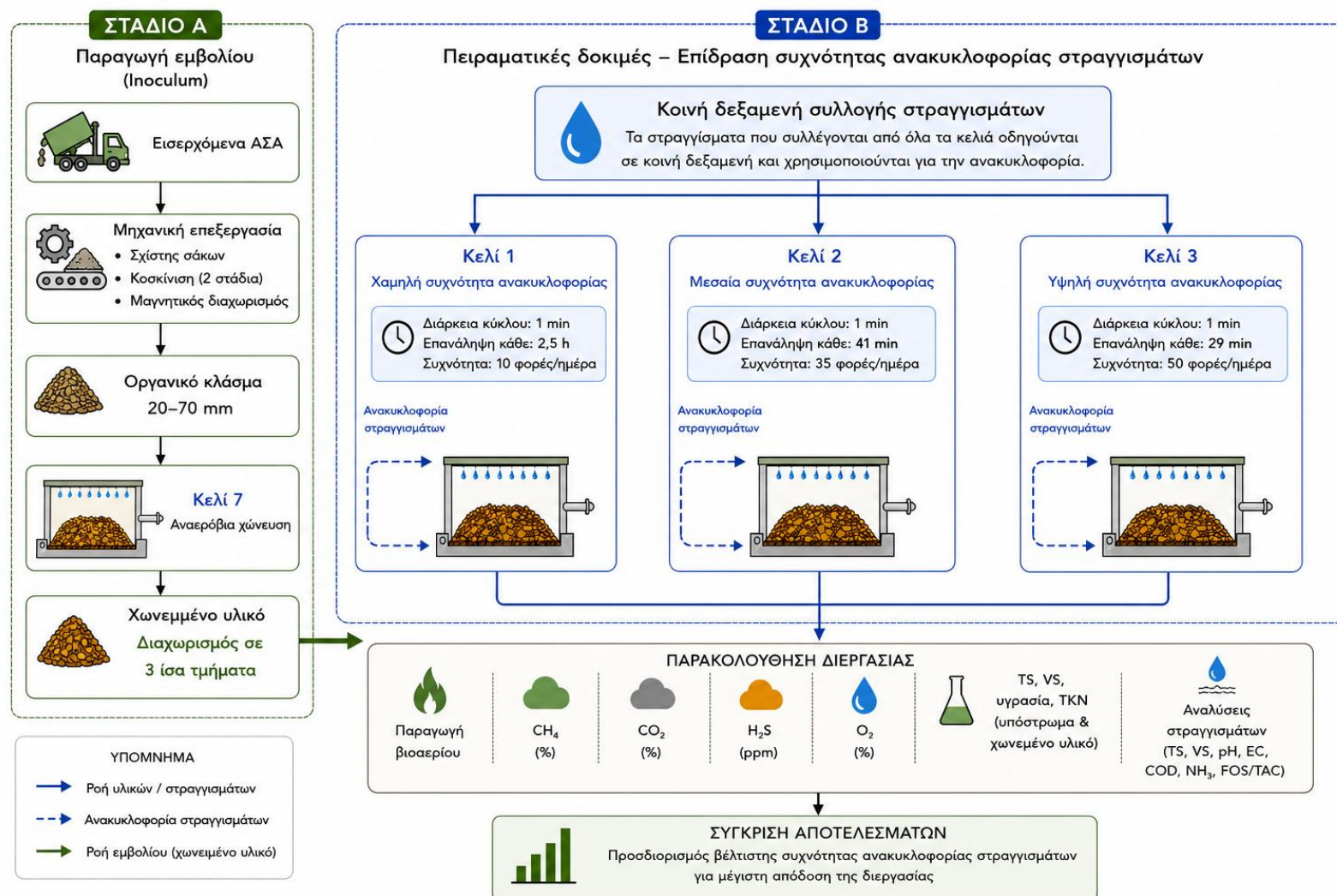
Πίνακας 5.2.10: Ημερήσιος όγκος ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων και ημερήσιος όγκος παροχής στραγγισμάτων ανά τόνο υλικού στα πειραματικά κελιά..

Κελί	Συχνότητα	Ημερήσιος όγκος ανακυκλοφορίας (m ³ /d)	Όγκος παροχής στραγγισμάτων (L/tn*d)
1	Χαμηλή	32,00	92,09
2	Μέση	117,07	327,19
3	Υψηλή	165,52	457,24

Η αναερόβια χώνευση πραγματοποιήθηκε υπό μεσόφιλες συνθήκες. Σε όλα τα κελιά διατηρήθηκαν ίδιες συνθήκες λειτουργίας, με μοναδική μεταβλητή τη συχνότητα ανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων. Για τις ανάγκες της πειραματικής διαδικασίας, το υλικό παρέμεινε σε όλα τα κελιά αναερόβιας χώνευσης για 40 ημέρες, ώστε να παρακολουθηθεί η εξέλιξη της αναερόβιας χώνευσης έως το στάδιο όπου η παραγωγή βιοαερίου παρουσίαζε

πλέον πτωτική τάση. Καθ' όλη τη διάρκεια της διεργασίας πραγματοποιήθηκε συνεχής παρακολούθηση της παραγωγής και της σύστασης του παραγόμενου βιοαερίου (CH_4 , CO_2 , O_2 και H_2S) μέσω του αναλυτή βιοαερίου, καθώς και της θερμοκρασίας και της πίεσης λειτουργίας των κελιών μέσω των αντίστοιχων οργάνων μέτρησης. Όλα τα δεδομένα μεταδίδονταν στο σύστημα Εποπτικού Ελέγχου και Συλλογής Δεδομένων (Supervisory Control and Data Acquisition -SCADA), μέσω του οποίου πραγματοποιούταν η συνεχής καταγραφή των μετρήσεων και ο αυτοματοποιημένος έλεγχος βασικών λειτουργικών παραμέτρων των αντιδραστήρων, όπως η ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων, η θερμοκρασία λειτουργίας και η διαχείριση της ροής του παραγόμενου βιοαερίου.

Η συνολική πειραματική διάταξη παρουσιάζεται σχηματικά στο Διάγραμμα 5.2.1, ενώ στις Εικόνες 5.2.3, 5.2.4 και 5.2.5 απεικονίζονται τα κελιά αναερόβιας χώνευσης που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία και στις Εικόνες 5.2.6, 5.2.7, 5.2.8 και 5.2.9 η διαδικασία πλήρωσής τους.



Διάγραμμα 5.2.1: Σχηματική απεικόνιση πειραματικής διαδικασίας.



Εικόνα 5.2.3: Κελί 7 της μονάδας αναερόβιας χώνευσης που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία.



Εικόνα 5.2.4: Κελιά 1, 2 και 3 της μονάδας αναερόβιας χώνευσης που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία.



Εικόνα 5.2.5: Εσωτερικό κελιού ξηρής αναερόβιας χώνευσης.



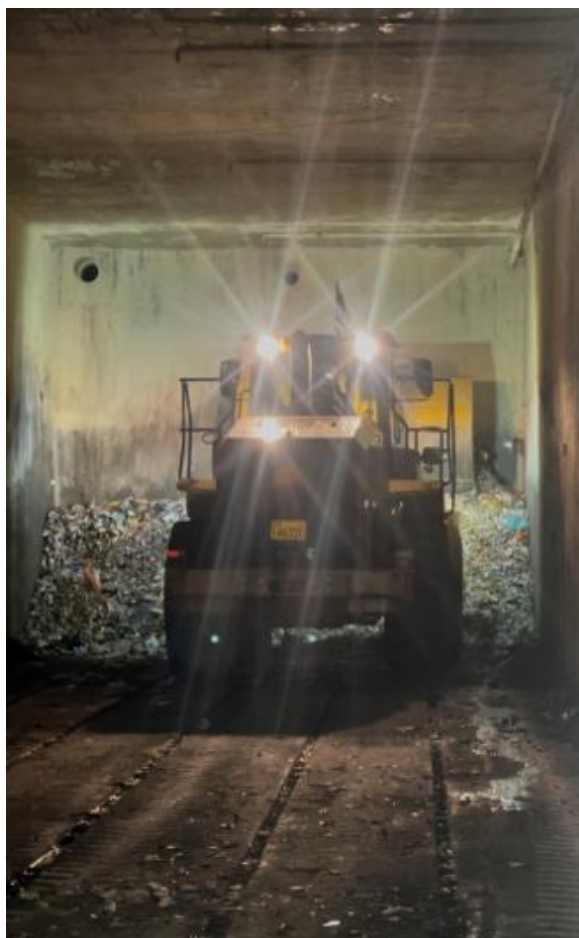
Εικόνα 5.2.6: Πλήρωση κελιού αναερόβιας χώνευσης με τη χρήση ελαστικοφόρου φορτωτή.



Εικόνα 5.2.7: Πλήρωση κελιού αναερόβιας χώνευσης.



Εικόνα 5.2.8: Πλήρωση κελιού αναερόβιας χώνευσης.



Εικόνα 5.2.9: Φορτωτής κατά τη διαδικασία πλήρωσης κελιού αναερόβιας χώνευσης.

5.3 Εργαστηριακές αναλύσεις

5.3.1 Φυσικοχημικός χαρακτηρισμός οργανικού κλάσματος και χωνεμένου υλικού

Για τον φυσικοχημικό χαρακτηρισμό του εισερχόμενου οργανικού κλάσματος 20–70 mm και του παραγόμενου χωνεμένου υλικού πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές αναλύσεις με στόχο την αξιολόγηση των βασικών χαρακτηριστικών τους πριν και μετά την αναερόβια χώνευση. Συγκεκριμένα, προσδιορίστηκαν τα ολικά στερεά (TS), τα πτητικά στερεά (VS), η υγρασία (Moisture) και το ολικό άζωτο κατά Kjeldahl (TKN). Οι εργαστηριακές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν σε αντιπροσωπευτικά δείγματα του οργανικού κλάσματος, του χωνεμένου υλικού και των στραγγισμάτων που συλλέχθηκαν από τη μονάδα, σύμφωνα με τις οδηγίες των *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* και άλλων πρότυπων αναλυτικών μεθόδων, ανάλογα με την εξεταζόμενη παράμετρο.

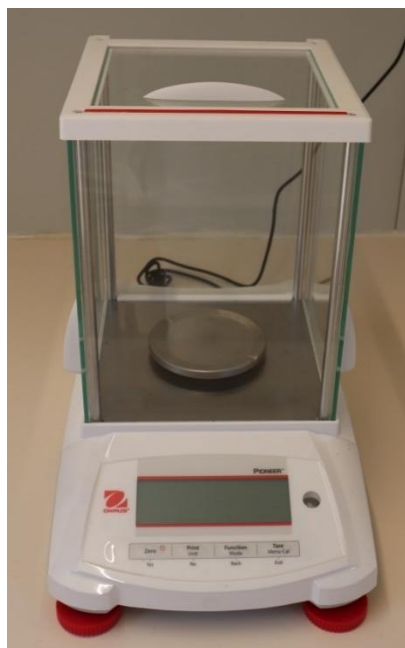
5.3.1.1 Προσδιορισμός ολικών στερεών (TS)

Τα ολικά στερεά (TS) προσδιορίστηκαν με τη μέθοδο της ξήρανσης σε εργαστηριακό φούρνο στους 105 °C. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν πορσελάνινες κάψες ζύγισης, οι οποίες πριν από τη χρήση τους ξηράνθηκαν στον φούρνο και στη συνέχεια τοποθετήθηκαν σε ξηραντήρα μέχρι να αποκτήσουν θερμοκρασία περιβάλλοντος. Έπειτα, οι κάψες ζυγίστηκαν σε αναλυτικό ζυγό ακριβείας και καταγράφηκε το βάρος τους. Στη συνέχεια, προστέθηκε το προς ανάλυση δείγμα και πραγματοποιήθηκε νέα ζύγιση, ώστε να προσδιοριστεί με ακρίβεια η αρχική μάζα του δείγματος. Οι κάψες με το δείγμα τοποθετήθηκαν εκ νέου στον φούρνο στους 105 °C έως ότου επιτευχθεί σταθερό βάρος. Ακολούθως, μεταφέρθηκαν σε ξηραντήρα μέχρι να αποκτήσουν θερμοκρασία περιβάλλοντος και στη συνέχεια ζυγίστηκαν εκ νέου. Η περιεκτικότητα του δείγματος σε ολικά στερεά υπολογίστηκε σύμφωνα με την Εξίσωση 5.3.1.

