

**Αξιολόγηση της απόδοσης αναερόβιων χωνευτών αγροκτηνοτροφικών
αποβλήτων κλίμακας πεδίου στην Ελλάδα: Συγκριτική μελέτη**

**Evaluation of the performance of anaerobic digesters of agricultural waste at
field scale in Greece: A comparative study**

Κουτσοφτεσούλης Φίλιππος

A.M. 158199

Επιβλέπων Καθηγητής:

Κομίλης Δημήτρης

Θεσσαλονίκη, 30/6/2026

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας μου, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κο Κομίλη Δημήτριο για την καθοδήγηση και τη πολύτιμη βοήθεια του κατά τη διάρκεια της εκπόνησης και συγγραφής της.

Παράλληλα, είναι υποχρέωσή μου να ευχαριστήσω θερμά τους συνεργάτες στις αναφερόμενες μονάδες αναερόβιας χώνευσης, τον κο Νοτόπουλο Νίκο και την κα Μπίκου Βασιλική από την «ΜΑΚΙΟΣ Α.Ε.», τον ο Τοτσίδη Αθανάσιο από τις μονάδες «ΒΙΟΑΕΡΙΟ ΛΑΓΚΑΔΑ Α.Ε.» και «ΒΙΟΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΝΙΓΡΙΤΑΣ Α.Ε.» καθώς και τους συνεργάτες στην εταιρία «Q-LAB Α.Ε.» κο Σφέτσα Θέμη και την κα Προκοπίδου Νικολέτα για την πολύτιμη βοήθεια τους στην παροχή των απαραίτητων πληροφοριών αλλά κυρίως των αποτελεσμάτων, μετρήσεων και δεδομένων για τις τρεις μονάδες, χωρίς τα οποία θα ήταν αδύνατη η εκπόνηση του τμήματος της συγκριτικής μελέτης της παρούσας εργασίας.

Τέλος, οφείλω να ευχαριστήσω τη σύζυγό μου Γεωργία, για την αμέριστη συμπαράστασή της και κυρίως για την υπομονή της κατά την περίοδο εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας αλλά και καθ' όλη τη διάρκεια των τεσσάρων ετών φοίτησης μου στο Μ.Π.Σ. «Διαχείριση Αποβλήτων» του Ε.Α.Π.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ	ΣΕΛΙΔΑ
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
ABSTRACT	6
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	8
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	9
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	13
1.1. Σκοπός και στόχοι της εργασίας	13
1.2. Αντικείμενο της μελέτης	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	14
2.1. Αναερόβια χώνευση: βασικές αρχές	14
2.2. Πρώτες ύλες (υποστρώματα) αγροκτηνοτροφικών αποβλήτων	22
2.3. Τύποι αναερόβιων χωνευτών	24
2.4. Παραγόμενα προϊόντα αναερόβιας χώνευσης	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ	29
3.1. Ελληνική και ευρωπαϊκή νομοθεσία για τη διαχείριση αποβλήτων	29
3.2. Τεχνοοικονομική βιωσιμότητα μονάδων αναερόβιας χώνευσης	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑΣ ΧΩΝΕΥΣΗΣ	32
4.1. Μονάδα Α – Μονάδα Αναερόβιας Χώνευσης & Παραγωγής Βιοαερίου «ΜΑΚΙΟΣ Α.Ε.»	32
4.2. Μονάδα Β – Μονάδα Αναερόβιας Χώνευσης & Παραγωγής Βιοαερίου «ΒΙΟΑΕΡΙΟ ΛΑΓΚΑΔΑ Α.Ε.»	35
4.3. Μονάδα Γ – Μονάδα Αναερόβιας Χώνευσης & Παραγωγής Βιοαερίου «ΒΙΟΑΕΡΙΟ ΝΙΓΡΙΤΑΣ Α.Ε.»	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑΣ ΧΩΝΕΥΣΗΣ	
5.1. Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Μονάδας Α	43
5.2. Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Μονάδας Β	55
5.3. Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Μονάδας Γ	67
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	78
6.1. Συζήτηση των αποτελεσμάτων της συγκριτικής μελέτης	78
6.2. Συγκριτική ερμηνεία της λειτουργίας των μονάδων	82
6.3. Συμπεράσματα	84
6.4. Προτάσεις βελτιστοποίησης και μελλοντικής έρευνας	85
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	86

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η κλιματική αλλαγή και η επιτακτική ανάγκη για τη σταδιακή απανθρακοποίηση της ενέργειας έχουν καταστήσει την αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας κεντρική προτεραιότητα σε διεθνές επίπεδο. Στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας, η τεχνολογία της αναερόβιας χώνευσης αναδεικνύεται σε μία από τις πιο υποσχόμενες μεθόδους, καθώς προσφέρει διπλό περιβαλλοντικό όφελος: την ορθολογική διαχείριση και επεξεργασία οργανικών υπολειμμάτων και την ταυτόχρονη παραγωγή βιοαερίου υψηλής ενεργειακής αξίας. Η Ελλάδα, λόγω του εκτεταμένου πρωτογενούς τομέα της, διαθέτει πλούσιο και εν πολλοίς ανεκμετάλλευτο δυναμικό αγροκτηνοτροφικών αποβλήτων. Ωστόσο, η λειτουργική συμπεριφορά των μονάδων αυτών σε πραγματικές συνθήκες πεδίου παρουσιάζει σύνθετες προκλήσεις, οι οποίες εξαρτώνται άμεσα από τη σύσταση του μίγματος τροφοδοσίας, τον τύπο των αντιδραστήρων και τις στρατηγικές διαχείρισης της βιολογικής διεργασίας.

Αντικείμενο και σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας είναι η συστηματική αξιολόγηση και η συγκριτική μελέτη της απόδοσης τριών πρότυπων μονάδων αναερόβιας χώνευσης αγροκτηνοτροφικών αποβλήτων και βιομηχανικών υποπροϊόντων κλίμακας πεδίου, οι οποίες λειτουργούν στην ευρύτερη περιοχή της Κεντρικής Μακεδονίας. Η μεθοδολογία της έρευνας βασίστηκε στη συγκέντρωση, επεξεργασία και στατιστική ανάλυση πραγματικών πειραματικών και λειτουργικών δεδομένων ενός πλήρους έτους. Στο πλαίσιο αυτό, εξετάστηκαν οι διακυμάνσεις κρίσιμων φυσικοχημικών παραμέτρων εντός των χωνευτών, όπως το pH, ο λόγος πτητικών οργανικών οξέων προς τη ρυθμιστική ικανότητα, η συγκέντρωση αμμωνιακών ιόντων και το ποσοστό των ολικών στερεών. Παράλληλα, αξιολογήθηκε η ποσοτική και ποιοτική απόδοση παραγωγής βιοαερίου με βάση τον ημερήσιο όγκο, την περιεκτικότητα σε μεθάνιο και τις προσμίξεις υδροθείου.

Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι και οι τρεις μονάδες στηρίζουν τη λειτουργία τους σε έναν σταθερό κορμό τροφοδοσίας από υγρά και στερεά κτηνοτροφικά απόβλητα, κυρίως αγελαδινή και πτηνοτροφική κοπριά. Ο κορμός αυτός εμπλουτίζεται σε μεταβλητά ποσοστά με δευτερογενή, ενεργειακά υποστρώματα και εποχικά απόβλητα της περιοχής, όπως ενσίρωμα καλαμποκιού, πούλπα φρούτων, κασίγαρο, τυρόγαλο και υπολείμματα γαλακτοβιομηχανιών.

Από τη συγκριτική ανάλυση των δεικτών απόδοσης προέκυψε ότι η σταθερότητα της τροφοδοσίας αποτελεί τον καθοριστικό παράγοντα για τον τελικό όγκο του παραγόμενου προϊόντος. Οι μονάδες που διατήρησαν ένα ομοιογενές ιστορικό εισροών καθ' όλη τη διάρκεια του έτους παρουσίασαν υψηλότερη και πιο προβλέψιμη ημερήσια παραγωγή βιοαερίου, αποφεύγοντας τις έντονες μεταβολές. Αντίθετα, η απότομη και εποχική εισαγωγή υπολειμμάτων με υψηλό οργανικό φορτίο, όπως ο κασίγαρος ή η πούλπα φρούτων, αναγκάζει τη μικροβιακή κοινότητα σε περιόδους προσαρμογής, προκαλώντας σποραδικές διακυμάνσεις στην απόδοση.

Όσον αφορά την ενεργειακή ποιότητα του αερίου, η περιεκτικότητα σε μεθάνιο αποδείχθηκε εξαιρετικά σταθερή και παρεμφερής και στις τρεις εγκαταστάσεις, επιβεβαιώνοντας ότι η μεθανογένεση δεν αναστέλλεται εύκολα όταν οι βασικές συνθήκες διατηρούνται εντός των επιθυμητών ορίων. Στον αντίποδα, το υδροθείο αναδείχθηκε ως η πιο ευαίσθητη παράμετρος στις αλλαγές των υποστρωμάτων, εμφανίζοντας έντονες εξάρσεις και αυξημένες τιμές κατά τις περιόδους χρήσης πρωτεϊνούχων ή θειούχων

αποβλήτων, γεγονός που επιτείνει την ανάγκη για αποτελεσματικά συστήματα αποθείωσης.

Σχετικά με τη φυσικοχημική σταθερότητα των αντιδραστήρων, οι τιμές του pH παρέμειναν εντός του ιδανικού αλκαλικού εύρους όπως και ο λόγος FOS/TAC εντός του επιθυμητού εύρους τιμών, επιβεβαιώνοντας την ισχυρή ρυθμιστική ικανότητα που προσφέρει η χρήση κτηνοτροφικών αποβλήτων ως βασικό υπόστρωμα.

Το βασικό συμπέρασμα της παρούσας εργασίας είναι ότι η απόδοση των μονάδων αναερόβιας χώνευσης στην Ελλάδα καθορίζεται κυρίως από τη δυνατότητα διατήρησης μιας ισορροπημένης και ελεγχόμενης συνδιαχείρισης. Η ανάμειξη κτηνοτροφικών αποβλήτων με εποχικά υποπροϊόντα πρέπει να σχεδιάζεται με ακρίβεια ώστε να αποτρέπονται φαινόμενα βιολογικής αναστολής, στα οποία πάντως οι εγχώριες μικροβιακές κοινότητες δείχνουν αξιοσημείωτο εγκλιματισμό. Τέλος, η εργασία προτείνει την εντατικοποίηση των αυτοματοποιημένων ελέγχων σε πραγματικό χρόνο και την περαιτέρω διερεύνηση της αξιοποίησης του χωνεμένου υπολείμματος ως πιστοποιημένου οργανικού λιπάσματος, ενισχύοντας τη συνολική βιωσιμότητα των επενδύσεων βιοαερίου στον ελληνικό αγροτικό χώρο.

Λέξεις-κλειδιά: Αναερόβια Χώνευση, Βιοαέριο, Μεθάνιο, Υδροθείο, Αγροκτηνοτροφικά Απόβλητα, Συν-χώνευση, Κλίμακα Πεδίου, Κυκλική Οικονομία.

ABSTRACT

Climate change and the imperative need for the gradual decarbonization of energy sectors have prioritized the deployment of Renewable Energy Sources globally. Within the framework of the circular economy, anaerobic digestion stands out as one of the most promising technologies, offering a dual environmental benefit through the sustainable treatment of organic residues and the simultaneous generation of high-energy-content biogas. Despite Greece's substantial biogas production potential due to its extensive primary sector, the operational performance of field-scale anaerobic digestion plants presents complex challenges, which rely directly on feedstock composition, reactor technology, and biological process management.

The primary objective of this master's thesis is to systematically evaluate and compare the operational performance of three field-scale anaerobic digesters processing agricultural/livestock wastes and industrial by-products in Central Macedonia, Greece. The research methodology involved gathering, processing, and statistically analyzing real-world experimental and operational data spanning a full year. Critical physicochemical parameters within the digesters were evaluated, including pH, volatile organic acids to total inorganic carbon ratio, ammonium ion concentration, and total solids percentage. Concurrently, the quantitative and qualitative efficiency of biogas production was assessed based on daily volumes, methane content, and concentrations of corrosive hydrogen sulfide impurities.

The findings demonstrate that all three facilities rely on a steady core feeding substrate composed of livestock manure, which is co-digested with variable ratios of secondary energy-rich substrates and seasonal agro-industrial residues, such as corn silage, fruit pulp, olive mill wastewater, vinasse, whey, and dairy wastes.

The comparative analysis yielded that feedstock stability is the key determining factor regarding the final volume of the generated product. Facilities that sustain a homogeneous input profile throughout the year achieve higher and more predictable daily biogas production, avoiding severe fluctuations. Conversely, the abrupt and seasonal introduction of residues with high organic loading, such as olive mill wastewater or fruit pulp, forces the microbial community into adaptation phases, causing sporadic variations in yield.

Regarding the energetic quality of the gas, methane content proved remarkably stable and comparable across all installations, confirming that methanogenic activity is not easily inhibited as long as baseline conditions remain within desired limits. On the other hand, hydrogen sulfide emerged as the most sensitive parameter to feedstock shifts, displaying distinct spikes and elevated values during periods of protein- or sulfur-rich waste utilization, which underscores the necessity for effective desulfurization systems.

As far as the physicochemical stability of the digesters is concerned, pH levels consistently fell within the optimal alkaline zone and the FOS/TAC values remained within the nominal range, demonstrating the strong buffering capacity provided by the use of cattle manure.

The overriding conclusion of this study is that the performance of anaerobic digesters in Greece is heavily dependent on sustaining a balanced and carefully managed

co-digestion mixture. The blending of livestock wastes with seasonal by-products must be precisely engineered to prevent biological inhibition phenomena, such as ammonia toxicity, to which domestic microbial communities display remarkable acclimatization. Ultimately, this thesis recommends expanding real-time automated process monitoring and further exploring the commercial upgrading of digestate into certified organic fertilizers, thereby boosting the techno-economic viability of biogas investments in the Greek agricultural sector.

Keywords: Anaerobic Digestion, Biogas, Methane, Hydrogen Sulfide, Agro-livestock Waste, Co-digestion, Field Scale, Circular Economy.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας	Τίτλος	Σελίδα
Πίνακας 1	Σύσταση του βιοαερίου σύμφωνα με τη βιβλιογραφία	27
Πίνακας 2	Πρωτογενής παραγωγή βιοαερίου σε επιλεγμένα κράτη μέλη της Ε.Ε. για το 2022, σε ktoe	31
Πίνακας 3	Σύσταση υποστρώματος τροφοδοσίας αναερόβιου χωνευτή (main digester) της Μονάδας Α	44
Πίνακας 4	% Σύσταση υποστρώματος τροφοδοσίας αναερόβιου χωνευτή (post digester) της Μονάδας Α	45
Πίνακας 5	Μετρήσεις Βασικών Παραμέτρων για το έτος 2025 στη δεξαμενή χώνευσης (main digester) της Μονάδας Α	47
Πίνακας 6	Μετρήσεις Βασικών Παραμέτρων για το έτος 2025 στη δεξαμενή χώνευσης (post digester) της Μονάδας Α	49
Πίνακας 7	Δεδομένα παραγόμενου προϊόντος της Μονάδας Α	51
Πίνακας 8	Σύσταση υποστρώματος τροφοδοσίας αναερόβιου χωνευτή (main digester) της Μονάδας Β	57
Πίνακας 9	% Σύσταση υποστρώματος τροφοδοσίας αναερόβιου χωνευτή (main digester) της Μονάδας Β	58
Πίνακας 10	Μετρήσεις Βασικών Παραμέτρων για το έτος 2025 στη δεξαμενή χώνευσης (main digester) της Μονάδας Β	60
Πίνακας 11	Μετρήσεις Βασικών Παραμέτρων για το έτος 2025 στη δεξαμενή χώνευσης (main digester) της Μονάδας Β	62
Πίνακας 12	Δεδομένα παραγόμενου προϊόντος της Μονάδας Β	64
Πίνακας 13	Σύσταση υποστρώματος τροφοδοσίας αναερόβιου χωνευτή (main digester) της Μονάδας Γ	69
Πίνακας 14	% Σύσταση υποστρώματος τροφοδοσίας αναερόβιου χωνευτή (main digester) της Μονάδας Γ	69
Πίνακας 15	Μετρήσεις Βασικών Παραμέτρων για το έτος 2025 στη δεξαμενή χώνευσης (main digester) της Μονάδας Γ	71
Πίνακας 16	Δεδομένα παραγόμενου προϊόντος της Μονάδας Γ	73
Πίνακας 17	Συγκριτικός πίνακας μέσων τιμών των τριών μονάδων Α, Β, Γ λειτουργικών παραμέτρων και απόδοσης.	78
Πίνακας 18	Πίνακας 18: Συγκριτικός πίνακας δεικτών λειτουργίας και απόδοσης των τριών μονάδων Α, Β, Γ	81

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα	Τίτλος	Σελίδα
Εικόνα 1	Σχηματική απεικόνιση ενίσχυσης κυκλικής οικονομίας από μονάδα αναερόβιας χώνευσης αγροκτηνοτροφικών αποβλήτων	14
Εικόνα 2	Σχηματική απεικόνιση της μικροβιακής διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης, με διαχωρισμό των σταδίων, το σχηματισμό των μεταβολικών ενώσεων σε κάθε στάδιο, το μικροβιακό υπόστρωμα κάθε σταδίου και της πιθανές δράσεις για την αύξηση του ρυθμού αντίδρασης	16
Εικόνα 3	Αεροφωτογραφία μονάδας αναερόβιας χώνευσης της ΜΑΚΙΟΣ Α.Ε. κατά την περίοδο ολοκλήρωσης της κατασκευής.	32
Εικόνα 4	Συνοπτικό Διάγραμμα Ροής Μονάδας Αναερόβιας Χώνευσης ΜΑΚΙΟΣ Α.Ε.	33
Εικόνα 5	Δεξαμενή πρωτογενούς χώνευσης (main digester) Μονάδας Αναερόβιας Χώνευσης «ΒΙΟΑΕΡΙΟ ΛΑΓΚΑΔΑ Α.Ε.»	35
Εικόνα 6	Αεροφωτογραφία Μονάδας Αναερόβιας Χώνευσης «ΒΙΟΑΕΡΙΟ ΛΑΓΚΑΔΑ Α.Ε.»	35
Εικόνα 7	Συνοπτικό Διάγραμμα Ροής Μονάδας Αναερόβιας Χώνευσης ΒΙΟΑΕΡΙΟ ΛΑΓΚΑΔΑ Α.Ε.	36
Εικόνα 8	Αεροφωτογραφία Μονάδας Αναερόβιας Χώνευσης «ΒΙΟΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΝΙΓΡΙΤΑΣ Α.Ε.»	38
Εικόνα 9	Συνοπτικό Διάγραμμα Ροής Μονάδας Αναερόβιας Χώνευσης ΒΙΟΕΝΕΡΓΕΙΑ ΝΙΓΡΙΤΑΣ Α.Ε.	39
Εικόνα 10	Γεννήτριες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας 1 MW στη μονάδα «Βιοενεργειακή Νιγρίτας Α.Ε.»	42

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

Γράφημα	Τίτλος	Σελίδα
Γράφημα 1	% σύσταση του υποστρώματος τροφοδοσίας Αναερόβιου Χωνευτή Μονάδας Α.	45
Γράφημα 2	Διακύμανση βασικών παραμέτρων στον αναερόβιο χωνευτή (Main Digester) της Μονάδας Α.	48
Γράφημα 3	Διακύμανση βασικών παραμέτρων στον αναερόβιο χωνευτή (Post Digester) της Μονάδας Α.	50
Γράφημα 4	Συγκριτικό διάγραμμα % προσθήκης κοτίσιας κοπριάς στην τροφοδοσία του χωνευτή και του συνολικού παραγόμενου βιοαερίου Μονάδας Α.	53
Γράφημα 5	Συγκριτικό διάγραμμα % προσθήκης κοτίσιας κοπριάς στην τροφοδοσία του χωνευτή και % CH ₄ στο βιοαέριο Μονάδας Α	53
Γράφημα 6	Συγκριτικό διάγραμμα % προσθήκης πούλπας φρούτων στην τροφοδοσία του χωνευτή και του συνολικού παραγόμενου βιοαερίου Μονάδας Α.	53
Γράφημα 7	Συγκριτικό διάγραμμα % προσθήκης πούλπας φρούτων στην τροφοδοσία του χωνευτή και της παραγωγής προσμίξεων υδροθείου Μονάδας Α.	53
Γράφημα 8	Συγκριτικό διάγραμμα % προσθήκης κασίγαρου στην τροφοδοσία του χωνευτή σε συνδυασμό με το % ποσοστό υγρασίας και αγελαδινής υγρής κοπριάς και του συνολικού παραγόμενου βιοαερίου Μονάδας Α.	54
Γράφημα 9	Συγκριτικό διάγραμμα % προσθήκης κασίγαρου στην τροφοδοσία του χωνευτή και του ποσοστού CH ₄ στο αέριο Μονάδας Α.	54
Γράφημα 10	Συγκριτικό διάγραμμα % προσθήκης βινάσης στην τροφοδοσία του χωνευτή και του συνολικού παραγόμενου βιοαερίου Μονάδας Α.	54
Γράφημα 11	Συγκριτικό διάγραμμα % προσθήκης υπολειμμάτων γαλακτοβιομηχανικής δραστηριότητας στην τροφοδοσία του χωνευτή και του συνολικού παραγόμενου βιοαερίου Μονάδας Α.	55
Γράφημα 12	Συγκριτικό διάγραμμα % προσθήκης υπολειμμάτων γαλακτοβιομηχανικής δραστηριότητας στην τροφοδοσία του χωνευτή και του % ποσοστού CH ₄ στο παραγόμενο αέριο Μονάδας Α.	55
Γράφημα 13	Συγκριτικό διάγραμμα % προσθήκης υπολειμμάτων αγροτικής δραστηριότητας και ενσιρώματος καλαμποκιού στην τροφοδοσία του χωνευτή και του συνολικού παραγόμενου βιοαερίου Μονάδας Α.	55
Γράφημα 14	Συγκριτικό διάγραμμα % προσθήκης υπολειμμάτων αγροτικής δραστηριότητας και ενσιρώματος καλαμποκιού στην τροφοδοσία του χωνευτή και του % ποσοστού CH ₄ στο παραγόμενο αέριο Μονάδας Α.	55
Γράφημα 15	% Σύσταση του υποστρώματος τροφοδοσίας Αναερόβιου Χωνευτή Μονάδας Β	58
Γράφημα 16	Διακύμανση βασικών παραμέτρων στον αναερόβιο χωνευτή (Main Digester) της Μονάδας Β	61
Γράφημα 17	Διακύμανση βασικών παραμέτρων στον αναερόβιο χωνευτή (post Digester) της Μονάδας Β	63
Γράφημα 18	Συγκριτικό διάγραμμα % προσθήκης κασίγαρου στην τροφοδοσία του χωνευτή και του ποσοστού CH ₄ στο αέριο στη Μονάδα Β	65
Γράφημα 19	Συγκριτικό διάγραμμα % προσθήκης κασίγαρου στην τροφοδοσία του χωνευτή και της συγκέντρωσης H ₂ S στο αέριο στη Μονάδα Β	65
Γράφημα 20	Συγκριτικό διάγραμμα % προσθήκης πούλπας φρούτων στην τροφοδοσία του χωνευτή και του συνολικού παραγόμενου αερίου στη Μονάδα Β	66
Γράφημα 21	Συγκριτικό διάγραμμα % προσθήκης πούλπας φρούτων στην τροφοδοσία του χωνευτή και της συγκέντρωσης H ₂ S στο αέριο στη Μονάδα Β	66
Γράφημα 22	Συγκριτικό διάγραμμα % προσθήκης υγρής κοτίσιας κοπριάς στην τροφοδοσία του χωνευτή και του συνολικού παραγόμενου αερίου στη μονάδα Β	66
Γράφημα 23	Συγκριτικό διάγραμμα % προσθήκης στερεής κοτίσιας κοπριάς στην τροφοδοσία του χωνευτή και του % ποσοστού CH ₄ στο παραγόμενο αέριο στη μονάδα Β	66

Γράφημα 24	Συγκριτικό διάγραμμα % προσθήκης αγελαδινής κοπριάς στην τροφοδοσία του χωνευτή και του συνολικού παραγόμενου αερίου στη μονάδα Β	67
Γράφημα 25	Συγκριτικό διάγραμμα % προσθήκης αγελαδινής κοπριάς στην τροφοδοσία του χωνευτή και του % ποσοστού CH ₄ στο παραγόμενο αέριο στη μονάδα Β	67
Γράφημα 26	Συγκριτικό διάγραμμα % προσθήκης ενσιρώματος καλαμποκιού και σπασμένου καλαμποκιού στην τροφοδοσία του χωνευτή και του συνολικού παραγόμενου αερίου στη μονάδα Β	67
Γράφημα 27	Συγκριτικό διάγραμμα % προσθήκης αγελαδινής κοπριάς στην τροφοδοσία του χωνευτή και του % ποσοστού CH ₄ στο παραγόμενο αέριο στη μονάδα Β	67
Γράφημα 28	% Σύσταση του υποστρώματος τροφοδοσίας Αναερόβιου Χωνευτή Μονάδας Γ	70
Γράφημα 29	Διακύμανση βασικών παραμέτρων στον αναερόβιο χωνευτή (FM1) της Μονάδας Γ	72
Γράφημα 30	Συγκριτικό διάγραμμα % ποσοστού μίγματος ανακυκλοφορίας στην τροφοδοσία του χωνευτή και του συνολικού παραγόμενου αερίου στη Μονάδα Γ	74
Γράφημα 31	Συγκριτικό διάγραμμα % ποσοστού μίγματος ανακυκλοφορίας στην τροφοδοσία του χωνευτή και του % ποσοστού CH ₄ στο παραγόμενο αέριο στη Μονάδα Γ	74
Γράφημα 32	Συγκριτικό διάγραμμα % ποσοστού υγρής αγελαδινής κοπριάς στην τροφοδοσία του χωνευτή και του συνολικού παραγόμενου αερίου στη Μονάδα Γ	74
Γράφημα 33	Συγκριτικό διάγραμμα % ποσοστού υγρής αγελαδινής κοπριάς στην τροφοδοσία του χωνευτή και του % ποσοστού CH ₄ στο παραγόμενο αέριο στη Μονάδα Γ	74
Γράφημα 34	Συγκριτικό διάγραμμα % ποσοστού οργανικού αποβλήτου στην τροφοδοσία του χωνευτή και του συνολικού παραγόμενου αερίου στη Μονάδα Γ	75
Γράφημα 35	Συγκριτικό διάγραμμα % ποσοστού οργανικού αποβλήτου στην τροφοδοσία του χωνευτή και της συγκέντρωσης H ₂ S στο παραγόμενο αέριο στη Μονάδα Γ	75
Γράφημα 36	Συγκριτικό διάγραμμα % ποσοστού πούλπας φρούτων στην τροφοδοσία του χωνευτή και του συνολικού παραγόμενου αερίου στη Μονάδα Γ	75
Γράφημα 37	Συγκριτικό διάγραμμα % ποσοστού πούλπας φρούτων στην τροφοδοσία του χωνευτή και της συγκέντρωσης H ₂ S στο παραγόμενο αέριο στη Μονάδα Γ	75
Γράφημα 38	Συγκριτικό διάγραμμα % ποσοστού πάστας ελιάς στην τροφοδοσία του χωνευτή και του συνολικού παραγόμενου αερίου στη Μονάδα Γ	76
Γράφημα 39	Συγκριτικό διάγραμμα % ποσοστού πάστας ελιάς στην τροφοδοσία του χωνευτή και της συγκέντρωσης H ₂ S στο παραγόμενο αέριο στη Μονάδα Γ	76
Γράφημα 40	Συγκριτικό διάγραμμα % ποσοστού τυρόγαλου στην τροφοδοσία του χωνευτή και του συνολικού παραγόμενου αερίου στη Μονάδα Γ	76
Γράφημα 41	Συγκριτικό διάγραμμα % ποσοστού τυρόγαλου στην τροφοδοσία του χωνευτή και του % ποσοστού CH ₄ στο παραγόμενο αέριο στη Μονάδα Γ	76
Γράφημα 42	Συγκριτικό διάγραμμα % ποσοστού ενσιρωμάτων στην τροφοδοσία του χωνευτή και του συνολικού παραγόμενου αερίου στη Μονάδα Γ	77
Γράφημα 43	Συγκριτικό διάγραμμα % ποσοστού ενσιρωμάτων στην τροφοδοσία του χωνευτή και της συγκέντρωσης H ₂ S στο παραγόμενο αέριο στη Μονάδα Γ	77
Γράφημα 44	Συγκριτικό διάγραμμα % ποσοστού πάστας ελιάς στην τροφοδοσία του χωνευτή και του συνολικού παραγόμενου αερίου στη μονάδα Γ	77
Γράφημα 45	Συγκριτικό διάγραμμα % ποσοστού πάστας ελιάς στην τροφοδοσία του χωνευτή και της συγκέντρωσης H ₂ S στο παραγόμενο αέριο στη μονάδα Γ	77
Γράφημα 46	Συγκριτικό ραβδόγραμμα % σύστασης κτηνοτροφικών αποβλήτων, % σύστασης δευτερογενών ή εποχικών υποστρωμάτων, συγκέντρωσης αμμωνιακών (mg/l) και ολικών στερεών (% κ.ο.) στο χωνευτή και συνολικό ημερήσιο παραγόμενο αέριο (Nm ³ /d), % ποσοστό CH ₄ και συγκέντρωση προσμίξεων H ₂ S (ppm) στο παραγόμενο αέριο για τις μονάδες Α, Β, Γ.	80

Γράφημα 47	Συνθετικό διάγραμμα λειτουργικού προφίλ των τριών μονάδων αναερόβιας χώνευσης, με βάση τους δείκτες λειτουργικού φορτίου, φυσικοχημικής σταθερότητας, παραγωγής και ποιότητας παραγόμενου αερίου.	81
Γράφημα 48	Συγκριτικό συγκεντρωτικό διάγραμμα συσχέτισης βασικών υποστρωμάτων – με δείκτες απόδοσης (Συνολικό παραγόμενο αέριο, % ποσοστό CH ₄ και συγκέντρωση H ₂ S) για τις μονάδες Α, Β, Γ.	83

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αναερόβια χώνευση αποτελεί μία από τις σημαντικότερες τεχνολογίες αξιοποίησης αποβλήτων των τελευταίων δύο δεκαετιών, καθώς συνδυάζει τη διαχείριση οργανικών υπολειμμάτων με την παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας υπό μορφή βιοαερίου. Η εφαρμογή της συμβάλλει στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του πρωτογενούς τομέα, στον περιορισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και στην προώθηση των αρχών της κυκλικής οικονομίας. Παρά το σημαντικό δυναμικό παραγωγής βιοαερίου που διαθέτει η Ελλάδα, λόγω της εκτεταμένης γεωργικής και κτηνοτροφικής δραστηριότητας, η ανάπτυξη και η απόδοση των μονάδων αναερόβιας χώνευσης παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των αποβλήτων, την τεχνολογία που εφαρμόζεται και τις συνθήκες λειτουργίας τους.

Η αξιολόγηση πραγματικών εγκαταστάσεων κλίμακας πεδίου είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς παρέχει πολύτιμα στοιχεία για την αποτελεσματικότητα των συστημάτων σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας και αναδεικνύει τις παραμέτρους που επηρεάζουν την παραγωγή βιοαερίου και τη συνολική βιωσιμότητα των μονάδων. Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα εργασία εξετάζει και συγκρίνει την απόδοση τριών αναερόβιων μονάδων χώνευσης αγροκτηνοτροφικών αποβλήτων που λειτουργούν στη Β.Ελλάδα.

1.1. Σκοπός και στόχοι της εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η αξιολόγηση της απόδοσης αναερόβιων χωνευτών αγροκτηνοτροφικών αποβλήτων κλίμακας πεδίου στην Ελλάδα και η συγκριτική διερεύνηση των χαρακτηριστικών που επηρεάζουν τη λειτουργία τους. Ειδικότερα, η εργασία αποσκοπεί στην καταγραφή και ανάλυση των τεχνικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών των εξεταζόμενων μονάδων, στη διερεύνηση των παραμέτρων που επηρεάζουν την παραγωγή βιοαερίου και στην αξιολόγηση της ενεργειακής και περιβαλλοντικής τους απόδοσης. Παράλληλα, επιδιώκεται η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τις βέλτιστες πρακτικές λειτουργίας και τις δυνατότητες περαιτέρω ανάπτυξης της τεχνολογίας αναερόβιας χώνευσης στον ελληνικό αγροτικό τομέα.

1.2. Αντικείμενο της μελέτης

Αντικείμενο της εργασίας αποτελεί η συγκριτική μελέτη αναερόβιων χωνευτών αγροκτηνοτροφικών αποβλήτων που λειτουργούν σε κλίμακα πεδίου στην Ελλάδα. Η έρευνα επικεντρώνεται στην αξιολόγηση της λειτουργικής τους απόδοσης μέσω της ανάλυσης δεδομένων που αφορούν τα χαρακτηριστικά των μονάδων, τα είδη και τις ποσότητες των υποστρωμάτων που χρησιμοποιούνται, καθώς και τα αποτελέσματα που επιτυγχάνονται ως την παραγωγή βιοαερίου και την ενεργειακή αξιοποίηση των αποβλήτων.

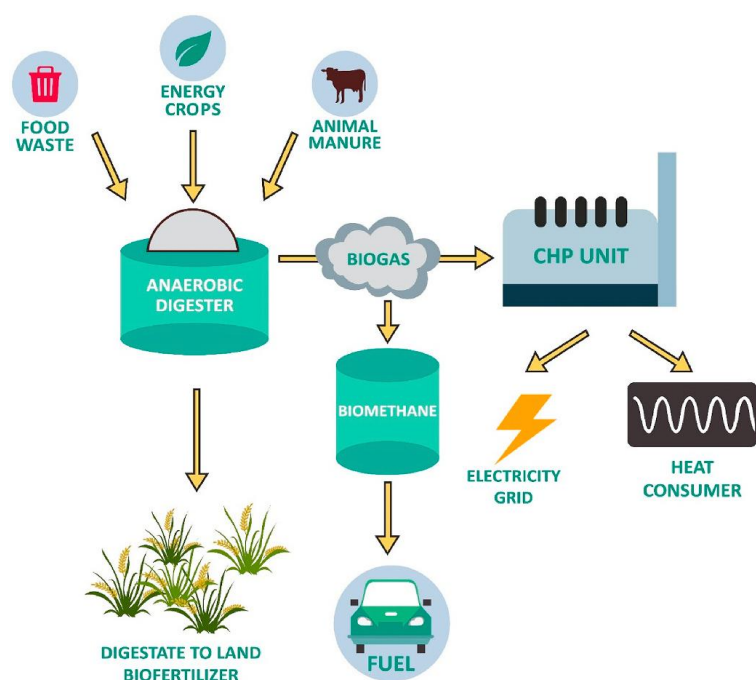
Η μελέτη επιδιώκει να αναδείξει τις ομοιότητες και τις διαφορές μεταξύ των εξεταζόμενων εγκαταστάσεων, να εντοπίσει τους παράγοντες που επηρεάζουν την αποδοτικότητά τους και να αξιολογήσει τον ρόλο της αναερόβιας χώνευσης ως τεχνολογίας διαχείρισης αγροκτηνοτροφικών αποβλήτων στον ελληνικό χώρο. Μέσα από τη συγκριτική προσέγγιση των διαθέσιμων δεδομένων, επιδιώκεται η διαμόρφωση χρήσιμων συμπερασμάτων που μπορούν να συμβάλουν στη βελτίωση της λειτουργίας των υφιστάμενων μονάδων και στην περαιτέρω ανάπτυξη του τομέα του βιοαερίου στην Ελλάδα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1. Αναερόβια χώνευση: βασικές αρχές

Η αναερόβια χώνευση ορίζεται ως μια βιολογική διαδικασία αποικοδόμησης της οργανικής ύλης που πραγματοποιείται σε περιβάλλοντα χωρίς την παρουσία οξυγόνου, όπου διάφορες ομάδες μικροοργανισμών συνεργάζονται για τη διάσπαση των υλικών (Bose et al., 2025). Η τεχνολογία αυτή αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη μέθοδο για τη διαχείριση και σταθεροποίηση αποβλήτων με υψηλή συγκέντρωση στερεών, όπως είναι τα γεωργικά και κτηνοτροφικά υπολείμματα, επιτρέποντας την ανάκτηση ενέργειας μέσω της παραγωγής βιοαερίου (Wang et al., 2023). Η εφαρμογή της αναερόβιας χώνευσης επιτρέπει τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του αγροτικού τομέα, καθώς περιορίζει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που προκύπτουν από την παραδοσιακή διαχείριση των αποβλήτων (Pirmoghani et al., 2025).

Το βιοαέριο που εκλύεται κατά τη διεργασία αποτελείται κυρίως από μεθάνιο (CH_4) και διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), διαθέτοντας σημαντικό ενεργειακό περιεχόμενο που μπορεί να υποκαταστήσει τα ορυκτά καύσιμα (Aravani et al., 2022). Παράλληλα, η αξιοποίηση του χωνεμένου υπολείμματος ως οργανικού λιπάσματος ενισχύει την κυκλική οικονομία, επιστρέφοντας πολύτιμα θρεπτικά συστατικά στο έδαφος και βελτιώνοντας την οικονομική απόδοση της γεωργικής εκμετάλλευσης (Pirmoghani et al., 2025; Spyridonidis et al., 2020).



Εικόνα 1: Σχηματική απεικόνιση ενίσχυσης κυκλικής οικονομίας από μονάδα αναερόβιας χώνευσης αγροκτηνοτροφικών αποβλήτων (O' Connor et al., 2021)

Σε εθνικό επίπεδο, το δυναμικό παραγωγής βιοαερίου στην Ελλάδα παραμένει σε νηπιακό επίπεδο, παρά την αφθονία γεωργικών και κτηνοτροφικών υπολειμμάτων που θα μπορούσαν να τροφοδοτήσουν βιολογικά συστήματα επεξεργασίας (Aravani et al., 2022). Η επιτυχία τέτοιων εγκαταστάσεων εξαρτάται από τη μικροβιακή ποικιλομορφία και τη σταθερότητα της διεργασίας, η οποία συχνά ενισχύεται μέσω της συγχώνευσης διαφορετικών πρώτων υλών. Η συγκεκριμένη προσέγγιση επιτρέπει τη βελτιστοποίηση

της αναλογίας θρεπτικών συστατικών και την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης ανά μονάδα όγκου του αντιδραστήρα (Aravani et al., 2022; Spyridonidis et al., 2020).

2.1.1. Εμπλεκόμενα μικροβιακά στάδια

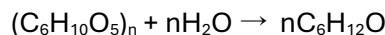
Η βιολογική μετατροπή της οργανικής ύλης σε μεθάνιο δεν είναι μια απλή αντίδραση, αλλά μια διεργασία σταδίων που απαιτεί τη διαδοχική δράση διαφορετικών ομάδων μικροοργανισμών (Spyridonidis et al., 2020).

Η διαδικασία ξεκινά με την υδρόλυση, όπου τα σύνθετα πολυμερή, όπως οι πρωτεΐνες και οι υδατάνθρακες, διασπώνται σε απλούστερα μονομερή. Στη συνέχεια, κατά την οξεογένεση, τα προϊόντα της υδρόλυσης μετατρέπονται σε πτητικά λιπαρά οξέα, αλκοόλες και αέρια, όπως το διοξείδιο του άνθρακα και το υδρογόνο. Το τρίτο στάδιο είναι η ακετογένεση, όπου τα πτητικά λιπαρά οξέα μεταβολίζονται σε οξικό οξύ, συνοδευόμενα από την παραγωγή επιπλέον υδρογόνου και διοξειδίου του άνθρακα. Η ολοκλήρωση της διεργασίας επιτυγχάνεται με τη μεθανογένεση, όπου εξειδικευμένοι μικροοργανισμοί παράγουν μεθάνιο, είτε μέσω της χρήσης οξικών αλάτων είτε μέσω της αναγωγής του διοξειδίου του άνθρακα (Bose et al., 2025).

Οι χημικές αντιδράσεις, οι οποίες περιγράφουν καθένα από τα παραπάνω στάδια της αναερόβιας χώνευσης παρουσιάζονται παρακάτω:

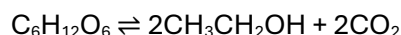
Υδρόλυση

Οι χημικοί δεσμοί των σύνθετων οργανικών ενώσεων διασπώνται παρουσία νερού για την απελευθέρωση των δομικών της στοιχείων. Οι πρωτεΐνες, τα λιπίδια και τα τριγλυκερίδια αποδομούνται στα αντίστοιχα αμινοξέα, λιπαρά οξέα και γλυκερόλη, οδηγώντας στον σχηματισμό διαλυτών μονομερών



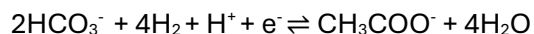
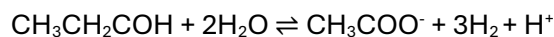
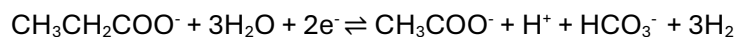
Οξεογένεση

Τα διαλυτά μόρια που προέκυψαν από το στάδιο της υδρόλυσης μεταβολίζονται προς παραγωγή οξικού οξέος (CH_3COOH), κρίσιμο συστατικό της διεργασίας, το οποίο λειτουργεί ως πρόδρομος των μεθανογόνων μικροοργανισμών



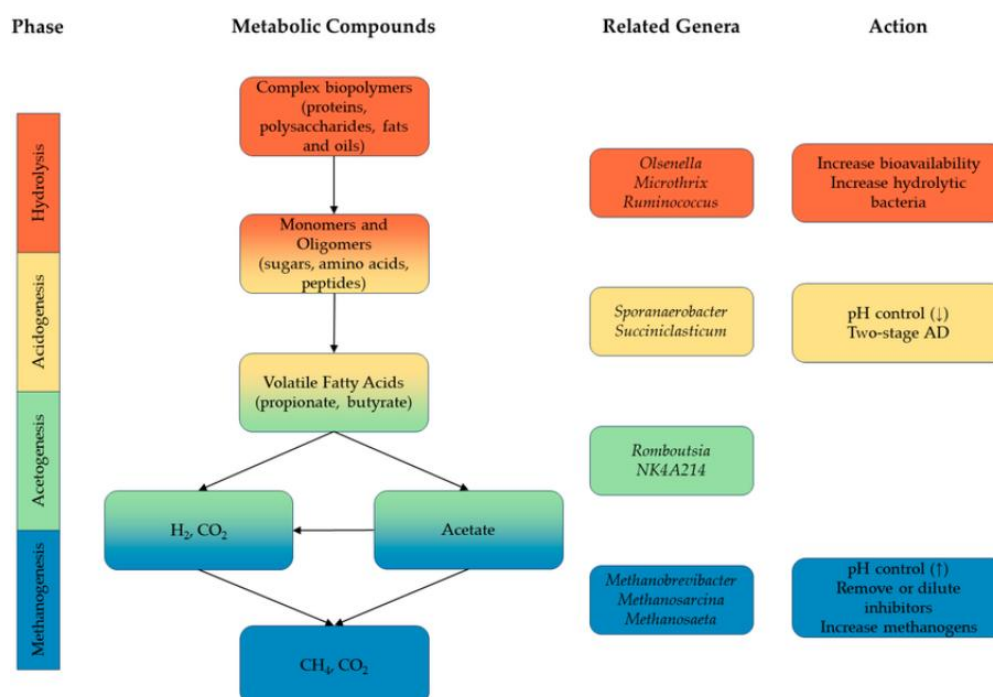
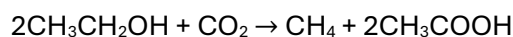
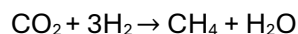
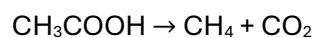
Ακετογένεση

Τα οργανικά οξέα (VFA's) και οι αλκοόλες του προηγούμενου σταδίου ανάγονται σε οξικές ρίζες μέσω βακτηρίων που δεσμεύουν υδρογόνο.



Μεθανογένεση

Στο τελικό αυτό στάδιο, οι μεθανογόνοι μικροοργανισμοί, οι οποίοι είναι αυστηρά αναερόβιοι οργανισμοί και εξαιρετικά ευαίσθητοι ακόμη και σε ελάχιστα επίπεδα οξυγόνου, μετατρέπουν το οξικό οξύ (CH_3COOH) και το υδρογόνο (H_2) σε διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και μεθάνιο (CH_4).



Εικόνα 2: Σχηματική απεικόνιση της μικροβιακής διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης, με διαχωρισμό των σταδίων, το σχηματισμό των μεταβολικών ενώσεων σε κάθε στάδιο, το μικροβιακό υπόστρωμα κάθε σταδίου και της πιθανές δράσεις για την αύξηση του ρυθμού αντίδρασης (Elliot et al., 2024)

Η ισορροπία μεταξύ αυτών των σταδίων είναι ζωτικής σημασίας, καθώς η συσσώρευση ενδιάμεσων προϊόντων μπορεί να οδηγήσει σε αποτυχία του συστήματος (Spyridonidis et al., 2020). Για τη διασφάλιση της σταθερότητας της μικροβιακής κοινότητας, η συγχώνευση διαφορετικών υλικών αποδεικνύεται ωφέλιμη, καθώς βοηθά στην αραίωση ουσιών που θα μπορούσαν να δράσουν ανασταλτικά, όπως η αμμωνία (Aravani et al., 2022). Η συνέργεια μεταξύ των διαφορετικών μικροβιακών πληθυσμών είναι αυτή που επιτρέπει την αύξηση της οργανικής φόρτωσης και τη μεγιστοποίηση της παραγωγής βιοαερίου χωρίς να κλονίζεται η λειτουργία της διεργασίας (Spyridonidis et al., 2020).

2.1.2. Παράγοντες που επηρεάζουν τη διεργασία

Η σταθερότητα και η αποδοτικότητα της πολύπλοκης διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης καθορίζονται από ένα σύνολο κρίσιμων παραμέτρων, όπως είναι το pH, η αμμωνία (NH_3), η θερμοκρασία, η αλκαλικότητα, ο ρυθμός οργανικής φόρτωσης (OLR), ο

υδραυλικός χρόνος παραμονής (HRT), ο λόγος C/N και η χημική σύσταση του μίγματος τροφοδοσίας, οι οποίες επηρεάζουν άμεσα τη μεταβολική δραστηριότητα των μικροοργανισμών (Spyridonidis et al., 2020). Λόγω της πολυπλοκότητας της διεργασίας, οι παράγοντες αυτοί πρέπει να παρακολουθούνται συνεχώς, καθώς η απόκλιση από τις βέλτιστες τιμές μπορεί να οδηγήσει σε αναστολή της μεθανογένεσης (Kainthola et al., 2019; Wang et al., 2023).

Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία αναγνωρίζεται ως ο πλέον καθοριστικός παράγοντας για τη λειτουργία της αναερόβιας χώνευσης, καθώς επηρεάζει άμεσα τη δομή και την ποικιλομορφία των μικροβιακών κοινοτήτων, την κινητική των αντιδράσεων και τις μετατροπές των υποστρωμάτων και των μεταβολιτών τους (Wang et al., 2023). Οι διαφορετικές ομάδες μεθανογόνων βακτηρίων παρουσιάζουν τη μέγιστη απόδοσή τους σε συγκεκριμένα θερμοικά όρια, τα οποία διακρίνονται στην ψυχρόφιλη περιοχή (< 20 °C), τη μεσόφιλη (20–45 °C) και τη θερμόφιλη (> 45 °C) (Yan et al., 2023; Wang et al., 2023). Ο ρυθμός παραγωγής βιοαερίου είναι ανάλογος της θερμοκρασίας, με τις υψηλότερες τιμές της να ευνοούν την αύξηση, ενώ η πτώση της σε τιμές κάτω των 10°C προκαλεί πρακτικά παύση της διεργασίας (Yan et al., 2023).

Παρά το γεγονός ότι υπάρχουν τρεις περιοχές, η μεσόφιλη και η θερμόφιλη χώνευση είναι αυτές που συγκεντρώνουν το κύριο ενδιαφέρον στις εφαρμογές παραγωγής βιοαερίου, καθώς η ψυχρόφιλη χώνευση παρουσιάζει πολύ χαμηλούς ρυθμούς αντίδρασης και περιορισμένη παραγωγή μεθανίου (Bose et al., 2025; Wang et al., 2023). Στην τρέχουσα περίοδο, η μεσόφιλη χώνευση είναι η πλέον διαδεδομένη λόγω της υψηλής σταθερότητας που προσφέρει και του χαμηλότερου λειτουργικού κόστους. Ωστόσο, η θερμόφιλη διεργασία επιλέγεται συχνά σε μεγάλες κεντρικές μονάδες, καθώς προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως ο ταχύτερος ρυθμός ανάπτυξης και δραστηριότητας των μικροοργανισμών, η αύξηση στην παραγωγή μεθανίου και η αποτελεσματικότερη εξόντωση των παθογόνων (Kothari et al., 2014). Ενδεικτικά, η χρήση θερμόφιλων συνθηκών μπορεί να ενισχύσει τον ειδικό ρυθμό ανάπτυξης των μικροοργανισμών έως και 60%, ενώ σε περιπτώσεις ξηρής αναερόβιας χώνευσης έχει παρατηρηθεί αύξηση της συνολικής απόδοσης μεθανίου κατά 21% σε σύγκριση με τις μεσόφιλες συνθήκες (Wang et al., 2023). Τα θερμόφιλα βακτήρια είναι πιο αποδοτικά σε σχέση με τα αντίστοιχα μεσόφιλα σε ό,τι αφορά το χρόνο παραμονής, τον ρυθμό τροφοδοσίας και την απόδοση σε βιοαέριο, ενώ παρουσιάζουν μεγαλύτερες αντοχές στις θερμοκρασιακές αυξομειώσεις και στις μεταβλητές που επηρεάζουν το περιβάλλον (Bond and Templeton, 2011).

