



**ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΑΠΟ ΓΕΩΡΓΙΚΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ ΠΡΟΣ
ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ: ΜΕΛΕΤΗ
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΣΤΗΝ
ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΒΟΙΩΤΙΑΣ**

ΕΛΕΝΗ ΝΤΑΓΙΑΝΤΑ
Διπλ. Μηχανολόγος Μηχανικός ΕΜΠ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Δρ. ΓΕΩΡΓΙΟΣ Ζ. ΚΥΖΑΣ

ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2026

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



**ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΑΠΟ ΓΕΩΡΓΙΚΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ ΠΡΟΣ
ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ: ΜΕΛΕΤΗ
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΣΤΗΝ
ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΒΟΙΩΤΙΑΣ**

ΕΛΕΝΗ ΝΤΑΓΙΑΝΤΑ

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΕΠΙΒΛΕΨΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ Α΄

ΚΥΖΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

Μέλος ΣΕΠ,

Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ Β΄

ΚΑΡΑΓΙΑΝΝΗΣ ΒΑΙΟΣ

Μέλος ΣΕΠ,

Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο

ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2026

*στη μονάκριβή μου Λήδα
στον σύζυγό μου, Κώστα
στους γονείς μου*

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Δρ. Γεώργιο Ζ. Κύζα, για τη στήριξή του, ο οποίος, ανταποκρινόμενος άμεσα σε οποιεσδήποτε απορίες μου καθ' όλη τη διάρκεια της χρονιάς, μου προσέφερε χρήσιμες συμβουλές και καθοδήγηση για την εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω την εταιρεία PK ENERGY, κατασκευάστρια εταιρεία της μονάδας παραγωγής βιοαερίου AGROMEG ΑΕ, ιδιαιτέρως, τον κ. Αθανάσιο Τοτσίδα, Διπλ. Πολιτικό Μηχανικό, MSc, τεχνικό διευθυντή της εταιρείας, καθώς επίσης και το προσωπικό της μονάδας για όλες τις πληροφορίες και την ενημέρωση που χρειαζόμουν για την παρουσίαση της μελέτης περίπτωσης.

Συντομογραφίες

ΣΗΘ, CHP	Μονάδα συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας
SH	Υγρά απόβλητα από σφαγεία
VW, Vn	Υγρά απόβλητα από επεξεργασία βινάσσας
WH	Υάκινθος του νερού
CPW	Υγρά απόβλητα από επεξεργασία κασάβας
POME	Υγρά απόβλητα από επεξεργασία φοινικέλαιου
CW, W	Ορός γάλακτος
PM	Κοπριά πουλερικών
CM	Κοπριά κοτόπουλων
EMP	Υγρά απόβλητα από επεξεργασία γάλακτος
LPM	Υγρή κοπριά χοίρων
OMW, OW	Υγρά απόβλητα ελαιοτριβείου
WDGS	Υγρά υπολείμματα απόσταξης με διαλυτά
BM	Κοπριά βοοειδών
BSG	Αναλωμένοι κόκκοι ζυθοποιίας
BWW	Υγρά απόβλητα ζυθοποιίας
SPW	Βιομηχανική ιλύς από επεξεργασία σόγιας
COD	Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο
BOD	Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο
sCOD	Διαλυτό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο
TCOD	Ολικά χημικά απαιτούμενο οξυγόνο
BMS	Βιοχημικό δυναμικό μεθανίου
TS	Ολικά στερεά
TSS	Ολικά αιωρούμενα στερεά
VS	Πτητικά στερεά
VFA	Πτητικά λιπαρά οξέα
ISR	Λόγος εμβολίου προς υπόστρωμα
HRT	Υδραυλικός χρόνος παραμονής
C/N	Λόγος άνθρακα – αζώτου
UF	Υπερδιήθηση
RO	Αντίστροφη όσμωση
UASB	Αναερόβιος αντιδραστήρας ανοδικής ροής με κλίνη ιλύος
CSTR	Αντιδραστήρας συνεχούς ανάδευσης
ASBR	Αναερόβιος αντιδραστήρας διαλείποντος έργου
ABR	Αναερόβιος αντιδραστήρας με διαφράγματα
UASFF	Αντιδραστήρας αναερόβιας ιλύος με σταθερή μεμβράνη
FBR	Αντιδραστήρας ρευστοποιημένης κλίνης
BTEX	Βενζόλιο, τολουόλιο, αιθυλοβενζόλιο, ξυλόλιο
ICE	Μηχανή εσωτερικής καύσης
SOFC	Κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου
PSA	Προσρόφηση με εναλλαγή πίεσης
TSA	Προσρόφηση με εναλλαγή θερμοκρασίας
VSA	Προσρόφηση με εναλλαγή κενού
DR-PSA	Προσρόφηση με εναλλαγή πίεσης διπλής αναρροής
CFZ	Ελεγχόμενη ζώνη κατάψυξης
CBM, bio-CNG	Συμπιεσμένο βιομεθάνιο

LBM, bio-LNG	Υγροποιημένο βιομεθάνιο
VFA/ALK	Λόγος VFA προς αλκαλικότητα
SI / CI	Μηχανή αερίου με ανάφλεξη μέσω σπινθήρα / συμπίεσης
IONP	Νανοδομημένα οξειδίων του σιδήρου
FD	Ξήρανση με κατάψυξη
HRES	Υβριδικά συστήματα ανανεώσιμης ενέργειας
FDOW	Απόβλητα OW προεπεξεργασμένα με FD
NPV	Καθαρές Παρούσες Αξίες
PBP	Περίοδος Αποπληρωμής
WT	Ανεμογεννήτρια
PV, Φ/B	Φωτοβολταϊκό σύστημα
AI	Τεχνητή νοημοσύνη
ANN	Τεχνητό νευρωνικό δίκτυο
MSE	Μέσο τετραγωνικό σφάλμα
RMSE	Τετράγωνο της ρίζας του MSE
PSO	Βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων
ABP	Αλγόριθμος προσαρμοστικής οπισθοδιάδοσης
ABNN	Τεχνητό νευρωνικό δίκτυο προσαρμοστικής οπισθοδιάδοσης
MOO	Πολυ-κριτηριακή βελτιστοποίηση
FBPNN	ANN πρόσθιας τροφοδότησης με οπισθοδιάδοση
NSGA-II	Γενετικός αλγόριθμος μη κυριαρχούμενης ταξινόμησης –II
MDE	Αλγόριθμος διαφορικής εξέλιξης
MNM	Τροποποιημένος αλγόριθμος Nelder-Mead
MSA	Αλγόριθμος προσομοιωμένης απόκτησης
MRS	Αλγόριθμος τυχαίας αναζήτησης
FFNN	Νευρωνικό δίκτυο εμπρόσθιας τροφοδότησης
RSM	Μεθοδολογία επιφάνειας απόκρισης
BRBP	Αλγόριθμος οπισθοδιάδοσης με μπεϋζιανή κανονικοποίηση
SVR	Παλινδρόμηση διανυσμάτων υποστήριξης
RBF	Συνάρτηση ακτινικής βάσης
BP	Ισχύς πέδησης
BTE	Θερμική απόδοση πέδησης
BSEC	Ειδική κατανάλωση ενέργειας πέδησης
BSFC	Ειδική κατανάλωση καυσίμου πέδησης
BSDC	Ειδική κατανάλωση diesel πέδησης
BSBC	Ειδική κατανάλωση βιοαερίου πέδησης
EGT	Θερμοκρασία καυσαερίων
FI	Λόγος τροφοδοσίας προς εμβόλιο
BC	Δόση βιοάνθρακα
OL	Οργανικό φορτίο
ANFIS	Νευροασαφές σύστημα παρεμβολής

Περιεχόμενα

Συντομογραφίες	i
Περιεχόμενα.....	iii
Περιεχόμενα πινάκων.....	v
Περιεχόμενα διαγραμμάτων.....	vi
Περιεχόμενα σχημάτων.. ..	vii
Περιεχόμενα εικόνων.....	vii
Περίληψη.....	x
Abstract.....	xii
1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Δομή Διπλωματικής Εργασίας.....	2
1.2 Μεθοδολογία Διπλωματικής Εργασίας.....	3
1.3 Περιγραφή στοιχείου καινοτομίας Διπλωματικής Εργασίας.....	4
2. Βιοαέριο	4
2.1 Πρώτες ύλες για παραγωγή βιοαερίου από γεωργικά απόβλητα.....	4
2.1.1 Χαρακτηριστικά γεωργικών αποβλήτων	6
2.1.2 Περιβαλλοντικό πρόβλημα	7
2.2 Αναερόβια χώνευση.....	8
2.2.1 Μηχανισμός της αναερόβιας χώνευσης.....	8
2.2.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την αναερόβια χώνευση	9
2.2.3 Προϊόντα της αναερόβιας χώνευσης.....	11
2.2.4 Αναερόβιοι βιοαντιδραστήρες	14
2.3 Επεξεργασία βιοαερίου που παράγεται από γεωργικά απόβλητα	16
2.4 Εφαρμογές του βιοαερίου	22
2.4.1 Συστήματα συνδυασμένης παραγωγής ενέργειας.....	22
2.4.2 Αναβάθμιση βιοαερίου	23
2.4.3 Αναμόρφωση βιοαερίου.....	26
2.5 Πλεονεκτήματα / Μειονεκτήματα της τεχνολογίας βιοαερίου	28
3. Μονάδες παραγωγής βιοαερίου προς συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας.....	29
3.1 Συστήματα ΣΗΘ	29

3.2	Περιγραφή της διαδικασίας παραγωγής ενέργειας σε μονάδα ΣΗΘ	32
3.3	Απόδοση-Κόστη-Οικονομικά οφέλη μονάδων βιοαερίου.....	33
3.4	Νομοθεσία.....	35
4.	Βιοαέριο στην Ελλάδα, την Ευρώπη και διεθνώς - Προοπτικές εξέλιξης.....	36
5.	Βιβλιογραφική επισκόπηση πρόσφατων μελετών σχετικών με την βελτίωση της τεχνολογίας βιοαερίου	46
5.1	Ενίσχυση της παραγωγής βιοαερίου	46
5.2	Υβριδικά συστήματα ΣΗΘ.....	52
5.3	Επεξεργασία βιοαερίου	54
5.4	Αναβάθμιση βιοαερίου	55
5.5	Αναμόρφωση βιοαερίου.....	57
5.6	Επεξεργασία χωνεμένου υπολείμματος	58
5.7	Μείωση εκπομπών μεθανίου από μονάδες παραγωγής βιοαερίου	59
5.8	Εφαρμογή Τεχνητής Νοημοσύνης στην τεχνολογία βιοαερίου	61
6.	Μονάδα παραγωγής βιοαερίου στην Περιφερειακή Ενότητα Βοιωτίας	80
6.1	Γενικά στοιχεία	80
6.2	Εγκαταστάσεις /Εξοπλισμός.....	81
6.3	Υποστρώματα	95
6.4	Διαδικασία παραγωγής	96
6.5	Τεχνοοικονομικά στοιχεία	104
7.	Συμπεράσματα	106
	Βιβλιογραφία	109
	Ξένη βιβλιογραφία.....	109
	Ιστοσελίδες	118

Περιεχόμενα πινάκων

Πίνακας 1 - Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των LPM, OMW, CW, PM (Τροποποίηση από (Thanos et al., 2021)	6
Πίνακας 2 – Χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων SH (Τροποποίηση από Nzouebet et al., 2025)	7
Πίνακας 3 – Σύνθεση βιοαερίου (Calbry-Muzyka et al., 2022)	12
Πίνακας 4 – Σύνθεση βιοαερίου (Τροποποίηση από Hosseini and Wahid, 2014)....	12
Πίνακας 5 - Επίπεδα ανοχής των ρύπων για χρήση βιοαερίου σε ICE, SOFC και για βιομεθάνιο (Τροποποίηση από Pera et al., 2024).	18
Πίνακας 6 - Χαρακτηριστικά κύριων τεχνολογιών αναβάθμισης (Τροποποίηση από Aguillos et al., 2024).....	26
Πίνακας 7 - Τεχνοοικονομική ανάλυση των τριών σεναρίων (Τροποποίηση από Xu et al., 2025).	35
Πίνακας 8 - Μέθοδοι ενίσχυσης της παραγωγής βιοαερίου	51
Πίνακας 9 - Ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια του προτεινόμενου υβριδικού συστήματος	53
Πίνακας 10 - Δείκτες απόδοσης παραγωγής πράσινου υδρογόνου μέσω αναμόρφωσης βιοαερίου (Τροποποίηση από Cormos et al., 2024)	57
Πίνακας 11 – Τιμές του μοντέλου ABNN-PSO	64
Πίνακας 12 – Τιμές του μοντέλου FBPNN/ NSGA-II	66
Πίνακας 13 – Τιμές του μοντέλου ANN /MDE, MNM, MSA και MRS	68
Πίνακας 14 - Τιμές του μοντέλου FFNN/RSM	69
Πίνακας 15 – Τιμές του μοντέλου ANFIS.....	73
Πίνακας 16 – Τιμές των Μοντέλων Τεχνητής Νοημοσύνης που χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία βιοαερίου.....	78
Πίνακας 17 - Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά ενδεικτικών εισερχόμενων πρώτων υλών (Τροποποίηση από Πηγή: PK ENERGY).....	95

Πίνακας 18 - Τεχνικά στοιχεία της μονάδας ΣΗΘ (Τροποποίηση από Πηγή: PK ENERGY).....105

Πίνακας 19 - Οικονομικά στοιχεία της μονάδας βιοαερίου (Πηγή: PK ENERGY)..106

Περιεχόμενα διαγραμμάτων

Διαγράμματα 1α - Αύξηση παραγωγής βιοαερίου, και 1β – αύξηση του αριθμού μονάδων βιοαερίου στην Ελλάδα μεταξύ 2011-2021 (Τροποποίηση από ALFA, 2023).
.....37

Διάγραμμα 2 – Συνδυασμένη παραγωγή βιοαερίου και βιομεθανίου ανά έτος στην Ευρώπη (Τροποποίηση από European Biogas Association, 2025). 39

Διαγράμματα 3α,β – Παραγωγή βιοαερίων στην Ευρώπη [βασική περίπτωση: τυπικό, ρεαλιστικό σενάριο, επιταχυμένη περίπτωση: σενάριο ταχύτερης υλοποίησης] (Τροποποίηση από International Energy Agency, 2025). 41

Διαγράμματα 4α,β – Παραγωγή βιοαερίων στη Γερμανία [βασική περίπτωση: τυπικό, ρεαλιστικό σενάριο, επιταχυμένη περίπτωση: σενάριο ταχύτερης υλοποίησης] (Τροποποίηση από International Energy Agency, 2025). 41

Διάγραμμα 5 – Παραγωγή βιοαερίου σε επιλεγμένες ευρωπαϊκές χώρες το 2024 και 2030 ανά τελική χρήση (Τροποποίηση από International Energy Agency, 2025). 42

Διαγράμματα 6α,β – Παραγωγή βιοαερίων στις ΗΠΑ [βασική περίπτωση: τυπικό, ρεαλιστικό σενάριο, επιταχυμένη περίπτωση: σενάριο ταχύτερης υλοποίησης] (Τροποποίηση από International Energy Agency, 2025). 43

Διαγράμματα 7α,β – Παραγωγή βιοαερίων στην Κίνα [βασική περίπτωση: τυπικό, ρεαλιστικό σενάριο, επιταχυμένη περίπτωση: σενάριο ταχύτερης υλοποίησης] (Τροποποίηση από International Energy Agency, 2025). 43

Διαγράμματα 8α,β – Παραγωγή βιοαερίων στην Ινδία [βασική περίπτωση: τυπικό, ρεαλιστικό σενάριο, επιταχυμένη περίπτωση: σενάριο ταχύτερης υλοποίησης] (Τροποποίηση από International Energy Agency, 2025). 44

Διάγραμμα 9 – Σύγκριση της συνδυασμένης παραγωγής βιοαερίων με τη ζήτηση για φυσικό αέριο (Τροποποίηση από European Biogas Association, 2025). 45

Διάγραμμα 10 – Μελλοντική αύξηση του αριθμού μονάδων bio-LNG και της δυναμικότητας παραγωγής (TWh/year) στην Ευρώπη (Τροποποίηση από EBA Statistical Report, 2025)	45
Διάγραμμα 11 – Δυναμικό βιομεθανίου το 2030 ανά τεχνολογία και χώρα (Τροποποίηση από ALFA, 2023).	46
Διάγραμμα 12 - Παραγόμενος όγκος βιοαερίου (α) στην περίπτωση αναφοράς και (β) μετά από την αφαίρεση σουλφιδίου (Τροποποίηση από Beschkon et al., 2025)	49

Περιεχόμενα σχημάτων

Σχήμα 1 - Πιθανές συνδυαστικές λύσεις παραγωγής ενέργειας από βιοαέριο.....	23
Σχήμα 2 - Τεχνολογίες αναβάθμισης (Τροποποίηση από Galloni and Di Marcoberardino, 2024)	25
Σχήμα 3 - Μικρο-αεριοστρόβιλος με ανάκτηση θερμότητας (Τροποποίηση από Kararaju and Rintala, 2013)	31
Σχήμα 4 - Ροή πρώτης ύλης από το σύστημα τροφοδοσίας στερεών (Σ.Τ.Σ) και τη δεξαμενή υποδοχής υγρής πρώτης ύλης (Δ.Υ.Υ.Π.Υ.) έως το σύστημα διαχωρισμού (Σ.Δ.) μέσω σωλήνων άντλησης.....	98
Σχήμα 5 - Διάγραμμα ροής διαδικασιών της μονάδας βιοαερίου	103
Σχήμα 6 - Σχηματικό διάγραμμα ροής της μονάδας [Σ.Π.Υ.: στερεά πρώτη ύλη, Υ.Π.Υ.: υγρή πρώτη ύλη, Σ.Τ.Σ: σύστημα τροφοδοσίας στερεών, Δ.Υ.Υ.Π.Υ.: δεξαμενή υποδοχής υγρής πρώτης ύλης, D1: αντιδραστήρας χώνευσης, D2: αντιδραστήρας μεταχώνευσης, Φ.Σ.Ν.: φρέαρ συμπυκνωμάτων νερού, Λ(1): μικρή λιμνοδεξαμενή (1), Λ(2): μεγάλη λιμνοδεξαμενή (2), ΣΗΘ: μονάδα συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας, Φ.Ε.Α: φίλτρο ενεργού άνθρακα, Ψ.Α.: ψύξη αερίου, Φ.Α.: φλόγα αερίου, Σ.Μ.: σταθμός μετασχηματιστή (Τροποποίηση από Πηγή: PK ENERGY).....	104

Περιεχόμενα εικόνων

Εικόνα 1 - Καταλύτες διάφορων σχημάτων που χρησιμοποιούνται στην αναμόρφωση

βιοαερίου (Zhao et al., 2020).....	28
Εικόνα 2 - Μονάδα παραγωγής βιοαερίου στην Τανάγρα Βοιωτίας (PK ENERGY, 2026)	80
Εικόνα 3 - Πίστες αποθήκευσης στερεών πρώτων υλών (προσωπικό αρχείο, 06/04/2026).....	81
Εικόνα 4 - Υπόγεια δεξαμενή υποδοχής υγρής πρώτης ύλης (προσωπικό αρχείο, 06/04/2026).....	82
Εικόνες 5 - (α) και (γ) Σύστημα τροφοδοσίας BIG-Mix, (Πηγή: PK ENERGY, προσωπικό αρχείο, 06/04/2026) (β) χαλύβδινες ράβδοι ώθησης και χαλύβδινοι κατακόρυφοι κοχλίες ανάμειξης στο εσωτερικό (Konrad Pumpe GmbH, 2026).....	83
Εικόνα 6 - Βιοαντιδραστήρας χώνευσης (προσωπικό αρχείο, 06/04/2026).....	84
Εικόνα 7 - Κάτοψη βιοαντιδραστήρων χώνευσης, μεταχώνευσης και δεξαμενής υποδοχής υγρής πρώτης ύλης (PK ENERGY, 2026)	85
Εικόνες 8 - (α) Αναδευτήρας τύπου BIOBULL® τοποθετημένος στον βιοαντιδραστήρα μεταχώνευσης (προσωπικό αρχείο, 06/04/2026), (β) Σχέδιο του αναδευτήρα μέσα στον βιοαντιδραστήρα (Πηγή: PK ENERGY).....	86
Εικόνα 9 - Φρέαρ συμπυκνωμάτων νερού (προσωπικό αρχείο, 06/04/2026)	87
Εικόνες 10 - Τεχνικό κτίριο (α) εξωτερική άποψη του κτιρίου, (β) αντλιοστάσιο εντός του τεχνικού κτιρίου (προσωπικό αρχείο, 06/04/2026).....	88
Εικόνα 11 - Σύστημα διαχωρισμού (προσωπικό αρχείο, 06/04/2026)	89
Εικόνα 12 - Άποψη της μεγάλης λιμνοδεξαμενής (2) αποθήκευσης υγρού χωνεμένου υπολείμματος (προσωπικό αρχείο, 06/04/2026).....	89
Εικόνα 13 - Λιμνοδεξαμενές 1 και 2 αποθήκευσης υγρού χωνεμένου υπολείμματος (PK ENERGY, 2026)	90
Εικόνα 14 - Μέθοδος αποθείωσης μέσω προσθήκης οξειδίων του σιδήρου (προσωπικό αρχείο, 06/04/2026)	90
Εικόνα 15 - Φίλτρο ενεργού άνθρακα (προσωπικό αρχείο, 06/04/2026).....	91
Εικόνα 16 - Μονάδα ΣΗΘ (PK ENERGY, 2026)	94

Εικόνα 17 - Πυρσός καύσης βιοαερίου (προσωπικό αρχείο, 06/04/2026).....	94
Εικόνα 18 - Διεργασία αναερόβιας χώνευσης στο εσωτερικό του αντιδραστήρα χώνευσης (προσωπικό αρχείο, 06/04/2026)	97
Εικόνα 19 - Άντληση υγρού χωνεμένου υπολείμματος από τη μεγάλη λιμνοδεξαμενή μέσω βυτίου της μονάδας προς διάθεση σε γειτονικούς αγρούς (προσωπικό αρχείο, 06/04/2026).....	99
Εικόνα 20 - Σωλήνας εξαγωγής βιοαερίου από το αεροφυλάκιο του αντιδραστήρα μεταχώνευσης (προσωπικό αρχείο, 06/04/2026).....	100
Εικόνες 21 - Σύστημα ψύξης βιοαερίου (α) σωλήνας μεταφοράς του βιοαερίου (σημείο στο οποίο ο υπόγειος σωλήνας μεταφοράς του βιοαερίου από την έξοδό του από τον αντιδραστήρα μεταχώνευσης γίνεται υπέργειος και οδηγεί το βιοαέριο στη μονάδα ΣΗΘ) και (β) εναλλάκτης θερμότητας (προσωπικό αρχείο, 06/04/2026)	100
Εικόνα 22 - Μεταφορά του βιοαερίου στο φίλτρο ενεργού άνθρακα μετά από τη ξήρανσή του (προσωπικό αρχείο, 06/04/2026)	101
Εικόνα 23 - (α) Μηχανή Εσωτερικής Καύσεως (ΜΕΚ) 999 kWel Jenbacher, (β) Γεννήτρια Jenbacher (προσωπικό αρχείο, 06/04/2026).....	102

Περίληψη

Η παραγωγή βιοενέργειας από αγροτικά και αγροτοβιομηχανικά απόβλητα που περιέχουν υψηλό οργανικό φορτίο και υψηλό δυναμικό παραγωγής βιοαερίου, όπως τα υγρά απόβλητα ελαιοτριβείων, σφαγείων, υγρές κοπριές, αποτελεί έναν καινοτόμο τρόπο διαχείρισης των τεράστιων αυτών όγκων αποβλήτων που παράγονται διεθνώς. Ο κύριος σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της παραγωγής βιοαερίου μέσω αναερόβιας διεργασίας, κυρίως, υγρών γεωργικών αποβλήτων. Η τεχνολογία βιοαερίου με τη βοήθεια πολιτικών που υιοθετούνται για την ενίσχυση και προώθησή της μπορεί να αποτελέσει δυνητικά μία ενεργειακά και οικονομικά αποδοτική, περιβαλλοντική και βιώσιμη εναλλακτική λύση έναντι των δαπανηρών, περιβαλλοντικά βλαβερών και υπό εξάντληση, ορυκτών καυσίμων. Το βιοαέριο, κατόπιν κατάλληλα επιλεγόμενης μεθόδου επεξεργασίας, μπορεί να διοχετεύεται ως καύσιμο σε μηχανές συστημάτων συνδυασμένης παραγωγής ενέργειας, να αναβαθμίζεται σε βιομεθάνιο και ως υποκατάστατο του φυσικού αερίου να εγχύεται στο κεντρικό δίκτυο ή να χρησιμοποιείται στις μεταφορές, ή να υποβάλλεται σε διεργασία αναμόρφωσης και να μετατρέπεται σε αέριο σύνθεσης με το παραγόμενο υδρογόνο να χρησιμοποιείται σε κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας. Το χωνεμένο υπόλειμμα, το δεύτερο προϊόν της εν λόγω διεργασίας μπορεί, επίσης, κατόπιν επεξεργασίας, να χρησιμοποιείται ως οργανικό λίπασμα. Σημαντικά πλεονεκτήματα που παρέχει η τεχνολογία βιοαερίου είναι, μεταξύ άλλων, η μείωση του όγκου των αποβλήτων και του κόστους διαχείρισής τους, η μείωση εκπομπών μεθανίου και διοξειδίου του άνθρακα, η οικονομική ανάπτυξη σε τοπικό και παγκόσμιο επίπεδο και η μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Σημαντικό μέρος της παρούσας εργασίας αφιερώνεται στην ανασκόπηση πρόσφατων μελετών που αφορούν σε τρόπους βελτίωσης της τεχνολογίας βιοαερίου, μέσω, π.χ., συγχώνευσης διάφορων υποστρωμάτων, υβριδικών ανανεώσιμων συστημάτων, καινοτόμων μεθόδων επεξεργασίας / αναβάθμισης / αναμόρφωσης του βιοαερίου και επεξεργασίας του χωνέματος, μείωσης των εκπομπών μεθανίου από τις μονάδες βιοαερίου, ή μέσω της τεχνητής νοημοσύνης. Για τη βιβλιογραφική έρευνα χρησιμοποιούνται βάσεις δεδομένων (π.χ., Scopus), ψηφιακές βιβλιοθήκες, κ.τ.λ. Τέλος, ιδιαίτερη έμφαση

δίνεται σε μελέτη περίπτωσης που αφορά μονάδα παραγωγής βιοαερίου ΣΗΘ 999 kW_{el} στην Βοιωτία, στην οποία μία ενδεικτική ημερήσια τροφοδοσία είναι, περίπου, 74 t (π.χ., ορός γάλακτος), η παραγόμενη ποσότητα βιοαερίου 3.995.000 Nm³/έτος, η ολική απόδοση της μονάδας 64,3%, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια 8.300.000 kWh_{el}/έτος με απόδοση 40,3%, η θερμική ενέργεια 4.940.000 kWh_{therm}/έτος με απόδοση 24%, και τα έσοδα 1,9 εκ €/έτος.

Λέξεις-κλειδιά

Βιοαέριο, γεωργικά απόβλητα, συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας, αναβάθμιση, αναμόρφωση, τεχνητή νοημοσύνη.

Biogas production from agricultural waste for combined heat and power generation: A case study of a biogas plant in the Regional Unit of Boeotia

Abstract

The production of bioenergy from agricultural and agro-industrial wastes is an innovative way of managing the massive amounts of this kind of waste produced worldwide, such as olive mill wastewater, slaughterhouse wastewater and liquid manure containing high organic loads and high biogas production potential. The main object of the present thesis is the study of biogas production through anaerobic digestion, mostly of wastewater derived from farming activities and/or the agri-food industry. Biogas technology aided by targeted support policies can potentially become an energy/cost efficient, environmental and sustainable alternative to the highly costly and environmentally harmful fossil fuels which are becoming rapidly depleted. Biogas after being subjected to a suitably selected treatment method can be burned as a fuel in engines of combined energy production systems, upgraded to biomethane and injected into the central grid as a substitute for natural gas or used in transport, or being reformed and the produced hydrogen can be used in solid oxide fuel cells for generating heat and electricity. The digestate, a nutrient-rich byproduct of the said process also after being processed can be used as an organic fertilizer. The significant reduction of the amounts of waste, as well as of its management costs, the reduction of methane and carbon dioxide emissions are only some of the advantages the biogas technology can provide thereby achieving local and global economic development and environmental footprint decrease. A significant part of this thesis is dedicated to reviewing recent studies on ways to improve biogas technology, through, e.g., co-digestion of various substrates, hybrid renewable systems, innovative methods of processing/upgrading/reforming biogas, processing digestate, reducing methane emissions produced in biogas plants, or through artificial intelligence. The bibliographic research has been conducted by means of databases (e.g., Scopus), digital libraries, e.t.c. Finally, special emphasis is laid on the presentation of a case study concerning a 999 kW_{el} CHP biogas production plant in the region of Boeotia, in which an indicative daily feed is approximately 74 t (e.g., whey), the produced quantity of biogas is 3,995,000 Nm³/year, the total efficiency of

the CHP plant is 64.3%, the produced electrical energy is 8,300,000 kWh_{el}./year with an efficiency of 40.3%, the thermal energy is 4,940,000 kWh_{therm}./year with an efficiency of 24%, %, and the revenue is 1.9 million €/year.

Keywords

Biogas, agricultural waste, heat and electric power cogeneration, upgrading, reforming, artificial intelligence.

1. Εισαγωγή

Τα υγρά απόβλητα από αγροτικές και αγροτο-βιομηχανικές δραστηριότητες παράγονται με υψηλούς ρυθμούς διεθνώς. Το 2019 από σφαγεία μόνο παράχθηκαν παγκοσμίως 2.448 δισεκατομμύρια λίτρα υγρών αποβλήτων. Η χωρίς επεξεργασία διάθεσή τους στο φυσικό περιβάλλον προκαλεί πλήθος περιβαλλοντικών προβλημάτων λόγω πιθανής παρουσίας τοξικών ενώσεων και βαρέων μετάλλων (Martinez-Burgos et al., 2021). Λόγω των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών τους (υψηλά βιοδιασπώμενα οργανικά, επαρκής αλκαλικότητα, μεγάλες ποσότητες φωσφόρου και αζώτου) μπορούν να υποβληθούν σε διεργασία αναερόβιας χώνευσης και να παραχθεί βιοαέριο, το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί ενεργειακά (Nzouebet et al., 2025). Η συγχώνευση διαφορετικών υποστρωμάτων μπορεί να βελτιώσει την παραγωγή βιοαερίου, εν τούτοις, παρουσιάζει περιορισμούς όσον αφορά στην επιλογή των κατάλληλων λόγων ανάμειξης και του σχεδιασμού του βιοαντιδραστήρα (Alvarez et al., 2025). Οι διακυμάνσεις που παρουσιάζουν σημαντικές μεταβλητές εισόδου, όπως η πίεση εισόδου και ο ρυθμός ροής του βιοαερίου, και η περιεκτικότητα σε μεθάνιο, επηρεάζουν αρνητικά τη σταθερότητα και τη βελτιστοποίηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. (Abdurakhman et al., 2024). Η Ελλάδα διαθέτει ένα τεράστιο δυναμικό βιομάζας προερχόμενο από γεωργικά απόβλητα, ωστόσο, περίπου 17 εκατομμύρια τόνοι οργανικών αποβλήτων ετησίως παραμένουν αχρησιμοποίητα με ενεργειακό περιεχόμενο που αντιστοιχεί σε περίπου 7 TWh βιομεθανίου (Liberal.gr, 2026). Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως επιμέρους στόχους να εξετάσει τις δυνατότητες βελτίωσης της τεχνολογίας του βιοαερίου, να αναδείξει τη συσχέτιση της ανάπτυξης της τεχνολογίας αυτής με τη διαμόρφωση εθνικών και παγκόσμιων πολιτικών στρατηγικών και τον καθορισμό μελλοντικών στόχων και να παρουσιάσει τα αποτελέσματα εφαρμογής της τεχνολογίας μέσω μελέτης περίπτωσης. Σκοπός της εργασίας είναι, μέσω της μελέτης της παραγωγής βιοαερίου με αναερόβια χώνευση οργανικού κλάσματος που προέρχεται, κυρίως, από υγρά γεωργικά απόβλητα και της επακόλουθης παραγωγής ενέργειας, να αναδειχθεί η βαρύνουσα σημασία μίας αειφόρου διαχείρισης των γεωργικών αποβλήτων, όπου το απόβλητο θα καθίσταται χρήσιμο, ενεργειακά αξιοποιήσιμο και οικονομικά αποδοτικό σε μία εποχή που ο πλανήτης υποφέρει από περιβαλλοντική ρύπανση, ενεργειακή κρίση, και συνεπακόλουθες κοινωνικές αναταραχές.

1.1 Δομή Διπλωματικής Εργασίας

Αρχικά, σε μία συνοπτική εισαγωγή θα παρουσιαστούν οι στόχοι και ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στη συνέχεια, στο δεύτερο κεφάλαιο θα γίνει αναφορά σε αντιπροσωπευτικά είδη γεωργικών αποβλήτων, ειδικότερα, υγρών γεωργικών αποβλήτων, τα οποία παράγονται σε μεγάλες ποσότητες στην Ελλάδα και σε άλλες χώρες, τις πηγές προέλευσης (αγροτικές, π.χ., εκτροφή ζώων, και αγροτοβιομηχανικές δραστηριότητες, π.χ., επεξεργασία αγροτικών προϊόντων) και τα χαρακτηριστικά τους, καθώς επίσης και το περιβαλλοντικό πρόβλημα που αυτά προκαλούν. Στο ίδιο κεφάλαιο, θα περιλαμβάνεται η διεργασία της αναερόβιας χώνευσης και οι παράγοντες που την επηρεάζουν, ενώ θα γίνει αναφορά στα κύρια χαρακτηριστικά των αναερόβιων αντιδραστήρων. Επιπλέον, θα περιγραφεί διεξοδικά η επεξεργασία στην οποία υποβάλλονται τα προϊόντα της αναερόβιας χώνευσης, δηλαδή, το βιοαέριο και το χωνεμένο υπόλειμμα προκειμένου αυτά να καταστούν κατάλληλα προς ενεργειακή αξιοποίηση. Ξεχωριστή ενότητα του κεφαλαίου αυτού θα αποτελέσει η αναφορά στις εφαρμογές και τελικές χρήσεις του βιοαερίου, όπου θα περιγραφούν αναλυτικά οι τεχνολογίες αναβάθμισης και αναμόρφωσης, ενώ θα παρουσιαστούν, γενικά, περιπτώσεις συνδυασμένης παραγωγής ενέργειας. Στην τελευταία ενότητα του κεφαλαίου αυτού, θα παρουσιαστούν τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της τεχνολογίας βιοαερίου. Στο αμέσως επόμενο κεφάλαιο, θα δοθεί έμφαση στον τρόπο λειτουργίας των μονάδων ΣΗΘ, τα στάδια της διαδικασίας που οδηγεί στη συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας, τους διάφορους εξοπλισμούς, και θα γίνει μία τεχνοοικονομική αξιολόγηση των μονάδων παραγωγής βιοαερίου. Αναφορά, θα γίνει, επίσης, στο εκσυγχρονισμένο νομοθετικό πλαίσιο που ρυθμίζει την παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές στην Ελλάδα. Στο τέταρτο κεφάλαιο, θα πραγματοποιηθεί μία εκτεταμένη συγκριτική ανάλυση, κυρίως, μέσω διαγραμμάτων, της κατάστασης που ισχύει διαχρονικά στην Ελλάδα και σε άλλες χώρες όσον αφορά στην τεχνολογία βιοαερίου (παραγόμενες ποσότητες βιοαερίου, βιομεθανίου, ηλεκτρικής ενέργειας, αριθμός μονάδων βιοαερίου) και θα εξεταστούν οι προοπτικές εξέλιξής τους. Ακολούθως, στο πέμπτο κεφάλαιο θα γίνει μία ενδελεχής βιβλιογραφική επισκόπηση που θα αφορά στις πιο πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία του βιοαερίου. Θα παρουσιαστεί η δυνατότητα ενίσχυσης της παραγωγής βιοαερίου, για παράδειγμα, μέσω αναερόβιας συγχώνευσης διαφορετικών

υποστρωμάτων, ειδικής προεπεξεργασίας των υποστρωμάτων, προσθήκης νανοσωματιδίων οξειδίων του σιδήρου. Επίσης, θα αναφερθούν πρόσφατες μελέτες σχετικά με υβριδικά συστήματα ΣΗΘ, την επεξεργασία, την αναβάθμιση και αναμόρφωση του βιοαερίου, την επεξεργασία του χωνέματος. Θα παρουσιαστούν λύσεις για την μείωση των εκπομπών μεθανίου στις μονάδες βιοαερίου, ενώ θα γίνει σημαντική μνεία στη χρήση της τεχνητής νοημοσύνης για τη βελτιστοποίηση της τεχνολογίας βιοαερίου. Το έκτο κεφάλαιο θα εστιάσει σε μελέτη περίπτωσης, και συγκεκριμένα, στη μελέτη μονάδας παραγωγής βιοαερίου στην περιοχή της Βοιωτίας, η οποία επεξεργάζεται φυτικά και ζωικά απόβλητα για συνδυασμένη παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας. Στο τελευταίο κεφάλαιο, θα εξαχθούν συμπεράσματα με βάση την ανάλυση και τα αποτελέσματα της έρευνας που πραγματοποιήθηκαν σε όλα τα προηγούμενα κεφάλαια.