Εξίσωση 5.3.1: Υπολογισμός της περιεκτικότητας σε TS.

$$TS = \frac{\text{Βάρος κάψας με ξηραμένο δείγμα (g)} - \text{Βάρος κενής κάψας (g)}}{\text{Ποσότητα δείγματος (g)}} \times 1000$$

Στις Εικόνες 5.3.1 και 5.3.2 παρουσιάζονται ο αναλυτικός ζυγός ακριβείας και ο φούρνος ξήρανσης που χρησιμοποιήθηκαν στις εργαστηριακές αναλύσεις.



Εικόνα 5.3.1: Αναλυτικός ζυγός ακριβείας.



Εικόνα 5.3.2: Φούρνος ξήρανσης.

5.3.1.2 Προσδιορισμός πτητικών στερεών (VS)

Τα πτητικά στερεά (VS) προσδιορίστηκαν μετά τον προσδιορισμό των ολικών στερεών (TS), χρησιμοποιώντας την ίδια πορσελάνινη κάψα με το ξηραμένο δείγμα. Η κάψα με το ξηραμένο δείγμα τοποθετήθηκε σε προθερμασμένο κλίβανο στους 550 °C, όπου παρέμεινε για μία ώρα. Κατά την παραμονή στον κλίβανο απομακρύνθηκε το πτητικό οργανικό κλάσμα του δείγματος και παρέμειναν τα μη πτητικά στερεά (Non-Volatile Solids - NVS). Στη συνέχεια, μεταφέρθηκε σε ξηραντήρα για 20 λεπτά, μέχρι να αποκτήσει θερμοκρασία περιβάλλοντος, και ακολούθησε η τελική ζύγισή της σε αναλυτικό ζυγό ακριβείας.

Αρχικά υπολογίστηκαν τα NVS σύμφωνα με την Εξίσωση 5.3.2, ενώ η περιεκτικότητα σε πτητικά στερεά προέκυψε από τη διαφορά μεταξύ των ολικών στερεών και των μη πτητικών στερεών. Η περιεκτικότητα του δείγματος σε υγρασία υπολογίστηκε έμμεσα από την περιεκτικότητα σε ολικά στερεά (TS), ως η διαφορά από τη συνολική μάζα του δείγματος, σύμφωνα με την Εξίσωση 5.3.3.

Εξίσωση 5.3.2: Υπολογισμός της περιεκτικότητας σε NVS.

$$NVS = \frac{\text{Βάρος κάψας με δείγμα μετά τους 550 °C} - \text{Βάρος κενής κάψας (g)}}{\text{Ποσότητα δείγματος (g)}} \times 1000$$

Εξίσωση 5.3.3: Υπολογισμός της περιεκτικότητας σε VS.

$$VS = TS - NVS$$



Εικόνα 5.3.3: Κλίβανος υψηλής θερμοκρασίας (550 °C).

5.3.1.3 Προσδιορισμός υγρασίας

Η περιεκτικότητα του δείγματος σε υγρασία υπολογίστηκε έμμεσα από την περιεκτικότητα σε TS, ως η διαφορά από τη συνολική μάζα του δείγματος, σύμφωνα με την Εξίσωση 5.3.4.

Εξίσωση 5.3.4: Υπολογισμός της περιεκτικότητας σε υγρασία.

$$\text{Υγρασία (\%)} = 100 - \text{TS (\%)}$$

5.3.1.4 Προσδιορισμός ολικού αζώτου κατά Kjeldahl (TKN)

Ο προσδιορισμός του ολικού αζώτου κατά Kjeldahl (TKN) πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο Kjeldahl. Αρχικά, τα δείγματα υποβλήθηκαν σε πέψη παρουσία θεικού οξέος (H_2SO_4) και θεικού χαλκού (CuSO_4) ως καταλύτη, σε συσκευή πέψης, για περίπου τέσσερις ώρες και σε θερμοκρασία που κυμαινόταν από 170 έως 380 °C. Με την ολοκλήρωση της πέψης, πραγματοποιήθηκε απόσταξη του παραγόμενου αμμωνιακού αζώτου με τη χρήση διαλύματος βορικού οξέος (H_3BO_3), ενώ η τελική συγκέντρωση του ολικού αζώτου προσδιορίστηκε με τιτλοδότηση χρησιμοποιώντας πρότυπο διάλυμα θεικού οξέος (H_2SO_4). Η απόσταξη πραγματοποιήθηκε σε αυτόματη συσκευή απόσταξης Vapodest, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.3.4.



Εικόνα 5.3.4: Συσκευή απόσταξης.

5.3.2 Φυσικοχημικός χαρακτηρισμός στραγγισμάτων

5.3.2.1 Προσδιορισμός pH

Ο προσδιορισμός του pH πραγματοποιήθηκε με τη χρήση ψηφιακού pHμέτρου. Πριν από κάθε μέτρηση, το δείγμα διατηρούνταν υπό συνεχή ανάδευση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στη συνέχεια, το ηλεκτρόδιο του οργάνου εμβαπτιζόταν στο δείγμα και η τιμή του pH καταγραφόταν μετά τη σταθεροποίηση της ένδειξης. Το pHμετρο που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.3.5.

5.3.2.2 Προσδιορισμός ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC)

Ο προσδιορισμός της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (Electrical Conductivity, EC) πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του ίδιου ψηφιακού οργάνου που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση του pH, με το κατάλληλο ηλεκτρόδιο αγωγιμότητας. Το δείγμα διατηρούνταν υπό συνεχή ανάδευση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και το ηλεκτρόδιο εμβαπτιζόταν στο δείγμα μέχρι τη σταθεροποίηση της ένδειξης, οπότε και καταγραφόταν η τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Το χρησιμοποιούμενο όργανο παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.3.5.



Εικόνα 5.3.5: Ψηφιακό όργανο μέτρησης pH και EC.

5.3.2.3 Προσδιορισμός χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (COD)

Ο προσδιορισμός του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (Chemical Oxygen Demand, COD) πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο της χημικής οξείδωσης. Αρχικά, σε ειδικά φιαλίδια προστέθηκαν 2,5 mL δείγματος. Για την παρασκευή του τυφλού δείγματος χρησιμοποιήθηκαν

2,5 mL απιονισμένου νερού αντί του δείγματος. Στη συνέχεια, σε κάθε φιαλίδιο προστέθηκαν 2,5 mL διαλύματος διχρωμικού καλίου ($K_2Cr_2O_7$) και 5 mL διαλύματος θειικού οξέος με θειικό άργυρο (H_2SO_4/Ag_2SO_4).

Τα φιαλίδια τοποθετήθηκαν σε θερμοαντιδραστήρα στους 148 °C, όπου παρέμειναν για δύο ώρες. Μετά την ολοκλήρωση της επώασης, τα φιαλίδια αφέθηκαν να αποκτήσουν θερμοκρασία περιβάλλοντος και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε τιτλοδότηση για τον προσδιορισμό της περισσειας των διχρωμικών ιόντων, με τη χρήση διαλύματος θειικού σιδήρου και αμμωνίου (Ferrous Ammonium Sulfate – FAS) γνωστής συγκέντρωσης και δείκτη φερροΐνης. Η συγκέντρωση του COD υπολογίστηκε από τη διαφορά της κατανάλωσης του διαλύματος μεταξύ του δείγματος και του τυφλού, σύμφωνα με την Εξίσωση 5.3.5.

Εξίσωση 5.3.5: Υπολογισμός της συγκέντρωσης COD.

$$COD (mg O_2/L) = \frac{(A - B) \times M \times 8000}{V}$$

όπου,

A: όγκος διαλύματος FAS που καταναλώθηκε για το τυφλό δείγμα (mL)

B: όγκος διαλύματος FAS που καταναλώθηκε για το δείγμα (mL)

M: μοριακή συγκέντρωση (M) του διαλύματος FAS

V: όγκος του δείγματος (mL)

5.3.2.4 Προσδιορισμός ολικών στερεών (TS)

Ο προσδιορισμός των ολικών στερεών (TS) στα στραγγίσματα πραγματοποιήθηκε με ξήρανση του δείγματος σε φούρνο στους 105 °C. Αρχικά, ζυγίστηκε η κενή πορσελάνινη κάψα και στη συνέχεια προστέθηκε συγκεκριμένος όγκος στραγγίσματος, ο οποίος ζυγίστηκε εκ νέου. Η κάψα με το δείγμα τοποθετήθηκε στον φούρνο στους 105 °C, όπου παρέμεινε μέχρι την πλήρη απομάκρυνση της υγρασίας. Μετά την ψύξη της σε ξηραντήρα, πραγματοποιήθηκε η τελική ζύγιση και η περιεκτικότητα σε ολικά στερεά υπολογίστηκε σύμφωνα με την Εξίσωση 5.3.6.

Εξίσωση 5.3.6: Υπολογισμός της περιεκτικότητας των στραγγισμάτων σε TS.

$$TS = \frac{\text{Βάρος κάψας με ξηραμένο δείγμα (g)} - \text{Βάρος κενής κάψας (g)}}{\text{Όγκος δείγματος (mL)}} \times 1000$$

5.3.2.5 Προσδιορισμός πτητικών στερεών (VS)

Ο προσδιορισμός των πτητικών στερεών (VS) στα στραγγίσματα πραγματοποιήθηκε μετά τον προσδιορισμό των ολικών στερεών (TS), χρησιμοποιώντας την ίδια πορσελάνινη κάψα με το ξηραμένο δείγμα. Η κάψα τοποθετήθηκε σε προθερμασμένο κλίβανο στους 550 °C, όπου παρέμεινε για μία ώρα. Στη συνέχεια, μεταφέρθηκε σε ξηραντήρα για 20 λεπτά, μέχρι να αποκτήσει θερμοκρασία περιβάλλοντος, και ακολούθησε η τελική ζύγισή της σε αναλυτικό ζυγό ακριβείας.

Αρχικά, υπολογίστηκαν τα μη πτητικά στερεά (Non-Volatile Solids, NVS), σύμφωνα με την Εξίσωση 5.3.7. Η περιεκτικότητα σε πτητικά στερεά υπολογίστηκε στη συνέχεια από τη διαφορά μεταξύ των ολικών στερεών και των μη πτητικών στερεών, σύμφωνα με την Εξίσωση 5.3.8.

Εξίσωση 5.3.7: Υπολογισμός της περιεκτικότητας των στραγγισμάτων σε NVS.

$$NVS = \frac{\text{Βάρος κάψας με δείγμα μετά τους 550 °C} - \text{Βάρος κενής κάψας}(g)}{\text{Όγκος δείγματος (mL)}} \times 1000$$

Εξίσωση 5.3.8: Υπολογισμός της περιεκτικότητας των στραγγισμάτων σε VS.

$$VS = TS - NVS$$

5.3.2.6 Προσδιορισμός αμμωνιακού αζώτου (NH₄-N)

Ο προσδιορισμός του αμμωνιακού αζώτου (NH₄-N) πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο της απόσταξης. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε ο καθαρισμός της συσκευής απόσταξης. Στη συνέχεια, σε κωνική φιάλη προστέθηκαν 10 mL διαλύματος βορικού οξέος, ενώ σε ογκομετρικό κύλινδρο τοποθετήθηκαν 50 mL κατάλληλα αραιωμένου δείγματος. Στο δείγμα προστέθηκαν 3 mL ρυθμιστικού διαλύματος αμμωνίας και 10 σταγόνες διαλύματος υδροξειδίου του νατρίου (NaOH), ώστε το pH να γίνει μεγαλύτερο από 10.

Ακολούθως, το δείγμα μεταφέρθηκε στη φιάλη απόσταξης της συσκευής απόσταξης, ενώ η κωνική φιάλη με το διάλυμα βορικού οξέος τοποθετήθηκε στη θέση συλλογής του αποστάγματος. Κατά τη διάρκεια της απόσταξης, η αμμωνία που απελευθερώθηκε από το δείγμα δεσμεύτηκε στο διάλυμα βορικού οξέος.

Μετά την ολοκλήρωση της απόσταξης, το διάλυμα υποβλήθηκε σε τιτλοδότηση με πρότυπο διάλυμα θειικού οξέος (H_2SO_4) μέχρι την αλλαγή του χρώματος από πράσινο σε μωβ. Η συγκέντρωση του $\text{NH}_4\text{-N}$ υπολογίστηκε από τη διαφορά της κατανάλωσης του οξέος μεταξύ του δείγματος και του τυφλού δείγματος, λαμβάνοντας υπόψη τον συντελεστή αραίωσης, σύμφωνα με την Εξίσωση 5.3.9. Η συσκευή απόσταξης που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.3.4.