Εν αντιθέσει με τα παραπάνω, η θερμόφιλη χώνευση παρουσιάζει σοβαρά τεχνικά και οικονομικά μειονεκτήματα, με κυριότερη τη μειωμένη σταθερότητα και αξιοπιστία του συστήματος, η οποία απαιτεί στενή παρακολούθηση και ακριβείς λειτουργικούς ελέγχους, καθώς και υψηλή ενεργειακή απαίτηση για θέρμανση (Paritosh et al., 2021, Matheri et al., 2018). Οι μικροοργανισμοί που συμμετέχουν στη διαδικασία είναι εξαιρετικά ευαίσθητοι σε θερμικές διακυμάνσεις, γεγονός που καθιστά απαραίτητη τη διατήρηση ενός απόλυτα σταθερού περιβάλλοντος (Bose et al., 2025). Η θερμόφιλη χώνευση είναι πιο ασταθής διεργασία λόγω του ταχύτατου ρυθμού υδρόλυσης, ο οποίος μπορεί να οδηγήσει σε επικίνδυνη συσσώρευση λιπαρών οξέων μακράς αλυσίδας (LCFA) και απότομη πτώση του pH (Labatut et al., 2014). Επιπλέον, η θερμόφιλη περιοχή αυξάνει την ευαισθησία του συστήματος στην τοξικότητα της αμμωνίας, καθώς η συγκέντρωση του ελεύθερου αμμωνιακού αζώτου αυξάνεται με την άνοδο της θερμοκρασίας (Rajagopal et al., 2013).

Συνεπώς, η επιλογή μεταξύ μεσόφιλης και θερμόφιλης λειτουργίας απαιτεί μια προσεκτική μεσοστάθμιση μεταξύ της αποδοτικότητας στην παραγωγή μεθανίου και του κόστους λειτουργίας και της κατανάλωσης ενέργειας (Wang et al., 2023).

pH

Η λειτουργία της αναερόβιας χώνευσης χαρακτηρίζεται από υψηλή ευαισθησία στις μεταβολές του pH, καθώς πρόκειται για μια σύνθετη βιοχημική διεργασία που καθοδηγείται από μια κοινότητα διαφορετικών μικροοργανισμών (Wang et al., 2023). Παρόλο που η παραγωγή μεθανίου μπορεί να ανιχνευθεί σε ένα ευρύ φάσμα μεταξύ 5,5 και 8,5, η βέλτιστη απόδοση για την παραγωγή βιοαερίου επιτυγχάνεται στην περιοχή 6,8 έως 7,2 (Wang et al., 2023; Bose et al., 2025; Ngabala & Emmanuel, 2024).

Μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στη διαχείριση του pH έγκειται στο γεγονός ότι τα διαφορετικά στάδια της χώνευσης απαιτούν διαφορετικές συνθήκες οξύτητας. Συγκεκριμένα, τα βακτήρια της υδρόλυσης και της οξεογένεσης είναι λιγότερο ευαίσθητα και αναπτύσσονται ιδανικά σε όξινο περιβάλλον, με το βέλτιστο pH να κυμαίνεται μεταξύ 5,5 και 6,5 (Carlini et al., 2021; Wang et al., 2023). Αντίθετα, οι μεθανογόνοι μικροοργανισμοί απαιτούν ένα σχεδόν ουδέτερο pH, γύρω στο 7,0, και παρουσιάζουν εξαιρετική ευαισθησία στις διακυμάνσεις (Ngabala & Emmanuel, 2024). Αυτή η διαφοροποίηση αποτελεί και τη βασική αιτία που πολλοί ερευνητές προκρίνουν τον διαχωρισμό της διεργασίας σε δύο στάδια σε χωριστούς αντιδραστήρες, όπου τα στάδια της υδρόλυσης/οξεογένεσης και αντίστοιχα της ακετογένεσης/μεθανογένεσης θα λάβουν χώρα (Ngabala & Emmanuel, 2024; Wang et al., 2023; Bose et al., 2025).

Έτσι, κατά τα αρχικά στάδια, το pH τείνει να μειώνεται λόγω της ταχείας κινητικής της υδρόλυσης και της συσσώρευσης οργανικών οξέων. Στη συνέχεια, καθώς η διεργασία προχωρά, η παραγωγή αμμωνίας από την αποικοδόμηση των πρωτεϊνών βοηθά στην άνοδο του pH σε πιο ουδέτερα επίπεδα, όπου τα μεθανογόνα βακτήρια αρχίζουν να μετατρέπουν τα οξέα σε μεθάνιο (Abbasi, 2012). Εάν το pH παραμείνει κάτω από 5,5-6,0 για μεγάλο χρονικό διάστημα, οι μεθανογόνοι μικροοργανισμοί καθίστανται ανενεργοί και η παραγωγή αερίου σταματά, οδηγώντας σε πλήρη αποτυχία του συστήματος (Jameel et al., 2024; Ngabala & Emmanuel, 2024).

Το pH παίζει σημαντικό ρόλο στο βαθμό του επηρεασμού του συστήματος από την τοξικότητα ορισμένων ενώσεων, όπως η αμμωνία, το υδρόθειο και τα λιπαρά οξέα, αφού η παρουσία τους στην ιοντική ή μη ιοντική μορφή τους (οι συγκεκριμένες ενώσεις είναι τοξικές στη μη ιοντική μορφή της) καθορίζεται από την τιμή του pH (Ward et al., 2008).

Ρυθμιστική Ικανότητα (Αλκαλικότητα)

Για την προστασία του αντιδραστήρα από απότομες πτώσεις του pH, είναι απαραίτητη η ενίσχυση της ρυθμιστικής ικανότητας (buffer capacity) (Wang et al., 2023; Jameel et al., 2024). Η ρυθμιστική ικανότητα, γνωστή στον τομέα της αναερόβιας χώνευσης ως αλκαλικότητα, αποτελεί έναν από τους πλέον αξιόπιστους δείκτες για την παρακολούθηση της ευστάθειας του αντιδραστήρα και την αξιολόγηση πιθανών ανισορροπιών στη διεργασία (Bose et al., 2025; Adnane et al., 2024). Η παράμετρος αυτή αναφέρεται στην ισορροπία που διαμορφώνεται μεταξύ του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και των διττανθρακικών ιόντων (HCO_3^-), η οποία και καθορίζει την ικανότητα του συστήματος να ανθίσταται σε απότομες μεταβολές του pH (Adnane et al., 2024; Wang et al., 2023). Αξίζει να τονιστεί ότι λόγω της συσσώρευσης λιπαρών οξέων ή αμμωνίας, η αλκαλικότητα μπορεί να μειωθεί δραματικά πολύ πριν γίνει αντιληπτή μια αισθητή πτώση

της τιμής του pH, γεγονός που καθιστά τη μέτρησή της σημαντικότερη από την απευθείας μέτρηση του pH (Bose et al., 2025; Adnane et al., 2024).

Για τη διασφάλιση της επιβίωσης των μεθανογόνων βακτηρίων, τα οποία χαρακτηρίζονται από υψηλή ευαισθησία, η αλκαλικότητα πρέπει να διατηρείται σε επίπεδα που επιτρέπουν στο pH να παραμένει γύρω στο 7,5 με 7,7 (Jameel et al., 2024). Η ρυθμιστική ικανότητα του αντιδραστήρα μπορεί να ενισχυθεί μέσω της προσθήκης κατάλληλων πρώτων υλών ή χημικών αντιδραστηρίων, αποτρέποντας έτσι την υπερβολική οξίνιση και διατηρώντας σταθερό το περιβάλλον της χώνευσης (Jameel et al., 2024; Wang et al., 2023). Οι διαθέσιμες λύσεις για την αύξηση της ρυθμιστικής ικανότητας και την αποφυγή απότομων πτώσεων του pH περιλαμβάνουν τη μείωση του ρυθμού οργανικής φόρτωσης (OLR), τη συγχώνευση με υποστρώματα υψηλής αλκαλικότητας, όπως η κτηνοτροφική κοπριά και η χρήση πρόσθετων χημικών ουσιών, όπως τα διττανθρακικά άλατα (π.χ. διττανθρακικό νάτριο), το υδροξείδιο του νατρίου ή του καλίου, και ο ασβέστης (Adnane et al., 2024; Wang et al., 2023, Bose et al., 2025). Επιπλέον, η άμεση παρέμβαση με τη χρήση χημικών ουσιών, αποτελεί αποτελεσματική μέθοδο για την άμεση αποκατάσταση της ισορροπίας. Ωστόσο, η χρήση αυτών των ουσιών απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή για την αποφυγή υπερδοσολογίας των χημικών προσθέτων στη διεργασία (Ward et al., 20).

Ρυθμός Οργανικής Φόρτωσης (Organic Loading Rate – OLR)

Ο Ρυθμός Οργανικής Φόρτωσης (OLR) αποτελεί μια από της σημαντικότερες λειτουργικές παραμέτρους για τον σχεδιασμό και την επιλογή του τύπου και του μεγέθους της αντιδραστήρα (Adnane et al., 2024). Ορίζεται ως η ποσότητα του οργανικού φορτίου που εισάγεται στο σύστημα ανά μονάδα ενεργού όγκου του αντιδραστήρα ανά ημέρα και συνήθως εκφράζεται σε $\text{kgVS}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$ ή $\text{kgCOD}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$ (Aslanzadeh et al., 2014). Το OLR υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\text{OLR} = \frac{Q \cdot \text{VS}}{V} \text{ (Kg VS m}^{-3} \text{ d}^{-1}\text{) όπου:}$$

Q = ημερήσια παροχή τροφοδοσίας του αντιδραστήρα

VS = συγκέντρωση της τροφοδοσίας σε % συγκέντρωση πτητικών στερεών

V = ο λειτουργικός όγκος του αντιδραστήρα

Η τιμή του OLR συνδέεται άμεσα με τις διαστάσεις του χωνευτή, καθώς η αύξηση του ρυθμού φόρτωσης επιτρέπει τη μείωση του απαιτούμενου όγκου του αντιδραστήρα, διατηρώντας παράλληλα την απόδοση σε μεθάνιο, γεγονός που ενισχύει την κερδοφορία των συστημάτων (Bose et al., 2025).

Στα συμβατικά συστήματα υγρής αναερόβιας χώνευσης ενός σταδίου που επεξεργάζονται μίγμα οργανικών αστικών αποβλήτων με υπολείμματα τροφίμων, οι ρυθμοί φόρτωσης κυμαίνονται τυπικά μεταξύ 2 – 4 $\text{kgVS}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$ (Bose et al., 2025). Αντίθετα, τα συστήματα ξηρής αναερόβιας χώνευσης μπορούν να λειτουργήσουν με σημαντικά υψηλότερο OLR λόγω της υψηλής περιεκτικότητας των υποστρωμάτων σε ολικά στερεά. Παρατηρείται έως και 4 – 6 φορές αυξημένο OLR στα συστήματα ξηρής αναερόβιας χώνευσης σε σύγκριση με τα αντίστοιχα υγρής χώνευσης επιτυγχάνοντας συγκρίσιμες αποδόσεις μεθανίου και μείωση των VS (Duan et al., 2023). Ωστόσο, πιθανή υπέρβαση των καθορισμένων ορίων φόρτωσης ενέχει σοβαρούς κινδύνους, καθώς μπορεί να προκαλέσει υπερφόρτωση του συστήματος, αδρανοποίηση της βιομάζας και συσσώρευση πτητικών λιπαρών οξέων (VFAs) και αιθανόλης (Bose et al., 2025; Adnane et al., 2024). Αυτό συμβαίνει διότι ο ρυθμός της υδρόλυσης και της οξεογένεσης ξεπερνά τον ρυθμό της μεθανογένεσης, οδηγώντας σε μη αναστρέψιμη οξίνιση και τελικά σε

αποτυχία του αντιδραστήρα (Adnane et al., 2024; Zamri et al., 2021). Τα συστήματα δύο σταδίων προσφέρουν τη δυνατότητα για περαιτέρω αύξηση του οργανικού φορτίου (μεταξύ 4 – 12 kgVS/m³·d) καθώς παρέχουν βέλτιστο περιβάλλον για τις διαφορετικές μικροβιακές κοινότητες, επιτρέποντας αύξηση του OLR έως και 300% σε σύγκριση με τα συστήματα ενός σταδίου (Bose et al., 2025).

Η επιλογή της κατάλληλης τιμής OLR είναι θεμελιώδους σημασίας για την αποδοτικότητα και τη σταθερότητα της διεργασίας (Wang et al., 2023). Ο υψηλός ρυθμός φόρτωσης προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, καθώς εμπλουτίζει το βακτηριακό μέσο εντός του βιοαντιδραστήρα, μειώνει τις απαιτήσεις ενέργειας και περιορίζει τις ανάγκες σε χωρητικότητα του χωνευτή, αποδίδοντας παράλληλα υψηλή παραγωγή βιοαερίου (Siddique and Wahid, 2018). Ωστόσο, η υπέρβαση της ικανότητας αποικοδόμησης του αντιδραστήρα οδηγεί σε μείωση της παραγωγής μεθανίου και σοβαρή διαταραχή της διεργασίας (Ganesh et al., 2013). Η υπερβολική φόρτωση μπορεί να δυσχεράνει τη μεταφορά θερμότητας, να δημιουργήσει ανομοιόμορφη κατανομή των υλικών κατά την ανάδευση και να προκαλέσει μηχανικές βλάβες στις αντλίες κυκλοφορίας (Gou et al., 2014, Liu et al., 2017).

Υδραυλικός Χρόνος Παραμονής (Hydraulic Retention Time – HRT)

Ο Υδραυλικός Χρόνος Παραμονής (HRT) αποτελεί μια κρίσιμη παράμετρο, η οποία προσδιορίζει τη μέση χρονική διάρκεια παραμονής του υποστρώματος εντός του βιοαντιδραστήρα (Adnane et al., 2024). Ουσιαστικά, αντιπροσωπεύει το χρόνο που απαιτείται ώστε οι μικροοργανισμοί να καταναλώσουν και να αποικοδομήσουν πλήρως την οργανική ύλη, επιτρέποντας παράλληλα τον πολλαπλασιασμό τους και τη μετατροπή του υποστρώματος σε βιοαέριο (Bose et al., 2025; Adnane et al., 2024). Μαθηματικά, ο HRT ορίζεται ως ο λόγος του όγκου του αντιδραστήρα (V) προς την ημερήσια παροχή τροφοδοσίας (Q) (Adnane et al., 2024; Bose et al., 2025).

$$HRT = \frac{V}{Q} \text{ (d)}$$

Ο βέλτιστος χρόνος παραμονής δεν είναι σταθερός, αλλά εξαρτάται από ένα σύνολο παραγόντων που επηρεάζουν τη διεργασία:

- α) Σύσταση Υποστρώματος: Υποστρώματα πλούσια σε υδατάνθρακες αποικοδομούνται εύκολα, επιτρέποντας μειωμένο HRT, ενώ υλικά πλούσια σε ίνες και κυτταρίνη απαιτούν σημαντικά μεγαλύτερο χρόνο για την αποτελεσματική διάσπασή της (Pan et al., 2021).
- Β) Θερμοκρασία Λειτουργίας: Η θερμοκρασία επηρεάζει άμεσα τον ρυθμό αποικοδόμησης. Στις μεσόφιλες συνθήκες, ο HRT κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 14 και 40 ημερών, ενώ στις θερμόφιλες συνθήκες το παράθυρο μειώνεται μεταξύ 14 και 20 ημερών (Bose et al., 2025; Adnane et al., 2024).
- Γ) Κλιματικές Συνθήκες: Σε ψυχρά κλίματα, ο HRT μπορεί να επεκταθεί έως και στις 100 ημέρες, σε αντίθεση με τις θερμές περιοχές όπου οι τιμές κυμαίνονται τυπικά από 30 έως 50 ημέρες (Kigozi et al., 2014).

Η επιλογή του κατάλληλου HRT απαιτεί μια προσεκτική ισορροπία. Ο παρατεταμένος HRT μπορεί να οδηγήσει σε θάνατο των μικροοργανισμών λόγω έλλειψης θρεπτικών συστατικών, ενώ απαιτεί μεγαλύτερο όγκο αντιδραστήρα και αυξημένα λειτουργικά έξοδα (Adnane et al., 2024). Από την άλλη πλευρά, σύντομος HRT είναι προτιμότερος για βιομηχανικές εφαρμογές καθώς μειώνει το κόστος επένδυσης, δεν ενέχει τον κίνδυνο της «έκπλυσης» (washout) των μικροοργανισμών, όπου ο ρυθμός απομάκρυνσής τους υπερβαίνει τον ρυθμό αναπαραγωγής τους (Adnane et al., 2024; Pirmoghani et al., 2025). Επιπλέον, ο πολύ σύντομος HRT μπορεί να προκαλέσει

συσσώρευση πτητικών λιπαρών οξέων (VFAs) και μείωση της παραγωγής βιοαερίου (Adnane et al., 2024).

Λόγος C/N

Ο λόγος άνθρακα της άζωτο (C/N) καθορίζει τη λεπτή ισορροπία των θρεπτικών συστατικών που απαιτούνται για την επιβίωση και τη δραστηριότητα των αναερόβιων βακτηρίων (Bose et al., 2025; Wang et al., 2023). Ο άνθρακας, προερχόμενος κυρίως από τους υδατάνθρακες, αποτελεί την πρωταρχική πηγή ενέργειας για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών, ενώ το άζωτο, που περιέχεται τις πρωτεΐνες και την αμμωνία, είναι απαραίτητο στοιχείο για τη σύνθεση των κυτταρικών τοιχωμάτων, των αμινοξέων και των νουκλεϊνικών οξέων (Bose et al., 2025; Jameel et al., 2024; Adnane et al., 2024). Επιπλέον, το άζωτο συμβάλλει στη διατήρηση ουδέτερου pH στον αντιδραστήρα, εξουδετερώνοντας της όξινες ιδιότητες των πτητικών οξέων (Beniche et al., 2024).

Η σημασία ενός ισορροπημένου λόγου C/N αναδεικνύεται από το γεγονός ότι τα βακτήρια καταναλώνουν τον άνθρακα περίπου 25 έως 35 φορές ταχύτερα από το άζωτο (Bose et al., 2025; Jameel et al., 2024; Adnane et al., 2024). Για τη διασφάλιση της μέγιστης λειτουργικής απόδοσης, η βιβλιογραφία συνιστά έναν λόγο C/N μεταξύ 20 και 30, με μία τιμή που κυμαίνεται από 25:1 έως 26:1 να θεωρείται ως το ιδανικό σημείο για τη μεγιστοποίηση της παραγωγής βιοαερίου (Bose et al., 2025; Wang et al., 2023; Adnane et al., 2024). Ωστόσο, ο βέλτιστος λόγος μπορεί να διαφοροποιηθεί σημαντικά από τις προαναφερόμενες τιμές ανάλογα με τη φύση των πρώτων υλών, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση της συγχώνευσης τροφικών υπολειμμάτων με κοπριά βοοειδών, όπου η τιμή ~16 έχει αναφερθεί ως ιδανική (Zhang et al., 2013).

Αποκλίσεις από της βέλτιστες τιμές του λόγου C/N μπορούν να προκαλέσουν σοβαρά προβλήματα στη διεργασία. Ένας πολύ υψηλός λόγος C/N μπορεί να προκαλέσει ταχεία εξάντληση του αζώτου από τα μεθανογόνα βακτήρια, με αποτέλεσμα ο εναπομείναντας άνθρακας να καθιστά το περιβάλλον όξινο. Αυτό οδηγεί σε χαμηλή διαλυτοποίηση των πρωτεϊνών με επακόλουθο μειωμένη ρυθμιστική ικανότητα του συστήματος και αποσταθεροποίηση του (Bose et al., 2025; Jameel et al., 2024; Adnane et al., 2024). Αντίθετα πολύ χαμηλές τιμές του λόγου C/N οδηγούν σε υπερβολική συσσώρευση αμμωνίας, η οποία αυξάνει το pH πάνω από το όριο του 8,5, δημιουργώντας ένα τοξικό περιβάλλον για τα μεθανογόνα βακτήρια και σταματώντας την παραγωγή αερίου λόγω έλλειψης άνθρακα (Bose et al., 2025; Jameel et al., 2024; Adnane et al., 2024).

Με βάση τα παραπάνω, η σωστή αναλογία των πρώτων υλών είναι πολύ αποτελεσματική για τη δραστηριότητα των αναερόβιων βακτηρίων και τον ρυθμό ζύμωσης και την επακόλουθη παραγωγή μεθανίου (Scarlat et al., 2024). Ο συνδυασμός υλικών με υψηλό λόγο C/N (π.χ. γεωργικά υπολείμματα) με υλικά χαμηλού λόγου (π.χ. κτηνοτροφικά απόβλητα) επιτρέπει τη βελτίωση της σταθερότητας της διεργασίας και την επίτευξη ενός σταθερού pH, εξασφαλίζοντας την ομαλή εξέλιξη της αναερόβιας χώνευσης (Wang et al., 2023; Adnane et al., 2024). Στην πράξη, η στρατηγική της συγχώνευσης υποστρωμάτων με διαφορετικούς λόγους C/N αποτελεί την ενδεδειγμένη λύση για τη διατήρηση της θρεπτικής ισορροπίας εντός του αντιδραστήρα (Wang et al., 2023; Bose et al., 2025).

Τύπος και Σύσταση Υποστρώματος

Τα χαρακτηριστικά και η βιοχημική σύσταση των υποστρωμάτων αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους που επηρεάζουν άμεσα την απόδοση του αντιδραστήρα, την ποσότητα και τη σύσταση του παραγόμενου βιοαερίου και είναι ένα βασικό κριτήριο για

την επιλογή του κατάλληλου μίγματος τροφοδοσίας του χωνευτή (Adnane et al., 2024). Η συγκέντρωση και η σύνθεση της οργανικής ύλης, είτε πρόκειται για γεωργικά υπολείμματα είτε για απόβλητα τροφίμων, διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην απόδοση μεθανίου (Bose et al., 2025). Η απόδοση σε μεθάνιο συνδέεται άμεσα με τα κύρια μακροθρεπτικά συστατικά του υποστρώματος (Adnane et al., 2024; Bose et al., 2025).

Υποστρώματα πλούσια σε πρωτεΐνες (π.χ. κτηνοτροφική κοπριά, απόβλητα σφαγείων) διαθέτουν υψηλό δυναμικό παραγωγής μεθανίου. Ωστόσο, η αποικοδόμησή τους οδηγεί συχνά σε συσσώρευση αμμωνίας, η οποία σε τιμές άνω των 4 g/l μπορεί να αναστείλει τη δράση των μεθανογόνων βακτηρίων και να οδηγήσει σε αποτυχία της διεργασίας (Adnane et al., 2024).

Τα λιπαρά υποστρώματα κατέχουν θεωρητικά το υψηλότερο δυναμικό παραγωγής μεθανίου σε σύγκριση με τις πρωτεΐνες και τους υδατάνθρακες. Παρόλα αυτά, η αποικοδόμησή τους παράγει λιπαρά οξέα μακράς αλυσίδας (LCFA), τα οποία σε υψηλές συγκεντρώσεις παρεμποδίζουν τον μεταβολισμό, προκαλούν έκπλυση της λάσπης και δημιουργία αφρού. Για τον λόγο αυτό, προτείνεται η συγκέντρωση των λιπιδίων να διατηρείται κάτω από το 40% για τη διασφάλιση της σταθερότητας του αντιδραστήρα (Adnane et al., 2024; Bose et al., 2025).

Η χρήση, μέσω της συγχώνευσης, υποστρωμάτων πλούσιων σε υδατάνθρακες (π.χ. λιγνοκυτταρινικά υπολείμματα, απόβλητα λαχανικών) αποτελεί μια από της πιο αποτελεσματικές τακτικές για την εξισορρόπηση των προβλημάτων που προκαλούν οι πρωτεΐνες και τα λίπη (Abomohra et al., 2022).

Τέλος, η παρουσία θρεπτικών στοιχείων στο υπόστρωμα είναι ζωτικής σημασίας. Τα θρεπτικά στοιχεία, όπως ο άνθρακας, το άζωτο και το υδρογόνο επηρεάζουν τη συνολική λειτουργία, ενώ μεταλλικά στοιχεία, όπως το νάτριο, το ασβέστιο και το κάλιο υποβοηθούν τη μικροβιακή δραστηριότητα, έχοντας σημαντικό αντίκτυπο στην απόδοση της αναερόβιας χώνευσης (Silva et al., 2018).

2.2. Πρώτες ύλες (υποστρώματα) αγροκτηνοτροφικών αποβλήτων

Τα αγροκτηνοτροφικά απόβλητα αποτελούν την κύρια πηγή πρώτων υλών για την αναερόβια χώνευση, καθώς διαθέτουν υψηλή συγκέντρωση θρεπτικών συστατικών, όπως ιχνοστοιχεία και βιταμίνες, που είναι απαραίτητα για τη μικροβιακή ανάπτυξη (Yorggey et al., 2014). Η επιλογή τους βασίζεται στο γεγονός ότι αποτελούν μια τεράστια δεξαμενή οργανικού άνθρακα και αζώτου με υψηλό ενεργειακό δυναμικό, ενώ η επεξεργασία τους κρίνεται επιβεβλημένη για τον περιορισμό περιβαλλοντικών κινδύνων, όπως η δυσοσμία και οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (Comparetti et al., 2024; Ngabala et al., 2024).

Η κατηγοριοποίηση αυτών των υλικών περιλαμβάνει την κτηνοτροφική κοπριά, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε υγρή ή στερεή μορφή και τα γεωργικά υπολείμματα, όπως το άχυρο σιτηρών, που διαθέτουν σημαντικό ενεργειακό δυναμικό (Ngabala et al., 2024). Ενώ τα κτηνοτροφικά απόβλητα εξασφαλίζουν τη μικροβιακή σταθερότητα, τα γεωργικά υπολείμματα προσφέρουν υψηλά επίπεδα οργανικού άνθρακα, αν και η σύνθετη δομή τους (λιγνίνη, κυτταρίνη) συχνά απαιτεί στοχευμένες παρεμβάσεις για την απελευθέρωση των σακχάρων (Pirmoghani et al., 2025; Ngabala et al., 2024). Η επιλογή του μίγματος επηρεάζεται από την εντοπιότητα και την εποχιακή διαθεσιμότητα των υλικών, παράγοντες που καθορίζουν την οικονομική βιωσιμότητα και την ενεργειακή αυτονομία των μονάδων (Comparetti et al., 2024; Ngabala et al., 2024).

2.2.1. Κτηνοτροφικά Απόβλητα

Τα κτηνοτροφικά απόβλητα αποτελούν τη μεγαλύτερη δεξαμενή οργανικών υλικών στον αγροτικό τομέα και διαδραματίζουν θεμελιώδη ρόλο στα συστήματα αναερόβιας χώνευσης λόγω της σταθερής τους σύνθεσης και της υψηλής ρυθμιστικής τους ικανότητας (Ngabala et al., 2024; Comparetti et al., 2024). Η κοπριά των ζώων είναι πλούσια σε απαραίτητα θρεπτικά συστατικά, βιταμίνες και ιχνοστοιχεία, τα οποία είναι ζωτικής σημασίας για την ανάπτυξη και τη μεταβολική δραστηριότητα των μικροοργανισμών (Ngabala et al., 2024). Επιπλέον, η αναερόβια επεξεργασία της κοπριάς αυξάνει τη διαθεσιμότητα σε άζωτο, μετατρέποντας το τελικό χωνεμένο υπόλειμμα (digestate) σε ένα εξαιρετικά αποτελεσματικό εδαφοβελτιωτικό που ενισχύει την κερδοφορία των γεωργικών εκμεταλλεύσεων (Ngabala et al., 2024; Pirmoghani et al., 2025).

Ωστόσο, η χώνευση αποκλειστικά κτηνοτροφικών αποβλήτων συχνά περιορίζεται από τη χαμηλή παραγωγή βιοαερίου ανά μονάδα όγκου, καθιστώντας απαραίτητη τη συγχώνευσή της με άλλα υλικά, όπως τα γεωργικά υπολείμματα, για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης (Sibiya et al., 2017). Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στη διαχείρισή της, καθώς η ακατάλληλη αποθήκευση ή έκθεση της κοπριάς στο περιβάλλον μπορεί να προκαλέσει έντονη δυσοσμία, διασπορά παθογόνων μικροοργανισμών και αυξημένες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (Dornelas et al., 2017). Σε περιοχές της Μεσογείου, η χρήση κτηνοτροφικών αποβλήτων είναι κρίσιμη για την επίτευξη ενεργειακής αυτονομίας σε τοπικό επίπεδο, ενώ ο συνδυασμός της με αγροτοβιομηχανικά υποπροϊόντα (π.χ. στέμφυλα ή υπολείμματα ελαιοτριβείων) βοηθά στην εξισορρόπηση των τοξικών ενώσεων και στη σταθεροποίηση των μικροβιακών κοινοτήτων (Greco et al., 2021).

2.2.2. Γεωργικά Υπολείμματα

Τα γεωργικά υπολείμματα, όπως το άχυρο των σιτηρών (σίκαλη, σιτάρι, ρύζι, αραβόσιτος), τα υπολείμματα καλαμποκιού και τα υπολείμματα από την επεξεργασία ζαχαρότευτλων, αποτελούν παραπροϊόντα με σημαντικό ενεργειακό δυναμικό για την παραγωγή βιοαερίου (Frankowski and Czekala, 2023). Η διαθεσιμότητά τους είναι άμεσα συνδεδεμένη με τις περιόδους συγκομιδής, καθιστώντας τα μια σταθερή πηγή οργανικού άνθρακα για τις μονάδες που βρίσκονται κοντά σε καλλιεργήσιμες εκτάσεις. Επιπλέον, στη μεσογειακή λεκάνη, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν υπολείμματα, όπως τα στέμφυλα, τα κλαδέματα από οπωρώνες και αμπελώνες, καθώς και αδιάθετα φρούτα και λαχανικά από της τοπικές αγορές, τα οποία ενισχύουν την τοπική ενεργειακή αυτονομία (Comparetti et al., 2024).

Παρά την υψηλή περιεκτικότητά τους σε ενέργεια, τα υπολείμματα αυτά παρουσιάζουν προκλήσεις λόγω της σύνθετης βιοχημικής τους δομής. Τα λιγνινοκυτταρινούχα υλικά, όπως το άχυρο και τα στελέχη καλαμποκιού είναι δύσκολο να αποικοδομηθούν λόγω της υψηλής συγκέντρωσης λιγνίνης, καθιστώντας απαραίτητη την προκατεργασία τους (Pirmoghani et al., 2025; Ngabala et al., 2024). Επιπλέον, ορισμένα τοπικά υποπροϊόντα, όπως τα στέμφυλα ελιάς ή οι φλούδες εσπεριδοειδών, μπορεί να περιέχουν ανασταλτικές ουσίες (π.χ. πολυφαινόλες), οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά τη μικροβιακή δραστηριότητα, αν δεν τύχουν σωστής διαχείρισης μέσω της συγχώνευσης με κτηνοτροφική κοπριά (Comparetti et al., 2024).

2.3. Τύποι αναερόβιων χωνευτών

Η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας χώνευσης καθορίζει την αποδοτικότητα, τη σταθερότητα και την οικονομική βιωσιμότητα μιας μονάδας βιοαερίου. Η διαμόρφωση του αντιδραστήρα πρέπει να είναι προσαρμοσμένη στα χαρακτηριστικά του

υποστρώματος και τις συνθήκες λειτουργίας, ώστε να μεγιστοποιείται η απόδοση μεθανίου ελαχιστοποιώντας παράλληλα τον κίνδυνο διαταραχών στη διεργασία (Pilarski et al., 2025).

2.3.1. Αντιδραστήρες Συνεχούς Ροής και Ασυνεχούς Λειτουργίας (Continuous & Batch Reactors)

Οι αναερόβιοι χωνευτές ταξινομούνται σε συνεχείας, ημισυνεχείας και ασυνεχούς ροής (batch) με βάση τη μέθοδο τροφοδοσίας τους. Στους αντιδραστήρες συνεχούς ροής, η οργανική πρώτη ύλη εισάγεται καθημερινά και ομοιόμορφα, ενώ ταυτόχρονα απομακρύνεται ισόποσο χωνεμένο υπόλειμμα (Jameel et al., 2024). Το σύστημα αυτό προσφέρει αδιάλειπτη λειτουργία, σταθερή παροχή βιοαερίου και διατήρηση ισορροπημένων μικροβιολογικών συνθηκών, αν και απαιτεί ακριβή συστήματα ελέγχου τροφοδοσίας (Weiland, 2010).

Οι συνεχείς αντιδραστήρες, όπως οι CSTR και οι αντιδραστήρες εμβολικής ροής (plug-flow), προτιμώνται συχνότερα επειδή απαιτούν μικρότερο όγκο, εξασφαλίζουν υψηλότερη λειτουργική σταθερότητα, επιτυγχάνουν υψηλό ρυθμό μικροβιακής ανάπτυξης και υψηλή αντίσταση στις περιβαλλοντικές διακυμάνσεις, εξασφαλίζουν αποτελεσματική μεταφορά μάζας μεταξύ βακτηρίων και βιομάζας και τελικώς παράγουν σταθερό ποσοστό βιοαερίου λόγω της σταθερής τροφοδοσίας (Adnane et al., 2024).

Στους αντιδραστήρες ασυνεχούς λειτουργίας (batch reactors), ο χωνευτής τροφοδοτείται με την πρώτη ύλη εφάπαξ και αδειάζει μόνο μετά την ολοκλήρωση της αποικοδόμησης (Pilarski et al., 2025; Adnane et al., 2025). Η μέθοδος αυτή είναι δομικά απλούστερη, με χαμηλότερο κόστος επένδυσης και μειωμένες ενεργειακές απαιτήσεις και απαιτήσεις συντήρησης, καθώς συχνά δεν απαιτείται ανάδευση ή άντληση. Ωστόσο, μπορεί να παρουσιάσει έντονες διακυμάνσεις στην παραγωγή βιοαερίου και απαιτεί μεγαλύτερη έκταση γης για την εγκατάσταση (Adnane et al., 2025).

Ενδιάμεση λύση αποτελούν τα ημισυνεχή συστήματα, όπου η τροφοδοσία γίνεται σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα. Όπως και στα συστήματα συνεχούς ροής, αφαιρείται από τον αντιδραστήρα ποσότητα υλικού ίση με την ποσότητα του υποστρώματος που τροφοδοτείται (Torres-Herrera et al., 2024).

2.3.2. Συστήματα Ενός και Πολλαπλών Σταδίων (Single & Multi-stage)

Σε βιομηχανική κλίμακα, οι διεργασίες αναερόβιας χώνευσης διακρίνονται σε ενός σταδίου ή πολλαπλών σταδίων, ανάλογα με τη βαρύτητα που θα δοθεί είτε στο σχεδιασμό μονάδων με προτεραιότητα στη λειτουργική απλότητα είτε σε αυτές που στοχεύουν σε ακριβή έλεγχο της διεργασίας (Pilarski et al., 2025).

Στα συστήματα ενός σταδίου, ολόκληρη η μικροβιολογική διαδικασία — από την υδρόλυση έως τη μεθανογένεση — πραγματοποιείται σε έναν μόνο αντιδραστήρα. Η διάταξη αυτή είναι ευκολότερη στην κατασκευή και λειτουργία, μειώνοντας τις απαιτήσεις σε αρχικό κεφάλαιο, ωστόσο είναι περιορισμένος ο έλεγχος των επιμέρους φάσεων της χώνευσης και συχνά οδηγεί σε μειωμένη παραγωγή μεθανίου (Devens et al., 2025).

Αντίθετα, τα συστήματα πολλαπλών σταδίων διαχωρίζουν τις φάσεις σε διαφορετικούς αντιδραστήρες που λειτουργούν σε σειρά υπό διακριτές συνθήκες. Συνήθως, ο πρώτος αντιδραστήρας χρησιμοποιείται για την υδρόλυση και την οξεογένεση και λειτουργεί σε όξινο pH (5,5–6,5) με σύντομο υδραυλικό χρόνο παραμονής (HRT), ενώ ο δεύτερος διατηρείται σε βέλτιστο pH (6,0–8,0) και με αυξημένο υδραυλικό χρόνο παραμονής (HRT) για τη διεργασία της μεθανογένεσης (Jo et al., 2018). Η μέθοδος

του διαχωρισμού επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο των παραμέτρων, αυξάνει τη σταθερότητα έναντι οργανικών υπερφορτώσεων, επιτυγχάνει αποτελεσματική καταστροφή των παθογόνων μικροοργανισμών και μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη βιοαποικοδόμηση και σε υψηλότερες αποδόσεις μεθανίου (Srisowmeaya et al., 2020, Pramanik et al., 2019). Παρά τα πλεονεκτήματα αυτά, το υψηλότερο κόστος εγκατάστασης και η πολυπλοκότητα των συστημάτων ελέγχου αποτελούν τους κύριους περιορισμούς για την ευρεία εφαρμογή της (Cremonez et al., 2021, Nabaterrega et al. 2021).

2.3.3. Υγρή και Ξηρή Αναερόβια Χώνευση (Wet vs Dry AD)

Η διάκριση μεταξύ υγρής και ξηρής χώνευσης βασίζεται στην περιεκτικότητα του υποστρώματος σε ολικά στερεά (TS). Οι υγροί χωνευτές (wet AD) είναι σχεδιασμένοι για επεξεργασία υλικών με υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία (TS < 15%), όπως η υγρή κοπριά, τα αστικά λύματα και η ενεργή ιλύς (Matheri et al., 2018, Andre et al., 2018). Οι ξηροί χωνευτές (dry/solid-state AD) χρησιμοποιούνται όταν τα ολικά στερεά υπερβαίνουν το 15% (συνήθως μεταξύ 20% και 40%), καθιστώντας τους ιδανικούς για γεωργικά υπολείμματα και υποπροϊόντα, άχυρα και ενσιρώματα (Adnane et al., 2024).

Η ξηρή χώνευση πλεονεκτεί λόγω του μικρότερου όγκου αντιδραστήρα που απαιτείται για το ίδιο φορτίο και των μειωμένων αναγκών σε ενέργεια για θέρμανση και ανάδευση. Επίσης, η διαχείριση του χωνεμένου υπολείμματος είναι ευκολότερος λόγω της χαμηλής περιεκτικότητας σε νερό (Yang et al., 2015). Ωστόσο, λόγω της ιδιαίτερα αυξημένης συγκέντρωσης ολικών στερεών και της περιορισμένης μεταφοράς μάζας, η τεχνολογία ξηρής χώνευσης αντιμετωπίζει και μεγάλες προκλήσεις, όπως η πιθανή συσσώρευση αναστολέων, η ανισορροπία σε θρεπτικά και η αστάθεια του συστήματος (Wang et al., 2023; Yang et al., 2015).

2.3.4. Τεχνολογία αναερόβιας συγχώνευσης (CoAD)

Η τεχνολογία της συγχώνευσης (co-digestion) αφορά την ταυτόχρονη επεξεργασία δύο ή περισσότερων τύπων οργανικών αποβλήτων στον ίδιο αντιδραστήρα, αποτελώντας μια από της σημαντικότερες στρατηγικές βελτιστοποίησης της αναερόβιας χώνευσης παγκοσμίως (Comparetti et al., 2025; Wang et al., 2023). Ενώ στο παρελθόν η κυρίαρχη πρακτική ήταν η μονο-χώνευση (mono-digestion) ενός μόνο υλικού, η σύγχρονη τάση στρέφεται στον συνδυασμό διαφορετικών υποστρωμάτων για την υπέρβαση των περιορισμών που παρουσιάζουν οι μεμονωμένες πρώτες ύλες (Mignogna et al., 2023). Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την επίτευξη μιας ισορροπημένης σύνθεσης θρεπτικών συστατικών και την ενίσχυση των συνεργιστικών μικροβιακών αλληλεπιδράσεων (Tallou et al., 2020).

Τα κύρια οφέλη της συγχώνευσης περιλαμβάνουν τη βελτίωση της ισορροπίας των θρεπτικών συστατικών, την αύξηση του ρυθμού οργανικής φόρτωσης (OLR) και την αραίωση δυνητικά τοξικών ενώσεων ή αναστολέων (Wang et al., 2023). Ιδιαίτερα σημαντική είναι η χρήση της κτηνοτροφικής κοπριάς ως βασικού υποστρώματος, καθώς παρέχει την απαραίτητη ρυθμιστική ικανότητα, κρίσιμα μικροθρεπτικά συστατικά και φυσικό μικροβιακό εμπλουτισμό (Comparetti et al., 2025). Ο συνδυασμός της κοπριάς με ενεργειακά πλούσια αγροβιομηχανικά υπολείμματα, όπως τα υγρά απόβλητα ελαιοτριβείων, οι φλούδες εσπεριδοειδών και τα στέμφυλα, οδηγεί σε σταθεροποίηση του pH με σημαντική αύξηση της παραγωγής μεθανίου (Comparetti et al., 2025; Ji et al., 2017).

Επιπλέον, η συγχώνευση βοηθά στην επίλυση του προβλήματος της ταχείας οξίνισης που παρατηρείται σε υποστρώματα, όπως τα απόβλητα φρούτων και λαχανικών. Μελέτες έχουν δείξει ότι η ανάμιξη των παραπάνω υποστρωμάτων με

υπολείμματα κρεάτων ή αστικά λύματα μπορεί να αυξήσει την απόδοση μεθανίου κατά 18% έως 47% σε σύγκριση με τη μεμονωμένη χώνευση των υλικών (Ji et al., 2017). Στα συστήματα ξηρής χώνευσης, η συγχώνευση θεωρείται κρίσιμη στρατηγική για την ενίσχυση της βιοαποικοδόμησης της οργανικής ύλης, επιτρέποντας τη λειτουργία κάτω από υψηλότερα φορτία (έως 18,5 g VS/L/d) σε σύγκριση με τη μονο-χώνευση (Dai et al., 2013).

Παρά τα πολυάριθμα πλεονεκτήματα, η τεχνολογία της συγχώνευσης παρουσιάζει προκλήσεις που σχετίζονται κυρίως με την αναλογία ανάμιξης των υλικών. Μια μη συμβατή αναλογία μπορεί να προκαλέσει οργανική υπερφόρτωση, συσσώρευση μη αποικοδομήσιμων στερεών, υψηλού φορτίου αζώτου ή συσσώρευση πτητικών λιπαρών οξέων (VFAs) και τελική αποτυχία του συστήματος (Mignogna et al., 2023; Wang et al., 2023).

Η βελτιστοποίηση της αναλογίας των υποστρωμάτων είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της ισορροπίας μεταξύ του μικροβιακού πληθυσμού και του επιπέδου θρεπτικών συστατικών. Για παράδειγμα, στην περίπτωση των υπολειμμάτων ντομάτας, έχει παρατηρηθεί ότι η υπέρβαση του 40% στο μίγμα τροφοδοσίας μπορεί να προκαλέσει αναστολή λόγω VFAs, ενώ μια αναλογία 50:50 μεταξύ αποβλήτων τροφίμων και κοπριάς χοίρων θεωρείται συχνά ιδανική για μεσόφιλες συνθήκες (Wang et al., 2023). Επιπλέον, η ανάδευση παίζει καθοριστικό ρόλο, καθώς η περιοδική ανάδευση έχει αποδειχθεί ότι βελτιώνει τη σταθερότητα της διεργασίας και την παραγωγή βιοαερίου περισσότερο από τη συνεχή ανάδευση, μειώνοντας παράλληλα τις ενεργειακές απαιτήσεις της μονάδας (Pirmoghani et al., 2025).

Επιπλέον, η τεχνολογία της συγχώνευσης προωθεί την ολοκληρωμένη διαχείριση των αποβλήτων σε περιφερειακό επίπεδο, μειώνοντας το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε σύγκριση με τη μέθοδο της μόνο-χώνευσης και συμβάλλει στην κυκλική οικονομία (Comparetti et al., 2025; Mignogna et al., 2023).

2.4. Παραγόμενα προϊόντα αναερόβιας χώνευσης

2.4.1. Βιοαέριο – σύσταση, απόδοση, παράγοντες απόδοσης

Το βιοαέριο αποτελεί το κύριο προϊόν της αναερόβιας χώνευσης και μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας με θετικό πρόσημο για το περιβάλλον και τη βιομηχανία. Πρόκειται για ένα μίγμα αερίων και είναι άχρωμο, με χαρακτηριστική οσμή (παρόμοια με χαλασμένα αυγά λόγω του υδρόθειου), άγευστο και καίγεται παρουσία χαρακτηριστικής μπλε φλόγας σε θερμοκρασία περίπου 800°C (Jameel et al., 2024).

Η σύσταση του βιοαερίου ποικίλλει ανάλογα με τον τύπο του υποστρώματος και τη θερμοκρασία χώνευσης. Η σχετική βιβλιογραφία παρουσιάζει ανομοιομορφία στη σύσταση του βιοαερίου, η οποία αποτυπώνεται στον πίνακα 1. Το κύριο και πολυτιμότερο συστατικό του είναι το μεθάνιο (CH₄), το οποίο κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 50% και 75% κατ' όγκο (Jameel et al., 2024; Aravani et al., 2022). Το υπόλοιπο μίγμα αποτελείται κυρίως από διοξείδιο του άνθρακα (CO₂, 25–45%), υδρατμούς (H₂O, 2–8%) και ίχνη άλλων αερίων, όπως υδρόθειο (H₂S), άζωτο (N₂), υδρογόνο (H₂), αμμωνία (NH₃) και μονοξείδιο του άνθρακα (CO) (Aravani et al., 2022; Jameel et al., 2024).

Πίνακας 1: Σύσταση του βιοαερίου σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Mignogna et al., 2023; Ngbala et al., 2024; Pirmoghani et al., 2025; Jameel et al., 2024; Bose et al., 2025)

Συστατικό	Χημικός Τύπος	Mignogna et al., 2023	Ngbala et al., 2024	Pirmoghani et al., 2025	Jameel et al., 2024	Bose et al., 2025	Μέσος Όρος (%)
Μεθάνιο	CH ₄	40-80	40-80	45-65	55-70	45-70	55,46
Διοξείδιο του Άνθρακα	CO ₂	30-50	15-60	30-40	35-40	25-55	33,92
Άζωτο	N ₂	0-1	0,5-2,5	0-5	0-3	0,01-5	1,51
Υγρασία / Υδατμοί	H ₂ O	0-1		0-10		0-10	4,81
Οξυγόνο	O ₂	0-1	0,1-1	0-2	0-1	0,01-2	0,64
Υδρογόνο	H ₂	-	1-3		0-1	0-1	2,75
Υδρόθειο	H ₂ S		0,1-0,5	0,2-3	0-1	0,1-0,3	0,62
Αμμωνία	NH ₃		0,1-0,5	0-1		0,01-2,5	0,24
Μονοξείδιο του Άνθρακα	CO		0-0,1				0,05
Ίχνη Μετάλλων							<0,01

Η ενεργειακή αξία του βιοαερίου εξαρτάται άμεσα από την περιεκτικότητά του σε μεθάνιο. Η καύση ενός κυβικού μέτρου (m³) βιοαερίου παράγει περίπου 5.500 έως 6.500 kcal θερμότητας, ποσότητα ικανή να λειτουργήσει μια μηχανή εσωτερικής καύσης ισχύος της ίππου για δύο ώρες (Jameel et al., 2024). Οι τιμές παραγωγής μεθανίου κυμαίνονται συνήθως από 250 έως 380 κυβικά μέτρα CH₄ ανά τόνο πτητικών στερεών (VS). Τα αγροτοβιομηχανικά υποπροϊόντα, όπως τα στέμφυλα, τα υγρά απόβλητα ελαιοτριβείων και οι φλούδες εσπεριδοειδών, θεωρούνται εξαιρετικά υποστρώματα, αποδίδοντας μέχρι και 450 m³ μεθανίου ανά τόνο πτητικών στερεών (VS) (Comparetti et al., 2025).

Προκειμένου το βιοαέριο να διοχετευθεί στο δίκτυο φυσικού αερίου ή να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο κίνησης, πρέπει να αναβαθμιστεί σε βιομεθάνιο. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει την απομάκρυνση του CO₂ και των άλλων προσμίξεων μέσω διαφόρων τεχνολογιών καθώς η παρουσία CO₂ μειώνει τη θερμογόνο δύναμη του αερίου, ενώ το θείο πρέπει να ελαχιστοποιείται για την αποφυγή φθορών στις μηχανές εσωτερικής καύσης (Aravani et al., 2022; S. O' Connor et al., 2021).

2.4.2. Χωνεμένο Υπόλειμμα (Digestate) – χρήση και περιβαλλοντικές παράμετροι

Το χωνεμένο υπόλειμμα αποτελεί το εναπομείναν υλικό της αναερόβιας χώνευσης μετά την παραγωγή του βιοαερίου και ορίζεται ως ένα σταθεροποιημένο οργανικό μίγμα που προκύπτει από την αποικοδόμηση υποστρωμάτων, όπως η κτηνοτροφική κοπριά, η φυτική βιομάζα και τα οργανικά απόβλητα (Dahlin et al., 2017). Παρόλο που παρουσιάζει υψηλότερη περιεκτικότητα σε υγρασία σε σύγκριση με την αρχική βιομάζα —λόγω της βιολογικής αποικοδόμησης μέρους της ξηρής ουσίας— είναι εξαιρετικά πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά, τα οποία είναι άμεσα απορροφήσιμα από τα φυτά (Mignogna et al., 2023; Pilarski et al., 2025).

Η φυσικοχημική του σύσταση εξαρτάται άμεσα από το είδος των υποστρωμάτων και τις παραμέτρους της διεργασίας, αποτελούμενο από μια στερεή φάση σε αιώρηση και μια υγρή φάση που περιέχει διαλυτά θρεπτικά συστατικά (Kaur et al., 2020). Τα κύρια συστατικά του περιλαμβάνουν μακροστοιχεία, όπως το άζωτο, ο φώσφορος και το κάλιο, καθώς και απαραίτητα μικροστοιχεία (Cu, Zn), οργανική ουσία, αμινοξέα και βιταμίνες που ενισχύουν τη γονιμότητα του εδάφους (Mignogna et al., 2023).