1.2 Μεθοδολογία Διπλωματικής Εργασίας

Το πρώτο βήμα της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας ήταν η διατύπωση του επιστημονικού ερωτήματος, δηλαδή, εάν η τεχνολογία βιοαερίου για ανάκτηση ενέργειας μέσω αναερόβιας χώνευσης γεωργικών αποβλήτων με τον τρόπο που αυτή εξελίσσεται, βελτιώνεται, υλοποιείται σήμερα και σχεδιάζεται η εφαρμογή της μελλοντικά με βάση καινοτόμες μεθόδους και πολιτικές που χαράσσονται σε εθνικό και παγκόσμιο επίπεδο, μπορεί να αποτελέσει μία ικανή εναλλακτική λύση έναντι των ορυκτών καυσίμων για την επίλυση των προβλημάτων της ολοένα και εντεινόμενης ενεργειακής κρίσης, της κακής διαχείρισης αποβλήτων, της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης, καθώς επίσης και των συνεπακόλουθων οικονομικών και κοινωνικών προβλημάτων.

Το δεύτερο βήμα ήταν η συλλογή πληροφοριών για την οποία χρησιμοποιήθηκαν βιβλιομετρικά εργαλεία που διατίθενται από διάφορες βάσεις δεδομένων. Τα βασικά κριτήρια αναζήτησης ήταν, με σειρά προτεραιότητας, η επιλογή «τίτλος άρθρου» ως θεματική περιοχή, ο συνδυασμός λέξεων-κλειδίων, η προσθήκη πεδίων αναζήτησης, το εύρος ετών 2020-2026 με ταξινόμηση από τον νεότερο προς τον παλαιότερο τύπο πηγής, με κύριο τύπο πηγής, κατά προτίμηση, τα άρθρα, και η αναγνώριση επιρροής της δημοσίευσης με βάση τον αριθμό αναφορών της από άλλους ερευνητές. Πηγές που χρησιμοποιήθηκαν για τη βιβλιογραφική έρευνα ήταν βάσεις δεδομένων, όπως Scopus

και Google Scholar, η διαδικτυακή πύλη ResearchGate, ψηφιακές βιβλιοθήκες, όπως HEAL-Link, Wiley, ScienceDirect, εκδοτικοί οργανισμοί, όπως MDPI, Springer, πρακτικά συνεδρίων.

Ως τρίτο βήμα της μεθοδολογίας υιοθετήθηκε η ερευνητική προσέγγιση χρησιμοποιώντας ως μελέτη περίπτωσης μία μονάδα βιοαερίου στην οποία πραγματοποιήθηκε επίσκεψη της συγγραφέως της παρούσας διπλωματικής εργασίας στις εγκαταστάσεις της προς συλλογή δεδομένων και λήψη φωτογραφιών με σκοπό την παρουσίαση και περιγραφή της λειτουργίας και απόδοσής της.

1.3 Περιγραφή στοιχείου καινοτομίας Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία θα χαρακτηρίζεται από τα εξής στοιχεία καινοτομίας:

- Συγκριτική παρουσίαση, κυρίως, μέσω διαγραμμάτων, της τεχνολογίας βιοαερίου στην Ελλάδα, την Ευρώπη και σε άλλες χώρες σε βάθος χρόνου και με προοπτικές εξέλιξης στο μέλλον. Θα αναλυθεί το μέγεθος της παραγωγής και ενεργειακής αξιοποίησης του βιοαερίου που συνδέεται άμεσα με πολιτικές στρατηγικές που διαμορφώνονται σε εθνικό και παγκόσμιο επίπεδο.
- Βιβλιογραφική επισκόπηση μελετών που έχουν διεξαχθεί από το 2020 έως και το 2026 και αφορούν στην εξέλιξη της τεχνολογίας βιοαερίου, με έμφαση στη χρήση τεχνητής νοημοσύνης, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας και απόδοσης των μονάδων βιοαερίου.
- Μελέτη περίπτωσης: α) συλλογή στοιχείων από μονάδα παραγωγής βιοαερίου που βρίσκεται στη Βοιωτία, η οποία χρησιμοποιεί ζωικά και φυτικά απόβλητα ως υποστρώματα για την παραγωγή βιοαερίου, και συνεπακόλουθα, την συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας, β) παρουσίαση της λειτουργίας και απόδοσης της μονάδας κατόπιν επίσκεψης της συγγραφέως στον χώρο και επιτόπια παρακολούθησης των υλοποιούμενων διεργασιών.

2. Βιοαέριο

2.1 Πρώτες ύλες για παραγωγή βιοαερίου από γεωργικά απόβλητα

Τα υγρά απόβλητα που προέρχονται από τον αγροτοβιομηχανικό τομέα, παράγονται με υψηλούς ρυθμούς και σε μεγάλους όγκους· προέρχονται, κυρίως, από επεξεργασία

προϊόντων, όπως ζαχαρότευτλα (αλκοόλη και σάκχαρα), ελαιόσποροι (φοινικέλαιο, σογιέλαιο), κασάβα (άμυλα και άλευρα), δημητριακά (άλευρα και αλκοόλη), γαλακτοκομικά προϊόντα και σφάγια ζώων (βοοειδή, χοίροι, πουλερικά). Συγκεκριμένα, από τη σφαγή ζώων, την παραγωγή βιοαιθανόλης, την επεξεργασία φοινικέλαιου, κασάβας και γάλακτος παράχθηκαν το 2019 παγκοσμίως, περίπου, 2.448, 1.650, 256, 85, και 0,143 δισεκατομμύρια λίτρα υγρών αποβλήτων, αντίστοιχα. Η τεράστια παραγωγή, ειδικά, υγρών αποβλήτων από σφαγεία (SH) προκαλεί ανησυχία λόγω του μεγάλου ρυπαντικού τους δυναμικού. Σε χώρες, όπως, η Κίνα, οι ΗΠΑ, η ΕΕ, και η Βραζιλία, παράγεται το 24%, 17%, 16%, και 10%, αντίστοιχα, της παγκόσμιας ποσότητας τέτοιων υγρών αποβλήτων. Οι ΗΠΑ, η Βραζιλία, η ΕΕ, η Κίνα είναι, επίσης, υπεύθυνες για την παραγωγή του 54%, 30%, 5% και 3%, αντίστοιχα, υγρών αποβλήτων από την επεξεργασία βινάσας (VW) από την παραγωγή βιοαιθανόλης. Οι μεγαλύτερες ποσότητες υγρών αποβλήτων από επεξεργασία κασάβας (CPW) παράχθηκαν στην Νιγηρία, Ταϊλάνδη, Κονγκό και Γκάνα (21%, 11%, 10% και 7%, αντίστοιχα, της παγκόσμιας παραγωγής). Η παγκόσμια παραγωγή υγρών αποβλήτων από την επεξεργασία φοινικέλαιου (POME) ανήλθε στα 250 δισεκατομμύρια λίτρα παγκοσμίως, προερχόμενη, κυρίως, από Ινδονησία και Μαλαισία, ενώ η παραγωγή ορού γάλακτος (CW) και υγρών αποβλήτων από την επεξεργασία γάλακτος (EMP) ήταν 158 και 143 δισεκατομμύρια λίτρα, αντίστοιχα, με τους υψηλότερους όγκους να έχουν παραχθεί στις ΗΠΑ, Ινδία, Βραζιλία (Martinez-Burgos et al., 2021).

Στην Ελλάδα, τα υποπροϊόντα τεσσάρων αντιπροσωπευτικών αγροτοβιομηχανικών δραστηριοτήτων με υψηλό οργανικό περιεχόμενο και εποχική παραγωγή είναι τα υγρά απόβλητα ελαιολιτριβείων (Οκτώβριο-Μάρτιο), ορός γάλακτος (Ιανουάριος-Ιούνιος), υγρή κοπριά χοίρων και πουλερικών (καθ' όλο το έτος). Συγκεκριμένα, τα υγρά απόβλητα ελαιολιτριβείων έχουν ένα υψηλό Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (COD) 50–150 kg/m³, με ακραίες τιμές έως 200 kg/m³, λόγω του οποίου τα απόβλητα αυτά ανήκουν στην κατηγορία των πιο ισχυρών βιομηχανικών υγρών αποβλήτων και με το πιο σημαντικό ενεργειακό δυναμικό (Thanos et al., 2021).

2.1.1 Χαρακτηριστικά γεωργικών αποβλήτων

Τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των υγρών γεωργικών αποβλήτων παρουσιάζουν διαφορές ακόμη κι αν έχουν την ίδια προέλευση. Για παράδειγμα, τα υγρά απόβλητα POME έχουν COD = 21-75 gO₂/L, Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο BOD = 23-42 gO₂/L, περιεκτικότητα σε φώσφορο από 7 έως 170 mg/L. Οι διακυμάνσεις αυτές οφείλονται στον τύπο της επεξεργασίας και της τεχνολογίας, καθώς επίσης, και στα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών. Τα υγρά απόβλητα CPW, VW, CW, POME περιέχουν τα υψηλότερα οργανικά φορτία (μέση τιμή 55 g O₂/L) λόγω των υψηλών επιπέδων υδατανθράκων, πρωτεϊνών, λιπιδίων και πολύ υψηλό ενεργειακό περιεχόμενο 281, 195, 155, 132 kWh/m³, αντίστοιχα. Τα υγρά απόβλητα SH, EMP έχουν οργανικό φορτίο, περίπου, 5 g O₂/L, που θεωρείται, επίσης, μία εξαιρετικά υψηλή τιμή και χαμηλό ενεργειακό περιεχόμενο, το οποίο αντισταθμίζεται από τους υψηλούς παραγόμενους όγκους τους (Martinez-Burgos et al., 2021).

Οι υγρές κοπριές από βοοειδή και χοίρους περιέχουν χαμηλότερη περιεκτικότητα σε ξηρή ύλη (8–11% και 7%, αντίστοιχα) και ένα υψηλότερο ποσοστό οργανικής ξηρής ύλης (75–86%) σε σύγκριση με τις αντίστοιχες στερεές κοπριές, ενώ είναι πλούσιες σε υδατάνθρακες (από τα βοοειδή) και πρωτεΐνες (από τους χοίρους) με αποτέλεσμα μία υψηλή περιεκτικότητα σε μεθάνιο. Το δυναμικό παραγωγής βιοαερίου για την υγρή κοπριά από βοοειδή είναι 200-500 Stm³/t oDM και από χοίρους 300-700 Stm³/t oDM (τυπικά κυβικά μέτρα ανά τόνο οργανικής ξηρής ύλης) (Ćurčić et al., 2025).

Τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά υγρής κοπριάς χοίρων (LPM), OMW, CW, κοπριάς πουλερικών (PM) παρουσιάζονται στον Πίνακα 1, και στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται τα φυσικοχημικά και βιολογικά χαρακτηριστικά των SH.

Πίνακας 1 - Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των LPM, OMW, CW, PM
(Τροποποίηση από (Thanos et al., 2021))

Παράμετροι	LPM	OMW	CW	PM
pH	7.7±0.1	4.9±0.0	4.5±0.1	8.9±0.0
TS (g/L)	9.5±9.6	94.9±2.5	73.9±1.1	268.2±3.2
VS (g/L)	5.9±6.9	83.2±2.4	59.9±1.9	180.2±1.6
t-COD (g/L)	12.9±9.2	195.6±15.3	80.7±3.2	7.7±3.3
N (g/L)	0.2±0.1	0.1±0.01	0.6±0.4	20.7±0.4

Πίνακας 2 – Χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων SH (Τροποποίηση από Nzouebet et al., 2025)

Παράμετροι	Τιμές
pH	7.58 ± 0.84
Ηλεκτρική αγωγιμότητα (mS/cm)	3460 ± 1678.16
Ολικά αιωρούμενα στερεά (TS) (%)	4.34 ± 1.03
Οργανικό άζωτο (TKN) (mg/L)	101.37 ± 16.03
Ολικός φώσφορος (TP) (mg/L)	97.6 ± 25.10
COD (mgO ₂ /L)	2940 ± 0.96
BOD ₅ (mgO ₂ /L)	901 ± 0.45
Κάλιο (K ⁺) (mg/L)	0.04 ± 0.001
Μαγνήσιο (Mg ²⁺) (mg/L)	0.07 ± 0.003
Ασβέστιο (Ca ²⁺) (mg/L)	0.05 ± 0.002
Νάτριο (Na ⁺) (mg/L)	0.27 ± 0.09
Χρώμα (mg/L PtCo)	312.8 ± 18.03
Θολρότητα (NFU)	364.09 ± 37.02
Ολικά αυγά Helminth (αυγά ανά L)	455,33 ± 227,16

2.1.2 Περιβαλλοντικό πρόβλημα

Τα υγρά γεωργικά απόβλητα έχουν υψηλά επίπεδα οργανικής ύλης, η οποία, ενδεχομένως, να περιέχει τοξικές ενώσεις και βαρέα μέταλλα με αρνητικές επιπτώσεις στην ποιότητα του νερού, του εδάφους και του αέρα σε περίπτωση απόρριψής τους χωρίς επεξεργασία. Πολλά ίχνη βαρέων μετάλλων (Pb²⁺, Cd²⁺, Zn²⁺, As²⁺, Co²⁺, Ni²⁺, Cu²⁺, Hg²⁺, Cr³⁺) εντοπίζονται σε υγρά απόβλητα VW, ίχνη Ni²⁺, Pb²⁺, Hg²⁺, Cd²⁺, As²⁺, Cr³⁺ σε υγρά απόβλητα POME και ίχνη Pb²⁺, Cd²⁺, Cu²⁺, Hg²⁺, Cr³⁺ σε υγρά απόβλητα CPW. Σημαντικές ποσότητες φωσφόρου και αζώτου υπάρχουν στα αγροτοβιομηχανικά υγρά απόβλητα που, όταν αυτά απορριφθούν στα υδάτινα σώματα, ενισχύουν την ανάπτυξη μικροοργανισμών, υδάτινων φυτών και μικροάλγης με αποτέλεσμα να προωθούνται διεργασίες ευτροφισμού που αποσταθεροποιούν τα οικοσυστήματα. Η απόρριψη των CPW στα εδάφη οδηγεί σε αύξηση της περιεκτικότητας σε άλατα. Επίσης, τα VW μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες χλωριδίων και νιτρικών στα υπόγεια ύδατα μέσω διεργασιών έκπλυσης προκαλώντας ρύπανση του εδάφους από τοξικά ιόντα και μέταλλα. Η υδρολίπανση ενέχει, επίσης, τον κίνδυνο το έδαφος να καταστεί υδρόφοβο λόγω της οργανικής ύλης και των μικροοργανισμών που καλύπτουν την επιφάνεια. Το υψηλό οργανικό φορτίο που περιέχουν αυτού του είδους τα απόβλητα μπορεί να φράξει τους πόρους του εδάφους και να μειώσει τη συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου. Ελλοχεύει, επίσης, ο κίνδυνος έκλυσης εκπομπών στην ατμόσφαιρα κατά τη βιοδιάσπαση της οργανικής ύλης των αποβλήτων, όπως τα

CPW, POME, EMP, VW, και SH, σε μεθάνιο (CH_4) και διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) ενισχύοντας το φαινόμενο του θερμοκηπίου· τα SH εκλύουν, επίσης, οξείδια του αζώτου (NO_x) και οξείδια του θείου (SO_x), τα οποία είναι υπεύθυνα για την όξινη βροχή (Martinez-Burgos et al., 2021). Τα υποπροϊόντα της παραγωγής ελαιόλαδου, όπως τα υγρά απόβλητα ελαιοτριβείου, θέτουν, επίσης, έναν σοβαρό περιβαλλοντικό κίνδυνο (Thanos et al., 2021). Τα υγρά απόβλητα σφαγείων, όταν απορρίπτονται στα επιφανειακά ύδατα, προκαλούν μείωση του διαλυμένου οξυγόνου με καταστροφικά αποτελέσματα στην υδάτινη ζωή ενώ δημιουργούν προβλήματα ευτροφισμού και δυσάρεστων οσμών. Η χωρίς επεξεργασία απόρριψή τους έχει, ομοίως, αρνητικές επιπτώσεις και στη χλωρίδα του φυσικού περιβάλλοντος (Nzouebet et al., 2025).

2.2 Αναερόβια χώνευση

Οι αναερόβιες διεργασίες έχουν ως αποτέλεσμα μία μερική μείωση του ρυπαντικού δυναμικού των υγρών αποβλήτων και την παραγωγή πιο μειωμένων μορίων που μπορούν να χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενέργειας. Τα υγρά γεωργικά απόβλητα λόγω των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών τους (υψηλά βιοδιασπώμενα οργανικά, επαρκής αλκαλικότητα, μεγάλες ποσότητες φωσφόρου και αζώτου, υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία, αναερόβιοι οργανισμοί) μπορούν να χρησιμοποιούνται ως υποστρώματα και να υποβάλλονται σε αναερόβια χώνευση για την παραγωγή βιοενέργειας και άλλων υποπροϊόντων με σημαντική οικονομική αξία. Τα υποστρώματα με περιεκτικότητα σε ξηρή ουσία μικρότερη από 20%, όπως η κοπριά, χρησιμοποιούνται για «υγρή χώνευση». Λόγω της παρουσίας φαινολικών ενώσεων σε απόβλητα, όπως τα υγρά απόβλητα ελαιοτριβείου, προτείνεται η αναερόβια συγχώνευσή τους με άλλα οργανικά απόβλητα ώστε να μετριαστεί η επίδραση των φαινολών στην αναερόβια χώνευση. Ιδανική λύση αποτελεί η συγχώνευση των OMW που έχουν μεγάλη ποσότητα οργανικής ύλης αλλά χαμηλή περιεκτικότητα σε άζωτο με κοπριά πουλερικών που είναι πλούσια σε θρεπτικά, όπως το άζωτο, ο φώσφορος και το κάλιο. (Martinez-Burgos et al., 2021; Nzouebet et al., 2025; Ćurčić et al., 2025; Thanos et al., 2021).

2.2.1 Μηχανισμός της αναερόβιας χώνευσης

Η αναερόβια χώνευση αποτελεί μία βιολογική αποδόμηση των οργανικών

υποστρωμάτων, η οποία συντελείται σε τέσσερα στάδια τα υποπροϊόντα των οποίων αποτελούν υπόστρωμα για το επόμενο στάδιο. Κάτωθι παρουσιάζονται τα στάδια (Tshemese et al., 2023).

- Υδρόλυση: σχετικά αργή διεργασία μετατροπής σύνθετων βιοπολυμερών (λιπιδίων, υδατανθράκων, πρωτεϊνών) σε υδατοδιαλυτές ενώσεις με αποδόμηση μέσω των βακτηρίων *Bacteroides*, *Clostridia*, και *Bifidobacteria* και μερικές φορές των *Streptococci* και *Enterobacteriaceae*.
- Οξεογένεση: στάδιο ζύμωσης, στο οποίο τα οξεογόνα βακτήρια *Streptococcus*, *Escherichia*, *Staphylococcus*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Sarcina*, *Desulfovibrio*, *Lactobacillus* είναι ενεργά και αποδομούν αμινοξέα, λιπίδια και γλυκόζη σε πτητικά λιπαρά οξέα, οργανικά οξέα, CO_2 και H_2 . Το πιο σημαντικό οργανικό οξύ που παράγεται είναι το οξικό οξύ (CH_3COOH), το οποίο αποτελεί υπόστρωμα για μεθανογόνους μικροοργανισμούς. Η παραγωγή πτητικών λιπαρών οξέων ευνοείται όταν $\text{pH} > 5$ και η παραγωγή αιθανόλης ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) ευνοείται όταν $\text{pH} < 5$.
- Οξικογένεση: παραγωγή H_2 και οξικού οξέος. Τα ενεργά βακτήρια σε αυτό το στάδιο είναι *Clostridium*, *Syntrophomonas wolfeii*, και *Syntrophomonas wolinii*. Το στάδιο αυτό είναι σημαντικό διότι αντανάκλα την απόδοση παραγωγής βιοαερίου.
- Μεθανογένεση: τελικό στάδιο στο οποίο το οξικό οξύ μετατρέπεται σε CH_4 και CO_2 χρησιμοποιώντας μεθανογόνα βακτήρια - τα οξικοτροφικά (ενεργό είδος τα *Methanosarcina* και *Methanosaeta*) και υδρογονοτροφικά (κυρίαρχο είδος τα *Methanospirillum*, *Methanobacterium formicicum*, *Methanoplanus*, και *Methanobrevibacterium*). Το μεθάνιο και το διοξείδιο του άνθρακα αποτελούν το βιοαέριο που είναι το κύριο τελικό προϊόν της αναερόβιας χώνευσης.

2.2.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την αναερόβια χώνευση

Η απόδοση της αναερόβιας χώνευσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά του υποστρώματος, τη διάρθρωση του βιοαντιδραστήρα και άλλες λειτουργικές παραμέτρους (Nzouebet et al., 2025). Η απόδοση του βιοαερίου καθορίζεται από την ποσότητα νωπής, ξηρής ή οργανικής ξηρής ύλης που υπάρχει στο υπόστρωμα (Ćurčić et al., 2025).

Κάτωθι αναφέρονται οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης (Tshemese et al., 2023; Wei et al., 2024):

- Τύπος υποστρώματος: η σύνθεση των πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται ως υποστρώματα επηρεάζει την απόδοση βιοαερίου, την περιεκτικότητα σε μεθάνιο, τη βιοαποδόμηση της βιομάζας και τον μηχανισμό αποδόμησης. Τα υποστρώματα που θεωρούνται κατάλληλα για βιοαποδόμηση και παραγωγή βιοαερίου περιέχουν θρεπτικά, όπως υδατάνθρακες, πρωτεΐνες και λιπίδια.
- pH: ιδανικές τιμές για αναερόβια χώνευση είναι 4-8,5 για την ανάπτυξη βακτηρίων ζύμωσης και 6,5-7,2 για την ανάπτυξη μεθανογόνων. Με τον έλεγχο του pH για τη βέλτιστη ανάπτυξη μικροοργανισμών επιτυγχάνεται μείωση της τοξικότητας λόγω αυξημένης συγκέντρωσης αμμωνίας. Το pH επηρεάζει, επίσης, τη σύνθεση των πτητικών λιπαρών οξέων (VFA). Η συσσώρευση των VFA μέσα στον βιοαντιδραστήρα οδηγεί σε πτώση του pH και κατά συνέπεια σε οξίνιση.
- Θερμοκρασία: αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για την αναερόβια χώνευση. Επηρεάζει τη δραστηριότητα των ενζύμων και συνενζύμων, την απόδοση παραγωγής μεθανίου και την ποιότητα του χωνέματος. Τα αναερόβια βακτήρια αναπτύσσονται, γενικά, σε ψυχρόφιλες θερμοκρασίες (10-30 °C), σε μεσόφιλες θερμοκρασίες (30-40 °C), και σε θερμόφιλες θερμοκρασίες (50-60 °C). Ενώ η απόδοση της αναερόβιας χώνευσης αυξάνει με την αύξηση της θερμοκρασίας, οι θερμόφιλες συνθήκες είναι πιο ευαίσθητες σε περιβαλλοντικές μεταβολές σε σύγκριση με τις μεσόφιλες.
- Ρυθμός οργανικής φόρτισης: ποσότητα υποστρώματος που προστίθεται σε ένα σύστημα χωνευτήρα ανά μονάδα όγκου ανά ημέρα (γραμμάρια ολικών στερεών, χημικά απαιτούμενου οξυγόνου, ή πτητικών στερεών ανά λίτρο όγκου χωνευτήρα ανά ημέρα).
- Υδραυλικός χρόνος παραμονής (HRT): μέσος χρόνος παραμονής ενός υγρού ή διαλυμένου συστατικού σε έναν αντιδραστήρα. Μεγαλύτερος HRT οδηγεί σε μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε μεθάνιο.
- Λόγος εμβολίου προς υπόστρωμα: καθορίζει τον αρχικό λόγο μεταξύ μικροβιακών πληθυσμών. Τα εμβόλια ενισχύουν θετικά την έναρξη της αναερόβιας χώνευσης. Για παράδειγμα, η παραγωγή βιοαερίου αυξήθηκε με χρήση υγρών αποβλήτων φοινικέλαιου ως εμβολίου στην αναερόβια χώνευση κοπριάς βοοειδών. Όσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα εμβολίου τόσο μεγαλύτερος ο αριθμός των μεθανογόνων.
- Λόγος Άνθρακα-Αζώτου (C/N): το άζωτο παίζει σημαντικό ρόλο στη μικροβιακή

- ανάπτυξη και ο λόγος C/N είναι κρίσιμος για τη σταθερή λειτουργία των συστημάτων αναερόβιας χώνευσης. Βέλτιστος λόγος C/N είναι 20-30. Όμως, ένας χαμηλός λόγος C/N (μεγάλη ποσότητα αζώτου) οδηγεί σε συσσώρευση αμμωνίας και, κατ' επέκταση, σε επιδείνωση της απόδοσης παραγωγής βιοαερίου και μεθανίου. Μελέτη των Lamoh et al. (2020) αναφέρει ότι με έναν λόγο C/N 10,08-11,44 το αποτέλεσμα ήταν μία κακή απόδοση παραγωγής βιοαερίου από POME.
- Συγκέντρωση στερεών: η μειωμένη περιεκτικότητα των οργανικών αποβλήτων σε νερό καθιστά δύσκολη τη διάχυση αερίου και υγρού μέσα στον βιοαντιδραστήρα και προκαλεί συσσώρευση αναστολέων με αποτέλεσμα μία μείωση της διαθεσιμότητας του υποστρώματος. Αντίθετα, η αύξηση της περιεκτικότητας σε νερό αυξάνει την απόδοση παραγωγής μεθανίου, την ομογενοποίηση μέσα στον αντιδραστήρα και την αλληλεπίδραση μεταξύ μικροοργανισμών και θρεπτικών.
 - Συγχώνευση υποστρωμάτων: οι διαφορετικές απαιτήσεις των αναερόβιων μικροοργανισμών σε οργανικά και μικροθρεπτικά για την ανάπτυξη και αποδόμησή τους μπορούν να ικανοποιηθούν με τον συνδυασμό δύο ή περισσότερων υποστρωμάτων.

2.2.3 Προϊόντα της αναερόβιας χώνευσης

A) Βιοαέριο

Γενικά, το ανεπεξέργαστο βιοαέριο αποτελείται από 60-65% μεθάνιο, 30-35% διοξείδιο του άνθρακα και μικρά ποσοστά υδρατμών, H₂, H₂S, και άλλων αέριων ρύπων (Jiménez-Come et al., 2023).

Στον Πίνακα 3 παρουσιάζεται η σύνθεση βιοαερίου από διάφορες γεωργικές πηγές (Ag-Cow: κοπριά γαλακτοκομικών αγελάδων, Ag-Mix: κοπριά βοοειδών, πουλερικών, λαχανικά, χλόη, Ag/Waste-A: κοπριά βοοειδών, χοίρων, απόβλητα από τρόφιμα, βιομηχανίες γαλακτοκομικών, ποτών, Ag/Waste-B: ίδιο με Ag/Waste-A με δύο βιοαντιδραστήρες, Waste-Mix: βιοαέριο από Ag/Waste-A, Ag/Waste-B και κοπριά αλόγων/πουλερικών/βοοειδών, απόβλητα τροφίμων, αστικά οργανικά απόβλητα, απόβλητα κήπων και βιομηχανικά υποπροϊόντα).

Πίνακας 3 – Σύνθεση βιοαερίου (Calbry-Muzyka et al., 2022)

	CH ₄ (v%)	CO ₂ (v%)	N ₂ (v%)	O ₂ (v%)	H ₂ S (ppm _v)	NH ₃ (ppm _v)
Ag-Cow	54.9	39.0	5.0	0.9	400–1000	30–53
Ag-Mix	53.0	43.3	3.2	0.4	4–10	b.d. (<0.25)
Ag/Waste-A	57.7	40.8	1.2	0.3	18	70
Ag/Waste-B	56.9	41.3	1.3	0.5	2	70
Waste-Mix	57.2	42.3	n.m.	0.2	60	n.m.

Οι μέσες τιμές των συστατικών του βιοαερίου είναι : CH₄=56%, CO₂=40%, N₂=3%, O₂=0,6%, H₂S=661 ppm_v S (μέρη ανά εκατομμύριο κατ' όγκο ως προς το θείο), θειόλες/μερκαπτάνες = 1,3 ppm_v S, σουλφίδια = 0,8 ppm_v S, θειοφαίνιο = 0,2 ppm_v S, σιλοξάνια <0.02 mg_{Si}/m³ N, αρωματικές και κυκλικές ενώσεις = 60 mg/m³ N, αλκάνια =0,4 mg/m³ N, οξυγονούχα = 30 mg/m³ N (Calbry-Muzyka et al., 2022).

Στον Πίνακα 4 παρουσιάζεται η σύσταση του βιοαερίου που παράχθηκε από αναερόβια χώνευση POME.

Πίνακας 4 – Σύνθεση βιοαερίου (Τροποποίηση από Hosseini and Wahid, 2014)

Συστατικό	Μονάδα	Βιοαέριο POME
CH ₄	Vol%	60–70
CO ₂	Vol%	30–40
N ₂	Vol%	< 1
H ₂ S	ppm	10–2000

Σύμφωνα με τους Zantedeschi et al. (2025), η σύνθεση του βιοαερίου που παράχθηκε από αναερόβια χώνευση μόνο υγρών αποβλήτων ελαιοτριβείου ήταν 50,71% CH₄ και 49,29% CO₂ και από αναερόβια συγχώνευση υγρών αποβλήτων ελαιοτριβείου με 4% φύλλα ελιάς ήταν 52,6% CH₄ και 47,40% CO₂.

Για βιοαέριο που παράχθηκε από αναερόβια συγχώνευση μείγματος 30% v/v OMW (υγρών αποβλήτων ελαιοτριβείου) και 70% PM (κοπριάς πουλερικών) και LPM (υγρής κοπριάς χοίρων) η περιεκτικότητα σε μεθάνιο ήταν 60 ± 4,7% και για βιοαέριο που παράχθηκε από αναερόβια συγχώνευση μείγματος 40% v/v of OMW και 60% PM και CW (ορού γάλακτος) η περιεκτικότητα σε μεθάνιο ήταν 61 ± 3,4% (Thanos et al., 2021).

B) Χωνεμένο υπόλειμμα

Το μη αέριο προϊόν της αναερόβιας χώνευσης είναι ένα υπόλειμμα που διαχωρίζεται σε ένα στερεό και ένα υγρό κλάσμα, το οποίο ύστερα από επεξεργασία εφαρμόζεται, συνήθως, σε καλλιεργήσιμη γη ή βοσκοτόπια ή επιστρέφει στη μονάδα επεξεργασία βιοαερίου, στη διεργασία ζύμωσης. Το χωνεμένο υπόλειμμα μπορεί να μεταφέρεται σε δεξαμενές για προσωρινή αποθήκευση και μπορεί να χρησιμοποιείται ως λίπασμα ή εδαφοβελτιωτικό. Σε περιόδους ενεργειακής κρίσης, το χώνεμα αποτελεί μία εξαιρετική εναλλακτική λύση έναντι των δαπανηρών ορυκτών λιπασμάτων. Η επίδρασή του στη μικροχλωρίδα του εδάφους είναι ευνοϊκή για την ανακατασκευή των ωφέλιμων μικροοργανισμών, την ταχεία αποδόμηση οργανικής ύλης και την ανάπτυξη των φυτών (Cermak et al., 2025; Jasiński et al., 2024).

Διαχείριση χωνεμένου υπολείμματος

Η διαχείριση του χωνεμένου υπολείμματος είναι σημαντική για την ανάκτηση θρεπτικών συστατικών, καθώς επίσης και για την απομάκρυνση επικίνδυνων ουσιών από αυτό ώστε να διασφαλίζεται η προστασία του περιβάλλοντος και η βιώσιμη αγροκαλλιέργεια. Η αναερόβια χώνευση, ειδικά, των υποστρωμάτων που προέρχονται από εκτροφή ζώων, παράγει τεράστιους όγκους χωνεμένου υπολείμματος, το οποίο είναι πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά και μπορεί να χρησιμοποιείται ως λίπασμα ή εδαφοβελτιωτικό. Ποσότητες βαρέων μετάλλων, έμμονων οργανικών ρύπων, φαρμακευτικών ουσιών, μικροπλαστικών ενδέχεται να υπάρχουν, επίσης, στο χωνεμένο υπόλειμμα με αποτέλεσμα οι επικίνδυνες αυτές ουσίες να καταλήγουν στους αγρούς προκαλώντας ένα σοβαρό πρόβλημα στη διατροφική αλυσίδα. Κάτωθι αναφέρονται συμβατικές και προηγμένες και αναδυόμενες τεχνολογίες επεξεργασίας του χωνεμένου υπολείμματος (Proskynitopoulou et al., 2026).

- Συμβατικές διεργασίες

- Μηχανικός διαχωρισμός: περιλαμβάνει κοχλιωτή πρέσα, φυγοκεντρικό διαχωριστή και δονητικό κόσκινο
- Διήθηση με μεμβράνη: έχει υψηλή εκλεκτικότητα και απόδοση διαχωρισμού ως προς τα στερεά θρεπτικά και τους μικρορύπους, ενώ επιτυγχάνει ανάκτηση και θρεπτικών και νερού.
- Αφαίρεση αμμωνίας: αφαιρεί τις πτητικές ενώσεις από υγρά ρεύματα και

εφαρμόζεται σε μεγάλο βαθμό για ανάκτηση αζώτου από το υγρό κλάσμα του χωνέματος.