Εξίσωση 5.3.9: Υπολογισμός της συγκέντρωσης του $\text{NH}_4\text{-N}$.

$$\begin{aligned} \text{NH}_4 - \text{N (mg/L)} \\ &= (\text{Κατανάλωση δείγματος} \\ &\quad - \text{Κατανάλωση τυφλού}) \times 2.8 \times \text{Αραίωση} \end{aligned}$$

6 Αποτελέσματα και Συζήτηση

6.1 Φυσικοχημικός χαρακτηρισμός

6.1.1 Φυσικοχημικός χαρακτηρισμός οργανικού κλάσματος πριν και μετά την αναερόβια χώνευση

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του φυσικοχημικού χαρακτηρισμού του οργανικού κλάσματος 20–70 mm πριν και μετά την ολοκλήρωση της αναερόβιας χώνευσης. Συγκεκριμένα, εξετάζονται οι μεταβολές στα ολικά στερεά (TS), στα πτητικά στερεά (VS) και στην περιεκτικότητα σε υγρασία προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδραση της διεργασίας στα χαρακτηριστικά του υλικού.

Πίνακας 6.1.1: Φυσικοχημικός χαρακτηρισμός οργανικού κλάσματος πριν και μετά την αναερόβια χώνευση.

Παράμετρος	Πριν την αναερόβια	Μετά την αναερόβια
TS (kg/tn)	421,5	451,1
VS (kg/tn)	323,7	251,0
Υγρασία (%)	57,5	54,9

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 6.1.1, προκύπτει ότι μετά την αναερόβια χώνευση παρατηρήθηκε τα TS αυξήθηκαν από 421,5 σε 451,1 kg/tn, ενώ αντίθετα τα VS μειώθηκαν από 323,7 σε 251,0 kg/tn παρουσιάζοντας μείωση της τάξης του 22,5%. Παράλληλα, η περιεκτικότητα του υλικού σε υγρασία παρουσίασε μικρή μείωση, από 57,5% σε 54,9%.

Η μείωση των πτητικών στερεών ήταν αναμενόμενη, καθώς μέρος της βιοαποδομήσιμης οργανικής ύλης αποδομήθηκε από τους μικροοργανισμούς και μετατράπηκε σε βιοαέριο. Παράλληλα, η αύξηση της περιεκτικότητας σε ολικά στερεά μετά την αναερόβια χώνευση πιθανόν σχετίζεται με τη μικρή μείωση της υγρασίας και τις μεταβολές που υπέστη το οργανικό υλικό κατά τη διάρκεια της διεργασίας.

6.1.2 Στραγγίσματα

Για τον φυσικοχημικό χαρακτηρισμό των στραγγισμάτων πραγματοποιήθηκαν πέντε δειγματοληψίες κατά τη διάρκεια της αναερόβιας χώνευσης. Στον Πίνακα 6.1.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των επιμέρους μετρήσεων, καθώς και η μέση τιμή κάθε παραμέτρου. Καθώς τα στραγγίσματα των κελιών που συμμετείχαν στο πείραμα συλλέγονταν

στην ίδια δεξαμενή, οι αναλύσεις αφορούν το κοινό ρεύμα στραγγισμάτων των συγκεκριμένων κελιών.

Πίνακας 6.1.2: Φυσικοχημικός χαρακτηρισμός στραγγισμάτων από τη δεξαμενή συλλογής.

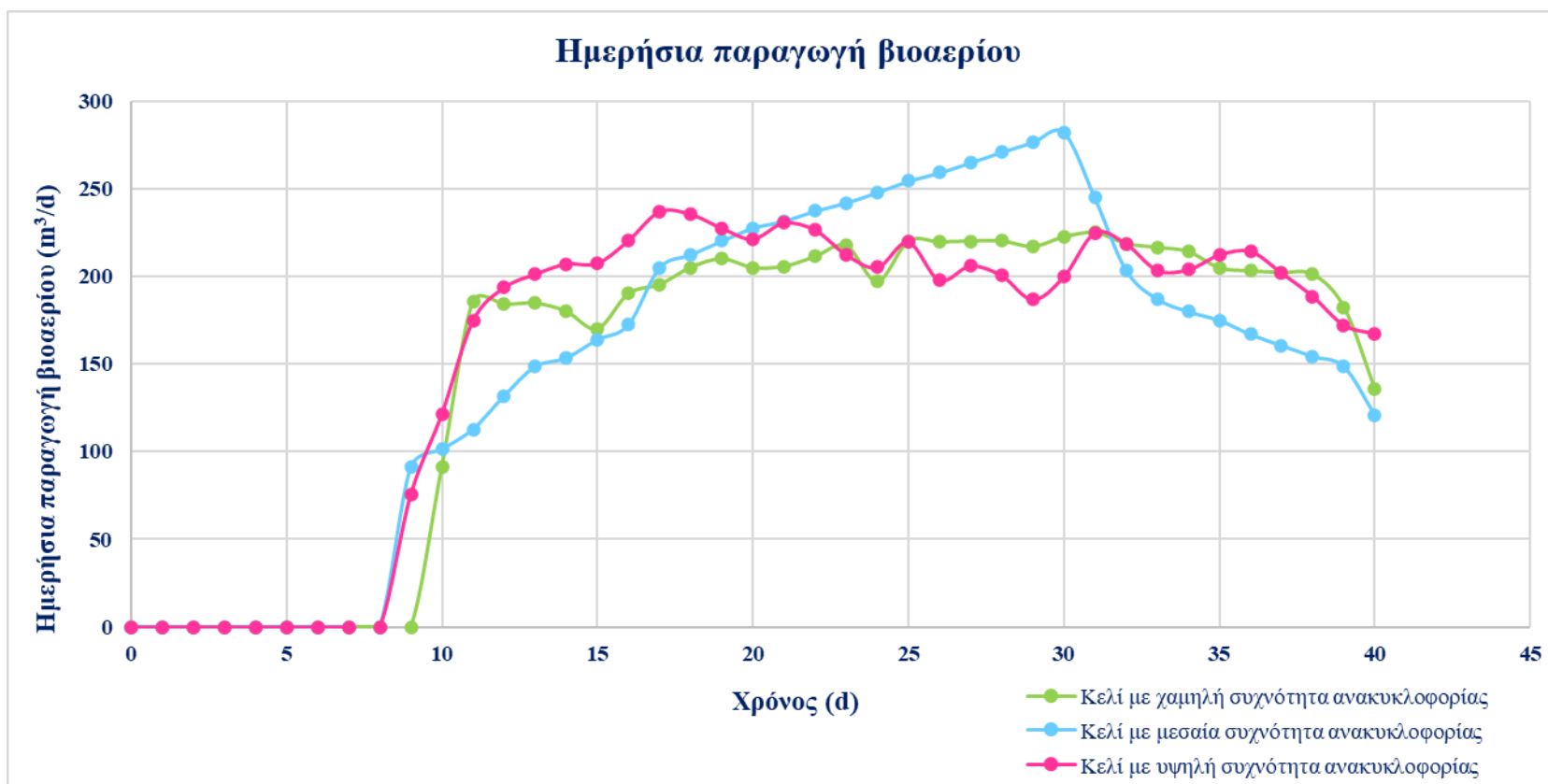
Παράμετρος	Μονάδες	25/02/26	03/03/26	11/03/26	21/03/26	14/04/26	M.O.
TS	g/L	28,1	29,5	33,3	34,1	32,0	31,4
VS	g/L	10,3	11,9	13,9	14,8	12,5	12,7
pH	-	8,0	8,0	7,9	8,2	8,1	8,0
EC	mS/cm	36,8	37,7	38,9	40,1	41,4	39,0
COD	g/L	17,4	12,8	14,5	5,4	4,1	10,8
NH ₄ -N	g/L	2,4	2,2	2,2	2,2	2,1	2,2

6.2 Επίδραση της συχνότητας ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων

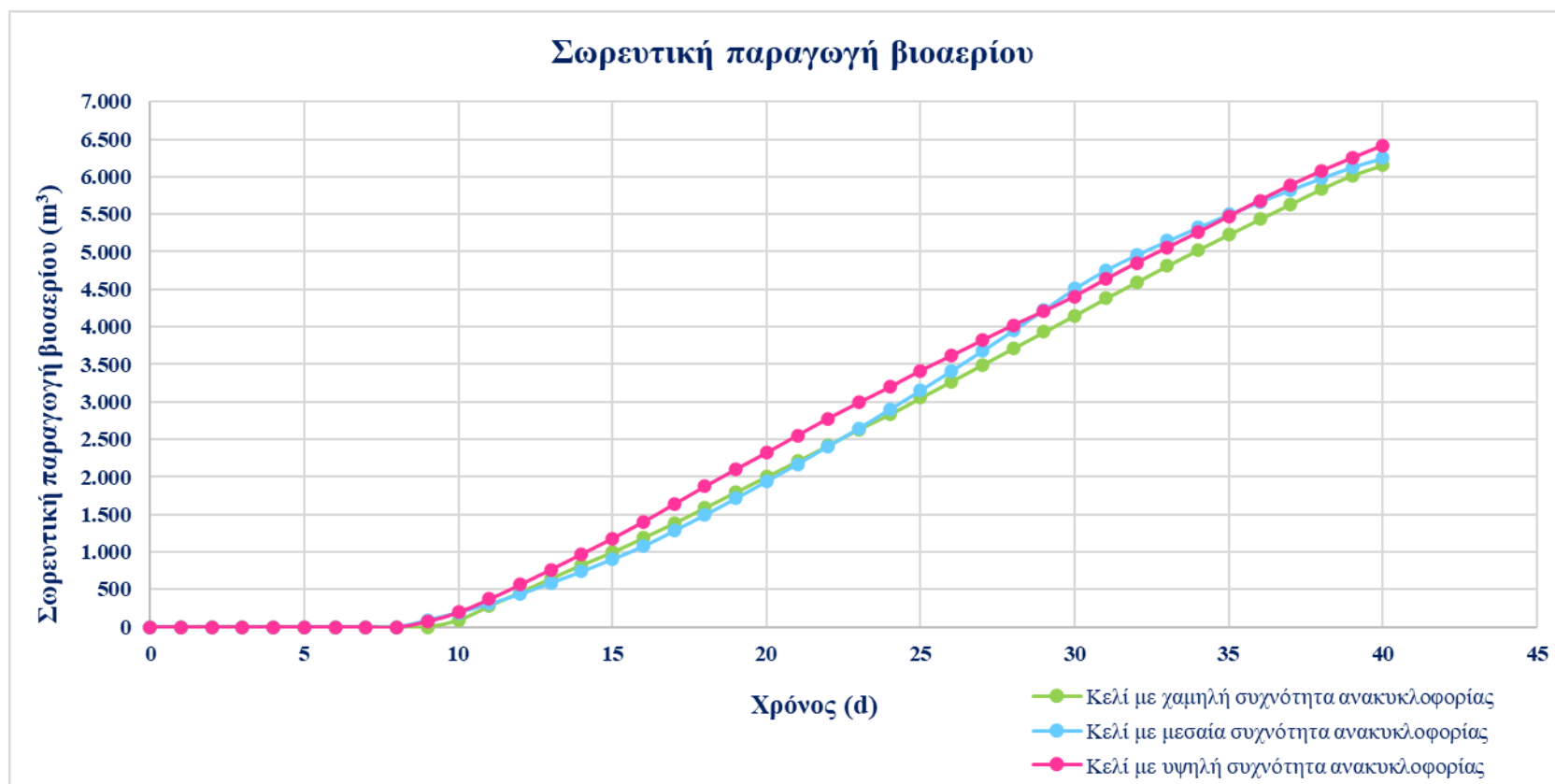
6.2.1 Παραγωγή βιοαερίου

Η επίδραση των διαφορετικών συχνοτήτων ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων αξιολογήθηκε αρχικά με βάση την παραγωγή βιοαερίου, καθώς αυτή αντανακλά την εξέλιξη της διεργασίας κατά τη διάρκεια του κύκλου αναερόβιας χώνευσης. Για τον σκοπό αυτό εξετάστηκαν τόσο η ημερήσια όσο και η σωρευτική παραγωγή βιοαερίου στα τρία πειραματικά κελιά, όπως παρουσιάζονται στα Διαγράμματα 6.2.1 και 6.2.2 αντίστοιχα. Η ημερήσια παραγωγή παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη δυναμική εξέλιξη της διεργασίας, ενώ η σωρευτική παραγωγή επιτρέπει τη σύγκριση της συνολικής απόδοσης των τριών διαφορετικών εφαρμοζόμενων συχνοτήτων ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων.