Η κύρια χρήση του χωνεμένου υπολείμματος εντοπίζεται στον γεωργικό τομέα, όπου αξιοποιείται ως βιολίπασμα και εδαφοβελτιωτικό, προσφέροντας μια βιώσιμη

εναλλακτική λύση αντί της χρήσης ορυκτών λιπασμάτων. Μπορεί να εφαρμοστεί στο έδαφος είτε ως ενιαίο υλικό είτε μετά από διαχωρισμό, όπου το στερεό κλάσμα χρησιμοποιείται για τη βελτίωση της δομής του εδάφους και το υγρό για την άμεση παροχή διαλυτού αζώτου (Mignogna et al., 2023). Η χρήση αυτή εξασφαλίζει τη διατήρηση των θρεπτικών συστατικών εντός των αγροτικών συστημάτων, μειώνοντας την εξάρτηση από συνθετικές εισροές και ενισχύει τη συνολική παραγωγικότητα των καλλιεργειών (Pilarski et al., 2025).

Στα πλεονεκτήματα του υπολείμματος συγκαταλέγεται η υψηλή λιπαντική του αξία, η οποία υπερέχει της απλής κοπριάς λόγω της μεγαλύτερης ομοιογένειας, της καλύτερης αναλογίας C/N και της αυξημένης διαθεσιμότητας θρεπτικών στοιχείων (Mignogna et al., 2023). Επιπλέον, η εφαρμογή του βελτιώνει τη δομή του εδάφους και την ικανότητα συγκράτησης νερού, ιδιαίτερα σε υποβαθμισμένα εδάφη, ενώ παράλληλα μειώνει σημαντικά τίνω δυσάρεστες οσμές που συνοδεύουν τα ανεπεξέργαστα απόβλητα (Mignogna et al., 2023; Comparetti et al., 2025). Ωστόσο, υπάρχουν και ορισμένα μειονεκτήματα που απαιτούν προσοχή, όπως ο κίνδυνος περιβαλλοντικής ρύπανσης από την απορροή θρεπτικών συστατικών και την εξάτμιση αμμωνίας σε περίπτωση ανεξέλεγκτης χρήσης (Wang et al., 2019). Παράλληλα, η πιθανή παρουσία βαρέων μετάλλων, παθογόνων μικροοργανισμών, αντιβιοτικών ή μικροπλαστικών καθιστά απαραίτητο τον έλεγχο ή ακόμα και την περαιτέρω επεξεργασία του υλικού πριν από την ασφαλή εφαρμογή του στο περιβάλλον (Mignogna et al., 2023; Pilarski et al., 2025).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Η ανάπτυξη και η λειτουργία των μονάδων βιοαερίου καθορίζεται από ένα σύνθετο νομοθετικό πλαίσιο που στοχεύει στην προώθηση της κυκλικής οικονομίας και τη διασφάλιση της περιβαλλοντικής προστασίας. Οι στρατηγικές αυτές ευθυγραμμίζονται με τους στόχους της Ευρωπαϊκής Οδηγίας για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και το Σχέδιο Δράσης για την Κυκλική Οικονομία, τα οποία ενθαρρύνουν τη βιώσιμη διαχείριση των βιολογικών πόρων και την ανάπτυξη τοπικών ενεργειακών συστημάτων (Comparetti et al., 2025).

Από τεchnοοικονομική σκοπιά, η βιωσιμότητα μιας επένδυσης εξαρτάται από την κλίμακα της εκμετάλλευσης, τα χαρακτηριστικά των διαθέσιμων υποστρωμάτων και το κόστος των απαιτούμενων τεχνολογιών (Pilarski et al., 2025). Για τις μικρομεσαίες αγροτικές μονάδες, η επιλογή συστημάτων χαμηλής πολυπλοκότητας, όπως η μεσόφιλη χώνευση ενός σταδίου, αποτελεί συχνά τον βέλτιστο οικονομικό συμβιβασμό, ενώ μεγαλύτερες επενδύσεις απαιτούν συστήματα πολλαπλών σταδίων για την πλήρη ενεργειακή αξιοποίηση της βιομάζας (Pilarski et al., 2025). Επιπλέον, η οικονομική απόδοση επηρεάζεται σημαντικά από τη δυνατότητα υποκατάστασης των συνθετικών λιπασμάτων με το χωνεμένο υπόλειμμα, μειώνοντας τις εξωτερικές εισροές και ενισχύοντας την κερδοφορία της αγροτικής δραστηριότητας (Mignogna et al., 2023; Pilarski et al., 2025).

3.1. Ελληνική και ευρωπαϊκή νομοθεσία για τη διαχείριση αποβλήτων

Η ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αποτελεί πρωταρχικό στόχο της ευρωπαϊκής ενεργειακής πολιτικής από τη δεκαετία του 1990, με ορόσημο την υιοθέτηση της «Λευκής Βίβλου για μια Κοινοτική Στρατηγική και ένα Σχέδιο Δράσης» το 1997 (Piekut et al., 2021). Το νομοθετικό πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ε.Ε.) διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση του κλάδου, εστιάζοντας στην απανθρακοποίηση της ενέργειας και τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (Mignogna et al., 2023). Κεντρικό εργαλείο αποτελεί η Οδηγία (ΕΕ) 2018/2001 (RED II) για την προώθηση της χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, η οποία ενισχύθηκε περαιτέρω με την Οδηγία (ΕΕ) 2023/2413. Η τελευταία εισάγει επιταχυνόμενες διαδικασίες αδειοδότησης και ένα αναβαθμισμένο σύστημα Εγγυήσεων Προέλευσης, διευκολύνοντας την ανάπτυξη παραγωγής βιομεθανίου (Pilarski et al., 2025).

Παράλληλα με το ενεργειακό σκέλος, η παραγωγή βιοαερίου διέπεται από αυστηρούς υγειονομικούς κανόνες, καθώς αξιοποιεί ζωικά υποπροϊόντα. Ο Κανονισμός (ΕΚ) 1069/2009 αποτελεί το βασικό νομοθέτημα που καθορίζει τους υγειονομικούς όρους για τα ζωικά υποπροϊόντα, που δεν προορίζονται για ανθρώπινη κατανάλωση, επιτρέποντας τη χρήση ορισμένων κατηγοριών για την παραγωγή βιοαερίου και λιπασματοποίηση (Παγώνα, 2019). Ο κανονισμός της, που αντικατέστησε τον 1774/2002, στοχεύει στην ελαχιστοποίηση των κινδύνων για τη δημόσια υγεία και την ασφάλεια της τροφικής αλυσίδας μέσω της αυστηρής ιχνηλασιμότητας σε κάθε στάδιο επεξεργασίας (Παγώνα, 2019; Λαμπροπούλου, 2018).

Σε εθνικό επίπεδο, η Ελλάδα εναρμονίζεται με την κοινοτική νομοθεσία μέσω Νόμων, Προεδρικών Διαταγμάτων και Κοινών Υπουργικών Αποφάσεων (ΚΥΑ). Σημαντική ώθηση στον κλάδο έδωσε ο νόμος 3851/2010, ο οποίος προωθεί την παραγωγή βιοαερίου ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και καθορίζει το πλαίσιο πώλησης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο. Επιπλέον, η διαχείριση των αποβλήτων που χρησιμοποιούνται ως πρώτες ύλες διέπεται από την Οδηγία 2008/98/ΕΚ (όπως τροποποιήθηκε από την 2015/1127), η οποία θέτει το γενικό πλαίσιο ανακύκλωσης και ανάκτησης πόρων. Ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στην προστασία των υδάτων από τη

νιτρορύπανση γεωργικής προέλευσης μέσω της Οδηγίας 91/676/ΕΟΚ (ΚΥΑ 16190/1335/1997), η οποία επιβάλλει συγκεκριμένους κανόνες για τη διαχείριση της κοπριάς και τη λίπανση, ειδικά στις ευπρόσβλητες ζώνες της χώρας (Λαμπροπούλου, 2018).

Συγκριτικά με άλλα μεσογειακά κράτη, η Ελλάδα βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης του τομέα του βιομεθανίου. Ενώ ο Εθνικός Κλιματικός Νόμος 4936/2022 και προγράμματα της το REPowerEU αναγνωρίζουν τις δυνατότητές του, η χώρα εξακολουθεί να στερείται ενός ολοκληρωμένου ρυθμιστικού πλαισίου για την έγχυση βιομεθανίου στο δίκτυο φυσικού αερίου, με τις τρέχουσες δραστηριότητες να περιορίζονται στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Pires and Martinho, 2019).

3.2. Τεχνοοικονομική βιωσιμότητα μονάδων αναερόβιας χώνευσης

Η οικονομική βιωσιμότητα μιας μονάδας βιοαερίου βασίζεται στην ισορροπία μεταξύ της ελαχιστοποίησης του λειτουργικού κόστους και της μεγιστοποίησης των εσόδων από την πώληση ενέργειας και υλικών, διατηρώντας παράλληλα τη σταθερότητα της διεργασίας (Spyridonidis et al., 2020). Παρά το γεγονός ότι οι μονάδες παραγωγής βιοαερίου αποτελούν μια από τις πλέον δαπανηρές σε αρχικό κεφάλαιο τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, λόγω του υψηλού κόστους κατασκευής και των σημαντικών συνεχιζόμενων λειτουργικών δαπανών, τα συστήματα αναερόβιας χώνευσης προσφέρουν πλεονεκτήματα που μπορούν να συμβάλλουν στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και παράλληλα να επιφέρουν αύξηση εσόδων κατά τουλάχιστον 80% (Pilarski et al., 2025; Aravani et al., 2022).

Οι αρχικές επενδυτικές δαπάνες (CAPEX) περιλαμβάνουν την αγορά και εγκατάσταση εξοπλισμού, την κατασκευή υποδομών, την απόκτηση γης και την έκδοση αδειοδοτήσεων. Στην περίπτωση αναβάθμισης υφιστάμενης μονάδας, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και επιπλέον δαπάνες. Ενδεικτικά, για μια μονάδα ισχύος 500 kW, το επενδυτικό κόστος μπορεί να ανέλθει στα 2,5 εκατομμύρια ευρώ, με την περίοδο αποπληρωμής να εκτιμάται στα 6 έως 10 έτη, ανάλογα με τη διαθεσιμότητα φθηνών υποστρωμάτων και την κρατική χρηματοδότηση (Spyridonidis et al., 2020; Pilarski et al., 2025).

Τα λειτουργικά έξοδα (OPEX) καλύπτουν την καθημερινή λειτουργία, όπως τη μισθοδοσία προσωπικού, την προμήθεια και τη μεταφορά πρώτων υλών, την προληπτική συντήρηση εξοπλισμού, την επεξεργασία του χωνεμένου υπολείμματος και τις δαπάνες συμμόρφωσης με νομικά και τεχνικά πρότυπα. Σημαντικό μέρος της παραγόμενης ενέργειας καταναλώνεται εσωτερικά για τη λειτουργία των συστημάτων της μονάδας, όπως οι αντλίες, οι αναδευτήρες και η θέρμανση των αντιδραστήρων, με τη μέση εσωτερική κατανάλωση της παραγόμενης ενέργειας να υπολογίζεται περίπου σε 12-15% (Spyridonidis et al., 2020; Pilarski et al., 2025).

Η λειτουργία των μονάδων αναερόβιας χώνευσης προσφέρει ένα ευρύ φάσμα οικονομικών πλεονεκτημάτων που εκτείνεται πολύ παραπάνω από την απλή παραγωγή ενέργειας, επηρεάζοντας θετικά τόσο την τοπική αγροτική οικονομία όσο και την εθνική οικονομία. Το κύριο έσοδο προκύπτει από την πώληση της παραγόμενης ενέργειας (ηλεκτρικής ή θερμικής) σε δίκτυα τηλεθέρμανσης ή γεωργικές εγκαταστάσεις. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το βιοαέριο θεωρείται πολύ πιο οικονομική και αποδοτική σε σύγκριση με την απευθείας καύση του αερίου (Rajendran et al., 2012).

Στον γεωργικό τομέα, η χρήση του παραγόμενου οργανικού λιπάσματος οδηγεί σε βελτιστοποίηση του εδάφους και αύξηση της παραγωγικότητας. Οι μακροπρόθεσμες επιδράσεις στη δομή και τη γονιμότητα του εδάφους μειώνουν την ανάγκη για χημικά

λιπάσματα και φυτοφάρμακα, συμβάλλοντας παράλληλα στην αποτροπή της εκροής συναλλάγματος για την εισαγωγή αυτών των προϊόντων (Jameel et al., 2024).

Η ελαχιστοποίηση του κόστους των πρώτων υλών αποτελεί προϋπόθεση για την κερδοφορία. Το κόστος προμήθειας επηρεάζεται άμεσα από την απόσταση μεταφοράς και για τον λόγο αυτό, η χωροθέτηση της μονάδας κοντά της πηγής υποστρωμάτων (π.χ. κτηνοτροφικές μονάδες) είναι κρίσιμη (Spyridonidis et al., 2020; Pilarski et al., 2025).

Πέρα από τα άμεσα οικονομικά μεγέθη, οι μονάδες αναερόβιας χώνευσης προσφέρουν σημαντικά κοινωνικά οφέλη, όπως η δημιουργία θέσεων εργασίας και η αγροτική ανάπτυξη (Pilarski et al., 2025). Η λειτουργία μιας μονάδας επιτρέπει στους τοπικούς κτηνοτρόφους να διαθέτουν τα απόβλητά τους με ασφαλή και νόμιμο τρόπο, αποφεύγοντας πρόστιμα για περιβαλλοντικές παραβάσεις και επιτρέποντάς τους να επεκτείνουν το ζωικό τους κεφάλαιο (Spyridonidis et al., 2020).

Η οικονομική απόδοση και η μεγιστοποίηση του κέρδους μιας μονάδας βιοαερίου εξαρτώνται άμεσα από τη διαθεσιμότητα και το κόστος των πρώτων υλών, καθώς ο πλέον αποδοτικός σχεδιασμός προϋποθέτει τη χωροθέτηση της εγκατάστασης κοντά στις πηγές των υποστρωμάτων (Pilarski et al., 2025). Η χρήση αστικών οργανικών αποβλήτων ή υπολειμμάτων από τον γεωργικό τομέα μπορεί να μειώσει περαιτέρω το κόστος εισροών, ενισχύοντας την κερδοφορία. Παράλληλα, η κερδοφορία συνδέεται άρρηκτα με την αποδοτικότητα λειτουργίας και το ποσοστό της παραγόμενης ενέργειας που αξιοποιείται, με κύριο στόχο την ενεργειακή αυτονομία της μονάδας (Pilarski et al., 2025). Τέλος, στην ευρύτερη αξιολόγηση της αξίας της μονάδας προσμετρώνται τα περιβαλλοντικά και κοινωνικά οφέλη, όπως η μείωση των εκπομπών του θερμοκηπίου, η βελτίωση των συστημάτων διαχείρισης αποβλήτων και η συμβολή στην τοπική απασχόληση και την αγροτική ανάπτυξη (Pilarski et al., 2025). Παρά τα εμπόδια του υψηλού αρχικού κόστους και της έλλειψης ενημέρωσης, η αναερόβια χώνευση παραμένει μια ενδιαφέρουσα επιχειρηματική κίνηση που προωθεί την κυκλική οικονομία και τη βιώσιμη ανάπτυξη (Spyridonidis et al., 2020).

Στον πίνακα 2 παρουσιάζεται η πρωτογενής παραγωγή βιοαερίου σε επιλεγμένα κράτη μέλη της Ε.Ε. για το 2022, σε ktOE (kilotonne of oil equivalent). Είναι εμφανές από τα δεδομένα του πίνακα ότι η Ελλάδα βρίσκεται ακόμα σε νηπιακό στάδιο στον συγκεκριμένο παραγωγικό τομέα.

Πίνακας 2: Πρωτογενής παραγωγή βιοαερίου σε επιλεγμένα κράτη μέλη της Ε.Ε. για το 2022, σε ktOE (kilotonne of oil equivalent)

Χώρα	Βιοαέριο από Χ.Υ.Τ.Α. (ktOE)	Βιοαέριο από χώνευση ιλύος Αστικών Αποβλήτων (ktOE)	Βιοαέριο από Αναερόβια Χώνευση (ktOE)	Σύνολο (ktOE)
Γερμανία	323	454	7332	8109
Ιταλία	222	38	1773	2033
Γαλλία	117	59	1374	1550
Δανία	1	21	667	689
Ολλανδία	16	57	342	415
Τσεχία	17	43	532	592
Βέλγιο	14	25	240	279
Πολωνία	45	68	206	319
Ισπανία	144	86	135	365
Σουηδία	7	44	120	285
Ελλάδα	42	9	60	110

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑΣ ΧΩΝΕΥΣΗΣ

4.1. Μονάδα Α – Μονάδα Αναερόβιας Χώνευσης & Παραγωγής Βιοαερίου «ΜΑΚΙΟΣ Α.Ε.»

4.1.1. Γενικά

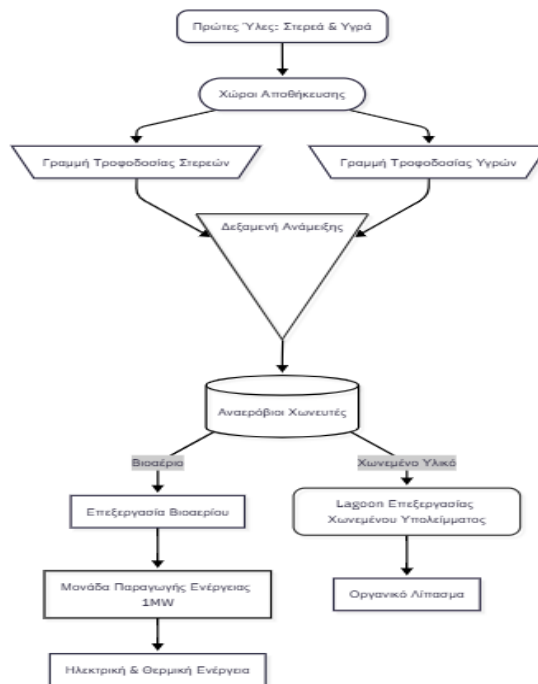
Η Makios Logistics έχει εγκαταστήσει και λειτουργεί από τον Σεπτέμβριο του 2021 ένα νέο ανεξάρτητο σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ισχύος 999 KW μέσω καύσης βιοαερίου στο 26^ο χλμ Θεσσαλονίκης-Χαλκηδόνas. Η παραγωγή του βιοαερίου στηρίζεται στην τεχνολογία της αναερόβιας ενζυματικής επεξεργασίας ζωικών αποβλήτων, υπολειμμάτων βιομηχανίας τροφίμων και ενσιρωμάτων φυτών. Η διαδικασία που ακολουθείται κατά την αναερόβια χώνευση – ζύμωση των α' υλών για την παραγωγή του βιοαερίου πραγματοποιείται σε τέσσερα (4) στάδια, την υδρόλυση, τη ζύμωση – οξεογένεση, την ακετογένεση και τη μεθανογένεση. Το παραγόμενο βιοαέριο αξιοποιείται ως καύσιμο σε μηχανή εσωτερικής καύσης συζευγμένης με ηλεκτρογεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 3: Αεροφωτογραφία μονάδας αναερόβιας χώνευσης της ΜΑΚΙΟΣ Α.Ε. κατά την περίοδο ολοκλήρωσης της κατασκευής.

Η μονάδα παραγωγής βιοαερίου λειτουργεί αδιάκοπα για 24 ώρες καθημερινά και παράγει 1MW/ώρα. Η παραγωγική διαδικασία της μονάδας μπορεί να διαχωριστεί σε έξι (6) βασικές επιμέρους φάσεις:

- Παραλαβή και αποθήκευση πρώτων υλών
- Αναερόβια χώνευση πρώτων υλών – Παραγωγή βιοαερίου
- Συλλογή και επεξεργασία του παραγόμενου βιοαερίου
- Παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας
- Αποθήκευση του χωνεμένου υπολείμματος
- Διάθεση του υπολείμματος ως εδαφοβελτιωτικό σε καλλιέργειες της περιοχής



Εικόνα 4: Συνοπτικό Διάγραμμα Ροής Μονάδας Αναερόβιας Χώνευσης MAKIOS A.E.

4.1.2. Αναερόβια χώνευση – Παραγωγή βιοαερίου

Η διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης λαμβάνει χώρα σε 2 δεξαμενές χωρητικότητας 6.500tn και 3.000tn αντίστοιχα και ακολουθεί τη μεσόφιλη ενζυματική χώνευση (40° – 42 °C) για την πρώτη δεξαμενή χώνευσης (main digester) και τη θερμόφιλη ενζυματική χώνευση (55 – 57 °C) στη δεύτερη δεξαμενή χώνευσης (post digester). Στη δεύτερη δεξαμενή χώνευσης επιτυγχάνεται η παστερίωση που απαιτείται στην παραγωγική διαδικασία της μονάδας.

Οι βιοαντιδραστήρες (δεξαμενές χώνευσης) θερμαίνονται με ζεστό νερό από την παραγόμενη θερμική ενέργεια κατά τη καύση του βιοαερίου, ενώ η θέρμανση του υποστρώματος εντός των δεξαμενών επιτυγχάνεται με σωληνώσεις (σπιράλ) στο εσωτερικό τοίχωμα των αντιδραστήρων. Εντός των αντιδραστήρων λειτουργούν μηχανικοί αναδευτήρες οι οποίοι συμβάλλουν στην διατήρηση της ομοιογένειας του μίγματος και την βελτίωση της διαδικασίας μεθανογένεσης.

Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής (HRT) της βιομάζας στους 2 βιοαντιδραστήρες συνολικά κυμαίνεται περίπου σε 45 ημέρες για το μίγμα τροφοδοσίας, ο οποίος διαχωρίζεται σε περίπου 33 ημέρες για τη μεσόφιλη χώνευση στην πρώτη δεξαμενή και σε περίπου 12 ημέρες για τη θερμόφιλη χώνευση στη δεύτερη δεξαμενή. Κατά τη διάρκεια της παραμονής του, το οργανικό υλικό μεταβολίζεται από μικροοργανισμούς που είναι παρόντες στη βιομάζα και οι οποίοι εισέρχονται στο σύστημα σε αναερόβιες συνθήκες, κατά την εκκίνηση του, χωρίς να απαιτείται επαναληπτική τροφοδοσία.

Από της διεργασίες της αναερόβιας χώνευσης παράγεται το βιοαέριο και το υπόλειμμα της παραγωγικής διαδικασίας που χρησιμοποιείται ως εδαφοβελτιωτικό εδάφους.

4.1.3. Συλλογή και επεξεργασία παραγόμενου βιοαερίου

Το παραγόμενο βιοαέριο συλλέγεται στους πολυστρωματικούς θόλους (PVC, PE, EPDM) των βιοαντιδραστήρων, οι οποίοι προσφέρουν ανθεκτικότητα στις καιρικές συνθήκες και αποθηκευτική ικανότητα. Λόγω της υψηλής συγκέντρωσης υδρόθειου

(~2000 ppm), η οποία προκαλεί διάβρωση και φθορές στις μηχανές ΣΗΘ, είναι απαραίτητη η αποθείωσή του σε επίπεδα κάτω των 700 ppm. Για τον σκοπό αυτό εφαρμόζεται βιολογική αποθείωση εντός του θόλου, όπου μέσω έγχυσης αέρα (2-8% κ.ο.) και της δράσης αυτόχθονων σουλφοβακτηρίων, το υδρόθειο μετατρέπεται σε στοιχειακό θείο. Το προϊόν αυτό επικάθεται στα τοιχώματα, καθαρίζεται περιοδικά και μπορεί να εμπλουτίσει το χωνεμένο υπόλειμμα ως εδαφοβελτιωτικό, επιτυγχάνοντας μείωση του H_2S κατά 75% (τελική τιμή ~500 ppm).

Επιπλέον, το βιοαέριο υφίσταται αφύγρανση δύο σταδίων για την απομάκρυνση των υδρατμών, οι οποίοι σε συνθήκες 100% σχετικής υγρασίας εντός του αντιδραστήρα θα προκαλούσαν βλάβες στις μονάδες ηλεκτροπαραγωγής. Η πρώτη φάση περιλαμβάνει τη φυσική συμπίκνωση των υδρατμών στα τοιχώματα υπόγειων κεκλιμένων σωλήνων και τη συλλογή τους σε ειδικούς διαχωριστές. Η διαδικασία αφύγρανσης ολοκληρώνεται με μια δεύτερη, εντατική ξήρανση μέσω ψύξης σε εναλλάκτη θερμότητας (κάτω από 10°C), η οποία πραγματοποιείται από εξωτερικό ξηραντήρα και συμπιεστή πριν την εισαγωγή του αερίου στη μηχανή εσωτερικής καύσης.

Τελικά, το επεξεργασμένο, καθαρό και ξηρό βιοαέριο τροφοδοτεί την ηλεκτρομηχανή, όπου μέσω της καύσης του παράγεται ηλεκτρική και θερμική ενέργεια. Η σωστή κατεργασία του αερίου διασφαλίζει τη μακροζωία του εξοπλισμού, μειώνοντας το κόστος συντήρησης και τη φθορά των λιπαντικών, καθιστώντας τη μονάδα λειτουργικά βιώσιμη και αποδοτική.

4.1.4. Παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας

Το επεξεργασμένο βιοαέριο οδηγείται στο χώρο της μηχανής εσωτερικής καύσης όπου αποθηκεύεται σε, ενσωματωμένη στη μηχανή, δεξαμενή αερίου και στην συνέχεια διοχετεύεται στη μηχανή εσωτερικής καύσης συζευγμένη με ηλεκτρογεννήτρια δυναμικότητας 1MW. Έτσι, το βιοαέριο συμπιέζεται και εισέρχεται στο θάλαμο καύσης της μηχανής, όπου αναμιγνύεται με ατμοσφαιρικό αέρα και αναφλέγεται. Τα απαέρια της καύσης διέρχονται από εναλλάκτη θερμότητας και απορρίπτονται στην ατμόσφαιρα αφού περάσουν από εξάτμιση και σιγαστήρα για τη μείωση του θορύβου. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια διατίθεται στο δίκτυο της ΔΕΗ μέσω του υποσταθμού που έχει εγκατασταθεί εντός της μονάδας. Η παραγόμενη θερμική ενέργεια οδηγείται κατά 90% στο σύστημα θέρμανσης των αντιδραστήρων ενώ η υπόλοιπη ποσότητα διοχετεύεται σε σύστημα ψύξης με χρήση air-cooling.

Για την καύση της περίσσειας του αερίου σε περίπτωση δυσλειτουργίας της ηλεκτρομηχανής υπάρχει ειδικός πυρσός που λειτουργεί αυτόματα και εκτονώνει την συγκέντρωση του βιοαερίου. Ο πυρσός έχει διαστασιολογηθεί κατάλληλα από την κατασκευάστρια εταιρία για να καλύπτει τουλάχιστον της ανάγκες των 500 m³/h, που είναι και η απόδοση της μηχανής εσωτερικής καύσης.

4.1.5. Αποθήκευση χωνεμένου υπολείμματος

Το χωνεμένο μίγμα των α' υλών που παραμένει στις δύο δεξαμενές χώνευσης (βιοαντιδραστήρες) μετά την παραγωγή του βιοαερίου μεταφέρεται μέσω συστήματος αντλιών σε υπόγεια δεξαμενή υπολειμμάτων (τύπου lagoon) χωρητικότητας 20.000tn. Η δεξαμενή είναι επιστρωμένη στο πυθμένα της και στα πλαϊνά τοιχώματα της με ειδική πλαστική μεμβράνη για πλήρη στεγανότητα και προστασία διαρροής στον εδαφικό αποδέκτη. Το υπόλειμμα αποθηκεύεται και παραμένει ώσπου να δοθεί στους αγρότες για φυσική λίπανση καλλιεργήσιμων εκτάσεων, αφού αποτελεί άριστο εδαφοβελτιωτικό σκεύασμα που μπορεί να αξιοποιηθεί από τους παραγωγούς στις καλλιέργειες.

4.2. Μονάδα Β – Μονάδα Αναερόβιας Χώνευσης & Παραγωγής Βιοαερίου «ΒΙΟΑΕΡΙΟ ΛΑΓΚΑΔΑ Α.Ε.»

4.2.1. Γενικά

Η εταιρεία «Βιοαέριο Λαγκαδά Α.Ε.» ιδρύθηκε τον Μάρτιο του 2011 με έδρα το Κολχικό Θεσσαλονίκης. Ο σχεδιασμός της μονάδας ολοκληρώθηκε το 2015, η κατασκευή της πραγματοποιήθηκε κατά το πρώτο εξάμηνο του 2016 και τέθηκε σε πλήρη λειτουργία αμέσως μετά. Πρόκειται για έναν σταθμό Συμπαγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας (ΣΗΘ) από βιοαέριο, ο οποίος αξιοποιεί ζωικά και αγροτοβιομηχανικά απόβλητα, καθώς και ενεργειακές καλλιέργειες (Μυλωνάς, 2025).

Η μονάδα έχει ετήσια δυναμικότητα επεξεργασίας περίπου 80.000 τόνων οργανικών υλικών, τα οποία μέσω της βιολογικής διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης παράγουν βιοαέριο. Το παραγόμενο αέριο χρησιμοποιείται ως καύσιμο σε θερμική μηχανή εσωτερικής καύσης ονομαστικής ηλεκτρικής ισχύος 998 kW και θερμικής ισχύος 1.064 kW ανά ώρα λειτουργίας. Σε ετήσια βάση, ο σταθμός αποδίδει περίπου 8.400 MWh ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο διανομής και παράγει 75.000 τόνους χωνεμένου υπολείμματος, το οποίο διατίθεται ως οργανικό εδαφοβελτιωτικό για τη λίπανση αγροτικών εκτάσεων (www.biogaslagada.gr/plant/).



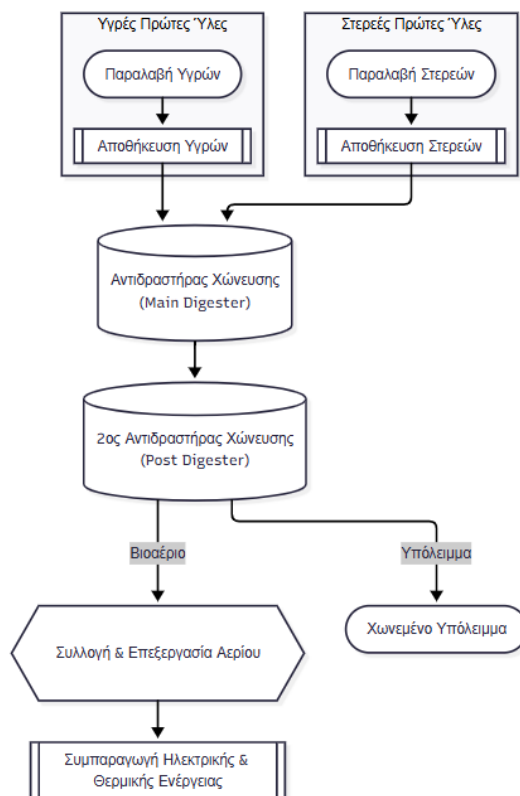
Εικόνα 5: Δεξαμενή πρωτογενούς χώνευσης (main digester) Μονάδας Αναερόβιας Χώνευσης «ΒΙΟΑΕΡΙΟ ΛΑΓΚΑΔΑ Α.Ε.» (Μυλωνάς, 2025)



Εικόνα 6: Αεροφωτογραφία Μονάδας Αναερόβιας Χώνευσης «ΒΙΟΑΕΡΙΟ ΛΑΓΚΑΔΑ Α.Ε.» (Μυλωνάς, 2025)

Η συνολική παραγωγική διαδικασία της μονάδας είναι αυτοματοποιημένη και ελεγχόμενη, χωρισμένη σε πέντε διακριτά λειτουργικά στάδια:

- Παραλαβή και αποθήκευση πρώτων υλών: Διαχωρισμός των εισερχόμενων υλικών σε υγρά (σε υπόγεια προδεξαμενή) και στερεά (σε υπαίθριους σιρούς).
- Αναερόβια χώνευση: Διβάθμια βιολογική αποικοδόμηση της οργανικής ύλης σε σειρά δύο στεγανών αντιδραστήρων (πρωτεύων και δευτερεύων χωνευτής).
- Συλλογή και επεξεργασία βιοαερίου: Μεταφορά του αερίου από της θόλους των χωνευτών και υποβολή του σε διεργασίες αφύγρανσης και αποθείωσης.
- Παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας: Καύση του βιοαερίου στη μονάδα ΣΗΘ για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος και ανάκτηση της θερμότητας.
- Παστερίωση και αποθήκευση υπολείμματος: Θερμική επεξεργασία του χωνεμένου υλικού στους 70°C και αποθήκευσή του πριν τη διάθεση του ως εδαφοβελτιωτικό (Μυλωνάς, 2025).



Εικόνα 7: Συνοπτικό Διάγραμμα Ροής Μονάδας Αναερόβιας Χώνευσης BIOAERIO ΛΑΓΚΑΔΑ Α.Ε.

4.2.2. Αναερόβια Χώνευση – Παραγωγή Βιοαερίου

Το στάδιο της αναερόβιας χώνευσης βασίζεται σε μια διβάθμια διάταξη υγρής χώνευσης. Οι χρησιμοποιούμενες υγρές πρώτες ύλες συγκεντρώνονται σε υπόγεια προδεξαμενή χωρητικότητας 300 m³, όπου αποθηκεύονται προσωρινά και ομοιογενοποιούνται με τη χρήση αναδευτήρων για την αποτροπή φαινομένων καθίζησης, ενώ οι στερεές πρώτες ύλες αποθηκεύονται σε υπαίθριους σιρούς και με τη βοήθεια τηλεσκοπικού φορτωτή μεταφέρονται στο σύστημα προεπεξεργασίας και τροφοδοσίας στερεών πρώτων υλών. Η εισαγωγή των υλικών στον αντιδραστήρα εκτελείται αυτόματα, σύμφωνα με το καθορισμένο πρόγραμμα τροφοδοσίας, κατανεμημένη σε 24 ημερήσιες δόσεις ώστε να διασφαλίζεται η σταθερή παροχή οργανικού φορτίου (www.biogaslagada.gr/plant/)

Το μίγμα τροφοδοσίας οδηγείται αρχικά στον πρωτεύοντα χωνευτήρα (main digester), ο οποίος έχει χωρητικότητα 4.000m³. Η θερμοκρασία του αντιδραστήρα διατηρείται σταθερά της 44°C, ενώ το υλικό παραμένει υπό συνεχή ανάδευση για περίπου 30 ημέρες. Κατά τη διάρκεια αυτού του υδραυλικού χρόνου παραμονής, λαμβάνει χώρα η αρχική αποικοδόμηση της οργανικής ύλης, παράγοντας περίπου το 60-65% του συνολικού βιοαερίου (www.biogaslagada.gr/plant/).

Στη συνέχεια, τα υλικά υπερχειλίζουν και οδηγούνται στον δευτερεύοντα χωνευτήρα ή μεταχωνευτή (post digester), ο οποίος διαθέτει χωρητικότητα 4.000 m³. Στο στάδιο αυτό, το υπόλειμμα παραμένει για ακόμη 60 ημέρες, γεγονός που επιτρέπει την περαιτέρω διάσπαση των πιο σύνθετων οργανικών ενώσεων και την έκλυση του υπόλοιπου 35-40% του βιοαερίου. Οι δύο χωνευτές καλύπτονται από αεροστεγείς

μεμβράνες διπλού στρώματος, οι οποίες λειτουργούν ως συλλέκτες και ενδιάμεσοι χώροι αποθήκευσης του παραγόμενου αερίου (www.biogaslagada.gr/plant/).

4.2.3. Συλλογή και επεξεργασία παραγόμενου βιοαερίου

Το βιοαέριο που συγκεντρώνεται στο επάνω μέρος των δύο χωνευτών μεταφέρεται μέσω συστήματος σωληνώσεων στις μονάδες επεξεργασίας. Επειδή το ακατέργαστο βιοαέριο περιέχει υψηλά ποσοστά υγρασίας και διαβρωτικών προσμίξεων, κυρίως υδροθείου (H_2S), κρίνεται απαραίτητος ο καθαρισμός του πριν εισαχθεί στη μηχανή εσωτερικής καύσης, ώστε να αποτραπούν φθορές στον εξοπλισμό (Κίτσογλου, 2018).

Η διεργασία αποθείωσης περιλαμβάνει τον έλεγχο των επιπέδων του υδροθείου εντός των ορίων ασφαλείας που θέτει ο κατασκευαστής της μονάδας ΣΗΘ (συμπααραγωγή ηλεκτρικής θερμικής ενέργειας). Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του συγκροτήματος αποθείωσης, το οποίο μειώνει της συγκεντρώσεις του H_2S (που σε περιόδους χρήσης κοτίσιας κοπριάς παρουσιάζουν αυξητικές τάσεις) (Μυλωνάς, 2025).

Μετά την απομάκρυνση του υδροθείου, το αέριο οδηγείται στο συγκρότημα αφύγρανσης. Εκεί, μέσω ψύξης, επιτυγχάνεται η συμπύκνωση και η απομάκρυνση των υδρατμών. Η αφαίρεση της υγρασίας σταθεροποιεί τη θερμαντική αξία του καυσίμου και προστατεύει τα μηχανικά μέρη από τη διάβρωση και τα υδραυλικά πλήγματα, εξασφαλίζοντας ένα ξηρό και καθαρό αέριο προτού αυτό οδηγηθεί προς καύση (Μυλωνάς, 2025).

4.2.4. Παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας

Το επεξεργασμένο βιοαέριο τροφοδοτεί τη μηχανή συμπααραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (ΣΗΘ). Το σύστημα αποτελείται από έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης συνδεδεμένο με γεννήτρια, μετατρέποντας τη χημική ενέργεια του μεθανίου σε δύο μορφές ενέργειας:

- Ηλεκτρική Ενέργεια: Η μονάδα παράγει 998 kW ηλεκτρικής ισχύος ανά ώρα λειτουργίας. Η ενέργεια αυτή διοχετεύεται απευθείας στο δίκτυο ηλεκτροδότησης, αποδίδοντας σε ετήσια βάση περίπου 8.400 MWh.
- Θερμική Ενέργεια: Παράλληλα, παράγονται 1.064 kW θερμικής ισχύος ανά ώρα λειτουργίας με τη μορφή ζεστού νερού της 95°C (www.biogaslagada.gr/plant/).

Η ανακτώμενη θερμική ενέργεια επαναχρησιμοποιείται για τις λειτουργικές ανάγκες του ίδιου του σταθμού. Συγκεκριμένα, ένα μέρος της αξιοποιείται για τη διατήρηση της θερμοκρασίας των χωνευτών στους 44°C μέσω εσωτερικών εναλλακτών θερμότητας, ενώ το υπόλοιπο διατίθεται για τη λειτουργία των δεξαμενών παστερίωσης, βελτιώνοντας τον συνολικό βαθμό ενεργειακής απόδοσης της εγκατάστασης.

4.2.5. Αποθήκευση χωνεμένου υπολείμματος

Μετά την πάροδο του απαιτούμενου χρόνου παραμονής στο μεταχωνευτή, το χωνεμένο υπόλειμμα οδηγείται σε δεξαμενές παστερίωσης. Στο στάδιο αυτό, το υλικό παραμένει για μία ώρα σε σταθερή θερμοκρασία 70°C, με σκοπό τη θερμική εξουδετέρωση τυχόν παθογόνων οργανισμών, εξασφαλίζοντας την υγειονομική σταθερότητα του προϊόντος. Στη συνέχεια, το παστεριωμένο υλικό μεταφέρεται σε δύο ανοιχτές δεξαμενές αποθήκευσης, όπου διατηρείται για διάστημα περίπου 120 ημερών (www.biogaslagada.gr/plant/).

Σε ετήσια βάση, η μονάδα παράγει 75.000 τόνους οργανικού εδαφοβελτιωτικού σε υγρή μορφή. Λόγω των υψηλών συγκεντρώσεων ανοργανοποιημένων θρεπτικών

συστατικών (άζωτο, φώσφορος, κάλιο), το υλικό αυτό διατίθεται για τη λίπανση και τη βελτίωση περίπου 5.000 στρεμμάτων αγροτικών εκτάσεων στην ευρύτερη περιοχή.

4.3. Μονάδα Β – Μονάδα Αναερόβιας Χώνευσης & Παραγωγής Βιοαερίου «ΒΙΟΕΝΕΡΓΕΙΑ ΝΙΓΡΙΤΑΣ Α.Ε.»

4.3.1. Γενικά

Η ΒΙΟΕΝΕΡΓΕΙΑ ΝΙΓΡΙΤΑΣ Α.Ε. αποτελεί μία σύγχρονη μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από βιοαέριο, με έδρα τη Νιγρίτα του Δήμου Βισαλτίας, στον Νομό Σερρών. Η λειτουργία της ξεκίνησε το 2016 με εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύ 998 kW, αξιοποιώντας την τεχνολογία της αναερόβιας χώνευσης για τη μετατροπή οργανικών πρώτων υλών σε βιοαέριο και, στη συνέχεια, σε ηλεκτρική και θερμική ενέργεια μέσω μονάδας Συμπαγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας (ΣΗΘ) (<https://bioupgrade.gr/nea/gnoriste-tin-ereynitiki-mas-omada-bioenergeia-nigritas-ae/>). Το 2022 ολοκληρώθηκε η επέκταση της εγκατάστασης με την προσθήκη 2 MW, ανεβάζοντας τη συνολική εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύ της μονάδας στα 3 MW, γεγονός που την κατατάσσει μεταξύ των μεγαλύτερων μονάδων βιοαερίου της χώρας (www.agrogroup.gr/drastiriotes/ananeuismes-piges-energeias/vioenergeia-nigritas-ae/).

Η παραγωγική διαδικασία βασίζεται στην αξιοποίηση αγροτικών και κτηνοτροφικών πρώτων υλών καθώς και οργανικών υπολειμμάτων αγροβιομηχανιών και γαλακτοβιομηχανιών. Τα υλικά αυτά οδηγούνται αρχικά σε δεξαμενές προεπεξεργασίας και στη συνέχεια στους χωνευτές, όπου πραγματοποιείται η αναερόβια χώνευση υπό ελεγχόμενες συνθήκες. Το παραγόμενο βιοαέριο υφίσταται κατάλληλη επεξεργασία και τροφοδοτεί τη μονάδα ΣΗΘ για την παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, ενώ το υπόλειμμα της χώνευσης (digestate) οδηγείται σε περαιτέρω διαχείριση και αξιοποιείται ως οργανικό εδαφοβελτιωτικό υψηλής ποιότητας. Παράλληλα, στο πλαίσιο της αναβάθμισης της μονάδας προβλέπεται και εγκατάσταση μονάδας κομποστοποίησης για την παραγωγή οργανικού κομποστ (<https://bioupgrade.gr/nea/gnoriste-tin-ereynitiki-mas-omada-bioenergeia-nigritas-ae/>).



Εικόνα 8: Αεροφωτογραφία Μονάδας Αναερόβιας Χώνευσης «ΒΙΟΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΝΙΓΡΙΤΑΣ Α.Ε.» (www.agrogroup.gr/drastiriotes/ananeuismes-piges-energeias/vioenergeia-nigritas-ae/)

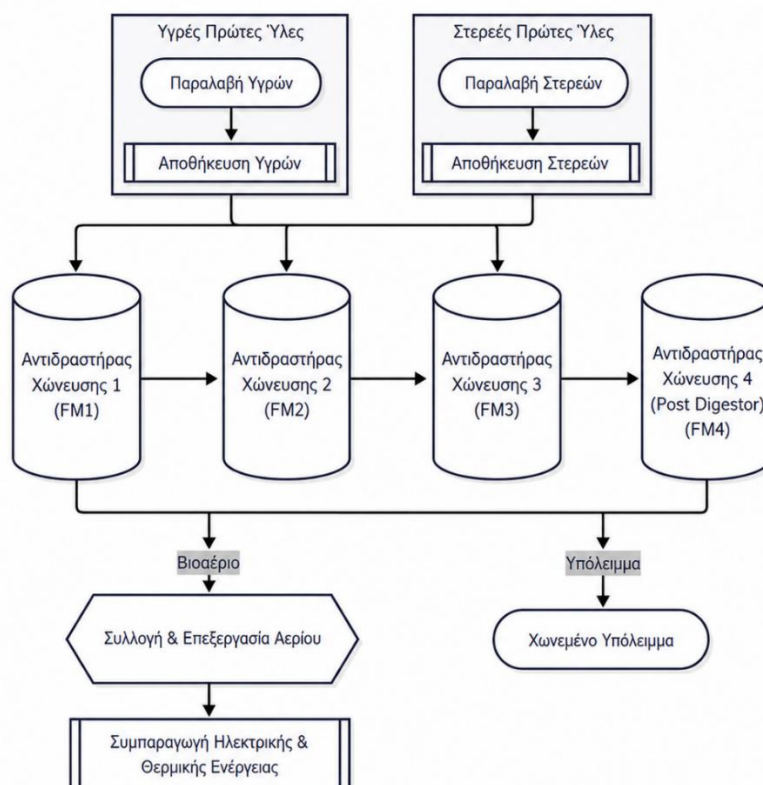
Σε ετήσια βάση, η μονάδα επεξεργάζεται περίπου 30.000 τόνους οργανικών πρώτων υλών, παράγοντας περίπου 8.400 MWh ηλεκτρικής ενέργειας και σημαντικές ποσότητες θερμικής ενέργειας, ενώ αποδίδει περίπου 25.000 τόνους οργανικού εδαφοβελτιωτικού, επαρκούς για τη λίπανση περίπου 5.000 στρεμμάτων αγροτικών εκτάσεων. Πριν την επέκταση, η εγκατάσταση παρήγαγε περίπου 998 kWh ηλεκτρικής και 1.064 kWh θερμικής ενέργειας ανά ώρα λειτουργίας, καθώς και περίπου 75 τόνους

εδαφοβελτιωτικού ημερησίως. Μετά την ολοκλήρωση της επέκτασης το 2022, η συνολική εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς ανέρχεται πλέον σε 3 MW, ενισχύοντας σημαντικά τη συνεισφορά της μονάδας στην παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές (<https://bioupgrade.gr/nea/gnoriste-tin-ereynitiki-mas-omada-bioenergeia-nigritas-ae/>).

Το βασικό τελικό προϊόν της μονάδας είναι η ηλεκτρική ενέργεια, παράλληλα το στερεό κλάσμα του υπολείμματος που προκύπτει από τη διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης, με δυνατότητα παραγωγής έως 125.000 τόνους ετησίως, αποτελεί υψηλής ποιότητας εδαφοβελτιωτικό για γεωργικές καλλιέργειες και διατίθεται προς πώληση σε σάκους.

Η συνολική παραγωγική διαδικασία της μονάδας είναι αυτοματοποιημένη και ελεγχόμενη, χωρισμένη σε πέντε διακριτά λειτουργικά στάδια:

- Παραλαβή και αποθήκευση πρώτων υλών: Διαχωρισμός των εισερχόμενων υλικών σε υγρά (σε υπόγεια προδεξαμενή) και στερεά (σε υπαίθριους σιρούς).
- Αναερόβια χώνευση: Διβάθμια βιολογική αποικοδόμηση της οργανικής ύλης σε σειρά τεσσάρων στεγανών αντιδραστήρων (πρωτεύων και δευτερεύων χωνευτής).
- Συλλογή και επεξεργασία βιοαερίου: Μεταφορά του αερίου από τους θόλους των χωνευτών και υποβολή του σε διεργασίες αφύγρανσης και αποθείωσης.
- Παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας: Καύση του βιοαερίου στη μονάδα ΣΗΘ για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος και ανάκτηση της θερμότητας.
- Παστερίωση και αποθήκευση υπολείμματος: Θερμική επεξεργασία του χωνεμένου υλικού στους 70°C και αποθήκευσή του πριν τη διάθεση ως εδαφοβελτιωτικό



Εικόνα 9: Συνοπτικό Διάγραμμα Ροής Μονάδας Αναερόβιας Χώνευσης BIOENERΓΕΙΑ ΝΙΓΡΙΤΑΣ Α.Ε.