- Χημική καθίζηση/κρυστάλλωση: χημική καθίζηση φωσφόρου ως φωσφορικού μαγνησίου ή ασβεστίου.
- Ανταλλαγή/ρόφηση ιόντων: ανάκτηση αζώτου και φωσφόρου από τα υγρά απόβλητα και από το χώνεμα χρησιμοποιώντας φυσικά και συνθετικά υλικά, μεταξύ των οποίων, ζεολίτες.
- Θερμοχημικές και Ηλεκτροχημικές διεργασίες
 - Υδροθερμική ενανθράκωση: ενισχύει την απόδοση διαχωρισμού υγρού-στερεού και, τυπικά, χρησιμοποιείται για τη μετατροπή οργανικής βιομάζας σε υδροεξανθράκωμα (hydrochar).
 - Πυρόλυση: μεγιστοποιεί την ανάκτηση πόρων και ελαχιστοποιεί τα απόβλητα μετατρέποντας οργανικά υπολείμματα σε ανακυκλώσιμα υλικά και φορείς ενέργειας· δίνει προϊόντα, όπως εξανθράκωμα, βιοέλαιο (bio-oil), αέρια.
 - Ηλεκτροχημικά και Βιοηλεκτροχημικά συστήματα: χρησιμοποιούν ηλεκτρισμό για να ανακτούν θρεπτικά, όπως άζωτο και φώσφορος, από το χώνεμα.
 - Ηλεκτροδιάλυση: χρησιμοποιείται για ανάκτηση θρεπτικών από το χώνεμα.
- Προηγμένες και Υβριδικές μέθοδοι
 - Επεξεργασία με βάση μεμβράνες σε σειρά: μπορεί να περιλαμβάνει μικροδιήθηση (microfiltration) για αφαίρεση αιωρούμενων στερεών, η οποία ακολουθείται από υπερδιήθηση (ultrafiltration) για περαιτέρω μείωση στερεών και ανάκτηση φωσφόρου και τέλος νανοδιήθηση (nanofiltration) ή αντίστροφη ώσμωση (RO) για συμπύκνωση θρεπτικών και ανάκτηση νερού υψηλής ποιότητας.
 - Προηγμένες τεχνικές για αφαίρεση φαρμακευτικών ουσιών: τεχνικές, όπως υπερδιήθηση, νανοδιήθηση, αντίστροφη ώσμωση έχουν υψηλή απόδοση στην αφαίρεση αντιβιοτικών από το υγρό κλάσμα του χωνέματος.

2.2.4 Αναερόβιοι βιοαντιδραστήρες

Για την αναερόβια χώνευση υπάρχουν διάφοροι τύποι βιοαντιδραστήρων ανάλογα με τις λειτουργικές παραμέτρους και το είδος του αποβλήτου. Για παράδειγμα, οι αντιδραστήρες τύπου τεχνητής καλυμμένης λίμνης χρησιμοποιούνται για την

επεξεργασία υγρής κοπριάς με στερεά λιγότερα από 2%, οι αντιδραστήρες πλήρους ανάμειξης χρησιμοποιούνται για επεξεργασία κοπριάς με 2-10% στερεά, κ.τ.λ. Κάτωθι αναφέρονται κάποιοι αντιδραστήρες με τα χαρακτηριστικά τους (Martinez-Burgos et al., 2021; Tshemese et al., 2023).

- Σύστημα τεχνητών λιμνών
Το σύστημα μπορεί να αποτελείται από έως 12 λίμνες, οι πρώτες είναι για ψύξη, οι επόμενες για ανάμειξη, αναερόβια χώνευση· χαρακτηρίζεται από χαμηλό κόστος, απλή και εύκολη λειτουργία. Συγκέντρωση CH_4 έως 55%. Χρόνος παραμονής 20-200 ημέρες. Απόδοση αφαίρεσης COD = 97%. Απαιτήσεις για μεγάλες εκτάσεις γης, δύσκολη δέσμευση αερίου.
- Αντιδραστήρας συνεχούς ανάδευσης (Continuous Stirred Tank Reactor, CSTR)
Πρόκειται για κλειστή δεξαμενή με μηχανική ανάδευση για αύξηση της παραγωγής βιοαερίου. Χρόνος παραμονής 4 ημέρες. Απόδοση αφαίρεσης COD = 60-83%. Η λειτουργία του είναι εύκολη, η συγκέντρωση CH_4 φθάνει έως 65-67%. Περιέχει μηχανικά συστήματα. Βελτιωμένος έλεγχος της θερμοκρασίας, εύκολη η αυτοματοποίηση. Υψηλές απαιτήσεις για ενέργεια.
- Αναερόβιος αντιδραστήρας διαλείποντος έργου (Anaerobic Sequencing Batch Reactor, ASBR)
Σχετικά φθηνός. Έχει μεγάλες υπολογιστικές απαιτήσεις για πολλαπλούς κύκλους. Υπάρχει δυσκολία στον προσδιορισμό της σωστής συγκέντρωσης βιομάζας στον αντιδραστήρα.
- Αναερόβιος Αντιδραστήρας με Διαφράγματα (Anaerobic Baffled Reactor, ABR)
Διαθέτει σειρά κατακόρυφων πτερυγίων που εξαναγκάζουν το ρεύμα εκροής να ρέει επάνω από αυτά από την είσοδο προς την έξοδο. Χρόνος παραμονής 3-5 ημέρες. Απόδοση αφαίρεσης COD = 82-92%. Συγκέντρωση CH_4 = 50-75%. Απλός και φθηνός εξοπλισμός χωρίς κινούμενα μέρη ή διάταξη ανάμειξης. Τα ρεύματα εκροής παρουσιάζουν υψηλό ιξώδες.
- Αντιδραστήρας Αναερόβιας Ιλύος με Σταθερή Μεμβράνη Ανοδικής Ροής (Upflow Anaerobic Sludge-Fixed Film, UASFF)
Αποτελείται, συνήθως από αντλίες, δεξαμενές τροφοδοσίας, διαχωριστές αερίου, κ.τ.λ. Χρόνος παραμονής 4-40 ημέρες. Απόδοση αφαίρεσης COD = 89-97%. Συγκέντρωση CH_4 = 62-82%. Χαρακτηρίζεται από ταχύ βιομετασχηματισμό της

οργανικής ύλης. Πρόκειται για πολύπλοκο σύστημα με υψηλές απαιτήσεις σε ισχύ εισόδου.

- Αντιδραστήρας ρευστοποιημένης κλίνης (Fluidized Bed Reactor, FBR)

Διαθέτει σύστημα συμπαγούς κλίνης, μεγάλη επιφάνεια επαφής, μπορεί να λειτουργεί με ανοδική ή καθοδική ροή. Χρόνος παραμονής 70 ημέρες. Απόδοση αφαίρεσης COD = 80-98%. Χαρακτηρίζεται από υψηλούς ρυθμούς οργανικής φόρτισης, υψηλή ταχύτητα ροής. Μεγάλες απαιτήσεις σε ισχύ εισόδου.

- Αναερόβιος Αντιδραστήρας Ανοδικής Ροής με Κλίνη Ιλύος (Upflow Anaerobic Sludge Blanket, UASB)

Αποτελείται από αντλία, κλίνη ιλύος, διαχωριστή αερίου, σύστημα συλλογής αερίου. Χρόνος παραμονής έως 200 ημέρες. Απόδοση αφαίρεσης COD = 60-97%. Ο εξοπλισμός χαρακτηρίζεται από ευελιξία, μπορεί να χρησιμοποιείται και για υγρά απόβλητα με μεγάλες ποσότητες αιωρούμενων στερεών. Είναι ενεργητικά αποδοτικός και παρέχει λειτουργική σταθερότητα. Δεν χρειάζεται έλεγχο θερμοκρασίας αφού η θερμότητα εκλύεται κατά τη διάρκεια της μεθανογένεσης. Η περίοδος έναρξης είναι μεγάλη (2-4 μήνες). Δεν μπορεί να αφαιρεί παθογόνα και χρωστικούς παράγοντες από τα υγρά απόβλητα. Ο αντιδραστήρας μπορεί, επίσης, να χρησιμοποιείται για συγχώνευση υγρών αποβλήτων από την επεξεργασία σάκχαρης και αστικών στερεών αποβλήτων.

2.3 Επεξεργασία βιοαέριου που παράγεται από γεωργικά απόβλητα

Οι κύριοι ρύποι που εντοπίζονται στο βιοαέριο είναι ενώσεις θείου (υδρόθειο (H_2S), καρβονυλοσουλφίδιο (COS), μερκαπτάνες και δισουλφίδια) σε μεγάλη ποσότητα (η υψηλότερη ποσότητα έχει βρεθεί σε βιοαέριο που παράγεται από κοπριά και γαλακτοκομικά απόβλητα), σιλοξάνια, αλογονάνθρακες και BTEX (βενζόλιο, τολουόλιο, αιθυλοβενζόλιο, ξυλόλιο). Το υδρόθειο είναι ο πιο επικίνδυνος ρύπος αυτών των ενώσεων και παρουσιάζει τις υψηλότερες συγκεντρώσεις (6.570 ppm) σε σύγκριση με άλλες πηγές οργανικών αποβλήτων. Μία μέση τιμή του H_2S είναι τα 204 ppm. Μία μέση τιμή των ενώσεων θείου (εκτός από το H_2S) είναι 24,6 ppm. Τα σιλοξάνια είναι ενώσεις του πυριτίου και τα επίπεδα τους στο βιοαέριο είναι πολύ χαμηλά, σχεδόν αμελητέα. Οι αλογονάνθρακες περιλαμβάνουν χλωροφθοράνθρακες, χλωροαλκάνια, χλωροαρωματικές ενώσεις· τα επίπεδά τους είναι σχετικά χαμηλά με

μία μέση τιμή 0,17 ppm. Οι συγκεντρώσεις των ενώσεων BTEX εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη διεργασία αποσύνθεσης και την πηγή των αποβλήτων. Μία μέση τιμή τους στο βιοαέριο είναι 13,2 ppm (Pera et al., 2024). Εάν το υπόστρωμα περιέχει πρωτεΐνες, τότε παράγεται αμμωνία κατά τη διάρκεια της υδρόλυσης. Το βιοαέριο που παράγεται από αναερόβια χώνευση γεωργικών αποβλήτων περιέχει ένα χαμηλό ποσοστό αζώτου, συνήθως 0,1% (Atelge et al., 2021).

Επίδραση των ρύπων στις τεχνολογίες βιοαερίου

Το υδρόθειο στο βιοαέριο που χρησιμοποιείται στις μηχανές εσωτερικής καύσης (ICE) μπορεί να οδηγήσει σε μία υποβάθμιση των ιδιοτήτων λίπανσης των μηχανών, διάβρωση των μηχανών και των μεταλλικών σωλήνων και σε σχηματισμό οξειδίων του θείου (SO_x) στα καυσαέρια που συμβάλλουν σημαντικά στο φαινόμενο της όξινης βροχής. Τα αέρια σιλοξάνια προκαλούν βλάβη στις μηχανές και εμποδίζουν την πιθανή καταλυτική επεξεργασία των καυσαερίων. Όσον αφορά στους αλογονάνθρακες και τις ενώσεις BTEX, δεν έχει αναφερθεί κάποια σημαντική πληροφορία σχετικά με την αρνητική τους επίδραση στις ICE (Pera et al., 2024).

Όταν το βιοαέριο χρησιμοποιείται σε κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC), οι ρύποι - ενώσεις θείου, σιλοξάνια, αλογονάνθρακες - που υπάρχουν σε αυτό μπορούν να δηλητηριάσουν τις καταλυτικές και ηλεκτροκαταλυτικές επιφάνειες με αποτέλεσμα μία μείωση της συνολικής απόδοσης της κυψέλης. Το H_2S και το οκταμεθυλοκυκλοτετρασιλοξάνιο (D4) αποτελούν από τους πιο επικίνδυνους ρύπους για τις SOFC. Το υδροχλώριο προκαλεί σημαντική διάβρωση στα υλικά της κυψέλης, ιδιαίτερος στην άνοδο και τη διεπαφή ηλεκτρολύτη. Οι συγκεντρώσεις των ενώσεων BTEX δεν είναι επικίνδυνες για τις SOFC (Pera et al., 2024).

Τεχνολογίες καθαρισμού προηγούνται της αναβάθμισης του βιοαερίου προκειμένου αυτό να απαλλαγεί από βλαβερές ουσίες – υδρόθειο (H_2S), αμμωνία (NH_3), πτητικές οργανικές ενώσεις (VOC) και σιλοξάνια – οι οποίες μπορούν να καταστρέψουν το σύστημα αναβάθμισης (Galloni and Di Marcoberardino, 2024).

Ορια ανοχής για διάφορες χρήσεις βιοαερίου

Ο Πίνακας 5 παρουσιάζει τα μέγιστα επιτρεπόμενα επίπεδα των ρύπων για χρήση βιοαερίου σε ICE, SOFC και για βιομεθάνιο.

Πίνακας 5 - Επίπεδα ανοχής των ρύπων για χρήση βιοαερίου σε ICE, SOFC και για βιομεθάνιο (Τροποποίηση από Pera et al., 2024)

Ρύποι	Όρια ανοχής		
	ICE	SOFC	Βιομεθάνιο
H ₂ S	50- 500 ppm	1-2 ppm	5 mg/Sm ³ (3,59 ppm)
Ενώσεις S	70 mg/kWh*/20 mg/kWh**	0,5 ppm	
Σιλοξάνια	5-30 mg/m ³	Ίχνη (ppb)	
Αλογόνα	10 mg/kWh*/2 mg/kWh**	4 ppm	
COS		550 ppb	5 mg/Sm ³ (3,59 ppm)
Μερκαπτάνες		200 ppb	6 mg/Sm ³ (3,05 ppm)
D4		Μονάδες ppb	
D5		0,5 ppm	
HCl, Cl ₂ , CH ₃ Cl		8 ppm	
NH ₃		1 ppm	

* Χωρίς καταλύτη / ** Με καταλύτη

Τεχνολογίες αφαίρεσης H₂S από βιοαέριο

Η επιλογή της βέλτιστης μεθόδου επεξεργασίας εξαρτάται από την αρχική σύνθεση του βιοαερίου και των ρύπων, τον απαιτούμενο βαθμό εξάλειψης του ρύπου, την πίεση, τη θερμοκρασία, την επιθυμία ανάκτησης του θείου, τη χρήση του βιοαερίου, τις προδιαγραφές που πρέπει να έχει το επεξεργασμένο αέριο και οικονομικούς παράγοντες. Τα συστήματα SOFC και τα συστήματα αναβάθμισης είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα σε σύγκριση με τις ICE και απαιτούν μία απαιτητική λύση καθαρισμού. Οι τεχνολογίες διακρίνονται σε ex situ / in situ και φυσικοχημικές / βιολογικές. Η βιολογική αφαίρεση θεωρείται μία ενεργειακά αποδοτική και οικονομικά ανταγωνιστική επιλογή σε σύγκριση με τις φυσικοχημικές μεθόδους (Ghimire et al., 2021; Atelge et al., 2021; Torres et al., 2020; Pera et al., 2024). Τεχνολογίες αφαίρεσης H₂S πριν από αναβάθμιση βιοαερίου περιλαμβάνουν (α) βιολογικές πλυντρίδες που αποτελούνται από έναν πύργο απορρόφησης που απορροφά το H₂S σε νερό και μία μονάδα βιοαντιδραστήρα μέσα στον οποίο οι μικροοργανισμοί μετασχηματίζουν το H₂S σε τελικά προϊόντα ή (β) βιολογικά φίλτρα που χρησιμοποιούν μία στερεά κλίνη για να υποστηρίξουν τη μικροβιακή ανάπτυξη (Galloni and Di Marcoberardino, 2024). Αναλυτικά οι τεχνολογίες καθαρισμού είναι (Ghimire et al., 2021):

(Α) *Ex situ*

- Χρήση μικροοργανισμών οξείδωσης σουλφιδίων

Χρησιμοποιούνται βιοφίλτρα (biofilters), βιολογικές πλυντρίδες (bioscrubbers) και βιοφίλτρα ενστάλαξης (biotrickling filters) υπό ανοξικές συνθήκες με χρησιμοποίηση μικροοργανισμών οξείδωσης θείου - μείωσης νιτρικών ιόντων, όπως *Thiobacillus denitrificans* ή υπό αερόβιες συνθήκες με χρησιμοποίηση χημειότροφων οργανισμών. Η διεργασία έχει χαμηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης, μειώνει το H_2S σε λιγότερο από 50 ppm, επιτυγχάνει καθαρότητα CH_4 μεγαλύτερη από 97%.

- Καθαρισμός με μικροάλγη

Αξιοποιείται η φωτοσυνθετική τους ικανότητα και η συμβίωσή τους με βακτήρια οξείδωσης θείου για αφαίρεση και CO_2 και H_2S .

- Προσρόφηση με εναλλαγή πίεσης (PSA)

Ως προσροφητικό υλικό χρησιμοποιείται ενεργός άνθρακας, ζεόλιθος ή άλλα υλικά με μεγάλη επιφάνεια και μπορεί, όταν το συμπιεσμένο βιοαέριο (περίπου 4-10 bar) παρέχεται στη στήλη προσρόφησης, να συγκρατεί αέρια, όπως CO_2 , N_2 , O_2 , H_2O , H_2S ενώ το CH_4 μπορεί να το διαπεράσει. Πρόκειται για αποδοτική τεχνολογία (96-98% CH_4), ευέλικτη για μικρές εφαρμογές.

- Προσρόφηση σε ενεργό άνθρακα

Ο ενεργός άνθρακας χρησιμοποιείται συχνά ως προσροφητικό μέσο, κατασκευάζεται από υλικά, όπως κέλυφος καρύδας, τύρφη, πυρήνες ελιάς, και αποτελείται, κυρίως, από άτομα άνθρακα ενώ έχει μία σύνθετη δομή με ένα δίκτυο πόρων. Η ικανότητα του να αφαιρεί το H_2S εξαρτάται από την παρουσία πόρων ορισμένων μεγεθών, μία συμβατότητα με το νερό και το χημικό περιβάλλον στους μικροπόρους. Η διεργασία χαρακτηρίζεται από υψηλή απόδοση ($H_2S < 3 \text{ cm}^3/\text{m}^3$), υψηλό βαθμό καθαρισμού, χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας.

- Προσρόφηση με οξείδια / υδροξείδια σιδήρου

Το H_2S αντιδρά με οξείδια / υδροξείδια σιδήρου για τον σχηματισμό θειούχου σιδήρου. Η αντίδραση είναι ελαφρώς ενδοθερμική και είναι βέλτιστη στους $25^\circ\text{C} - 50^\circ\text{C}$. Τα οξείδια σιδήρου μπορούν να χρησιμοποιούνται με τη μορφή πέλετ ή ξυλοτεμαχιδίων (σπόγγο). Η τεχνολογία είναι απλή, έχει χαμηλό κόστος επένδυσης, υψηλή απόδοση αφαίρεσης (>99% CH_4) και αφαιρεί ταυτόχρονα και μερκαπτάνες. Η μέθοδος είναι δημοφιλής λόγω της δυνατότητας αναγέννησης των οξειδίων σιδήρου μέσω του

σχηματισμού του στοιχειακού θείου από την οξείδωση του θειούχου σιδήρου με αέρα. Οξειδία άλλων υλικών, όπως μαγγάνιο, κοβάλτιο, νικέλιο, μόλυβδος, χαλκός και ψευδάργυρος παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά.

- Πλύση με νερό

Συμβαίνει ταυτόχρονος διαχωρισμός των CO_2 και H_2S από το βιοαέριο λόγω της υψηλότερης διαλυτότητάς τους στο νερό από το CH_4 . Στην κανονική λειτουργία, το βιοαέριο υποβάλλεται σε πίεση 6-10 bar και θερμοκρασία 40 °C και εγχύεται στη στήλη προσρόφησης από το κάτω μέρος ενώ γίνεται ψεκασμός με νερό από το επάνω μέρος. Πρόκειται για απλή τεχνολογία και οικονομική αν υπάρχει διαθέσιμο νερό. Αντί για νερό μπορούν να χρησιμοποιούνται οργανικοί διαλύτες που είναι μείγματα μεθανόλης και διμεθυλαιθέρα πολυαιθανογλυκόλης με υψηλή απόδοση (>99% CH_4).

- Διαχωρισμός με μεμβράνες

Η διεργασία αυτή χρησιμοποιείται, κυρίως, για την αναβάθμιση του βιοαερίου (ανάκτηση του 96-98% CH_4) και όχι για την εκλεκτική αφαίρεση του υδρόθειου. Υπάρχουν δύο τύποι μεμβρανών: στερεές μεμβράνες που έχουν μικρούς πόρους και λειτουργούν ως φίλτρα και ακινητοποιημένες μεμβράνες που δεν έχουν πόρους και λειτουργούν με βάση την αρχή της διάχυσης. Ο διαχωρισμός μπορεί να πραγματοποιείται όταν υπάρχουν αέρια και στις δύο πλευρές της μεμβράνης ή όταν υπάρχει υγρό στη μία πλευρά που απορροφά τα μόρια CO_2 και H_2S και αέριο στην άλλη πλευρά της μεμβράνης.

(B) In situ

- Μικροαερισμός

Η μετατροπή του H_2S σε S πραγματοποιείται με μικροοργανισμούς της οικογένειας *Thiobacillus*, οι οποίοι χρησιμοποιούν CO_2 από τον χωνευτήρα ως πηγή άνθρακα. Μικρή ποσότητα οξυγόνου, 2% - 6% αέρα (ανάλογα με την ποσότητα του H_2S) προστίθεται στο βιοαέριο απευθείας στον αναερόβιο χωνευτήρα. Δεν χρειάζονται ξεχωριστοί αντιδραστήρες για την αφαίρεση του υδρόθειου.

- Προσθήκη αλάτων/οξειδίων σιδήρου

Διάφορες μορφές χλωριούχου σιδήρου, οξειδίων του σιδήρου, άλατα σιδήρου (III), όπως υδροξείδια τρισθενούς σιδήρου [$\text{Fe}(\text{OH})_3$] και τριχλωριούχος σίδηρος (FeCl_3) προστίθενται απευθείας μέσα στον χωνευτήρα ή στην εισροή, αντιδρούν με το παραγόμενο υδρόθειο και σχηματίζουν αδιάλυτα άλατα θειούχου σιδήρου. Αυτή η

μέθοδος μπορεί να μειώνει τις συγκεντρώσεις H_2S σε 200-100 ppmv.

Τεχνολογίες αφαίρεσης σιλοξανίων από το βιοαέριο

Η εξάλειψη του μεγαλύτερου μέρους των ρύπων αυτών μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας οργανικούς διαλύτες με μακρά αλυσίδα ατόμων άνθρακα αλλά η πλήρης αφαίρεσή τους επιτυγχάνεται με χημική απορρόφηση. Συνδυασμός 480 L/m^3 θεικού οξέος και 650 L/m^3 νιτρικού οξέος επιτυγχάνει αφαίρεση του 95% της συγκέντρωσής τους στους 60°C . Ο διαλύτης Selexol μπορεί να αφαιρέσει τουλάχιστον το 98% των σιλοξανίων. Η προσρόφηση των ρύπων αυτών σε ενεργό άνθρακα έχει απόδοση που εξαρτάται από την ικανότητα προσρόφησης, τις φυσικοχημικές ιδιότητες και του όγκους μικροπόρων του ενεργού άνθρακα. Η γέλη πυριτίας έχει υψηλότερη ικανότητα αφαίρεσης από τον ενεργό άνθρακα, αλλά μπορεί να είναι αποτελεσματική σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Ο κρυογονικός διαχωρισμός μπορεί να αφαιρεί το 12%, 25,9%, 90% και 99,3% των συγκεντρώσεων σε θερμοκρασίες 5°C , -25°C , -30°C , και -70°C , αντίστοιχα, αλλά πρόκειται για μέθοδο με επενδυτικά και λειτουργικά κόστη υψηλότερα από άλλες μεθόδους προσρόφησης. Για τον διαχωρισμό με μεμβράνες χρησιμοποιούνται μεμβράνες με υψηλή περιεκτικότητα μεθανίου/σιλοξανίων (Atelge et al., 2021). Οι κύριες φυσικοχημικές μέθοδοι καθαρισμού από σιλοξάνια και VOC που προηγούνται της αναβάθμισης του βιοαερίου, περιλαμβάνουν προσρόφηση σε ενεργό άνθρακα, απορρόφηση με φωσφορικό οξύ και έκπλυση με νερό (Galloni and Di Marcoberardino, 2024).

Τεχνολογίες αφαίρεσης αμμωνίας από το βιοαέριο

Η αφαίρεση της NH_3 επιτυγχάνεται κατά τη διάρκεια της ανάκτησης ή πρωταρχικής ξήρανσης του βιοαερίου και κατά τη διάρκεια της προσρόφησης. Για ταυτόχρονη αφαίρεση αμμωνίας και υδροθείου μπορεί να χρησιμοποιηθεί οριζόντιο βιοφίλτρο ενστάλαξης με εξαντλημένο ενεργό άνθρακα που εμβολιάζεται με βακτήρια νιτροποίησης που οξειδώνουν το θείο. Με τη μέθοδο πλύσης με νερό μπορούν να αφαιρεθούν από το βιοαέριο αμμωνία, ενώσεις του θείου και αλογονωμένες ενώσεις. Με ένα σύστημα PSA μπορούν να αφαιρεθούν αμμωνία και υδρατμοί (Atelge et al., 2021).

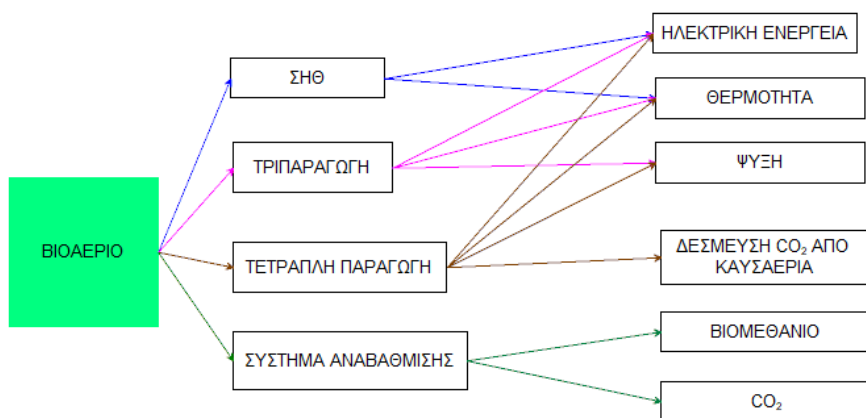
Τεχνολογίες αφαίρεσης νερού

Το ανεπεξέργαστο βιοαέριο περιέχει 5% νερό στους 35 °C με τη μορφή κορεσμένων υδρατμών, οι οποίοι μπορούν να συμπυκνώνονται στους σωλήνες του αερίου ή να προκαλούν διάβρωση με ενώσεις θείου. Με την αύξηση της πίεσης ή τη μείωση της θερμοκρασίας οι υδρατμοί συμπυκνώνονται ως μία φυσική μέθοδος διαχωρισμού. Απορρόφηση και προσρόφηση χρησιμοποιούνται ως μία χημική μέθοδος ξήρανσης για την αφαίρεση του νερού. Οι μέθοδοι προσρόφησης περιλαμβάνουν τη χρήση μοριακών κόσκινων, πυριτίας, ενεργού ξυλάνθρακα. Οι φυσικές μέθοδοι διαχωρισμού περιλαμβάνουν (α) διαχωριστές-κυκλώνες που χρησιμοποιούν φυγόκεντρο δύναμη για τον διαχωρισμό σταγονιδίων νερού, (β) παγίδες υγρασίας που χρησιμοποιούν διαφορά πίεσης για τη δημιουργία χαμηλής θερμοκρασίας και συμπυκνωμάτων νερού, και (γ) παγίδες νερού που χρησιμοποιούν ένα δίκτυο σωλήνων για τη συλλογή νερού (Atelge et al., 2021).

2.4 Εφαρμογές του βιοαερίου

2.4.1 Συστήματα συνδυασμένης παραγωγής ενέργειας

Το βιοαέριο μπορεί να χρησιμοποιείται ως καύσιμο σε λέβητες για την παραγωγή θερμότητας ή/και ατμού, ως μία βιομηχανική πηγή ενέργειας για θερμότητα, ατμό ή/και ηλεκτρική ενέργεια και ψύξη σε έναν μικροστρόβιλο, για την παραγωγή βιομεθανίου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντί για φυσικό αέριο, ή για την παραγωγή αερίου σύνθεσης μέσω της αναμόρφωσης που θα χρησιμοποιηθεί σε κυψέλες καυσίμου (Kararaju and Rintala, 2013). Για τη μεγιστοποίηση της ανάκτησης ενέργειας, το βιοαέριο που παράγεται σε μικρές μονάδες, μπορεί να χρησιμοποιείται σε συστήματα ΣΗΘ ώστε να ενισχύεται η απόδοση παράγοντας ταυτόχρονα ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητα (Ćurčić et al., 2025). Η συνδυασμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θερμότητας, ψύξης, και ανάκτησης του CO₂ από τα καυσαέρια της μηχανής ώστε το CO₂ να αποκτά υψηλό βαθμό καθαρότητας, υλοποιείται όταν υπάρχει ζήτηση για CO₂ σε τοπικό επίπεδο (θερμοκήπια για τη φωτοσύνθεση, επεξεργασία τροφών, παραγωγή ποτών). Τα πλεονεκτήματα αυτής της τετραπλής παραγωγής είναι ότι επιτυγχάνεται υψηλό επίπεδο συνολικής αξιοποίησης της ενέργειας, μειώνεται το κόστος και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα (Clarke Energy, 2026). Το Σχήμα 1 παρουσιάζει πιθανές συνδυαστικές λύσεις παραγωγής ενέργειας από βιοαέριο.



Σχήμα 1 - Πιθανές συνδυαστικές λύσεις παραγωγής ενέργειας από βιοαέριο

2.4.2 Αναβάθμιση βιοαερίου

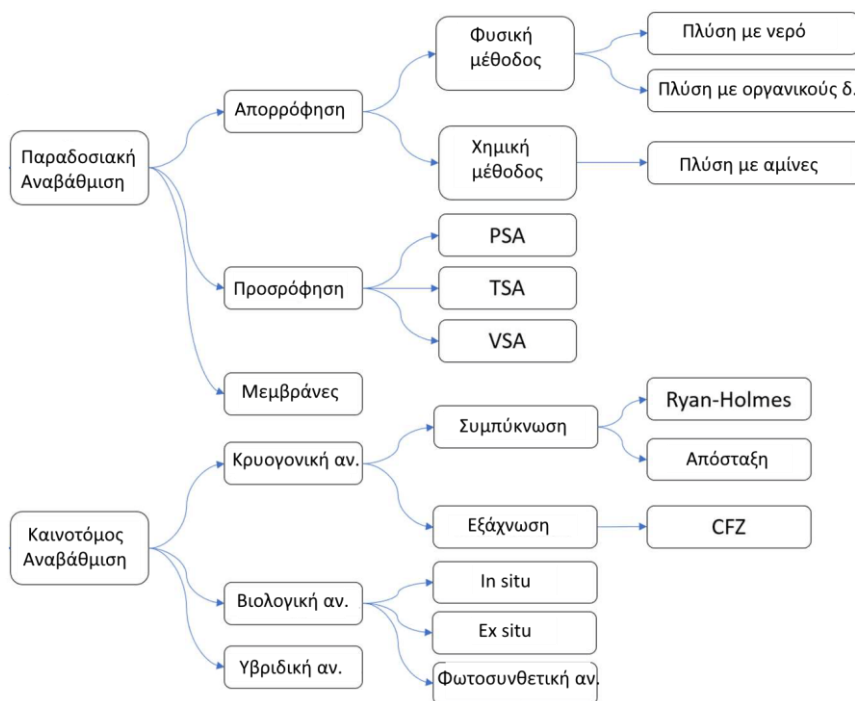
Η εξάντληση των ορυκτών πόρων και οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα αποτελούν βασικά προβλήματα της σύγχρονης εποχής. Το βιοαέριο αποτελούμενο, κυρίως, από μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα μπορεί με κατάλληλη επεξεργασία αφαίρεσης σημαντικών ποσοτήτων του CO₂ να αναβαθμιστεί σε βιομεθάνιο χρησιμοποιώντας ως ένα φιλικό προς το περιβάλλον υποκατάστατο του φυσικού αερίου. Με την αναβάθμιση του ανεπεξέργαστου βιοαερίου προκύπτει βιομεθάνιο με περιεκτικότητα μεγαλύτερη από 95%, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα εναλλακτικό καύσιμο για οχήματα ή να εγχυθεί σε δίκτυα φυσικού αερίου (Aguilloso et al., 2024; Eze and Agbo, 2010). Το βιομεθάνιο μπορεί να συμπιέζεται (συμπιεσμένο βιομεθάνιο, CBM ή bio-CNG) ή να υγροποιείται (υγροποιημένο βιομεθάνιο, LBM ή bio-LNG) και να χρησιμοποιείται στις μεταφορές. Το bio-LNG χρησιμοποιείται σε οχήματα βαρέως τύπου (φορτηγά) ή στη ναυτιλία, ειδικά για μεγάλες διαδρομές λόγω της υψηλότερης ενεργειακής πυκνότητάς του, η οποία είναι παρόμοια με το συμβατικό υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG) και 2,4 φορές υψηλότερη από το bio-CNG (Prussi et al., 2021; Naquash et al., 2024).

Με την αναβάθμιση παράγεται, επίσης, ένα ρεύμα CO₂ υψηλής καθαρότητας, το οποίο, αντί να αντιμετωπιστεί ως ένα απόβλητο, μπορεί να αξιοποιηθεί στα πλαίσια της κυκλικής οικονομίας μέσω των διαδρομών δέσμευσης, χρησιμοποίησης και αποθήκευσης (CCU/CCS) παρέχοντας σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη (μείωση εκπομπών θερμοκηπίου, αρνητικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα). Η βιομηχανία

του βιοαερίου αρχίζει να χειρίζεται το CO_2 ως πολύτιμο πόρο για τη σύνθεση του βιομεθανίου, χημικών, καυσίμων. Η διεργασία ορυκτής ενανθράκωσης του CO_2 οδηγεί στον σχηματισμό στερεών ανθρακικών αλάτων μιμούμενη τη φυσική αποσάθρωση των πετρωμάτων που, ιστορικά, συμβάλλει στη μείωση των εκπομπών ατμοσφαιρικού CO_2 . Η επιταχυνόμενη ενανθράκωση είναι εξώθερμη διεργασία που αυξάνει τον ρυθμό μετατροπής του CO_2 σε ορυκτές μορφές καθιστώντας δυνατή την αποθήκευση ή αξιοποίησή τους ως κατασκευαστικά υλικά (Sahota et al., 2026).

Οι τεχνολογίες αναβάθμισης του βιοαερίου παρουσιάζονται στο Σχήμα 2. Η πλύση με νερό είναι μία απλή, ευρέως χρησιμοποιούμενη διεργασία φυσικής απορρόφησης που δεν παράγει τοξικά υποπροϊόντα και αξιοποιεί τα διαφορετικά επίπεδα διαλυτότητας των CO_2 και CH_4 (το CO_2 έχει μεγαλύτερη διαλυτότητα από το CH_4). Η διαλυτότητα εξαρτάται από τη θερμοκρασία και είναι αντιστρόφως ανάλογη της. Στην πλύση με οργανικό διαλύτη, η μείωση της απαιτούμενης ποσότητας διαλύτη είναι σημαντική λόγω της υψηλότερης διαλυτότητας του CO_2 στον οργανικό διαλύτη από ότι στο νερό. Η πλύση με αμίνες είναι η κύρια μέθοδος αναβάθμισης μέσω απορρόφησης και περιλαμβάνει ένα αντιδραστήριο που σχηματίζει χημικούς δεσμούς με μόρια του CO_2 . Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες αμίνες είναι μονοαιθανολαμίνη (MEA), N-μεθυλοδιαιθανολαμίνη (MDEA), διαιθανολαμίνη (DEA), διγλυκολαμίνη (DGA), με την DGA να είναι η πιο οικονομικά και ενεργειακά αποδοτική. Οι διεργασίες προσρόφησης βασίζονται στο μέγεθος των μορίων του βιοαερίου, το διαφορετικό πορώδες των υλικών προσρόφησης, και τις μοναδικές ενδομοριακές δυνάμεις μεταξύ των χημικών στοιχείων στο βιοαέριο και το πορώδες υλικό, και η διαφορά μεταξύ τους έγκειται στη διαφορετική τεχνική αναπαραγωγής του υλικού προσρόφησης. Στην Προσρόφηση με εναλλαγή πίεσης (PSA) η αναγέννηση πραγματοποιείται μέσω μείωσης της πίεσης επάνω από την ατμοσφαιρική πίεση, στην Προσρόφηση με εναλλαγή θερμοκρασίας (TSA) μέσω θέρμανσης, και στην Προσρόφηση με εναλλαγή κενού (VSA) μέσω μείωσης της πίεσης κάτω από την ατμοσφαιρική πίεση. Η διεργασία με μεμβράνες βασίζεται στις διαφορετικές ικανότητες διάχυσης των μορίων μέσω ενός πορώδους μέσου· το ρεύμα πλούσιο σε CH_4 συγκρατείται από τη μεμβράνη, ενώ το ρεύμα που περιέχει CO_2 , O_2 και υγρασία διαπερνά τη μεμβράνη. Ο ρυθμός διαπερατότητας καθορίζεται, κυρίως, από το μέγεθος των μορίων, την υδροφιλικότητα των μορίων και τη διαφορά πίεσης μεταξύ των δύο

πλευρών της μεμβράνης. Οι πιο κατάλληλες εμπορικές μεμβράνες είναι από πολυιμίδια και οξική κυτταρίνη. Η κρυογονική απόσταξη και η μέθοδος Rayan-Holmes περιλαμβάνουν συμπίεση του βιοαερίου και μείωση της θερμοκρασίας αξιοποιώντας τα διαφορετικά σημεία βρασμού των CH_4 και CO_2 , ενώ η διεργασία Ελεγχόμενης Ζώνης Κατάψυξης (CFZ) χρησιμοποιεί τη στερεοποίηση του CO_2 σε ατμοσφαιρική πίεση. Οι κρυογονικές μέθοδοι είναι δαπανηρές και τεχνολογικά πολύπλοκες. Οι βιολογικές μέθοδοι συνίστανται στη μεθανοποίηση in situ (έγχυση H_2 απευθείας στον χωνευτήρα ώστε να χρησιμοποιηθούν τα υδρογονοτροφικά μεθανογόνα βακτήρια), ex situ (έγχυση του H_2 που παράγεται εξωτερικά, και του βιοαερίου μέσα σε έναν αντιδραστήρα με υδρογονοτροφικά βακτήρια) και φωτοσυνθετική διεργασία (έκθεση βιοαερίου σε μικροάλγη). Οι υβριδικές τεχνολογίες περιλαμβάνουν τον συνδυασμό δύο ή περισσότερων μεθόδων, για παράδειγμα, τον συνδυασμό κρυογονικών μεθόδων και μεθόδων με χρήση μεμβρανών (Galloni and Di Marcoberardino, 2024).