Όσον αφορά τη σύσταση του παραγόμενου βιοαερίου, η περιεκτικότητα σε μεθάνιο παρουσίασε παρόμοια εξέλιξη στα τρία πειραματικά κελιά. Κατά τις πρώτες ημέρες της διεργασίας παρατηρήθηκε σταδιακή αύξηση του ποσοστού μεθανίου, ενώ στη συνέχεια οι τιμές διαμορφώθηκαν γενικά σε επίπεδα της τάξης του 50–55%, τα οποία βρίσκονται εντός του τυπικού εύρους περιεκτικότητας σε μεθάνιο που αναφέρεται για βιοαέριο προερχόμενο από αναερόβια χώνευση ΑΣΑ.



Διάγραμμα 6.2.1: Ημερήσια παραγωγή βιοαερίου στα τρία πειραματικά κελιά.

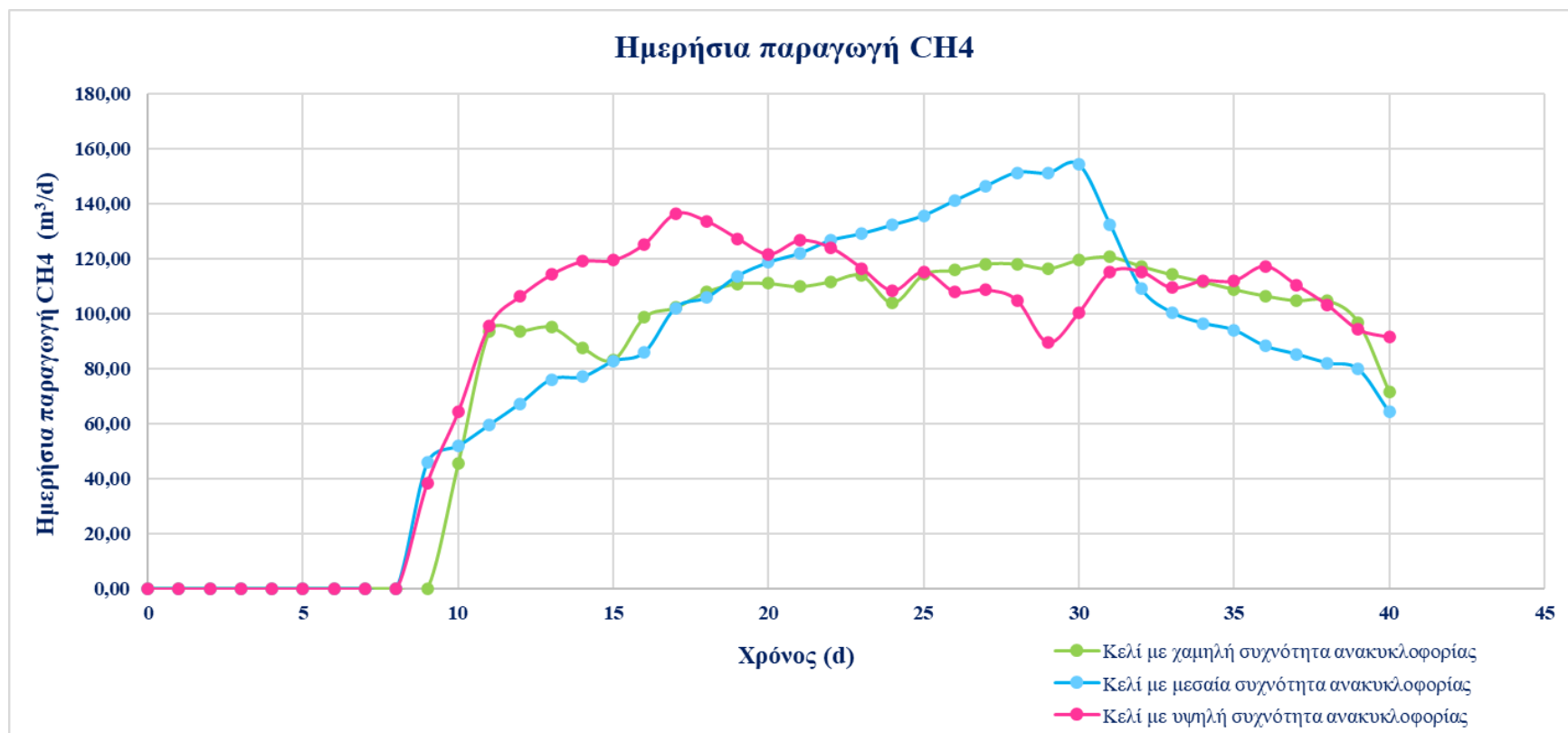


Διάγραμμα 6.2.2: Σωρευτική παραγωγή βιοαερίου στα τρία πειραματικά κελιά αναερόβιας χώνευσης.

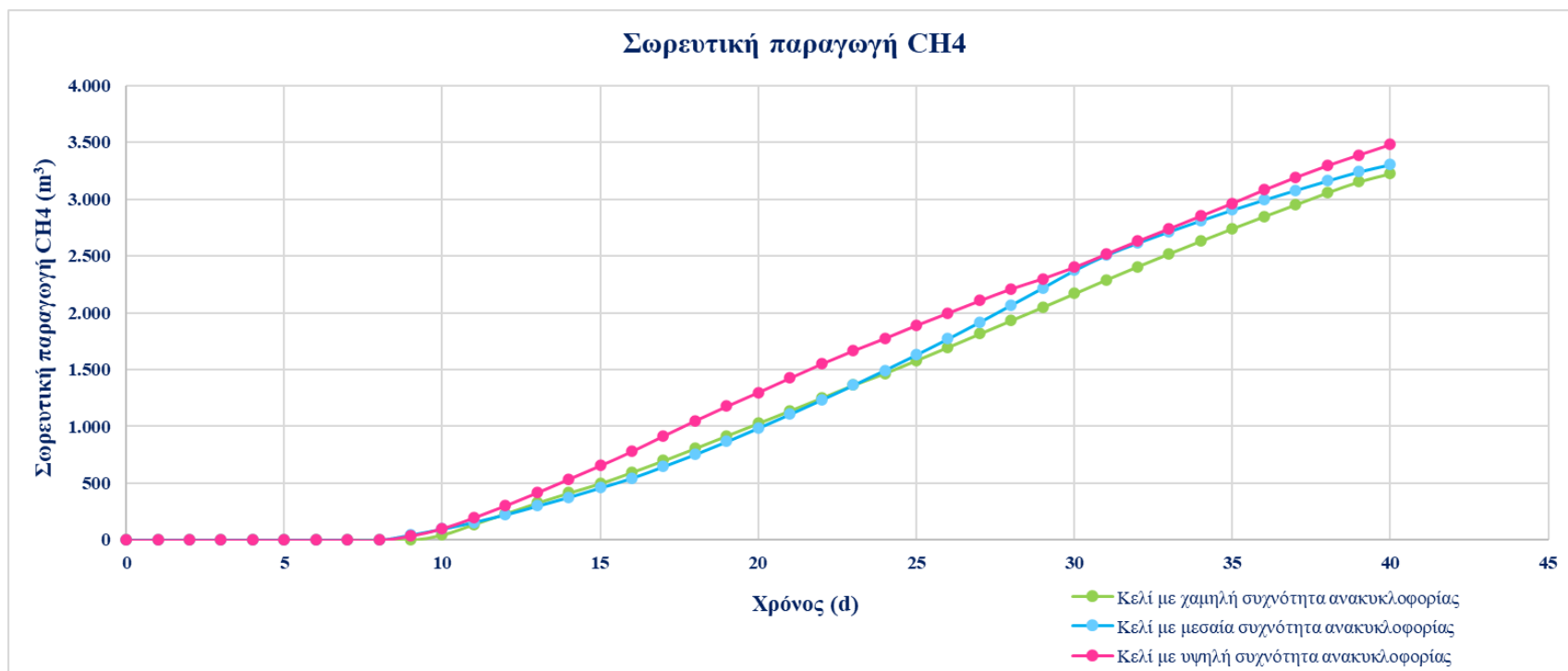
Από τα Διαγράμματα 6.2.1 και 6.2.2 προκύπτει ότι η ημερήσια παραγωγή βιοαερίου καταγράφηκε για πρώτη φορά την 9η ημέρα της διεργασίας στα κελιά μέσης και υψηλής συχνότητας ανακυκλοφορίας, ενώ από τη 10η ημέρα καταγράφηκε και στο κελί χαμηλής συχνότητας. Στη συνέχεια, η ημερήσια παραγωγή αυξήθηκε σταδιακά και στα τρία πειραματικά κελιά έως την επίτευξη των μέγιστων τιμών της. Η μέγιστη ημερήσια παραγωγή βιοαερίου καταγράφηκε στο κελί μέσης συχνότητας ανακυκλοφορίας, με τιμή 282,20 m³/d την 30ή ημέρα της διεργασίας. Στο κελί υψηλής συχνότητας η μέγιστη ημερήσια παραγωγή ανήλθε σε 236,95 m³/d την 17η ημέρα, ενώ στο κελί χαμηλής συχνότητας σε 224,95 m³/d την 31η ημέρα. Μετά την επίτευξη της μέγιστης τιμής σε κάθε πειραματικό κελί, η ημερήσια παραγωγή ακολούθησε πτωτική πορεία έως την ολοκλήρωση της διεργασίας. Επιπλέον, η σωρευτική παραγωγή βιοαερίου αυξήθηκε προοδευτικά καθ' όλη τη διάρκεια της διεργασίας και στα τρία πειραματικά κελιά. Η υψηλότερη τελική σωρευτική παραγωγή βιοαερίου καταγράφηκε στο κελί υψηλής συχνότητας ανακυκλοφορίας και ανήλθε σε 6.416,08 m³, ενώ στα κελιά μέσης και χαμηλής συχνότητας οι αντίστοιχες τιμές ήταν 6.250,50 m³ και 6.156,50 m³.

6.2.2 Παραγωγή μεθανίου

Η επίδραση των διαφορετικών συχνοτήτων ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων αξιολογήθηκε επιπλέον ως προς την παραγωγή μεθανίου. Στα Διαγράμματα 6.2.3 και 6.2.4 παρουσιάζονται η ημερήσια και η σωρευτική παραγωγή μεθανίου για καθεμία από τις τρεις εφαρμοζόμενες συχνότητες ανακυκλοφορίας. Οι αντίστοιχες τιμές υπολογίστηκαν με βάση την ημερήσια παραγωγή βιοαερίου και την αντίστοιχη ημερήσια περιεκτικότητα του παραγόμενου βιοαερίου σε CH₄. Οι αναλυτικές τιμές της περιεκτικότητας του βιοαερίου σε μεθάνιο παρατίθενται στο Παράρτημα (Πίνακας Α 3).



Διάγραμμα 6.2.3: Ημερήσια παραγωγή μεθανίου στα τρία πειραματικά κελιά αναερόβιας χώνευσης.



Διάγραμμα 6.2.4: Σωρευτική παραγωγή μεθανίου στα τρία πειραματικά κελιά αναερόβιας χώνευσης.

Από τα Διαγράμματα 6.2.3 και 6.2.4 προκύπτει ότι η ημερήσια και η σωρευτική παραγωγή μεθανίου ακολούθησαν παρόμοια πορεία με την αντίστοιχη παραγωγή βιοαερίου. Η ημερήσια παραγωγή μεθανίου αυξήθηκε και στα τρία πειραματικά κελιά έως την επίτευξη των μέγιστων τιμών της. Η μέγιστη ημερήσια παραγωγή μεθανίου καταγράφηκε στο κελί μέσης συχνότητας ανακυκλοφορίας, με τιμή 154,08 m³/d την 30ή ημέρα της διεργασίας. Στο κελί υψηλής συχνότητας η μέγιστη ημερήσια παραγωγή ανήλθε σε 136,25 m³/d την 17η ημέρα, ενώ στο κελί χαμηλής συχνότητας σε 120,57 m³/d την 31η ημέρα. Μετά την επίτευξη της μέγιστης τιμής σε κάθε πειραματικό κελί, η ημερήσια παραγωγή ακολούθησε πτωτική πορεία έως την ολοκλήρωση της διεργασίας. Επιπλέον, η σωρευτική παραγωγή μεθανίου αυξήθηκε προοδευτικά καθ' όλη τη διάρκεια της διεργασίας. Η υψηλότερη τελική σωρευτική παραγωγή καταγράφηκε στο κελί υψηλής συχνότητας ανακυκλοφορίας και ανήλθε σε 3.482,56 m³, ενώ στα κελιά μέσης και χαμηλής συχνότητας καταγράφηκαν τελικές παραγωγές 3.306,75 m³ και 3.225,92 m³, αντίστοιχα.