4.3.2. Αναερόβια Χώνευση – Παραγωγή Βιοαερίου

Η μονάδα αναερόβιας χώνευσης «Βιοενεργειακή Νιγρίτας» διαθέτει τις παρακάτω βασικές υποδομές:

1. 4 Πίστες Ενσίρωσης για αποθήκευση Στερεών Α' Υλών, 4945m²
2. 4 Προδεξαμενές αποθήκευσης Υγρών Α' Υλών:
 - Υπέργεια δεξαμενή 800m³ - ακτίνας 6m και ύψους 7m – με ικανότητα ανάμειξης (ένας βυθιζόμενος αναδευτήρας).
 - Υπόγεια 150m³ - ακτίνας 3,7m και βάθους 4m – με ικανότητα ανάμειξης (ένας βυθιζόμενος αναδευτήρας).
 - Δεξαμενή Α' υλών 8.200m³, με ικανότητα ανάμειξης (3 αναδευτήρες)
 - Υπόγεια δεξαμενή τροφοδοσίας 550m³, ανάμειξης υγρών — στερεών υλικών με ικανότητα ανάμειξης (2 αναδευτήρες).
3. Τροφοδοσία και επεξεργασία στερεών και υγρών υλικών, για να ακολουθήσει η ολική τροφοδοσία του αντιδραστήρα.
4. Δεξαμενές Αναερόβιας Χώνευσης, μία χωρητικότητας 4950m³ (FM1 αντιδραστήρας), με ικανότητα ανάδευσης (4 βυθιζόμενοι αναδευτήρες) & 3 Δεξαμενές Αναερόβιας Χώνευσης 4000m³ (FM2, FM3 και FM4 αντιδραστήρες), με ικανότητα ανάδευσης (3 Gas Mixers + 1 βυθιζόμενο αναδευτήρα)
5. Τρεις Δεξαμενές αποθήκευσης χωνεμένου υπολείμματος χωρητικότητας 10.000m³, με ικανότητα ανάδευσης (3 βυθιζόμενοι αναδευτήρες + Αντλίες).
6. Σύστημα διαχωρισμού χωνεμένου υπολείμματος σε υγρή και στερεή ουσία.
7. Διάταξη παστερίωσης χωνεμένου υπολείμματος σε θερμοκρασία 75°C παραμονής 24 ωρών.
8. Διάταξη επεξεργασίας του παραγόμενου βιοαερίου από τον αντιδραστήρα.
9. Τεχνικό Κτίριο Εγκατάστασης της μηχανής Συμπαγωγής Ηλεκτρικής και Θερμικής ενέργειας (ΣΗΘ).
10. Δύο Containers με τον πλήρη εξοπλισμό των μηχανών Συμπαγωγής Ηλεκτρικής και Θερμικής ενέργειας (ΣΗΘ).
11. Τρία ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη αποτελούμενα από παλινδρομικές μηχανές αερίου
12. Πυρσό Εκτόνωσης Πίεσης και καύσης περίσσειας βιοαερίου.
13. Φρεάτιο Συγκέντρωσης Συμπυκνωμάτων από την κυκλοφορία του παραγόμενου βιοαερίου.

Οι χρησιμοποιούμενες υγρές πρώτες ύλες συλλέγονται και αποθηκεύονται προσωρινά σε τέσσερις υπόγειες προδεξαμενές. Στις δεξαμενές αυτές πραγματοποιείται ομογενοποίηση του υλικού μέσω κατάλληλων αναδευτήρων, με σκοπό τη διατήρηση ομοιόμορφης σύστασης και την αποφυγή φαινομένων καθίζησης.

Αντίστοιχα, οι στερεές πρώτες ύλες αποθηκεύονται σε υπαίθριους σιρούς και μέσω τηλεσκοπικού φορτωτή μεταφέρονται στο σύστημα προεπεξεργασίας και τροφοδοσίας στερεών πρώτων υλών. Η εισαγωγή των υλικών στους αντιδραστήρες πραγματοποιείται αυτοματοποιημένα, σύμφωνα με προκαθορισμένο πρόγραμμα τροφοδοσίας. Η ημερήσια τροφοδοσία κατανέμεται σε 24 επιμέρους δόσεις, με στόχο τη διασφάλιση σταθερής παροχής οργανικού φορτίου και την ομαλή λειτουργία της διεργασίας.

Το μίγμα τροφοδοσίας οδηγείται αρχικά στους κύριους χωνευτήρες FM1, FM2 και FM3, καθένας από τους οποίους διαθέτει χωρητικότητα 4.000 m³. Η θερμοκρασία

λειτουργίας των αντιδραστήρων διατηρείται σταθερά στους 42°C, ενώ το υλικό παραμένει υπό συνεχή ανάδευση για χρονικό διάστημα περίπου 30 ημερών.

Στη συνέχεια, το χωνευμένο υλικό υπερχειλίζει και οδηγείται στον δευτερεύοντα χωνευτήρα ή μεταχωνευτή FM4, ο οποίος διαθέτει επίσης χωρητικότητα 4.000 m³. Στο στάδιο αυτό, το υπόλειμμα παραμένει για επιπλέον χρονικό διάστημα περίπου 60 ημερών, επιτρέποντας την περαιτέρω αποδόμηση πιο σύνθετων οργανικών ενώσεων και την παραγωγή του υπολειπόμενου ποσοστού βιοαερίου, το οποίο εκτιμάται περίπου στο 35–40% της συνολικής παραγωγής (www.agrogroup.gr/drastiriotites/ananeusimes-piges-energeias/vioenergeia-nigritas-ae).

4.3.3. Συλλογή και επεξεργασία παραγόμενου βιοαερίου

Η αξιοποίηση του παραγόμενου βιοαερίου προϋποθέτει την κατάλληλη επεξεργασία του, ώστε να πληροί τις απαιτήσεις λειτουργίας της μονάδας συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας. Για τον λόγο αυτό, το βιοαέριο που συλλέγεται από τους τέσσερις χωνευτές οδηγείται στις εγκαταστάσεις καθαρισμού πριν χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο.

Το πρώτο στάδιο της επεξεργασίας αφορά την απομάκρυνση του υδροθείου (H₂S), το οποίο αποτελεί μία από τις σημαντικότερες ανεπιθύμητες προσμίξεις του βιοαερίου λόγω της διαβρωτικής του δράσης. Η αποθείωση πραγματοποιείται σε ειδική μονάδα, με στόχο τη διατήρηση της συγκέντρωσης του H₂S εντός των επιτρεπόμενων ορίων για την ασφαλή λειτουργία του κινητήρα.

Στη συνέχεια, το βιοαέριο υποβάλλεται σε αφύγρανση, κατά την οποία ψύχεται ώστε να συμπυκνωθούν και να απομακρυνθούν οι υδρατμοί. Με τον τρόπο αυτό παράγεται ένα ξηρό και καθαρό καύσιμο, το οποίο περιορίζει τα φαινόμενα διάβρωσης και εξασφαλίζει την ομαλή και αξιόπιστη λειτουργία της μονάδας ΣΗΘ.

4.3.4. Παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας

Μετά την επεξεργασία του, το βιοαέριο τροφοδοτεί τη μονάδα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (ΣΗΘ), η οποία περιλαμβάνει κινητήρα εσωτερικής καύσης συνδεδεμένο με γεννήτρια. Στη μονάδα αυτή, η χημική ενέργεια του μεθανίου μετατρέπεται ταυτόχρονα σε ηλεκτρική και θερμική ενέργεια, επιτυγχάνοντας υψηλό βαθμό ενεργειακής αξιοποίησης:

- **Ηλεκτρική Ενέργεια:** Η μονάδα παράγει 2,996 MW ηλεκτρικής ισχύος ανά ώρα λειτουργίας. Η ενέργεια αυτή διοχετεύεται απευθείας στο δίκτυο ηλεκτροδότησης, αποδίδοντας σε ετήσια βάση περίπου 26.280 MWh.
- **Η ανακτώμενη θερμική ενέργεια** αξιοποιείται για την κάλυψη των λειτουργικών αναγκών της εγκατάστασης. Ειδικότερα, μέρος της χρησιμοποιείται για τη διατήρηση της απαιτούμενης θερμοκρασίας των χωνευτών μέσω εσωτερικών εναλλακτών θερμότητας, ενώ η υπόλοιπη ποσότητα διοχετεύεται στις δεξαμενές παστερίωσης.



Εικόνα 10: Γεννήτριες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας 1 MW στη μονάδα «Βιοενεργειακή Νιγρίτας Α.Ε.»

4.2.5. Αποθήκευση χωνεμένου υπολείμματος

Το στερεό κλάσμα του υπολείμματος της διαδικασίας αναερόβιας χώνευσης, το οποίο μπορεί να φθάσει τους 125.000 τόνους/ έτος αποτελεί άριστο εδαφοβελτιωτικό για τις καλλιέργειες. Το υγρό κλάσμα του υπολείμματος που ανέρχεται σε 62.500 τόνους διατίθεται σε αγρότες της ευρύτερης περιοχής για φυσική λίπανση των καλλιεργήσιμων εκτάσεων τους. Η εταιρεία έχει εξασφαλίσει καλλιεργήσιμη έκταση 4.520 στρεμμάτων για τη διάθεση του υγρού υπολείμματος με συμφωνίες με τοπικούς αγρότες της περιοχής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑΣ ΧΩΝΕΥΣΗΣ

5.1. Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Μονάδας Α

5.1.1. Εισαγωγικά

Η μονάδα αναερόβιας χώνευσης και παραγωγής βιοαερίου ΜΑΚΙΟΣ Α.Ε. διενεργεί σειρά εργαστηριακών αναλύσεων σε μηνιαία βάση αλλά και ενδιάμεσα στα πλαίσια προσπάθειας βέλτιστου ελέγχου της διεργασίας. Στο παρόν κεφάλαιο παρατίθενται και αναλύονται διεξοδικά τα πειραματικά δεδομένα και τα λειτουργικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την παρακολούθηση της μονάδας αναερόβιας χώνευσης κατά την περίοδο του έτους 2025. Η ανάλυση επικεντρώνεται στην ποσοτική και ποιοτική αξιολόγηση των πρώτων υλών (σύσταση υποστρώματος), καθώς και στη συσχέτισή της με κρίσιμες παραμέτρους λειτουργίας του αντιδραστήρα (θερμοκρασία, pH, FOS/TAC, αμμωνιακά ιόντα $\text{NH}_4\text{-N}^+$, ολικά στερεά).

5.1.2. Σύνθεση και διαχείριση πρώτων υλών – Σύσταση υποστρώματος

Βάσει των πινάκων 3 και 4, οι οποίοι αποτυπώνουν την ποσοτική (σε τόνους) και την ποσοστιαία (%) σύσταση της τροφοδοσίας του αναερόβιου χωνευτή για το 2025, προκύπτει μια σαφής εικόνα για τη διαχείριση των πρώτων υλών στη Μονάδα Α. Η συνολική ημερήσια τροφοδοσία κινείται σταθερά σε υψηλά επίπεδα, κυμαινόμενη κυρίως μεταξύ 160 και 230 τόνων, εξασφαλίζοντας τη συνεχή λειτουργία της μονάδας.

Με βάση μία πρώτη ανάγνωση της σύστασης του υποστρώματος είναι αντιληπτό ότι η αγελαδινή κοπριά αποτελεί τη βασική πηγή τροφοδοσίας καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Το ποσοστό της κυμαίνεται σταθερά από περίπου 43% έως και πάνω από 63% του συνολικού μείγματος. Δεύτερο σε σταθερή συνεισφορά έρχεται το υπόστρωμα κοτίσιας κοπριάς, το οποίο συμμετέχει σχεδόν κάθε εβδομάδα με ποσοστά κυρίως μεταξύ 6% και 18%. Αυτά τα δύο κτηνοτροφικά απόβλητα εξασφαλίζουν την απαραίτητη ρυθμιστική ικανότητα (αλκαλικότητα) και τη σταθερότητα της υγρασίας εντός του χωνευτή.

Η τροφοδοσία της μονάδας παρουσιάζει έντονη εποχικότητα, η οποία συνδέεται άμεσα με της περιόδους συγκομιδής και επεξεργασίας των αγροτικών προϊόντων. Κατά της καλοκαιρινούς μήνες (Ιούνιο έως Σεπτέμβριο), παρατηρείται κατακόρυφη αύξηση στην πούλπα φρούτων, η οποία φτάνει να αγγίζει μέχρι και το 14,3%, ενώ αντίθετα κατά τη φθινοπωρινή και χειμερινή περίοδο παρατηρείται ραγδαία αύξηση της χρησιμοποίησης κατσίγαρου (απόβλητο ελαιοτριβείων) με ποσοστά από 18% έως 30% της συνολικής τροφοδοσίας, παρέχοντας υπόστρωμα υψηλού οργανικού φορτίου.

Επιπλέον, η τροφοδοσία της μονάδας χαρακτηρίζεται από μεγάλη ποικιλομορφία, περιλαμβάνοντας ένα ευρύ φάσμα οργανικών υπολειμμάτων. Το ενσίρωμα καλαμποκιού διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα (0 – 6%), λειτουργώντας προφανώς ως συμπληρωματική πηγή άνθρακα. Τα υπολείμματα από ακτινίδια και φασολάκια σε πολύ χαμηλά έως και μηδενικά ποσοστά, ενώ παρόμοια χαμηλή αλλά σταθερή παρουσία εμφανίζει η βινάση (περίπου 3 – 5% της περισσότερες εβδομάδες). Τέλος, η συμμετοχή των γαλακτοκομικών υποπροϊόντων στην τροφοδοσία (ορός γιαουρτιού, συμπυκνωμένος ορός και τυρόγαλο) εμφανίζει μία ακανόνιστη διακύμανση, η οποία οφείλεται είτε σε περιοδική επιστράτευση της για απότομη αύξηση του διαθέσιμου οργανικού φορτίου είτε στην τυχαία διαθεσιμότητα της από την τοπική ή περιφερειακή βιομηχανική δραστηριότητα.

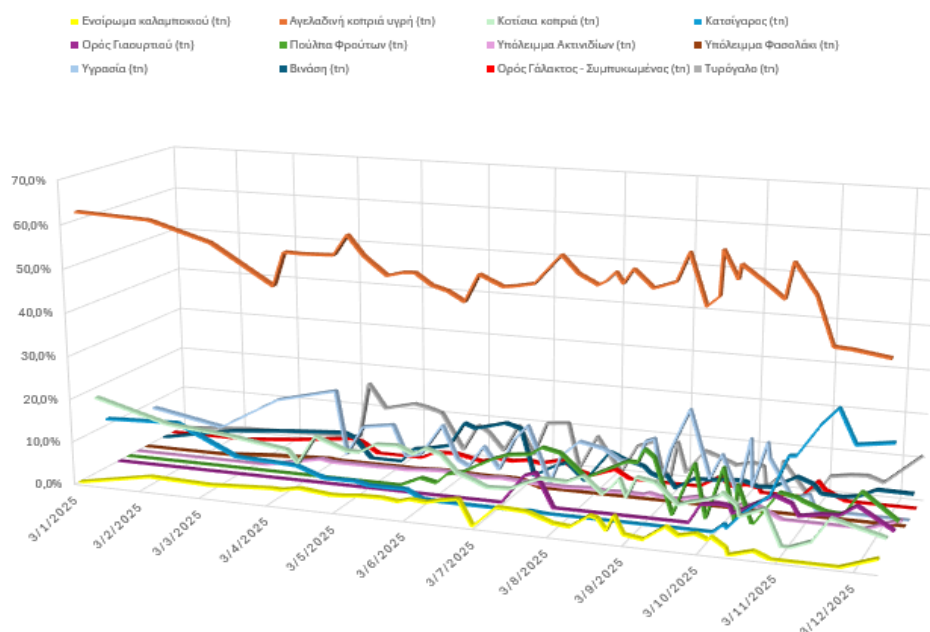
Πίνακας 3: Σύσταση υποστρώματος τροφοδοσίας αναερόβιου χωνευτή (main digester) της Μονάδας Α

Ημερομηνία	Ενσίρωμα καλαμποκιού (tn)	Αγελαδινή κοπριά υγρή (tn)	Κοτίσια κοπριά (tn)	Κασιίγαρος (tn)	Ορός Γιαουρτιού (tn)	Πούλπα Φρούτων (tn)	Υπόλειμμα Ακτινιδίων (tn)	Υπόλειμμα Φασολάκι (tn)	Υγρασία (tn)	Βινάση (tn)	Ορός Γάλακτος - Συμπυκνωμέ- νος (tn)	Τυρόγαλο (tn)	Συνολική Ποσότητα πρώτων υλών (tn)
3/1/2025	0	115,62	33,38	21,62	0	0	0	0	16,1	0	0	0	186,72
6/2/2025	6	117,22	25,28	23,56	0	0	0	0	10,51	6,35	0	2,77	191,69
6/3/2025	5	105,07	22,06	10,4	0	0	0	2	25,08	8,66	2,49	3,47	184,23
3/4/2025	6	82,26	17	8,62	0	0	5	3	29,07	9,8	5,23	3,98	169,96
8/4/2025	7	112,77	14,37	8,31	0	0	5	3	4,02	9,46	5,05	31,86	200,84
16/4/2025	8,5	111,72	27,47	5,57	0	0	5	3	17,98	0	0	20,19	199,43
30/4/2025	7	111,38	22,19	5,69	0	0	5	3	20,12	0	0	23,56	197,94
6/5/2025	7	116,7	21,49	4,27	0	0	5	3	5,83	6,61	0	21,76	191,66
13/5/2025	8	111,76	26,38	4,38	0	0	5	3	7,38	7,86	3,47	20,33	197,56
23/5/2025	7	88,46	22,87	3,81	0	3,98	5	3	18,92	8,71	3,35	3	168,1
30/5/2025	6	85,64	19,22	0,65	0	2,58	5	3	5,35	17,52	1,94	12,92	159,82
4/6/2025	8	94,31	23,92	0,42	0	6,97	5	3	3,49	17,53	1,26	11,67	175,57
11/6/2025	8	95,99	23,56	0,32	0	9,04	5	3	13,43	20,45	3,62	4,75	187,16
18/6/2025	10	97,46	17,14	0,27	0	13,31	5	3	4,01	23,18	3,06	17,48	193,91
25/6/2025	10	83,24	12,95	0,19	0	15,07	5	3	16,55	18,94	3,68	4	172,62
1/7/2025	0	100,8	11,5	0,16	0	18,38	5	3	24,35	0	3,17	18,91	185,27
11/7/2025	10	107	13,21	0	13,99	21,68	5	0	0	6,09	6,25	22,06	205,28
16/7/2025	10	108,96	16,19	0,68	16,26	25,81	5	0	14,03	8,13	2,71	0	207,77
24/7/2025	10	115,48	20,56	0	0	25,01	5	0	22,89	0	0	17,77	216,71
4/8/2025	5	111,31	17,37	0	0	12,03	5	0	17,58	13,9	3,91	0,08	186,18
11/8/2025	5	119,54	23,69	0	0	17,69	5	0	15,21	12,7	0	14,45	213,28
19/8/2025	10	101,51	14,02	0	0	19,65	5	0	13,02	9,25	0	15,6	188,05
22/8/2025	10	109,69	17,65	0	0	22,39	5	0	24,18	6,89	0	4,02	199,82
26/8/2025	5	117,23	23,27	0	0	22,89	5	0	26,72	5,52	0	0	205,63
29/8/2025	10	92,02	12,31	0	0	24,13	5	0	4,43	5,72	0	14,73	168,34
2/9/2025	4	118,53	24,51	0	0	26,11	5	0	22,12	1,05	0	3,42	204,74
10/9/2025	3	118,76	24,72	0	0	0	5	0	44,97	6,78	0	16	219,23
19/9/2025	7	82,13	10,04	0	0	17,96	5	0	7,39	4,94	4,28	8,33	147,07
24/9/2025	6	123,53	15,35	0	9,04	0	5	0	21,47	7,34	1,75	9,13	198,61
1/10/2025	9	117,86	20,11	0	11,74	27,62	5	0	4,11	8,98	3,86	12,96	230,24
6/10/2025	6	112,73	20,61	4,66	10,29	0	5	0	31,96	6,66	2,51	10,35	210,77
7/10/2025	7	121,51	20,32	2,51	6,35	16,37	5	0	7,86	5,37	0	0	192,29
13/10/2025	3	109,77	15,54	9,35	9,35	0	5	0	28,04	5,84	0	5,84	191,73
14/10/2025	0	118,98	11,22	10,49	10,49	0	5	0	21,6	6,17	0	12,96	196,91
24/10/2025	3	112,13	15,89	18,74	16,34	15,05	0	0	4,66	11,98	0	0	197,79
31/10/2025	0	111,69	0	38,64	14,27	14,44	0	0	7,43	9,6	8,64	2,63	207,34
3/11/2025	0	120,58	0	36,79	8,34	12,02	0	0	0	5,28	4,52	8,08	195,61
12/11/2025	0	109,38	3,86	51,42	10,28	8,81	0	0	0	4,83	0,18	9,79	198,55
19/11/2025	0	81,13	13,47	54,18	9,64	7,45	0	0	0,11	5,47	0	9,34	180,79
26/11/2025	0	77,82	11,3	39,07	13,75	16,99	0	0	0	8,49	0	6,94	174,36
11/12/2025	5	76,31	7,76	41,43	5,56	6,95	5	0	0	8,38	0	19,05	175,44

Πίνακας 4: % Σύσταση υποστρώματος τροφοδοσίας αναερόβιου χωνευτή (post digester)
της Μονάδας Α

Ημερομηνία	Ενοσίρωμα καλαμποκιού (tn)	Αγελαδινή κοπριά υγρή (tn)	Κοτίσια κοπριά (tn)	Κατσίγαρος (tn)	Ορός Γιαουρτιού (tn)	Πούλπα Φρούτων (tn)	Υπόλειμμα Ακτινιδίων (tn)	Υπόλειμμα Φασολάκι (tn)	Υγρασία (tn)	Βινάση (tn)	Ορός Γάλακτος - Συμπυκνωμέ- νος (tn)	Τυρόγαλο (tn)
3/1/2025	0,0%	61,9%	17,9%	11,6%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	8,6%	0,0%	0,0%	0,0%
6/2/2025	3,1%	61,2%	13,2%	12,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	5,5%	3,3%	0,0%	1,4%
6/3/2025	2,7%	57,0%	12,0%	5,6%	0,0%	0,0%	0,0%	1,1%	13,6%	4,7%	1,4%	1,9%
3/4/2025	3,5%	48,4%	10,0%	5,1%	0,0%	0,0%	2,9%	1,8%	17,1%	5,8%	3,1%	2,3%
8/4/2025	3,5%	56,1%	7,2%	4,1%	0,0%	0,0%	2,5%	1,5%	2,0%	4,7%	2,5%	15,9%
16/4/2025	4,3%	56,0%	13,8%	2,8%	0,0%	0,0%	2,5%	1,5%	9,0%	0,0%	0,0%	10,1%
30/4/2025	3,5%	56,3%	11,2%	2,9%	0,0%	0,0%	2,5%	1,5%	10,2%	0,0%	0,0%	11,9%
6/5/2025	3,7%	60,9%	11,2%	2,2%	0,0%	0,0%	2,6%	1,6%	3,0%	3,4%	0,0%	11,4%
13/5/2025	4,0%	56,6%	13,4%	2,2%	0,0%	0,0%	2,5%	1,5%	3,7%	4,0%	1,8%	10,3%
23/5/2025	4,2%	52,6%	13,6%	2,3%	0,0%	2,4%	3,0%	1,8%	11,3%	5,2%	2,0%	1,8%
30/5/2025	3,8%	53,6%	12,0%	0,4%	0,0%	1,6%	3,1%	1,9%	3,3%	11,0%	1,2%	8,1%
4/6/2025	4,6%	53,7%	13,6%	0,2%	0,0%	4,0%	2,8%	1,7%	2,0%	10,0%	0,7%	6,6%
11/6/2025	4,3%	51,3%	12,6%	0,2%	0,0%	4,8%	2,7%	1,6%	7,2%	10,9%	1,9%	2,5%
18/6/2025	5,2%	50,3%	8,8%	0,1%	0,0%	6,9%	2,6%	1,5%	2,1%	12,0%	1,6%	9,0%
25/6/2025	5,8%	48,2%	7,5%	0,1%	0,0%	8,7%	2,9%	1,7%	9,6%	11,0%	2,1%	2,3%
1/7/2025	0,0%	54,4%	6,2%	0,1%	0,0%	9,9%	2,7%	1,6%	13,1%	0,0%	1,7%	10,2%
11/7/2025	4,9%	52,1%	6,4%	0,0%	6,8%	10,6%	2,4%	0,0%	0,0%	3,0%	3,0%	10,7%
16/7/2025	4,8%	52,4%	7,8%	0,3%	7,8%	12,4%	2,4%	0,0%	6,8%	3,9%	1,3%	0,0%
24/7/2025	4,6%	53,3%	9,5%	0,0%	0,0%	11,5%	2,3%	0,0%	10,6%	0,0%	0,0%	8,2%
4/8/2025	2,7%	59,8%	9,3%	0,0%	0,0%	6,5%	2,7%	0,0%	9,4%	7,5%	2,1%	0,0%
11/8/2025	2,3%	56,0%	11,1%	0,0%	0,0%	8,3%	2,3%	0,0%	7,1%	6,0%	0,0%	6,8%
19/8/2025	5,3%	54,0%	7,5%	0,0%	0,0%	10,4%	2,7%	0,0%	6,9%	4,9%	0,0%	8,3%
22/8/2025	5,0%	54,9%	8,8%	0,0%	0,0%	11,2%	2,5%	0,0%	12,1%	3,4%	0,0%	2,0%
26/8/2025	2,4%	57,0%	11,3%	0,0%	0,0%	11,1%	2,4%	0,0%	13,0%	2,7%	0,0%	0,0%
29/8/2025	5,9%	54,7%	7,3%	0,0%	0,0%	14,3%	3,0%	0,0%	2,6%	3,4%	0,0%	8,8%
2/9/2025	2,0%	57,9%	12,0%	0,0%	0,0%	12,8%	2,4%	0,0%	10,8%	0,5%	0,0%	1,7%
10/9/2025	1,4%	54,2%	11,3%	0,0%	0,0%	0,0%	2,3%	0,0%	20,5%	3,1%	0,0%	7,3%
19/9/2025	4,8%	55,8%	6,8%	0,0%	0,0%	12,2%	3,4%	0,0%	5,0%	3,4%	2,9%	5,7%
24/9/2025	3,0%	62,2%	7,7%	0,0%	4,6%	0,0%	2,5%	0,0%	10,8%	3,7%	0,9%	4,6%
1/10/2025	3,9%	51,2%	8,7%	0,0%	5,1%	12,0%	2,2%	0,0%	1,8%	3,9%	1,7%	5,6%
6/10/2025	2,8%	53,5%	9,8%	2,2%	4,9%	0,0%	2,4%	0,0%	15,2%	3,2%	1,2%	4,9%
7/10/2025	3,6%	63,2%	10,6%	1,3%	3,3%	8,5%	2,6%	0,0%	4,1%	2,8%	0,0%	0,0%
13/10/2025	1,6%	57,3%	8,1%	4,9%	4,9%	0,0%	2,6%	0,0%	14,6%	3,0%	0,0%	3,0%
14/10/2025	0,0%	60,4%	5,7%	5,3%	5,3%	0,0%	2,5%	0,0%	11,0%	3,1%	0,0%	6,6%
24/10/2025	1,5%	56,7%	8,0%	9,5%	8,3%	7,6%	0,0%	0,0%	2,4%	6,1%	0,0%	0,0%
31/10/2025	0,0%	53,9%	0,0%	18,6%	6,9%	7,0%	0,0%	0,0%	3,6%	4,6%	4,2%	1,3%
3/11/2025	0,0%	61,6%	0,0%	18,8%	4,3%	6,1%	0,0%	0,0%	0,0%	2,7%	2,3%	4,1%
12/11/2025	0,0%	55,1%	1,9%	25,9%	5,2%	4,4%	0,0%	0,0%	0,0%	2,4%	0,1%	4,9%
19/11/2025	0,0%	44,9%	7,5%	30,0%	5,3%	4,1%	0,0%	0,0%	0,1%	3,0%	0,0%	5,2%
26/11/2025	0,0%	44,6%	6,5%	22,4%	7,9%	9,7%	0,0%	0,0%	0,0%	4,9%	0,0%	4,0%
11/12/2025	2,8%	43,5%	4,4%	23,6%	3,2%	4,0%	2,8%	0,0%	0,0%	4,8%	0,0%	10,9%

% Σύσταση Υποστρώματος Μονάδας Α



Γράφημα 1: % σύσταση του υποστρώματος τροφοδοσίας Αναερόβιου Χωνευτή Μονάδας Α

5.1.3. Φυσικοχημικές Παράμετροι Αναερόβιας Χώνευσης Μονάδας Α

Στον Πίνακα 5 αποτυπώνεται η ανάλυση των βασικών παραμέτρων του αναερόβιου χωνευτή της Μονάδας Α, (pH, FOS/TAC, αμμωνιακά, ολικά στερεά και θερμοκρασία), οι οποίες αποτελούν τους «ζωτικούς δείκτες» της υγείας των μεθανογόνων μικροοργανισμών.

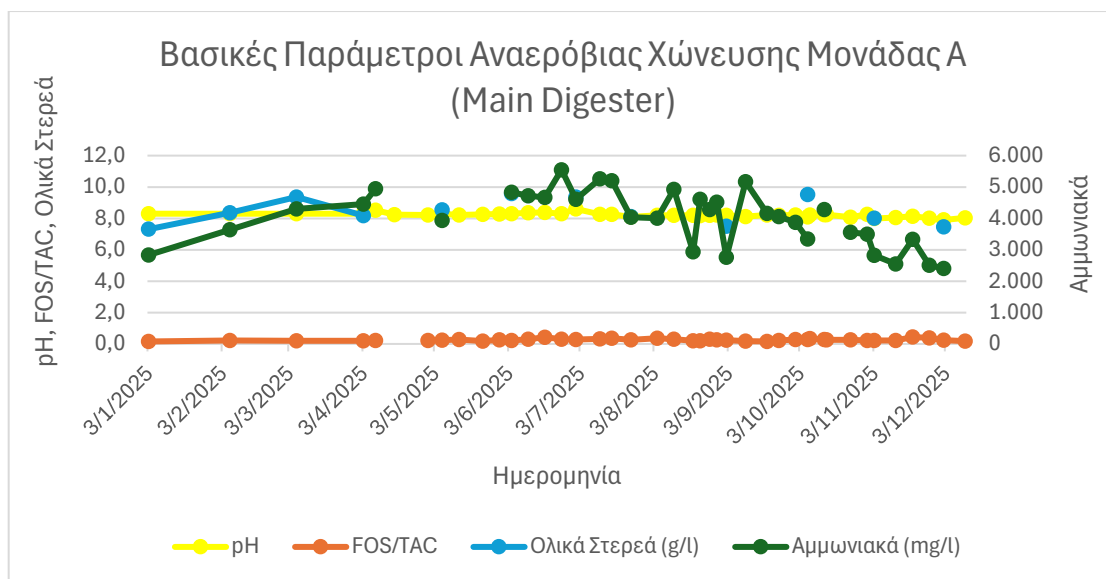
Το γράφημα της εικόνας 6 δείχνει ικανοποιητική σταθερότητα του pH του βασικού αναερόβιου χωνευτή σχεδόν καθόλη τη διάρκεια του έτους. Έτσι, κατά το μεγαλύτερο μέρος του έτους (Ιανουάριος – Σεπτέμβριος), το pH διατηρείται σε ελαφρώς αλκαλικά επίπεδα, μεταξύ 8,1 και 8,6, υποδηλώνοντας ισχυρή ρυθμιστική ικανότητα, κυρίως λόγω της συνεχούς τροφοδοσίας με αγελαδινή κοπριά. Ωστόσο, κατά της τελευταίους μήνες (Νοέμβριος – Δεκέμβριος) παρατηρείται μια σαφής πτωτική τάση, όπου το pH σταθεροποιείται στο 8,0 και αγγίζει τη χαμηλότερη τιμή του της αρχής Δεκεμβρίου (7,9). Η συμπεριφορά αυτή εξηγείται, καθώς συμπίπτει χρονικά με τη μαζική εισαγωγή κασσίγαρου στο υπόστρωμα, ο οποίος λόγω της οξύτητας του αυξάνει τη συγκέντρωση των πτητικών λιπαρών οξέων και προκαλεί μείωση των τιμών του pH.

Οι τιμές του λόγου FOS/TAC παρουσιάζουν μία σχετική σταθερότητα και διακύμανση εντός του επιθυμητού εύρους 0,2 – 0,3 κατά τη μεγαλύτερη διάρκεια του έτους. Εξάιρεση αποτελούν δύο περιπτώσεις υψηλής αιχμής. Η πρώτη κατά την καλοκαιρινή περίοδο στις 18 Ιουνίου, όπου η τιμή του FOS/TAC εκτινάσσεται στο 0,42 ξεπερνώντας το ιδανικό εύρος λειτουργίας (0,2 – 0,3), ίσως λόγω της απότομης τροφοδοσίας εύκολα διασπώμενης οργανικής ύλης (πούλπα φρούτων), η οποία δημιούργησε συσσώρευση οξέων. Η δεύτερη περίπτωση καταγράφεται της 19 Νοεμβρίου με τη μέγιστη τιμή FOS/TAC για το έτος (0,44) και η οποία οφείλεται στην απότομη αύξηση του ποσοστού του κασσίγαρου στην τροφοδοσία στα όρια του 30%. Η υπερφόρτωση αυτή σε οργανικό φορτίο προκάλεσε την προσωρινή καταπόνηση του συστήματος, καθώς της επόμενες εβδομάδες ο δείκτης υποχωρεί γρήγορα (στο 0,24 και 0,18), δείχνοντας ότι η μικροβιακή κοινότητα προσαρμόστηκε επιτυχώς.

Τα ολικά στερεά παρουσιάζουν μετρήσεις που κυμαίνονται μεταξύ 7,31 και 9,59 % κ.β., επιβεβαιώνοντας ότι ο κύριος χωνευτής (MAIN) λειτουργεί αποκλειστικά ως σύστημα υγρής αναερόβιας χώνευσης, όπου το στερεό περιεχόμενο διατηρείται κάτω από το 10% κ.β., ώστε να είναι εφικτή η μηχανική ανάδευση και η σωστή μεταφορά μάζας. Τέλος, οι συγκεντρώσεις των αμμωνιακών ($\text{NH}_4\text{-N}^+$) είναι γενικά υψηλές, με σημαντική αύξησή τους κατά τους καλοκαιρινούς μήνες (Ιούνιος – Ιούλιος), όταν και η συγκέντρωσή τους φτάνει και ξεπερνάει το ψυχολογικό όριο των 5.000mg/l. Αντίθετα τους φθινοπωρινούς μήνες και ειδικότερα τον Οκτώβριο, η συγκέντρωση των αμμωνιακών παρουσιάζει κατακόρυφη πτώση.

Πίνακας 5: Μετρήσεις Βασικών Παραμέτρων για το έτος 2025 στη δεξαμενή χώνευσης (main digester) της Μονάδας Α

Ημερομηνία	Χωνευτής	pH	FOS/TAC	Αμμωνιακά (mgN/l)	Ολικά Στερεά (% κ.β.)
3/1/2025	MAIN	8,3	0,16	2.831	7,31
6/2/2025	MAIN	8,3	0,22	3.640	8,35
6/3/2025	MAIN	8,3	0,19	4.306	9,36
¾/2025	MAIN	8,3	0,20	4.456	8,17
8/4/2025	MAIN	8,5	0,22	4.940	
16/4/2025	MAIN	8,2		-	
30/4/2025	MAIN	8,2	0,22	-	
6/5/2025	MAIN	8,3	0,23	3.937	8,55
13/5/2025	MAIN	8,2	0,29		
23/5/2025	MAIN	8,3	0,18		
30/5/2025	MAIN	8,3	0,26		
4/6/2025	MAIN	8,3	0,22	4.832	9,59
11/6/2025	MAIN	8,4	0,31	4.720	
18/6/2025	MAIN	8,4	0,42	4.665	
25/6/2025	MAIN	8,3	0,31	5.550	
1/7/2025	MAIN	8,6	0,29	4.608	9,36
11/7/2025	MAIN	8,3	0,31	5.265	
16/7/2025	MAIN	8,3	0,36	5.200	
24/7/2025	MAIN	8,1	0,25	4.040	8,12
4/8/2025	MAIN	8,2	0,37	4.006	
11/8/2025	MAIN	8,2	0,30	4.920	
19/8/2025	MAIN	8,2	0,20	2.938	
22/8/2025	MAIN	8,2	0,21	4.610	
26/8/2025	MAIN	8,2	0,29	4.280	
29/8/2025	MAIN	8,2	0,25	4.520	
2/9/2025	MAIN	8,2	0,23	2.761	7,51
10/9/2025	MAIN	8,1	0,18	5.170	
19/9/2025	MAIN	8,2	0,16	4.160	
24/9/2025	MAIN	8,2	0,22	4.060	
1/10/2025	MAIN	8,2	0,29	3.870	
6/10/2025	MAIN	8,1	0,28	3.347	9,52
7/10/2025	MAIN	8,2	0,34		
13/10/2025	MAIN	8,2	0,27	4.280	
14/10/2025	MAIN	8,2	0,26		
24/10/2025	MAIN	8,1	0,26	3.560	
31/10/2025	MAIN	8,3	0,23	3.500	
3/11/2025	MAIN	8,0	0,23	2.827	8,02
12/11/2025	MAIN	8,1	0,21	2.550	
19/11/2025	MAIN	8,1	0,44	3.335	
26/11/2025	MAIN	8,0	0,38	2.510	
2/12/2025	MAIN	7,9	0,24	2.407	7,46
11/12/2025	MAIN	8,0	0,18		



Γράφημα 2: Διακύμανση βασικών παραμέτρων στον αναερόβιο χωνευτή (Main Digester) της Μονάδας Α

Ο μεταχωνευτής (post digester) λειτουργεί ως το τελικό στάδιο σταθεροποίησης του υποστρώματος, όπου υποβαθμίζεται το εναπομείναν οργανικό φορτίο. Στον πίνακα 6 παρουσιάζεται η διακύμανση των αντίστοιχων βασικών παραμέτρων λειτουργίας του μεταχωνευτή.

Η σταθερότητα στις τιμές της θερμοκρασίας δείχνει ξεκάθαρα ότι ο χωνευτής λειτουργεί υπό θερμοφίλες συνθήκες, με τις τιμές να κυμαίνονται σχεδόν μόνιμα μεταξύ 51°C και 52,5°C για το μεγαλύτερο μέρος του έτους. Αξιοσημείωτη είναι η τάση ανόδου στα τέλη Νοεμβρίου και τον Δεκέμβριο, όπου η θερμοκρασία αγγίζει τις υψηλότερες τιμές της (54,5°C).

Το pH στον μεταχωνευτή εμφανίζεται ελαφρώς πιο ανεβασμένο και ακόμη πιο σταθερό σε σχέση με τον κύριο χωνευτή, κινούμενο σχεδόν αποκλειστικά μεταξύ 8,3 και 8,7. Η τάση αυτή είναι απόλυτα φυσιολογική, καθώς το υπόστρωμα έχει ήδη υποστεί την κύρια αποικοδόμηση, τα οργανικά οξέα έχουν καταναλωθεί σε μεγάλο βαθμό, οδηγώντας σε περαιτέρω αλκαλικότητα του μέσου. Ακόμα και κατά την περίοδο της ευρείας χρήσης κασίγαρου (Νοέμβριος – Δεκέμβριος), το pH πέφτει ελάχιστα (μέχρι το 8,2 της 2/12), δείχνοντας ότι ο μεταχωνευτής διαθέτει τεράστια ρυθμιστική ικανότητα.

Την ίδια εικόνα της ομαλοποίησης στον μεταχωνευτή, καταδεικνύουν και οι τιμές του FOS/TAC. Κατά τη διάρκεια σχεδόν όλου του έτους, ο δείκτης παραμένει σταθερά σε χαμηλά, εξαιρετικά ασφαλή επίπεδα (0,16 – 0,28), με μοναδική έντονη αιχμή να καταγράφεται της 13/5/2025 με 0,45, η οποία αποτελεί άμεση μεταφορά της πίεσης που δέχτηκε ο βασικός χωνευτής λίγο πριν ξεκινήσει η καλοκαιρινή περίοδος. Ακόμα και κατά τη φθινοπωρινή περίοδο, όπου η χρήση κασίγαρου προκάλεσε σημαντική αύξηση των τιμών του FOS/TAC στο βασικό χωνευτή, οι αντίστοιχες τιμές στο μεταχωνευτή παρουσιάζουν ήπια αύξηση (0,35 – 0,36), γεγονός που καταδεικνύει ότι η βασική χώνευση δρα ως προστασία του μεταχωνευτή από πιθανή οξίνιση.

Οι συγκεντρώσεις των αμμωνιακών στο μεταχωνευτή είναι ακόμα πιο υψηλές από ό,τι στον κύριο χωνευτή, αγγίζοντας ακραίες τιμές που ξεπερνούν τα 6.000 mg/L. Η αύξηση αυτή σε σχέση με τον κύριο χωνευτή οφείλεται στη συνεχιζόμενη αποικοδόμηση των πρωτεϊνών (από την κοτίσια και την αγελαδινή κοπριά), η οποία απελευθερώνει επιπλέον άζωτο. Όπως και στο βασικό χωνευτή, έτσι και στο μεταχωνευτή, από τον

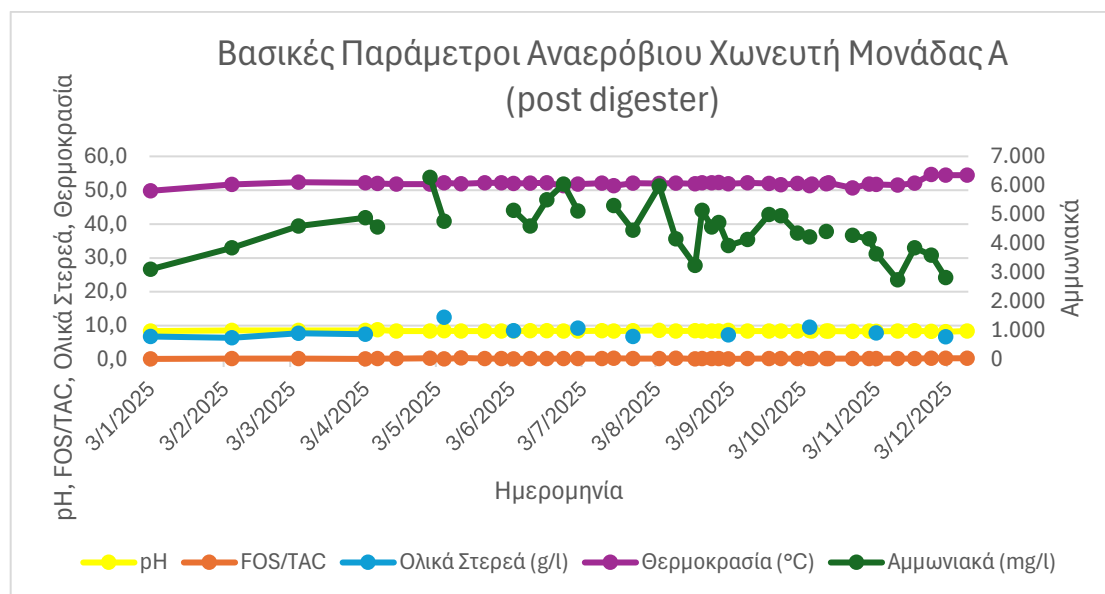
Οκτώβριο και μετά παρατηρείται ραγδαία πτώση των αμμωνιακών, ως αποτέλεσμα της τροφοδοσίας με τον φτωχό σε άζωτο κασιόγαρο.

Οι σποραδικές μετρήσεις των ολικών στερεών κινούνται μεταξύ 6,40% και 9,52% κ.β., συστηματικά χαμηλότερα (κατά 0,5 – 1% κ.β.) σε σχέση με της αντίστοιχες τιμές της στη βασική δεξαμενή. Αυτή η μείωση είναι ξεκάθαρη αποτύπωση της αποδοτικότητας του συστήματος, καθώς επιβεβαιώνει ότι η οργανική ύλη καταναλώνεται και μετατρέπεται επιτυχώς σε βιοαέριο.

Πίνακας 6: Μετρήσεις Βασικών Παραμέτρων για το έτος 2025 στη δεξαμενή χώνευσης (post digester) της Μονάδας Α

Ημερομηνία	Χωνευτής	pH	FOS/TAC	Αμμωνιακά (mgN/l)	Θερμοκρασία (°C)	Ολικά Στερεά (% κ.β.)
3/1/2025	POST	8,4	0,16	3.105	49,8	6,75
6/2/2025	POST	8,6	0,23	3.845	51,7	6,40
6/3/2025	POST	8,6	0,22	4.594	52,4	7,75
3/4/2025	POST	8,6	0,20	4.888	52,2	7,43
8/4/2025	POST	8,7	0,27	4.570	52,0	
16/4/2025	POST	8,4	0,25		51,8	
30/4/2025	POST	8,4	0,32	6.275	51,8	
6/5/2025	POST	8,5	0,21	4.767	52,2	12,50
13/5/2025	POST	8,4	0,45		51,9	
23/5/2025	POST	8,4	0,22		52,2	
30/5/2025	POST	8,4	0,26		52,2	
4/6/2025	POST	8,4	0,19	5.140	52,0	8,47
11/6/2025	POST	8,5	0,28	4.600	52,1	
18/6/2025	POST	8,5	0,28	5.500	52,2	
25/6/2025	POST	8,4	0,26	6.040	51,4	
1/7/2025	POST	8,4	0,26	5.122	51,8	9,25
11/7/2025	POST	8,5	0,28		52,1	
16/7/2025	POST	8,4	0,35	5.300	51,3	
24/7/2025	POST	8,5	0,22	4.457	52,1	6,76
4/8/2025	POST	8,6	0,25	5.975	52,0	
11/8/2025	POST	8,4	0,33	4.155	52,0	
19/8/2025	POST	8,5	0,21	3.245	51,9	
22/8/2025	POST	8,4	0,28	5.135	52,1	
26/8/2025	POST	8,4	0,28	4.560	52,2	
29/8/2025	POST	8,4	0,27	4.720	52,3	
2/9/2025	POST	8,6	0,21	3.924	51,9	7,24
10/9/2025	POST	8,4	0,24	4.130	52,2	
19/9/2025	POST	8,4	0,25	5.000	52,0	
24/9/2025	POST	8,4	0,28	4.950	51,6	
1/10/2025	POST	8,4	0,22	4.355	52,0	
6/10/2025	POST	8,5	0,24	4.226	51,4	9,52
7/10/2025	POST	8,4	0,28	-	51,8	
13/10/2025	POST	8,4	0,25	4.410	51,9	
14/10/2025	POST	8,4	0,22	-	52,1	

24/10/2025	POST	8,3	0,26	4.280	50,7	
31/10/2025	POST	8,4	0,24	4.160	51,8	
3/11/2025	POST	8,3	0,22	3.642	51,7	7,87
12/11/2025	POST	8,4	0,24	2.740	51,6	
19/11/2025	POST	8,5	0,25	3.850	52,1	
26/11/2025	POST	8,3	0,36	3.595	54,6	
2/12/2025	POST	8,2	0,35	2.820	54,5	6,66
11/12/2025	POST	8,4	0,34		54,5	



Γράφημα 3: Διακύμανση βασικών παραμέτρων στον αναερόβιο χωνευτή (Post Digester) της Μονάδας Α

5.1.4. Δεδομένα παραγωγής βιοαερίου στη Μονάδα Α

Στον πίνακα 5 παρουσιάζονται τα δεδομένα παραγωγής βιοαερίου, με ειδική αναφορά στο συνολικό παραγόμενο αέριο, το ποσοστό μεθανίου σε αυτό, της προσμίξεις υδροθείου και το λόγο του παραγόμενου αερίου προς το θεωρητικό με βάση τη σύσταση υποστρώματος.

Ο συνολικός όγκος του παραγόμενου βιοαερίου παρουσιάζει διακυμάνσεις που συνδέονται άμεσα με το ενεργειακό φορτίο της τροφοδοσίας. Η πορεία της παραγωγής βιοαερίου κατά το έτος 2025 εμφανίζεται σταθερή από της αρχές του έτους (~10.000 – 10.500 m³/ημέρα) μέχρι και την αρχή του καλοκαιριού όταν παρατηρείται μία χαρακτηριστική τάση ανόδου (~10.500 – 11.000 m³/ημέρα). Η τάση αυτή διακόπτεται προσωρινά από μια σύντομη φθινοπωρινή κάμψη από τα μέσα Οκτωβρίου έως τα μέσα Νοεμβρίου (~8.000 – 9.000 m³/ημέρα), πριν εκτιναχθεί οριστικά στο τέλος του έτους (~11.000 m³/ημέρα).

Η ποιοτική σύσταση του βιοαερίου σε μεθάνιο (CH₄) χαρακτηρίζεται από αξιοσημείωτη σταθερότητα, διατηρώντας μια μέση τάση κοντά στο 58%–59% για το μεγαλύτερο μέρος του έτους, ενώ χρήζει ιδιαίτερης αναφοράς η περίοδος του Οκτωβρίου, κατά την οποία το ποσοστό του μεθανίου υπερβαίνει και το 60%. Εξαιρέση αρνητική αποτελούν οι δύο τελευταίες εβδομάδες του έτους κατά την οποία καταγράφεται έντονη μεταβλητότητα με υποχώρηση του ποσοστού στο ελάχιστο 56,5%, που υποδηλώνει μια προσωρινή βιολογική καταπόνηση των μεθανογόνων βακτηρίων.

Η συγκέντρωση του υδροθείου (H_2S) παρουσιάζει την πιο ξεκάθαρη και έντονη εποχική τάση, χωρίζοντας το έτος σε δύο αντίθετες φάσεις λειτουργίας. Από τον Φεβρουάριο έως και τον Αύγουστο αναπτύσσεται μια σταθερά υψηλή τάση με τιμές που ξεπερνούν συστηματικά τα 1.200 ppm (με μέγιστο τα 1.956 ppm τον Μάιο), εξαιτίας της αυξημένης χρήσης πλούσιων σε θείο κτηνοτροφικών αποβλήτων. Από τον Σεπτέμβριο και μετά, η τάση αντιστρέφεται θεαματικά με το υδρόθειο να κατακρημνίζεται σε σχεδόν μηδενικά επίπεδα (<50 ppm), καθώς η τροφοδοσία στρέφεται σε αγροβιομηχανικά υπολείμματα (πούλπα φρούτων και κατσίγαρο) που στερούνται θείου, βελτιώνοντας δραστικά την καθαρότητα του αερίου.