Σχήμα 2 - Τεχνολογίες αναβάθμισης (Τροποποίηση από Galloni and Di Marcoberardino, 2024)

Οι κύριες τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί για τον διαχωρισμό των CH_4 , CO_2 περιλαμβάνουν την απορρόφηση, την προσρόφηση, τον κρυογονικό διαχωρισμό

(θερμοκρασίες κάτω από -100°C) και τον διαχωρισμό με μεμβράνες. Στον Πίνακα 6 παρουσιάζονται τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μεθόδων αυτών, καθώς επίσης, και η περιγραφή τους (Aguilloso et al., 2024).

Πίνακας 6 - Χαρακτηριστικά κύριων τεχνολογιών αναβάθμισης (Τροποποίηση από Aguilloso et al., 2024)

Τεχνολογία	Περιγραφή	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Προσρόφηση με εναλλαγή πίεσης (PSA)	Εκλεκτική προσρόφηση σε υψηλές πιέσεις και εκρόφηση σε χαμηλές πιέσεις	Λιγότερο ενεργοβόρος διεργασία (λειτουργία υπό σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες)	Μείωση απόδοσης και καθαρότητας αερίου (σύνθετα μείγματα πολλών αερίων με όμοιες ιδιότητες προσρόφησης)
Πλύση (φυσική/χημική)	Απορρόφηση ή χημική αντίδραση αέριων ρύπων με υγρό πλύσης (νερό ή διάλυμα με χημ. αντιδραστήρια)	Βελτιστοποίηση απόδοσης με έλεγχο χρόνου επαφής αερίου-υγρού, λόγου υ./α., σύνθεσης διαλύματος πλύσης	Παραγωγή μεγάλων όγκων υγρών αποβλήτων από την επεξεργασία του υγρού πλύσης που μολύνεται με ρύπους (κόστος διαχείρισής τους)
Διαχωρισμός με μεμβράνες	Εκλεκτική διαπερατότητα μεμβρανών που επιτρέπουν σε ορισμένα αέρια να τις διαπερνούν ενώ συγκρατούν άλλα	Χαμηλότερα κόστη συντήρησης (δεν χρειάζονται χημικά αντιδραστήρια ή διαλύτες)	Μειωμένη απόδοση διαχωρισμού και περιοδική αντικατάσταση μεμβρανών λόγω αποδόμησής τους κατά την έκθεσή τους στις ρυπαντικές ουσίες
Κρυογονικός διαχωρισμός	Ψύξη βιοαερίου σε κρυογονικές θερμ. → συμπύκνωση/πήξη CO_2	Παραγωγή μεθανίου υψηλής καθαρότητας (>99%, βιομεθάνιο υψηλής ποιότητας)	Υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις για τη ψύξη/αύξηση λειτουργικού κόστους

2.4.3 Αναμόρφωση βιοαερίου

Το βιοαέριο είναι κατάλληλο για απευθείας μετατροπή σε αέριο σύνθεσης, δηλαδή, ένα μείγμα H_2 και CO μέσω αναμόρφωσης. Οι εφαρμογές του αερίου σύνθεσης περιλαμβάνουν την παραγωγή χημικών, μεθανόλης, αμμωνίας, κετονών, αλκοολών, υγρών υδρογονανθράκων, διμεθυλαιθέρα, την παραγωγή ενέργειας (Khosravanian et al., 2023). Οι κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC) μπορούν να χρησιμοποιούν υδρογόνο που παράγεται από την αναμόρφωση του βιοαερίου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας (Tamburrano et al., 2024).

Η αναμόρφωση βιοαερίου επηρεάζεται από αρκετούς παράγοντες, όπως η

θερμοκρασία, η πίεση, η σύνθεση του αερίου, η δραστηριότητα του καταλύτη (Zhao et al., 2020).

Παρακάτω παρατίθενται τεχνολογίες αναμόρφωσης / μετατροπής του βιοαερίου σε αέριο σύνθεσης (Zhao et al., 2020):

- *Ξηρά αναμόρφωση (dry reforming) ή αναμόρφωση με διοξείδιο του άνθρακα*
Πρόκειται για μία ενδόθερμη διεργασία κατά την οποία το διοξείδιο του άνθρακα αντιδρά με το μεθάνιο σε θερμοκρασίες 700-900 °C και πίεση 1 bar. Οι καταλύτες που χρησιμοποιούνται έχουν βάση κυρίως το νικέλιο, το οποίο είναι αρκετά δημοφιλές σε αυτή τη διεργασία και το ιρίδιο. Τα Al_2O_3 (αλουμίνη) και SiO_2 (διοξείδιο του πυριτίου) αποτελούν φορείς καταλύτη στη ξηρά αναμόρφωση. Οι μετατροπές CH_4 και CO_2 είναι γενικά μεγαλύτερες από 42% και 57%, αντίστοιχα. Ο παραγόμενος λόγος $\text{H}_2:\text{CO}$ είναι 0,7:1,0.
- *Διπλή αναμόρφωση (bi-reforming) ή αναμόρφωση με ατμό (steam reforming)*
Η διεργασία αυτή περιλαμβάνει τον συνδυασμό αναμόρφωσης με CO_2 και ατμό, και λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασίες 800-850 °C και πίεση 1-7 bar. Χρησιμοποιούνται, κυρίως, καταλύτες με βάση το νικέλιο με διαφορετικούς φορείς, όπως Al_2O_3 , SiC , ZrO_2 . Οι μετατροπές CH_4 και CO_2 είναι γενικά υψηλότερες από 61% και 33%, αντίστοιχα. Ο παραγόμενος λόγος $\text{H}_2:\text{CO}$ είναι 1,1:2,7.
- *Τριπλή αναμόρφωση (tri-reforming)*
Η τριπλή αναμόρφωση λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασίες 700-950 °C και πίεση 1 bar σε αντιδραστήρα σταθερής κλίνης. Χρησιμοποιούνται, κυρίως, καταλύτες με βάση το νικέλιο με διαφορετικούς φορείς, όπως Al_2O_3 , SiO_2 , ZrO_2 , και CeO_2 . Η μετατροπή CH_4 είναι υψηλότερη από 72% και η μετατροπή CO_2 είναι 22-100%, αντίστοιχα. Ο παραγόμενος λόγος $\text{H}_2:\text{CO}$ είναι 1,0:2,3. Η διεργασία αυτή είναι ένας συνδυασμός τριών διεργασιών αναμόρφωσης μεθανίου (αναμόρφωσης με διοξείδιο του άνθρακα, αναμόρφωσης με ατμό, και αναμόρφωσης με μερική οξείδωση). Η τριπλή αναμόρφωση έχει το περιβαλλοντικό πλεονέκτημα της αναμόρφωσης του διοξειδίου του άνθρακα, το υψηλό οικονομικό πλεονέκτημα της αναμόρφωσης ατμού, δεν χρειάζεται η αφαίρεση O_2 , παρουσιάζει υψηλή ενεργειακή απόδοση της εξώθερμης αντίδρασης μερικής οξείδωσης και σχετικά χαμηλότερη ενεργειακή κατανάλωση σε σύγκριση με τις προηγούμενες δύο διεργασίες αναμόρφωσης. Στην Εικόνα 1 παρουσιάζονται καταλύτες που χρησιμοποιούνται στην αναμόρφωση

βιοαερίου.



Εικόνα 1 - Καταλύτες διάφορων σχημάτων που χρησιμοποιούνται στην αναμόρφωση βιοαερίου (Zhao et al., 2020)

2.5 Πλεονεκτήματα / Μειονεκτήματα της τεχνολογίας βιοαερίου

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της τεχνολογίας βιοαερίου που παράγεται από γεωργικά απόβλητα παρουσιάζονται κάτωθι (Chithra et al., 2025; Baldé et al., 2022; Feiz et al., 2021; Muradin, 2022; Tamburini et al., 2023).

Πλεονεκτήματα

- Ανακύκλωση πρώτων υλών & θρεπτικών (δυνατότητα ανάκτησης αζώτου 97% και φωσφόρου 100%). Παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας.
- Μείωση εκπομπών CO₂ και CH₄, μείωση όγκου αποβλήτων, δυνατότητα αντικατάστασης των ορυκτών καυσίμων.
- Δυνατότητα αντικατάστασης των δαπανηρών συνθετικών λιπασμάτων από φθινό χώνεμα. Αύξηση ανάπτυξης φυτών κατά 10-30%.
- Ταχύτερη απορρόφηση θρεπτικών του χωνέματος από τα φυτά σε σύγκριση με την ανεπεξέργαστη κοπριά.
- Οικονομικά αποδοτική λύση (αξιοποίηση/πώληση των προϊόντων της Α.Χ.).
- Οικονομική ανάπτυξη, δημιουργία νέων θέσεων εργασίας στην τοπική κοινωνία.
- Παροχή ηλεκτρικής ενέργειας κατόπιν ζήτησης (δυνατότητα αποθήκευσης αερίου).
- Παραγωγή κατανεμημένης ενέργειας κοντά σε σημεία κατανάλωσης ⇒ μείωση κόστους μετάδοσης και μεταφοράς, υψηλότερη αξιοπιστία των δικτύων.
- Παραγωγή υδρογόνου και βιομεθανίου (υποκατάστατου του φυσικού αερίου).
- Συνολικά μειωμένα κόστη μεταφοράς γεωργικών αποβλήτων, υποπροϊόντων,

βιολογικών λιπασμάτων (μείωση 40%).

Μειονεκτήματα

- Υδραυλική υπερφόρτιση (μειωμένος υδραυλικός χρόνος παραμονής) $\Rightarrow$ μείωση CH_4 , μείωση της απόδοσης αφαίρεσης COD, αύξηση στερεών στο ρεύμα εκροής, αύξηση λόγου πτητικών λιπαρών οξέων προς αλκαλικότητα (VFA/ALK).
- Οργανική υπερφόρτιση (ανισορροπία μεταξύ οργανικής ύλης και μικροοργανισμών) $\Rightarrow$ μείωση CH_4 , μείωση της αφαίρεσης COD, αύξηση VFA/ALK, μείωση του pH.
- Οργανική υποφόρτιση (χαμηλός ρυθμός ανάπτυξης μικροοργανισμών) $\Rightarrow$ παραγωγή πολύ μικρής ποσότητας βιοαερίου.
- Τοξικές ουσίες στα υποστρώματα $\Rightarrow$ μείωση απόδοσης βιοαερίου, ταχεία μείωση της απόδοσης αφαίρεσης COD, αύξηση VFA/ALK.
- Σημαντικές εκπομπές μεθανίου στις μονάδες βιοαερίου (διαρροές από μονάδες βιοαερίου, αποθήκες χωνεμάτων, πυρσό καύσης).
- Περιβαλλοντική επιβάρυνση των μεταφορών στις αγροτο-βιομηχανικές μονάδες βιοαερίου (έως και το 99,9% της αθροιστικής περιβαλλοντικής επιβάρυνσης): οι υγρές πρώτες ύλες πρέπει να μεταφέρονται με σωλήνες, και οι μονάδες που λειτουργούν με τέτοια υποστρώματα πρέπει να βρίσκονται κοντά στις πηγές τους.
- Πιθανή έκλυση βλαβερών ουσιών (VOC, PM, βακτήρια, μύκητες), αρνητικές επιπτώσεις της κυκλοφορίας των οχημάτων της μονάδας στις εκπομπές CO, NO_x.

3. Μονάδες παραγωγής βιοαερίου προς συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας

3.1 Συστήματα ΣΗΘ

Στις μονάδες ΣΗΘ η ηλεκτρική ενέργεια και η θερμότητα παράγονται μέσω της καύσης του βιοαερίου μετά από την επεξεργασία του. Εκτός από το κινητήριο σύστημα (prime mover) μέσα στο οποίο συντελείται η καύση, υπάρχει μονάδα ανάκτησης θερμότητας για τη δέσμευση της θερμότητας που εκλύεται από τα καυσαέρια της καύσης και τη μηχανή. Η θερμότητα μπορεί να μετατραπεί σε ωφέλιμη θερμική ενέργεια με τη μορφή ατμού ή νερού και να μεταφερθεί με δίκτυο σωληνώσεων για να καλύψει, συνήθως, τις εσωτερικές ανάγκες της μονάδας. Για τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας που

παράγεται στο prime mover σε ηλεκτρική υπάρχει σύγχρονη γεννήτρια, συνήθως, συνδεδεμένη με το κεντρικό δίκτυο στο οποίο διοχετεύει την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια. Στη μονάδα ΣΗΘ υπάρχει σύστημα ελέγχου και τηλεπαρακολούθησης (Kaparaju and Rintala, 2013). Κάτωθι αναφέρονται τα σημαντικότερα prime mover για την καύση του βιοαερίου (Khan et al., 2024; Kaparaju and Rintala, 2013).

- Παλινδρομικές μηχανές

Για την παραγωγή ενέργειας, συνήθως, χρησιμοποιούνται οι παλινδρομικές μηχανές εσωτερικής καύσης με ισχύ που κυμαίνεται από αρκετά kW έως MW. Η ηλεκτρική απόδοση κυμαίνεται μεταξύ 40% και 30% για μεγάλες και μικρές μηχανές, αντίστοιχα, και η θερμική απόδοση μεταξύ 45% και 60% με αποτέλεσμα η συνολική απόδοση να ανέρχεται στο 90%. Προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη καύση απαιτείται περιεκτικότητα του βιοαερίου σε μεθάνιο μεγαλύτερη από 30% αλλά και μία περιεκτικότητα 21% μπορεί να είναι αποτελεσματική. Το αποδεκτό όριο ποσότητας H_2S μέσα στο βιοαέριο είναι 500 ppm, ενώ και τα σιλοζάνια πρέπει να αφαιρούνται.

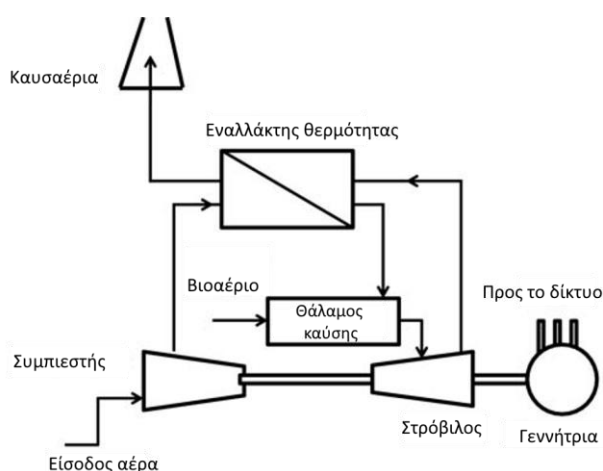
- Μηχανές αερίου με ανάφλεξη μέσω σπινθήρα (SI) και μέσω συμπίεσης (CI)

Σε μονάδες βιοαερίου χρησιμοποιούνται, κυρίως, μηχανές αερίου SI, οι οποίες έχουν εύκολη λειτουργία και συντήρηση και, επιπλέον, χαμηλό έως μέτριο αρχικό επενδυτικό κόστος. Οι μηχανές διπλού καυσίμου με βάση το βιοαέριο ή οι μηχανές μόνο βιοαερίου είναι εμπορικά διαθέσιμες σε μέτρια ή μεγάλη κλίμακα (100kW έως MW). Οι μηχανές αυτές έχουν ηλεκτρική απόδοση έως 18-43% ανάλογα με το μέγεθός τους. Παρά την υψηλή ανοχή τους σε ρύπους, απαιτείται επεξεργασία αφαίρεσης του H_2S (κάτω από 100 ppm), σιλοζανίων και υγρασίας. Τα καυσαέρια της μηχανής φθάνουν σε θερμοκρασίες έως 650 °C. Η ανάκτηση θερμότητας πραγματοποιείται μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας. Το βιοαέριο μπορεί να συνδυάζεται με μικρές ποσότητες βιοντίζελ, βιοαιθανόλης ή βιοδιμεθυλαιθέρα. Η καύση του βιοαερίου στις μηχανές SI και CI δεν παράγει μεγάλους ρύπους. Οι μηχανές CI λειτουργούν με διπλό καύσιμο. Το βιοαέριο παρουσιάζει αντικροτική (anti-knock) συμπεριφορά λόγω του υψηλού αριθμού οκτανίου του βιοαερίου, μία παράμετρος που είναι σημαντική στις μηχανές SI.

- Αεριοστροβίλοι

Οι μονάδες βιοαερίου μεγάλης κλίμακας χρησιμοποιούν στροβίλους

δυναμικότητας ίσης ή μεγαλύτερης από 3–5MW και οι μονάδες μικρής κλίμακας 30 to 75kW. Οι αεριοστρόβιλοι έχουν υψηλά επίπεδα ανοχής· ακόμη και ανεπεξέργαστο βιοαέριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Οι μικροστρόβιλοι, παρά το μικρό μέγεθός τους, μπορούν να συνδέονται μεταξύ τους ώστε τελικά να διαμορφώνεται το επιθυμητό μέγεθος (Σχήμα 3). Μειονέκτημα των αεριοστροβίλων είναι τα δαπανηρά τεχνικά υλικά που απαιτούνται λόγω των υψηλών περιστροφικών ταχυτήτων τους και των υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας τους.



Σχήμα 3 - Μικρο-αεριοστρόβιλος με ανάκτηση θερμότητας (Τροποποίηση από Kaporaju and Rintala, 2013)

Ο οργανικός κύκλος Rankine (ORC), ο κύκλος Cheng, ο ατμοστρόβιλος μπορούν να χρησιμοποιούνται για την καύση του βιοαέριου και την παραγωγή ατμού. Οι μηχανές Stirling μπορούν, επίσης, να χρησιμοποιούν το βιοαέριο ως καύσιμο (Kaporaju and Rintala, 2013).

Μία χρήση του βιοαέριου για συμπαραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας που δεν περιλαμβάνει καύση είναι οι κυψέλες καυσίμου, οι οποίες παράγουν ηλεκτρική ενέργεια απευθείας μέσω ηλεκτροχημικής αντίδρασης του οξυγόνου με το υδρογόνο με αποτέλεσμα τον σχηματισμό νερού. Κάθε κυψέλη αποτελείται από μία αρνητική άνοδο και μία θετική κάθοδο, οι οποίες διαχωρίζονται από έναν στερεό ή υγρό ηλεκτρολύτη. Το υδρογόνο που παράγεται από την αναμόρφωση του βιοαέριου διέρχεται από την άνοδο, ενώ το οξυγόνο διέρχεται από την κάθοδο και ένας καταλύτης χρησιμοποιείται για την επιτάχυνση των αντιδράσεων. Μεταξύ των διάφορων ειδών,

οι κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC) παρουσιάζουν υψηλότερη ισχύ, είναι αποδοτικές, δομοστοιχειωτές και μπορούν να συνδεόνται με το βιοαέριο που παράγεται από αναερόβια χώνευση για αποδοτικές και αποκεντρωμένες μονάδες ΣΗΘ. Τα ενσωματωμένα συστήματα SOFC-βιοαερίου αξιοποιούν το παραγόμενο βιοαέριο και μεγιστοποιούν την παραγωγή καθαρής ενέργειας (Tamburrano et al., 2024).

3.2 Περιγραφή της διαδικασίας παραγωγής ενέργειας σε μονάδα ΣΗΘ

Σκοπός των μονάδων βιοαερίου ΣΗΘ που χρησιμοποιούν γεωργικά απόβλητα ως ενεργειακό πόρο για την αναερόβια χώνευση, είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας. Μία τυπική μονάδα βιοαερίου διακρίνεται από δύο ξεχωριστά μέρη, το βιοτεχνολογικό μέρος στο οποίο λαμβάνει χώρα η διεργασία της αναερόβιας χώνευσης με προϊόντα το βιοαέριο και το χωνεμένο υπόλειμμα, και το ενεργειακό μέρος στο οποίο παράγεται η ενέργεια. Μία τέτοια μονάδα, συνήθως, αποτελείται από εγκαταστάσεις και εξοπλισμούς για:

- αποθήκευση, προετοιμασία, τροφοδοσία των υποστρωμάτων (σιλό, πίστες αποθήκευσης, δεξαμενές υποδοχής, συστήματα τροφοδοσίας),
- αναερόβια χώνευση και αποθήκευση του βιοαερίου (βιοαντιδραστήρες χώνευσης, μεταχώνευσης),
- επεξεργασία του βιοαερίου (κύκλωμα συμπίκνωσης για την αφαίρεση των υδρατμών και ξήρανση του βιοαερίου, συστήματα καθαρισμού - συνήθως, σύστημα βιολογικής αποθείωσης μέσα στους βιοαντιδραστήρες με προσθήκη οξυγόνου και χρησιμοποιώντας βακτήρια για τη μετατροπή του υδρόθειου σε στοιχειακό θείο και θειικό άλας, προσρόφηση σε φίλτρο ενεργού άνθρακα για δέσμευση πτητικών οργανικών ενώσεων, πλύση με νερό ή χημική πλύση για αφαίρεση CO₂ και H₂S),
- επεξεργασία και αποθήκευση του χωνεμένου υπολείμματος (σύστημα διαχωρισμού, μονάδα αποστείρωσης/παστερίωσης, δεξαμενές αποθήκευσης),
- μεταφορά/τροφοδοσία των υποστρωμάτων, του βιοαερίου, του παραγόμενου χωνέματος (τεχνικό κτίριο, δίκτυο σωλήνων, αντλίες),
- ποσοτική και ποιοτική επόπτευση όλων των βιοχημικών και μηχανικών διεργασιών (εξοπλισμοί/αυτοματισμοί μέτρησης και ελέγχου)
- διασφάλιση της λειτουργίας (πυρσός βιοαερίου σε επείγουσες περιπτώσεις όπου απαιτείται η καύση περίσσειας βιοαερίου),

- μετατροπή του βιοαερίου σε ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα (prime mover, σταθμός μετασχηματιστή για σύνδεση με το κεντρικό δίκτυο ισχύος, εναλλάκτες θερμότητας για την ανάκτηση θερμικής ενέργειας) (Jasiński et al., 2024; Lupu et al., 2026).

3.3 Απόδοση-Κόστη-Οικονομικά οφέλη μονάδων βιοαερίου

Οι μονάδες βιοαερίου παρουσιάζουν μία εξαιρετικά υψηλή απόδοση. Η ηλεκτρική ενέργεια, η θερμότητα, τα χωνέματα που παράγονται μπορούν να πωλούνται και να αποφέρουν κέρδη, ενώ, επιπλέον, υπάρχουν και έσοδα από τις υπηρεσίες διαχείρισης βιοδιασπώμενων αποβλήτων, κυρίως, από την αγρο-διατροφική βιομηχανία. Η λειτουργία των μονάδων βιοαερίου επιδρά σε μεγάλο βαθμό στη μείωση της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων, στην περιβαλλοντική προστασία, και στην ενίσχυση των οικονομικών δραστηριοτήτων στον τομέα αυτό (Jasiński et al., 2024; Slavica et al., 2022).

Οι De Loma-Osorio and Borge-Diez (2023) χρησιμοποίησαν για τις ενεργειακές ανάγκες ενός κτιρίου κατοικιών στην Ισπανία ένα μικροδίκτυο που ήταν συνδεδεμένο με το κύριο δίκτυο για αγορά και πώληση ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο βασίστηκε σε ένα μικροσύστημα ΣΗΘ που ήταν το κύριο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και αποτελούταν από δύο μικρομονάδες ΣΗΘ τροφοδοτούμενες με βιοαέριο. Η θερμότητα που παραγόταν από το σύστημα ΣΗΘ χρησιμοποιούνταν για τη θέρμανση του νερού της δεξαμενής αποθήκευσης. Το μικροδίκτυο αποτελούταν, επιπλέον, από σύστημα δεξαμενής αποθήκευσης νερού για την αποθήκευση της εναπομείνουσας ενέργειας σε περίπτωση που το θερμικό φορτίο ήταν χαμηλότερο από την αποθηκευμένη θερμική ενέργεια μέσα στο σύστημα δεξαμενής. Επίσης, τοποθετήθηκε λέβητας (boiler) που τροφοδοτούταν με φυσικό αέριο για την περίπτωση που η θερμική ενέργεια δεν ικανοποιούνταν από τη δεξαμενή αποθήκευσης νερού. Με τη συγκεκριμένη διάταξη, η ηλεκτρική ενέργεια που παραγόταν από τις μικρομονάδες ΣΗΘ για λειτουργία 6.653 ώρες/έτος ήταν ισοδύναμη με 332,65 MWh/έτος. Τα έσοδα για τιμή πώλησης 0,19087 €/kWh (στην ισπανική αγορά τη χρονική στιγμή της μελέτης) ήταν 63.493 €/έτος. Η ενεργειακή κατανάλωση του κτιρίου ανερχόταν σε 1.209 MWh/έτος και με τιμή αγοράς 0,13337 €/kWh, το ολικό κόστος για αγορά ηλεκτρικής ενέργειας ανερχόταν σε 161.244 €/έτος. Άρα το ετήσιο κόστος για

κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανερχόταν σε 97.751 €, δηλαδή επιτεύχθηκε εξοικονόμηση περίπου 40%. Σύμφωνα με τους De Loma-Osorio and Borge-Diez (2023), τα μικροδίκτυα μπορούν να λειτουργούν ανεξάρτητα από το κύριο δίκτυο παρέχοντας μία λύση στο πρόβλημα των διακοπών ρεύματος, ειδικά, σε μία εποχή όπως η σημερινή που χαρακτηρίζεται από συχνές φυσικές καταστροφές.

Η Κίνα διαθέτει άφθονους πόρους βιομάζας που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή βιοαερίου στις αγροτικές περιοχές. Οι Liu et al. (2023) ανέπτυξαν μία μικρομονάδα ΣΗΘ και διεξήγαγαν εργαστηριακές δοκιμές υπό συνθήκες λειτουργίας με φυσικό αέριο και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μονάδα είχε μία απόδοση ηλεκτρικής ενέργειας ίση με 29%, η οποία παρέμενε σταθερή υπό διαφορετικές συνθήκες, ενώ η θερμική απόδοση ήταν πιο ευαίσθητη στη θερμοκρασία νερού εισόδου. Η ολική απόδοση ήταν 96%. Η μονάδα υποβλήθηκε σε επιτόπια δοκιμή σε ένα κτίριο γραφείων στην επαρχία Jiangsu υπό συνθήκες λειτουργίας με βιοαέριο. Η περιεκτικότητα σε μεθάνιο του παραγόμενου βιοαερίου ήταν 50,854% και η πίεση εξόδου του ήταν 3kpa. Τα αποτελέσματα αυτής της επιτόπιας δοκιμής έδειξαν ότι η μονάδα μπορούσε να θερμαίνει τις αίθουσες και είχε μία μέγιστη παραγωγή ενέργειας ίση με 3,2 kW. Η μέση απόδοση ηλεκτρικής ενέργειας ήταν ίση, περίπου, με 26,8%, η απόδοση θερμικής ενέργειας ίση με 65,6% και η ολική απόδοση ήταν 92,4%. Οι δοκιμές έδειξαν ότι το μικροσύστημα ΣΗΘ μπορούσε να ικανοποιεί τις ενεργειακές ανάγκες των αγροτών βελτιώνοντας την απόδοση χρήσης ενέργειας και μειώνοντας τις εκπομπές άνθρακα.

Οι Xu et al. (2025) (Κίνα) χρησιμοποίησαν τα υγρά υπολείμματα απόσταξης με διαλυτά (WDGS) που παράχθηκαν από την παραγωγή αιθανόλης με βάση την κασάβα και υλοποίησαν τρία σενάρια για την ίδια ποσότητα κασάβας: (1) ξήρανση των WDGS και πώλησή τους ως τροφή για τα ζώα, (2) αναερόβια χώνευση των WDGS για την παραγωγή βιοαερίου και την καύση του για θέρμανση και (3) αναερόβια χώνευση των WDGS για την παραγωγή βιοαερίου και χρήση του ως καύσιμο σε ένα σύστημα ΣΗΘ. Σύμφωνα με τον Πίνακα 7, η ποσότητα παραγόμενης βιοαιθανόλης είναι ίδια και για τα τρία σενάρια. Επίσης, φαίνεται ότι το σενάριο 3 διαμορφώνοντας έναν κύκλο ενέργειας κλειστού βρόχου, επιτυγχάνει βελτίωση της απόδοσης, ικανοποιεί τις απαιτήσεις σε ηλεκτρική και θερμική ενέργεια, ενώ παρέχει την πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο. Με την ενσωμάτωση του συστήματος ΣΗΘ παράχθηκε

ηλεκτρική ενέργεια ίση με 81,58 kWh, ελαχιστοποιήθηκαν τα κόστη ενέργειας και αυξήθηκαν τα έσοδα από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνοντας το υψηλότερο κέρδος (\$396,80/τόνο αιθανόλης), που παρουσίασε μία αύξηση 9,2% σε σύγκριση με το σενάριο 1. Επιπλέον, παρατηρήθηκε το χαμηλότερο παγκόσμιο δυναμικό θέρμανσης (−1515,05 kg CO₂-eq/τόνο αιθανόλης) σε σύγκριση με τα σενάρια 1 και 2, ενώ μπορεί να επιτευχθεί απεξάρτηση της παραγωγής αιθανόλης από ορυκτά καύσιμα.

Πίνακας 7 - Τεχνοοικονομική ανάλυση των τριών σεναρίων (Τροποποίηση από Xu et al., 2025).

Σενάριο 1	Είσοδος				Έξοδος			Κέρδος
	Κασάβα (t)	Ηλεκτρ. εν. (kWh)	Φυσ. αέριο (m ³)	Θερμότητα (Mj)	Ηλεκτρ. εν. (kWh)	Βιοαιθανόλη (kg)	DDGS (kg)	
Ποσότητα	8.1	74.089	466.6285714	0	0	1000	1686	
Τιμή μονάδας (USD)	56.32	0.102	0.366	0.0042	0.102	0.8448	0.0908	
Τιμή (USD)	456.36	7.56	170.79	0.00	0.04	844.80	153.09	363.18
Σενάριο 2	Είσοδος				Έξοδος			Κέρδος
	Κασάβα (t)	Ηλεκτρ. εν. (kWh)	Φυσ. αέριο (m ³)	Θερμότητα (Mj)	Ηλεκτρ. εν. (kWh)	Βιοαιθανόλη (kg)	DDGS (kg)	
Ποσότητα	8.1	74.089	0	757.6142638	0	1000	0	
Τιμή μονάδας (USD)	56.32	0.102	0.366	0.0042	0.102	0.8448	0.0908	
Τιμή (USD)	456.36	7.56	0.00	3.18	0.00	844.80	0	384.06
Σενάριο 3	Είσοδος				Έξοδος			Κέρδος
	Κασάβα (t)	Ηλεκτρ. εν. (kWh)	Φυσ. αέριο (m ³)	Θερμότητα (Mj)	Ηλεκτρ. εν. (kWh)	Βιοαιθανόλη (kg)	DDGS (kg)	
Ποσότητα	8.1	0	0	10.32422053	81.58222	1000	0	
Τιμή μονάδας (USD)	56.32	0.102	0.366	0.0042	0.102	0.8448	0.0908	
Τιμή (USD)	456.36	0.00	0.00	0.04	8.32	844.80	0	396.80

3.4 Νομοθεσία

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή προωθεί την παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ με στόχο τη μείωση των εκπομπών του θερμοκηπίου στις χώρες της Ευρώπης. Συνολικός δεσμευτικός στόχος είναι έως το 2030 τουλάχιστον το 42,5% της ενέργειας στην Ευρώπη να προέρχεται από ΑΠΕ, με προοπτική να επιτευχθεί το 45% (European Commission, 2026).

Λόγω της ιδιαιτερότητάς τους οι μονάδες βιοαερίου άπτονται πολλών νομικών πεδίων. Κανονισμοί που θεσπίζονται από την Ευρωπαϊκή Ένωση και ευρωπαϊκές Οδηγίες που ενσωματώνονται στο εθνικό δίκαιο ορίζουν ρυθμίσεις που αφορούν στην παραγωγή ενέργειας, τη διαχείριση αποβλήτων και χωνεμένων υπολειμμάτων, και την εν γένει λειτουργία των μονάδων βιοαερίου (Jasiński et al., 2024).