6.2.3 Συγκριτική αξιολόγηση των διαφορετικών συχνοτήτων ανακυκλοφορίας

Η εφαρμογή διαφορετικών συχνοτήτων ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων οδήγησε σε διαφοροποιήσεις τόσο στη χρονική εξέλιξη της παραγωγής όσο και στις συνολικές αποδόσεις των τριών πειραματικών κελιών. Το κελί υψηλής συχνότητας ανακυκλοφορίας παρουσίασε τη μεγαλύτερη σωρευτική παραγωγή τόσο βιοαερίου όσο και μεθανίου, ενώ το κελί μέσης συχνότητας κατέγραψε τη μεγαλύτερη μέγιστη ημερήσια παραγωγή βιοαερίου και μεθανίου. Οι μελέτες που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3 και συνοψίζονται στον Πίνακα 3.5.1 εφαρμόζουν διαφορετικές συχνότητες ανακυκλοφορίας και συνεπώς όγκους παροχής στραγγισμάτων, γεγονός που αναδεικνύει τη σημασία της επιλογής κατάλληλης στρατηγικής ανακυκλοφορίας για τη βελτιστοποίηση της διεργασίας. Παρότι οι εφαρμοζόμενες συνθήκες διαφέρουν σημαντικά μεταξύ των επιμέρους μελετών, όλες συγκλίνουν στο ότι η συχνότητα ανακυκλοφορίας αποτελεί κρίσιμο παράγοντα που επηρεάζει την απόδοση της ξηρής αναερόβιας χώνευσης. Συνεπώς, τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης βρίσκονται σε συμφωνία με αυτή τη γενική τάση της βιβλιογραφίας.

Η μεγαλύτερη σωρευτική παραγωγή βιοαερίου και μεθανίου που καταγράφηκε στο κελί υψηλής συχνότητας ανακυκλοφορίας δείχνει ότι, υπό τις συνθήκες της παρούσας μελέτης, η συχνότερη ανακυκλοφορία συνέβαλε στη συνολική απόδοση της διεργασίας. Επιπλέον, στο ίδιο κελί η παραγωγή βιοαερίου και μεθανίου έφτασε στις μέγιστες τιμές της σημαντικά

νωρίτερα σε σχέση με τα υπόλοιπα πειραματικά κελιά (17^η ημέρα, έναντι της 30^{ης} και 31^{ης} ημέρας για τα κελιά μέσης και χαμηλής συχνότητας, αντίστοιχα), γεγονός που υποδηλώνει ότι η αυξημένη συχνότητα ανακυκλοφορίας συνέβαλε στην ταχύτερη εξέλιξη της αναερόβιας χώνευσης. Παράλληλα, η μεγαλύτερη μέγιστη ημερήσια παραγωγή που καταγράφηκε στο κελί μέσης συχνότητας δείχνει ότι η επίδραση της ανακυκλοφορίας δεν περιορίζεται μόνο στη συνολική παραγωγή, αλλά επηρεάζει και τον τρόπο με τον οποίο εξελίσσεται η διεργασία κατά τη διάρκεια του κύκλου αναερόβιας χώνευσης.

Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης συμφωνούν με τα ευρήματα των (Degueurce et al., 2016), οι οποίοι έδειξαν ότι η περιοδικότητα της ανακυκλοφορίας αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν τόσο τη συνολική παραγωγή μεθανίου όσο και την εξέλιξη της διεργασίας. Σύμφωνα με τους ίδιους ερευνητές, όταν μεσολαβούν μεγάλα χρονικά διαστήματα χωρίς ανακυκλοφορία, μειώνεται η υγρασία του υποστρώματος και δημιουργούνται λιγότερο ευνοϊκές συνθήκες για τη μικροβιακή δραστηριότητα, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε χαμηλότερες αποδόσεις. Αντίστοιχη τάση παρατηρήθηκε και στην παρούσα μελέτη, όπου η υψηλότερη συχνότητα ανακυκλοφορίας συνδέθηκε με μεγαλύτερη σωρευτική παραγωγή βιοαερίου και μεθανίου, καθώς και με ταχύτερη εξέλιξη της διεργασίας. Παρόμοια τάση αναφέρθηκε και από τους (Pezzolla et al., 2017), οι οποίοι διαπίστωσαν ότι η αύξηση της συχνότητας ανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων οδήγησε σε υψηλότερη παραγωγή βιοαερίου και βελτίωση της σταθερότητας της διεργασίας. Οι ερευνητές απέδωσαν το αποτέλεσμα αυτό στη μείωση της συσσώρευσης πτητικών λιπαρών οξέων (VFAs) και στη βελτίωση της βιοαποδόμησης της οργανικής ύλης. Τα ευρήματα αυτά βρίσκονται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης, όπου η υψηλότερη συχνότητα ανακυκλοφορίας συνδέθηκε με τη μεγαλύτερη σωρευτική παραγωγή βιοαερίου και μεθανίου.

Αντίστοιχα, και άλλες μελέτες της βιβλιογραφίας καταδεικνύουν τη θετική συμβολή της ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων στην απόδοση της ξηρής αναερόβιας χώνευσης. Οι (Di Maria et al., 2013) ανέφεραν ότι η ανακυκλοφορία βελτίωσε τη σταθερότητα της διεργασίας και συνέβαλε στην αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των VFAs, ενώ οι (Kusch et al., 2012) διαπίστωσαν ότι η διακοπτόμενη ανακυκλοφορία εξασφάλισε σταθερότερη λειτουργία και υψηλότερες αποδόσεις μεθανίου σε σχέση με τη συνεχή. Παράλληλα, οι (Massaccesi et al., 2013) έδειξαν ότι η ανακυκλοφορία συνέβαλε στη διατήρηση της αλκαλικότητας και της σταθερότητας του pH, ενώ οι (Fernández-Rodríguez et al., 2013) ανέφεραν βελτίωση της ομογενοποίησης του υποστρώματος, αύξηση της παραγωγής μεθανίου και μείωση του

απαιτούμενου χρόνου παραμονής του υλικού στον αντιδραστήρα. Συνολικά, τα παραπάνω ευρήματα ενισχύουν την άποψη ότι η κατάλληλη στρατηγική ανακυκλοφορίας μπορεί να βελτιώσει τόσο την απόδοση όσο και τη σταθερότητα της διεργασίας.

Επιπλέον, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα ευρήματα των (Rocamora, Wagland, Rivas Casado, et al., 2022), καθώς αποτελούν μία από τις λίγες διαθέσιμες μελέτες που διερεύνησαν την επίδραση της ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων σε μονάδες ξηρής αναερόβιας χώνευσης πλήρους κλίμακας. Οι ερευνητές διαπίστωσαν ότι η ανακυκλοφορία αποτελεί κρίσιμο λειτουργικό παράγοντα για τη βελτιστοποίηση της παραγωγής μεθανίου, ενώ η εφαρμογή υπερβολικά μεγάλων όγκων ανακυκλοφορίας μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τη διεργασία, οδηγώντας σε μείωση της παραγωγής μεθανίου. Τα ευρήματα αυτά αναδεικνύουν ότι η επιλογή της κατάλληλης στρατηγικής ανακυκλοφορίας είναι ιδιαίτερα σημαντική στις εφαρμογές βιομηχανικής κλίμακας. Υπό το πρίσμα αυτό, τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης αποκτούν ιδιαίτερη σημασία, καθώς προέρχονται επίσης από μονάδα ξηρής αναερόβιας χώνευσης πλήρους κλίμακας, γεγονός που επιτρέπει τη σύγκρισή τους με τα ευρήματα των (Rocamora, Wagland, Rivas Casado, et al., 2022) και επιβεβαιώνει τη σημασία της κατάλληλης στρατηγικής ανακυκλοφορίας για τη λειτουργία της ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης.

7 Συμπεράσματα και Προτάσεις

7.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως στόχο τη διερεύνηση της επίδρασης της συχνότητας ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων στην απόδοση της ξηρής αναερόβιας χώνευσης του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ, μέσω πειραματικής εφαρμογής στη ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης. Η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε μέσω της σύγκρισης τριών διαφορετικών συχνοτήτων ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων, με στόχο τη διερεύνηση της επίδρασής τους στην απόδοση της διεργασίας της ξηρής αναερόβιας χώνευσης. Τα αποτελέσματα ανέδειξαν ότι η συχνότητα ανακυκλοφορίας αποτελεί σημαντική λειτουργική παράμετρο της διεργασίας, καθώς επηρέασε τόσο τη συνολική παραγωγή όσο και τη χρονική εξέλιξη της παραγωγής βιοαερίου.

Η διαφορετική συμπεριφορά των τριών πειραματικών κελιών έδειξε ότι η αύξηση της συχνότητας ανακυκλοφορίας δεν επηρεάζει μόνο την τελική παραγωγή βιοαερίου, αλλά και τον τρόπο με τον οποίο εξελίσσεται η διεργασία. Ειδικότερα, το κελί υψηλής συχνότητας παρουσίασε τη μεγαλύτερη σωρευτική παραγωγή και την ταχύτερη επίτευξη της μέγιστης παραγωγής, ενώ το κελί μέσης συχνότητας κατέγραψε τη μεγαλύτερη μέγιστη ημερήσια παραγωγή.

Συνολικά, η παρούσα μελέτη έδειξε ότι η συχνότητα ανακυκλοφορίας αποτελεί κρίσιμη λειτουργική παράμετρο της ξηρής αναερόβιας χώνευσης, καθώς επηρεάζει τόσο την απόδοση όσο και την εξέλιξη της διεργασίας. Παράλληλα, αναδεικνύεται η ανάγκη αξιολόγησης της ανακυκλοφορίας όχι μόνο ως προς τη συνολική παραγωγή βιοαερίου, αλλά και ως προς τον ρυθμό εξέλιξης της διεργασίας, καθώς οι διαφορετικές συχνότητες μπορούν να επηρεάσουν με διαφορετικό τρόπο τα επιμέρους χαρακτηριστικά της λειτουργίας του συστήματος.

7.2 Προτάσεις για βελτιστοποίηση της διεργασίας στη ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης

Μία πιθανή κατεύθυνση για τη βελτιστοποίηση της διεργασίας θα μπορούσε να είναι η ανάπτυξη ενός αλγορίθμου ελέγχου της ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων, ενσωματωμένου στο υφιστάμενο σύστημα SCADA της μονάδας, ο οποίος θα προσαρμόζει δυναμικά τη συχνότητα ή/και τη διάρκεια της ανακυκλοφορίας, αξιοποιώντας πληροφορίες από την παραγωγή βιοαερίου και από βασικές παραμέτρους της διεργασίας, όπως το pH, η υγρασία της απορριμματικής μάζας και η συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων (VFAs). Έτσι, η

ανακυκλοφορία θα μπορεί να προσαρμόζεται στις πραγματικές ανάγκες της διεργασίας και όχι να εφαρμόζεται με ένα προκαθορισμένο πρόγραμμα.

Επιπλέον, προτείνεται η διερεύνηση διαφορετικών συνδυασμών συχνότητας ανακυκλοφορίας και όγκου παροχής στραγγισμάτων στη ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης, καθώς οι δύο αυτές παράμετροι είναι πιθανό να λειτουργούν αλληλεπιδραστικά και να επηρεάζουν από κοινού την απόδοση της διεργασίας. Με τον τρόπο αυτό θα μπορεί να προσδιοριστεί η καταλληλότερη στρατηγική λειτουργίας για τις ιδιαίτερες συνθήκες της μονάδας.

Τέλος, προτείνεται η συνεχής αξιολόγηση της στρατηγικής ανακυκλοφορίας κατά τη λειτουργία της ΜΕΑ Αλεξανδρούπολης, ώστε αυτή να προσαρμόζεται στις μεταβολές της σύστασης των εισερχόμενων αποβλήτων και στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας της μονάδας. Η αξιολόγηση αυτή θα ήταν χρήσιμο να πραγματοποιείται καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, ώστε να λαμβάνονται υπόψη και οι εποχικές διαφοροποιήσεις στη σύσταση των αποβλήτων.