Τέλος, ο λόγος του πραγματικού παραγόμενου προς το θεωρητικό αέριο, ο οποίος αποτελεί τον δείκτη βιολογικής αποδοτικότητας της διεργασίας, παρουσιάζει μια κυμαδοειδή τάση που αποτυπώνει τον χρόνο προσαρμογής του συστήματος στις αλλαγές της τροφοδοσίας. Κατά της πρώτους μήνες του έτους, ο δείκτης εμφανίζει μια σταθερά υψηλή τάση (>75% και έως 93%), επιβεβαιώνοντας ότι η μονάδα λειτουργεί πολύ κοντά στο μέγιστο των δυνατοτήτων της υπό σταθερές συνθήκες. Κατά τη θερινή περίοδο, η τάση γίνεται πιο ασταθής με ενδιάμεσες βυθίσεις, οι οποίες αντικατοπτρίζουν τις περιόδους υψηλής συγκέντρωσης αμμωνιακών που επιβραδύνουν τον μεταβολισμό. Ωστόσο, η πιο χαρακτηριστική τάση κάμψης εμφανίζεται κατά την έναρξη της φθινοπωρινής περιόδου, όπου ο δείκτης υποχωρεί προσωρινά κοντά στο 62%. Η πτώση αυτή δεν οφείλεται σε δυσλειτουργία, αλλά στην απότομη εισαγωγή του κατσίγαρου, ο οποίος αυξάνει απότομα τις θεωρητικές προσδοκίες του μοντέλου, αναγκάζοντας το σύστημα να εισέλθει σε μια σύντομη φάση προσαρμογής (lag phase) πριν επανέλθει σε τροχιά πλήρους απόδοσής της προς το τέλος του έτους.

Πίνακας 7: Δεδομένα παραγόμενου προϊόντος της Μονάδας Α

Ημερομηνία	Συνολικό Παραγόμενο αέριο (m^3)	Ποσοστό CH_4	H_2S (ppm)	Θεωρητικό Παραγόμενο αέριο με βάση τη σύσταση υποστρώματος (m^3)	% Παραγόμενο / Θεωρητικό
3/1/2025	10.982,00	58,43%	640,62	11.763,72	93,4%
6/2/2025	10.482,00	57,90%	1.217,33	14.050,13	74,6%
6/3/2025	10.607,00	59,76%	485,56	12.396,78	85,6%
4/2025	10.519,00	58,91%	62,2	11.842,94	88,8%
8/4/2025	9.655,35	59,88%	80,82	13.847,98	69,7%
16/4/2025	10.624,00	57,80%	582,39	11.958,95	88,8%
30/4/2025	10.098,00	56,59%	124,98	11.038,60	91,5%
6/5/2025	10.220,35	56,98%	153,69	12.905,51	79,2%
13/5/2025	10.068,00	58,62%	1.160,79	14.169,45	71,1%
23/5/2025	11.194,58	57,39%	798,67	12.318,62	90,9%
30/5/2025	10.873,00	57,52%	886,37	13.981,39	77,8%
4/6/2025	11.467,00	56,79%	1.480,05	15.549,52	73,7%
11/6/2025	10.988,00	57,33%	2.055,44	16.470,87	66,7%
18/6/2025	11.634,00	56,91%	1.702,56	17.527,75	66,4%
25/6/2025	10.938,00	58,55%	2.218,00	14.699,41	74,4%
1/7/2025	10.635,90	58,60%	1.568,35	8.323,94	127,8%
11/7/2025	9.325,00	58,09%	764,94	13.470,23	69,2%
16/7/2025	10.050,00	57,78%	1.682,39	13.748,10	73,1%
24/7/2025	10.885,00	54,20%	587,18	12.099,94	90,0%
4/8/2025	10.200,00	58,49%	1.617,59	13.267,67	76,9%

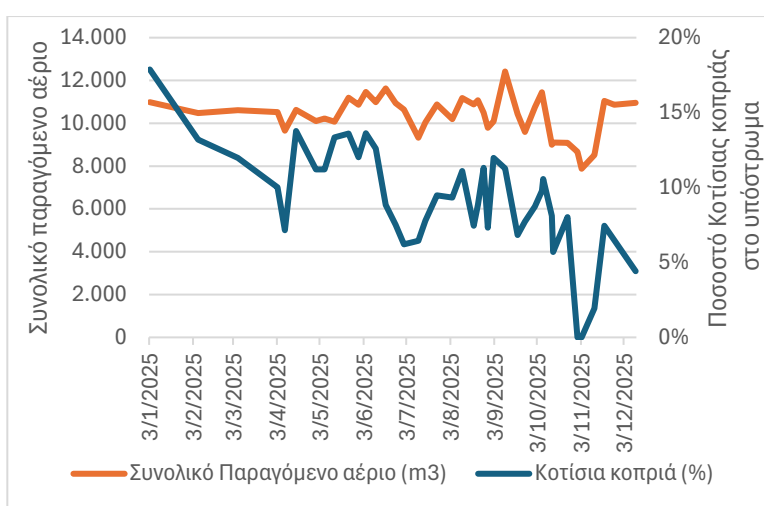
11/8/2025	11.173,00	61,46%	1.897,73	14.948,82	74,7%
19/8/2025	10.879,35	58,58%	1.282,36	12.939,06	84,1%
22/8/2025	11.071,00	56,68%	1.354,02	12.756,75	86,8%
26/8/2025	10.492,23	59,05%	714,38	12.313,05	85,2%
29/8/2025	9.783,00	59,53%	673,22	11.587,34	84,4%
2/9/2025	10.091,35	57,81%	787,51	11.427,22	88,3%
10/9/2025	12.420,00	58,20%	2.029,00	11.808,13	105,2%
19/9/2025	10.437,00	61,18%	844,35	9.629,81	108,4%
24/9/2025	9.600,00	58,80%	406,89	11.426,14	84,0%
1/10/2025	10.747,00	60,30%	1.067,45	16.403,00	65,5%
6/10/2025	11.450,00	61,36%	1.737,90	12.298,31	93,1%
7/10/2025	11.114,23	60,61%	1.969,42	12.447,58	89,3%
13/10/2025	8.996,00	62,29%	284,68	10.847,05	82,9%
14/10/2025	9.104,23	62,33%	165,65	10.537,89	86,4%
24/10/2025	9.091,00	59,47%	833,32	14.481,21	62,8%
31/10/2025	8.666,00	62,77%	204,68	13.797,86	62,8%
3/11/2025	7.877,00	64,34%	113,9	12.175,52	64,7%
12/11/2025	8.520,00	63,96%	72,84	13.608,48	62,6%
19/11/2025	11.052,00	55,72%	124,34	14.416,99	76,7%
26/11/2025	10.866,00	56,78%	177,84	13.728,93	79,1%
11/12/2025	10.962,00	56,88%	343,46	14.329,26	76,5%

5.1.5. Επίδραση της σύστασης του υποστρώματος και των φυσικοχημικών παραμέτρων στην παραγωγή βιοαερίου στη Μονάδα Α

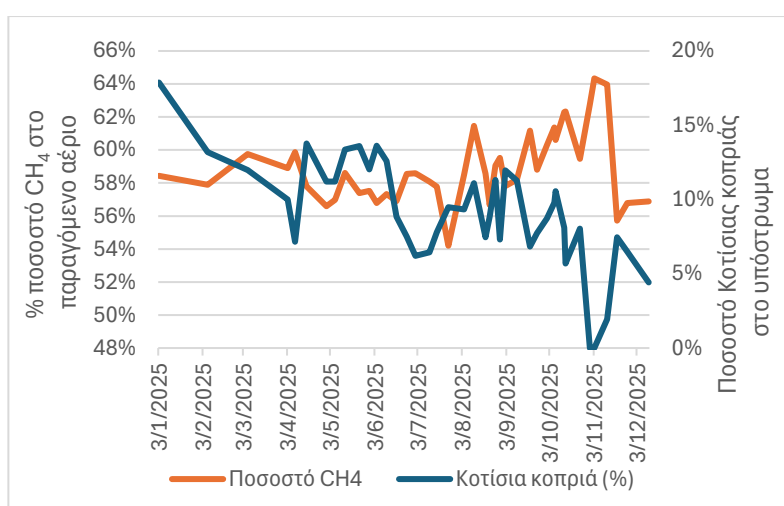
Η συνδυαστική αξιολόγηση των λειτουργικών δεδομένων της μονάδας Α αναδεικνύει τις στενές αλληλεξαρτήσεις μεταξύ της τροφοδοσίας, των φυσικοχημικών συνθηκών και της τελικής ενεργειακής απόδοσης. Η ανάλυση των συσχετίσεων αυτών επιτρέπει τη χαρτογράφηση των παραγόντων που ευνοούν ή παρεμποδίζουν τη διεργασία, προσφέροντας μια ολοκληρωμένη εικόνα της αναερόβιας συγχώνευσης για το έτος 2025.

Από τα δεδομένα φαίνεται ότι όλα τα υποστρώματα δεν επηρεάζουν με τον ίδιο τρόπο την εγκατάσταση. Κάποια φαίνονται να ανεβάζουν κυρίως τον όγκο παραγωγής, κάποια να βελτιώνουν περισσότερο την απόδοση ως προς το θεωρητικό, ενώ άλλα φαίνεται να έχουν αρνητική επίδραση είτε στον όγκο, είτε στην απόδοση είτε και στα δύο.

Η χρήση κοτίσιας κοπριάς, παρότι δεν αποτελεί το κυρίαρχο συστατικό βελτιστοποίησης της παραγωγής δείχνει να έχει απόλυτα θετική επίδραση στην παραγωγή βιοαερίου. Όπως φαίνεται και στο γράφημα 4, το γράφημα της % σύστασης της κοτίσιας κοπριάς στην τροφοδοσία ακολουθεί την τάση του γραφήματος παραγωγής βιοαερίου. Αντίθετα, στο γράφημα 5 φαίνεται ότι η χρήση κοτίσιας κοπριάς δείχνει να έχει οριακά αρνητική επίδραση στο % ποσοστό του μεθανίου στο βιοαέριο.

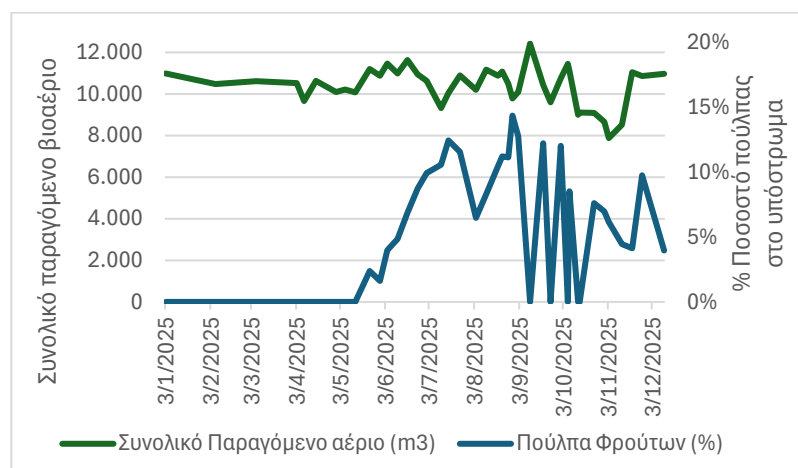


Γράφημα 4: Συγκριτικό διάγραμμα % προσθήκης κοτίσιας κοπριάς στην τροφοδοσία του χωνευτή και του συνολικού παραγόμενου βιοαερίου

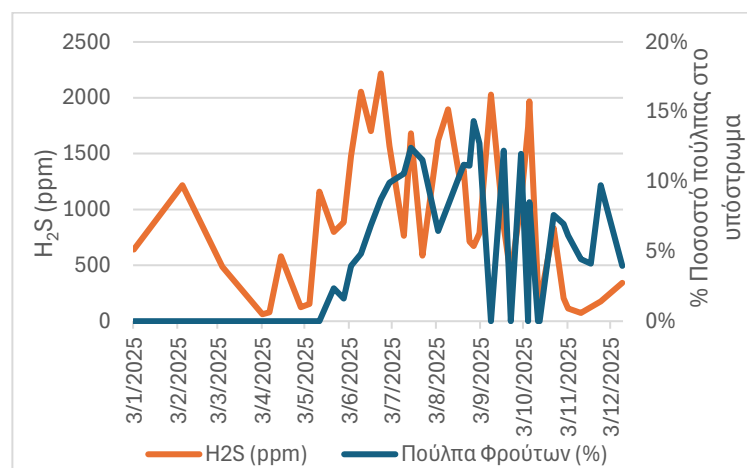


Γράφημα 5: Συγκριτικό διάγραμμα % προσθήκης κοτίσιας κοπριάς στην τροφοδοσία του χωνευτή και % CH₄ στο βιοαέριο

Η χρήση της πούλπας φρούτων ως υπόστρωμα τροφοδοσίας χαρακτηρίζεται από έντονη εποχικότητα, καθώς εμφανίζεται στο μίγμα αποκλειστικά κατά της θερινούς μήνες (Ιούνιο έως Αύγουστο), ακολουθώντας πιστά την περίοδο αιχμής της αγροτικής συγκομιδής και επεξεργασίας (γραφήματα 6 και 7).



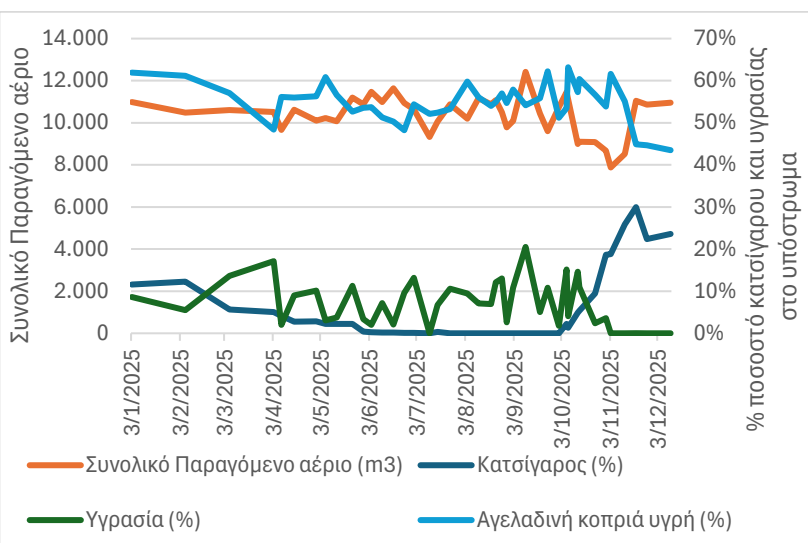
Γράφημα 6: Συγκριτικό διάγραμμα % προσθήκης πούλπας φρούτων στην τροφοδοσία του χωνευτή και του συνολικού παραγόμενου βιοαερίου



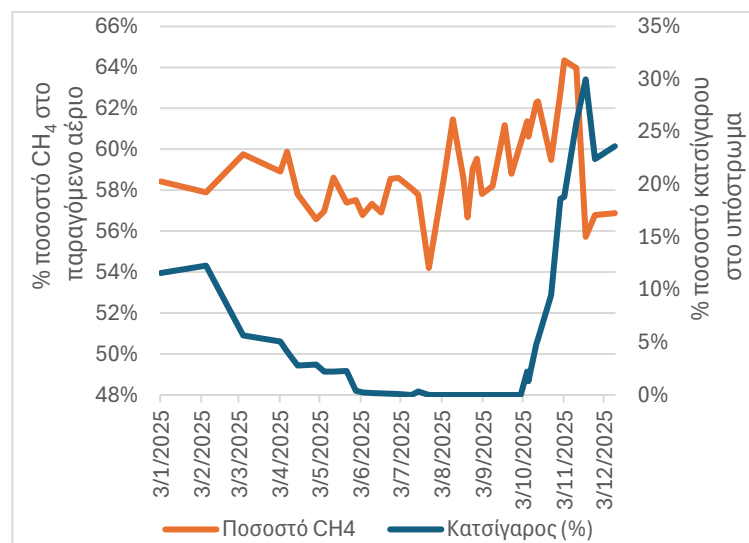
Γράφημα 7: Συγκριτικό διάγραμμα % προσθήκης πούλπας φρούτων στην τροφοδοσία του χωνευτή και της παραγωγής προσμίξεων υδροθείου

Υψηλότερη εποχικότητα χαρακτηρίζει και τη χρήση κασίγαρου, όπως ονομάζονται τα υγρά απόβλητα ελαιουργείων. Η χρήση του στην τροφοδοσία του χωνευτή της μονάδας Α είναι έντονη κατά τους χειμερινούς μήνες. Από το γράφημα 8 φαίνεται ότι η αύξηση του ποσοστού δείχνει αρχικά να μην έχει επίδραση στην παραγωγή αερίου. Ωστόσο, της αρχές Νοεμβρίου η αύξηση του ποσοστού του κασίγαρου στα επίπεδα του 30% προκαλεί ραγδαία κατακόρυφη αύξηση του παραγόμενου αερίου, από την χαμηλότερη ετήσια τιμή της τάξης των 8.000m³ στα επίπεδα των 11.000m³. Μία εξήγηση του παραπάνω είναι η μείωση του ποσοστού υγρασίας και της αγελαδινής κοπριάς ακριβώς την ίδια περίοδο, το οποίο ήταν πιθανώς στρατηγική απόφαση λόγω της υψηλής υγρασίας που χαρακτηρίζει τα υγρά υπολείμματα ελαιουργίας. Η χρήση του κασίγαρου στο ίδιο χρονικό διάστημα φαίνεται να επηρεάζει αρνητικά το ποσοστό

συγκέντρωσης CH₄ στο παραγόμενο αέριο, μειώνοντάς το κατά τρεις ποσοστιαίες μονάδες (γράφημα 9).

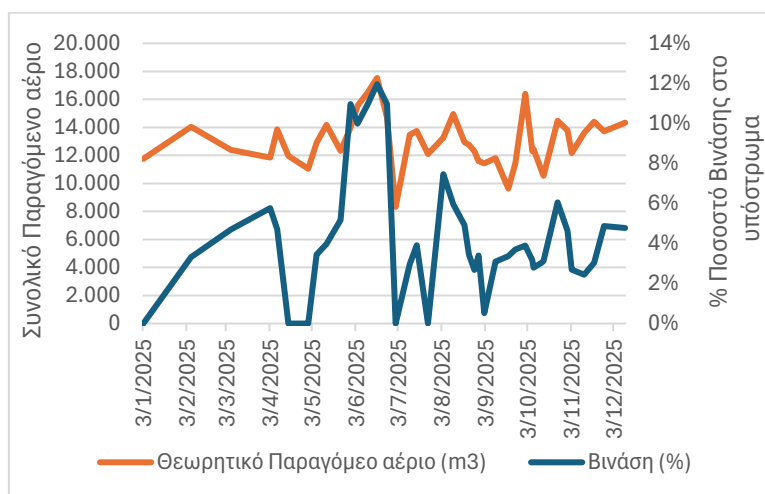


Γράφημα 8: Συγκριτικό διάγραμμα % προσθήκης κασιίγαρου στην τροφοδοσία του χωνευτή σε συνδυασμό με το % ποσοστό υγρασίας και αγελαδινής υγρής κοπριάς και του συνολικού παραγόμενου βιοαερίου



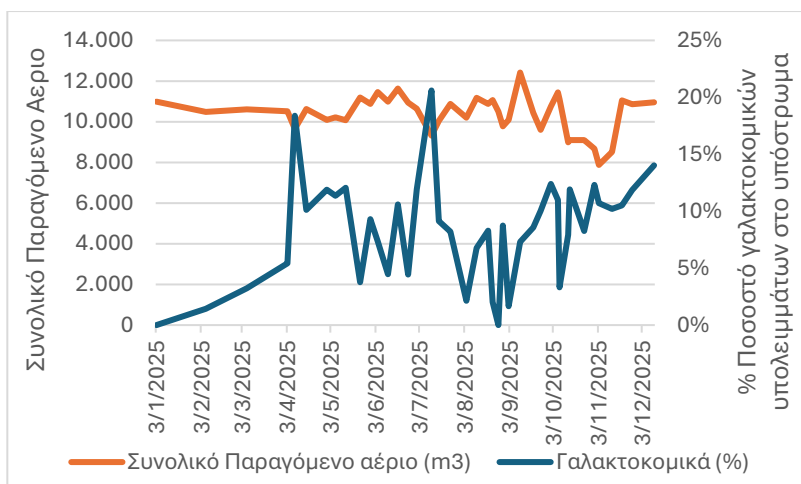
Γράφημα 9: Συγκριτικό διάγραμμα % προσθήκης κασιίγαρου στην τροφοδοσία του χωνευτή και του ποσοστού CH₄ στο αέριο

Η βινάση είναι ένα φυσικό οργανικό παραπροϊόν που προέρχεται από την απόσταξη μελάσας ζαχαροκάλαμου, ζαχαροτεύτλων ή την επεξεργασία οινοποιίας. Παρόμοια εικόνα και ίσως ακόμα πιο έντονη δείχνει να έχει η βινάση ως προς την τάση αυξομειώσεως του παραγόμενου αερίου σε σύγκριση με το ποσοστό χρήσης της στο τροφοδοτούμενο υπόστρωμα, όπως αποτυπώνεται στο γράφημα 10.

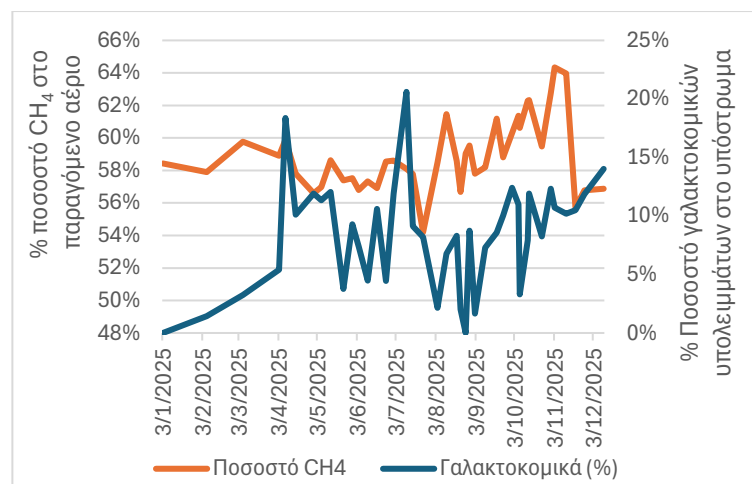


Γράφημα 10: Συγκριτικό διάγραμμα % προσθήκης βινάσης στην τροφοδοσία του χωνευτή και του συνολικού παραγόμενου βιοαερίου

Αντίθετα, η επί συνόλου χρήση υπολειμμάτων γαλακτοκομικής δραστηριότητας ως υπόστρωμα τροφοδοσίας έχει οριακά αρνητική επίδραση ως προς το συνολικό παραγόμενο βιοαέριο. Όπως φαίνεται από τη μελέτη του γραφήματος 11, η αύξηση του % ποσοστού χρήσης υπολειμμάτων γαλακτοβιομηχανιών μειώνει τη συνολική παραγωγή, ενώ σύμφωνα και με το γράφημα 12 η τάση φαίνεται να είναι οριακά αρνητική και ως προς το % ποσοστό μεθανίου κατά τη χρήση της.

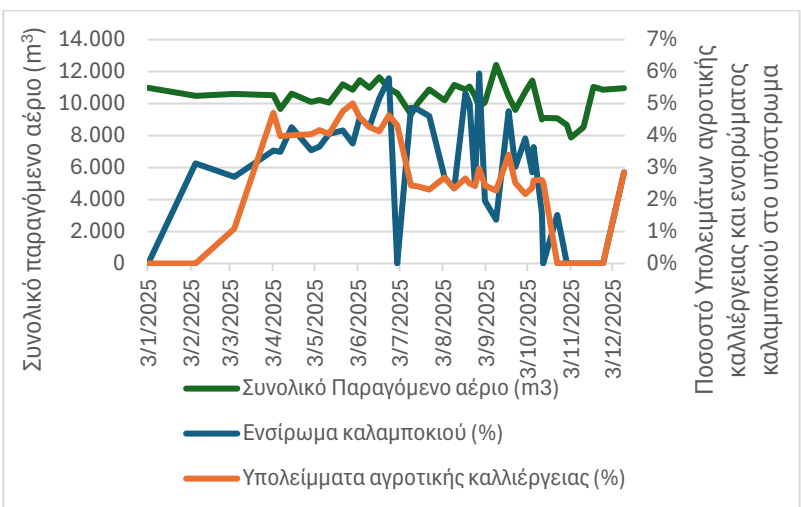


Γράφημα 11: Συγκριτικό διάγραμμα % προσθήκης υπολειμμάτων γαλακτοβιομηχανικής δραστηριότητας στην τροφοδοσία του χωνευτή και του συνολικού παραγόμενου βιοαερίου

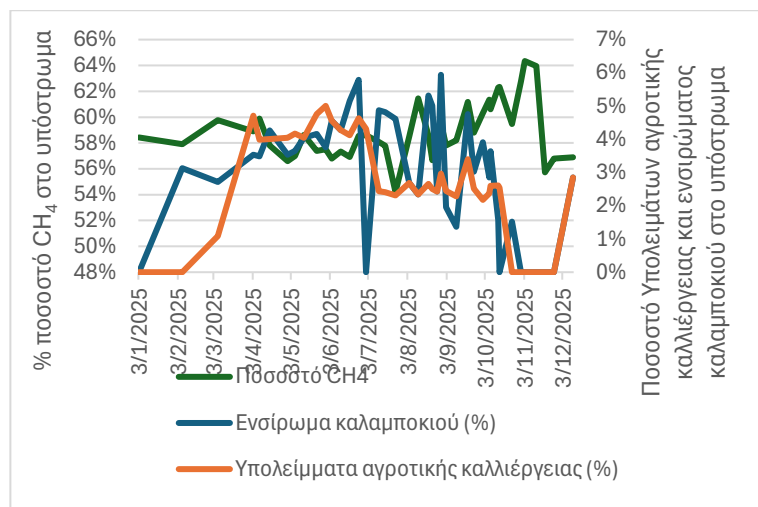


Γράφημα 12: Συγκριτικό διάγραμμα % προσθήκης υπολειμμάτων γαλακτοβιομηχανικής δραστηριότητας στην τροφοδοσία του χωνευτή και του % ποσοστού CH₄ στο παραγόμενο αέριο.

Τέλος, η χρήση υπολειμμάτων αγροτικής καλλιέργειας από ακτινίδια και φασολάκι καθώς και η χρήση ενσιρώματος καλαμποκιού γίνεται σε χαμηλό ποσοστό επί του συνολικού υποστρώματος και δε φαίνεται να επιδρούν μεμονωμένα στο συνολικό παραγόμενο αέριο, αλλά μόνο ως συμπλήρωμα της συνολικής τροφοδοσίας. Σε κάθε περίπτωση η χρήση τους δεν δείχνει να επηρεάζει την τάση παραγωγής του βιοαερίου, ούτε και την περιεκτικότητά του σε μεθάνιο (γραφήματα 13 και 14).



Γράφημα 13: Συγκριτικό διάγραμμα % προσθήκης υπολειμμάτων αγροτικής δραστηριότητας και ενσιρώματος καλαμποκιού στην τροφοδοσία του χωνευτή και του συνολικού παραγόμενου βιοαερίου



Γράφημα 14: Συγκριτικό διάγραμμα % προσθήκης υπολειμμάτων αγροτικής δραστηριότητας και ενσιρώματος καλαμποκιού στην τροφοδοσία του χωνευτή και του % ποσοστού CH₄ στο παραγόμενο αέριο.

5.2. Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Μονάδας Β

5.2.1. Εισαγωγικά

Η μονάδα αναερόβιας χώνευσης και παραγωγής βιοαερίου “ΒΙΟΑΕΡΙΟ ΛΑΓΚΑΔΑ Α.Ε.” διενεργεί σειρά εργαστηριακών αναλύσεων σε εβδομαδιαία βάση σε εξωτερικό εργαστήριο αναλύσεων υδάτων και λυμάτων διαπιστευμένο κατά ISO17025. Στο παρόν κεφάλαιο παρατίθενται και αναλύονται διεξοδικά τα πειραματικά δεδομένα και τα λειτουργικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την παρακολούθηση της μονάδας

αναερόβιας χώνευσης κατά τη διάρκεια του έτους 2025. Η ανάλυση επικεντρώνεται στην ποσοτική και ποιοτική αξιολόγηση των πρώτων υλών (σύσταση υποστρώματος), καθώς και στη συσχέτισή τους με κρίσιμες παραμέτρους λειτουργίας του αντιδραστήρα (θερμοκρασία, pH, FOS/TAC, αμμωνιακά ιόντα $\text{NH}_4\text{-N}^+$, ολικά στερεά).

5.2.2. Σύνθεση και διαχείριση πρώτων υλών – Σύσταση υποστρώματος

Η σύσταση της τροφοδοσίας του αναερόβιου χωνευτή της μονάδας Β, όπως αυτή απεικονίζεται στους πίνακες 8 και 9, βασίζεται σε ένα μίγμα οργανικών υποστρωμάτων φυτικής και ζωικής προέλευσης, με στόχο τη διατήρηση σταθερής βιολογικής διεργασίας και τη βέλτιστη παραγωγή βιοαερίου. Η συνολική ημερήσια τροφοδοσία της μονάδας κυμαίνεται από περίπου 194 έως 227 tn/ημέρα, με μέση ημερήσια ποσότητα ~210 tn/ημέρα. Η σχετικά μικρή διακύμανση της συνολικής τροφοδοσίας καταδεικνύει την προσπάθεια διατήρησης σταθερού οργανικού φορτίου και χρόνου παραμονής στον χωνευτή, στοιχείο ιδιαίτερα σημαντικό για την ομαλή λειτουργία της αναερόβιας χώνευσης και την αποφυγή διαταραχών στη μικροβιακή δραστηριότητα. Η διαχείριση των πρώτων υλών πραγματοποιείται με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται συνεχής και ομοιόμορφη τροφοδοσία, παρά της εποχικές διαφοροποιήσεις στη διαθεσιμότητα ορισμένων υποστρωμάτων.

Κυρίαρχο υπόστρωμα της τροφοδοσίας αποτελεί η υγρή αγελαδινή κοπριά, η οποία συμμετέχει κατά μέσο όρο σε ποσοστό περίπου 55% της συνολικής ημερήσιας τροφοδοσίας και σε αρκετές περιπτώσεις υπερβαίνει το 60%. Η χρήση της ως βασικού υποστρώματος οφείλεται κυρίως στη σταθερή διαθεσιμότητα, στη μεγάλη περιεκτικότητα σε υγρασία και στην υψηλή συγκέντρωση αναερόβιων μικροοργανισμών που συμβάλλουν στη σταθεροποίηση της διεργασίας. Παράλληλα, η αγελαδινή κοπριά εμφανίζει καλή ρυθμιστική ικανότητα και συμβάλλει στη διατήρηση κατάλληλων συνθηκών για τη δράση των μεθανογόνων βακτηρίων. Παρότι, η θεωρητική παραγωγή βιοαερίου της αγελαδινής κοπριάς είναι χαμηλότερη σε σχέση με άλλα ενεργειακά υποστρώματα, η συνεχής και αξιόπιστη παροχή της, την καθιστά τον βασικό «φορέα» της διεργασίας χώνευσης. Σημαντική συμμετοχή εμφανίζει και το τυρόγαλο, με μέση ποσοστιαία συμμετοχή περίπου 12% και περιόδους μέσα στο έτος που αγγίζει το 20%, το οποίο χρησιμοποιείται συστηματικά λόγω της υψηλής βιοαποδομησιμότητάς του και της σημαντικής περιεκτικότητας σε διαλυμένα οργανικά συστατικά, κυρίως λακτόζη και πρωτεΐνες.

Σταθερή συμμετοχή στο υπόστρωμα παρουσιάζει η στερεή κοτίσια κοπριά με μέση τιμή περίπου 5%, η οποία χρησιμοποιείται για την ενίσχυση του οργανικού φορτίου. Η παρουσία της συμβάλλει στη βελτίωση της σχέσης άνθρακα της άζωτο (C/N) και στην παροχή πιο αργά βιοαποδομήσιμου οργανικού υλικού, το οποίο βοηθά στη σταδιακή παραγωγή βιοαερίου. Παράλληλα, το ενσίρωμα καλαμποκιού, με μέση συμμετοχή περίπου 7%, αποτελεί ενεργειακό υπόστρωμα υψηλής απόδοσης σε μεθάνιο λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε υδατάνθρακες και εύκολα αποδομήσιμη οργανική ύλη και η χρήση του γίνεται κυρίως συμπληρωματικά ώστε να αυξάνεται η ενεργειακή απόδοση της μονάδας.

Ορισμένα υποστρώματα χρησιμοποιούνται αποκλειστικά ή κυρίως εποχικά, ανάλογα με τη διαθεσιμότητά τους στην αγροδιατροφική παραγωγή. Ο κασιόγαρος χρησιμοποιείται αποκλειστικά κατά την ελαιοκομική περίοδο από Οκτώβριο έως Ιανουάριο, αποτελώντας χαρακτηριστικό εποχικό υπόστρωμα με μέση συμμετοχή τη συγκεκριμένη περίοδο περίπου 18%. Παρότι η χρήση του απαιτεί προσεκτική δοσολογία λόγω της υψηλής οργανικής φόρτισης και της παρουσίας φαινολικών ενώσεων, η αξιοποίησή του προσφέρει σημαντική ενεργειακή ενίσχυση. Αντίθετα, η χρήση υγρής κοτίσιας κοπριάς λαμβάνει χώρα αποκλειστικά τους καλοκαιρινούς μήνες και σε πολύ

υψηλά ποσοστά από 10 – 18% της τροφοδοσίας. Η χρήση της αποκλειστικά κατά τους καλοκαιρινούς μήνες πιθανώς συνδέεται με την αντίστοιχη απουσία τυρόγαλου, οπότε η υγρή κοτίσια κοπριά δρα ως υποκατάστατο υπόστρωμα υψηλού οργανικού φορτίου και υψηλού ποσοστού υγρασίας.

Παρά τη γενική παραδοχή της εποχικής βιομηχανικής δραστηριότητας επεξεργασίας και τυποποίησης προϊόντων φρούτων, στη Μονάδα αναερόβιας χώνευσης «ΒΙΟΑΕΡΙΟ ΛΑΓΚΑΔΑ» η χρήση πούλπας φρούτων γίνεται με σταθερή κανονικότητα καθόλη τη διάρκεια του έτους εκτός από της τελευταίους μήνες του έτους με μέση συμμετοχή >5% και με την καλοκαιρινή περίοδο να αγγίζει το 10%. Η υψηλή περιεκτικότητά της σε σάκχαρα, τα οποία αποδομούνται ταχύτατα, μπορεί να οδηγήσει σε παραγωγή βιοαερίου πλούσιο σε μεθάνιο.

Τέλος, υλικά όπως η κοτίσια κοπριά υγρής μορφής, το ρυζάλευρο και τα υπολείμματα ακτινιδίου συμμετέχουν σε μικρότερες ποσότητες αλλά με σχετική κανονικότητα, λειτουργώντας κυρίως ως συμπληρωματικά υποστρώματα εξισορρόπησης της τροφοδοσίας.

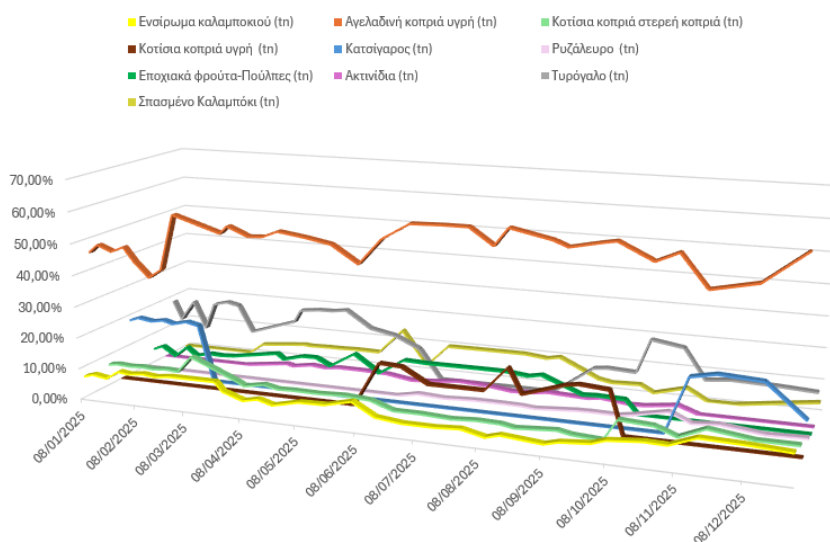
Πίνακας 8: Σύσταση υποστρώματος τροφοδοσίας αναερόβιου χωνευτή (main digester) της Μονάδας Β

Ημερομηνία	Ενσίρωμα καλαμποκιού (tn)	Αγελαδινή κοπριά υγρή (tn)	Κοτίσια κοπριά στερεή (tn)	Κοτίσια κοπριά υγρή (tn)	Κασιόγαρος (tn)	Ρυζάλευρο (tn)	Εποχιακά φρούτα Πούλπες (tn)	Ακτινίδια (tn)	Τυρόγαλο (tn)	Σπασμένο Καλαμπόκι (tn)	Ποσότητα πρώτων υλών (tn)
08/01/2025	15	100	15		40		10		40		220
13/01/2025	16	100	15		40		12		25		208
21/01/2025	15	100	15		40		6		40		216
28/01/2025	20	100	15		40		13		20		208
03/02/2025	20	95	15		40		8		40		218
11/02/2025	20	80	15		40		10		40		205
18/02/2025	20	90	15		40		10		40		215
26/02/2025	20	120	25				10		20	7	202
24/03/2025	20	110	12				15	4	30	10	201
28/03/2025	15	120	10				12	3	40	10	210
08/04/2025	10	110	12				15	5	40	10	202
16/04/2025	12	110	10				15	4	40	10	201
24/04/2025	9	110	10				10	5	40	10	194
08/05/2025	13	110	10				20	5	30	10	198
22/05/2025	15	120	12				10	5	30	30	222
05/06/2025	18	100	10	30			20	2	20	5	205
17/06/2025	10	120	5	30		3	20	3		20	211
01/07/2025	8	130	5	20		2	20	5		20	210
17/07/2025	8	130	4	20		3	20	4		20	209
30/07/2025	9	130	5	20		3	20	2		20	209
11/08/2025	6	130	5	40		3	20	3		20	227
18/08/2025	8	130	3	20		2	20	4		20	207
08/09/2025	6	130	5	30		4	10	3	20	8	216
15/09/2025	8	120	3	30		4	10	4	20	6	205
30/09/2025	10	130	2	30		4	10	2	20	7	215
07/10/2025	12	120	15			5		2	40	2	196
24/10/2025	15	120	15			10		5	40	8	213
04/11/2025	15	130	10		40	4			20		219
17/11/2025	20	100	16		40	5			20		201
09/12/2025	20	110	13		40	2			20	4	209
29/12/2025	20	140	14		20	3			20	8	225

Πίνακας 9: % Σύσταση υποστρώματος τροφοδοσίας αναερόβιου χωνευτή (main digester) της Μονάδας Β

Ημερομηνία	Ενσίρωμα καλαμποκιού (tn)	Αγελαδινή κοπριά υγρή (tn)	Κοτίσια κοπριά στερεή κοπριά (tn)	Κοτίσια κοπριά υγρή (tn)	Κατσίγαρος (tn)	Ρυζάλευρο (tn)	Εποχιακά φρούτα-Πούλπες (tn)	Ακτινίδια (tn)	Τυρόγαλο (tn)	Σπασμένο Καλαμπόκι (tn)
08/01/2025	6,82%	45,45%	6,82%	0,00%	18,18%	0,00%	4,55%	0,00%	18,18%	0,00%
13/01/2025	7,69%	48,08%	7,21%	0,00%	19,23%	0,00%	5,77%	0,00%	12,02%	0,00%
21/01/2025	6,94%	46,30%	6,94%	0,00%	18,52%	0,00%	2,78%	0,00%	18,52%	0,00%
28/01/2025	9,62%	48,08%	7,21%	0,00%	19,23%	0,00%	6,25%	0,00%	9,62%	0,00%
03/02/2025	9,17%	43,58%	6,88%	0,00%	18,35%	0,00%	3,67%	0,00%	18,35%	0,00%
11/02/2025	9,76%	39,02%	7,32%	0,00%	19,51%	0,00%	4,88%	0,00%	19,51%	0,00%
18/02/2025	9,30%	41,86%	6,98%	0,00%	18,60%	0,00%	4,65%	0,00%	18,60%	0,00%
26/02/2025	9,90%	59,41%	12,38%	0,00%	0,00%	0,00%	4,95%	0,00%	9,90%	3,47%
24/03/2025	9,95%	54,73%	5,97%	0,00%	0,00%	0,00%	7,46%	1,99%	14,93%	4,98%
28/03/2025	7,14%	57,14%	4,76%	0,00%	0,00%	0,00%	5,71%	1,43%	19,05%	4,76%
08/04/2025	4,95%	54,46%	5,94%	0,00%	0,00%	0,00%	7,43%	2,48%	19,80%	4,95%
16/04/2025	5,97%	54,73%	4,98%	0,00%	0,00%	0,00%	7,46%	1,99%	19,90%	4,98%
24/04/2025	4,64%	56,70%	5,15%	0,00%	0,00%	0,00%	5,15%	2,58%	20,62%	5,15%
08/05/2025	6,57%	55,56%	5,05%	0,00%	0,00%	0,00%	10,10%	2,53%	15,15%	5,05%
22/05/2025	6,76%	54,05%	5,41%	0,00%	0,00%	0,00%	4,50%	2,25%	13,51%	13,51%
05/06/2025	8,78%	48,78%	4,88%	14,63%	0,00%	0,00%	9,76%	0,98%	9,76%	2,44%
17/06/2025	4,74%	56,87%	2,37%	14,22%	0,00%	1,42%	9,48%	1,42%	0,00%	9,48%
01/07/2025	3,81%	61,90%	2,38%	9,52%	0,00%	0,95%	9,52%	2,38%	0,00%	9,52%
17/07/2025	3,83%	62,20%	1,91%	9,57%	0,00%	1,44%	9,57%	1,91%	0,00%	9,57%
30/07/2025	4,31%	62,20%	2,39%	9,57%	0,00%	1,44%	9,57%	0,96%	0,00%	9,57%
11/08/2025	2,64%	57,27%	2,20%	17,62%	0,00%	1,32%	8,81%	1,32%	0,00%	8,81%
18/08/2025	3,86%	62,80%	1,45%	9,66%	0,00%	0,97%	9,66%	1,93%	0,00%	9,66%
08/09/2025	2,78%	60,19%	2,31%	13,89%	0,00%	1,85%	4,63%	1,39%	9,26%	3,70%
15/09/2025	3,90%	58,54%	1,46%	14,63%	0,00%	1,95%	4,88%	1,95%	9,76%	2,93%
30/09/2025	4,65%	60,47%	0,93%	13,95%	0,00%	1,86%	4,65%	0,93%	9,30%	3,26%
07/10/2025	6,12%	61,22%	7,65%	0,00%	0,00%	2,55%	0,00%	1,02%	20,41%	1,02%
24/10/2025	7,04%	56,34%	7,04%	0,00%	0,00%	4,69%	0,00%	2,35%	18,78%	3,76%
04/11/2025	6,85%	59,36%	4,57%	0,00%	18,26%	1,83%	0,00%	0,00%	9,13%	0,00%
17/11/2025	9,95%	49,75%	7,96%	0,00%	19,90%	2,49%	0,00%	0,00%	9,95%	0,00%
09/12/2025	9,57%	52,63%	6,22%	0,00%	19,14%	0,96%	0,00%	0,00%	9,57%	1,91%
29/12/2025	8,89%	62,22%	6,22%	0,00%	8,89%	1,33%	0,00%	0,00%	8,89%	3,56%
M.O.	6,67%	54,58%	5,19%	4,11%	6,38%	0,87%	5,35%	1,09%	11,69%	4,07%

% Σύσταση Υποστρώματος Μονάδας Β



Γράφημα 15: % Σύσταση του υποστρώματος τροφοδοσίας Αναερόβιου Χωνευτή Μονάδας Β

5.2.3. Φυσικοχημικές Παράμετροι Αναερόβιας Χώνευσης Μονάδας Β

Η παρακολούθηση των βασικών λειτουργικών παραμέτρων του κύριου χωνευτή (MAIN) δείχνει ότι η μονάδα λειτουργεί συνολικά υπό ελεγχόμενες συνθήκες, χωρίς ενδείξεις σοβαρής βιολογικής αποσταθεροποίησης. Οι σημαντικότερες παράμετροι που αξιολογούνται είναι το pH, ο λόγος FOS/TAC, η συγκέντρωση αμμωνιακών και η

περιεκτικότητα σε ολικά στερεά, οι οποίες συνδέονται άμεσα με τη σύσταση της τροφοδοσίας και την ισορροπία της αναερόβιας χώνευσης.

Η τιμή του pH παρουσιάζει ιδιαίτερα μικρές διακυμάνσεις, κυμαινόμενη μεταξύ 7,7 και 8,4 και μέση τιμή 8,0, γεγονός που αποτελεί σαφή ένδειξη σταθερής δραστηριότητας. Οι χαμηλότερες τιμές παρατηρούνται στα τέλη Φεβρουαρίου και κατά την περίοδο Νοεμβρίου–Δεκεμβρίου (7,7–7,8), χωρίς ωστόσο να προσεγγίζονται επίπεδα όξινης αποσταθεροποίησης. Αντίθετα, οι υψηλότερες τιμές pH (8,3 – 8,4) εμφανίζονται σποραδικά και παρότι σχετικά υψηλές για αναερόβια χώνευση, παραμένουν εντός αποδεκτών ορίων λειτουργίας, γεγονός που δείχνει ότι η μονάδα διατηρεί επαρκή ρυθμιστική ικανότητα μέσω της ανάμιξης διαφορετικών υποστρωμάτων.

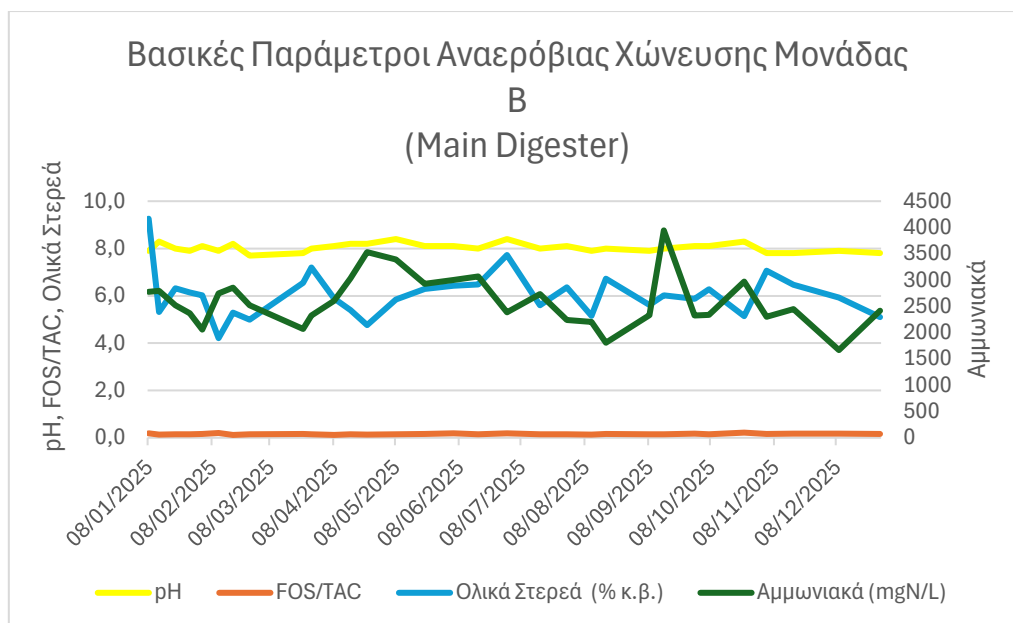
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και ο λόγος FOS/TAC, ο οποίος αποτελεί βασικό δείκτη ισορροπίας μεταξύ πτητικών λιπαρών οξέων και αλκαλικότητας. Καθ' όλη τη διάρκεια του έτους οι τιμές κυμαίνονται σε πολύ χαμηλά επίπεδα, από 0,12 έως 0,2 και μέση τιμή 0,16, γεγονός που υποδηλώνει εξαιρετικά σταθερή λειτουργία του χωνευτή. Οι χαμηλές τιμές δείχνουν ότι δεν υπάρχει συσσώρευση οργανικών οξέων και ότι οι μεθανογόνοι μικροοργανισμοί καταναλώνουν αποτελεσματικά τα ενδιάμεσα προϊόντα της οξεογένεσης. Η ελάχιστη τιμή (~0,12) παρατηρείται τον Φεβρουάριο, περίοδο όπου η τροφοδοσία βασίζεται κυρίως στην αγελαδινή κοπριά και σε σχετικά σταθερές οργανικές φορτίσεις. Η μέγιστη τιμή (0,217) καταγράφεται στα τέλη Οκτωβρίου, πιθανόν λόγω αυξημένης συμμετοχής ενεργειακών και εύκολα βιοαποδομήσιμων υποστρωμάτων, όπως τυρόγαλο ή κασίγαρος, τα οποία οδηγούν σε ταχύτερη παραγωγή πτητικών λιπαρών οξέων. Οι τιμές του FOS/TAC καθ' όλη τη διάρκεια του έτους είναι μικρότερες του ψυχολογικού ορίου της τιμής 0,2, γεγονός που ίσως αφήνει περιθώριο για επιπλέον φόρτιση του αντιδραστήρα και προς μεγαλύτερη παραγωγή βιοαερίου.