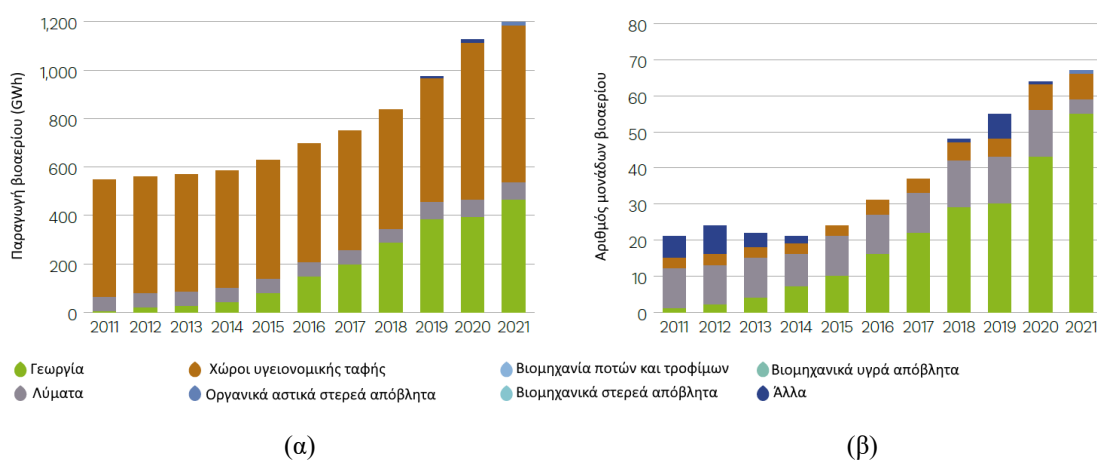
Ο Νόμος 5299/2026 (ΦΕΚ Α' 67/05.05.2026) (Φύλλα Εφημερίδας της Κυβερνήσεως, 2026), ο οποίος ενσωματώνει την ευρωπαϊκή Οδηγία 2023/2413 (RED III) έχει αντικείμενο την επιτάχυνση της ενεργειακής μετάβασης, τη μείωση των εκπομπών του θερμοκηπίου, την ενίσχυση της αυτοκατανάλωσης. Περιλαμβάνει ρυθμίσεις που αφορούν στην προώθηση της παραγωγής ενέργειας από μονάδες Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας Υψηλής Απόδοσης (Σ.Η.Θ.Υ.Α.) και την προώθηση της παραγωγής βιοαερίου, ενώ θέτει το θεσμικό πλαίσιο για την παραγωγή και διοχέτευση βιομεθανίου σε δίκτυα αερίου σε αντίθεση με την τρέχουσα κατάσταση όπου το βιοαέριο χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, θεσπίζονται κανόνες για τις διαδικασίες και την επιτάχυνση αδειοδοτήσεων και σύνδεσης των μονάδων Σ.Η.Θ.Υ.Α. Ορίζεται ως Αυτοπαραγωγός/αυτοκαταναλωτής ενέργειας από Σ.Η.Θ.Υ.Α ο τελικός πελάτης που έχει τη δυνατότητα αποθήκευσης ή/και πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας που έχει παραχθεί στις εγκαταστάσεις του από Σ.Η.Θ.Υ.Α. για να καλύψει δικές του ανάγκες αλλά η κύρια επαγγελματική δραστηριότητά του δεν είναι αυτή. Οι σταθμοί Σ.Η.Θ.Υ.Α. συνδέονται με το Δίκτυο. Η Σ.Η.Θ.Υ.Α. ορίζεται με βάση το ποσοστό εξοικονόμησης πρωτογενούς ενέργειας, το οποίο είναι τουλάχιστον 10% σε σχέση με την παραγόμενη ηλεκτρική και θερμική ενέργεια, ενώ για μονάδες Μικρής (εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύ < 1 MWe) και Πολύ Μικρής Κλίμακας (εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύ < 50 kWe) πρέπει να εξασφαλίζεται εξοικονόμηση ενέργειας ανεξάρτητα από το ποσοστό.

4. Βιοαέριο στην Ελλάδα, την Ευρώπη και διεθνώς - Προοπτικές εξέλιξης

Γενικά η κατάσταση έως σήμερα

Η Ελλάδα παρά το τεράστιο δυναμικό βιομάζας που διαθέτει, το οποίο προέρχεται από γεωργικά υπολείμματα, δεν μπορεί να το χρησιμοποιήσει επαρκώς για την παραγωγή βιοαερίου σε τοπικές μονάδες. Περίπου 17 εκατομμύρια τόνοι οργανικών αποβλήτων/έτος φαίνεται να μένουν αχρησιμοποίητα, το ενεργειακό περιεχόμενο των οποίων αντιστοιχεί σε περίπου 7 TWh βιομεθανίου. Παράγοντες, στους οποίους οφείλεται αυτή η αδυναμία πλήρους ενεργειακής αξιοποίησης, είναι, για παράδειγμα, η κατακερματισμένη εφοδιαστική αλυσίδα, η διαθεσιμότητα πρώτων υλών, η γραφειοκρατία και τα έως τώρα ανεπαρκή οικονομικά κίνητρα για μικρά αγροκτήματα

(ALFA, 2023; Liberal.gr, 2026). Για την παραγωγή βιοαερίου από μονάδες που βασίζονται σε γεωργικά απόβλητα, χρησιμοποιήθηκαν 1.867.000 τόνοι υγρού βάρους το 2021, με το 88% των γεωργικών πρώτων υλών να προέρχεται από γεωργικά υπολείμματα, όπως κοπριά, ενώ το 5% προερχόταν από διαδοχικές καλλιέργειες και το υπόλοιπο 11% από ενεργειακές καλλιέργειες. Βιοαέριο από γεωργικά απόβλητα (αγροτικά και ζωικά) παράχθηκε για πρώτη φορά στην Ελλάδα το 2011 και το 2021 η παραγωγή του έφτασε την τιμή των 465 GWh. Στα Διαγράμματα 1α,β, παρουσιάζεται η ανάπτυξη της παραγωγής βιοαερίου στην Ελλάδα, καθώς επίσης και του αριθμού μονάδων βιοαερίου την περίοδο 2011-2021 χρησιμοποιώντας διάφορα υποστρώματα (ALFA, 2023). Στην Ελλάδα σήμερα υπάρχουν 146 σταθμοί βιοαερίου· 6 από αυτούς τους σταθμούς έχουν εκδηλώσει ενδιαφέρον για μετατροπή του βιοαερίου σε βιομεθάνιο. Φαίνεται πως η αγορά του βιομεθανίου βρίσκεται ακόμη σε φάση αναμονής έως ότου επιλυθούν θέματα, όπως λήψη κρατικών μέτρων στήριξης, βραδείες αδειοδοτικές διαδικασίες, αποζημιώσεις (EnergyPress, 2026).



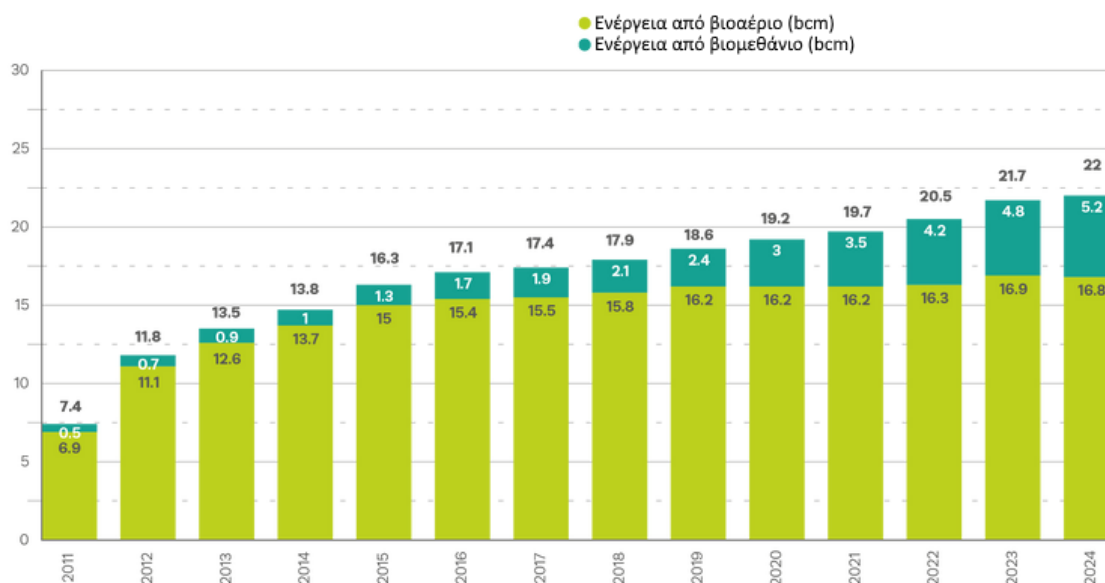
Διαγράμματα 1α - Αύξηση παραγωγής βιοαερίου, και 1β – αύξηση του αριθμού μονάδων βιοαερίου στην Ελλάδα μεταξύ 2011-2021 (Τροποποίηση από ALFA, 2023).

Την περίοδο 2021-2023 παρατηρήθηκε σε αρκετές χώρες, συμπεριλαμβανομένων της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ), της Ινδίας και της Κίνας, μία έντονη αύξηση του ενδιαφέροντος προς την τεχνολογία βιοαερίου, η οποία εκφράστηκε, κυρίως, με τον σχεδιασμό εθνικών πολιτικών και τον καθορισμό φιλόδοξων στόχων για το 2030. Χώρες, όπως η Γερμανία, η Γαλλία και η Δανία,

αποτελούν πρωτοπόρους στην τεχνολογία αυτή ενώ επενδύουν ακόμη περισσότερο στην ανάπτυξη του βιοαερίου και βιομεθανίου. Μεγάλες αναδυόμενες οικονομίες, όπως η Κίνα και η Ινδία, έχουν μεγάλη εμπειρία στα παραδοσιακά οικιακά συστήματα βιοαερίου μικρής κλίμακας, εν τούτοις, μετακινούνται με ταχείς ρυθμούς προς την παραγωγή βιομηχανικής κλίμακας. Χώρες με περιορισμένη εμπειρία ανάπτυξης, όπως η Ισπανία, η Πολωνία, η Ιρλανδία, η Βραζιλία, χαράσσουν πολιτικές για να υποστηρίξουν την παραγωγή βιοαερίων. Σε πολλές χώρες το 2023 παρατηρήθηκε επιτάχυνση της παραγωγής, για παράδειγμα, στις ΗΠΑ χάρη στις μεγάλες φορολογικές πιστώσεις, και στην Ευρώπη χάρη στα αναθεωρημένα τιμολόγια. Το 2024 παρατηρήθηκε μία στασιμότητα σε μερικές από τις ευρωπαϊκές χώρες, όπως η Γερμανία, η Δανία και η Ολλανδία, κυρίως, λόγω επιδείνωσης των συνθηκών αγοράς (π.χ., αύξηση του κόστους πρώτων υλών). Αντίθετα, η ανάπτυξη στην Γαλλία και την Ιταλία παράμεινε ισχυρή. Στις ΗΠΑ, η λήξη ισχύος κάποιων φορολογικών πιστώσεων στο τέλος του 2024 επιτάχυνε την επενδυτική δραστηριότητα. Η ανάπτυξη συνεχίστηκε στην Κίνα και την Ινδία με ετήσιες αυξήσεις 3-4% (International Energy Agency, 2025).

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση η συνολική παραγωγή βιοαερίου και βιομεθανίου αυξήθηκε κατά 3% το 2024. Η Γερμανία παράγει βιοαέριο που χρησιμοποιείται, κυρίως, για ΣΗΘ (53% της παραγωγής στην ΕΕ), ενώ το 2024 είχε συνδυασμένη παραγωγή βιοαερίου και βιομεθανίου ίση με 329 PJ. Εξακολουθεί να είναι η μεγαλύτερη αγορά βιοαερίου και βιομεθανίου. Χώρες με μικρότερες αγορές, όπως η Ελλάδα, η Ισπανία και η Πολωνία, επεκτείνουν την παραγωγή βιοαερίου. Η μετατροπή βιοαερίου σε βιομεθάνιο ευνοείται σε χώρες, όπως η Ιταλία και η Ολλανδία, με πολιτικούς σχεδιασμούς που ενισχύουν την κατασκευή καινούριων μονάδων βιομεθανίου ή την τροποποίηση των υπαρχουσών μονάδων βιοαερίου. Η Γερμανία παράγει βιομεθάνιο που αποτελεί το 29% της παραγωγής στην ΕΕ, ενώ μαζί με τη Γαλλία, την Ιταλία, τη Δανία και την Ολλανδία συνολικά παράγουν βιομεθάνιο ίσο με το 93% της παραγωγής της ΕΕ. Η Γαλλία, η οποία έχει πολλές μικρού και μεσαίου μεγέθους μονάδες τροφοδοτούμενες με γεωργικά απόβλητα (κατά μέσο όρο 200 Nm³/h), συνδεδεμένες όλες με το δίκτυο, είναι η ταχύτερα αναπτυσσόμενη αγορά. Η Ιταλία είναι η δεύτερη μεγαλύτερη αγορά βιοαερίου στην Ευρώπη· σχεδόν όλο το βιομεθάνιο χρησιμοποιείται στις μεταφορές (International Energy Agency, 2025).

Στο Διάγραμμα 2 παρουσιάζεται η συνδυασμένη παραγωγή βιοαερίου και βιομεθανίου ανά έτος στην Ευρώπη από το 2011 έως το 2024. Το 2024 παράχθηκαν συνολικά 22 bcm βιοαέριο και βιομεθάνιο (16,8 bcm βιοαέριο και 5,2 bcm βιομεθάνιο). Υπάρχουν 1.620 μονάδες βιομεθανίου στην Ευρώπη και 1.433 μονάδες στην ΕΕ-27. Η παραγωγή βιομεθανίου πραγματοποιείται σε 25 ευρωπαϊκές χώρες (European Biogas Association, 2025).



Διάγραμμα 2 – Συνδυασμένη παραγωγή βιοαερίου και βιομεθανίου ανά έτος στην Ευρώπη (Τροποποίηση από European Biogas Association, 2025).

Στην Ευρώπη το 2024, από γεωργικά απόβλητα προερχόταν το 69% της παραγωγής βιοαερίου και το 45% της παραγωγής βιομεθανίου. Το 2025, το 86% των μονάδων βιομεθανίου ήταν συνδεδεμένες με το δίκτυο. Το 52% των μονάδων βιομεθανίου χρησιμοποιεί ως τεχνολογία αναβάθμισης τον διαχωρισμό με μεμβράνες (EBA Statistical Report, 2025).

Οι ΗΠΑ είναι ο μεγαλύτερος παραγωγός βιομεθανίου (περίπου 136 PJ) και μία από τις πιο δυναμικές αγορές με τις μεταφορές ως τελική χρήση του bio-CNG ή bio-LNG για φορτηγά μεγάλων αποστάσεων να σημειώνουν μία σημαντική αύξηση χάρη σε κίνητρα, όπως οι ομοσπονδιακές φορολογικές πιστώσεις, οι αριθμοί ταυτοποίησης ανανεώσιμων καυσίμων (RIN) και πιστώσεις άνθρακα από προγράμματα προτύπων χαμηλών εκπομπών άνθρακα, ιδιαιτέρως στην Καλιφόρνια (International Energy

Agency, 2025).

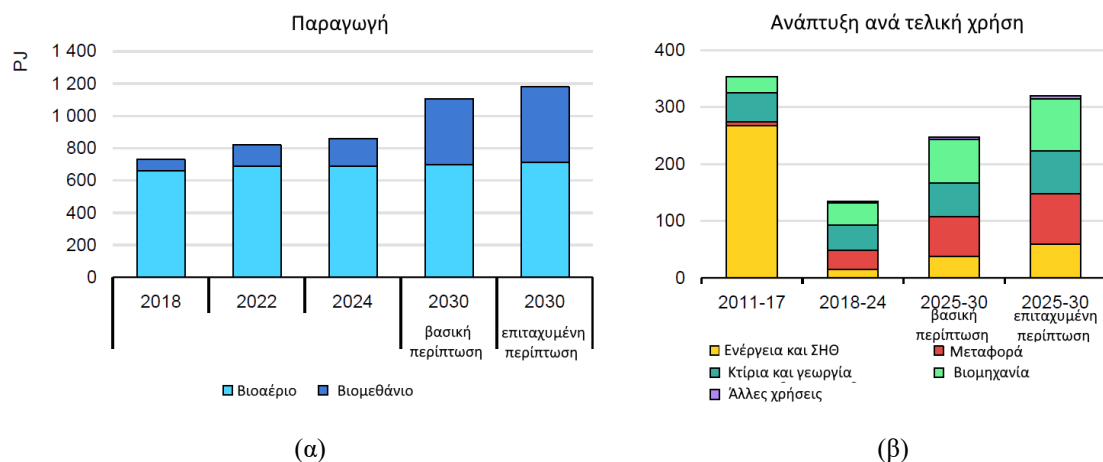
Η Κίνα έχει μακρά παράδοση στην παραγωγή βιοαερίου. Χάρη σε κρατικές επιδοτήσεις, τις δεκαετίες 2000, 2010, κατέστη δυνατή η εγκατάσταση αναερόβιων χωνευτήρων μικρής κλίμακας σε εκατομμύρια οικογενειακές φάρμες (42 εκατομμύρια μονάδες το 2015). Λόγω, π.χ., δυσκολιών συντήρησης, όμως, ο αριθμός των ενεργών μονάδων μειώθηκε. Επιπλέον, η κυβερνητική πολιτική υποστηρίζει την ανάπτυξη έργων μεγαλύτερης κλίμακας και την προώθηση της βιομηχανίας βιομεθανίου.

Η Ινδία διαθέτει ένα υψηλό δυναμικό πρώτων υλών χάρη στο οποίο θα μπορούσε να παράγει 115 bcm βιοαερίων ισοδύναμο με το 160% της τρέχουσας κατανάλωσης φυσικού αερίου. Σημαντικό μέρος της παραγωγής βιοαερίου προέρχεται από οικιακές μονάδες σε αγροτικές περιοχές, εν τούτοις, η κυβερνητική πολιτική στοχεύει στην ανάπτυξη από μεγαλύτερες και πιο αποδοτικές μονάδες και έχει λάβει μέτρα ενίσχυσης του βιομηχανικού βιοαερίου και μονάδων συμπιεσμένου βιοαερίου. Η χρήση του bio-CNG στις μεταφορές επεκτείνεται ταχέως με τον αριθμό οχημάτων που χρησιμοποιούν αυτό το καύσιμο να ανέρχεται στα 7,5 εκατομμύρια το 2025.

Μελλοντική προοπτική εξέλιξης

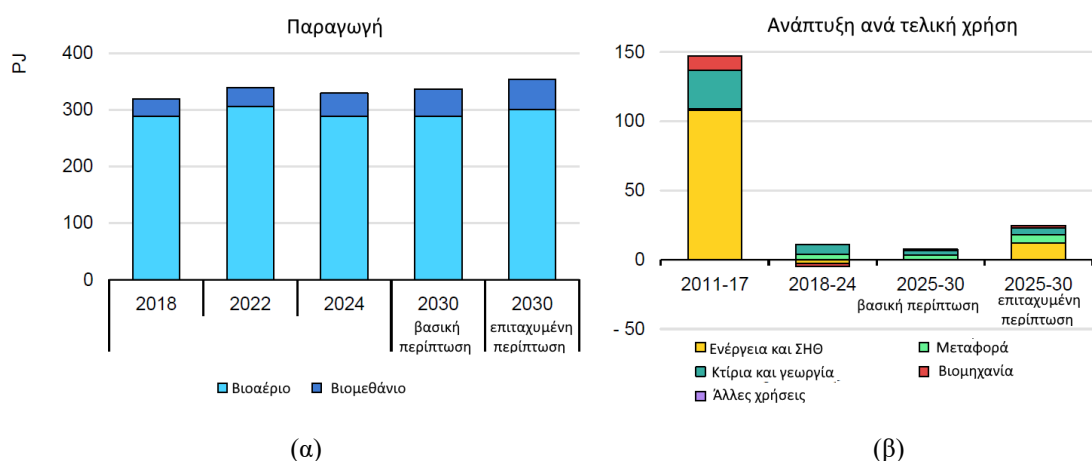
Η παγκόσμια συνδυασμένη παραγωγή βιοαερίου και βιομεθανίου αναμένεται να επεκταθεί κατά 22% την περίοδο 2025-2030, ενώ η καθαρή ανάπτυξη θα προέλθει από το βιομεθάνιο λόγω της δυνατότητάς του να υποκαταστήσει το φυσικό αέριο. Από την άλλη πλευρά, η άμεση χρήση του βιοαερίου για ηλεκτρική ενέργεια ή ΣΗΘ παραμένει σε σχετική ανάπτυξη σε χώρες με περιορισμένες υποδομές δικτύου σωληνώσεων, όπως η Βραζιλία, η Ινδία και η Κίνα (International Energy Agency, 2025).

Στα Διαγράμματα 3α,β φαίνονται οι παραγωγές βιοαερίου και βιομεθανίου καθώς και η ανάπτυξη ανά χρήση, διαχρονικά αλλά και με προοπτική το έτος 2030, στην Ευρώπη συνολικά.



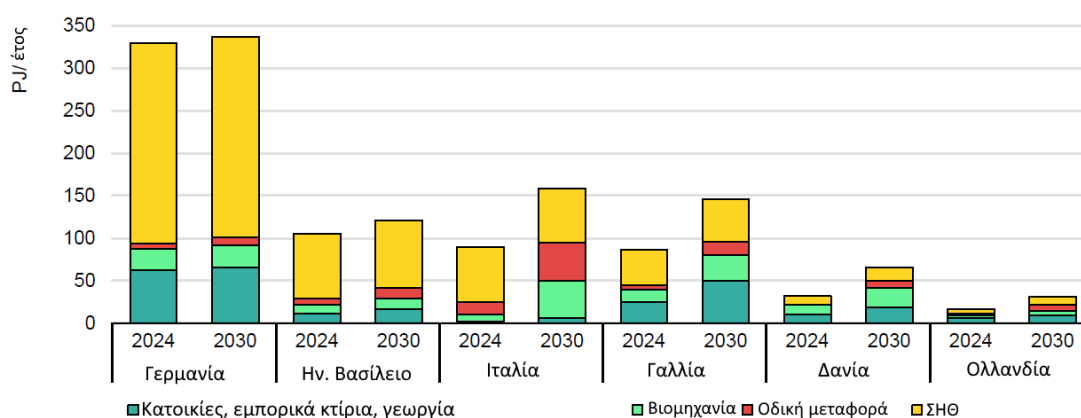
Διαγράμματα 3α,β – Παραγωγή βιοαερίων στην Ευρώπη [βασική περίπτωση: τυπικό, ρεαλιστικό σενάριο, επιταχυσμένη περίπτωση: σενάριο ταχύτερης υλοποίησης] (Τροποποίηση από International Energy Agency, 2025).

Σημαντικές αλλαγές στους τομείς βιοαερίου και βιομεθανίου, όπως η μετατροπή μεγαλύτερων μονάδων σε μονάδες παραγωγής βιομεθανίου, η εξερεύνηση νέων μοντέλων κοινής παραγωγής για τις μικρότερες μονάδες, χρήση συμπιεσμένου ή υγροποιημένου βιομεθανίου για τις μεταφορές, θα λάβουν χώρα στη Γερμανία τα επόμενα χρόνια. Την περίοδο 2025-2060 αναμένεται συνδυασμένη ανάπτυξη 2% και αύξηση μόνο του βιομεθανίου 19% (International Energy Agency, 2025). Στα Διαγράμματα 4α,β φαίνονται οι παραγωγές βιοαερίου και βιομεθανίου και η ανάπτυξη ανά χρήση, διαχρονικά αλλά και με προοπτική το έτος 2030, στη Γερμανία.



Διαγράμματα 4α,β – Παραγωγή βιοαερίων στη Γερμανία [βασική περίπτωση: τυπικό, ρεαλιστικό σενάριο, επιταχυσμένη περίπτωση: σενάριο ταχύτερης υλοποίησης] (Τροποποίηση από International Energy Agency, 2025).

Την περίοδο 2025-2030, η αγορά βιοαερίου και βιομεθανίου στη Γαλλία προβλέπεται να έχει ανάπτυξη 71%, ενώ στην Ιταλία αναμένεται αύξηση της παραγωγής τους ίση με 77% (Διάγραμμα 5) (International Energy Agency, 2025). Στο Διάγραμμα 5 φαίνεται η παραγωγή βιοαερίου και βιομεθανίου το 2024 αλλά και με προοπτική το έτος 2030 σε διάφορες επιλεγμένες ευρωπαϊκές χώρες.

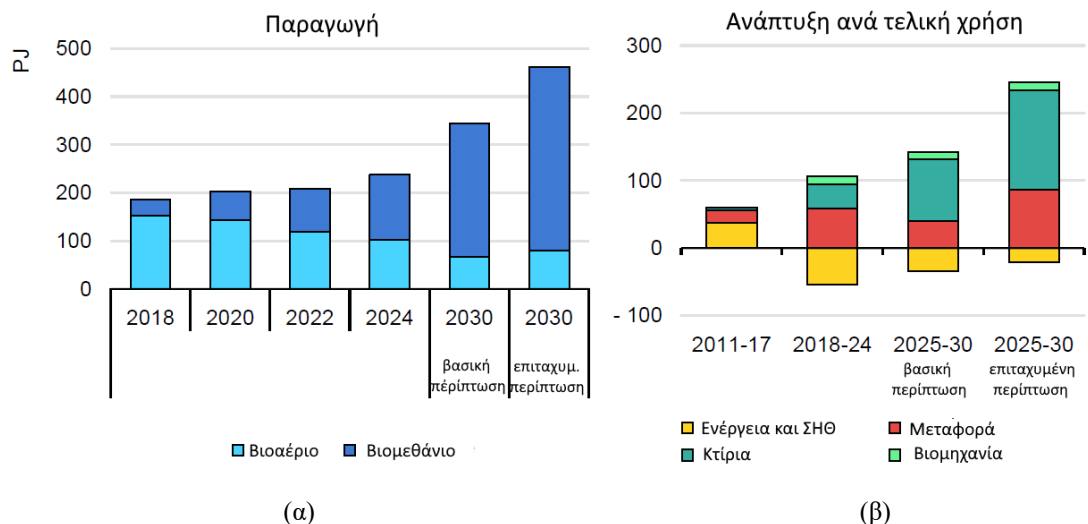


Διάγραμμα 5 – Παραγωγή βιοαερίων σε επιλεγμένες ευρωπαϊκές χώρες το 2024 και 2030 ανά τελική χρήση (Τροποποίηση από International Energy Agency, 2025).

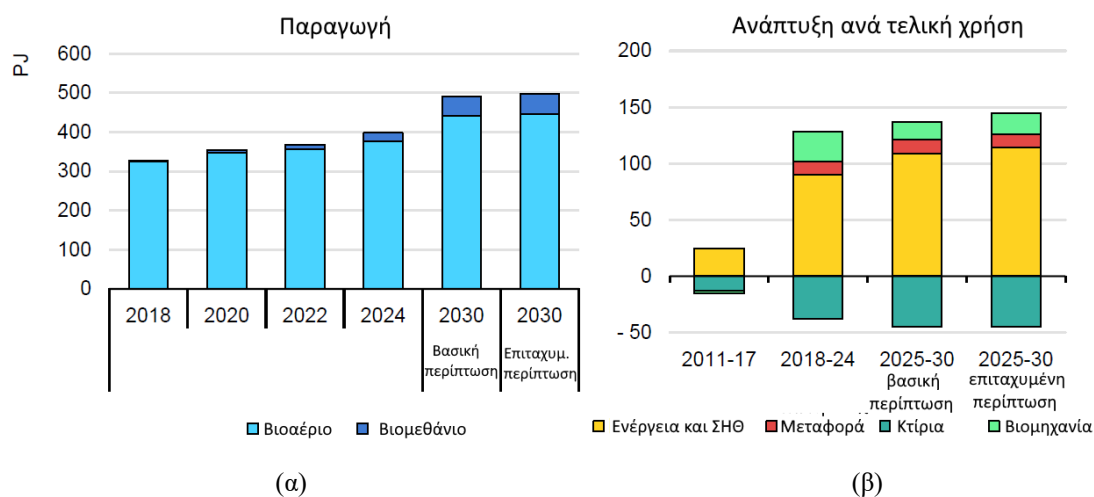
Στις ΗΠΑ, η συνδυασμένη παραγωγή βιοαερίου και βιομεθανίου θα αυξηθεί 1,6 φορές το 2030 σε σύγκριση με τα επίπεδα του 2023. Τα βιομεθάνια σε μεγάλο βαθμό θα χρησιμοποιούνται στις μεταφορές αλλά η ζήτηση για οικίες και εμπορικά κτίρια αναμένεται να αυξηθεί ραγδαία, περίπου 43% ετησίως (Διάγραμμα 6β) (International Energy Agency, 2025). Στα Διαγράμματα 6α,β φαίνονται οι παραγωγές βιοαερίου και βιομεθανίου και η ανάπτυξη ανά χρήση, διαχρονικά αλλά και με προοπτική το έτος 2030, στις ΗΠΑ.

Η συνδυασμένη παραγωγή βιοαερίου και βιομεθανίου στην Κίνα αναμένεται να παρουσιάσει αύξηση 23% την περίοδο 2025-2030 (βασική περίπτωση, η οποία περιλαμβάνει μικρούς οικιακούς χωνευτήρες που εγκαταλείπονται με ταχύ ρυθμό). Εάν ληφθούν υπόψη έργα μόνο μεσαίας και μεγάλης κλίμακας, τότε η ανάπτυξη είναι σημαντικά μεγαλύτερη (περίπου 80%). Οι προβλέψεις δίνουν μία συνολική παραγωγή 12,8-13 bcm το 2030, ενώ ο στόχος 20 bcm για εκείνο το έτος φαίνεται δύσκολο να επιτευχθεί (Διάγραμμα 7α) (International Energy Agency, 2025). Στα Διαγράμματα 7α,β φαίνονται οι παραγωγές βιοαερίου και βιομεθανίου και η ανάπτυξη ανά χρήση,

διαχρονικά αλλά και με προοπτική το έτος 2030, στην Κίνα.



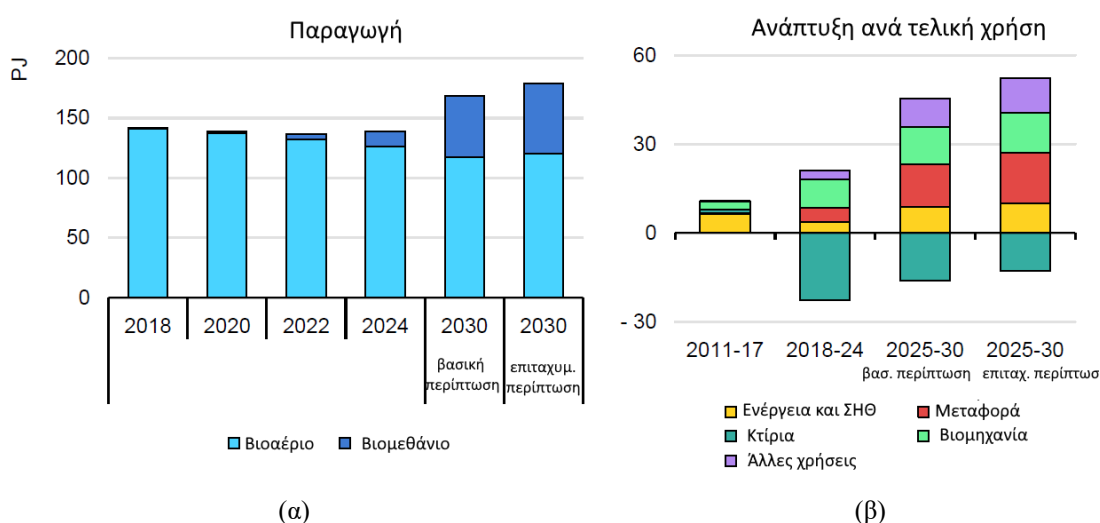
Διαγράμματα 6α,β – Παραγωγή βιοαερίων στις ΗΠΑ [βασική περίπτωση: τυπικό, ρεαλιστικό σενάριο, επιταχυσμένη περίπτωση: σενάριο ταχύτερης υλοποίησης] (Τροποποίηση από International Energy Agency, 2025).



Διαγράμματα 7α,β – Παραγωγή βιοαερίων στην Κίνα [βασική περίπτωση: τυπικό, ρεαλιστικό σενάριο, επιταχυσμένη περίπτωση: σενάριο ταχύτερης υλοποίησης] (Τροποποίηση από International Energy Agency, 2025).

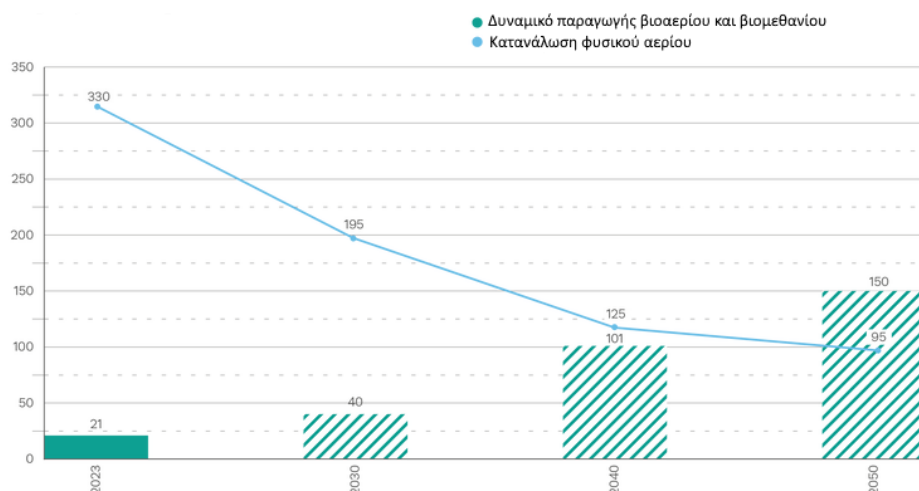
Στην Ινδία η αναμενόμενη αύξηση για βιοαέριο και συμπιεσμένο βιοαέριο συνολικά είναι 21% (βασική περίπτωση) την περίοδο 2024-2030. Στην πρόβλεψη λαμβάνεται υπόψη μείωση της παραγωγής από μικρές μονάδες σε αγροτικές περιοχές

καθώς αυτές εγκαταλείπονται. Σε περίπτωση που δεν λαμβάνονται υπόψη αυτές, η συνολική ανάπτυξη μπορεί να είναι 103% (βασική περίπτωση) και 119% (επιταχυσμένη περίπτωση). Η κατανάλωση συμπιεσμένου βιοαερίου στις μεταφορές αναμένεται να αυξηθεί 3,7 φορές (βασική περίπτωση) και 4,2 φορές (επιταχυσμένη περίπτωση) την περίοδο 2024-2030 (Διαγράμματα 8α,β) (International Energy Agency, 2025). Στα Διαγράμματα 8α,β, φαίνονται οι παραγωγές βιοαερίου και βιομεθανίου και η ανάπτυξη ανά χρήση, διαχρονικά αλλά και με προοπτική το έτος 2030, στην Ινδία.



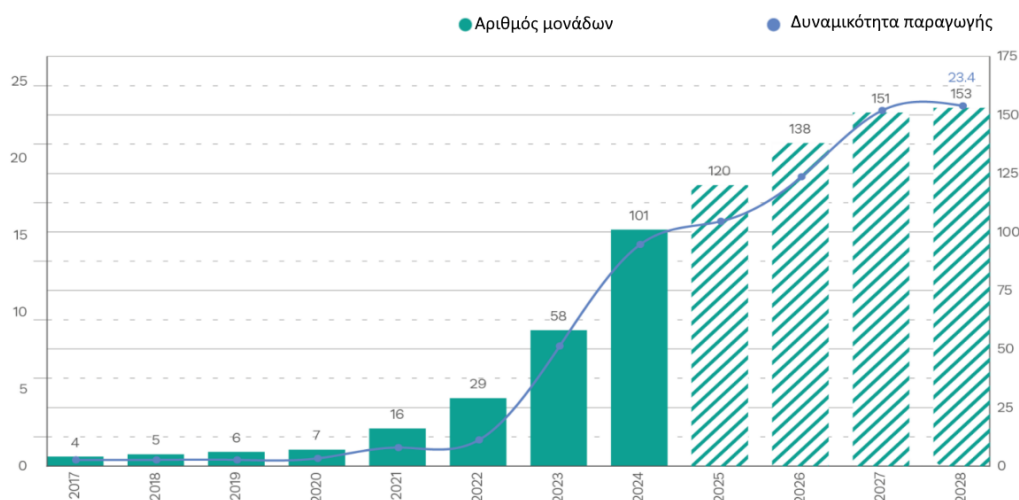
Διαγράμματα 8α,β – Παραγωγή βιοαερίων στην Ινδία [βασική περίπτωση: τυπικό, ρεαλιστικό σενάριο, επιταχυσμένη περίπτωση: σενάριο ταχύτερης υλοποίησης] (Τροποποίηση από International Energy Agency, 2025).

Οι προβλέψεις εκτιμούν ότι το 2030 η ΕΕ θα μπορέσει με συνδυασμένη παραγωγή να επιτύχει το 68% του στόχου των 35 bcm που έχει τεθεί από την ΕΕ (σχέδιο REPowerEU - παραγωγή 35 δισεκατομμυρίων κυβικών μέτρων βιομεθανίου ετησίως έως το 2030) (International Energy Agency, 2025). Τα βιοαέρια μπορούν να συμβάλλουν στην απεξάρτηση της ΕΕ από τις εισαγωγές φυσικού αερίου μέσω της παραγωγής ενός ανανεώσιμου και εναλλακτικού καυσίμου στην Ευρώπη. Σύμφωνα με το Διάγραμμα 9 (σύγκριση της τρέχουσας και δυνητικής παραγωγής βιοαερίων στην ΕΕ-27 με την τρέχουσα και αναμενόμενη ζήτηση για φυσικό αέριο το 2030, 2040 και 2050) η μελλοντική ζήτηση για φυσικό αέριο μειώνεται σε αντίθεση με την παραγωγή βιοαερίων που βαίνει αυξανόμενη και τελικά το έτος 2050 φαίνεται πως υπερβαίνει σημαντικά τη ζήτηση για φυσικό αέριο (European Biogas Association, 2025).