7.3 Κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα

Η παρούσα εργασία ανέδειξε τη σημασία της συχνότητας ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων στη λειτουργία της ξηρής αναερόβιας χώνευσης, παράλληλα όμως ανέδειξε και νέα ερευνητικά ερωτήματα που θα μπορούσαν να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικών μελετών. Αρχικά, θα είχε ιδιαίτερο ενδιαφέρον να εξεταστεί μεγαλύτερος αριθμός συχνοτήτων ανακυκλοφορίας, καθώς και διαφορετικοί συνδυασμοί συχνότητας και όγκου παροχής στραγγισμάτων, ώστε να αποσαφηνιστεί καλύτερα η μεταξύ τους αλληλεπίδραση. Επιπλέον, η παρακολούθηση παραμέτρων όπως το pH, η υγρασία της απορριμματικής μάζας και η συγκέντρωση των VFAs θα μπορούσε να συμβάλει στην καλύτερη ερμηνεία της επίδρασης της ανακυκλοφορίας στη διεργασία. Τέλος, η επανάληψη της πειραματικής διαδικασίας σε περισσότερους κύκλους λειτουργίας και για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα θα επέτρεπε να αξιολογηθεί η επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων και να εξαχθούν ασφαλέστερα συμπεράσματα.

8 Βιβλιογραφία

8.1 Ξένη Βιβλιογραφία

- Abbasi, T., Tauseef, S. M., & Abbasi, S. A. (2011). *Biogas Energy (SpringerBriefs in Environmental Science)*. <http://www.springer.com/series/8868>
- Abbassi-Guendouz, A., Brockmann, D., Trably, E., Dumas, C., Delgenès, J. P., Steyer, J. P., & Escudie, R. (2012). Total solids content drives high solid anaerobic digestion via mass transfer limitation. *Bioresource Technology*, *111*, 55–61. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.01.174>
- André, L., Pauss, A., & Ribeiro, T. (2018). Solid anaerobic digestion: State-of-art, scientific and technological hurdles. In *Bioresource Technology* (Vol. 247, pp. 1027–1037). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.003>
- André, L., Zdanevitch, I., Pineau, C., Lencauchez, J., Damiano, A., Pauss, A., & Ribeiro, T. (2019). Dry anaerobic co-digestion of roadside grass and cattle manure at a 60 L batch pilot scale. *Bioresource Technology*, 289. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121737>
- Angelidaki, I., Ellegaard, L., Birgitte, ., & Ahring, K. (2003). *Applications of the Anaerobic Digestion Process*. https://doi.org/10.1007/3-540-45838-7_1
- Angelonidi, E., & Smith, S. R. (2015). A comparison of wet and dry anaerobic digestion processes for the treatment of municipal solid waste and food waste. *Water and Environment Journal*, 29(4), 549–557. <https://doi.org/10.1111/wej.12130>
- Awino, F. B., & Apitz, S. E. (2024). Solid waste management in the context of the waste hierarchy and circular economy frameworks: An international critical review. In *Integrated Environmental Assessment and Management* (Vol. 20, Number 1, pp. 9–35). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/ieam.4774>
- Basinas, P., Rusín, J., & Chamrádová, K. (2021). Assessment of high-solid mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of mechanically-separated municipal solid waste. *Environmental Research*, 192. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110202>
- Blagoeva, N., Georgieva, V., & Dimova, D. (2023). *Relationship between GDP and Municipal Waste: Regional Disparities and Implication for Waste Management Policies*. <https://doi.org/10.20944/preprints202308.0503.v1>
- Blumensaat, F., & Keller, J. (2005). Modelling of two-stage anaerobic digestion using the IWA Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1). *Water Research*, 39(1), 171–183. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.07.024>
- Bolzonella, D., Innocenti, L., Pavan, P., Traverso, P., & Cecchi, F. (2003). Semi-dry thermophilic anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste:

- focusing on the start-up phase. *Bioresource Technology*, Elsevier, (86), 123–129. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(02\)00161-X](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00161-X)
- Bolzonella, D., Pavan, P., Mace, S., & Cecchi, F. (2006). Dry anaerobic digestion of differently sorted organic municipal solid waste: A full-scale experience. *Water Science and Technology*, 53(8), 23–32. <https://doi.org/10.2166/wst.2006.232>
- Botheju, D., Lie, B., & Bakke, R. (2010). Oxygen effects in anaerobic digestion - II. *Modeling, Identification and Control*, 31(2), 55–65. <https://doi.org/10.4173/mic.2010.2.2>
- Bouallagui, H., Lahdheb, H., Ben Romdan, E., Rachdi, B., & Hamdi, M. (2009). Improvement of fruit and vegetable waste anaerobic digestion performance and stability with co-substrates addition. *Journal of Environmental Management*, 90(5), 1844–1849. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.12.002>
- Campuzano, R., & González-Martínez, S. (2016). Characteristics of the organic fraction of municipal solid waste and methane production: A review. In *Waste Management* (Vol. 54, pp. 3–12). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.05.016>
- Carvajal, A., Sepúlveda, C., Navia, D., Poblete-Castro, I., Pinto-Ibieta, F., & Serrano, A. (2024). Bulking agent in dry anaerobic digestion as a key factor for the enhancement of biogas production. *New Biotechnology*, 82, 65–74. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2024.05.002>
- Chen, L., & Neibling, H. (2014). Anaerobic Digestion Basics. *University of Idaho Extension*, 1–5. <https://www.extension.uidaho.edu/publishing/pdf/CIS/CIS1215.pdf>
- Christensen, T. H. (2010). Introduction to Waste Management. In T. H. Christensen (Ed.), *Solid Waste Technology & Management: I* (1.1.1/2 Solid Waste). John Wiley & Sons.
- Christensen, T. H. (2012). *Solid Waste Technology and Management: II* (T. H. Christensen, Ed.). John Wiley and Sons.
- Cremonez, P. A., Teleken, J. G., Weiser Meier, T. R., & Alves, H. J. (2021). Two-Stage anaerobic digestion in agroindustrial waste treatment: A review. In *Journal of Environmental Management* (Vol. 281). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111854>
- Czekała, W., Jasiński, T., Grzelak, M., Witaszek, K., & Dach, J. (2022). Biogas Plant Operation: Digestate as the Valuable Product. *Energies*, 15(21). <https://doi.org/10.3390/en15218275>
- Czekała, W., Nowak, M., & Piechota, G. (2023). Sustainable management and recycling of anaerobic digestate solid fraction by composting: A review. In *Bioresource Technology* (Vol. 375). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128813>

- De Baere, L., & Mattheeuws, B. (2013). Anaerobic Digestion of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste in Europe-Status, Experience and Prospects. In Karl J. Thomé-Kozmiensky & S. Thiel (Eds.), *Waste Management, Volume 3: Recycling and Recovery: III* (pp. 517–526). TK Verlag.
- Defra. (2013). *Mechanical Biological Treatment of Municipal Solid Waste*. www.defra.gov.uk
- Degueurce, A., Trémier, A., & Peu, P. (2016). Dynamic effect of leachate recirculation on batch mode solid state anaerobic digestion: Influence of recirculated volume, leachate to substrate ratio and recirculation periodicity. *Bioresource Technology*, 216, 553–561. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.05.113>
- Denafas, G., Ruzgas, T., Martuzevičius, D., Shmarin, S., Hoffmann, M., Mykhaylenko, V., Ogorodnik, S., Romanov, M., Neguliaeva, E., Chusov, A., Turkadze, T., Bochoidez, I., & Ludwig, C. (2014). Seasonal variation of municipal solid waste generation and composition in four East European cities. *Resources, Conservation and Recycling*, 89, 22–30. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.06.001>
- Deublein, D., & Steinhauser, A. (2008). *Biogas from Waste and Renewable Resources*. Wiley-VCH. <https://doi.org/10.1002/9783527621705>
- Di Maria, F., Gigliotti, G., Sordi, A., Micale, C., Zadra, C., & Massaccesi, L. (2013). Hybrid solid anaerobic digestion batch: Biomethane production and mass recovery from the organic fraction of solid waste. *Waste Management and Research*, 31(8), 869–873. <https://doi.org/10.1177/0734242X13477902>
- Di Maria, F., Sordi, A., & Micale, C. (2012). Optimization of Solid State Anaerobic Digestion by inoculum recirculation: The case of an existing Mechanical Biological Treatment plant. *Applied Energy*, 97, 462–469. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.12.093>
- EBA. (2025). *Statistical Report 2025. Tracking biogas and biomethane deployment across Europe*.
- Erickson, L. E., Fayet, E., Krishna, B., & Davis, L. C. (2004). *Anaerobic Digestion*. <https://www.k-state.edu/nabc/projects/NABCC%20Carcass%20Disposal%20Full%20Text.pdf>
- European Biogas Association. (2025). *8 powerful reasons to choose biogases*. <https://www.europeanbiogas.eu/biogas-biomethane-in-a-nutshell/>
- Eurostat. (2024a, September). *Eurostat*. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics#Source_data_for_tables_and_graphs
- Eurostat. (2024b, September). *Waste generation by economic activities and households, EU, 2022*. <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics->

[explained/index.php?title=File:Waste_generation_by_economic_activities_and_households_EU_2022_\(%25_share_of_total_waste\).png](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Waste_generation_by_economic_activities_and_households_EU_2022_(%25_share_of_total_waste).png)

Eurostat. (2026a, January). *Municipal waste generated, 2014 and 2024 (kg per capita)*. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal_waste_statistics

Eurostat. (2026b, January). *Municipal waste generated, by material, EU, 2023*. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal_waste_statistics

Eurostat. (2026c, January). *Municipal waste statistics*. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal_waste_statistics

Feng, S., Hong, X., Wang, T., Huang, X., Tong, Y., & Yang, H. (2019). Reutilization of high COD leachate via recirculation strategy for methane production in anaerobic digestion of municipal solid waste: Performance and dynamic of methanogen community. *Bioresource Technology*, 288. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121509>

Fernández-González, J. M., Díaz-López, C., Martín-Pascual, J., & Zamorano, M. (2020). Recycling organic fraction of municipal solid waste: Systematic literature review and bibliometric analysis of research trends. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 12, Number 11). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su12114798>

Fernández-Rodríguez, J., Pérez, M., & Romero, L. I. (2013). Comparison of mesophilic and thermophilic dry anaerobic digestion of OFMSW: Kinetic analysis. *Chemical Engineering Journal*, 232, 59–64. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.07.066>

Forster-Carneiro, T., Pérez, M., & Romero, L. I. (2008). Anaerobic digestion of municipal solid wastes: Dry thermophilic performance. *Bioresource Technology*, 99(17), 8180–8184. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.03.021>

Fournier, G. P., & Gogarten, J. P. (2008). Evolution of acetoclastic methanogenesis in *Methanosarcina* via horizontal gene transfer from cellulolytic *Clostridia*. *Journal of Bacteriology*, 190(3), 1124–1127. <https://doi.org/10.1128/JB.01382-07>

Franca, L. S., Ornelas-Ferreira, B., Pereira, C. P., & Bassin, J. P. (2022a). Performance of a percolation reactor integrated to solid-state anaerobic garage-type digesters with leachate recirculation for organic fraction of municipal solid waste treatment. *Bioresource Technology Reports*, 20. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101215>

Franca, L. S., Ornelas-Ferreira, B., Pereira, C. P., & Bassin, J. P. (2022b). Performance of a percolation reactor integrated to solid-state anaerobic garage-type digesters with leachate recirculation for organic fraction of municipal solid waste treatment. *Bioresource Technology Reports*, 20. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101215>