Η συγκέντρωση αμμωνιακών παρουσιάζει τις σημαντικότερες διακυμάνσεις μέσα στο έτος όπως φαίνεται και από την κυματοειδή μορφή του διαγράμματος της εικόνας 19. Η μέση τιμή των αμμωνιακών είναι 2603 mg/l κυμαινόμενη από 1.668 mg/L έως 3.945 mg/L. Οι υψηλότερες τιμές εμφανίζονται από την άνοιξη έως και τις αρχές φθινοπώρου, με χαρακτηριστικές κορυφώσεις τον Απρίλιο, τον Μάιο, τον Ιούνιο και ιδιαίτερα τον Σεπτέμβριο. Οι τιμές αυτές συμπίπτουν με την αυξημένη χρήση κοτίσιας κοπριάς, η οποία, λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς της σε πρωτεΐνες και άζωτο ουρίας, οδηγεί σε αυξημένη παραγωγή αμμωνίας κατά την βιοαποικοδόμηση. Η μέγιστη τιμή των 3.945 mg/L στα μέσα Σεπτεμβρίου προσεγγίζει επίπεδα που δυνητικά μπορούν να προκαλέσουν ανασταλτικά φαινόμενα στη μεθανογένεση, ειδικά υπό θερμοφιλικές συνθήκες λειτουργίας. Παρόλα αυτά, το γεγονός ότι το pH και ο λόγος FOS/TAC παραμένουν σε αποδεκτές τιμές δείχνει ότι το σύστημα κατάφερε να προσαρμοστεί στα αυξημένα αμμωνιακά φορτία, πιθανότατα λόγω της ταυτόχρονης χρήσης υποστρωμάτων υψηλής περιεκτικότητας σε υδατάνθρακες, όπως τα φρούτα, το τυρόγαλο και το ενσίρωμα καλαμποκιού, τα οποία ενισχύουν την παραγωγή οργανικών οξέων και συμβάλλουν στη διατήρηση ισορροπίας άνθρακα και αζώτου.

Τέλος, τα ολικά στερεά παρουσιάζουν σχετικά σταθερή συμπεριφορά, κυμαινόμενα κυρίως μεταξύ 5 – 7% κ.β., με ελάχιστες περιπτώσεις να βρίσκονται εκτός της συγκεκριμένης περιοχής. Ελάχιστες περιπτώσεις αυξομειώσεων της τιμής των ολικών στερεών εκτός της παραπάνω περιοχής δεν αιτιολογούνται με βάση το % ποσοστό του υποστρώματος.

Πίνακας 10: Μετρήσεις Βασικών Παραμέτρων για το έτος 2025 στη δεξαμενή χώνευσης (main digester) της Μονάδας Β

Ημερομηνία	Χωνευτής	pH	FOS/TAC	Αμμωνιακά (mgN/L)	Ολικά Στερεά (% κ.β.)
08/01/2025	MAIN	7,9	0,192	2778	9,26
13/01/2025	MAIN	8,3	0,136	2796	5,32
21/01/2025	MAIN	8	0,152	2521	6,32
28/01/2025	MAIN	7,9	0,144	2370	6,14
03/02/2025	MAIN	8,1	0,155	2058	6,02
11/02/2025	MAIN	7,9	0,199	2746	4,21
18/02/2025	MAIN	8,2	0,119	2853	5,29
26/02/2025	MAIN	7,7	0,143	2518	4,99
24/03/2025	MAIN	7,8	0,166	2068	6,55
28/03/2025	MAIN	8	0,149	2324	7,2
08/04/2025	MAIN	8,1	0,124	2603	5,88
16/04/2025	MAIN	8,2	0,148	3030	5,4
24/04/2025	MAIN	8,2	0,128	3534	4,76
08/05/2025	MAIN	8,4	0,149	3390	5,85
22/05/2025	MAIN	8,1	0,157	2926	6,29
05/06/2025	MAIN	8,1	0,187	3004	6,42
17/06/2025	MAIN	8	0,146	3071	6,48
01/07/2025	MAIN	8,4	0,192	2389	7,72
17/07/2025	MAIN	8	0,146	2732	5,6
30/07/2025	MAIN	8,1	0,149	2243	6,36
11/08/2025	MAIN	7,9	0,138	2206	5,16
18/08/2025	MAIN	8	0,164	1810	6,72
08/09/2025	MAIN	7,9	0,142	2334	5,61
15/09/2025	MAIN	8	0,153	3945	6,02
30/09/2025	MAIN	8,1	0,173	2324	5,87
07/10/2025	MAIN	8,1	0,148	2340	6,28
24/10/2025	MAIN	8,3	0,217	2974	5,14
04/11/2025	MAIN	7,8	0,157	2303	7,06
17/11/2025	MAIN	7,8	0,172	2449	6,47
09/12/2025	MAIN	7,9	0,178	1668	5,93
29/12/2025	MAIN	7,8	0,165	2415	5,1



Γράφημα 16: Διακύμανση βασικών παραμέτρων στον αναερόβιο χωνευτή (Main Digester) της Μονάδας Β

Σε σύγκριση με τον κύριο χωνευτή, οι μεταβολές των παραμέτρων στο μεταχωνευτή εμφανίζονται γενικά ηπιότερες, γεγονός που είναι αναμενόμενο, καθώς το μεγαλύτερο μέρος της εύκολα βιοαποδομήσιμης οργανικής ύλης έχει ήδη καταναλωθεί στον κύριο χωνευτή.

Οι τιμές του pH διατηρούνται σχεδόν καθ' όλη τη διάρκεια του έτους μεταξύ 7,8 και 8,4, με μοναδική εξαίρεση την καταγραφή της 26^{ης} Φεβρουαρίου, όπου παρατηρείται τιμή 6,8. Η συγκεκριμένη μέτρηση αποκλίνει σημαντικά από τη γενική τάση και πιθανόν οφείλεται είτε σε στιγμιαία λειτουργική διαταραχή είτε σε αναλυτική απόκλιση, καθώς δεν συνοδεύεται από αντίστοιχη μεταβολή στους υπόλοιπους δείκτες σταθερότητας. Η διατήρηση του pH σε ελαφρώς αλκαλικά επίπεδα υποδηλώνει επαρκή αλκαλικότητα και συνεχιζόμενη μεθανογόνο δραστηριότητα, ακόμη και μετά την παραμονή του υποστρώματος στον κύριο χωνευτή.

Ο λόγος FOS/TAC παρουσιάζει ιδιαίτερα χαμηλές και σταθερές τιμές καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, κυμαινόμενος από 0,114 έως 0,184. Η συμπεριφορά αυτή επιβεβαιώνει ότι το υλικό που εισέρχεται στο δεύτερο στάδιο χώνευσης έχει ήδη σταθεροποιηθεί σημαντικά στον κύριο χωνευτή και ότι η διεργασία στο μεταχωνευτή επικεντρώνεται κυρίως στην ολοκλήρωση της βιοαποδόμησης των πιο ανθεκτικών οργανικών ενώσεων και στην ανάκτηση του υπολειπόμενου βιοαερίου.

Τα ολικά στερεά παρουσιάζουν τη μικρότερη μεταβλητότητα από τις εξεταζόμενες παραμέτρους, με τιμές που κυμαίνονται κυρίως μεταξύ 4% και 6%. Η σχετικά χαμηλότερη περιεκτικότητα σε στερεά σε σύγκριση με τον κύριο χωνευτή αποτελεί ένδειξη της προοδευτικής αποδόμησης της οργανικής ύλης κατά τη διάρκεια της συνολικής παραμονής στο σύστημα.

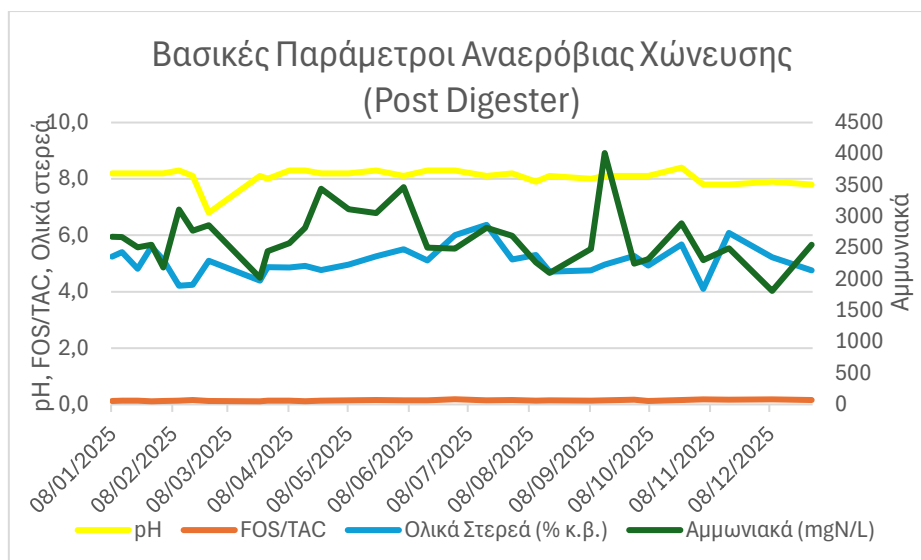
Η συγκέντρωση των αμμωνιακών εμφανίζει μεγαλύτερες διακυμάνσεις σε σχέση με τις υπόλοιπες παραμέτρους, με μέση τιμή ~2650 mg/l. Οι υψηλότερες τιμές παρατηρούνται κατά το δίμηνο από τα μέσα Απριλίου έως τα μέσα Ιουνίου, όπου η μέση τιμή αυξάνεται ραγδαία στα ~3180 mg/l, χρονική περίοδο που συμπίπτει με τις αντίστοιχα αυξημένες τιμές αμμωνιακών και στο κύριο χωνευτή. Η τάση αυτή επιβεβαιώνει ότι η αυξημένη περιεκτικότητα συγκεκριμένων υποστρωμάτων σε πρωτεΐνες και οργανικό

άζωτο συνεχίζει να επηρεάζει τη χημική σύσταση του υλικού και κατά το δεύτερο στάδιο της χώνευσης.

Συνολικά, τα δεδομένα του μεταχωνευτή καταδεικνύουν ένα ιδιαίτερα σταθερό δεύτερο στάδιο χώνευσης, στο οποίο ολοκληρώνεται η βιολογική σταθεροποίηση του υποστρώματος, διατηρούνται ασφαλείς συνθήκες λειτουργίας και επιτυγχάνεται η ανάκτηση του υπολειπόμενου ενεργειακού δυναμικού πριν από τη μεταφορά του χωνεμένου υπολείμματος στα επόμενα στάδια επεξεργασίας.

Πίνακας 11: Μετρήσεις Βασικών Παραμέτρων για το έτος 2025 στη δεξαμενή χώνευσης (main digester) της Μονάδας Β

Ημερομηνία	Χωνευτής	pH	FOS/TAC	Αμμωνιακά (mgN/L)	Ολικά Στερεά (% κ.β.)
08/01/2025	POST	8,2	0,124	2677	5,24
13/01/2025	POST	8,2	0,13	2673	5,40
21/01/2025	POST	8,2	0,129	2508	4,81
28/01/2025	POST	8,2	0,116	2550	5,60
03/02/2025	POST	8,2	0,124	2186	5,13
11/02/2025	POST	8,3	0,132	3113	4,21
18/02/2025	POST	8,1	0,151	2773	4,25
26/02/2025	POST	6,8	0,121	2861	5,10
24/03/2025	POST	8,1	0,116	2023	4,39
28/03/2025	POST	8,	0,137	2446	4,87
08/04/2025	POST	8,3	0,131	2576	4,86
16/04/2025	POST	8,3	0,114	2820	4,91
24/04/2025	POST	8,2	0,133	3443	4,77
08/05/2025	POST	8,2	0,145	3116	4,96
22/05/2025	POST	8,3	0,155	3055	5,26
05/06/2025	POST	8,1	0,143	3467	5,50
17/06/2025	POST	8,3	0,141	2505	5,11
01/07/2025	POST	8,3	0,184	2487	6,00
17/07/2025	POST	8,1	0,147	2822	6,37
30/07/2025	POST	8,2	0,151	2694	5,14
11/08/2025	POST	7,9	0,129	2269	5,30
18/08/2025	POST	8,1	0,148	2099	4,71
08/09/2025	POST	8,	0,137	2482	4,76
15/09/2025	POST	8,1	0,143	4013	4,96
30/09/2025	POST	8,1	0,163	2247	5,27
07/10/2025	POST	8,1	0,118	2320	4,93
24/10/2025	POST	8,4	0,151	2892	5,67
04/11/2025	POST	7,8	0,178	2305	4,10
17/11/2025	POST	7,8	0,165	2493	6,08
09/12/2025	POST	7,9	0,174	1812	5,22
29/12/2025	POST	7,8	0,158	2550	4,75



Γράφημα 17: Διακύμανση βασικών παραμέτρων στον αναερόβιο χωνευτή (post Digester) της Μονάδας Β

Συνολικά, η ανάλυση των παραμέτρων δείχνει ότι η μονάδα εφαρμόζει αποτελεσματική στρατηγική συνδιαχείρισης πολλαπλών υποστρωμάτων, επιτυγχάνοντας ισορροπία μεταξύ υψηλού οργανικού φορτίου και λειτουργικής σταθερότητας. Η αγελαδινή κοπριά λειτουργεί ως σταθεροποιητικό βασικό υπόστρωμα, ενώ τα ενεργειακά και εποχικά υλικά, όπως το τυρόγαλο, ο κασίγαρος, τα φρούτα και η κοτίσια κοπριά, χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση της παραγωγής βιοαερίου. Παρά τις έντονες διαφοροποιήσεις στη σύσταση της τροφοδοσίας, οι βασικοί δείκτες σταθερότητας παραμένουν σε ασφαλή επίπεδα, γεγονός που υποδεικνύει ορθή διαχείριση της διεργασίας και καλή προσαρμοστικότητα της μικροβιακής κοινότητας του χωνευτή.

5.2.4. Δεδομένα παραγωγής βιοαερίου στη Μονάδα Β

Η ανάλυση των δεδομένων παραγωγής βιοαερίου κατά τη διάρκεια του 2025 δείχνει ότι η μονάδα λειτουργεί με ιδιαίτερα υψηλή σταθερότητα τόσο ως προς την ποσότητα όσο και ως προς την ποιότητα του παραγόμενου αερίου. Η συνολική παραγωγή βιοαερίου κυμαίνεται από 11.563 έως 12.896 Nm³/day, με μέση τιμή περίπου 12.050 Nm³/day. Η διακύμανση της τάξης του ±5% γύρω από τη μέση τιμή υποδηλώνει ότι η στρατηγική διαχείρισης της τροφοδοσίας επιτυγχάνει τη διατήρηση σχεδόν σταθερού οργανικού φορτίου στον χωνευτή, παρά τις μεταβολές στη σύνθεση των επιμέρους υποστρωμάτων. Η περίοδος μέγιστης παραγωγής (μέση τιμή 12.417 Nm³/day), από τα μέσα Ιουνίου έως το τέλος Ιουλίου, συμπίπτει με την εντατικότερη χρήση υποστρωμάτων υψηλής βιοαποδομησιμότητας, όπως η κοτίσια υγρή κοπριά, το τυρόγαλο και η πούλπα φρούτων. Η αντίστοιχη αυξημένη παραγωγή κατά τον Ιανουάριο (τιμές σταθερά >12.000 Nm³/day) οφείλεται στην εντατική χρήση κασίγαρου.

Η περιεκτικότητα του βιοαερίου σε μεθάνιο (CH₄) παρουσιάζει ιδιαίτερα ικανοποιητικές τιμές, κυμαινόμενη από 54,03% έως 62,00%, με μέση τιμή περίπου 58,8%. Οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις παρατηρούνται στις αρχές του έτους, όταν η παράλληλα υψηλή ποσοστιαία συμμετοχή τυρόγαλου και κασίγαρου στο υπόστρωμα φαίνεται να έχει αρνητική επίπτωση. Καθώς προχωρά το έτος, η συμμετοχή ευκολότερα βιοαποδομήσιμων υποστρωμάτων αυξάνεται, με αποτέλεσμα την προοδευτική βελτίωση της ποιότητας του παραγόμενου αερίου. Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις μεθανίου εμφανίζονται κατά το τελευταίο δίμηνο του έτους (61,9–62,0%), περίοδο κατά την οποία παρατηρείται και η επανεμφάνιση του κασίγαρου στην τροφοδοσία.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η διακύμανση της συγκέντρωσης του υδρόθειου (H₂S), το οποίο αποτελεί μία από της σημαντικότερες ανεπιθύμητες προσμίξεις στο παραγόμενο βιοαέριο. Οι υψηλότερες τιμές παρατηρούνται κατά το πρώτο τετράμηνο του έτους, με μέγιστη τιμή 259 ppm τον Μάρτιο, ενώ από τον Μάιο έως τον Οκτώβριο παρατηρείται σημαντική μείωση, με τιμές που συχνά παραμένουν μεταξύ 70 και 100 ppm. Η μείωση αυτή ενδέχεται να σχετίζεται τόσο με αλλαγές στη σύσταση του υποστρώματος όσο και με την αποτελεσματικότερη λειτουργία των διεργασιών αποθείωσης. Η εκ νέου αύξηση των συγκεντρώσεων προς το τέλος του έτους πιθανόν συνδέεται με την επανένταξη του κασιόγαρου στην τροφοδοσία.

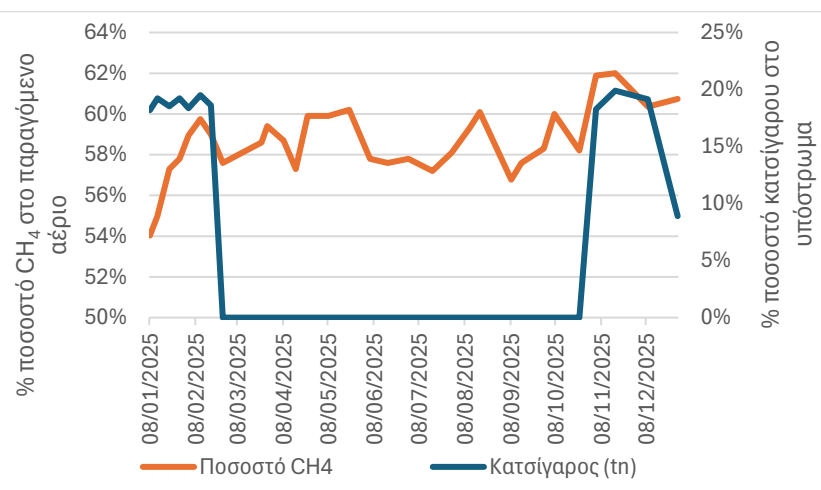
Πίνακας 12: Δεδομένα παραγόμενου προϊόντος της Μονάδας Β

Ημερομηνία	Συνολικά Παραγόμενο Αέριο (Nm ³ /ημέρα)	Ποσοστό CH ₄	H ₂ S (ppm)
08/01/2025	11.563,00	54,03%	250
13/01/2025	12.103,00	55,00%	210
21/01/2025	11.998,00	57,30%	200
28/01/2025	12.103,00	57,80%	215
03/02/2025	12.103,00	58,95%	236
11/02/2025	12.023,00	59,75%	247
18/02/2025	12.089,00	59,00%	212
26/02/2025	11.999,00	57,60%	225
24/03/2025	12.054,00	58,60%	259
28/03/2025	12.110,00	59,40%	240
08/04/2025	12.150,00	58,70%	200
16/04/2025	12.012,00	57,30%	196
24/04/2025	12.123,00	59,90%	179
08/05/2025	11.990,00	59,90%	123
22/05/2025	11.990,00	60,20%	100
05/06/2025	12.059,00	57,80%	97
17/06/2025	12.156,00	57,60%	100
01/07/2025	12.896,00	57,80%	102
17/07/2025	12.100,00	57,20%	100
30/07/2025	12.201,00	58,10%	100
11/08/2025	12.106,00	59,30%	90
18/08/2025	12.100,00	60,10%	100
08/09/2025	11.987,00	56,78%	100
15/09/2025	12.100,00	57,60%	70
30/09/2025	12.100,00	58,30%	80
07/10/2025	12.100,00	60,00%	70
24/10/2025	12.100,00	58,20%	89
04/11/2025	12.100,00	61,89%	186
17/11/2025	11.987,00	62,00%	200
09/12/2025	11.569,00	60,36%	201
29/12/2025	11.999,00	60,74%	190

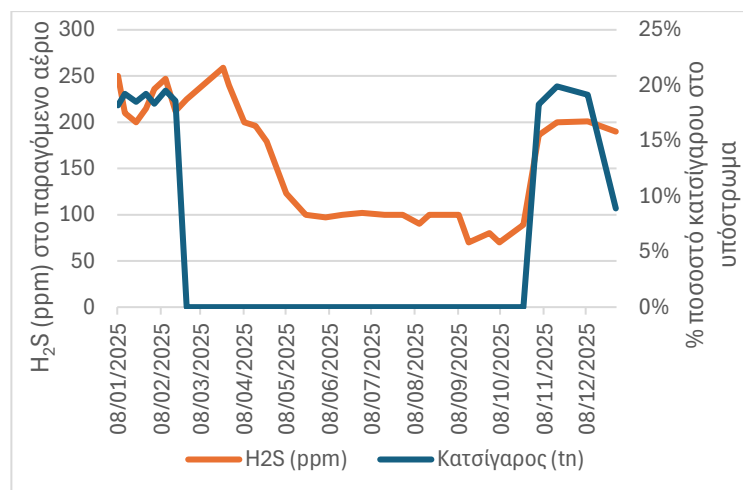
5.2.5. Επίδραση της σύστασης του υποστρώματος και των φυσικοχημικών παραμέτρων στην παραγωγή βιοαερίου στη Μονάδα Β

Όπως και στη συνδυαστική ανάλυση που προηγήθηκε για τη Μονάδα Α και η οποία ανέδειξε ότι η απόδοση της αναερόβιας συγχώνευσης δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την ποσότητα της τροφοδοσίας, αλλά από τη σύνθετη αλληλεπίδραση μεταξύ της σύστασης των υποστρώματων και των φυσικοχημικών συνθηκών λειτουργίας του χωνευτή, έτσι και για τα δεδομένα της Μονάδας Β, η διερεύνηση των αντίστοιχων σχέσεων παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, προκειμένου να διαπιστωθεί κατά πόσο οι παράγοντες που επηρεάζουν την παραγωγή βιοαερίου εμφανίζουν παρόμοια ή διαφορετική συμπεριφορά.

Αξιοσημείωτο παράδειγμα αποτελεί η εποχική χρήση του κασίγαρου αποκλειστικά κατά τη χειμερινή περίοδο (από αρχές Νοεμβρίου έως και τα μέσα Φεβρουαρίου). Έτσι, ενώ η απότομη αύξηση στη χρήση του το Νοέμβριο του 2025 στα επίπεδα κοντά στο 20% του τροφοδοτούμενου υποστρώματος δε φαίνεται να έχει σημαντική επίδραση στο συνολικό παραγόμενο αέριο, σημαντική δείχνει να είναι η επίδραση της χρήσης του στο % ποσοστό του μεθανίου στο βιοαέριο, με την αύξηση να αγγίζει το 3%. Στοιχείο που δείχνει να επιβεβαιώνει το παραπάνω, είναι το γεγονός ότι το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται και τους πρώτους δύο μήνες του ίδιου έτους, όταν το ποσοστό κασίγαρου στο υπόστρωμα ήταν της τάξης του 20%, υπήρξε αντίστοιχη αύξηση στο ποσοστό μεθανίου από 54% σε 60% (γράφημα 18). Αντίθετα, η χρήση κασίγαρου δείχνει να έχει αρνητική επίδραση στη συγκέντρωση H_2S στο αέριο, καθώς η απότομη χρησιμοποίησή του στην τροφοδοσία του χωνευτή συνοδεύεται με απότομη αύξηση της συγκέντρωσης H_2S από τα 89ppm στα 186ppm και διατήρησή του στα επίπεδα των 200ppm έως και το τέλος του έτους (γράφημα 19).

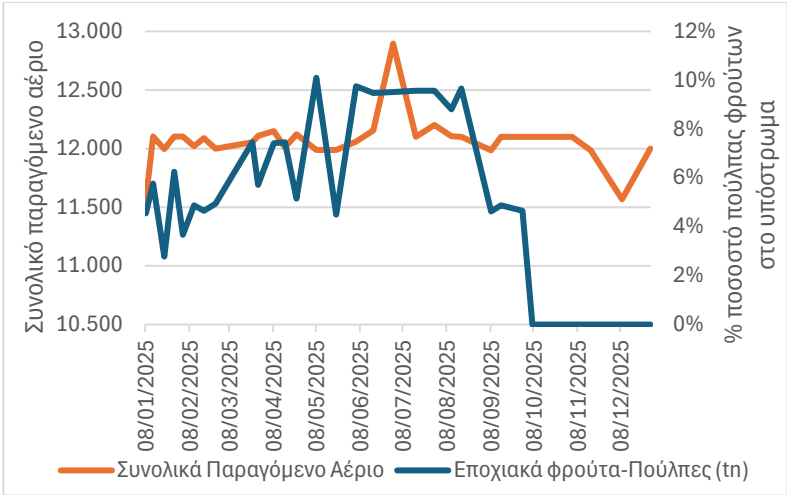


Γράφημα 18: Συγκριτικό διάγραμμα % προσθήκης κασίγαρου στην τροφοδοσία του χωνευτή και του ποσοστού CH_4 στο αέριο στη μονάδα Β

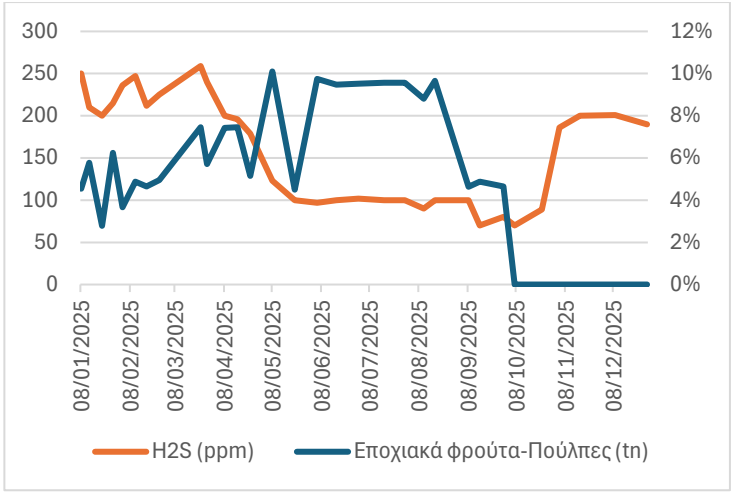


Γράφημα 19: Συγκριτικό διάγραμμα % προσθήκης κασίγαρου στην τροφοδοσία του χωνευτή και της συγκέντρωσης H_2S στο αέριο στη μονάδα Β

Από την άλλη, η τάση χρησιμοποίησης του ετέρου σημαντικού εποχικού υποστρώματος, της πούλπας φρούτων παρότι δε φαίνεται να ακολουθεί απόλυτα την τάση αυξομειώσεως της παραγωγής βιοαερίου, η μέγιστη ημερήσια παραγωγή αερίου την 01/07/2025 με $12.896Nm^3$ μπορεί να συνδεθεί με την αύξηση του ποσοστού χρησιμοποίησης πούλπας στο επίπεδο $>10\%$ κατά την ίδια περίοδο (γράφημα 20). Παράλληλα, η χρήση της δείχνει να έχει θετική επίδραση και στη συγκέντρωση H_2S στο παραγόμενο αέριο. Πράγματι, την περίοδο εκτεταμένης χρήσης της (ποσοστό $\sim 10\%$ Μάιος – Σεπτέμβριος 2025) τα επίπεδα H_2S πέφτουν στα 100ppm, ενώ όλο το υπόλοιπο έτος με το μέση τιμή ποσοστού χρήσης της στο 4%, τα επίπεδα H_2S φτάνουν στη μέση τιμή των 185ppm (γράφημα 21).

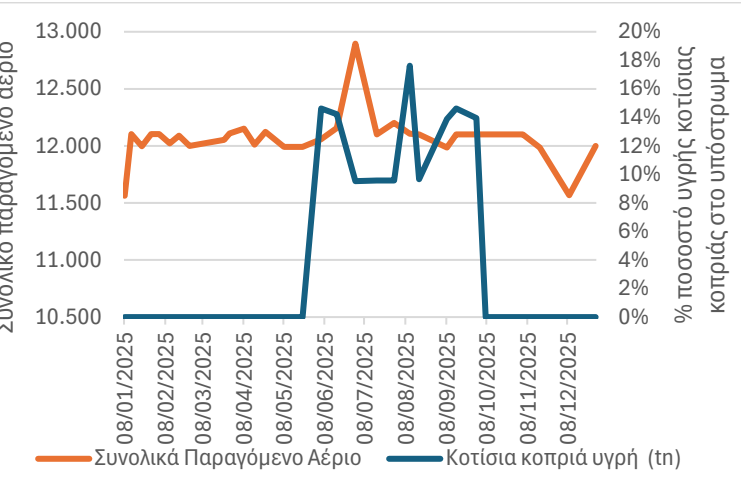


Γράφημα 20: Συγκριτικό διάγραμμα % προσθήκης πούλπας φρούτων στην τροφοδοσία του χωνευτή και του συνολικού παραγόμενου αερίου στη Μονάδα Β

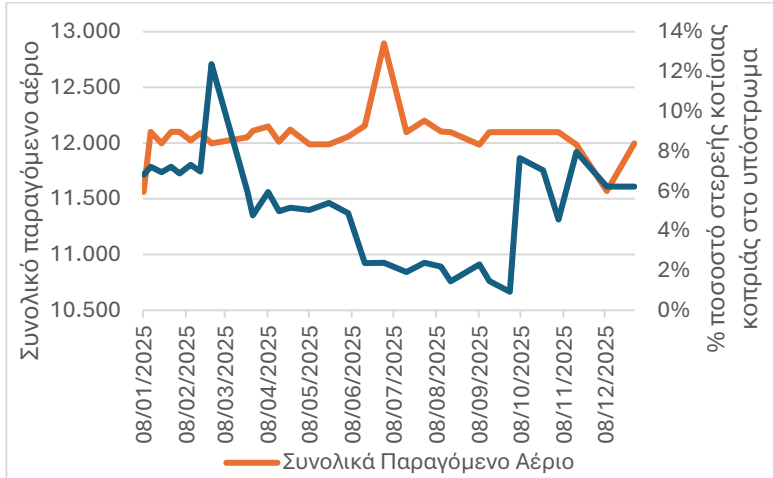


Γράφημα 21: Συγκριτικό διάγραμμα % προσθήκης πούλπας φρούρων στην τροφοδοσία του χωνευτή και της συγκέντρωσης H₂S στο αέριο στη Μονάδα Β

Ακριβώς την ίδια επίδραση δείχνει να έχει και η χρήση της υγρής κοτίσιας κοπριάς, η οποία συμμετέχει σε υψηλά ποσοστά αποκλειστικά για τέσσερις μήνες από Ιούνιο έως και Σεπτέμβριο. Η χρησιμοποίησή της μοιάζει να έχει θετική επίδραση στο συνολικό παραγόμενο αέριο, ενώ αντίθετα αρνητική φαίνεται να είναι η επίδραση της χρήσης στερεής κοτίσιας κοπριάς (Γραφήματα 22 και 23).

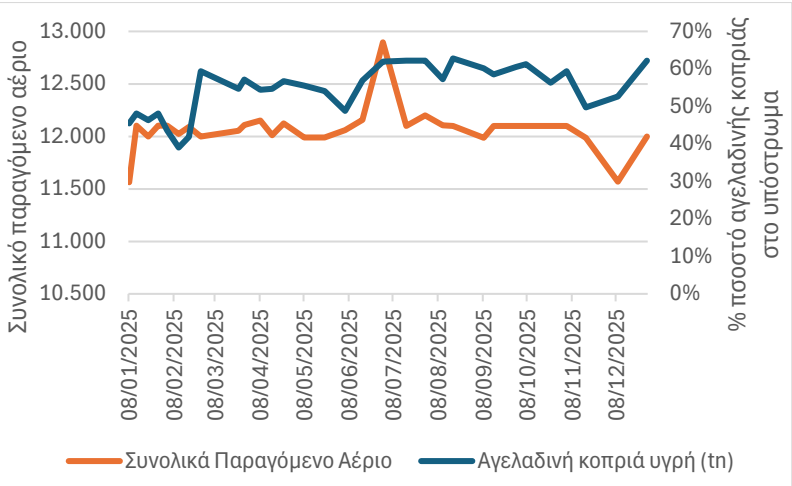


Γράφημα 22: Συγκριτικό διάγραμμα % προσθήκης υγρής κοτίσιας κοπριάς στην τροφοδοσία του χωνευτή και του συνολικού παραγόμενου αερίου στη μονάδα Β

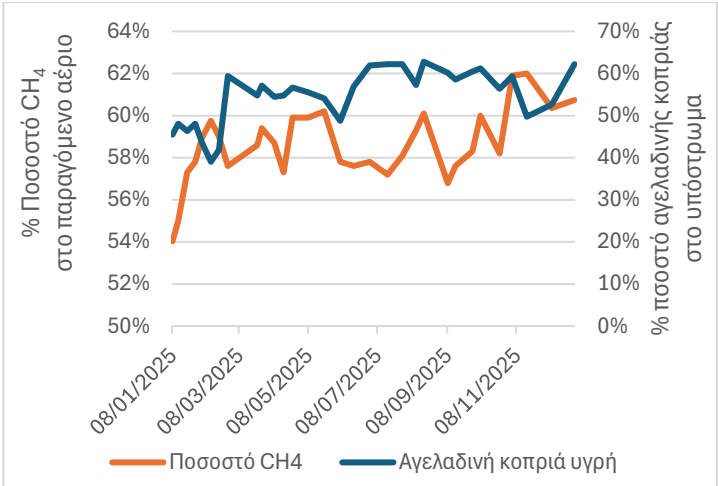


Γράφημα 23: Συγκριτικό διάγραμμα % προσθήκης στερεής κοτίσιας κοπριάς στην τροφοδοσία του χωνευτή και του % ποσοστού CH₄ στο παραγόμενο αέριο στη μονάδα Β

Η αγελαδινή κοπριά συμμετέχει σε υψηλά επίπεδα (περίπου 45–62%) και δείχνει να συμβάλει κυρίως στη σταθερότητα της διεργασίας και λιγότερο στην αύξηση του συνολικού όγκου παραγωγής. Αυτό φαίνεται από την τάση του γραφήματος του ποσοστού της αγελαδινής κοπριάς στο υπόστρωμα, το οποίο δείχνει να ακολουθεί την τάση του γραφήματος παραγωγής βιοαερίου (γράφημα 24). Παρόμοια εικόνα, παρότι όχι τόσο έντονη, δείχνει να ακολουθεί και η τάση του ποσοστού της αγελαδινής κοπριάς στο υπόστρωμα συγκριτικά με την τάση του % ποσοστού CH₄ στο παραγόμενο βιοαέριο (γράφημα 25). Τα ευρήματα αυτά υποδηλώνουν ότι η αγελαδινή κοπριά παρέχει ευνοϊκές συνθήκες στη σταθεροποίηση της διεργασίας και στη διατήρηση υψηλής ποιότητας βιοαερίου.

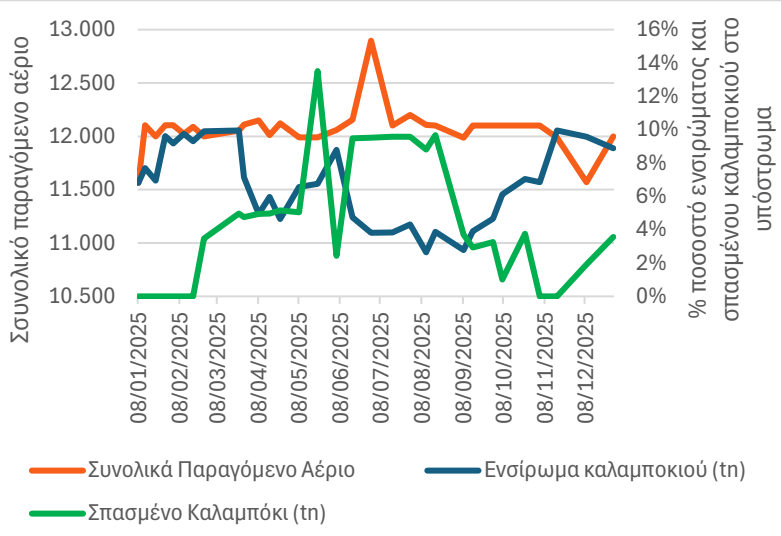


Γράφημα 24: Συγκριτικό διάγραμμα % προσθήκης αγελαδινής κοπριάς στην τροφοδοσία του χωνευτή και του συνολικού παραγόμενου αερίου στη μονάδα Β

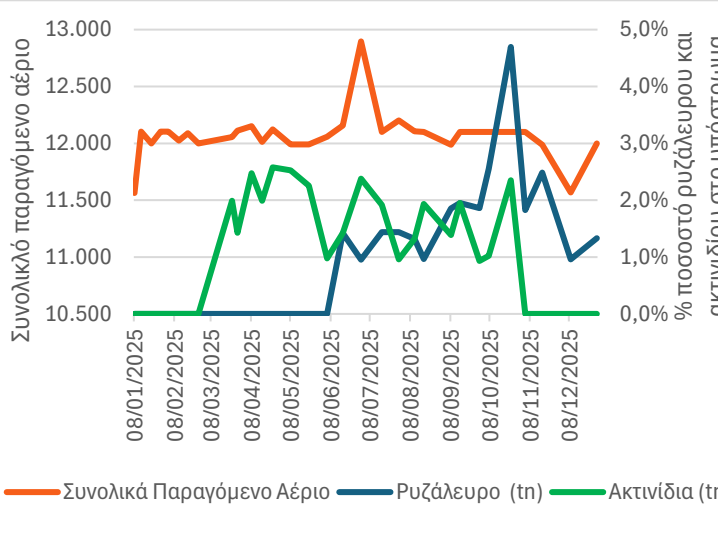


Γράφημα 25: Συγκριτικό διάγραμμα % προσθήκης αγελαδινής κοπριάς στην τροφοδοσία του χωνευτή και του % ποσοστού CH₄ στο παραγόμενο αέριο στη μονάδα Β

Τέλος, μηδαμινή, ελάχιστη ή ακανόνιστη επίδραση δείχνουν τα γραφήματα 27 και 28, τα οποία αποτυπώνουν την τάση % ποσοστού στο υπόστρωμα για τα ενσιρώματα καλαμποκιού, το ρυζάλευρο, των υπολειμμάτων ακτινιδίου και του σπασμένου καλαμποκιού ως προς την τάση παραγωγής βιοαερίου. Τα υποστρώματα αυτά χρησιμοποιούνται σε ποσότητες πολύ μικρότερες σε σχέση με τα υπόλοιπα και δείχνουν να επιδρούν μόνο ως συμπλήρωμα της συνολικής τροφοδοσίας.



Γράφημα 26: Συγκριτικό διάγραμμα % προσθήκης ενσιρώματος καλαμποκιού και σπασμένου καλαμποκιού στην τροφοδοσία του χωνευτή και του συνολικού παραγόμενου αερίου στη μονάδα Β



Γράφημα 27: Συγκριτικό διάγραμμα % προσθήκης αγελαδινής κοπριάς στην τροφοδοσία του χωνευτή και του % ποσοστού CH₄ στο παραγόμενο αέριο στη μονάδα Β

5.3. Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Μονάδας Γ

5.3.1. Εισαγωγικά

Η μονάδα αναερόβιας χώνευσης και παραγωγής βιοαερίου “ΒΙΟΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΝΙΓΡΙΤΑΣ Α.Ε.” διενεργεί εργαστηριακές αναλύσεις σε εξωτερικό εργαστήριο αναλύσεων υδάτων και λυμάτων διαπιστευμένο κατά ISO17025. Οι αναλύσεις λαμβάνουν χώρα σε μη περιοδική βάση αλλά με βάση της ανάγκες της μονάδας. Λόγω εργασιών αναβάθμισης

της ονομαστικής ισχύος της μονάδας από 1MW σε 3MW, τα δεδομένα περιορίζονται στο 1^ο μισό του 2025 και καλύπτουν και το 1^ο μισό του 2026, ώστε να έχουμε αντίστοιχη δεξαμενή δεδομένων με άλλες δύο μονάδες που μελετώνται. Η ανάλυση καλύπτει την ποιοτική και ποσοτική αξιολόγηση των πρώτων υλών (σύσταση υποστρώματος), καθώς και τη συσχέτισή της με κρίσιμες παραμέτρους λειτουργίας του αντιδραστήρα (θερμοκρασία, pH, FOS/TAC, αμμωνιακά ιόντα $\text{NH}_4\text{-N}^+$, ολικά στερεά).

5.3.2. Σύνθεση και διαχείριση πρώτων υλών – Σύσταση υποστρώματος

Όπως και στις άλλες δύο μονάδες έτσι και στη συγκεκριμένη, η τροφοδοσία του χωνευτή κατά την εξεταζόμενη περίοδο χαρακτηρίζεται από μια σταθερή βάση κτηνοτροφικών και αγροτοβιομηχανικών υποστρωμάτων, πάνω στην οποία προστίθενται ορισμένα συμπληρωματικά ρεύματα είτε για ενίσχυση της οργανικής φόρτισης είτε για λειτουργική προσαρμογή της διεργασίας. Στους πίνακες 13 και 14 αποτυπώνονται η πραγματική και η ποσοστιαία σύσταση του υποστρώματος στην τροφοδοσία του αναερόβιου χωνευτή της μονάδας Γ «Βιοενεργειακή Νιγρίτας Α.Ε.», ενώ στο γράφημα 29 παρουσιάζεται και το αντίστοιχο διάγραμμα.

Με βάση τη σύσταση του υποστρώματος, οι βασικοί άξονες τροφοδοσίας είναι η υγρή αγελαδινή κοπριά, η ανακυκλοφορία, το τυρόγαλο, η κοτίσια κοπριά και, σε μικρότερο βαθμό, το ενσίρωμα καλαμποκιού. Η χρονική εξέλιξη της σύστασης του υποστρώματος υποδεικνύει σαφή διάκριση μεταξύ βασικών και εποχικών υποστρωμάτων. Η υγρή αγελαδινή κοπριά, η ανακυκλοφορία και σε μεγάλο μέρος της περιόδου το τυρόγαλο αποτελούν της βασικές πηγές τροφοδοσίας, καθώς εμφανίζονται επανειλημμένα και με σχετικά υψηλά ποσοστά συμμετοχής. Αντίστοιχα, η κοτίσια κοπριά και το ενσίρωμα καλαμποκιού λειτουργούν ως δευτερεύοντες αλλά συστηματικοί συντελεστές του μίγματος.

Η υγρή αγελαδινή κοπριά αποτελεί τη σημαντικότερη επιμέρους ροή, με μέση συμμετοχή περίπου 30% στο συνολικό μίγμα, ενώ η ανακυκλοφορία ακολουθεί, επιβεβαιώνοντας ότι το σύστημα λειτουργεί με έντονη εξάρτηση από ρεύματα σταθεροποίησης και αραίωσης του υποστρώματος. Μάλιστα, η μονάδα αναερόβιας χώνευσης Γ είναι η μοναδική εκ των τριών που μελετώνται, στην οποία γίνεται ξεκάθαρα χρήση ανακυκλοφορίας του υποστρώματος ως ποσοστό της τροφοδοσίας του χωνευτή, το οποίο αποτελεί το 1/5 της τροφοδοσίας σε μέση ετήσια βάση, ενώ κάποιες φορές αγγίζει και το 40% της συνολικής τροφοδοσίας. Παράλληλα, το τυρόγαλο συμμετέχει με μέσο ποσοστό περίπου 11%, ενώ η κοτίσια κοπριά και το ενσίρωμα καλαμποκιού συνεισφέρουν κατά μέσο όρο 5% και 7% αντίστοιχα. Η εικόνα αυτή δείχνει ότι η καθημερινή τροφοδοσία δεν βασίζεται σε μία μόνο πρώτη ύλη, αλλά σε έναν μικτό πυρήνα οργανικών ρευμάτων με σαφή κυριαρχία της αγελαδινής κοπριάς και της ανακυκλοφορίας χωνεμένου υπολείμματος.

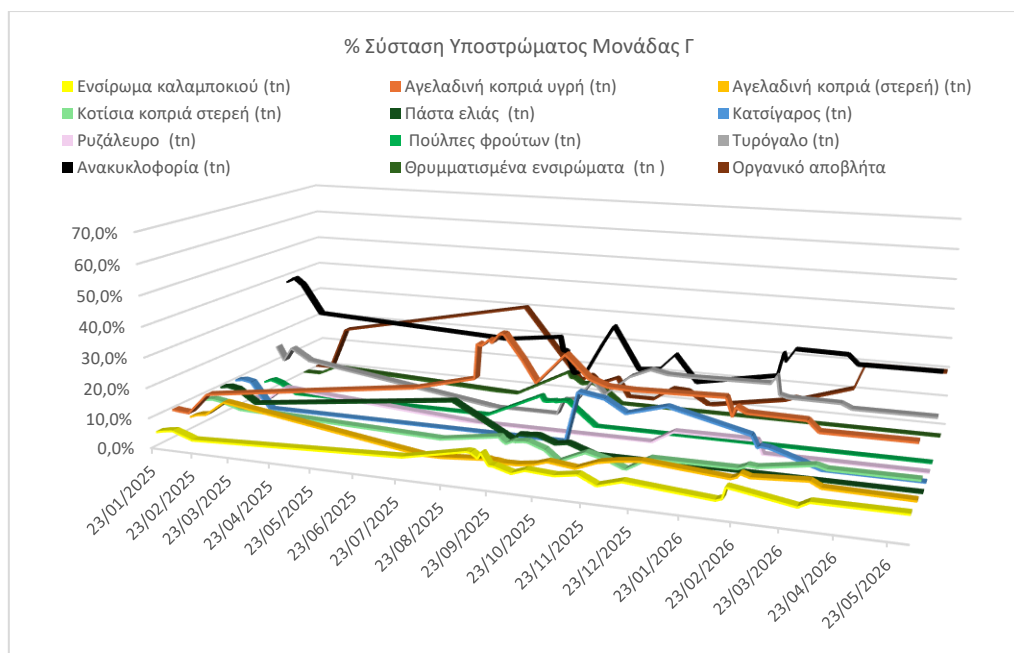
Αντίθετα, η πάστα ελιάς, ο κασίγαρος, οι πούλπες φρούτων, τα θρυμματισμένα ενσίρωματα, η γλυκερίνη, το ρυζάλευρο και το οργανικό απόβλητο εμφανίζουν πιο περιορισμένη ή διαλείπουσα παρουσία, γεγονός που επιτρέπει να χαρακτηριστούν ως εποχικά ή ευκαιριακά υποστρώματα. Ειδικότερα, η πάστα ελιάς και ο κασίγαρος εντοπίζονται κυρίως σε συγκεκριμένες περιόδους, κάτι που είναι συμβατό με την εποχικότητα των ελαιοκομικών δραστηριοτήτων, ενώ οι πούλπες φρούτων, τα θρυμματισμένα ενσίρωματα και το οργανικό απόβλητο εμφανίζονται εντονότερα από το καλοκαίρι έως το φθινόπωρο του 2025, πιθανότατα ως αποτέλεσμα διαθεσιμότητας ή ανάγκης ενίσχυσης της οργανικής φόρτισης.