Διάγραμμα 9 – Σύγκριση της συνδυασμένης παραγωγής βιοαερίων με τη ζήτηση για φυσικό αέριο (Τροποποίηση από European Biogas Association, 2025).

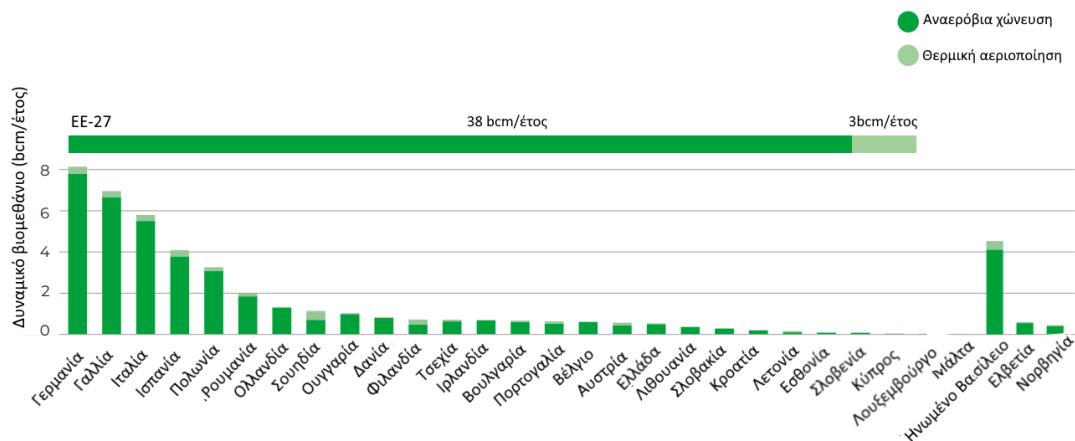
Το Διάγραμμα 10 παρουσιάζει την τρέχουσα κατάσταση του bio-LNG, ενώ αναμένεται μελλοντική αύξηση του αριθμού μονάδων bio-LNG καθώς επίσης και αύξηση της δυναμικότητας παραγωγής του στην Ευρώπη μεταξύ 2017 και 2028.



Διάγραμμα 10 – Μελλοντική αύξηση του αριθμού μονάδων bio-LNG και της δυναμικότητας παραγωγής (TWh/year) στην Ευρώπη (Τροποποίηση από EBA Statistical Report, 2025)

Σύμφωνα με εκτιμήσεις για το 2030, στην Ελλάδα η παραγωγή βιομεθανίου αναμένεται να είναι αρκετά χαμηλότερη από 2 bcm/έτος, σύμφωνα με το Διάγραμμα

11, που αναφέρεται σε διάφορες ευρωπαϊκές χώρες και στις διεργασίες αναερόβιας χώνευσης και θερμικής αεριοποίησης (ALFA, 2023).



Διάγραμμα 11 – Δυναμικό βιομεθανίου το 2030 ανά τεχνολογία και χώρα (Τροποποίηση από ALFA, 2023).

5. Βιβλιογραφική επισκόπηση πρόσφατων μελετών σχετικών με την βελτίωση της τεχνολογίας βιοαερίου

5.1 Ενίσχυση της παραγωγής βιοαερίου

Οι Al Bkoor Alrawashdeh et al. (2022b) σε ένα πρώτο στάδιο διεξήγαγαν δοκιμές χρησιμοποιώντας διάφορα υποστρώματα κοπριάς από κοτόπουλα (CM) και υγρών αποβλήτων από ελαιοτριβείο (OMW) και σε ένα δεύτερο στάδιο πρόσθεσαν νανοσωματίδια οξειδίων του σιδήρου (IONP) στα υποστρώματα με τον βέλτιστο λόγο συγχώνευσης που βρέθηκε στο πρώτο στάδιο. Οι δοκιμές του πρώτου σταδίου σε μεσόφιλες συνθήκες οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι, από άποψη παραγωγής βιοαερίου και μεθανίου, σταθερότητας της αναερόβιας συγχώνευσης, και απόδοσης αφαίρεσης των ολικού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (TCOD), πτητικών στερεών (VS) και ολικών στερεών (TS), ο βέλτιστος λόγος συγχώνευσης των δύο διαφορετικών υποστρωμάτων ήταν CM:OMW=25:75. Με βάση την υπολογισθείσα βέλτιστη σύνθεση υποστρωμάτων κοπριάς από κοτόπουλα και υγρών αποβλήτων από ελαιοτριβείο, διαπιστώθηκε, ύστερα από δοκιμές με προσθήκη διάφορων συγκεντρώσεων νανοσωματιδίων οξειδίων του σιδήρου (15-40 mg IONP/g VS υποστρώματος) ότι η προσθήκη μίας συγκέντρωσης IONP μεταξύ 20 mg/g VS και 35 mg/g VS στην αναερόβια συγχώνευση των δύο υποστρωμάτων επέφερε ένα ευνοϊκό

αποτέλεσμα στη διεργασία της υδρόλυσης αυξάνοντας τα ποσοστά της σε 85,3% (25 mg IONP/g VS) - 77,4% (35 mg IONP/g VS), δηλαδή, μία αύξηση 7,2%-15,1% σε σύγκριση με τη δοκιμή ελέγχου (χωρίς προσθήκη IONP) στην οποία το ποσοστό ήταν 70,2%. Επίσης, ενισχύθηκε αρκετά η παραγωγή οξικού οξέος με μία μέγιστη συγκέντρωση εντός 5 ημερών επώασης ίση με 1.084, 9.463 και 760 g/L με προσθήκη αντίστοιχα 25, 30 και 20 mg IONP/g VS σε σύγκριση με τα 713 g/L που ελήφθησαν με τη δοκιμή ελέγχου. Η απόδοση αφαίρεσης COD, θολερότητας, χρώματος, TS και VS με την προσθήκη 20-30 mg IONP/g VS αυξήθηκε, αντίστοιχα, κατά 6,7%-20,5%, 3%-15,4%, 1,8%-6,1%, 6,3%-12,5%, και 9,9%-12,3% σε σύγκριση με τη δοκιμή ελέγχου. Η απόδοση παραγωγής μεθανίου ενισχύθηκε κατά 1,3% - 4,2%. Για υδραυλικό χρόνο παραμονής 32 ημερών, με την προσθήκη 25 mg IONP/g VS επιτεύχθηκε η υψηλότερη παραγωγή βιοαερίου ίση με 0,339 Nm³/kg VS (παραγωγή βιοαερίου με προσθήκη 20 και 30 mg IONP/g VS ίση με 0,312 Nm³/kg VS, με τη δοκιμή ελέγχου ίση με 0,282 Nm³/kg VS) και περιεκτικότητα σε μεθάνιο ίση με 72,2%.

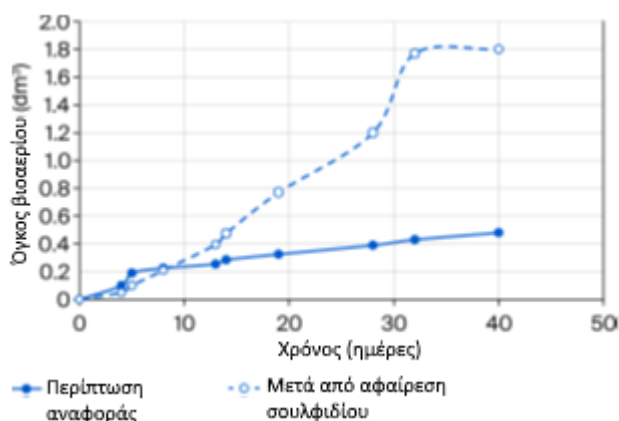
Οι Al Bkoor Alrawashdeh et al. (2022a) διεξήγαγαν δοκιμές Βιοχημικού Δυναμικού Μεθανίου (BMS) εφαρμόζοντας προεπεξεργασία σε υπόστρωμα υγρών αποβλήτων ελαιοτριβείου (OMW) πριν από την αναερόβια χώνευση χρησιμοποιώντας διεργασία Fenton με διάφορες συγκεντρώσεις υπεροξειδίου του υδρογόνου (H₂O₂) και διάφορους λόγους ιόντων δισθενούς σιδήρου (Fe⁺²) / υπεροξειδίου του υδρογόνου (H₂O₂). Η διεργασία Fenton είναι μία αντίδραση χημικής οξείδωσης, η οποία χρησιμοποιεί ιόντα σιδήρου (Fe⁺²) ως καταλύτη για τη διάσπαση του (H₂O₂) με αποτέλεσμα την παραγωγή ριζών υδροξυλίου που έχουν την ικανότητα να αποδομούν τους ρύπους. Από τα πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών με λόγους Fe⁺² / H₂O₂ ίσους με 0,002, 0,004, 0,006, 0,008, 0,01 και συγκεντρώσεις H₂O₂ ίσες με 2, 4, 6 g/kgVS, προέκυψε ότι η δοκιμή BMP με συγκέντρωση H₂O₂ ίση με 2 g/kgVS και λόγο Fe⁺² / H₂O₂ ίσο με 0,006, επέτυχε την υψηλότερη απόδοση αφαίρεσης TCOD, BOD₅, και πολυφαινολών, όπως επίσης και την υψηλότερη απόδοση αφαίρεσης VS κατά τη διάρκεια της αναερόβιας χώνευσης. Η περιεκτικότητα σε μεθάνιο σημειώθηκε με την εν λόγω δοκιμή (συγκέντρωση H₂O₂: 2 g/kgVS, λόγος Fe⁺² / H₂O₂: 0,006) και έφτασε το 68,3%. Η υψηλότερη παραγωγή βιοαερίου επιτεύχθηκε, επίσης, με την εν λόγω δοκιμή (συγκέντρωση H₂O₂ = 2 g/kgVS, λόγος Fe⁺² / H₂O₂ = 0,006) και ήταν 0,311 Nm³/kgVS σημειώνοντας μία αύξηση 93,75% σε σύγκριση με την απόδοση χώνευσης

με τη δοκιμή ελέγχου (χωρίς προεπεξεργασία).

Η βελτίωση της παραγωγής βιοαερίου μπορεί να επιτευχθεί μέσω αναερόβιας συγχώνευσης κοπριάς βοοειδών (BM) και ορού γάλακτος (W), εν τούτοις παρουσιάζει περιορισμούς που αφορούν στην επιλογή των κατάλληλων λόγων ανάμειξης και του σχεδιασμού του βιοαντιδραστήρα. Με βάση αυτό το σκεπτικό, οι Alvarez et al. (2025) χρησιμοποίησαν διάφορους λόγους ανάμειξης των δύο υποστρωμάτων και διαπίστωσαν ότι η αναλογία κοπριάς βοοειδών / ορού γάλακτος ίση με 80:20 είχε ως αποτέλεσμα μία αύξηση της παραγωγής βιοαερίου κατά 12,3% σε σύγκριση με τις θεωρητικές προβλέψεις, ενώ προέκυψε μία βέλτιστη περιεκτικότητα σε CH_4 ίση με 54,2%. Με την ενσωμάτωση καινοτομιών στις δοκιμές που διεξήγαγαν οι Alvarez et al. (2025), όπως η χρησιμοποίηση ενός θερμοκηπίου που μπόρεσε να διατηρήσει σταθερή μεσόφιλη θερμοκρασία στους 37°C, αυξήθηκε η παραγωγή βιοαερίου κατά 25%-30%. Επίσης, η εφαρμογή ενός χειροκίνητου αναδευτήρα για την ανάμειξη των υποστρωμάτων μέσα στον χωνευτήρα εξασφάλισε μία ομοιογένεια ανάμειξης βελτιώνοντας περαιτέρω την παραγωγή βιοαερίου κατά 15%-20%. Σύμφωνα με τους Bryant and Osei-Marfo (2021), ο οικιακός βιοαντιδραστήρας αναερόβιας χώνευσης με τον χειροκίνητο αναδευτήρα δύο πτερυγίων ασυνεχούς ανάδευσης που κατασκεύασαν, είχε τη δυνατότητα να παράγει ποσότητα ίση περίπου με $2,52 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 / (\text{kg COD} \cdot \text{d})$ που θα μπορούσε να καίγεται για τουλάχιστον 8 ώρες για οικιακές ανάγκες μαγειρέματος και θέρμανσης. Το χώνεμα που παράχθηκε από την αναερόβια συγχώνευση (Alvarez et al., 2025) είχε έναν μέσο λόγο NPK (άζωτο-φώσφορος-κάλιο) ίσο με 1,75-0,5-0,25 g/l. Η περιεκτικότητα του παραγόμενου λιπάσματος σε αυτά τα τρία θρεπτικά στοιχεία αποδείχτηκε ικανή να αυξήσει την απόδοση των γεωργικών καλλιεργειών κατά 20%.

Οι Beschkov et al. (2025) εφάρμοσαν μία καινούρια και απλή μέθοδο αφαίρεσης σουλφιδίων, και συγκεκριμένα, υδρόθειου από ρεύματα υγρών αποβλήτων όπως ένα υπόστρωμα βινάσσας (Vn) μέσω χημειορόφησης του σουλφιδίου με σκοπό την παραγωγή βιοαερίου και ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Για την προσρόφηση του σουλφιδίου χρησιμοποιήθηκε προσροφητής με βάση τον άνθρακα που παράχθηκε μέσω πυρόλυσης υπολειμμάτων από παραγωγή ελαστικών, προσμεμιγμένος με οξείδιο του ψευδαργύρου. Ακολούθησε αναγέννηση του προσροφητή σε λειτουργία κυψέλης καυσίμου με αφαίρεση του H_2S από τον

προσροφητή μέσω ηλεκτροχημικής οξειδωσης σε αβλαβή θειώδη και θειικά ανιόντα μέσα σε υδατικά διαλύματα. Η ενέργεια που παράγεται στην κυψέλη καυσίμου εξασφαλίζει την ενεργειακή αυτάρκεια του εξοπλισμού. Το καθαρισμένο ρεύμα βινάσσας απαλλαγμένο από τοξικά και διαβρωτικά συστατικά χρησιμοποιήθηκε ως υπόστρωμα για παραγωγή βιοαερίου· η αθροιστική απόδοση βιοαερίου υπερτριπλασιάστηκε σε σύγκριση με την περίπτωση αναφοράς (πριν από την αφαίρεση του σουλφιδίου). Το Διάγραμμα 12 παρουσιάζει τον παραγόμενο όγκο βιοαερίου (α) στην περίπτωση αναφοράς και (β) μετά από την αφαίρεση σουλφιδίου (Beschkon et al., 2025).



Διάγραμμα 12 - Παραγόμενος όγκος βιοαερίου (α) στην περίπτωση αναφοράς και (β) μετά από την αφαίρεση σουλφιδίου (Τροποποίηση από Beschkon et al., 2025)

Οι Chai et al. (2022) υλοποίησαν δοκιμές συγχώνευσης δύο υποστρωμάτων, βινάσσας ζαχαρότευτλων (Vn) και υάκινθου του νερού (WH) με διάφορους λόγους ανάμειξης υπό θερμοφίλες συνθήκες (55 °C) για 60 ημέρες. Η μελέτη έδειξε ότι η συγχώνευση των δύο υποστρωμάτων είχε καλύτερη απόδοση από τη ξεχωριστή χώνευση του καθενός υποστρώματος. Συγκεκριμένα, ο λόγος ανάμειξης Vn:WH ίσος με 1:1 με λόγο εμβολίου προς υπόστρωμα (ISR) ίσο με 0,38 g VS_{εμβολίου} / g VS_{υποστρώματος} αποδείχτηκε ο πιο ευνοϊκός, επιτυγχάνοντας απόδοση μείωσης διαλυτού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (sCOD) ίση με 71,6% και αθροιστική παραγωγή βιοαερίου ίση περίπου με 1.229 mL, δηλαδή μία αύξηση της παραγωγής βιοαερίου ίση περίπου με 25% και 164% σε σύγκριση με τη δοκιμή χώνευσης μόνο ενός υποστρώματος με λόγο ανάμειξης Vn:WH = 0:1 (παραγωγή βιοαερίου περίπου 983

mL) και 1:0 (παραγωγή βιοαερίου περίπου 465 mL), αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι με τη χώνευση μόνο υποστρώματος WH ($ISR=0,22gVS_{\text{εμβολίου}}/gVS_{\text{υποστρώματος}}$) η παραγωγή βιοαερίου ήταν υψηλότερη από την περίπτωση χώνευσης μόνο βινάσσας καθιστώντας, έτσι, τον υάκινθο του νερού ένα κατάλληλο υπόστρωμα για αναερόβια αποδόμηση και παραγωγή ενέργειας.

Οι Di Mario et al. (2025) αρχικά εφάρμοσαν ξήρανση με κατάψυξη (freeze-drying, FD) ως μέθοδο προεπεξεργασίας υγρών αποβλήτων ελαιοτριβείου (OW) πριν από την αναερόβια χώνευσή τους. Η εν λόγω μέθοδος αποτελείται από τρία βήματα - κατάψυξη της βιομάζας σε χαμηλές θερμοκρασίες $-20/-80\text{ }^{\circ}\text{C}$, κύρια ξήρανση και δευτερεύουσα ξήρανση - και, μεταξύ άλλων, επιτυγχάνει αφαίρεση της υγρασίας από τα απόβλητα, αυξάνει την περιεκτικότητα σε άζωτο και καταστρέφει τις μικροβιακές οντότητες στα απόβλητα. Με την εφαρμογή της μεθόδου FD στα υγρά απόβλητα ελαιοτριβείου πριν από την αναερόβια χώνευση αυξήθηκε η παραγωγή βιοαερίου στα 658 mL βιοαερίου ανά γραμμάριο VS σε σύγκριση με τα μη προεπεξεργασμένα απόβλητα OW τα οποία παρήγαγαν μόνο 79 mL βιοαερίου ανά γραμμάριο VS, δηλαδή, παρατηρείται μία αύξηση στην παραγωγή βιοαερίου κατά 733%. Δοκιμή συγχώνευσης, επίσης, διεξήχθη των υγρών αποβλήτων ελαιοτριβείου που έχουν υποβληθεί σε μέθοδο FD (FDOW) με υπόστρωμα που αποτελείται από αναλωμένους κόκκους ζυθοποιίας (BSG). Με τη συγχώνευση των FDOW και των BSG η παραγωγή βιοαερίου αυξήθηκε σε 1.131 mL/g VS από 944 mL/g VS που παράχθηκαν από χώνευση μόνο των BSG, δηλαδή, μία αύξηση κατά 19,8%.

Οι Goshe et al. (2025) διερεύνησαν την περίπτωση αναερόβιας συγχώνευσης υγρών αποβλήτων ζυθοποιίας (BWW) και βιομηχανικής ιλύος που προέρχεται από επεξεργασία σόγιας (SPW). Ύστερα από δοκιμές με διάφορους λόγους ανάμειξης και υδραυλικούς χρόνους παραμονής (HDR) από 10 έως 25 ημέρες υπό μεσόφιλες συνθήκες ($37 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$), διαπιστώθηκε ότι με λόγο ανάμειξης $SPW:BWW = 50:50$ και $HDR = 25$ ημέρες παράχθηκε η υψηλότερη ποσότητα βιοαερίου ίση περίπου με 277,3 ml/ημέρα και περιεκτικότητα σε μεθάνιο ίση περίπου με 65,01, ενώ η υψηλότερη περιεκτικότητα σε μεθάνιο (65,39%) παρατηρήθηκε με έναν λόγο $SPW:BWW = 75:25$ και $HRT = 20$ ημέρες. Για $HDR=25$ ημέρες, η παραγωγή βιοαερίου μόνο από BWW ήταν 75,3 ml/ημέρα και μόνο από SPW ήταν 74 ml/ημέρα, δηλαδή, παρατηρείται μία αύξηση περίπου 268% και 274%, αντίστοιχα.

Στον Πίνακα 8 φαίνονται συνολικά οι μέθοδοι που αναφέρονται σε αυτή την ενότητα.

Πίνακας 8 - Μέθοδοι ενίσχυσης της παραγωγής βιοαερίου

Μέθοδος	Υποστρώματα	Αύξηση παραγωγής βιοαερίου	Βιβλιογραφικές παραπομπές
Αναερόβια συγχώνευση & προσθήκη 25 mg IONP/g VS	CM:OMW=25:75	20,2 %	Al Bkoor Alrawashdeh, K., 2022b
Προεπεξεργασία με Fenton ($H_2O_2=2g/kgVS$ & $Fe^{+2}/H_2O_2 = 0,006$)	OMW	93,75%	Al Bkoor Alrawashdeh, K., 2022a
Αναερόβια συγχώνευση μικρής κλίμακας & θερμοκήπιο (37°C) & χειροκίνητος αναδευτήρας	BM:W=80:20	12,3% + 25%-30% + 15%-20%	Alvarez et al., 2025
Χημειορόφηση H_2S & αφαίρεσή του από τον προσροφητή σε κυψέλη καυσίμου μέσω οξείδωσης σε υδατικό διάλυμα	Vn	260%	Beschkov et al., 2025
Αναερόβια συγχώνευση σε θερμοφίλες συνθήκες, $ISR=0,38gVS_{εμβ.}/gVS_{υποστρ.}$	Vn:WH=1:1	25-164%	Chai et al., 2022
1) Προεπεξεργασία με FD 2) συγχώνευση FDOW+BSG	1) OW 2) FDOW+BSG	1) 733% 2) 19,8%	Di Mario et al., 2025
Αναερόβια συγχώνευση [HDR=25 ημέρες, 37 ± 2 °C]	SPW:BW=50:50	268-274%	Goshe et al., 2025

5.2 Υβριδικά συστήματα ΣΗΘ

Τα υβριδικά συστήματα ανανεώσιμης ενέργειας ενσωματώνουν δύο ή περισσότερες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και μπορούν να ικανοποιούν τις ενεργειακές ανάγκες με εύελκτο τρόπο ακόμη και κατά τη διάρκεια μεταβαλλόμενων περιβαλλοντικών συνθηκών, να μειώνουν την εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα και βελτιστοποιούν την οικονομική αποδοτικότητα (Giedraityte et al., 2025).

Τα συστήματα HRES συμβάλλουν στην αύξηση της ευστάθειας και αξιοπιστίας του δικτύου, τη μείωση της διαλείπουσας λειτουργίας, τον περιορισμό των εκπομπών άνθρακα, και ενισχύουν σημαντικά τις τοπικές κοινωνίες μειώνοντας τα ενεργειακά κόστη και δημιουργώντας θέσεις εργασίας. Αυτά τα συστήματα μπορούν να συνδυάζουν ανανεώσιμες πηγές, όπως εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών συστημάτων, και ανεμογεννήτριες, με συστήματα ΣΗΘ για την πιο περιβαλλοντικά και οικονομικά αποδοτική παραγωγή ηλεκτρικής, θερμικής ενέργειας και ψύξης (Panbechi et al., 2025).

Οι Croce et al. (2025) χρησιμοποίησαν ένα υβριδικό σύστημα που αποτελούταν από δύο μονάδες ΣΗΘ συνολικής ισχύος 400 kW_e τροφοδοτούμενες από βιοαέριο συνδυασμένες με φωτοβολταϊκό σύστημα (Φ/Β) ισχύος 110 kW σε αγροτική επιχείρηση (βόρεια Ιταλία). Για τη διερεύνηση του ρόλου που παίζουν οι πολιτικές στήριξης της ανανεώσιμης ενέργειας, εξετάστηκαν δύο σενάρια: (1) πώληση ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο με εγγυημένη τιμή αγοράς (feed-in tariff) για 15 έτη και (2) πώληση ηλεκτρικής ενέργειας με ωριαία τιμή αγοράς ανά ζώνη στην Ιταλία. Το σενάριο (1) βελτίωσε σημαντικά τα οικονομικά έσοδα με Καθαρές Παρούσες Αξίες (NPV) να υπερβαίνουν τα 6,7 εκατομμύρια € και μία Περίοδο Αποπληρωμής (PBP) περίπου 3 έτη, ενώ με το σενάριο (2) οι NPV έπεσαν κάτω από 1 εκατομμύριο € και η PBP επεκτάθηκε σε 10-11 έτη. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι αυτό το υβριδικό σύστημα παραμένει οικονομικά βιώσιμο ακόμη και χωρίς εγγυημένη τιμή αγοράς και προσφέρει σταθερή και συνεχή ηλεκτρική και θερμική ενέργεια στον τελικό χρήστη αλλά, όμως, ο σχεδιασμός πολιτικών συμβάλλει καθοριστικά στην προώθηση και υιοθέτηση συστημάτων συνδυασμένων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Μελέτη προτεινόμενης υβριδικής διάταξης μικρής κλίμακας αποτελούμενης από μονάδα ΣΗΘ, ανεμογεννήτρια (WT) και φωτοβολταϊκό πάρκο (PV) εξετάζει την απόδοση, καθώς επίσης, και την οικονομική βιωσιμότητα της μονάδας σε σύγκριση με

σύστημα φυσικού αερίου που βασίζεται σε λέβητα φυσικού αερίου για θέρμανση, ηλεκτρικό ψύκτη για ψύξη και το δίκτυο τροφοδοσίας ηλεκτρικής ενέργειας, και με σύστημα που χρησιμοποιεί λέβητα ξυλοτεμαχιδίων για θέρμανση και τον ίδιο εξοπλισμό με το σύστημα φυσικού αερίου για ψύξη και τροφοδοσία ηλεκτρικής ενέργειας (Figaj, 2024). Η μηχανή εσωτερικής καύσης της μονάδας ΣΗΘ τροφοδοτήθηκε με βιοαέριο που προήλθε από την αναερόβια χώνευση υποστρωμάτων υγρής κοπριάς βοοειδών και ενσιρώματος καλαμποκιού. Παρά τη μη ικανοποιητική οικονομική αποδοτικότητα του προτεινόμενου υβριδικού συστήματος χωρίς πολιτικές κεφαλαιακών επενδύσεων ή εγγυημένες τιμές αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, η απόδοσή του ήταν ικανοποιητική από άποψη εξοικονόμησης πρωτογενούς ενέργειας και εκπομπών ισοδύναμου CO₂ (περισσότερο από 60% μείωση και της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας και των εκπομπών ισοδύναμου CO₂). Το προτεινόμενο σύστημα αποδείχτηκε τεχνικά και ενεργειακά εφικτό ικανοποιώντας ένα σημαντικό μέρος των ενεργειακών αναγκών των χρηστών και μειώνοντας την εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα και το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Στον Πίνακα 9 παρουσιάζεται η ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια του προτεινόμενου υβριδικού συστήματος με βάση στοιχεία από Figaj (2024).

Πίνακας 9 - Ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια του προτεινόμενου υβριδικού συστήματος

Ηλεκτρική ενέργεια		
ICE	78,68 MWh	77,5 % της ολικής ετήσιας παραγωγής
WT	17,30 MWh	17,1 % της ολικής ετήσιας παραγωγής
PV	5,49 MWh	5,4 % της ολικής ετήσιας παραγωγής
Ολική ετήσια παραγωγή	101,47 MWh	
Ζήτηση	142,54 MWh	
Προς το δίκτυο	1,82 MWh	1,8 % της ολικής ετήσιας παραγωγής
Από το δίκτυο	42,88 MWh	

ICE: μηχανή εσωτερικής καύσης

WT: ανεμογεννήτρια

PV: εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων

5.3 Επεξεργασία βιοαερίου

Οι Sawalha et al. (2020) μελέτησαν την αφαίρεση H_2S από βιοαέριο μέσω προσρόφησης σε ενεργό άνθρακα που παρασκευάστηκε με σύνθεση από τοπικά διαθέσιμη βιομάζα. Το βιοαέριο παράχθηκε από την αναερόβια χώνευση αποβλήτων που αποτελούνταν από 20 τόνους/ημέρα στερεάς κοπριάς βοοειδών αναμειγμένης με υγρά απόβλητα από εγκατάσταση άμελξης και 60 τόνους/ημέρα υγρής κοπριάς. Η σύνθεση του βιοαερίου ήταν 67,30% CH_4 , 31,90% CO_2 , 0,20% O_2 , 0,07% H_2S , 0,53% άλλα αέρια. Η βιομάζα που χρησιμοποιήθηκε για τη σύνθεση του ενεργού άνθρακα, ήταν απόβλητα που αποτελούνται από κόκκους καφέ, φλοιό ευκάλυπτου και κελύφη αμυγδάλου που υποβλήθηκαν σε πλύση, ξήρανση σε κλίβανο, θρυμματισμό, κοσκίνισμα, πυρόλυση στους 500 °C για 1 ώρα, εμποτισμό χρησιμοποιώντας ως αντιδραστήρια το υδροξείδιο του καλίου (KOH) και χλωριούχο ψευδάργυρο ($ZnCl_2$), ανάδευση στις 300 rpm και θέρμανση στους 80°C. Τα πειράματα προσρόφησης χρησιμοποιώντας φίλτρο σταθερής κλίνης με τον παραχθέντα ενεργό άνθρακα έδειξαν ότι η υψηλότερη ικανότητα προσρόφησης και απόδοση αφαίρεσης υδρόθειου επιτεύχθηκαν με τον ευκάλυπτο (~690 mg H_2S /g προσροφητή), ενώ ακολούθησαν τα κελύφη αμυγδάλου (230 mg H_2S /g προσροφητή) και, τέλος, οι κόκκοι καφέ (22 mg H_2S /g προσροφητή). Το KOH αποδείχτηκε το αντιδραστήριο με την υψηλότερη απόδοση προσρόφησης, ενώ η αύξηση του ύψους της κλίνης κατά τη διάρκεια των δοκιμών αύξησε την ικανότητα προσρόφησης και απόδοση αφαίρεσης.

Μελέτη των Bruna et al. (2024) αφορούσε στην αφαίρεση H_2S από βιοαέριο που παράχθηκε από την αναερόβια χώνευση υγρών αποβλήτων σφαγείου χρησιμοποιώντας μέθοδο χημικής προσρόφησης σε ηλεκτροχημικά παρασκευασμένα διαλύματα που περιείχαν ιόντα σιδήρου III (Fe^{3+}). Το βιοαέριο είχε σύνθεση: $48,8 \pm 1,5\%$ CH_4 , $9,5 \pm 0,3\%$ CO_2 , και 2.068 ± 57 ppm H_2S . Η αποτελεσματικότητα της διεργασίας καθαρισμού καθορίζεται από τον χρόνο απενεργοποίησης κάθε διαλύματος, ο οποίος, είναι επωφελής, να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερος. Τα αποτελέσματα των δοκιμών καθαρισμού έδειξαν ότι τα διαλύματα ιόντων σιδήρου είχαν μία καλή απόδοση αφαίρεσης H_2S σε σύγκριση με το απεσταγμένο νερό. Το διάλυμα που παρασκευάστηκε με pH 7,4 και χρόνο ηλεκτρόλυσης 22,1 λεπτά απέδωσε έναν χρόνο απενεργοποίησης 83% μεγαλύτερο από εκείνον του απεσταγμένου νερού. Καλύτερα αποτελέσματα για τον χρόνο απενεργοποίησης επιτεύχθηκαν όταν χρησιμοποιήθηκαν

διαλύματα με υψηλότερες τιμές pH, με τις τιμές pH πλησίον του 8,0 να είναι οι καλύτερες επιλογές.

Οι Wasajja et al. (2026) διερεύνησαν τη δυνατότητα in situ μείωσης του υδρόθειου σε βιοαέριο χρησιμοποιώντας ούρα βοοειδών ως διαλύτη στην αναερόβια χώνευση κοπριάς βοοειδών αντί για νερό. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι τα ούρα βοοειδών περιέχουν στοιχεία μετάλλων (ο σίδηρος ήταν το κύριο στοιχείο) και χαρακτηρίζονται από ένα σχετικά υψηλό pH (μεγαλύτερο από 7,7) κατά την υδρόλυση. Η προσθήκη ούρων βοοειδών στο υπόστρωμα είχε ως αποτέλεσμα ένα αυξημένο pH μέσα στον αντιδραστήρα χώνευσης σε σύγκριση με τη διάλυση του υποστρώματος με νερό. Το pH και τα ίχνη μετάλλων αποδείχτηκε ότι μπορούν να επηρεάσουν την διεργασία της αναερόβιας χώνευσης και, ως εκ τούτου, τη σύνθεση του βιοαερίου και την περιεκτικότητά του σε H_2S . Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, εάν το μείγμα ούρων βοοειδών/υποστρώματος χαρακτηρίζεται από έναν λόγο Fe:S μεγαλύτερο από 1:0,5 και συνολική περιεκτικότητα σε S μικρότερη από 0,5 mM, τότε η περιεκτικότητα σε H_2S στο βιοαέριο είναι σχετικά χαμηλή. Η χρησιμοποίηση ούρων βοοειδών ως διαλύτη σε υπόστρωμα αναερόβιας χώνευσης αποτελεί, τότε, μία αποτελεσματική in situ λύση καθαρισμού του βιοαερίου από H_2S ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές SOFC.

Σύμφωνα με μελέτη των Wu et al. (2025) αποτελεί εφικτή λύση η χρήση μεμβρανών από πολυδιμεθυλοσιλοξάνιο (PDMS) για να αφαιρούνται τα πτητικά μεθυλοσιλοξάνια (VMS) από το βιοαέριο και για να ενισχύεται η παραγωγή CH_4 . Δοκιμές διαπερατότητας έδειξαν ότι αυτές οι μεμβράνες παρουσιάζουν έναν υψηλό βαθμό διαπερατότητας στο D_4 (διαπερατότητα 1.492,37 GPU). Οι τιμές εκλεκτικότητας για D_4/CH_4 ήταν 75,26, δηλαδή, οι μεμβράνες είχαν ικανότητα για διπλή ανάκτηση D_4 και CH_4 . Πειραματικές και προσομοιωτικές δοκιμές έδειξαν ότι με αύξηση του πάχους του στρώματος της μεμβράνης από 3,32 μm στα 15,72 μm η συγκέντρωση του D_4 μειώθηκε σε 0,79 mg/m³ από μία αρχική τιμή 50 mg/m³, με ένα ποσοστό απώλειας του CH_4 ίσο μόνο με 3,39%. Με εφαρμογή ενός δευτερεύοντος διαχωρισμού με μεμβράνη η απώλεια του CH_4 μειώθηκε περαιτέρω σε 0,37%.

5.4 Αναβάθμιση βιοαερίου

Τεχνολογικές καινοτομίες στα υλικά και στο σχεδιασμό μεμβρανών έχουν ενισχύσει

την εκλεκτικότητα και διαπερατότητά τους βελτιστοποιώντας περαιτέρω τη διεργασία αναβάθμισης του βιοαερίου. Για παράδειγμα, έχουν διερευνηθεί καινούρια πολυμερικά και ανόργανα υλικά, τα οποία προσφέρουν βελτιωμένη αντίσταση στην έμφραξη και αποδόμηση των μεμβρανών. Οι ανόργανες μεμβράνες, για παράδειγμα, από αλουμίνα και ζεόλιθους προσφέρουν εξαιρετική χημική και θερμική ευστάθεια πέρα από την υψηλή ικανότητα διαχωρισμού. Οι κεραμικές μεμβράνες παρουσιάζουν υψηλή εκλεκτικότητα, διαπερατότητα και χημική ευστάθεια. Οι πολυμερικές μεμβράνες είναι η πιο δημοφιλής επιλογή λόγω της οικονομικής αποδοτικότητάς τους, της ικανότητάς τους να διατηρούν ευστάθεια και απόδοση υπό υψηλή πίεση και της ευκολίας στη χρήση τους. Οι μεμβράνες μεικτής μήτρας ενσωματώνουν μικρά σωματίδια, όπως νανοσωλήνες άνθρακα ή ζεόλιθους, σε μία πολυμερική μήτρα συνδυάζοντας την υψηλή εκλεκτικότητα ανόργανων υλικών με την οικονομική αποδοτικότητα και την επεξεργασιμότητα των πολυμερών. Η ενσωμάτωση ανόργανων σωματιδίων στην πολυμερική μήτρα ενισχύει την απόδοση της μεμβράνης και μειώνει τα κόστη σε σύγκριση με τη χρήση μόνο ανόργανων μεμβρανών. Οι μεμβράνες ανθρακούχων μοριακών κόσκινων παρουσιάζουν εξαιρετικά χαρακτηριστικά απόδοσης, κυρίως ως προς την εκλεκτικότητα και διαπερατότητα. Οι ασύμμετρες δομές μεμβρανών και η χρήση πρόσθετων, όπως, πολυβινυλαλκοόλης επίσης, συμβάλλουν στη βελτίωση της απόδοσης. Τεχνολογική πρόοδος έχει σημειωθεί στην ενσωμάτωση συστημάτων μεμβρανών με άλλες τεχνολογίες αναβάθμισης, όπως PSA και χημική προσρόφηση, μία υβριδική προσέγγιση που παρέχει πιο αποδοτικές και οικονομικά βιώσιμες λύσεις ανάλογα με τις ειδικές ανάγκες αναβάθμισης του βιοαερίου (Aguilloso et al., 2024).