- Gerardi H. Michael. (2003). *The Microbiology of Anaerobic Digesters* (Gerardi H., Michael). John Wiley & Sons.
- Hansen, C. L., & Cheong, D. Y. (2013). Agricultural Waste Management in Food Processing. In *Handbook of Farm, Dairy and Food Machinery Engineering: Second Edition* (pp. 619–666). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385881-8.00023-9>
- Hayyat, U., Khan, M. U., Sultan, M., Zahid, U., Bhat, S. A., & Muzamil, M. (2024). A Review on Dry Anaerobic Digestion: Existing Technologies, Performance Factors, Challenges, and Recommendations. *Methane*, 3(1), 33–52. <https://doi.org/10.3390/methane3010003>
- Hoornweg, D., & Bhada-Tata, P. (2012). *What a waste: A Global Review of Solid Waste Management*. <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/302341468126264791>
- Kamperidou, V., & Terzopoulou, P. (2021). Anaerobic digestion of lignocellulosic waste materials. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 13, Number 22). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su132212810>
- Karalis, E. (2021). Towards thermophilic anaerobic digestion application in Attica, Greece: a feasibility study. *International Journal of Research in Engineering and Science (IJRES)*, 9, 50–57. www.ijres.org
- Karthikeyan, O. P., & Visvanathan, C. (2013). Bio-energy recovery from high-solid organic substrates by dry anaerobic bio-conversion processes: A review. In *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* (Vol. 12, Number 3, pp. 257–284). <https://doi.org/10.1007/s11157-012-9304-9>
- Katheem, K. S., Ibrahim, M. H., Quaik, S., & Ismail, S. A. (2016). An Introduction to Anaerobic Digestion of Organic Wastes. In *Prospects of Organic Waste Management and the Significance of Earthworms* (pp. 23–44). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24708-3_2
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050* (World Bank Group, Ed.). Washington, DC: World Bank. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>
- Khalid, A., Arshad, M., Anjum, M., Mahmood, T., & Dawson, L. (2011). The anaerobic digestion of solid organic waste. In *Waste Management* (Vol. 31, Number 8, pp. 1737–1744). <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.03.021>
- Kim, D. H., & Oh, S. E. (2011). Continuous high-solids anaerobic co-digestion of organic solid wastes under mesophilic conditions. *Waste Management*, 31(9–10), 1943–1948. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.05.007>

- Kothari, R., Pandey, A. K., Kumar, S., Tyagi, V. V., & Tyagi, S. K. (2014). Different aspects of dry anaerobic digestion for bio-energy: An overview. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 39, pp. 174–195). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.011>
- Krishna, D., & Kalamdhad, A. S. (2014). Pre-treatment and anaerobic digestion of food waste for high rate methane production - A review. In *Journal of Environmental Chemical Engineering* (Vol. 2, Number 3, pp. 1821–1830). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2014.07.024>
- Kusch, S., Oechsner, H., & Jungbluth, T. (2008). Biogas production with horse dung in solid-phase digestion systems. *Bioresource Technology*, 99(5), 1280–1292. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.02.008>
- Kusch, S., Oechsner, H., & Jungbluth, T. (2012). Effect of various leachate recirculation strategies on batch anaerobic digestion of solid substrates. *Int. J. Environment and Waste Management*, 9, 69–88. <https://doi.org/https://doi.org/10.1504/IJEW.2012.044161>
- Lenkiewicz, Z. (2024). *Global Waste Management Outlook 2024*. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/44939>
- Leung, D. Y. C., & Wang, J. (2016). An overview on biogas generation from anaerobic digestion of food waste. *International Journal of Green Energy*, 13(2), 119–131. <https://doi.org/10.1080/15435075.2014.909355>
- Li, Y., Park, S. Y., & Zhu, J. (2011a). Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 15, Number 1, pp. 821–826). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.042>
- Li, Y., Park, S. Y., & Zhu, J. (2011b). Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 15, Number 1, pp. 821–826). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.042>
- Liebetrau, J., Sträuber, H., Kretzschmar, J., Denysenko, V., & Nelles, M. (2019). Anaerobic digestion. In *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology* (Vol. 166, pp. 281–299). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/10_2016_67
- Logan, M., & Visvanathan, C. (2019). Management strategies for anaerobic digestate of organic fraction of municipal solid waste: Current status and future prospects. *Waste Management and Research*, 37(1_suppl), 27–39. <https://doi.org/10.1177/0734242X18816793>
- Lohani, S. P., & Havukainen, J. (2018). Anaerobic Digestion: Factors Affecting Anaerobic Digestion Process. In *Energy, Environment, and Sustainability* (pp. 343–359). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7413-4_18

- Luning, L., Van Zundert, E. H. M., & Brinkmann, A. J. F. (2003). *Comparison of dry and wet digestion for solid waste*. <https://iwaponline.com/wst/article-pdf/48/4/15/45350/15.pdf>
- Massaccesi, L., Sordi, A., Micale, C., Cucina, M., Zadra, C., Di Maria, F., & Gigliotti, G. (2013). Chemical characterisation of percolate and digestate during the hybrid solid anaerobic digestion batch process. *Process Biochemistry*, 48(9), 1361–1367. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2013.06.026>
- Mata-Alvarez, J. (2003). *Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes* (J. Mata-Alvarez, Ed.). IWA Publishing.
- Mata-Alvarez, J., Dosta, J., Romero-Güiza, M. S., Fonoll, X., Peces, M., & Astals, S. (2014). A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 36, pp. 412–427). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.039>
- Meegoda, J. N., Li, B., Patel, K., & Wang, L. B. (2018). A review of the processes, parameters, and optimization of anaerobic digestion. In *International Journal of Environmental Research and Public Health* (Vol. 15, Number 10). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ijerph15102224>
- Musluoğlu, A., Dereli, R. K., Arıkan, O. A., & Övez, S. S. (2025). Comprehensive experiences on the operation of a full-scale continuous dry anaerobic digestion plant treating mechanically sorted OFMSW. *Water Science and Technology*, 91(10), 1157–1171. <https://doi.org/10.2166/wst.2025.062>
- Nasr, N., Elbeshbishy, E., Hafez, H., Nakhla, G., & Hesham El Naggar, M. (2012). Comparative assessment of single-stage and two-stage anaerobic digestion for the treatment of thin stillage. *Bioresource Technology*, 111, 122–126. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.02.019>
- Parawira, W. (2012). Enzyme research and applications in biotechnological intensification of biogas production. In *Critical Reviews in Biotechnology* (Vol. 32, Number 2, pp. 172–186). <https://doi.org/10.3109/07388551.2011.595384>
- Pezzolla, D., Di Maria, F., Zadra, C., Massaccesi, L., Sordi, A., & Gigliotti, G. (2017). Optimization of solid-state anaerobic digestion through the percolate recirculation. *Biomass and Bioenergy*, 96, 112–118. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.11.012>
- Pramanik, S. K., Suja, F. B., Zain, S. M., & Pramanik, B. K. (2019). The anaerobic digestion process of biogas production from food waste: Prospects and constraints. In *Bioresource Technology Reports* (Vol. 8). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100310>
- Qian, M., Zhang, Y., Li, R., Nelles, M., Stinner, W., & Li, Y. (2017). Effects of Percolate Recirculation on Dry Anaerobic Co-digestion of Organic Fraction of Municipal Solid

- Waste and Corn Straw. *Energy and Fuels*, 31(11), 12183–12191. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b01869>
- Ramos-Suárez, J. L., Arroyo, N. C., & González-Fernández, C. (2015). The Role of Anaerobic Digestion in Algal Biorefineries: Clean Energy Production, Organic Waste Treatment, and Nutrient Loop Closure. In *Algae and Environmental Sustainability* (pp. 53–76). Springer India. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2641-3_5
- Rapport, J. L., Zhang, R., Williams, R. B., & Jenkins, B. M. (2012). Anaerobic Digestion technologies for the treatment of Municipal Solid Waste. *International Journal of Environment and Waste Management*, 9(1–2), 100–122. <https://doi.org/10.1504/IJEW.2012.044163>
- Richards, M. A., Lie, T. J., Zhang, J., Ragsdale, S. W., Leigh, J. A., & Price, N. D. (2016). Exploring hydrogenotrophic methanogenesis: A genome scale metabolic reconstruction of *Methanococcus maripaludis*. *Journal of Bacteriology*, 198(24), 3379–3390. <https://doi.org/10.1128/JB.00571-16>
- Rocamora, I., Wagland, S. T., Rivas Casado, M., Hassard, F., Villa, R., Peces, M., Simpson, E. W., Fernández, O., & Bajón-Fernández, Y. (2022). Managing full-scale dry anaerobic digestion: Semi-continuous and batch operation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(4). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108154>
- Rocamora, I., Wagland, S. T., Villa, R., Simpson, E. W., Fernández, O., & Bajón-Fernández, Y. (2020). Dry anaerobic digestion of organic waste: A review of operational parameters and their impact on process performance. In *Bioresource Technology* (Vol. 299). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122681>
- Rocamora, I., Wagland, S. T., Villa, R., Simpson, E. W., Fernández, O., & Bajón-Fernández, Y. (2022). Use of Inoculum, Water and Percolate as Strategy to Avoid Inhibition on Dry-Batch Anaerobic Digestion of Organic Fraction of Municipal Solid Waste. *Waste and Biomass Valorization*, 13(1), 227–239. <https://doi.org/10.1007/s12649-021-01503-0>
- Rossi, E., Pecorini, I., Ferrara, G., & Iannelli, R. (2022). Dry Anaerobic Digestion of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste: Biogas Production Optimization by Reducing Ammonia Inhibition. *Energies*, 15(15). <https://doi.org/10.3390/en15155515>
- Seruga, P., Krzywonos, M., Seruga, A., Niedźwiecki, Ł., Pawlak-Kruczek, H., & Urbanowska, A. (2020). Anaerobic Digestion Performance: Separate Collected vs. Mechanical Segregated Organic Fractions of Municipal Solid Waste as Feedstock. *Energies*, 13(15). <https://doi.org/10.3390/en13153768>
- Tchobanoglous, G., & Kreith, F. (2002). *Handbook of Solid Waste Management* (2nd ed.). McGraw-Hill. <https://doi.org/10.1036/0071356231>

- Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. A. (1993). *Integrated Solid Waste Management Engineering Principles and Management Issues* (1st ed.). McGraw-Hill, Inc.
- Tsachidou, B. (2023). *Anaerobic digestion in the battle for organic waste recycling in Greece: Stop wasting Organic Waste!* (2023, No. 1; POLLEN Policy Brief). https://www.researchgate.net/publication/373655140_Anaerobic_digestion_in_the_battle_for_organic_waste_recycling_in_Greece_Stop_wasting_Organic_Waste#fullTextFileContent
- Van, D. P., Fujiwara, T., Tho, B. L., Toan, P. P. S., & Minh, G. H. (2020). A review of anaerobic digestion systems for biodegradable waste: Configurations, operating parameters, and current trends. *Environmental Engineering Research*, 25(1), 1–17. <https://doi.org/10.4491/eer.2018.334>
- Wilson, L. P., Sharvelle, S. E., & De Long, S. K. (2016). Enhanced anaerobic digestion performance via combined solids- and leachate-based hydrolysis reactor inoculation. *Bioresource Technology*, 220, 94–103. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.08.024>
- World Health Organization. (2024). *Chapter 4: Solid Waste*. <https://iris.who.int/handle/10665/378095>
- Zeshan, Karthikeyan, O. P., & Visvanathan, C. (2012). Effect of C/N ratio and ammonia-N accumulation in a pilot-scale thermophilic dry anaerobic digester. *Bioresource Technology*, 113, 294–302. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.02.028>
- Zhang, C., Hu, M., Di Maio, F., Sprecher, B., Yang, X., & Tukker, A. (2022). An overview of the waste hierarchy framework for analyzing the circularity in construction and demolition waste management in Europe. In *Science of the Total Environment* (Vol. 803). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149892>
- Zhang, C., Su, H., Baeyens, J., & Tan, T. (2014). Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 38, pp. 383–392). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.038>
- Zhang, P., Chen, Y., & Zhou, Q. (2009). Waste activated sludge hydrolysis and short-chain fatty acids accumulation under mesophilic and thermophilic conditions: Effect of pH. *Water Research*, 43(15), 3735–3742. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.05.036>

8.2 Ελληνική Βιβλιογραφία

- ΑΕΠΟ. (2012). Έγκριση Περιβαλλοντικών Όρων του έργου «Μονάδα Επεξεργασίας Απορριμμάτων και Χώρος Υγειονομικής Ταφής Υπολειμμάτων στο Νομό Έβρου [ΟΕΔΑ Ανατολικού Τομέα της Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας Θράκης (ΠΑΜΘ)]». (Number B44Ξ0-4IB, pp. 1–49). ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ & ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ - ΓΕΝΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ.