Πίνακας 13: Σύσταση υποστρώματος τροφοδοσίας αναερόβιου χωνευτή (main digester) της Μονάδας Γ

Ημερομηνία	Ενοσίρωμα καλαμποκιάς (tn)	Αγελαδινή κοπριά υγρή (tn)	Αγελαδινή κοπριά στερεή (tn)	Κοτίσια κοπριά στερεή (tn)	Πάστα ελιάς (tn)	Κατσίγαρος (tn)	Γλυκερίνη (tn)	Ρυζάλευρο (tn)	Πούλπες φρούτων (tn)	Τυρόγαλο (tn)	Ανακυκλοφορία (tn)	Θρυμματισμένα ενοσιρώματα (tn)	Οργανικό αποβλήτα	Ποσότητα πρώτων υλών (tn)
23/01/2025	12	25	11	20	25	25	1		10	40	100			269
29/01/2025	13	23	13	20	25	25	1		12	25	100			257
05/02/2025	15	24	15	20	25	25			10	40	100			274
20/02/2025	6	30	20	10	9			10		20	50	6	30	191
25/07/2025	12	50		6	26						45		60	199
05/09/2025	20	60	3	12	5				18		50	20	12	200
07/09/2025	25	100	3	12	5				18		50	20	12	245
10/09/2025	25	100	3	10	10				18		50	20	12	248
15/09/2025	20	100	2	12	10				18	13	30	15	16	236
17/09/2025	25	100	2	12	10				18	13	30	15	16	241
22/09/2025	15	100	2	12	10				18	13	30	15	10	225
25/09/2025	15	100	2	12	10				18	13	30	15	10	225
07/10/2025	15	110	5	10	7				10	40	70	10	20	297
16/10/2025	15	70	7		7	40				20	70			229
04/11/2025	15	100	5	10		40				40	40			250
19/11/2025	15	70	10	5		25				40	35		10	210
1/12/2025	10	70	13			30				40	50		10	223
17/12/2025	15	70	15	10		35		10		40	30			225
12/2/2026	10	70	10	10		20		10		40	40		10	220
16/2/2026	10	50	10	10		10				40	50		10	190
18/2/2026	15	50	11	10		10				25	40		10	171
24/2/2026	15	50	10	10		10				25	50		10	180
1/4/2026	10	50	12	15						25	50		20	182
8/4/2026	15	50	10	15						25	50		40	205
3/6/2026	15	50	9	15						25	50		40	204

Πίνακας 14: % Σύσταση υποστρώματος τροφοδοσίας αναερόβιου χωνευτή (main digester) της Μονάδας Γ

Ημερομηνία	Ενοσίρωμα καλαμποκιάς (tn)	Αγελαδινή κοπριά υγρή (tn)	Αγελαδινή κοπριά (στερεή) (tn)	Κοτίσια κοπριά στερεή (tn)	Πάστα ελιάς (tn)	Κατσίγαρος (tn)	Γλυκερίνη (tn)	Ρυζάλευρο (tn)	Πούλπες φρούτων (tn)	Τυρόγαλο (tn)	Ανακυκλοφορία (tn)	Θρυμματισμένα ενοσιρώματα (tn)	Οργανικό αποβλήτα
23/01/2025	4,5%	9,3%	4,1%	7,4%	9,3%	9,3%	0,4%	0,0%	3,7%	14,9%	37,2%	0,0%	0,0%
29/01/2025	5,1%	8,9%	5,1%	7,8%	9,7%	9,7%	0,4%	0,0%	4,7%	9,7%	38,9%	0,0%	0,0%
05/02/2025	5,5%	8,8%	5,5%	7,3%	9,1%	9,1%	0,0%	0,0%	3,6%	14,6%	36,5%	0,0%	0,0%
20/02/2025	3,1%	15,7%	10,5%	5,2%	4,7%	0,0%	0,0%	5,2%	0,0%	10,5%	26,2%	3,1%	15,7%
25/07/2025	6,0%	25,1%	0,0%	3,0%	13,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	22,6%	0,0%	30,2%
05/09/2025	10,0%	30,0%	1,5%	6,0%	2,5%	0,0%	0,0%	0,0%	9,0%	0,0%	25,0%	10,0%	6,0%
07/09/2025	10,2%	40,8%	1,2%	4,9%	2,0%	0,0%	0,0%	0,0%	7,3%	0,0%	20,4%	8,2%	4,9%
10/09/2025	10,1%	40,3%	1,2%	4,0%	4,0%	0,0%	0,0%	0,0%	7,3%	0,0%	20,2%	8,1%	4,8%
15/09/2025	8,5%	42,4%	0,8%	5,1%	4,2%	0,0%	0,0%	0,0%	7,6%	5,5%	12,7%	6,4%	6,8%
17/09/2025	10,4%	41,5%	0,8%	5,0%	4,1%	0,0%	0,0%	0,0%	7,5%	5,4%	12,4%	6,2%	6,6%
22/09/2025	6,7%	44,4%	0,9%	5,3%	4,4%	0,0%	0,0%	0,0%	8,0%	5,8%	13,3%	6,7%	4,4%
25/09/2025	6,7%	44,4%	0,9%	5,3%	4,4%	0,0%	0,0%	0,0%	8,0%	5,8%	13,3%	6,7%	4,4%
07/10/2025	5,1%	37,0%	1,7%	3,4%	2,4%	0,0%	0,0%	0,0%	3,4%	13,5%	23,6%	3,4%	6,7%
16/10/2025	6,6%	30,6%	3,1%	0,0%	3,1%	17,5%	0,0%	0,0%	0,0%	8,7%	30,6%	0,0%	0,0%
04/11/2025	6,0%	40,0%	2,0%	4,0%	0,0%	16,0%	0,0%	0,0%	0,0%	16,0%	16,0%	0,0%	0,0%
19/11/2025	7,1%	33,3%	4,8%	2,4%	0,0%	11,9%	0,0%	0,0%	0,0%	19,0%	16,7%	0,0%	4,8%
1/12/2025	4,5%	31,4%	5,8%	0,0%	0,0%	13,5%	0,0%	0,0%	0,0%	17,9%	22,4%	0,0%	4,5%
17/12/2025	6,7%	31,1%	6,7%	4,4%	0,0%	15,6%	0,0%	4,4%	0,0%	17,8%	13,3%	0,0%	0,0%
12/2/2026	4,5%	31,8%	4,5%	4,5%	0,0%	9,1%	0,0%	4,5%	0,0%	18,2%	18,2%	0,0%	4,5%
16/2/2026	5,3%	26,3%	5,3%	5,3%	0,0%	5,3%	0,0%	0,0%	0,0%	21,1%	26,3%	0,0%	5,3%
18/2/2026	8,8%	29,2%	6,4%	5,8%	0,0%	5,8%	0,0%	0,0%	0,0%	14,6%	23,4%	0,0%	5,8%
24/2/2026	8,3%	27,8%	5,6%	5,6%	0,0%	5,6%	0,0%	0,0%	0,0%	13,9%	27,8%	0,0%	5,6%
1/4/2026	5,5%	27,5%	6,6%	8,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	13,7%	27,5%	0,0%	11,0%
8/4/2026	7,3%	24,4%	4,9%	7,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	12,2%	24,4%	0,0%	19,5%
3/6/2026	7,4%	24,5%	4,4%	7,4%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	12,3%	24,5%	0,0%	19,6%
M.O.	6,8%	29,9%	3,8%	5,0%	3,1%	5,1%	0,0%	0,6%	2,8%	10,8%	22,9%	2,3%	6,8%



συμμετοχή από τυρόγαλο, κασίγαρο, στερεή αγελαδινή κοπριά και ανακυκλοφορία χωνεμένου υπολείμματος. Η παράμετρος αυτή, επομένως, αντανakλά με τον πιο άμεσο τρόπο την επίδραση της σύστασης του υποστρώματος στη λειτουργία του χωνευτή και μπορεί να θεωρηθεί ενός εκ των βασικότερων δεικτών μεταβολής του φορτίου.

Τα ολικά στερεά διαμορφώθηκαν κατά μέσο όρο ~6,4% κ.β., με ελάχιστη τιμή 4,8% και μέγιστη 8,0%, παρουσιάζοντας προοδευτική αύξηση προς το τέλος της εξεταζόμενης περιόδου. Κατά το πρώτο στάδιο της λειτουργίας οι τιμές παρέμειναν μεταξύ ~5,5 – 6,0%, ενώ από τα τέλη του 2025 και κυρίως μέσα στο 2026 παρατηρείται σαφής άνοδος, ένδειξη ότι το μίγμα έγινε σταδιακά πιο συμπυκνωμένο. Η αύξηση αυτή συνδέεται κυρίως με μεγαλύτερη συμμετοχή κοτίσιας στερεής κοπριάς, αγελαδινής στερεής κοπριάς, τυρόγαλου και ενσιρωμάτων, δηλαδή υλικών που σχετίζονται με υψηλότερο στερεό κλάσμα. Αντίθετα, χαμηλότερες τιμές ολικών στερεών συνδέονται με αυξημένη συμμετοχή πάστας ελιάς, πούλπας φρούτων και υγρής αγελαδινής κοπριάς. Η συγκεκριμένη παράμετρος, σε συνδυασμό με τα αμμωνιακά, καταγράφει με σαφήνεια τη σταδιακή διαφοροποίηση της φυσικής σύστασης της τροφοδοσίας κατά τη διάρκεια της λειτουργίας.

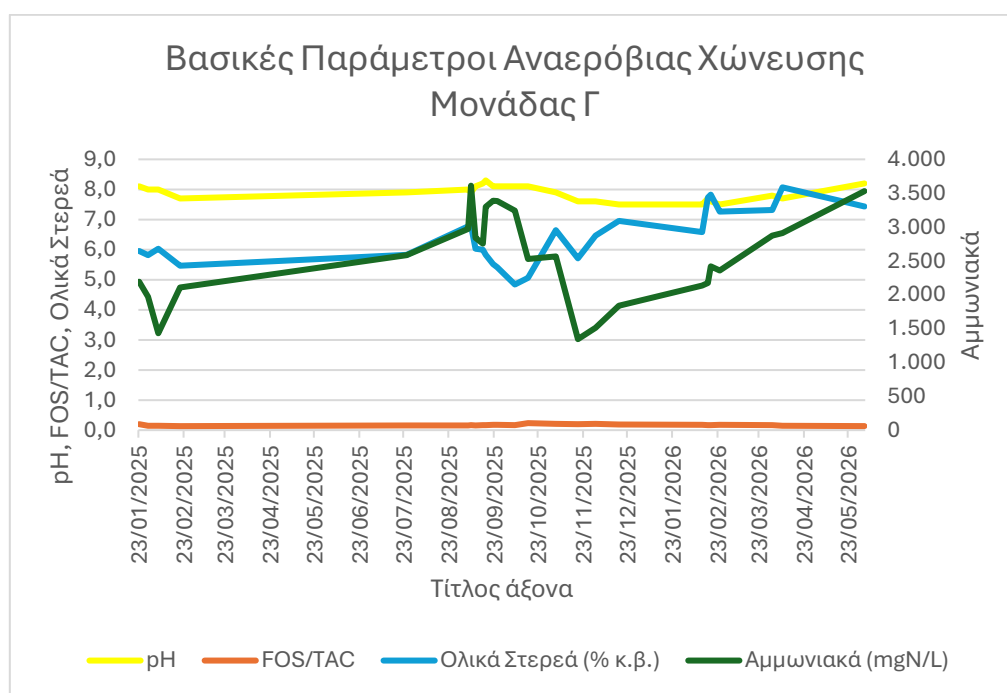
Τέλος, οι τιμές του λόγου FOS/TAC υποδηλώνουν ότι το σύστημα διατηρήθηκε συνολικά εντός αποδεκτών ορίων σταθερότητας. Παρότι οι τιμές του δείκτη παρέμειναν σε σχετικά ασφαλή επίπεδα, παρατηρείται αισθητή αύξηση κατά την περίοδο Οκτωβρίου-Δεκεμβρίου 2025, γεγονός που ίσως αιτιολογείται από την αυξημένη τροφοδοσία οργανικού φορτίου ή αυξημένη παραγωγή πτητικών οξέων. Η συσχέτιση του FOS/TAC με τη σύσταση του υποστρώματος δείχνει θετικότερη επίδραση από τον κασίγαρο, την υγρή αγελαδινή κοπριά και το τυρόγαλο, ενώ χαμηλότερες τιμές του δείκτη συνδέονται με αυξημένη συμμετοχή κοτίσιας στερεής κοπριάς, οργανικού αποβλήτου, θρυμματισμένων ενσιρωμάτων, πούλπας φρούτων και ανακυκλοφορίας χωνεμένου υπολείμματος.

Συνολικά, η μελέτη των φυσικοχημικών παραμέτρων, όπως αυτή παρουσιάζεται στον πίνακα 15 και στο γράφημα 30, δείχνει ότι ο χωνευτής FM1 λειτούργησε με ικανοποιητική σταθερότητα, ενώ οι μεταβολές στη σύσταση της τροφοδοσίας αποτυπώνονται κυρίως στις διακυμάνσεις των αμμωνιακών, των ολικών στερεών και δευτερευόντως του FOS/TAC. Έτσι, η σύνθεση του υποστρώματος αναδεικνύεται ως κρίσιμος παράγοντας όχι μόνο για την παραγωγική απόδοση, αλλά και για τη διατήρηση της φυσικοχημικής ισορροπίας της διεργασίας.

Πίνακας 15: Μετρήσεις Βασικών Παραμέτρων για το έτος 2025 στη δεξαμενή χώνευσης (main digester) της Μονάδας Γ

Ημερομηνία	Χωνευτής	pH	FOS/TAC	Αμμωνιακά (mgN/L)	Ολικά Στερεά (% κ.β.)
23/01/2025	FM1	8,1	0,195	2191	5,95
29/01/2025	FM1	8,0	0,141	1970	5,82
05/02/2025	FM1	8,0	0,148	1433	6,03
20/02/2025	FM1	7,7	0,135	2109	5,46
25/07/2025	FM1	7,9	0,162	2586	5,83
05/09/2025	FM1	8,0	0,154	2972	6,77
07/09/2025	FM1	7,9	0,162	3611	6,79
10/09/2025	FM1	8,1	0,160	2840	6,03
15/09/2025	FM1	8,2	0,166	2754	6,00
17/09/2025	FM1	8,3	0,171	3300	5,83
22/09/2025	FM1	8,1	0,178	3390	5,52

25/09/2025	FM1	8,1	0,175	3385	5,41
07/10/2025	FM1	8,1	0,169	3240	4,84
16/10/2025	FM1	8,1	0,233	2528	5,06
04/11/2025	FM1	7,9	0,210	2565	6,65
19/11/2025	FM1	7,6	0,202	1344	5,71
1/12/2025	FM1	7,6	0,212	1513	6,46
17/12/2025	FM1	7,5	0,191	1837	6,95
12/2/2026	FM1	7,5	0,179	2136	6,58
16/2/2026	FM1	7,7	0,172	2175	7,73
18/2/2026	FM1	7,6	0,165	2420	7,83
24/2/2026	FM1	7,5	0,180	2360	7,26
¼/2026	FM1	7,8	0,172	2873	7,32
8/4/2026	FM1	7,7	0,147	2912	8,07
3/6/2026	FM1	8,2	0,137	3532	7,43



Γράφημα 29: Διακύμανση βασικών παραμέτρων στον αναερόβιο χωνευτή (FM1) της Μονάδας Γ

5.3.4. Δεδομένα παραγωγής βιοαερίου στη Μονάδα Γ

Η ανάλυση των δεδομένων παραγωγής του χωνευτή FM1, όπως αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακα 16, δείχνει ότι η μονάδα παρουσίασε σχετικά σταθερή συνολική παραγωγή βιοαερίου, με μέση τιμή περίπου 12002,6 Nm³/ημέρα, ελάχιστη 11908 Nm³/ημέρα και μέγιστη 12100 Nm³/ημέρα. Το περιορισμένο εύρος διακύμανσης υποδηλώνει ότι, παρά τις μεταβολές στη σύσταση του υποστρώματος, η διεργασία διατήρησε σε γενικές γραμμές σταθερή παραγωγικότητα. Η σταθερότητα του pH και οι γενικά αποδεκτές τιμές του FOS/TAC φαίνεται ότι συνέβαλαν στη διατήρηση ομαλής παραγωγικής συμπεριφοράς.

Το ποσοστό CH₄ παρουσίασε μεγαλύτερη μεταβλητότητα, με μέση τιμή περίπου 58,7%, ελάχιστη 55,0% και μέγιστη 62,0%, γεγονός που δείχνει ότι η ποιότητα του

παραγόμενου αερίου επηρεαζόταν περισσότερο από τη σύσταση του υποστρώματος απ' ό,τι ο συνολικός όγκος του. Υψηλότερες τιμές μεθανίου φαίνεται να συνδέονται κυρίως με τη συμμετοχή υγρής αγελαδινής κοπριάς και τυρόγαλου, ενώ αρνητικότερη τάση εμφανίζουν η συμμετοχή ανακυκλοφορίας και η χρήση στερεής αγελαδινής κοπριάς. Η μεταβολή του CH₄ δεν φαίνεται να εξαρτάται άμεσα από μία μόνο φυσικοχημική παράμετρο, αλλά περισσότερο από τη συνολική ποιότητα και βιοαποδομησιμότητα του μίγματος τροφοδοσίας.

Αντίθετα, η συγκέντρωση H₂S εμφάνισε της μεγαλύτερες διακυμάνσεις, με μέση τιμή περίπου 240 ppm, ελάχιστη 100 ppm και μέγιστη 500 ppm. Η παράμετρος αυτή φαίνεται να είναι η πιο ευαίσθητη στις μεταβολές της τροφοδοσίας. Αυξημένες τιμές H₂S συνδέθηκαν κυρίως με μεγαλύτερη συμμετοχή οργανικού αποβλήτου και πάστας ελιάς, ενώ χαμηλότερες τιμές παρατηρήθηκαν κατά την εποχική χρήση πούλπας φρούτων και κατσίγαρου.

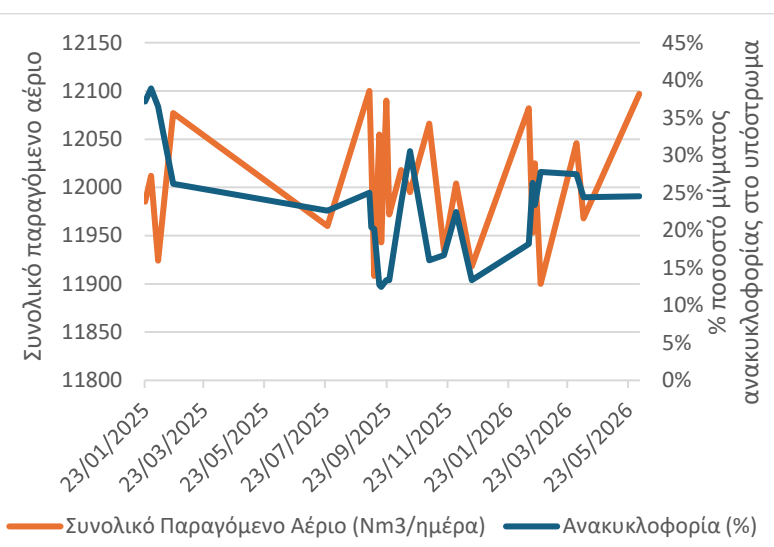
Πίνακας 16: Δεδομένα παραγόμενου προϊόντος της Μονάδας Γ

Ημερομηνία	Συνολικό Παραγόμενο Αέριο (Nm ³ /ημέρα)	Ποσοστό CH ₄	H ₂ S (ppm)
23/01/2025	11985,00	58,70%	187
29/01/2025	12012,00	55,40%	186
05/02/2025	11924,00	61,20%	238
20/02/2025	12077,00	56,80%	200
25/07/2025	11960,00	59,50%	500
05/09/2025	12100,00	60,90%	101
07/09/2025	12031,00	55,90%	126
10/09/2025	11908,00	57,30%	245
15/09/2025	12055,00	61,80%	240
17/09/2025	11943,00	58,10%	221
22/09/2025	12090,00	60,20%	198
25/09/2025	11972,00	56,10%	189
07/10/2025	12018,00	59,90%	250
16/10/2025	11995,00	57,70%	164
04/11/2025	12066,00	62,00%	356
19/11/2025	11935,00	55,00%	300
1/12/2025	12004,00	60,60%	245
17/12/2025	11918,00	58,90%	192
12/2/2026	12082,00	56,50%	400
16/2/2026	11953,00	61,50%	350
18/2/2026	12025,00	57,00%	342
24/2/2026	11900,00	59,20%	333
1/4/2026	12046,00	55,70%	119
8/4/2026	11968,00	60,00%	125
3/6/2026	12097,00	61,00%	254

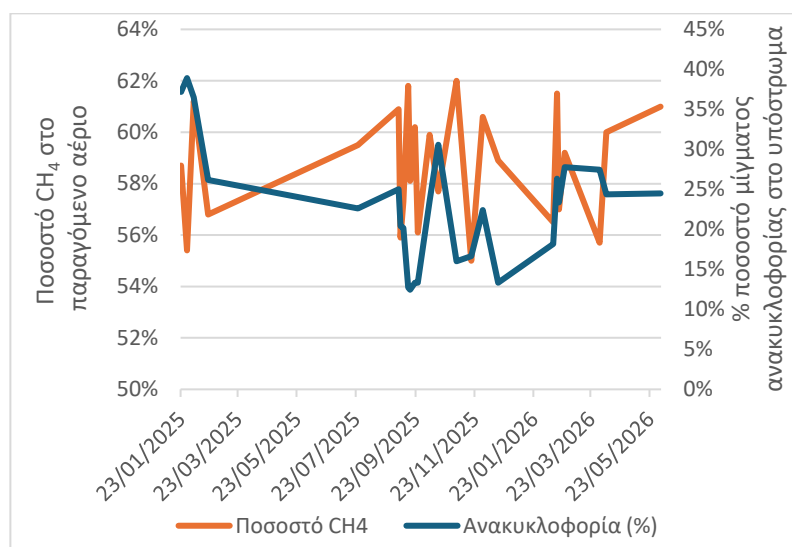
5.3.5. Επίδραση της σύστασης του υποστρώματος και των φυσικοχημικών παραμέτρων στην παραγωγή βιοαερίου στη Μονάδα Β

Η χρήση της ανακυκλοφορίας χωνεμένου υπολείμματος δεν παρουσίασε ιδιαίτερα έντονες επιδράσεις στην παραγωγή αερίου. Το Γράφημα 29 δείχνει μία ασθενώς θετική

επίδραση ως προς το συνολικό παραγόμενο αέριο, ενώ το Γράφημα 30 δείχνει μία ελαφρώς αρνητική σχέση με το ποσοστό CH₄. Στην ουσία η χρήση της κυρίως στοχεύει στην εξισορρόπηση της τροφοδοσίας και στη διατήρηση των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών (pH, θερμοκρασία, κτλ.) σε σταθερές συνθήκες.

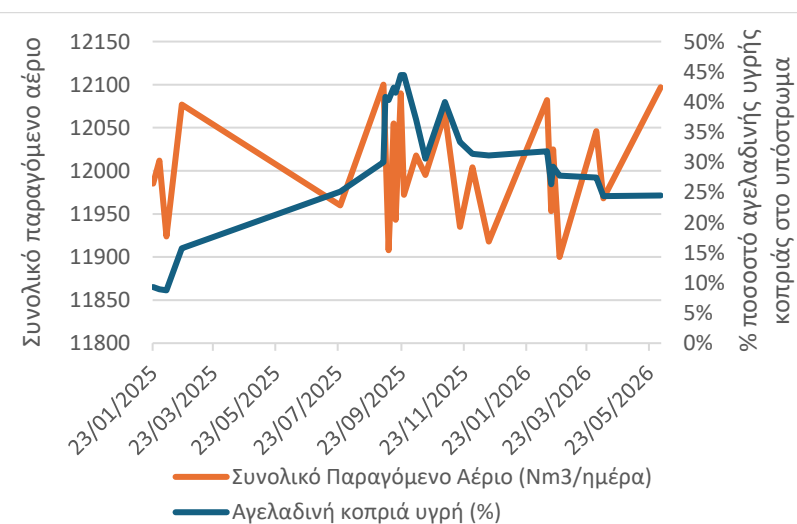


Γράφημα 30: Συγκριτικό διάγραμμα % ποσοστού μίγματος ανακυκλοφορίας στην τροφοδοσία του χωνευτή και του συνολικού παραγόμενου αερίου στη μονάδα Γ

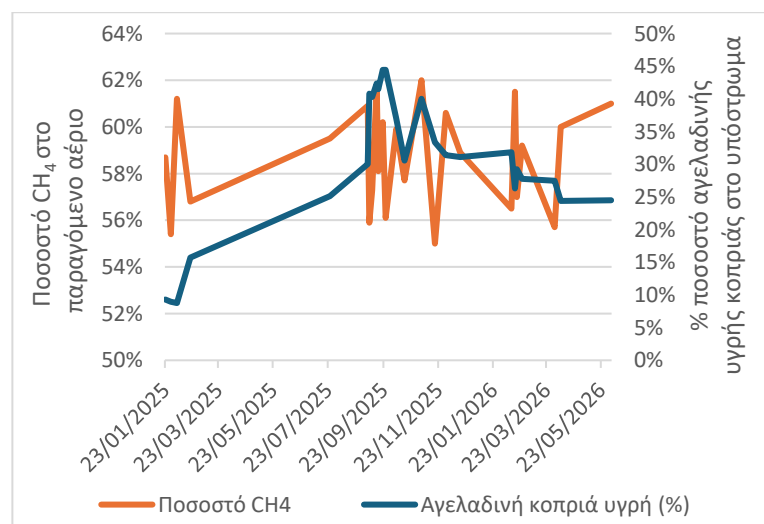


Γράφημα 31: Συγκριτικό διάγραμμα % ποσοστού μίγματος ανακυκλοφορίας στην τροφοδοσία του χωνευτή και του % ποσοστού CH₄ στο παραγόμενο αέριο στη μονάδα Γ

Αντίστοιχη εικόνα ασθενούς θετικής επίδρασης τόσο στο συνολικό παραγόμενο αέριο, όσο και στο ποσοστό CH₄ σε αυτό, παρουσιάζει η χρήση της υγρής αγελαδινής κοπριάς, η οποία αποτελεί το βασικό συστατικό της τροφοδοσίας με μέση ετήσιο ποσοστό συμμετοχής της το 30% και τιμές που συχνά αγγίζουν το 45% (Γραφήματα 32 και 33 αντίστοιχα). Καταδεικνύεται έτσι, ότι η υγρή αγελαδινή κοπριά ουσιαστικά παρέχει το μεγαλύτερο ποσοστό του απαιτούμενου οργανικού φορτίου, επιδρά ασθενώς θετικά ως της την παραγωγή του βιοαερίου και εξασφαλίζει την ισορροπία του συστήματος.

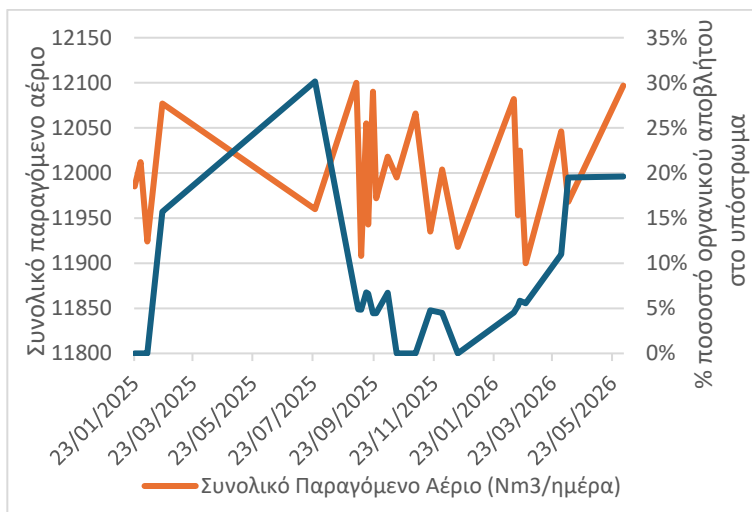


Γράφημα 32: Συγκριτικό διάγραμμα % ποσοστού υγρής αγελαδινής κοπριάς στην τροφοδοσία του χωνευτή και του συνολικού παραγόμενου αερίου στη Μονάδα Γ

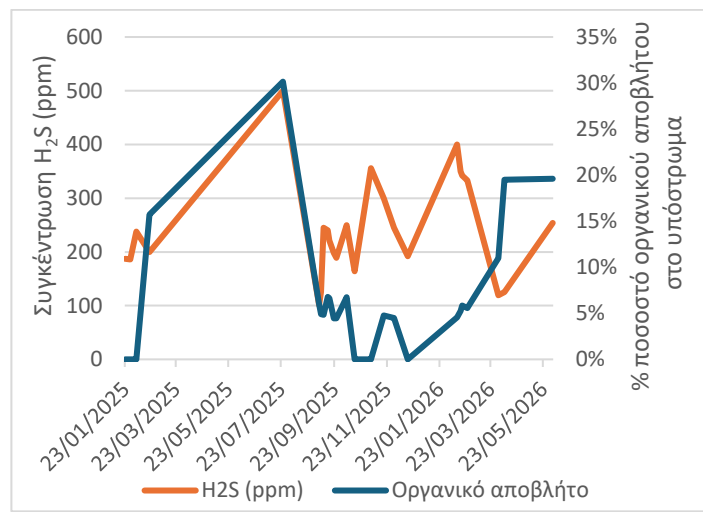


Γράφημα 33: Συγκριτικό διάγραμμα % ποσοστού υγρής αγελαδινής κοπριάς στην τροφοδοσία του χωνευτή και του % ποσοστού CH₄ στο παραγόμενο αέριο στη Μονάδα Γ

Το οργανικό απόβλητο παρουσίασε μία θετική, παρότι ακανόνιστη, επίδραση σε σχέση με το συνολικό παραγόμενο αέριο, γεγονός που υποδηλώνει ότι μπορεί να συμβάλλει στην αύξηση της ποσότητας του βιοαερίου (Γράφημα 34). Ωστόσο, η ίδια πρώτη ύλη εμφάνισε και τη σαφέστερη αρνητική επίδραση ως της της προσμίξεις H_2S στο παραγόμενο αέριο, στοιχείο που δείχνει ότι η αυξημένη συμμετοχή του πιθανόν να συνοδεύεται από επιβάρυνση της ποιότητας του αερίου λόγω υψηλότερης συγκέντρωσης υδρόθειου (Γράφημα 35).

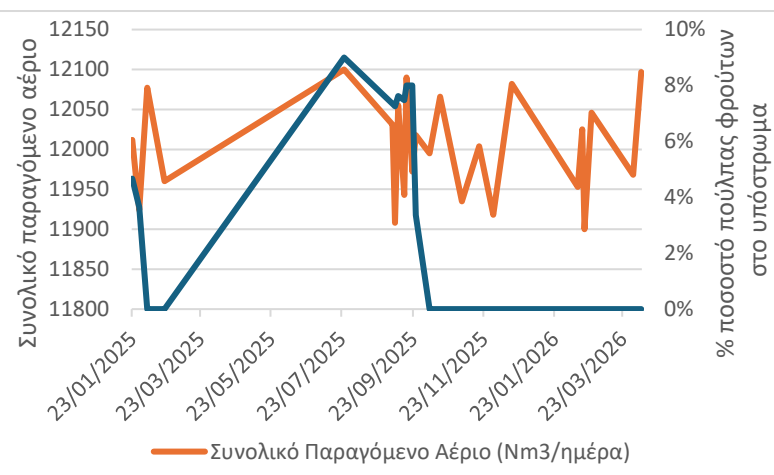


Γράφημα 34: Συγκριτικό διάγραμμα % ποσοστού οργανικού αποβλήτου στην τροφοδοσία του χωνευτή και του συνολικού παραγόμενου αερίου στη Μονάδα Γ

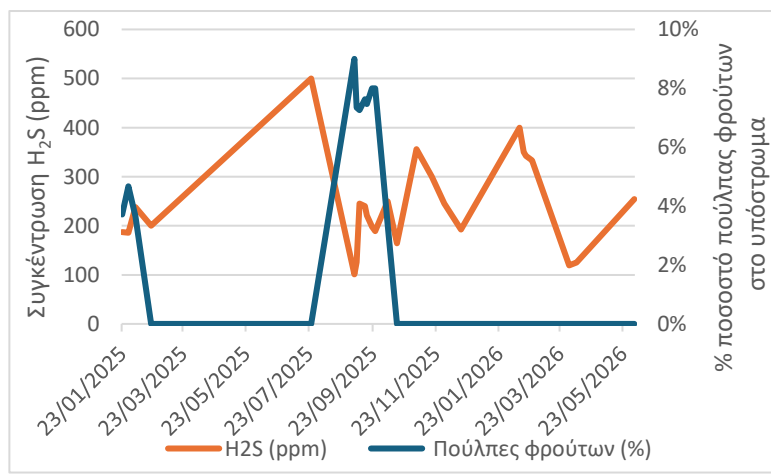


Γράφημα 35: Συγκριτικό διάγραμμα % ποσοστού οργανικού αποβλήτου στην τροφοδοσία του χωνευτή και της συγκέντρωσης H_2S στο παραγόμενο αέριο στη Μονάδα Γ

Η άκρως εποχική χρήση της πούλπας φρούτων, αποκλειστικά από αρχές Οκτωβρίου έως και τέλος Οκτωβρίου, εμφάνισε μία ασθενώς θετική επίδραση σε σχέση με τη συνολική παραγωγή και την ισχυρότερη θετική επίδραση από όλα τα υποστρώματα ως προς τη συγκέντρωση H_2S στο τελικό παραγόμενο αέριο (Γραφήματα 36 και 37). Και τα δύο αποτελούν απόδειξη ότι η αυξημένη συμμετοχή της συμβάλει ουσιαστικά τόσο στην αύξηση της παραγωγής αλλά ιδιαίτερα στη μείωση της συγκέντρωσης υδρόθειου.



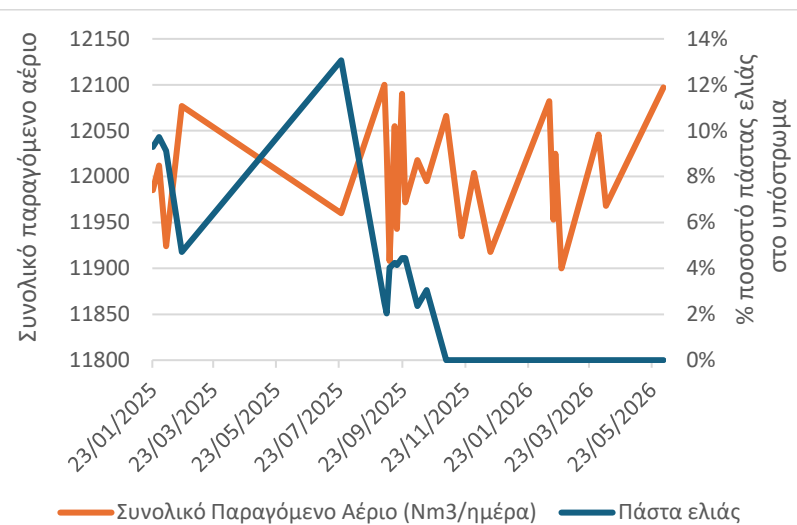
Γράφημα 36: Συγκριτικό διάγραμμα % ποσοστού πούλπας φρούτων στην τροφοδοσία του χωνευτή και του συνολικού παραγόμενου αερίου στη Μονάδα Γ



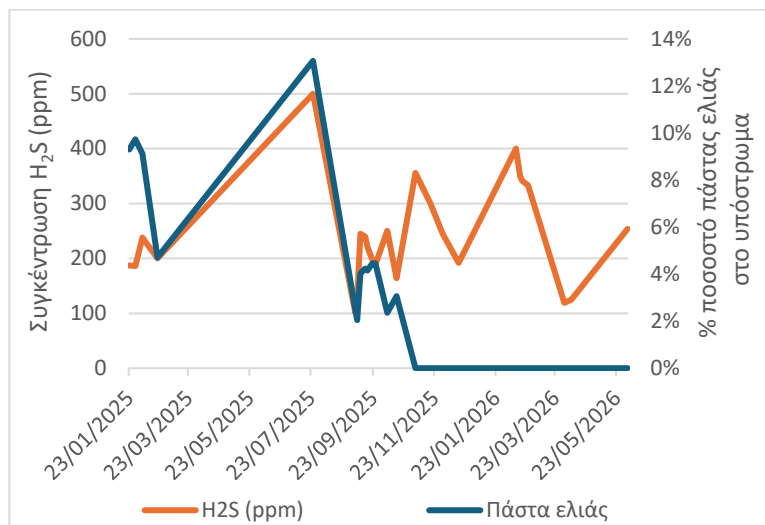
Γράφημα 37: Συγκριτικό διάγραμμα % ποσοστού πούλπας φρούτων στην τροφοδοσία του χωνευτή και της συγκέντρωσης H_2S στο παραγόμενο αέριο στη Μονάδα Γ

Η πάστα ελιάς χρησιμοποιήθηκε επίσης εποχικά και αποκλειστικά κατά το πρώτο μισό της περιόδου μελέτης, αλλά εμφάνισε αντίθετη επίδραση συγκριτικά με την πούλπα

φρούτων. Στο γράφημα 38 φαίνεται η αρνητική επίδραση της χρήσης πάστας ελιάς στο συνολικό παραγόμενο αέριο, ενώ στο γράφημα 39 είναι ακόμα πιο ξεκάθαρη η αρνητική επίδραση και ως προς τις προσμίξεις H_2S στο τελικό παραγόμενο προϊόν.

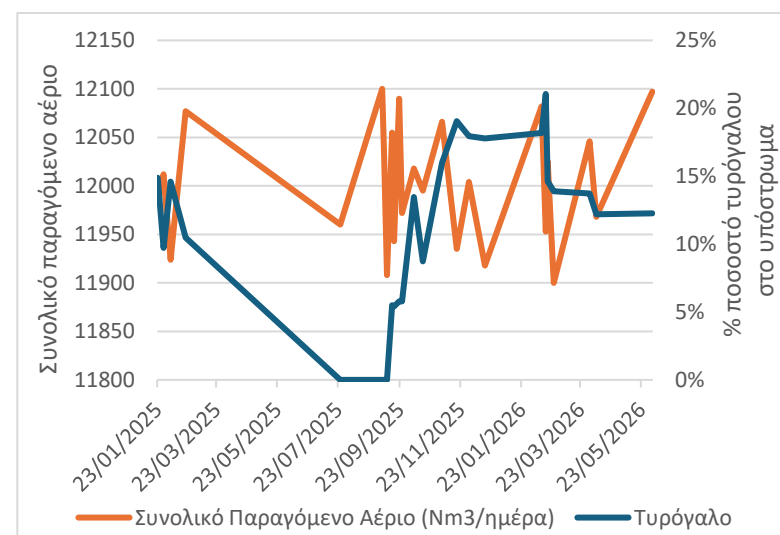


Γράφημα 38: Συγκριτικό διάγραμμα % ποσοστού πάστας ελιάς στην τροφοδοσία του χωνευτή και του συνολικού παραγόμενου αερίου στη Μονάδα Γ

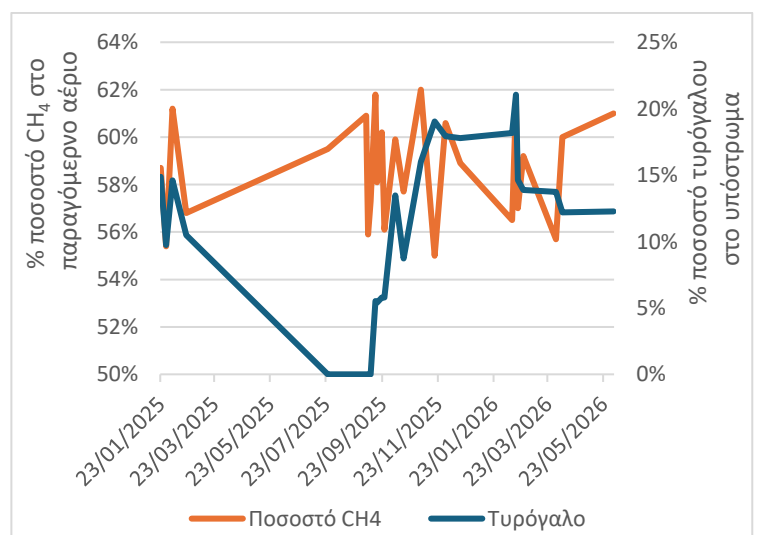


Γράφημα 39: Συγκριτικό διάγραμμα % ποσοστού πάστας ελιάς στην τροφοδοσία του χωνευτή και της συγκέντρωσης H_2S στο παραγόμενο αέριο στη Μονάδα Γ

Το τυρόγαλο παρουσίασε ελαφρώς αρνητική σχέση με το συνολικό παραγόμενο αέριο, γεγονός που δείχνει ότι δεν φαίνεται να λειτουργεί ως παράγοντας αύξησης της συνολικής παραγωγής. Ωστόσο, ως προς το ποσοστό CH_4 εμφάνισε θετική τάση, γεγονός που υποδηλώνει ότι μπορεί να συνδέεται με βελτίωση της περιεκτικότητας του βιοαερίου σε μεθάνιο (Γραφήματα 40 και 41).



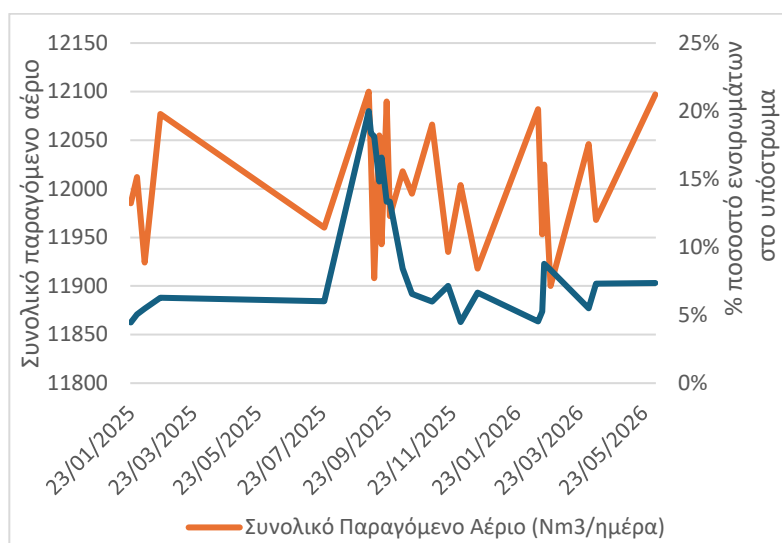
Γράφημα 40: Συγκριτικό διάγραμμα % ποσοστού τυρόγαλου στην τροφοδοσία του χωνευτή και του συνολικού παραγόμενου αερίου στη Μονάδα Γ



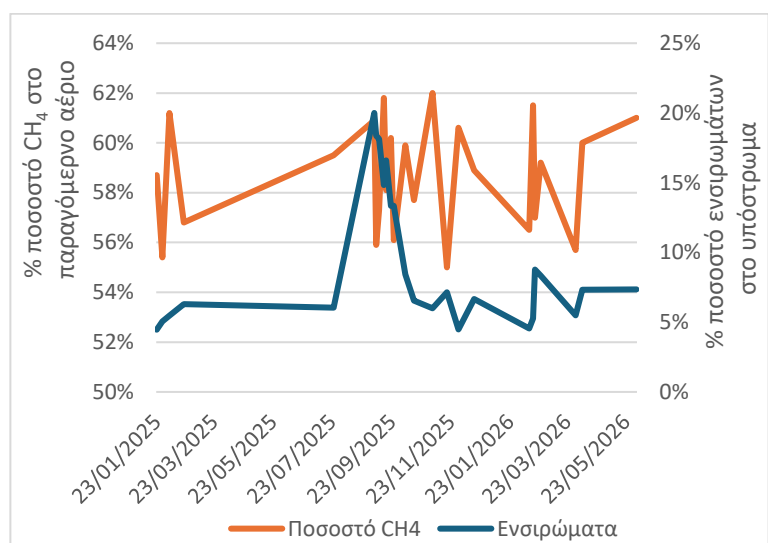
Γράφημα 41: Συγκριτικό διάγραμμα % ποσοστού τυρόγαλου στην τροφοδοσία του χωνευτή και του % ποσοστού CH_4 στο παραγόμενο αέριο στη Μονάδα Γ

Το ενσίρωμα, είτε ως ενσίρωμα καλαμποκιού είτε ως λοιπά θρυμματισμένα ενσιρώματα αποτελεί σταθερή πηγή τροφοδοσίας του χωνευτή χωρίς κάποια χαρακτηριστική ή ιδιαίτερη επίδραση στα δεδομένα παραγωγής αερίου. Αυτό ισχύει τόσο σε ετήσια βάση, όπου η μέση τιμή συμμετοχής του κυμαίνεται στα επίπεδα του 6%, όσο και το μήνα Σεπτέμβριο, όπου η συμμετοχή του ενσιρώματος φτάνει στη μέση τιμή του

16,4%, χωρίς καμία αισθητή επίδραση ούτε στο συνολικό παραγόμενο αέριο, ούτε στη συγκέντρωση CH₄ σε αυτό (Γραφήματα 42 και 43)

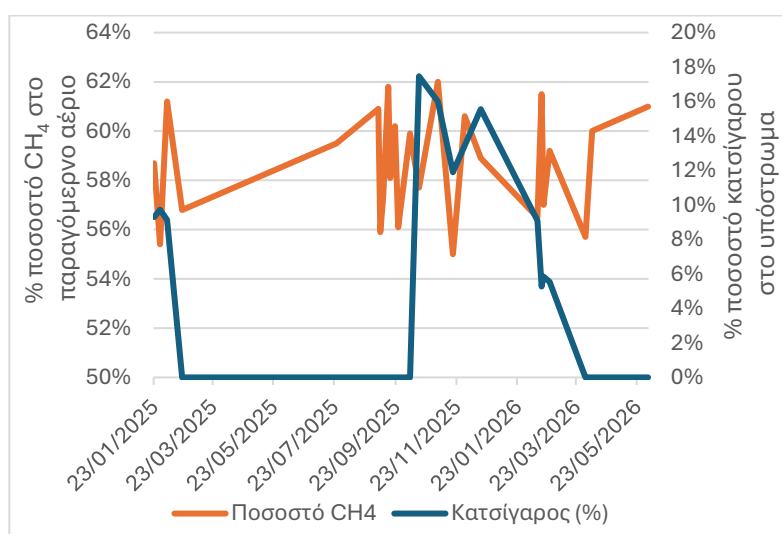


Γράφημα 42: Συγκριτικό διάγραμμα % ποσοστού ενσιρωμάτων στην τροφοδοσία του χωνευτή και του συνολικού παραγόμενου αερίου στη Μονάδα Γ

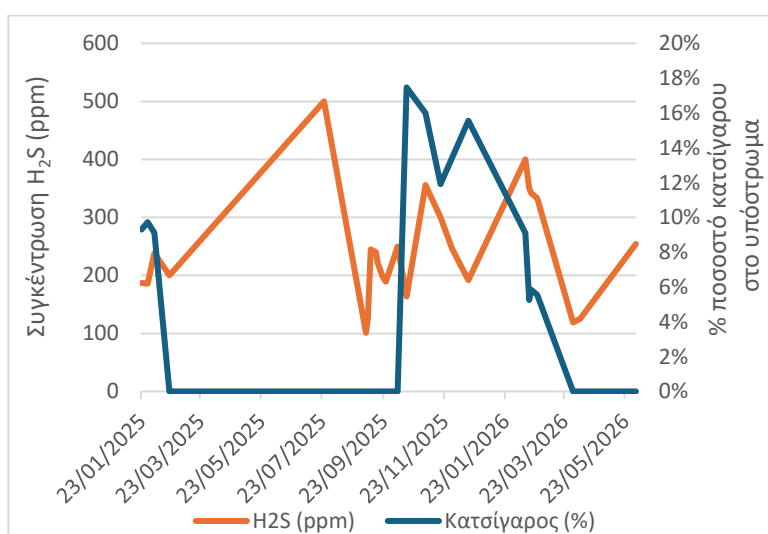


Γράφημα 43: Συγκριτικό διάγραμμα % ποσοστού ενσιρωμάτων στην τροφοδοσία του χωνευτή και της συγκέντρωσης H₂S στο παραγόμενο αέριο στη Μονάδα Γ

Τέλος, ο κασίγαρος, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε μόνο κατά τους χειμερινούς μήνες εμφανίζει μία ανεπαίσθητη θετική επίδραση τόσο σε ό,τι αφορά το % ποσοστό μεθανίου, όσο και στις προσμίξεις H₂S στο τελικό παραγόμενο αέριο (Γραφήματα 44 και 45).



Γράφημα 44: Συγκριτικό διάγραμμα % ποσοστού πάστας ελιάς στην τροφοδοσία του χωνευτή και του συνολικού παραγόμενου αερίου στη μονάδα Γ



Γράφημα 45: Συγκριτικό διάγραμμα % ποσοστού πάστας ελιάς στην τροφοδοσία του χωνευτή και της συγκέντρωσης H₂S στο παραγόμενο αέριο στη μονάδα Γ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1. Συγκριτική μελέτη της λειτουργίας των μονάδων

Η παρούσα συγκριτική μελέτη των τριών μονάδων αναερόβιας χώνευσης αγροκτηνοτροφικών αποβλήτων σε κλίμακα πεδίου στην Ελλάδα ανέδειξε ότι η λειτουργική απόδοση των εγκαταστάσεων δεν καθορίζεται αποκλειστικά από τη δυναμικότητα ή το μέγεθός τους, αλλά κυρίως από τη σύνθεση του τροφοδοτούμενου υποστρώματος, τη σταθερότητα των φυσικοχημικών συνθηκών και τον βαθμό στον οποίο οι δύο αυτοί παράγοντες συντονίζονται με σκοπό τη βέλτιστη παραγωγή και ποιότητα βιοαερίου. Παρότι και οι τρεις μονάδες διαθέτουν την ίδια περίπου ονομαστική ισχύ του 1MW, βασίζονται στην ίδια διεργασία της μεσοφιλικής ή θερμοφιλικής αναερόβιας βιοαποικοδόμησης οργανικών υποστρωμάτων και αξιοποιούν τη συγχώνευση μιγμάτων κτηνοτροφικών και αγροτοβιομηχανικών υπολειμμάτων, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι κάθε μονάδα έχει διαμορφώσει διαφορετικό λειτουργικό πρότυπο, το οποίο αντανακλάται τόσο στα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του χωνευτή όσο και στα τελικά χαρακτηριστικά του παραγόμενου αερίου. Στην προσπάθεια συγκριτικής μελέτης των τριών μονάδων παρατίθεται ο πίνακας 17 μέσω των ετήσιων τιμών των διαφόρων παραμέτρων που αφορούν τη λειτουργία και την απόδοσή τους.

Πίνακας 17: Συγκριτικός πίνακας μέσω των τιμών των τριών μονάδων Α, Β, Γ λειτουργικών παραμέτρων και απόδοσης.