Μέθοδος Προσρόφησης με Εναλλαγή Πίεσης Διπλής αναρροής (DR-PSA), μία προηγμένη παραλλαγή των συμβατικών συστημάτων PSA, εφαρμόστηκε σε μείγμα βιοαερίου που περιείχε 45 mol% CO₂ και 55 mol% CH₄ χρησιμοποιώντας γέλη πυριτίας με εκλεκτική δέσμευση CO₂ ως τον στερεό προσροφητή. Τα αποτελέσματα έδειξαν μία σημαντική απόδοση του συστήματος DR-PSA με το οποίο ανακτήθηκαν δύο ρεύματα, ένα ρεύμα από ελαφρύ προϊόν που περιείχε 86% CH₄ με μία καθαρότητα 85,8%, και ένα ρεύμα από βαρύ προϊόν που περιείχε 82,9% CO₂ χρησιμοποιώντας έναν λόγο υψηλής προς χαμηλή πίεση P_H/P_L=5 (Bahrn et al., 2025a).

Μελέτη των Camarillo et al. (2026) διερεύνησε την απόδοση αναβάθμισης χρησιμοποιώντας μία σταθερή κλίνη δύο σταδίων (οξειδίο του σιδήρου (Fe₂O₃) ή

αφαίρεση H_2S και κατόπιν στερεό υδροξείδιο του ασβεστίου ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) για αφαίρεση του CO_2), ενώ πραγματοποιήθηκε επιτόπου επεξεργασία του παραγόμενου βιοαερίου μέσω ημισυνεχούς αναερόβιας συγχώνευσης αποβλήτων φρούτων και λαχανικών, και κοπριάς βοοειδών (λόγος ανάμειξης 30:70). Το παραγόμενο βιοαέριο ήταν $66 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ και το CH_4 ήταν $44,22 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$. Το αναβαθμισμένο αέριο περιείχε ποσότητα CH_4 μεγαλύτερη από 99,4% με σχεδόν πλήρη αφαίρεση του CO_2 (~99,7–99,95%), ενώ το H_2S μειώθηκε σε χαμηλά επίπεδα (0,624–1,54 ppm, περισσότερο από 99%). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αναβάθμιση βιοαερίου σε βιομεθάνιο μπορεί να επιτευχθεί υπό ήπιες συνθήκες λειτουργίας χρησιμοποιώντας στερεούς προσροφητές χαμηλού κόστους σε μία συμπαγή σταθερή κλίνη δύο σταδίων.

5.5 Αναμόρφωση βιοαερίου

Για την παραγωγή πράσινου υδρογόνου μέσω διεργασίας αναμόρφωσης βιοαερίου ενσωματωμένης με δέσμευση CO_2 χρησιμοποιήθηκαν συστήματα διαχωρισμού αερίων με μεμβράνες και τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης διεργασίας αξιολογήθηκαν με βάση τις περιπτώσεις καταλυτικής αναμόρφωσης με ατμό (1) χωρίς δέσμευση CO_2 , (2) με δέσμευση CO_2 πριν από την καύση μέσω χημικής απορρόφησης αερίου – υγρού (χρησιμοποιώντας μεθυλοδιαιθανολαμίνη, MDEA), (3) με δέσμευση CO_2 πριν από την καύση με μεμβράνες, και (4) με δέσμευση CO_2 πριν και μετά από την καύση με μεμβράνες. Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 10, με βάση τους δείκτες απόδοσης για τις τέσσερις υπό εξέταση περιπτώσεις, στην περίπτωση (4) έχει δεσμευθεί σχεδόν εξ ολοκλήρου το CO_2 , ενώ με την τεχνολογία μεμβρανών η ολική απόδοση ενέργειας είναι υψηλή (περίπου 55-60%) παρέχοντας, έτσι, τη δυνατότητα παραγωγής πράσινου υδρογόνου και απανθρακοποιημένης ενέργειας (Cormos et al., 2024).

Πίνακας 10 - Δείκτες απόδοσης παραγωγής πράσινου υδρογόνου μέσω αναμόρφωσης βιοαερίου (Τροποποίηση από Cormos et al., 2024)

Δείκτης απόδοσης	Μονάδες	(1)	(2)	(3)	(4)
Βιοαέριο	t/h	31.16	31.16	35.80	35.80
Θερμική ισχύς από υδρογόνο	MW_{th}	100.00	100.00	100.00	100.00
Καθαρή ισχύς εξόδου	MW_e	6.56	1.10	4.66	-4.59
Θερμική απόδοση υδρογόνου	%	65.72	65.72	57.20	57.20
Καθαρή ηλεκτρική απόδοση	%	4.31	0.72	2.66	-2.62
Συνολική απόδοση ενέργειας	%	70.03	66.44	59.86	54.58
Ποσοστό δέσμευσης CO_2	%	0.00	64.70	55.50	99.60
Ειδικές εκπομπές CO_2	kg/MWh	470.60	175.20	240.78	2.25

Η μετατροπή μεθανίου σε τirkουάζ υδρογόνο οδηγεί σε παραγωγή ενέργειας με αρνητικές εκπομπές άνθρακα. Η τεχνολογία αυτή βασίζεται στην πυρόλυση του μεθανίου που περιέχεται στο βιοαέριο. Η πηγή άνθρακα προέρχεται από βιομάζα και ο άνθρακας δεσμεύεται σε στερεά μορφή. Μελέτη έδειξε ότι η απευθείας μετατροπή του βιοαερίου μέσα σε έναν αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης μπορεί να παράξει ένα αέριο σύνθεσης (syngas) του οποίου η σύνθεση ικανοποιεί τις απαιτήσεις για παραγωγή συνθετικών καυσίμων (σύνθεση μεθανόλης ή παραγωγή υγρού υδρογονάνθρακα μέσω της διεργασίας Fischer-Tropsch). Για την πυρόλυση του βιοαερίου χρησιμοποιήθηκε ο καταλύτης Fe@carbon ως ένας ρευστοποιημένος καταλύτης. Στην καταλυτική μετατροπή του βιοαερίου απαιτούνταν θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 850 °C για την παραγωγή άνθρακα, διαφορετικά ο άνθρακας μετατρέπεται σε CO. Στους 950 °C επιτεύχθηκε αναμόρφωση του βιοαερίου με πολύ υψηλή μετατροπή του μεθανίου (90%) λόγω της πρόσθετης αντίδρασης της ξηράς αναμόρφωσης. Σε αυτή τη θερμοκρασία, η συγκέντρωση του αερίου ήταν H₂=62%, CO=33%, CH₄=4%, CO₂=1%, ενώ η παραγωγή άνθρακα ήταν 0,3 kg⁻¹ kg_{καταλύτη}⁻¹h⁻¹. Ο λόγος H₂ : CO ήταν περίπου 2 : 1, ο οποίος ήταν ιδανικός για τη σύνθεση Fisher-Tropsch ή μεθανόλης (MeOH) (L'hospital et al., 2024).

5.6 Επεξεργασία χωνεμένου υπολείμματος

Οι Bao et al. (2021) ανέπτυξαν ένα ενσωματωμένο σύστημα «προεπεξεργασίας με στροβιλισμό υπό πίεση / καθίζηση μέσω κεκλιμένων πλακών (pressure swirl/inclined plate sedimentation) και διαχωρισμού δύο σταδίων μέσω μεμβρανών υπερδιήθησης / αντίστροφης ώσμωσης (ultrafiltration UF / reverse osmosis RO)» με το οποίο επιτεύχθηκε ταυτοχρόνως πλήρης διαχωρισμός στερεού-υγρού κλάσματος του παραγόμενου χωνεμένου υπολείμματος, ανάκτηση του στερεού κλάσματος, συμπύκνωση του υγρού κλάσματος και ανάκτηση νερού. Το σύστημα UF ήταν μεμβράνη από Φθοριούχο Πολυβινυλιδένιο (PVDF) σε μορφή εμβαπτισμένων κοίλων ινών και το σύστημα RO ήταν μεμβράνη από πολυαμίδιο για θαλασσινό νερό. Το χωνεμένο υπόλειμμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν κοπριά βοοειδών που υποβλήθηκε σε αναερόβια χώνευση σε αντιδραστήρες CSTR σε μεσόφιλες συνθήκες (35°C). μετά τον διαχωρισμό, το στερεό κλάσμα μπορούσε να εφαρμοστεί ως οργανικό λίπασμα. Το υγρό κλάσμα συμπυκνώθηκε περισσότερες από 3,7 (αρχικά μέσω UF) και 6,6 φορές

(δευτερευόντως μέσω RO), το ποσοστό ανάκτησης νερού ήταν 46,9%, το ποσοστό ανάκτησης θρεπτικών συστατικών ήταν περίπου 100%, το ποσοστό αφαίρεσης COD ήταν 99,9%, το ποσοστό ανάκτησης υγρού ήταν 94%.

Οι Visca et al. (2021) διερεύνησαν την παρουσία υπολειμμάτων αντιβιοτικών και των αντίστοιχών τους ανθεκτικών στα αντιβιοτικά γονιδίων (ARG) σε δείγματα χωνέματος που ελήφθησαν μετά από αναερόβια χώνευση κοπριάς βοοειδών και πριν από τον διαχωρισμό του σε στερεό και υγρό κλάσμα. Η μονάδα βιοαερίου περιλάμβανε δύο χωνευτήρες σε σειρά, όγκου 1.300 m³ έκαστος, οι οποίοι λειτουργούσαν σε μεσόφιλες συνθήκες (33–35 °C) με HRT 45 ημερών και τροφοδοτούνταν ημερησίως με 70 m³ υποστρώματος, ενώ παραγόταν ίση ποσότητα χωνεμένου υπολείμματος. Τα δείγματα υποστρώματος και χωνεμένου υπολείμματος εξετάστηκαν για παρουσία σουλφαμεθοξαζόλης (SMX), σιπροφλοξασίνης (CIP), ενροφλοξασίνης (ENR), και των ARG τους για ένα έτος. Τα συνολικά αποτελέσματα στα δείγματα χωνεμένου υπολείμματος έδειξαν μείωση και των αντιβιοτικών και των ARG κατά τη διάρκεια της αναερόβιας χώνευσης. Συγκεκριμένα, η SMX μειώθηκε έως 100%, η CIP έως 92% και η ENR έως 84%, ενώ τα ARG μειώθηκαν έως 80%.

5.7 Μείωση εκπομπών μεθανίου από μονάδες παραγωγής βιοαερίου

Οι μονάδες βιοαερίου και οι μονάδες επεξεργασίας λυμάτων αποτελούν σημαντικές πηγές εκπομπών μεθανίου με αθροιστικό μερίδιο συμμετοχής περίπου 40% στον τομέα αποβλήτων του Εθνικού Καταλόγου Εκπομπών της Ελβετίας (Bühler et al., 2022).

Σε μονάδες βιοαερίου στη Δανία οι μετρήσεις έδειξαν διαρροές μεθανίου συχνά στους αντιδραστήρες (59% των εγκαταστάσεων) και στις δεξαμενές βιομάζας/χωνέματος (67% των εγκαταστάσεων). Η αποθήκευση χωνέματος σε ανοιχτές δεξαμενές χωρίς συλλογή αερίου ήταν μία συχνή πηγή εκπομπών CH₄. Οι ανακουφιστικές βαλβίδες πίεσης ήταν μία συνήθης αιτία των εκπομπών αυτών (Fredenslund et al., 2023).

Οι διαρροές μεθανίου προέρχονται από εξοπλισμό υπό πίεση και άκαυστο μεθάνιο από μηχανές και πυρσό βιοαερίου. Εκτενείς και ακριβείς μετρήσεις αυτών των εκπομπών είναι αναγκαίες για την ποσοτικοποίησή τους και, άρα, τη λήψη των απαραίτητων μέτρων για τη μείωσή τους (Baldé et al., 2022).

Σε μελέτη που διεξήγαγαν οι Baldé et al. (2022) μετρήθηκαν για ένα έτος οι

εκπομπές μεθανίου από δύο μονάδες βιοαερίου εκ των οποίων η μία (Α) διέθετε έναν αναερόβιο χωνευτήρα δύο σταδίων που λειτουργούσε σε μεσόφιλες συνθήκες με συνολικό υδραυλικό χρόνο παραμονής 60 ημερών και δεχόταν ένα μείγμα κοπριάς βοοειδών και υλικών εκτός φάρμας (π.χ., υπολείμματα τροφών) και η άλλη μονάδα (Β) είχε έναν αναερόβιο χωνευτήρα ενός σταδίου που λειτουργούσε, επίσης, σε μεσόφιλες συνθήκες με υδραυλικό χρόνο παραμονής 27 ημερών και δεχόταν ένα μείγμα κοπριάς βοοειδών και υλικών εκτός φάρμας. Στη μονάδα (Α) το στερεό κλάσμα του χωνεμένου υπολείμματος αποθηκευόταν σε έναν σωρό μέσα σε εσωτερικό χώρο, ενώ το υγρό κλάσμα αποθηκευόταν σε κοντινή δεξαμενή αποθήκευσης από σκυρόδεμα ή σε χωμάτινη αποθήκη εκτός των εγκαταστάσεων. Στη μονάδα (Β) το χωνεμένο υπόλειμμα αποθηκευόταν σε μία ακάλυπτη χωμάτινη αποθήκη. Για την ποσοτικοποίηση των εκπομπών μεθανίου χρησιμοποιήθηκαν λέιζερ ανοικτής διαδρομής (open path laser) που επιτρέπουν τη μη επεμβατική μέτρηση σύνθετων πηγών CH_4 στις μονάδες βιοαερίου. Στη μονάδα (Α) οι απώλειες CH_4 εντοπίστηκαν, κυρίως, στην αποθήκη του χωνεμένου υπολείμματος (5,8% του παραγόμενου μεθανίου), στα σημεία διαρροών/αερισμού (5,5%) και στον πυρσό βιοαερίου (0,2%). Στη μονάδα (Β) οι απώλειες από την αποθήκη χωνεμένου υπολείμματος ήταν υψηλότερες (10,7%) κυρίως λόγω μικρότερου υδραυλικού χρόνου παραμονής. Οι διαφεύγουσες εκπομπές από διαρροές ήταν αρχικά 3,8% αλλά μειώθηκαν σε 0,6% μετά την επισκευή της μεμβράνης του χωνευτήρα.

Ο αυξανόμενος αριθμός των λειτουργικών μονάδων βιοαερίου στο Ηνωμένο Βασίλειο έχει δημιουργήσει μία καινούρια πηγή εκπομπών CH_4 , επομένως, πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα για παρακολούθηση, ποσοτικοποίηση και μείωσή τους ώστε να μην εκλύονται στην ατμόσφαιρα ενισχύοντας περαιτέρω το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Οι Bakaloglu et al. (2021) πραγματοποίησαν μελέτη για την ποσοτικοποίηση εκπομπών μεθανίου από 10 μονάδες βιοαερίου στο ΗΒ, εκ των οποίων οι 4 (Α έως Δ) χρησιμοποίησαν ως υπόστρωμα υπολείμματα τροφίμων, οι 6 (Ε έως Ι) χρησιμοποίησαν γεωργικά απόβλητα (κοπριές βοοειδών, ενεργειακές καλλιέργειες, ενσιρώματα, κ.τ.λ.). Ύστερα από μετρήσεις διαπιστώθηκε ότι οι εκπομπές μεθανίου κυμαίνονταν μεταξύ 0,1 και 58,7 $\text{kg CH}_4 \text{ h}^{-1}$ και το ποσοστό απωλειών σε σχέση με το υπολογισμένο ποσοστό παραγωγής κυμαινόταν μεταξύ 0,02 και 8,1%. Ο μέσος ρυθμός εκπομπών ήταν 15,9 $\text{kg CH}_4 \text{ h}^{-1}$ και το μέσο ποσοστό

απωλειών ήταν 3,7%. Γενικά, τα ποσοστά εκπομπών μεθανίου από μικρότερες μονάδες βιοαερίου ήταν υψηλότερα από τις μεγαλύτερες μονάδες βιοαερίου με υπόστρωμα τα υπολείμματα τροφών. Επίσης, σύμφωνα με τους Bakkaloglu et al. (2021) οι εκπομπές μεθανίου από μονάδες βιοαερίου μπορεί να ευθύνονται για το 0,4-3,8% με μία μέση τιμή 1,9% των συνολικών εκπομπών μεθανίου στο HB εκτός από τις μονάδες βιοαερίου με υπόστρωμα ιλύος από επεξεργασία λυμάτων.

5.8 Εφαρμογή Τεχνητής Νοημοσύνης στην τεχνολογία βιοαερίου

Οι διακυμάνσεις που παρουσιάζουν σημαντικές μεταβλητές εισόδου, όπως η πίεση εισόδου και ο ρυθμός ροής του βιοαερίου, και η περιεκτικότητα σε μεθάνιο, επηρεάζουν αρνητικά τη σταθερότητα και τη βελτιστοποίηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η βελτιστοποίηση τέτοιων επιδραστικών παραμέτρων μπορεί να επιτευχθεί μέσω μοντέλων τεχνητής νοημοσύνης (AI) με σκοπό τη μεγιστοποίηση της απόδοσης μίας μονάδας βιοαερίου (Abdurrakhman et al., 2024).

- **Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο με Αλγόριθμο Προσαρμοστικής Οπισθοδιάδοσης και Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων (ABNN-PSO) για τη βελτιστοποίηση της ισχύος εξόδου μίας ηλεκτρικής γεννήτριας βιοαερίου**

Οι Abdurrakhman et al. (2024) χρησιμοποιούν ένα μοντέλο AI, και πιο συγκεκριμένα, ένα Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο (ANN), το οποίο ενσωματώνει έναν αλγόριθμο Προσαρμοστικής Οπισθοδιάδοσης (Adaptive Back-Propagation, ABP) για μοντελοποίηση, σε συνδυασμό με μία προσέγγιση που βασίζεται στη Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization, PSO) για τη βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων του μοντέλου δικτύου. Με αυτό το ενισχυμένο μοντέλο ABNN-PSO δύναται να εξασφαλίζεται η βελτιστοποίηση των παραμέτρων εισόδου – πίεσης εισόδου βιοαερίου, περιεκτικότητας του βιοαερίου σε μεθάνιο και ρυθμού ροής του βιοαερίου – οι οποίες επηρεάζουν την ισχύ εξόδου της ηλεκτρικής γεννήτριας.

Τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται στην τεχνητή νοημοσύνη μιμούμενα τον ανθρώπινο εγκέφαλο για διάφορες εφαρμογές, για παράδειγμα, για αναγνώριση μοτίβων, κατηγοριοποίηση δεδομένων και προβλεπτική ανάλυση. Μπορούν να μαθαίνουν από την εμπειρία και αποτελούνται από διασυνδεδεμένους νευρώνες, με τις συνδέσεις μεταξύ τους να λαμβάνουν αριθμητικές τιμές, τα «βάρη» (Abdurrakhman et

al., 2024).

Στον αλγόριθμο Οπισθοδιάδοσης (Back-Propagation) το σύνολο δεδομένων που συλλέγεται διαιρείται στις εξής βασικές φάσεις: εκπαίδευση χρησιμοποιώντας το μεγαλύτερο μέρος του συνόλου δεδομένων (training), επικύρωση της ακρίβειας του μοντέλου (validation), δοκιμή του μοντέλου (testing) και πρόβλεψη (forecasting). Το δίκτυο χρησιμοποιεί ενημερωμένα βάρη σε μία επανάληψη εκπαίδευσης, η οποία οδηγεί στην ενίσχυση της απόδοσης του μοντέλου και την επίτευξη ακριβούς αποτελέσματος με ένα ελάχιστο Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα (MSE) (Abdurakhman et al., 2024).

Η Προσαρμοστική Οπισθοδιάδοση (ABP) αντιμετωπίζει τα προβλήματα σωρευτικών σφαλμάτων και ανεπαρκών δεδομένων εκπαίδευσης λαμβάνοντας υπόψη τις αποκλίσεις μεταξύ εκπαιδευόμενων και επικείμενων συνόλων δεδομένων και, έτσι, προσαρμόζει τις τιμές πρόβλεψης. Ο αλγόριθμος ABP παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των παραδοσιακών νευρωνικών δικτύων, όπως η μείωση του χρόνου εκπαίδευσης του μοντέλου, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ακρίβεια και αποτελεσματικότητα. Το Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο Προσαρμοστικής Οπισθοδιάδοσης (ABNN) απαιτεί λιγότερες επαναλήψεις προκειμένου να επιτευχθεί η σύγκλιση, κάτι που βελτιώνει την ταχύτητα και τον ρυθμό εκπαίδευσης, ενώ επιπλέον επιτρέπεται στο δίκτυο να αναγνωρίζει τον ελάχιστο αποδεκτό ρυθμό σφάλματός του. Έτσι, το δίκτυο αποκτά τη μέγιστη δυνατότητα μάθησης με βάση την ποιότητα και ποσότητα των δεδομένων εκπαίδευσης με αποτέλεσμα να αποτρέπονται προβλήματα υπερεκπαίδευσης (overfitting) και υποεκπαίδευσης (underfitting) του αλγόριθμου. Η ικανότητα διαχείρισης μη γραμμικών δεδομένων υψηλής πυκνότητας και υπολογιστικά πολύπλοκων προβλημάτων καθιστά το ABNN ένα ενισχυμένο μοντέλο που μπορεί να προβλέπει αποτελεσματικά και με ακρίβεια την ισχύ εξόδου μίας ηλεκτρικής γεννήτριας βιοαερίου (Abdurakhman et al., 2024).

Η Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων (PSO) είναι ένας εξαιρετικά δημοφιλής αλγόριθμος Νοημοσύνης Σμήνους (Swarm Intelligence), ο οποίος χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης (Zhao et al., 2023). Η PSO σχεδιάζεται έχοντας ως πρότυπο τις συντονισμένες συμπεριφορές που παρουσιάζουν τα σμήνη πτηνών. Μία ομάδα σωματιδίων δημιουργείται μέσω μίας τυχαίας διαδικασίας εντός προκαθορισμένων ορίων και αναζητά λύσεις. Κάθε σωματίδιο αυτής της ομάδας

αντιπροσωπεύει μία συγκεκριμένη θέση ή επίλυση για ένα δεδομένο πρόβλημα. Καθώς τα σωματίδια μετακινούνται εντός της περιοχής εξερεύνησης, προσαρμόζουν τις θέσεις τους για την ανακάλυψη των πιο ευνοϊκών λύσεων. Έτσι, διευκολύνεται η ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ τους και ενισχύεται η αποτελεσματικότητα της προσπάθειας αναζήτησης. Η επαναληπτική διαδικασία αναζήτησης συνεχίζεται για έναν προκαθορισμένο αριθμό κύκλων και η απόδοση κάθε λύσης αξιολογείται με μία συνάρτηση καταλληλότητας (fitness function). Η PSO αποτελεί μία αξιοσημείωτη εξέλιξη στον τομέα της βελτιστοποίησης (Abdurrakhman et al., 2024). Τα κύρια οφέλη της είναι η απλότητά της και η ευκολία υλοποίησής της λόγω του μικρού αριθμού παραμέτρων που απαιτεί για να λειτουργεί αποτελεσματικά (Zhao et al., 2023). Η PSO μπορεί να καθορίζει τις βέλτιστες τιμές για κάθε μεταβλητή επηρεάζοντας την ισχύ εξόδου της ηλεκτρικής γεννήτριας (Abdurrakhman et al., 2024).

Σύμφωνα με τους Abdurrakhman et al. (2024) η ανάπτυξη του συνδυασμένου μοντέλου ABNN-PSO βασίζεται στα εξής βασικά στάδια:

συλλογή δεδομένων από ένα σύστημα παρακολούθησης IoT (Διαδίκτυο των Πραγμάτων, συνδέει μηχανές και ανθρώπους επιτρέποντας την ταχεία ανταλλαγή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο σε διαφορετικά δίκτυα), το οποίο περιλαμβάνει αισθητήρες πίεσης βιοαερίου, αερίου CH_4 , ρυθμού ροής και ισχύος εξόδου της ηλεκτρικής γεννήτριας βιοαερίου,

επεξεργασία των συλλεγόμενων δεδομένων και μοντελοποίηση της σχέσης μεταξύ των μεταβλητών εισόδου (πίεσης εισόδου βιοαερίου, περιεκτικότητας του βιοαερίου σε μεθάνιο και ρυθμού ροής του βιοαερίου) και της μεταβλητής εξόδου (ισχύος εξόδου της γεννήτριας) χρησιμοποιώντας το νευρωνικό δίκτυο, και

χρήση του αλγόριθμου PSO με είσοδο το αποτέλεσμα μοντελοποίησης για τον καθορισμό ενός βέλτιστου συνδυασμού μεταβλητών εισόδου που μεγιστοποιεί τη μεταβλητή εξόδου.

Η αποτελεσματικότητα των προβλέψεων του μοντέλου ABNN-PSO αξιολογείται με έναν υψηλό συντελεστή προσδιορισμού, R^2 , ίσο με 0,98567 για εκπαίδευση και 0,98513 για δοκιμή και ένα πολύ μικρό Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα, MSE, ίσο με 0,0010507, επιδεικνύοντας, έτσι, υψηλή αξιοπιστία και ακρίβεια.

Το αναπτυγμένο μοντέλο ABNN-PSO επιτυγχάνει την αναγνώριση των κατάλληλων λειτουργικών παραμέτρων και την ακριβή πρόβλεψη της ισχύος εξόδου

της ηλεκτρικής γεννήτριας βιοαερίου. Οι βέλτιστες τιμές της πίεσης εισόδου είναι 34,36 kPa, της περιεκτικότητας του βιοαερίου σε μεθάνιο είναι 90% και του ρυθμού ροής εισόδου είναι 0,22 l/s. Με τις ανωτέρω τιμές επιτυγχάνεται μεγιστοποίηση της ισχύος εξόδου, η οποία δύναται να φτάνει έως 1,42 kW με μία τυπική απόκλιση 10,6% (Πίνακας 11).

Πίνακας 11 – Τιμές του μοντέλου ABNN-PSO

Είσοδοι	Βέλτιστες τιμές Εισόδων	Έξοδοι	Μέγιστη τιμή Εξόδου
Πίεση εισόδου	34,36 kPa		
Περιεκτικότητα σε μεθάνιο	90%	Ισχύς ηλεκτρικής γεννήτριας βιοαερίου	1,42 kW
Ρυθμός ροής εισόδου	0,22 l/s		

- **Πολυ-κριτηριακή Βελτιστοποίηση (MOO) της διεργασίας Προσρόφησης με Εναλλαγή Πίεσης Διπλής Αναρροής (DR-PSA) με τη βοήθεια Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων Πρόσθιας Τροφοδότησης με Οπισθοδιάδοση (FBPNN/NSGA-II) για αναβάθμιση βιοαερίου**

Οι Bahrn et al. (2025b) εφαρμόζουν τη διεργασία Προσρόφησης με Εναλλαγή Πίεσης Διπλής αναρροής (DR-PSA), η οποία είναι μία προηγμένη παραλλαγή των συμβατικών συστημάτων Προσρόφησης με Εναλλαγή Πίεσης (PSA) και έχει τη δυνατότητα να διαχωρίζει τα κύρια συστατικά του βιοαερίου (CH_4 και CO_2) κατά τη διάρκεια της αναβάθμισης βιοαερίου με υψηλό βαθμό καθαρότητας και ανάκτησης. Προβλήματα εγγενών αντισταθμίσεων μεταξύ καθαρότητας CH_4 στο ελαφρύ προϊόν (βιομεθάνιο) / παραγωγικότητας κλίνης και παραγωγικότητας κλίνης / έργου κύκλου, καθιστούν αναγκαία τη χρησιμοποίηση της MOO για την εξισορρόπηση αυτών των αντισταθμίσεων, και έτσι τη βελτιστοποίηση της διεργασίας DR-PSA.

Η MOO στοχεύει στην εύρεση βέλτιστων λύσεων μεταξύ αυτών των αντικρουόμενων κριτηρίων, και συγκεκριμένα, στη μεγιστοποίηση της καθαρότητας CH_4 στο ελαφρύ προϊόν (βιομεθάνιο) με τη μέγιστη δυνατή παραγωγικότητα κλίνης και το ελάχιστο δυνατό έργο κύκλου.

Για την εφαρμογή της MOO χρησιμοποιούνται Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα

Πρόσθιας Τροφοδότησης με Οπισθοδιάδοση (Feed-forward Back-Propagation Neural Network, FBPNN) ως υποκατάστατα μοντέλα για την ακριβή και αξιόπιστη πρόβλεψη των δεικτών απόδοσης της διεργασίας DR-PSA.

Τα μοντέλα ANN σχεδιάζονται με ένα κρυφό επίπεδο και αναπτύσσονται με διάφορες δομές και αλγόριθμους εκπαίδευσης και ενσωματώνονται στον γενετικό αλγόριθμο μη κυριαρχούμενης ταξινόμησης – II (NSGA-II). Ο αλγόριθμος NSGA-II είναι ένας από τους πιο αποτελεσματικούς γενετικούς αλγόριθμους της MOO κυρίως λόγω της ικανότητάς του να επιλύει προβλήματα υψηλής υπολογιστικής πολυπλοκότητας, ιδιαιτέρως, όταν συνδυάζεται με υποκατάστατα μοντέλα ANN.

Κάθε μοντέλο ANN αποτελείται από τρία επίπεδα, το επίπεδο εισόδου, το κρυφό επίπεδο, και το επίπεδο εξόδου, τα οποία συνδέονται με νευρώνες και έχει τρεις μεταβλητές εισόδου που αντιπροσωπεύουν τις παραμέτρους που επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος, οι οποίες είναι ο χρόνος τροφοδότησης/αναρροής ελαφρού προϊόντος (χρόνος τροφοδ./αν. ε. π.), ο λόγος αναρροής ελαφρού προϊόντος (λόγος αν. ε. π.), το ύψος στήλης κλίνης, και μία έξοδο που αντιστοιχεί σε κάθε έναν από τους δείκτες απόδοσης της διεργασίας DR-PSA, δηλαδή την καθαρότητα μεθανίου στο ελαφρύ προϊόν, την ανάκτηση μεθανίου στο ελαφρύ προϊόν, την παραγωγικότητα κλίνης και το έργο κύκλου.

Τα μοντέλα ANN για καθαρότητα CH₄ στο ελαφρύ προϊόν, ανάκτηση CH₄ στο ελαφρύ προϊόν και έργο κύκλου παρουσιάζουν υψηλή ακρίβεια πρόβλεψης με R² ίσο με 0,9975, 0,9928 και 0,9959, αντίστοιχα, και MSE ίσο με 0,0022, 0,0059 και 0,4943, αντίστοιχα, ενώ, το ανεπτυγμένο μοντέλο για παραγωγικότητα κλίνης παρουσιάζει υψηλή ακρίβεια με R² ίσο με 0,9988 και MSE ίσο με 0,0000 (δεδομένα δοκιμής και εκπαίδευσης).

Η βέλτιστη λύση επιλέγεται με βάση την υψηλότερη δυνατή καθαρότητα μεθανίου που επιτυγχάνεται με καθαρότητα μεθανίου στο ελαφρύ προϊόν ίση με 91,63%, ανάκτηση CH₄ στο ελαφρύ προϊόν ίση με 91,33%, παραγωγικότητα κλίνης ίση με 1,18 mol CH₄ h⁻¹ kg⁻¹ και έργο κύκλου ίσο με 47,22 kJ mol⁻¹ CH₄ (που δεσμεύεται) για χρόνο τροφοδότησης/αναρροής ελαφρού προϊόντος ίσο με 57,63 s, λόγο αναρροής ελαφρού προϊόντος ίσο με 0,21 και ύψος στήλης κλίνης ίσο με 1,20 m (Πίνακας 12).

Πίνακας 12 – Τιμές του μοντέλου FBPNN/ NSGA-II

Είσοδοι	Βέλτιστες τιμές Εισόδων	Εξοδοι	Μέγιστες τιμές Εξόδων
Χρόνος τροφοδ./αν. ε. π.	57,63 s	Καθαρότητα CH ₄ στο ε. π.	91,63%
Λόγος αν. ε. π.	0,21	Ανάκτηση CH ₄ στο ε. π.	91,33%
Ύψος στήλης κλίνης	1,20 m	Παραγωγικότητα κλίνης	1,18 mol CH ₄ h ⁻¹ kg ⁻¹
		Έργο κύκλου	47,22 kJ mol ⁻¹ CH ₄ που δεσμεύεται

- Υβριδικό μοντέλο μοντελοποίησης και βελτιστοποίησης με παλινδρόμηση σε Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ANN) και τροποποιημένες εκδοχές των αλγορίθμων MDE, MNM, MSA και MRS για την επιλογή βέλτιστης θέσης εγκατάστασης μονάδας βιοαερίου

Σύμφωνα με τους Ceylan et al. (2023) μπορεί να επιλεγθεί η βέλτιστη θέση εγκατάστασης μονάδας βιοαερίου χρησιμοποιώντας υβριδικό μοντέλο με βάση τη μέθοδο παλινδρόμησης σε νευρωνικά δίκτυα (neuro-regression) και τροποποιημένες εκδοχές αλγορίθμων βελτιστοποίησης, και συγκεκριμένα, των αλγορίθμων Διαφορικής Εξέλιξης (Modified Differential Evolution, MDE), Nelder-Mead (Modified Nelder-Mead, MNM), Προσομοιωμένης Ανόπτησης (Modified Simulated Annealing, MSA), και Τυχαίας Αναζήτησης (Modified Random Search, MRS) για την επίλυση των προβλημάτων (Ceylan et al., 2023).

Η παλινδρόμηση σε νευρωνικά δίκτυα (neuro-regression) είναι μία προηγμένη τεχνική μαθηματικής μοντελοποίησης, η οποία συνδυάζει τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα με ανάλυση παλινδρόμησης. Προκειμένου να διευκολυνθεί η διαδικασία μοντελοποίησης, το σύνολο δεδομένων διαιρείται σε υποσύνολα εκπαίδευσης, δοκιμής, και επικύρωσης. Στη φάση εκπαίδευσης, το 80% του συνόλου δεδομένων χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των συντελεστών του μοντέλου με αποτέλεσμα την υψηλότερη δυνατή ακρίβεια πρόβλεψης των πραγματικών τιμών, ενώ το υπόλοιπο 20% δεσμεύεται για δοκιμή και επικύρωση επιτρέποντας μία αξιολόγηση της απόδοσης πρόβλεψης του μοντέλου για τα αθέατα δεδομένα (Savran, 2024).

Οι μονοκριτηριακές και πολυκριτηριακές προσεγγίσεις οδηγούν στην επίτευξη του βέλτιστου σχεδιασμού του συστήματος. Οι τροποποιημένες εκδοχές των μεθόδων βελτιστοποίησης (MDE, MNM, MSA, MRS) χρησιμοποιούνται για την επίλυση των προβλημάτων (Ceylan et al., 2023).