- ΑΕΠΟ. (2017). Έγκριση Περιβαλλοντικών Όρων για την Τροποποίηση της υπ. αριθμ. οικ.196552/1-03-2012 Υπουργικής Απόφασης Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων (ΑΕΠΟ) του έργου «Μονάδα Επεξεργασίας Απορριμμάτων και Χώρος Υγειονομικής Ταφής Υπολειμμάτων στο Νομό Έβρου [ΟΕΔΑ Ανατολικού Τομέα της Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας Θράκης (ΠΑΜΘ)]», στη θέση Χ.Α.Δ.Α. Αλεξανδρούπολης του Δήμου Αλεξανδρούπολης Νομού Έβρου. (Number Ω348ΟΡ1Υ-ΓΟ3, pp. 1–11). Δ/ΝΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ & ΧΩΡΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ - ΘΡΑΚΗΣ ΤΜΗΜΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΥ & ΧΩΡΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ.
- Κομίλης, Δ. (2023). Διαχείριση και Μηχανική Στερεών Αποβλήτων (3rd ed.). Εκδόσεις Τζιόλα.
- Οδηγία 31/ΕΚ. (1999). Οδηγία 1999/31/ΕΚ του Συμβουλίου της 26ης Απριλίου 1999 περί υγειονομικής ταφής των αποβλήτων (Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης, Ed.; 1999/31/ΕΚ; pp. 1–19). Επίσημη Εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/1999/31/oj/eng/>
- Οδηγία 98/ΕΚ. (2008). Οδηγία 2008/98/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 19ης Νοεμβρίου 2008 για τα απόβλητα και την κατάργηση ορισμένων Οδηγιών (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης, Ed.; pp. 3–30). Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/HTML/?uri=CELEX:32008L0098>
- Οδηγία 851/ΕΕ. (2018). Οδηγία (ΕΕ) 2018/851 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 30ής Μαΐου 2018, για την τροποποίηση της οδηγίας 2008/98/ΕΚ για τα απόβλητα (pp. 109–140). Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L0851>
- ΠΕΣΔΑ. (2016). Μελέτη Επικαιροποίησης Περιφερειακού Σχεδίου Διαχείρισης Αποβλήτων ΠΑΜΘ. ΔΙ.Α.Α.ΜΑ.Θ. Α.Α.Ε.
- Πράξη 39 της 31.8. (2020). Έγκριση του Εθνικού Σχεδίου Διαχείρισης Αποβλήτων (Ε.Σ.Δ.Α.). In Υπουργικό Συμβούλιο της Ελληνικής Δημοκρατίας (Ed.), Εφημερίδα της Κυβερνήσεως (Number 185, pp. 9803–10538). Εθνικό Τυπογραφείο. <https://www.elinyae.gr/ethniki-nomothesia/pys-39-tis-31820202020-fek-185a-2992020>
- ΦΕΚ 3339. (2014). Καθορισμός απαιτήσεων (προδιαγραφών) για εργασίες επεξεργασίας στο πλαίσιο της μηχανικής-βιολογικής επεξεργασίας των σύμμεικτων αστικών αποβλήτων και καθορισμός χαρακτηριστικών των παραγόμενων υλικών ανάλογα με τις χρήσεις τους, σύμφωνα με το εδάφιο β της παραγράφου 1 του άρθρου 38 του Ν. 4042/2012 (Α΄/24). In Εφημερίς της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας: Τεύχος Β΄ (Number 3339, pp. 38661–38668). Εθνικό Τυπογραφείο. <https://www.elinyae.gr/ethniki-nomothesia/ya-oik-5636643512014-fek-3339b-12122014>
- Χαραλαμπίδης, Χ. (2021). Παραγωγή βιοαερίου από το οργανικό κλάσμα σύμμεικτων αστικών στερεών αποβλήτων: Μελέτη περίπτωσης της Μονάδας Επεξεργασίας

Απορριμμάτων (ΜΕΑ) Περιφέρειας Ηπείρου. [Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία,
Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο]. [http://apothesis.eap.gr/archive/item/82285\](http://apothesis.eap.gr/archive/item/82285)

Παράρτημα

Ακολουθώντας στους Πίνακες Α 1 και Α 2, παρατίθενται οι ημερήσιες και οι σωρευτικές τιμές παραγωγής βιοαερίου και μεθανίου αντίστοιχα, στις οποίες βασίστηκαν τα Διαγράμματα 6.2.1., 6.2.2., 6.2.3 και 6.2.4. Επιπλέον, στον Πίνακα Α 3 παρουσιάζεται η ημερήσια περιεκτικότητα του παραγόμενου βιοαερίου σε μεθάνιο στα τρία πειραματικά κελιά.

Πίνακας Α 1: Ημερήσια και σωρευτική παραγωγή βιοαερίου στα πειραματικά κελιά για τις τρεις εφαρμοζόμενες συχνότητες ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων.

Ημέρα	Κελί 1 – χαμηλής συχνότητας (m ³ /d)	Σωρευτική παραγωγή βιοαερίου Κ1 (m ³)	Κελί 2 – μέσης συχνότητας (m ³ /d)	Σωρευτική παραγωγή βιοαερίου Κ2 (m ³)	Κελί 3 – υψηλής συχνότητας (m ³ /d)	Σωρευτική παραγωγή βιοαερίου Κ3 (m ³)
0	0,00	0	0,00	0	0,00	0
1	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0
2	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0
3	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0
4	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0
5	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0
6	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0
7	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0
8	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0
9	0,00	0	91,00	91,00	75,32	75,32
10	91,13	91,13	101,40	192,40	121,36	196,68
11	185,59	276,72	112,80	305,20	174,53	371,21
12	183,96	460,68	131,80	437,00	193,57	564,78
13	184,70	645,38	148,60	585,60	201,26	766,04
14	180,06	825,44	153,60	739,20	207,17	973,21
15	170,10	995,54	164,00	903,20	207,52	1.180,73
16	190,15	1.185,69	172,50	1.075,70	220,48	1.401,21
17	195,32	1.381,01	205,00	1.280,70	236,95	1.638,16
18	205,07	1.586,08	212,40	1.493,10	235,54	1.873,70
19	209,99	1.796,07	220,20	1.713,30	227,61	2.101,31
20	205,06	2.001,13	227,60	1.940,90	221,40	2.322,71

21	205,70	2.206,83	231,60	2.172,50	230,51	2.553,22
22	211,34	2.418,17	237,40	2.409,90	226,54	2.779,76
23	217,54	2.635,71	242,00	2.651,90	212,51	2.992,27
24	197,15	2.832,86	248,00	2.899,90	205,15	3.197,42
25	220,04	3.052,90	254,40	3.154,30	219,55	3.416,97
26	219,67	3.272,57	259,20	3.413,50	197,89	3.614,86
27	220,15	3.492,72	265,00	3.678,50	206,02	3.820,88
28	220,27	3.712,99	271,00	3.949,50	200,54	4.021,42
29	217,05	3.930,04	276,60	4.226,10	186,88	4.208,30
30	222,50	4.152,54	282,20	4.508,30	199,88	4.408,18
31	224,95	4.377,49	244,80	4.753,10	224,90	4.633,08
32	218,74	4.596,23	203,60	4.956,70	218,60	4.851,68
33	216,54	4.812,77	187,20	5.143,90	203,60	5.055,28
34	214,12	5.026,89	180,00	5.323,90	203,87	5.259,15
35	204,88	5.231,77	175,00	5.498,90	212,32	5.471,47
36	203,10	5.434,87	167,00	5.665,90	214,31	5.685,78
37	202,18	5.637,05	160,60	5.826,50	201,95	5.887,73
38	201,15	5.838,20	154,40	5.980,90	188,70	6.076,43
39	182,50	6.020,70	148,60	6.129,50	172,26	6.248,69
40	135,80	6.156,50	121,00	6.250,50	167,39	6.416,08

Πίνακας Α 2: Ημερήσια και σωρευτική παραγωγή μεθανίου στα πειραματικά κελιά για τις τρεις εφαρμοζόμενες συχνότητες ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων.

Ημέρα	Κελί 1 – χαμηλής συχνότητας (m ³ /d)	Σωρευτική παραγωγή CH ₄ K1 (m ³)	Κελί 2 – μέσης συχνότητας (m ³ /d)	Σωρευτική παραγωγή CH ₄ K2 (m ³)	Κελί 3 – υψηλής συχνότητας (m ³ /d)	Σωρευτική παραγωγή CH ₄ K3 (m ³)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	45,66	45,66	45,86	45,86	38,56	38,56
10	45,56	91,13	51,82	97,68	64,44	103,01
11	93,64	184,77	59,56	157,24	95,64	198,65
12	94,94	279,71	67,35	224,59	106,27	304,92
13	87,51	367,22	76,08	300,67	114,11	419,03
14	94,94	462,16	76,95	377,62	118,92	537,95
15	87,31	549,47	82,66	460,28	119,32	657,27
16	87,51	636,98	85,91	546,19	125,23	782,51
17	98,19	735,17	102,09	648,28	136,25	918,75
18	102,87	838,04	105,78	754,05	133,55	1.052,30
19	110,94	948,98	113,62	867,67	127,23	1.179,54
20	109,84	1.058,82	118,58	986,25	121,55	1.301,09
21	113,77	1.172,59	121,82	1.108,08	126,55	1.427,64
22	113,77	1.286,36	126,53	1.234,61	123,92	1.551,56
23	113,77	1.400,13	128,99	1.363,60	116,46	1.668,01
24	104,20	1.504,33	132,18	1.495,78	108,32	1.776,33
25	113,77	1.618,10	135,60	1.631,37	115,26	1.891,59
26	103,90	1.722,00	141,00	1.772,38	107,85	1.999,44
27	115,00	1.837,00	146,28	1.918,66	108,57	2.108,01
28	118,00	1.955,00	151,22	2.069,88	104,83	2.212,90
29	110,94	2.065,94	151,02	2.220,90	100,34	2.313,24
30	119,48	2.185,42	154,08	2.374,98	110,19	2.423,43
31	120,57	2.305,99	132,44	2.507,42	115,20	2.538,63
32	117,24	2.423,23	109,13	2.616,55	109,33	2.647,96
33	114,12	2.537,35	100,34	2.716,89	111,92	2.759,88
34	108,79	2.646,14	96,48	2.813,37	111,89	2.871,77
35	104,73	2.750,87	93,98	2.907,34	111,89	2.983,66
36	104,80	2.855,67	88,18	2.995,52	117,23	3.100,89
37	96,91	2.952,58	85,28	3.080,80	110,47	3.211,36
38	104,73	3.057,31	81,90	3.162,70	103,23	3.314,59
39	96,91	3.154,22	79,80	3.242,50	94,23	3.408,82

40	71,70	3.225,92	64,25	3.306,75	91,39	3.482,56
----	-------	-----------------	-------	-----------------	-------	-----------------

Πίνακας Α 3: Ημερήσια περιεκτικότητα του παραγόμενου βιοαερίου σε μεθάνιο στα τρία πειραματικά κελιά.

Ημέρα	Κελί 1 – χαμηλής συχνότητας (%)	Κελί 2 – μέσης συχνότητας (%)	Κελί 3 – υψηλής συχνότητας (%)
0	10,3	9,3	6,8
1	17,3	14,3	12
2	23,5	20,3	21,4
3	30,9	24,5	29,2
4	35,2	28,1	34,6
5	39,2	34,5	38,4
6	42,4	41,8	42,9
7	44,3	44,4	45,2
8	46,5	48,5	49,4
9	48,1	50,4	51,2
10	50,1	51,1	53,1
11	50,4	52,8	54,8
12	50,9	51,1	54,9
13	51,4	51,2	56,7
14	48,6	50,1	57,4
15	48,9	50,4	57,5
16	51,9	49,8	56,8
17	52,3	49,8	57,5
18	52,6	49,8	56,7
19	52,8	51,6	55,9
20	54,1	52,1	54,9
21	53,4	52,6	54,9
22	52,8	53,3	54,7

23	52,3	53,3	54,8
24	52,7	53,3	52,8
25	51,9	53,3	52,5
26	52,7	54,4	54,5
27	53,6	55,2	52,7
28	53,6	55,8	52,3
29	53,6	54,6	47,9
30	53,7	54,6	50,2
31	53,6	54,1	51,1
32	53,6	53,6	52,7
33	52,7	53,6	53,7
34	52,1	53,6	54,9
35	53,1	53,7	52,7
36	52,4	52,8	54,7
37	51,8	53,1	54,7
38	52,1	53,1	54,7
39	53,1	53,7	54,7
40	52,8	53,1	54,6