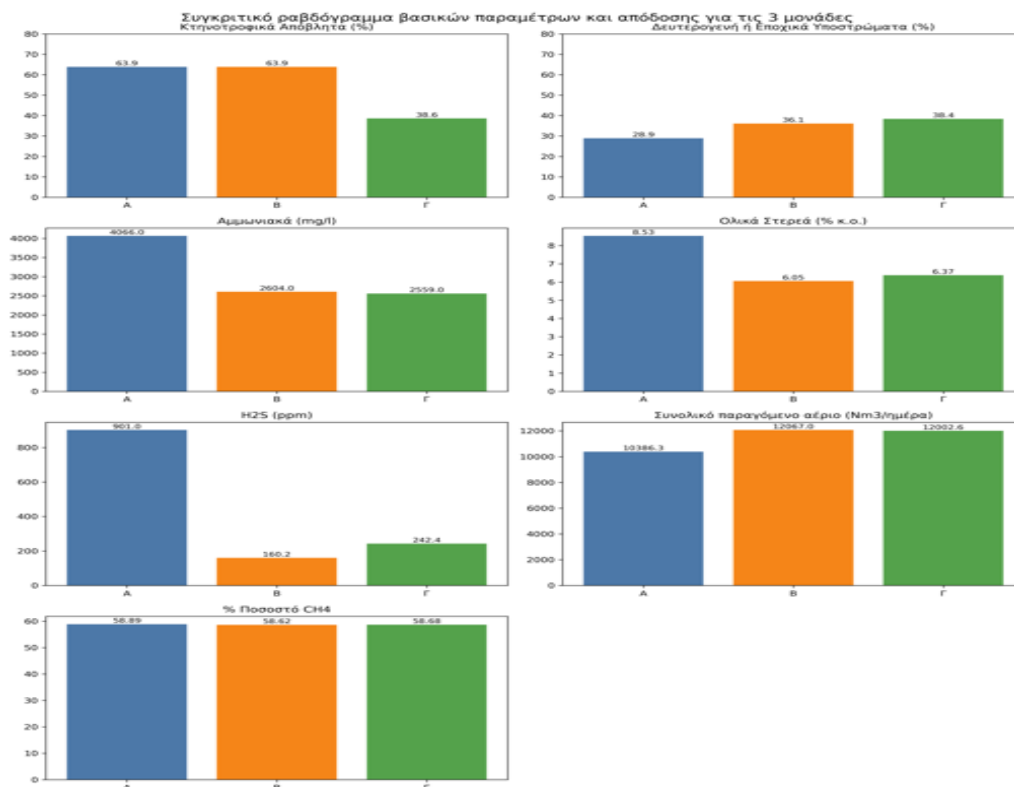
Μονάδα	Α	Β	Γ
Κτηνοτροφικά Απόβλητα (%)	63,9%	63,9%	38,6%
Δευτερογενή ή Εποχικά Υποστρώματα (%)	28,9%	36,1%	38,4%
Αμμωνιακά (mg/l)	4.066	2.604	2.559
Ολικά Στερεά (% κ.ο.)	8,53	6,05	6,37
H ₂ S (ppm)	901	160,2	242,4
Συνολικό παραγόμενο αέριο (Nm ³ /ημέρα)	10386,3	12067,0	12002,6
% Ποσοστό CH ₄	0,59	0,59	0,59
pH	8,2	8	7,9
FOS/TAC	0,26	0,16	0,17

Ως προς τη σύνθεση της τροφοδοσίας, κοινό γνώρισμα και των τριών μονάδων είναι η σημαντική παρουσία κτηνοτροφικών αποβλήτων, τα οποία αποτελούν τον βασικό πυρήνα σταθερής τροφοδοσίας και συνεισφέρουν στη διατήρηση της υγρασίας, της αλκαλικότητας και της βασικής οργανικής φόρτισης. Ωστόσο, η σύγκριση δείχνει ότι οι μονάδες διαφοροποιούνται ουσιαστικά ως προς την ένταξη δευτερογενών και εποχικών υποστρωμάτων, όπως κασσίγαρος, πάστα ελιάς, πούλπες φρούτων, τυρόγαλο, οργανικά απόβλητα και ενσιρώματα. Η διαφοροποίηση αυτή φαίνεται να αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την τελική λειτουργική συμπεριφορά. Η Μονάδα Α φαίνεται να λειτουργεί με πιο «βαρύ» και περισσότερο φορτισμένο μίγμα, κάτι που αντανακλάται στις υψηλότερες μέσες τιμές αμμωνιακών και ολικών στερεών. Η Μονάδα Β παρουσιάζει πιο εξισορροπημένη λειτουργία, με χαμηλότερο οργανικό και αζωτούχο φορτίο σε σχέση με τη Μονάδα Α και με πολύ χαμηλότερες συγκεντρώσεις H₂S. Η Μονάδα Γ, τέλος, καταλαμβάνει μια ενδιάμεση θέση, συνδυάζοντας ποικίλα υποστρώματα με σχετικά σταθερές φυσικοχημικές συνθήκες, αλλά μεγαλύτερη μεταβλητότητα ως προς ορισμένες ποιοτικές παραμέτρους του βιοαερίου.

Η σύγκριση των φυσικοχημικών παραμέτρων δείχνει ότι και οι τρεις μονάδες λειτούργησαν γενικά εντός αποδεκτών ορίων pH και FOS/TAC, γεγονός που υποδηλώνει ότι σε όλες υπήρχε επαρκής ρυθμιστική ικανότητα και δεν παρατηρήθηκαν σοβαρά φαινόμενα οξίνισης. Παρ' όλα αυτά, η διακύμανση των αμμωνιακών και των ολικών στερεών αναδείχθηκε ως ο πιο ευαίσθητος δείκτης διαφοροποίησης μεταξύ των μονάδων. Οι μονάδες με μεγαλύτερη συμμετοχή κοπριάς και πιο πυκνών οργανικών ρευμάτων εμφάνισαν υψηλότερες συγκεντρώσεις αμμωνιακών και μεγαλύτερο φορτίο στερεών, κάτι που μπορεί να ενισχύει τη μεθανογόνο δυναμική του μίγματος, αλλά αυξάνει και τον κίνδυνο λειτουργικής επιβάρυνσης αν δεν υπάρχει σωστή εξισορρόπηση. Αντιθέτως, οι μονάδες με μεγαλύτερη ανακυκλοφορία ή συμμετοχή πιο υδαρών ρευμάτων φαίνεται να συγκρατούν καλύτερα τις μεταβολές αυτές. Συνεπώς, από τη συγκριτική μελέτη προκύπτει ότι η σταθερότητα της αναερόβιας χώνευσης δεν εξαρτάται αποκλειστικά από μία μεμονωμένη φυσικοχημική παράμετρο, αλλά από τη συνολική ισορροπία οργανικού φορτίου, υγρασίας, αζώτου και αλκαλικότητας.

Ως προς την παραγωγή βιοαερίου, η πιο σταθερή παράμετρος μεταξύ των μονάδων φαίνεται να είναι συνήθως ο συνολικός όγκος του παραγόμενου αερίου, ενώ μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις καταγράφονται στην ποιότητα του βιοαερίου, και ειδικότερα στο ποσοστό CH_4 και στις συγκεντρώσεις H_2S . Η Μονάδα Β εμφάνισε τη μεγαλύτερη μέση ημερήσια παραγωγή βιοαερίου ($12.066,77 \text{ Nm}^3/\text{ημέρα}$), ενώ η Μονάδα Γ ακολούθησε πολύ κοντά ($12.002,56 \text{ Nm}^3/\text{ημέρα}$). Η Μονάδα Α, παρότι λειτουργεί με υψηλότερο φυσικοχημικό φορτίο, εμφάνισε χαμηλότερη μέση παραγωγή ($10.386,31 \text{ Nm}^3/\text{ημέρα}$). Το εύρημα αυτό υποδηλώνει ότι η υψηλή οργανική και αζωτούχος φόρτιση δεν συνεπάγεται αυτομάτως αυξημένη παραγωγή, εάν δεν συνοδεύεται από την αντίστοιχη ισορροπία στη σύνθεση του μίγματος. Επίσης, η συγκριτική ανάλυση δείχνει ότι η ποσότητα του παραγόμενου αερίου επηρεάζεται μεν από τη σύσταση του υποστρώματος, αλλά όχι τόσο έντονα όσο η ποιότητά του.

Οι μέσες τιμές του % ποσοστού CH_4 είναι εξαιρετικά κοντινές και στις τρεις μονάδες (58,89%, 58,62% και 58,68% για τις μονάδες Α, Β, και Γ αντίστοιχα), γεγονός που δείχνει ότι σε επίπεδο ενεργειακής ποιότητας το μεθάνιο διατηρείται σε ένα συγκρίσιμο εύρος ανεξάρτητα από τις διαφοροποιήσεις του υποστρώματος. Αντίθετα, η πιο έντονη διαφοροποίηση καταγράφεται στη συγκέντρωση του H_2S , όπου η Μονάδα Α εμφανίζει κατά πολύ τη μεγαλύτερη μέση τιμή ($901,34 \text{ ppm}$), η Μονάδα Γ ενδιάμεση τιμή ($242,44 \text{ ppm}$) και η Μονάδα Β την καλύτερη επίδοση ($160,23 \text{ ppm}$). Υποστρώματα όπως το οργανικό απόβλητο, το τυρόγαλο ή ο κασσίγαρος φαίνεται να βελτιώνουν σε ορισμένες περιπτώσεις το οργανικό φορτίο και τη δυνητική παραγωγή, αλλά συχνά συνοδεύονται από αύξηση των προσμίξεων. Αντίθετα, υλικά όπως οι πούλπες φρούτων και τα θρυμματισμένα ενσιρώματα φαίνεται να συνδέονται με καλύτερη ισορροπία μεταξύ αποδεκτής παραγωγής και χαμηλότερων συγκεντρώσεων H_2S . Το στοιχείο αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία, διότι στην πράξη η ενεργειακή αξία του βιοαερίου δεν καθορίζεται μόνο από τον όγκο του, αλλά και από την καθαρότητά του και το κόστος επεξεργασίας πριν από την ενεργειακή αξιοποίηση. Στα ραβδογράμματα του γραφήματος 46 αποτυπώνεται και οπτικά η σύγκριση των μέσων τιμών των βασικών παραμέτρων λειτουργίας και απόδοσης των τριών μονάδων.



Γράφημα 46: Συγκριτικό ραβδόγραμμα % σύστασης κτηνοτροφικών αποβλήτων, % σύστασης δευτερογενών ή εποχικών υποστρωμάτων, συγκέντρωσης αμμωνιακών (mg/l) και ολικών στερεών (% κ.ο.) στο χωνευτή και συνολικό ημερήσιο παραγόμενο αέριο (Nm³/d), % ποσοστό CH₄ και συγκέντρωση προσμίξεων H₂S (ppm) στο παραγόμενο αέριο για τις μονάδες A, B, Γ.

Για τη βέλτιστη σύγκριση λειτουργίας και απόδοσης των τριών μονάδων παρατίθεται το ιστόγραμμα του γραφήματος 47 τεσσάρων δεικτών λειτουργίας και απόδοσης. Οι τέσσερις δείκτες προκύπτουν ως εξής:

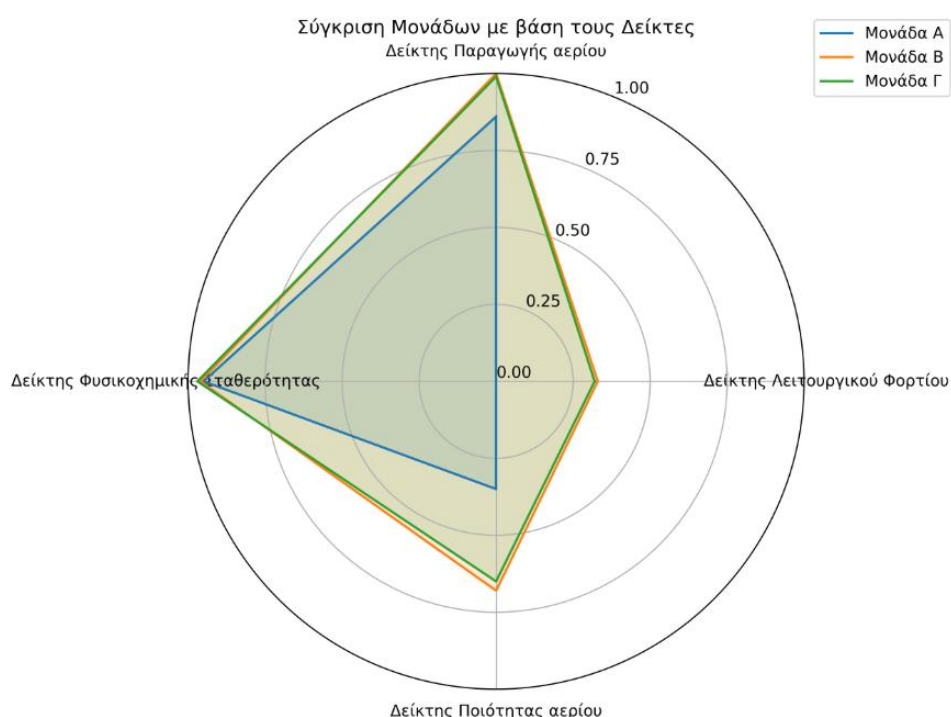
- Δείκτης Λειτουργικού Φορτίου: Δείκτης συνοπτικής απόδοσης της επιβαρυμένης φόρτισης της κάθε μονάδας. Προκύπτει από τα δεδομένα φόρτισης κάθε χωνευτή σε αμμωνιακά και ολικά στερεά, καθώς όσο αυξημένες είναι οι τιμές των αμμωνιακών, τόσο αυξημένο είναι το αζωτούχο φορτίο του συστήματος, ενώ όσο υψηλότερα είναι τα ολικά στερεά, τόσο πιο συμπυκνωμένο και ενδεχομένως πιο απαιτητικό είναι το υπόστρωμα. Πρακτικά, κάθε μία από τις δύο παραμέτρους μετατράπηκε πρώτα σε κανονικοποιημένη τιμή από 0 έως 1 (1 το βέλτιστο για τη μονάδα με τη θετικότερη τιμή ανά παράμετρο), ώστε να μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους, παρότι έχουν διαφορετικές μονάδες μέτρησης. Στη συνέχεια συνδυάστηκαν σε έναν ενιαίο δείκτη με ελαφρώς υψηλότερη βαρύτητα στα αμμωνιακά (60%) και ελαφρώς χαμηλότερη στα ολικά στερεά (40%).
- Δείκτης Φυσικοχημικής Σταθερότητας: Δείκτης των βασικών παραμέτρων σταθερότητας του αναερόβιου χωνευτή, δηλ. του pH και του λόγου FOS/TAC. Γίνεται η παραδοχή βέλτιστης τιμής pH για την αναερόβια χώνευση το 7,5 και του FOS/TAC το 0,2 και υπολογίστηκαν οι απόλυτες τιμές απόκλισης από τις βέλτιστες τιμές για κάθε μία εκ των δύο παραμέτρων για κάθε μονάδα. Στη συνέχεια, κάθε μία από τις δύο παραμέτρους μετατράπηκε πρώτα σε κανονικοποιημένη τιμή από 0 έως 1 (1 το βέλτιστο για τη μονάδα με τη θετικότερη τιμή ανά παράμετρο), ώστε να μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους, παρότι έχουν διαφορετικές μονάδες μέτρησης. Στη συνέχεια συνδυάστηκαν σε έναν ενιαίο δείκτη με ελαφρώς υψηλότερη βαρύτητα στο pH (60%) και ελαφρώς χαμηλότερη στο λόγο FOS/TAC (40%).

- Δείκτης Ποιότητας Αερίου: Δείκτης των βασικών παραμέτρων ποιότητας του παραγόμενου αερίου, δηλ. του ποσοστού CH_4 και των προσμίξεων H_2S . Πρακτικά, κάθε μία από τις δύο παραμέτρους μετατράπηκε πρώτα σε κανονικοποιημένη τιμή από 0 έως 1 (1 το βέλτιστο για τη μονάδα με τη θετικότερη τιμή ανά παράμετρο), ώστε να μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους, παρότι έχουν διαφορετικές μονάδες μέτρησης. Στη συνέχεια συνδυάστηκαν σε έναν ενιαίο δείκτη με ελαφρώς υψηλότερη βαρύτητα στο % ποσοστό CH_4 (60%) και ελαφρώς χαμηλότερη στις προσμίξεις H_2S (40%).
- Δείκτης Παραγωγής Αερίου: Δείκτης της ημερήσιας παραγωγής αερίου ανά μονάδα, θεωρώντας ως βέλτιστη τιμή (1) τη μέγιστη μέση τιμή ημερήσιας παραγωγής αερίου, δηλ. τη μέση τιμή της Μονάδας Β.

Με βάση τα παραπάνω προκύπτουν ο πίνακας 18 με τους δείκτες λειτουργίας και απόδοσης των τριών μονάδων και το αντίστοιχο ιστόγραμμα στο Γράφημα 47.

Πίνακας 18: Συγκριτικός πίνακας δεικτών λειτουργίας και απόδοσης των τριών μονάδων Α, Β, Γ

Μονάδα	Δείκτης Παραγωγής αερίου	Δείκτης Λειτουργικού Φορτίου	Δείκτης Ποιότητας αερίου	Δείκτης Φυσικοχημικής Σταθερότητας
Α	0,86	0,00	0,35	0,95
Β	1,00	0,33	0,68	0,96
Γ	0,99	0,32	0,65	0,97



Γράφημα 47: Συνθετικό διάγραμμα λειτουργικού προφίλ των τριών μονάδων αναερόβιας χώνευσης, με βάση τους δείκτες λειτουργικού φορτίου, φυσικοχημικής σταθερότητας, παραγωγής και ποιότητας παραγόμενου αερίου.

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η Μονάδα Α φαίνεται να ακολουθεί ένα μοντέλο πιο εντατικής φόρτισης, με υψηλές τιμές αμμωνιακών, αυξημένα στερεά και

σχετικά υψηλότερο FOS/TAC. Παρά την ικανοποιητική περιεκτικότητα σε μεθάνιο, η πολύ αυξημένη συγκέντρωση H_2S αποτελεί σαφές μειονέκτημα, καθώς υποβαθμίζει την ποιότητα του παραγόμενου αερίου και ενδέχεται να αυξάνει τις απαιτήσεις σε συστήματα καθαρισμού και προστασίας του εξοπλισμού. Επομένως, η μονάδα αυτή φαίνεται να εκμεταλλεύεται αποτελεσματικά οργανικά φορτία, αλλά με τίμημα μεγαλύτερη ποιοτική επιβάρυνση του βιοαερίου.

Η Μονάδα Β εμφανίζει τη συνολικά πιο ισορροπημένη λειτουργική εικόνα. Συνδυάζει τη μεγαλύτερη μέση παραγωγή βιοαερίου με χαμηλές συγκεντρώσεις H_2S και με φυσικοχημικές παραμέτρους που παραμένουν σε ελεγχόμενα επίπεδα. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι η στρατηγική τροφοδοσίας της μονάδας είναι πιθανόν πιο αποτελεσματικά ρυθμισμένη, επιτυγχάνοντας καλύτερη ισορροπία μεταξύ ποσοτικής απόδοσης και ποιότητας του παραγόμενου αερίου. Συνεπώς, η Μονάδα Β μπορεί να θεωρηθεί ως η μονάδα με την πιο λειτουργικά αποδοτική και ποιοτικά σταθερή συμπεριφορά από τις τρεις που εξετάστηκαν.

Τέλος, η Μονάδα Γ παρουσιάζει μια επίσης ικανοποιητική λειτουργική εικόνα, με παραγωγή σχεδόν ισοδύναμη της Μονάδας Β και με μέσες φυσικοχημικές τιμές που παραμένουν εντός σταθερού πλαισίου. Ωστόσο, η ποιότητα του αερίου εμφανίζεται πιο ευαίσθητη στη μεταβολή της τροφοδοσίας, κυρίως λόγω της εντονότερης επίδρασης ορισμένων υποστρωμάτων στο H_2S . Από την ανάλυση της Μονάδας Γ προκύπτει ότι, η μονάδα αυτή εμφανίζει καλές προοπτικές βελτιστοποίησης κυρίως μέσω ανασχεδιασμού της σύνθεσης του μίγματος.

6.2. Συγκριτική μελέτη των βασικών υποστρωμάτων τροφοδοσίας

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει μία προσπάθεια συσχέτισης της απόδοσης των τριών μονάδων με βάση τα διαφορετικά υποστρώματα τροφοδοσίας. Για το λόγο αυτό αυτό χρησιμοποιήθηκε ένα κοινό διάγραμμα των συντελεστών συσχέτισης r μεταξύ των βασικών υποστρωμάτων και των παραμέτρων απόδοσης για τις τρεις μονάδες μαζί.

Ο συντελεστής συσχέτισης r που χρησιμοποιήθηκε είναι ο γραμμικός συντελεστής συσχέτισης Pearson. Ο δείκτης αυτός μετρά τον βαθμό και την κατεύθυνση της γραμμικής σχέσης μεταξύ δύο μεταβλητών. Μαθηματικά, ο συντελεστής Pearson υπολογίζεται από τη σχέση:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

όπου:

r : συντελεστής συσχέτισης Pearson

x_i : οι τιμές της πρώτης μεταβλητής, π.χ. το ποσοστό ενός συγκεκριμένου υποστρώματος

y_i : οι τιμές της δεύτερης μεταβλητής, π.χ. το παραγόμενο αέριο ή το H_2S

$\bar{x}$: ο μέσος όρος της πρώτης μεταβλητής

$\bar{y}$: ο μέσος όρος της δεύτερης μεταβλητής

n : ο αριθμός των παρατηρήσεων

Στην περίπτωσή μας, η μία μεταβλητή είναι το ποσοστό συμμετοχής ενός υποστρώματος στο μίγμα τροφοδοσίας και η δεύτερη είναι ένας δείκτης απόδοσης, όπως το συνολικό παραγόμενο αέριο, το %ποσοστό CH_4 ή η συγκέντρωση H_2S

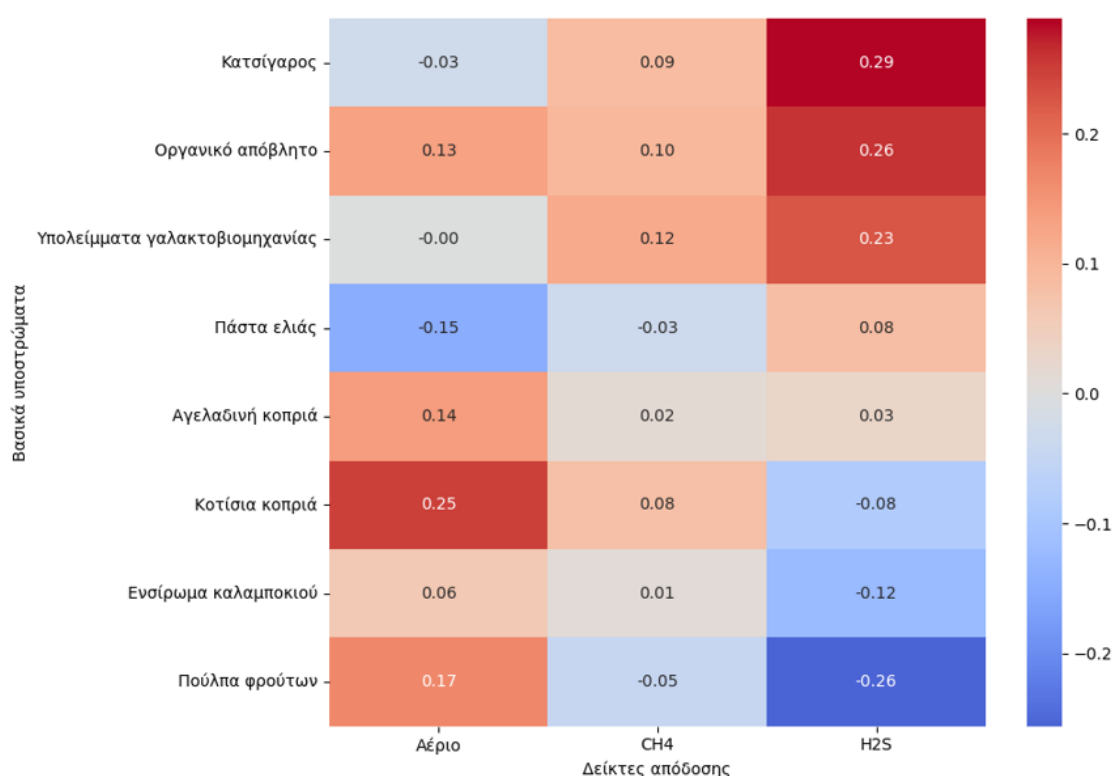
Η λογική του τύπου είναι ότι εξετάζει κατά πόσο οι αποκλίσεις των δύο μεταβλητών από τους μέσους όρους τους μεταβάλλονται μαζί. Αν όταν αυξάνεται η μία αυξάνεται και η άλλη, τότε το r παίρνει θετικές τιμές. Αν όταν αυξάνεται η μία η άλλη μειώνεται, τότε το r γίνεται αρνητικό. Αν δεν υπάρχει σαφής γραμμική σχέση, τότε το r τείνει προς το μηδέν.

Οι τιμές του συντελεστή κυμαίνονται από -1 έως +1:

- $r = +1$ σημαίνει τέλεια θετική γραμμική συσχέτιση
- $r = -1$ σημαίνει τέλεια αρνητική γραμμική συσχέτιση
- $r = 0$ σημαίνει απουσία γραμμικής συσχέτισης

(Schober et al., 2018)

Το γράφημα 47 συνοψίζει, σε ενιαία μορφή, τη σχέση των βασικών υποστρωμάτων με τους 3 βασικούς δείκτες απόδοσης (συνολικό παραγόμενο αέριο, το % ποσοστό CH_4 και τις συγκεντρώσεις H_2S σε αυτό). Προς διευκόλυνση της μελέτης κρατήθηκαν μόνο τα υποστρώματα που ήταν κοινά ή λειτουργικά συγκρίσιμα μεταξύ των τριών μονάδων και/ή που είχαν ουσιαστική συμμετοχή δηλαδή άνω του 10% σε κάποια από τις μονάδες. Οπότε με την παραπάνω παραδοχή, στο διάγραμμα περιλαμβάνονται τα εξής βασικά υποστρώματα: αγελαδινή κοπριά, κοτίσια κοπριά, κασίγαρος, πούλπα φρούτων, υπολείμματα γαλακτοβιομηχανίας, ενσίρωμα καλαμποκιού, οργανικό απόβλητο, πάστα ελιάς.



Γράφημα 48: Συγκριτικό συγκεντρωτικό διάγραμμα συσχέτισης βασικών υποστρωμάτων – με δείκτες απόδοσης (Συνολικό παραγόμενο αέριο, % ποσοστό CH_4 και συκέντρωση H_2S) για τις μονάδες Α, Β, Γ.

Το διάγραμμα μας βοηθάει να κατανοήσουμε ότι το πιο θετικό πρόσημο ως προς το συνολικό παραγόμενο αέριο εμφανίζει η κοτίσια κοπριά ($r = 0,249$), ακολουθούμενη από την πούλπα φρούτων ($r = 0,168$), την αγελαδινή κοπριά ($r = 0,139$) και το οργανικό απόβλητο ($r = 0,133$). Αυτό σημαίνει ότι, σε συγκεντρωτικό επίπεδο και για τις τρεις μονάδες, τα συγκεκριμένα υποστρώματα συνδέονται περισσότερο με αυξημένη

παραγωγή βιοαερίου. Αντίθετα, η πάστα ελιάς παρουσιάζει αρνητική συσχέτιση ($r = -0,147$), ενώ ο κασίγαρος και τα υπολείμματα γαλακτοβιομηχανίας εμφανίζουν ουδέτερη έως οριακά αρνητική σχέση με την ποσότητα του παραγόμενου αερίου.

Σε ότι έχει να κάνει με το ποσοστό CH_4 , την πιο θετική σχέση εμφανίζουν τα υπολείμματα γαλακτοβιομηχανίας ($r = 0,118$), το οργανικό απόβλητο ($r = 0,096$), ο κασίγαρος ($r = 0,088$) και η κοτίσια κοπριά ($r = 0,078$). Αντίθετα, η πούλπα φρούτων ($r = -0,045$) και η πάστα ελιάς ($r = -0,032$) εμφανίζουν ελαφρώς αρνητική σχέση με το CH_4 , χωρίς όμως ιδιαίτερα ισχυρή επίδραση.

Τέλος, την πιο καθαρή θετική συσχέτιση με αύξηση των προσμίξεων H_2S εμφανίζει ο κασίγαρος ($r = 0,289$), το οργανικό απόβλητο ($r = 0,260$) και τα υπολείμματα γαλακτοβιομηχανίας ($r = 0,226$). Έτσι, τα υποστρώματα αυτά, παρότι μπορεί να είναι χρήσιμα για το οργανικό τους φορτίο ή και την παραγωγή CH_4 , συνδέονται με μεγαλύτερη επιβάρυνση του βιοαερίου σε υδρόθειο. Αντίθετα, η πούλπα φρούτων ($r = -0,256$) και το ενσίρωμα καλαμποκιού ($r = -0,124$) εμφανίζουν αρνητική συσχέτιση με το H_2S , άρα σχετίζονται με καθαρότερη ποιοτικά παραγωγή αερίου. Η κοτίσια κοπριά εμφανίζει επίσης ήπια αρνητική σχέση ($r = -0,084$).

6.3 Συμπεράσματα

Συνολικά, από τη συγκριτική μελέτη των τριών μονάδων προκύπτει ότι το βέλτιστο λειτουργικό μοντέλο δεν ταυτίζεται απαραίτητα με τη μέγιστη δυνατή οργανική φόρτιση ή τη μεγαλύτερη ποικιλία υποστρωμάτων, αλλά με τη δυνατότητα της μονάδας να συνδυάζει σταθερή βασική τροφοδοσία, ελεγχόμενη ένταξη εποχικών υποστρωμάτων και συνεχή παρακολούθηση των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών. Οι μονάδες που πετυχαίνουν αυτή την ισορροπία φαίνεται να διατηρούν όχι μόνο καλύτερη λειτουργική σταθερότητα, αλλά και πιο αποδοτική και ποιοτικά ελεγχόμενη παραγωγή βιοαερίου. Επομένως, το βασικό συμπέρασμα της παρούσας εργασίας είναι ότι η απόδοση των μονάδων αναερόβιας χώνευσης αγροκτηνοτροφικών αποβλήτων στην Ελλάδα εξαρτάται κυρίως από την ποιότητα της διαχείρισης της τροφοδοσίας και λιγότερο από το απλό πλήθος ή την ονομαστική ποσότητα των χρησιμοποιούμενων υποστρωμάτων. Ο ορθότερος συνδυασμός πρώτων υλών, με στόχο την εξισορρόπηση του οργανικού και αζωτούχου φορτίου και τη μείωση των προσμίξεων H_2S , αναδεικνύεται ως κρίσιμος παράγοντας για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας τέτοιων εγκαταστάσεων σε συνθήκες πεδίου.

Σε ό,τι αφορά τη σύσταση του υποστρώματος, φαίνεται ότι και στις τρεις μονάδες υπάρχει ένας βασικός κορμός τροφοδοσίας, ο οποίος στηρίζεται κυρίως σε κτηνοτροφικά απόβλητα, και ειδικότερα σε αγελαδινές και πτηνοτροφικές κοπριές, που λειτουργούν ως σταθεροποιητικά υποστρώματα του μίγματος. Ωστόσο, η κάθε μονάδα διαφοροποιείται σημαντικά ως προς την ένταση με την οποία ενσωματώνει αγροτοβιομηχανικά ή εποχικά οργανικά ρεύματα, όπως ο κασίγαρος, η πάστα ελιάς, τα υπολείμματα και οι πούλπες φρούτων, το τυρόγαλο, το οργανικό απόβλητο και τα θρυμματισμένα ενσίρωματα. Από τη συγκριτική θεώρηση προκύπτει ότι οι μονάδες που βασίζονται περισσότερο σε σταθερή κτηνοτροφική βάση τείνουν να παρουσιάζουν μεγαλύτερη λειτουργική προβλεψιμότητα, ενώ όσες ενσωματώνουν πιο σύνθετα και εποχικά ρεύματα εμφανίζουν μεγαλύτερη ευελιξία ως προς την αξιοποίηση αποβλήτων, αλλά ταυτόχρονα και μεγαλύτερη μεταβλητότητα στα λειτουργικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά του παραγόμενου βιοαερίου. Η εποχικότητα συγκεκριμένων πρώτων υλών, όπως οι πούλπες φρούτων και ο κασίγαρος, επιβεβαιώνει ότι η λειτουργία των μονάδων στην ελληνική πραγματικότητα συνδέεται στενά με τον αγροδιατροφικό κύκλο παραγωγής.

Η μελέτη έδειξε επίσης ότι οι φυσικοχημικές παράμετροι όπως το pH και ο λόγος FOS/TAC παραμένουν σε αποδεκτά επίπεδα και στις τρεις μονάδες, επομένως η λειτουργική σταθερότητα φαίνεται να διασφαλίζεται σε βασικό βαθμό. Ωστόσο, οι συγκεντρώσεις αμμωνιακών και τα ολικά στερεά αποτελούν πιο ευαίσθητους δείκτες διαφοροποίησης της λειτουργίας κάθε μονάδας. Επιπλέον, η πιο έντονη διαφοροποίηση μεταξύ των εγκαταστάσεων δεν εντοπίζεται τόσο στο ποσοστό CH_4 , το οποίο παρέμεινε περίπου στο ίδιο επίπεδο, αλλά κυρίως στη συγκέντρωση των προσμίξεων H_2S , δηλαδή στον δείκτη που επηρεάζει άμεσα την καθαρότητα και την τεχνική αξιοποίηση του βιοαερίου.

Συνολικά, η μονάδα Β προκύπτει ως η πιο ισορροπημένη περίπτωση μεταξύ των τριών, συνδυάζοντας υψηλή παραγωγή, σταθερές φυσικοχημικές συνθήκες και χαμηλή περιεκτικότητα σε H_2S . Η μονάδα Α εμφανίζει έντονο οργανικό και αζωτούχο φορτίο και σημαντική επιβάρυνση ως προς το H_2S , ενώ η μονάδα Γ παρουσιάζει πολύ ικανοποιητική παραγωγή αλλά μεγαλύτερη ευαισθησία της ποιότητας του αερίου στη μεταβολή της σύστασης του υποστρώματος. Επομένως, η βελτιστοποίηση της λειτουργίας τέτοιων εγκαταστάσεων στην ελληνική πραγματικότητα θα πρέπει να εστιάζει πρωτίστως στη συνδυαστική επιλογή υποστρωμάτων με στόχο τη διατήρηση της φυσικοχημικής ισορροπίας και τη μείωση των προσμίξεων H_2S , χωρίς να θυσιάζεται η συνολική παραγωγή βιοαερίου.

6.4 Προτάσεις βελτιστοποίησης και μελλοντικής έρευνας

Με βάση τα παραπάνω, προτείνεται η περαιτέρω συστηματική παρακολούθηση της σχέσης μεταξύ επιμέρους υποστρωμάτων και κρίσιμων δεικτών απόδοσης, με έμφαση όχι μόνο στην ποσότητα του παραγόμενου αερίου αλλά και στην ποιότητά του. Η ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης της συγκέντρωσης H_2S και της απόδοσης σε περιεκτικότητα σε CH_4 με βάση τη σύσταση του υποστρώματος θα μπορούσε να προσφέρει ουσιαστικό εργαλείο βελτιστοποίησης της αναερόβιας διεργασίας. Επιπλέον, η μελλοντική έρευνα θα ήταν χρήσιμο να ενσωματώσει στοιχεία όπως πτητικά στερεά, οργανικό φορτίο ανά μονάδα όγκου, θερμοκρασιακές διακυμάνσεις και χρόνους παραμονής, ώστε να καταστεί δυνατή μια ακόμη πληρέστερη αξιολόγηση της πραγματικής λειτουργικής αποδοτικότητας των αναερόβιων χωνευτών σε συνθήκες πεδίου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Διαδίκτυο

- [1] Βιοαέριο Λαγκαδά Α.Ε. – Μονάδα παραγωγής βιοαερίου www.biogaslagada.gr/plant/ (accessed 24/05/2026)
- [2] Βιοενέργεια Νιγρίτας Α.Ε. – Μονάδα παραγωγής βιοαερίου www.agrogroup.gr/drastiriotes/ananeuwsimes-piges-energeias/vioenergeia-nigritas-ae
- [3] Επενδυτικό Σχέδιο Καινοτομίας: BioUpgrade <https://bioupgrade.gr/nea/gnoriste-tin-ereynitiki-mas-omada-bioenergeia-nigritas-ae/>

Ελληνική

- [4] Κίτσογλου Σάββας, (2018). Οι εκπομπές των ατμοσφαιρικών ρύπων από Σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση βιοαερίου από βιομάζα. Μελέτη περίπτωσης η 'Βιοαέριο Λαγκαδά Α.Ε.' - Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών Διαχείριση Αποβλήτων.
- [5] Λαμπροπούλου Δήμητρα, (2018). Διαχείριση και αξιοποίηση κτηνοτροφικών αποβλήτων με αναερόβια χώνευση για την παραγωγή βιοαερίου. Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο Σχολή Θετικών Επιστήμων & Τεχνολογίας - Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών Διαχείριση Αποβλήτων.
- [6] Μυλωνάς Απόστολος, (2025). Βιοαέριο/Biogas. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Σχολή Τεχνολογίας, Τμήμα Συστημάτων Ενέργειας.
- [7] Παγώνα Αναστασία, (2019). Συνεκμετάλλευση αποβλήτων σφαγείου, γεωργοκτηνοτροφικών αποβλήτων και αποβλήτων γαλακτοκομικών βιομηχανιών. Βελτιστοποίηση ενεργειακής αξιοποίησης. Πειραματική μελέτη περίπτωσης μονάδας «Βιοαέριο Πέλλας» στον νομό Πέλλας - Κρύα Βρύση. Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο Σχολή Θετικών Επιστήμων & Τεχνολογίας - Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών Διαχείριση Αποβλήτων.

Ξενόγλωσση

- [8] Abbasi T., Abbasi S.A., (2012). *Is the use of renewable energy sources an answer to the problems of global warming and pollution? Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 42 (2), 99–154
- [9] Abomohra A., Faisal S., Ebaid R., Huang J., Wang Q., Elsayed M., (2021). *Recent advances in anaerobic digestion of lipid-rich waste: challenges and potential of seaweeds to mitigate the inhibitory effect*, *Chemical Engineering Journal*, 449
- [10] Adnane I., Taoumi H., Elouahabi K., Lahrech K., Oulmekki A., (2024). *Valorization of crop residues and animal wastes: Anaerobic co-digestion technology*. *Heliyon*, 10, 5.
- [11] Andre L, Pauss A., Ribeiro T., (2018). *Solid anaerobic digestion: state-of-art, scientific and technological hurdles*. *Bioresource Technology*, 247, 1027–1037.
- [12] Aravani V.P., Sun H., Yang Z., Liu G., Wang W., Anagnostopoulos G., Syriopoulos G., Charisiou N.D., Goula M.A., Kornaros M., Papadakis V.G., (2022). *Agricultural and livestock sector's residues in Greece & China: Comparative qualitative and quantitative characterization for assessing their potential for biogas production*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 154, 1821, ISSN 1364-0321.
- [13] Aravani V.P., Tsigkou K., Papadakis V.G., Kornaros M., (2022). *Biochemical Methane potential of most promising agricultural residues in Northern and Southern Greece*. *Chemosphere*. 296, 133985.
- [14] Aslanzadeh S., Rajendran K., Taherzadeh M.J., (2014). *A comparative study between single- and two-stage anaerobic digestion processes: effects of organic loading rate and hydraulic retention time*. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 95, 181–188.
- [15] Beniche I., Hungria J., El Bari H., Siles J.A., Chica A.F., Martín M.A., (2021). *Effects of C/N ratio on anaerobic co-digestion of cabbage, cauliflower, and restaurant food waste*, *Biomass Conversion and Biorefinery*, 11 (5), 2133–2145

- [16] Bond T., Templeton M.R., (2011). *History and future of domestic biogas plants in the developing world*, *Energy for Sustainable Development*, 15 (4), 347–354.
- [17] Bose L., Chanukya C.R., C.S.P. Lakra, Agrawal A., Ghosh P., Chaudhari P.K., 2025. *Anaerobic digestion of agro and agro-industrial waste for bio-methane production*. *Journal of the Indian Chemical Society*, 102, 10, 101966, ISSN 0019-4522.
- [18] Carlini M., Monarca D., Castellucci S., Mennuni A., Casini L., Selli S., (2021). *Beer spent grains biomass for biogas production: characterization and anaerobic digestion-oriented pre-treatments*, *Energy Reports*, 7, 921–929.
- [19] Comparetti A., Ciulla S., Greco C., Santoro F., Orlando S., (2025). *State of the Art of Biomethane Production in the Mediterranean Region*, *Agronomy*, 15, 1702.
- [20] Cremonese P.A., Teleken J.G., Weiser Meier T.R., Alves H.J., (2021). *Two-Stage anaerobic digestion in agroindustrial waste treatment: a review*, *Journal of Environmental Management*, 281.
- [21] Dahlin J., Nelles M., Herbes C., (2017). *Biogas digestate management: Evaluating the attitudes and perceptions of German gardeners towards digestate-based soil amendments*. *Resources, Conservation and Recycling*, 118, 27–38.
- [22] Dai X., Duan N., Dong B., Dai L., (2013). *High-solids anaerobic co-digestion of sewage sludge and food waste in comparison with mono digestions: stability and performance*. *Waste Management*, 33, 308–16.
- [23] Devens K.U., Ribeiro A.R., Camargo F.P., Sakamoto I.K., Varesche M.B.A., Silva E.L., (2025). *Two-stage versus single-stage anaerobic co-digestion on methane synthesis: Energy prospects and microbial community*. *Process Safety and Environmental Protection*, 196, 106884.
- [24] Dornelas K.C., Schneider R.M., Do Amaral A.G., (2017) *Biogas from poultry waste—production and energy potential*. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189 (8), 1–11.
- [25] Duan N., Dong B., Wu B., Dai X., (2012). *High-solid anaerobic digestion of sewage sludge under mesophilic conditions: feasibility study*. *Bioresource Technology*, 104, 150–6.
- [26] Frankowski J., Czekata W., (2023). *Agricultural plant residues as potential co-substrates for biogas production*, *Energies*, 16 (11), 4396.
- [27] Ganesh R., Torrijos M., Sousbie P., Steyer J.P., Lugardon A., Delgenes J.P., (2013). *Anaerobic co-digestion of solid waste: effect of increasing organic loading rates and characterization of the solubilised organic matter*. *Bioresource Technology*, 130, 559–69.
- [28] Gou C., Yang Z., Huang J., Wang H., Xu H., Wang L., (2014). *Effects of temperature and organic loading rate on the performance and microbial community of anaerobic co-digestion of waste activated sludge and food waste*. *Chemosphere*, 105, 146–151.
- [29] Greco C., Comparetti A., Fascella G., Febo P., La Placa G., Saiano F., Mammano M.M., Orlando S., Laudicina V.A., *Effects of vermicompost, compost and digestate as commercial alternative peat-based substrates on qualitative parameters of Salvia officinalis*. *Agronomy*, 11, 98.
- [30] Jameel M.K., Mustafa M.A., Ahmed H.S., Mohammed A., Ghazy H., Shakir M.N., Lawas A.M., Mohammed S., Idan A.H., Mahmoud Z.H., Sayadi H., Kianfar E., (2024). *Biogas: Production, properties, applications, economic and challenges: A review*. *Results in Chemistry*, 7, 101549, ISSN 2211-7156.
- [31] Jo Y., Kim J., Hwang K., Lee C., (2018). *A comparative study of single- and two-phase anaerobic digestion of food waste under uncontrolled pH conditions*. *Waste Management*, 78, 509–520.
- [32] Kainthola J., Kalamdhad A.S., Goud V.V., (2019). *A review on enhanced biogas production from anaerobic digestion of lignocellulosic biomass by different enhancement techniques*. *Process Biochemistry*, 84, 81–90.
- [33] Kaur G., Wong J.W., Kumar R., Patria R.D., Bhardwaj A., Uisan K., Johnravindar D., (2020) *Value addition of anaerobic digestate from biowaste: Thinking beyond agriculture*. *Environmental Science, Agricultural and Food Sciences*, 7, 48–55.
- [34] Kigozi R., Aboyade A., Muzenda E., (2014). *Biogas production using the organic fraction of municipal solid waste as feedstock*, *International Journal of Research in Chemical, Metallurgical and Civil Engineering*, 1, 54-64.

- [35] 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. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39:174–95.
- [36] Labatut R.A., Angenent L.T., Scott N.R., (2014). *Conventional mesophilic vs. thermophilic anaerobic digestion: a trade-off between performance and stability? Water Research*, 53, 249–58.
- [37] Liu C., Wang W., Anwar N., Ma Z., Liu G., Zhang R., (2017). *Effect of organic loading rate on anaerobic digestion of food waste under mesophilic and thermophilic conditions, Energy & Fuels*, 3, 2976–2984.
- [38] Matheri A.N., Sethunya V.L., Belaid M., Muzenda E., (2018) *Analysis of the biogas productivity from dry anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. Renewable and Sustainable Energy Review*, 81, 2328–34.
- [39] Matheri A.N., Mbohwa C., Ntuli F., Belaid M., Seodigeng T., Ngila J.C., Njenga C.K., (2018). *Waste to energy bio-digester selection and design model for the organic fraction of municipal solid waste. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1.
- [40] Mignogna D., Ceci P., Cafaro C., Corazzi G., Avino P., (2023). *Production of Biogas and Biomethane as Renewable Energy Sources: A Review. Applied Sciences*, 13, 10219.
- [41] Nabaterega R., Kumar V., Khoei S., Eskicioglu C., (2021). *A review on two-stage anaerobic digestion options for optimizing municipal wastewater sludge treatment process Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9 (4).
- [42] Ngabala F.J., Emmanuel J.K., (2024). *Potential substrates for biogas production through anaerobic digestion-an alternative energy source. Heliyon*, 10(23).
- [43] O' Connor S., Ehimen E., Pillai S.C., Black A., Tormey D., Bartlett J., (2021). *Biogas production from small-scale anaerobic digestion plants on European farms, Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 139.
- [44] Pan S.Y., Tsai C.Y., Liu C.W., Wang S.W., Kim H., Fan C., (2021). *Anaerobic co-digestion of agricultural wastes toward circular bioeconomy, iScience*, 24, 102704.
- [45] Paritosh K., Kumar V., Pareek N., Sahoo D., Fernandez Y.B., Coulon F., Radu T., Kesharwani N., Vivekanand V., (2021). *Solid state anaerobic digestion of water poor feedstock for methane yield: an overview of process characteristics and challenges. Waste Disposal & Sustainable Energy*, 3(3), 227–45.
- [46] Piekut M., (2019). *The consumption of renewable energy sources (RES) by the European Union households between 2004 and 2019. Energies*, 14, 5560.
- [47] Pilarski K., Pilarska A.A., Pietrzak M.B., (2025). *Biogas Production in Agriculture: Technological, Environmental, and Socio-Economic Aspects. Energies*, 18(21), 5844.
- [48] Pires A., Martinho G., (2019). *Waste hierarchy index for circular economy in waste management. Waste Management*, 95, 298–305.
- [49] Pirmoghani A., Mohammadrezaei R., Shahmoradi B., (2025). *Biomass Resource Management and Increasing the Yield of Biogas Production in the Farm: A Review. Journal of Advances in Environmental Health Research*, 13(2), 68–89.
- [50] 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. Bioresource Technology Reports*, 8.
- [51] Rajagopal R., Masse D.I., Singh G., (2013). *A critical review on inhibition of anaerobic digestion process by excess ammonia. Bioresource Technology*, 143, 632–41.
- [52] Rajendran K., Aslanzadeh S., Taherzadeh M.J., (2012). *Household biogas digesters – A review, Energies* 5, 8, 2911–2942
- [53] Scarlat N., Dallemand J.F., Monforti-Ferrario F., Banja M., Motola V., (2015). *Renewable energy policy framework and bioenergy contribution in the European Union–An overview from National Renewable Energy Action Plans and Progress Reports, Renewable and Sustainable Energy Review*, 51, 969–985.
- [54] Schober P., Boer C., Schwarte L.A., (2018). *Correlation Coefficients Appropriate Use and Interpretation. Anesthesia and Analgesia*, 126(5), 1763–1768.
- [55] Sibiyi N.T., Muzenda E., Mbohwa C., (2017). *Evaluation of potential substrates for biogas production via anaerobic digestion: a review. Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science*, 2, 583–588

- [56] Siddique M.N.I., Wahid Z.A., (2018). *Achievements and perspectives of anaerobic co-digestion: a review*, *Journal of Cleaner Production*, 194, 359–371.
- [57] Silva F.M.S., Mahler C.F., Oliveira L.B., Bassin J.P., (2018). *Hydrogen and methane production in a two-stage anaerobic digestion system by co-digestion of food waste, sewage sludge and glycerol*. *Waste Management*, 76, 339–349.
- [58] Spyridonidis A., Vasiliadou I.A., Akratos C.S., Stamatelatou K., (2020). *Performance of a Full-Scale Biogas Plant Operation in Greece and Its Impact on the Circular Economy*. *Water*, 12, 3074.
- [59] Srisowmeya G., Chakravarthy M., Nandhini Devi G., (2020). *Critical considerations in two-stage anaerobic digestion of food waste – a review: Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119.
- [60] Tallou A., Salcedo F.P., Haouas A., Jamali M.Y., Atif K., Aziz F., Amir S., (2020). *Assessment of biogas and biofertilizer produced from anaerobic co-digestion of olive mill wastewater with municipal wastewater and cow dung*. *Environmental Technology and Innovation*, 20, 101152.
- [61] Torres-Herrera S., Palomares-Cortes J., Gonzalez-Cortes J.J., Cubides-Paez D.F., Gamelans X., Cantero D., Ramírez D., (2024). *Biodesulfurization of landfill biogas by a pilot-scale bioscrubber: Operational limits and microbial analysis*, *Environmental Research*, 246, 118164.
- [62] Wang S., Yang L., Su M., Ma X., Sun Y., Yang M., Zhao P., Shen J., Zhang F., Goulding K., (2019). *Increasing the agricultural, environmental and economic benefits of farming based on suitable crop rotations and optimum fertilizer applications*. *Field Crops Research*, 240, 78–85.
- [63] Wang Z., Hu Y., Wang S., Wu G., Zhan X., (2023). *A critical review on dry anaerobic digestion of organic waste: Characteristics, operational conditions, and improvement strategies*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 176, 113208, ISSN 1364-0321.
- [64] Ward A.J., Hobbs P.J., Holliman P.J., Jones D.L., (2008). *Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources*, *Bioresource Technology*, 99 (17), 7928–7940.
- [65] Weiland P., (2010). *Biogas production: Current state and perspectives*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85, 849–860.
- [66] Yan X., Deng P., Ding T., Zhang Z., Li X., Wu Z., (2023). *Effect of temperature on anaerobic fermentation of poplar ethanol wastewater: performance and microbial communities*. *ACS Omega*, 8 (6), 5486–5496.
- [67] Yang L., Xu F., Ge X., Li Y., (2015). *Challenges and strategies for solid-state anaerobic digestion of lignocellulosic biomass*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 824–834.
- [68] Yorgey G., Frear C., Kruger C.E., Zimmerman T., (2014). *The Rationale for Recovery of Phosphorus and Nitrogen from Dairy Manure*, Washington State University Extension.
- [69] Zamri M.F.M.A., Hasmady S., Akhbar A., Ideris F., Shamsuddin A.H., Mofijur M., Fattah I.R., Mahlia T.M., (2021). *A comprehensive review on anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste*. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 137:110637.
- [70] Zhang C., Xiao G., Peng L., Su H., Tan T., (2013). *The anaerobic co-digestion of food waste and cattle manure*. *Bioresource Technology*, 129, 170–6.