Ο τροποποιημένος αλγόριθμος MDE είναι ένας συνδυασμός της συμβατικής μεθόδου Διαφορικής Εξέλιξης (Differential Evolution) και της μεθόδου εσωτερικών σημείων (interior point). Επίσης, η αντικειμενική συνάρτηση πρέπει να είναι ομαλή και να έχει την πρώτη και δεύτερη παράγωγο. Το γενικό πρόβλημα περιορισμένης βελτιστοποίησης (constrained optimization) μετατρέπεται αρχικά στην τυπική μορφή. Προκειμένου να εξασφαλιστεί σύγκλιση, χρησιμοποιείται μία επανυζημένη συνάρτηση αξίας Langrange (augmented Lagrangian merit function) (Ceylan et al., 2023).

Ο τροποποιημένος αλγόριθμος MNM είναι μία παραλλαγή της μεθόδου Nelder-Mead, στον οποίο έχει προστεθεί μία συνάρτηση ποινής (penalty function) για την επίλυση προβλημάτων περιορισμένης βελτιστοποίησης (Ceylan et al., 2023).

Ο τροποποιημένος αλγόριθμος MSA αποτελεί έναν συνδυασμό συμβατικής μεθόδου Προσομοιωμένης Ανόπτησης (Simulated Annealing) και αλγορίθμων κύριων αξόνων (principal axis) (Ceylan et al., 2023).

Ο τροποποιημένος αλγόριθμος MRS αποτελεί συνδυασμό αλγορίθμων Τυχαίας Αναζήτησης (Random Search) και Levenberg-Marquardt στο τελικό βήμα και πρόκειται για μία σημαντική μέθοδο για την αξιολόγηση της σύγκλισης (Ceylan et al., 2023).

Η μοντελοποίηση του συστήματος πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας ως μεταβλητές εισόδου δύο συντεταγμένες (βόρειο παράλληλο, ανατολικό μεσημβρινό), και τέσσερις εξόδους, (1) την ποσότητα ισχύος που παράγεται από βιοαέριο που προέρχεται από τη χρησιμοποίηση του συνολικού πληθυσμού ζώων, (2) του πληθυσμού μόνο των βοοειδών, (3) μόνο των μικρών βοοειδών και (4) μόνο των πουλερικών. Ο στόχος είναι ο βέλτιστος καθορισμός των παραμέτρων του συστήματος που μεγιστοποιεί την ποσότητα ισχύος που παράγεται από βιοαέριο που προέρχεται από απόβλητα ζώων (Ceylan et al., 2023).

Για την Έξοδο (1) επιλέγεται υβριδικό μοντέλο νευρωνικού δικτύου παλινδρόμησης με R^2 ίσο με 0,951 (εκπαίδευση) και 0,994 (δοκιμή), για την Έξοδο (2)

μοντέλο με R^2 ίσο με 0,987 (εκπαίδευση) και 0,992 (δοκιμή), για την Έξοδο (3) μοντέλο με R^2 ίσο με 0,992 (εκπαίδευση) και 0,987 (δοκιμή), και για την Έξοδο (4) μοντέλο με R^2 ίσο με 0,983 (εκπαίδευση) και 0,996 (δοκιμή).

Οι αναλύσεις πραγματοποιούνται εφαρμόζοντας τους περιορισμούς στις παραμέτρους εξόδου του συστήματος με βάση τα κατάλληλα μοντέλα· η αύξηση του αριθμού των περιορισμών συμβάλλει στην προσέγγιση των βέλτιστων αποτελεσμάτων με την πραγματικότητα.

Αποτέλεσμα της ανάλυσης του προτεινόμενου υβριδικού μοντέλου είναι η εύρεση της μέγιστης ποσότητας ηλεκτρικής ισχύος, η οποία προέρχεται από όλα τα ζώα (Έξοδος 1), είναι ίση με 68 GWh και αντιστοιχεί σε συντεταγμένες $x_1=38.50748061663436$ (βόρειος παράλληλος) και $x_2=28.092300414368328$ (ανατολικός μεσημβρινός) (θέση Salihli, Gölmarmara και Ahmetli στην περιοχή Manisa, Τουρκία) (Πίνακας 13).

Πίνακας 13 – Τιμές του μοντέλου ANN /MDE, MNM, MSA και MRS

Είσοδοι	Βέλτιστες τιμές Εισόδων	Έξοδος	Μέγιστη τιμή Εξόδου
Συντεταγμένες			
(βόρειος παράλληλος, ανατολικός μεσημβρινός)	$x_1=38.50748061663436$ $x_2=28.092300414368328$	Ηλεκτρική ισχύς από συνολικό πληθυσμό ζώων	68 GWh

- **Συνδυασμός Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου Εμπρόσθιας Τροφοδότησης (FFNN) και Μεθοδολογίας Επιφάνειας Απόκρισης (RSM) για τη βελτιστοποίηση της αναερόβιας χώνευσης υγρών αποβλήτων από μονάδα παραγωγής φοινικέλαιου (POME) με προσθήκη βιοάνθρακα (BC)**

Οι Chang et al. (2025) εφαρμόζουν νευρωνικό δίκτυο εμπρόσθιας τροφοδότησης (feed-forward neural network, FFNN) χρησιμοποιώντας περιβάλλον MATLAB R2020b για τη μοντελοποίηση και την πρόβλεψη των περίπλοκων σχέσεων μεταξύ πολλαπλών παραμέτρων που επηρεάζουν την διεργασία της αναερόβιας χώνευσης. Η βελτιστοποίηση της διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης επιτυγχάνεται με τη χρησιμοποίηση της RSM μέσω συστηματικής ανάλυσης των επιδράσεων διάφορων

παραμέτρων εισόδου στις μεταβλητές εξόδου και της αναγνώρισης του βέλτιστου συνδυασμού τους. Σκοπός της βελτιστοποίησης είναι η μεγιστοποίηση της παραγωγής βιοαερίου και της απόδοσης μεθανίου, όπως επίσης και η ελαχιστοποίηση της δόσης βιοάνθρακα, και, άρα, η μείωση του λειτουργικού κόστους. Ο συνδυασμός FFNN/RSM προσφέρει βελτιωμένη ακρίβεια διεργασίας, απόδοση και οικονομική βιωσιμότητα.

Γενικά, τα μοντέλα ANN χρησιμοποιούνται ευρέως για την παραγωγή βιοαερίου από διάφορα υποστρώματα στην αναερόβια χώνευση. Συγκεκριμένα, επιδεικνύουν υψηλή ακρίβεια πρόβλεψης όταν το υπόστρωμα είναι υγρά απόβλητα από εργοστάσιο παραγωγής φοινικέλαιου.

Οι επιλεγόμενες μεταβλητές εισόδου του μοντέλου FFNN είναι ο λόγος τροφοδοσίας προς εμβόλιο (FI), η δόση βιοάνθρακα (BC), και το οργανικό φορτίο (OL), ενώ οι μεταβλητές εξόδου είναι τέσσερις : παραγωγή βιοαερίου, σύνθεση μεθανίου, απόδοση μεθανίου και αφαίρεση ολικών στερεών. Έμφαση δίνεται, κυρίως, σε δύο εξόδους, την παραγωγή βιοαερίου και την απόδοση μεθανίου.

Το μοντέλο παρουσιάζει υψηλή ακρίβεια πρόβλεψης με R^2 ίσο με 0,9999 και MSE ίσο με 143 mL² για αθροιστικό όγκο βιοαερίου (mL), και R^2 ίσο με 0,9999 και MSE ίσο με 2,5 L² CH₄/g² VS για απόδοση μεθανίου (L CH₄/g VS).

Η βελτιστοποίηση μέσω RSM δείχνει ότι ένας λόγος FI ίσος με 0,615, μία δόση BC ίση με 1,34 g (όγκος αντιδραστήρα 5,36 g/ml) και ένα υψηλό OL ίσο με 4,8 g VS/L μεγιστοποιούν τις εξόδους. Ο αθροιστικός όγκος βιοαερίου προβλέπεται ίσος με 2.351,41 mL και η απόδοση μεθανίου ίση με 0,34 L CH₄/g VS με μία απόκλιση μικρότερη από 10% σε σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα (Πίνακας 14).

Πίνακας 14 - Τιμές του μοντέλου FFNN/RSM

Είσοδοι	Βέλτιστες τιμές Εισόδων	Έξοδοι	Μέγιστες τιμές Εξόδων
λόγος FI	0,615	Αθροιστικός όγκος βιοαερίου (mL)	2.351,41 mL
δόση BC	1,34 g	Απόδοση CH ₄ (L CH ₄ /g VS)	0,34 L CH ₄ /g VS
OL	4,8 g VS/L		

- Συνδυασμός Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου Εμπρόσθιας Τροφοδότησης (FFNN) με Αλγόριθμο Οπισθοδιάδοσης με Μπεϋζιανή κανονικοποίηση (BRBP)

για παραγωγή βιοαερίου σε Βιοαντιδραστήρες Ενσωματωμένου Συστήματος Αναερόβιας-Αερόβιας Χώνευσης από υγρά απόβλητα μονάδας παραγωγής φοινικέλαιου (POME)

Τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα προτιμώνται για λειτουργίες μεγάλης κλίμακας, όπως είναι οι βιοαντιδραστήρες ενσωματωμένου συστήματος αναερόβιας-αερόβιας χώνευσης λόγω της ταχύτερης και απλούστερης μοντελοποίησης υπολογισμού. Επίσης, λόγω των μεταβαλλόμενων χαρακτηριστικών των υγρών αποβλήτων που προέρχονται από εργοστάσια παραγωγής φοινικέλαιου απαιτείται στενή παρακολούθηση και αποτελεσματική ανατροφοδότηση για σταθερή λειτουργία.

Οι Chen et al. (2022) χρησιμοποιούν λογισμικό MATLAB R2019b για την ανάπτυξη νευρωνικού δικτύου εμπρόσθιας τροφοδότησης (feed-forward neural network, FFNN) και για την εκπαίδευση του FFNN χρησιμοποιούν αλγόριθμο οπισθοδιάδοσης με Μπεϋζιανή κανονικοποίηση (Bayesian regularization backpropagation, BRBP) με σκοπό τη βελτιστοποίηση της παραγωγής βιοαερίου και της απόδοσης αφαίρεσης COD. Ο αλγόριθμος εκπαίδευσης με Μπεϋζιανή κανονικοποίηση χρησιμοποιείται για την ενίσχυση της ακρίβειας της πρόβλεψης των τιμών εξόδου.

Δύο μοντέλα ANN αναπτύσσονται για τον καθορισμό των βέλτιστων παραμέτρων εισόδου και επιδεικνύουν υψηλή ακρίβεια πρόβλεψης ($R^2 > 0,997$) και ευθυγράμμιση με τα βιομηχανικά δεδομένα.

Μοντέλο ANN 1: Αναερόβια διεργασία: 6 παράμετροι εισόδου (ρυθμός ροής εισόδου, ρυθμός οργανικής φόρτισης, $COD_{εισ.}$, $BOD_{εισ.}$, $TSS_{εισ.}$ και $pH_{εισ.}$) και 3 παράμετροι εξόδου (αφαίρεση COD, καθαρότητα CH_4 και απόδοση CH_4).

Μοντέλο ANN 2: Αερόβια διεργασία: 7 παράμετροι εισόδου (ρυθμός οργανικής φόρτισης, $COD_{εισ.}$, $BOD_{εισ.}$, $TSS_{εισ.}$, αιωρούμενα στερεά στο μεικτό υγρό (mixed liquor suspended solids), διαλυμένο οξυγόνο και λόγος τροφής προς μικροοργανισμούς) και 3 παράμετροι εξόδου (αφαίρεση COD, αφαίρεση BOD και αφαίρεση TSS).

Στην αναερόβια διεργασία, για την ακριβή πρόβλεψη της αφαίρεσης COD, της καθαρότητας CH_4 και της απόδοσης CH_4 επιτεύχθηκαν τιμές R^2 ίσες με 0,998, 0,983 και 0,990, αντίστοιχα, και τιμές MSE ίσες με 0,48, 0,43 και 0,0000206, αντίστοιχα.

Στην αερόβια διεργασία, για την ακριβή πρόβλεψη αφαίρεσης COD, αφαίρεσης BOD και αφαίρεσης TSS επιτεύχθηκαν τιμές R^2 ίσες με 0,997, 0,981 και 0,995,

αντίστοιχα, και τιμές MSE ίσες με 1,0288, 0,6047 και 0,5560, αντίστοιχα.

Η τιμή $COD_{εισ.}$ που αποτελεί την επιδραστική παράμετρο στην αναερόβια διεργασία πρέπει να διατηρηθεί μεταξύ 50.000 και 97.000 mg/L ώστε να επιτευχθεί υψηλή αφαίρεση COD και απόδοση CH_4 . Υπο βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας, στην αναερόβια διεργασία, η αφαίρεση COD βελτιώνεται κατά 33,9% (από 68,7% σε 92%), ενώ η απόδοση μεθανίου βελτιώνεται κατά 13,4% (από 0,23 LCH_4/g COD σε 0,26 LCH_4/g COD που αφαιρέθηκαν). Οι τιμές των αιωρούμενων στερεών στο μεικτό υγρό και του διαλυμένου οξυγόνου που αποτελούν τις πιο επιδραστικές παραμέτρους στην αερόβια διεργασία πρέπει να διατηρηθούν μεταξύ 37.000 και 40.500 mg/L, και μεταξύ 2,0–7,3 mg/L, αντίστοιχα. Υπο βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας, στην αερόβια διεργασία, η αφαίρεση COD βελτιώνεται από 85% σε 99% και η καθαρότητα μεθανίου φτάνει το 66,4%.

- **Εφαρμογή Προσαρμοστικού Νευροασαφούς Συστήματος Παρεμβολής (ANFIS) για την πρόβλεψη παραγωγής βιοαερίου από υγρά απόβλητα μονάδας παραγωγής φοινικέλαιου (POME).**

Οι Chong et al. (2023) συμπεραίνουν ότι το Προσαρμοστικό Νευροασαφές Σύστημα Παρεμβολής (neuro-fuzzy inference system, ANFIS) είναι το πιο αποτελεσματικό σύστημα μοντελοποίησης ύστερα από σύγκριση με τη Μεθοδολογία Επιφάνειας Απόκρισης (RSM) και τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ANN) για την ακριβέστερη πρόβλεψη της απόδοσης αναερόβιας χώνευσης υγρών αποβλήτων POME.

Τα ασαφή συστήματα διακρίνονται σε: συστήματα Mamdani, συστήματα Tsukamoto και συστήματα Sugeno. Από αυτούς τους τρεις τύπους, τα συστήματα Mamdani είναι τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα ενώ τα συστήματα Sugeno είναι τα πιο αποτελεσματικά και πιο συμπαγή. Τα σύνολα δεδομένων διαιρούνται σε τρία τμήματα: εκπαίδευση, δοκιμή, επικύρωση. Τα συστήματα ANFIS αποτελούν έναν συνδυασμό των ANN και των ασαφών συστημάτων παρεμβολής ώστε να βελτιώνεται η ταχύτητα, η ανοχή σε σφάλματα και η προσαρμοστικότητα και έτσι να επιτυγχάνεται ένα καλύτερο σύστημα μοντελοποίησης (Uzuner and Cekmecelioglu, 2016). Οι Chong et al. (2023) επιλέγουν τελικά τα συστήματα Sugeno για τη μοντελοποίηση με συστήματα ANFIS διαιρώντας τα σύνολα δεδομένων σε 70% για εκπαίδευση, 15% για δοκιμή και 15% επικύρωση. Τα συστήματα ANFIS επιδεικνύουν υψηλή υπολογιστική ικανότητα,

υψηλή ικανότητα μάθησης και κατανόησης μη γραμμικότητας στο σύνολο δεδομένων. Το μοντέλο RSM παρουσιάζει χαμηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα και, άρα, βραχύτερους χρόνους πρόβλεψης, και είναι κατάλληλο για ερμηνεία απλούστερων δεδομένων με πολυώνυμα μικρότερου βαθμού. Όμως, η μοντελοποίηση RSM, σε αντίθεση με τα ANN και ANFIS, παράγει αποτελέσματα χαμηλής συσχέτισης όταν αναλύονται μεγάλοι όγκοι δεδομένων. Τα αναπτυγμένα μοντέλα ANFIS, RSM, ANN αξιολογούνται με βάση τους δείκτες απόδοσής τους και επιλέγεται το μοντέλο πρόβλεψης με την υψηλότερη στατιστική απόδοση ως το πιο κατάλληλο μοντέλο Μηχανικής Μάθησης (ML).

Οι παράμετροι εισόδου που επιλέγονται είναι θερμοκρασία, pH, λόγος ανακυκλοφορίας και οι παράμετροι εξόδου είναι παραγωγή βιοαερίου, απόδοση CH₄.

Και τα τρία συστήματα παρουσιάζουν υψηλή απόδοση πρόβλεψης με ελάχιστη απόκλιση από τις πραγματικές τιμές (απόκλιση 1,25% για παραγωγή βιοαερίου και 5,09% για απόδοση μεθανίου). Συγκεκριμένα, για παραγωγή βιοαερίου, το ANFIS επιτυγχάνει τον υψηλότερο συντελεστή προσδιορισμού R² ίσο με 0,9771 με MSE ίσο με 0,0226 ενώ για RMS και ANN οι τιμές R² είναι 0,9512 και 0,9767, αντίστοιχα, και οι τιμές MSE είναι 0,0482 και 0,0230, αντίστοιχα. Επίσης, για απόδοση μεθανίου, το ANFIS επιτυγχάνει τον υψηλότερο συντελεστή προσδιορισμού R² ίσο με 0,9810 με MSE ίσο με 0,0188 ενώ για RMS και ANN οι τιμές R² είναι 0,9712 και 0,9797, αντίστοιχα, και οι τιμές MSE είναι 0,0205 και 0,0200, αντίστοιχα. Τέλος, το ANFIS παρουσιάζει συνολικά την υψηλότερη ακρίβεια πρόβλεψης με R² ίσο με 0,9791 και το χαμηλότερο MSE ίσο με 0,0207. Τα RMS και ANN παρουσιάζουν συνολικά ακρίβεια πρόβλεψης με R² ίσο με 0,9652 και 0,9782, αντίστοιχα και MSE ίσο με 0,0344 και 0,0215, αντίστοιχα. Η μεθοδολογία RMS παρουσιάζει τη χαμηλότερη απόδοση.

Για τη βελτιστοποίηση επιλέγεται το μοντέλο πρόβλεψης ANFIS με την υψηλότερη στατιστική απόδοση και χρησιμοποιείται λογισμικό MATLAB R2021a, το οποίο αναγνωρίζει τις βέλτιστες μεταβλητές εισόδου και μεγιστοποιεί τα αποτελέσματα ενώ ταυτόχρονα ικανοποιούνται οι περιορισμοί.

Οι βέλτιστες τιμές για τις παραμέτρους εισόδου είναι: 38,9 °C για τη θερμοκρασία του αναερόβιου αντιδραστήρα, 7,03 για το pH, και 1,89 για τον λόγο ανακυκλοφορίας. Οι βέλτιστες, αυτές, τιμές μπορούν να αυξάνουν την παραγωγή βιοαερίου και την απόδοση μεθανίου κατά 19,4% και 12,2%, αντίστοιχα (Πίνακας 15).

Πίνακας 15 – Τιμές του μοντέλου ANFIS

Είσοδοι	Βέλτιστες τιμές Εισόδων	Έξοδοι	Μέγιστες τιμές Εξόδων
θερμοκρασία	38,9 °C	Παραγωγή βιοαερίου	$3,981 \times 10^5$ Nm ³ / μήνα
pH	7,03	Απόδοση CH ₄	0,2808 Nm ³ /kg COD που αφαιρέθηκε
λόγος ανακυκλοφορίας	1,89		

- Προσομοίωση (με SuperPro Designer v. 9.0) και Πρόβλεψη (με Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο Εμπρόσθιας Τροφοδότησης, FFNN) της απόδοσης βιολογικής πλυντρίδας για απομάκρυνση H₂S από βιοαέριο που παράγεται από υγρά απόβλητα μονάδας παραγωγής φοινικέλαιου (POME)

Οι Clifford et al. (2024) πραγματοποιούν προσομοίωση της επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων POME και του καθαρισμού του βιοαερίου από H₂S. Η προσομοίωση παίζει έναν σημαντικό ρόλο στην εκτίμηση και ανάλυση της συμπεριφοράς των βιολογικών πλυντρίδων υπό διαφορετικές λειτουργικές συνθήκες με ελάχιστα λειτουργικά κόστη. Το λογισμικό SuperPro Designer v. 9.0 που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση αυτή είναι κατάλληλο για την εκτίμηση παραμέτρων που δεν παρακολουθούνται καθημερινά, όπως COD, BOD, TSS, απόδοση μεθανίου, περιεκτικότητα σε μεθάνιο, αλλά και άλλων παραμέτρων, όπως ρυθμός οργανικής φόρτισης, ρυθμός ροής ανακυκλοφορίας, και καθιστά δυνατή τη λεπτομερή μοντελοποίηση ρευμάτων διεργασιών. Έτσι, παρέχει πληροφορίες για μία πιο ενδελεχή κατανόηση της συνολικής απόδοσης της διεργασίας, των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και της βελτιστοποίησης των λειτουργικών παραμέτρων.

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα μπορούν να προβλέπουν με ακρίβεια συγκεκριμένες παραμέτρους χρησιμοποιώντας ιστορικά δεδομένα και πολύπλοκους αλγόριθμους με ελάχιστη ανθρώπινη επίβλεψη. Οι Clifford et al. (2024) επιπλέον εφαρμόζουν προσέγγιση βελτιστοποίησης χρησιμοποιώντας Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο Εμπρόσθιας Τροφοδότησης (FFNN) με αλγόριθμο εκπαίδευσης Levenberg-Marquardt για την ανάλυση της διαδικασίας καθαρισμού του βιοαερίου από H₂S με βάση καθημερινά καταγεγραμμένα δεδομένα. Το λογισμικό που χρησιμοποιείται για το μοντέλο ANN είναι το MATLAB R2022a.

Η θερμοκρασία εισόδου και ο ρυθμός ροής βιοαερίου επιλέγονται ως παράμετροι εισόδου και η συγκέντρωση H₂S επιλέγεται ως η έξοδος του μοντέλου.

Το μοντέλο ANN επιτυγχάνει αξιοπιστία και μία υψηλή ακρίβεια πρόβλεψης με R^2 ίσο με 0,90 και MSE ίσο με 0,0068.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα προσομοίωσης, η τελική συγκέντρωση H_2S στο βιοαέριο είναι 43 mg/L, η απόδοση αφαίρεσης H_2S από τη βιολογική πλυντρίδα είναι 95,5%, και η απόδοση βιοαερίου είναι 26,12 Nm³ ανά m³ POME, μία τιμή που συμφωνεί με τα βιομηχανικά δεδομένα με απόκλιση μικρότερη από 1%.

Αφού η επεξεργασία των POME και ο καθαρισμός του βιοαερίου υποβληθούν σε προσομοίωση με το SuperPro πραγματοποιείται σύγκριση αρκετών παραμέτρων με τα βιομηχανικά δεδομένα. Οι αποκλίσεις που προκύπτουν από τη σύγκριση είναι μικρότερες από 10%. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν την υψηλή ακρίβεια και τις προοπτικές του συνδυασμού Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων με προσομοίωση SuperPro Designer v. 9.

- **Συνδυασμός πειραματικής ανάλυσης και μοντελοποίησης με Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο (ANN) για την πρόβλεψη και βελτιστοποίηση της απόδοσης μηχανών διπλού καυσίμου (diesel-βιοαερίου)**

Η εφαρμογή βιοαερίου σε μηχανές diesel ώστε αυτές να λειτουργούν με δύο καύσιμα παρουσιάζει προβλήματα απόδοσης και εκπομπών, κυρίως, λόγω μη σταθερής σύνθεσης του βιοαερίου και χαμηλού ενεργειακού περιεχομένου σε σύγκριση με το καύσιμο diesel.

Σύμφωνα με τους Girmay et al. (2025) η ενσωμάτωση πειραματικών δοκιμών σε Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο (ANN) δύναται να παρέχει, αφενός, πειραματικό χαρακτηρισμό των μηχανών διπλού καυσίμου (diesel-βιοαερίου) υπό διαφορετικές συνθήκες φορτίου και, αφετέρου, ένα ισχυρό προβλεπτικό μοντέλο. Έτσι, ο συνδυασμός αυτός βελτιστοποιεί την απόδοση των μηχανών διπλού καυσίμου (diesel-βιοαερίου) και ελαχιστοποιεί τις εκπομπές συμβάλλοντας, έτσι, στη ευρεία διάδοση και χρήση αυτών των μηχανών σε μεταφορικές και βιομηχανικές εφαρμογές.

Σε μηχανή ανάφλεξης με συμπίεση (CI) άμεσης έγχυσης που τροποποιήθηκε ώστε να λειτουργεί ως ένα σύστημα διπλού καυσίμου – diesel και βιοαερίου – διεξάχθηκαν πειράματα υποκατάστασης καυσίμου από βιοαέριο με βάση δεδομένα που συλλέχθηκαν σχετικά με την απόδοση της μηχανής, την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές. Η απόδοση της μηχανής μπορεί να αξιολογείται με βάση διάφορες

παραμέτρους, όπως η ισχύς πέδησης (BP), η ροπή πέδησης, η θερμική απόδοση πέδησης (BTE) και η ειδική κατανάλωση καυσίμου πέδησης (BSFC).

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων δείχνουν, για συνθήκες μερικού φορτίου (10 Nm), μία αύξηση στην ισχύ πέδησης ίση με 3,18% και 7,9% σε ποσοστά υποκατάστασης 15% και 35%, αντίστοιχα, και μία μείωση στην BSFC ίση με 4,8% και 17,8% στις 1.500 rpm και σε ποσοστά υποκατάστασης 15% και 35%, αντίστοιχα. Για συνθήκες πλήρους φορτίου (20 Nm), όμως, η ισχύς πέδησης παρουσιάζει μία μείωση έως 37,7% σε ποσοστό υποκατάστασης 35%.

Το μοντέλο ANN αναπτύσσεται προκειμένου να αντιμετωπίσει αυτές τις διακυμάνσεις λαμβάνοντας υπόψη τις περίπλοκες μη γραμμικές σχέσεις μεταξύ πολλαπλών λειτουργικών παραμέτρων. Το μοντέλο ANN προβλέπει τις σημαντικές παραμέτρους απόδοσης και εκπομπών υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες λειτουργίας και τα προβλεπόμενα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα πειραματικά αποτελέσματα για την αξιολόγηση της ακρίβειας και αξιοπιστίας.

Οι μεταβλητές εισόδου περιλαμβάνουν την ταχύτητα της μηχανής, το φορτίο, το ποσοστό υποκατάστασης καυσίμου από βιοαέριο, τη χρονική στιγμή εγχύσεως και την ατμοσφαιρική θερμοκρασία, ενώ οι μεταβλητές εξόδου περιλαμβάνουν BP, BTE, BSFC και εκπομπές (CO, HC, NO_x, και αδιαφάνεια καπνού). Ως αλγόριθμος εκπαίδευσης χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος οπισθοδιάδοσης Levenberg–Marquardt.

Το μοντέλο ANN επιτυγχάνει υψηλή ακρίβεια πρόβλεψης με R^2 ίσο με 0,984, 0,977, 0,981, 0,965, και 0,968, για BTE (%), BSFC (kg/kWh), BP (kW), εκπομπές CO (% κ.ο.), και HO (ppm), αντίστοιχα. Οι τιμές MSE υπολογίζονται ως το τετράγωνο της ρίζας του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) που δίνεται από τους Girmay et al. (2025) για κάθε παράμετρο. Συνεπώς, με υπολογισμό το MSE του μοντέλου ANN βρίσκεται να είναι ίσο με 0,3844%, 0,000324, 0,0121, 0,000144, και 18,49 για BTE, BSFC, BP, εκπομπές CO, και HO, αντίστοιχα.

• **Παλινδρόμηση Διανυσμάτων Υποστήριξης (SVR) και Συνάρτηση Ακτινικής Βάσης (RBF) για την πρόβλεψη της παραγωγής βιοαερίου από υγρά απόβλητα μονάδας επεξεργασίας φρούτων**

Οι Isenkul et al. (2025) αξιολογούν την ικανότητα πρόβλεψης της παραγωγής βιοαερίου σε έναν αντιδραστήρα UASB πλήρους κλίμακας που επεξεργάζεται υγρά

απόβλητα από μονάδα επεξεργασίας φρούτων χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Παλινδρόμησης Διανυσμάτων Υποστήριξης (Support Vector Regression, SVR) με μία Συνάρτηση Ακτινικής Βάσης (Radial Basis Function, RBF).

Ο αλγόριθμος SVR είναι μία γενικευμένη μορφή του αλγόριθμου Μηχανής Διανυσμάτων Υποστήριξης (Support Vector Machine, SVM), ο οποίος είναι ένας πανίσχυρος αλγόριθμος εποπτευόμενης μάθησης. Ο αλγόριθμος SVR είναι προσαρμοσμένος για επίλυση προβλημάτων παλινδρόμησης και έχει ως κύριο σκοπό την εύρεση συνάρτησης που ταιριάζει καλύτερα στα δεδομένα εκπαίδευσης και ταυτοχρόνως την επίτευξη υψηλής απόδοσης πρόβλεψης σε καινούρια αθέατα δεδομένα. Βασικά πλεονεκτήματα του αλγόριθμου SVR είναι η υπολογιστική πολυπλοκότητά του, η ικανότητα γενίκευσης εντός των δεδομένων εισόδου με αποτέλεσμα την ενίσχυση της απόδοσης πρόβλεψης του συστήματος, η προσαρμοστικότητά του σε τρέχοντα δεδομένα και η αποτελεσματικότητά του όσον αφορά στην πρόβλεψη μελλοντικών άγνωστων δεδομένων. Ο αλγόριθμος SVR μπορεί να διαχειρίζεται περίπλοκες και μη γραμμικές σχέσεις μεταξύ διάφορων εξαρτώμενων και ανεξάρτητων παραμέτρων και να παρουσιάζει αξιόπιστες λύσεις για την πρόβλεψη της απόδοσης του βιοαερίου και τη βελτιστοποίηση των διεργασιών σε συστήματα αναερόβιας χώνευσης μεγάλης κλίμακας.

Τα μοντέλα SVR χρησιμοποιούν ως κατάλληλη συνάρτηση πυρήνα (kernel) για την αποτελεσματική επίλυση μη γραμμικών και πολυδιάστατων προβλημάτων με περιορισμένα δείγματα, τη συνάρτηση RBF λόγω της υψηλής απόδοσής της σε πολύπλοκα, μη γραμμικά δεδομένα αλλά και λόγω των ελάχιστων μεταβολών στις παραμέτρους.

Για την ενίσχυση του μοντέλου SVR χρησιμοποιείται βελτιστοποίηση υπερπαραμέτρων (hyperparameter optimization) ώστε να αναγνωρίζεται ο βέλτιστος συνδυασμός παραμέτρων και να μεγιστοποιείται, έτσι, η απόδοση πρόβλεψης. Αυτό επιτυγχάνεται με το RandomizedSearchCV, το οποίο μειώνει τα υπολογιστικά κόστη και έχει μία υψηλή πιθανότητα να αναγνωρίζει υπερπαραμέτρους πλησίον της βέλτιστης τιμής. Το βελτιστοποιημένο μοντέλο SVR είναι αξιόπιστο και μπορεί να πραγματοποιεί προβλέψεις με ένα καλό περιθώριο ακρίβειας σε διαφορετικές λειτουργικές συνθήκες.

Οι παράμετροι του μοντέλου SVR είναι (μέσες τιμές): CODεισοροής=6.859,1

mg/L, CODεκροής=1.787,8 mg/L, sCODεκροής=684,6, ρυθμός ογκομετρικής οργανικής φόρτισης 10,54 kg/m³, και HRT 21,23 ημέρες. Η έξοδος του μοντέλου είναι η παραγωγή βιοαερίου 4.284 m³/ημέρα .

Το μοντέλο SVR παρέχει ακριβείς προβλέψεις με R² ίσο 0,893 με μία μικρή τυπική απόκλιση ίση με 0,0382, η οποία υποδεικνύει υψηλή απόδοση γενίκευσης, και MSE ίσο με 0,0047 με μία μικρή τυπική απόκλιση ίση με 0,0017.

Το μοντέλο SVR είναι κατάλληλο για πραγματικές βιομηχανικές εφαρμογές όπου οι εισροές παρουσιάζουν μεταβλητή σύνθεση με εποχιακές διακυμάνσεις, όπως τα υγρά αγροτοβιομηχανικά απόβλητα.

- **Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ANN) για την πρόβλεψη της απόδοσης και των εκπομπών μίας τροποποιημένης μηχανής Ανάφλεξης με Συμπίεση (CI) διπλού καυσίμου (βιοαερίου-diesel)**

Οι Prabhu et al. (2021) αναπτύσσουν μοντέλο ANN για τη μαθηματική μοντελοποίηση και πρόβλεψη της απόδοσης και των εκπομπών τροποποιημένης μηχανής Ανάφλεξης με Συμπίεση (Compression Ignition, CI) που λειτουργεί με μείγμα βιοαερίου-αέρα και diesel σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Για την ανάπτυξη του μοντέλου ANN χρησιμοποιείται λογισμικό MATLAB και ως αλγόριθμος εκπαίδευσης χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος οπισθοδιάδοσης Levenberg–Marquardt, ο οποίος δεν απαιτεί πολύ χρόνο.

Το μοντέλο ANN χρησιμοποιεί δεδομένα που λαμβάνονται από πειράματα, τα οποία διαιρούνται τυχαία σε τρία σύνολα: το πρώτο σύνολο (70%) για εκπαίδευση, το δεύτερο (15%) για επικύρωση και το τρίτο (15%) για δοκιμή.

Για την ανάπτυξη του μοντέλου ANN λαμβάνονται υπόψη δύο μεταβλητές εισόδου, το φορτίο της μηχανής και το προθερμασμένο μείγμα βιοαερίου-αέρα, ενώ η πρόβλεψη αφορά έντεκα μεταβλητές εξόδου, την ισχύ πέδησης (BP), τη θερμική απόδοση πέδησης (BTE), την ειδική κατανάλωση diesel πέδησης (BSDC), την ειδική κατανάλωση βιοαερίου πέδησης (BSBC), την ειδική κατανάλωση ενέργειας πέδησης (BSEC), τη θερμοκρασία καυσαερίων (EGT), CH₄, CO₂, CO, HC, και NO_x για διάφορες θερμοκρασίες εισαγωγής μείγματος βιοαερίου-αερίου (55 ± 5 – 85 ± 5 °C) και διάφορα φορτία (20% έως 80%).

Για τη σύγκριση μεταξύ μετρούμενων και προβλεπόμενων τιμών

χρησιμοποιείται ο συντελεστής συσχέτισης, R , ο οποίος παρουσιάζει τις εξής τιμές: για εκπαίδευση 0,998, για επικύρωση 0,965, για δοκιμή 0,975 και η συνολική είναι ίση με 0,990. Όλες αυτές οι τιμές προσεγγίζουν το 1 και, έτσι, δείχνουν ότι το μοντέλο ANN μπορεί να προβλέπει τα χαρακτηριστικά της μηχανής, τα οποία είναι ίδια όπως στο πείραμα. Η τιμή του συντελεστή προσδιορισμού R^2 είναι για BP ίση με 0,998, για BTE ίση με 0,99, για BSEC ίση με 0,996, για BSDC ίση με 0,985, για BSBC ίση με 0,995, για EGT ίση με 0,996, για CO_2 ίση με 0,978, για CO ίση με 0,991, για CH_4 ίση με 0,974, για NO_x ίση με 0,994, και για HC ίση με 0,995. Το MSE κυμαίνεται από 0,0003515 έως 0,00544501.

Η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων της πρόβλεψης με το μοντέλο ANN και των πειραματικών αποτελεσμάτων δείχνει ότι το μοντέλο ANN μπορεί να προβλέπει αξιόπιστα, με ακρίβεια και ελάχιστο σφάλμα τις παραμέτρους της μηχανής CI που χρησιμοποιεί διπλό καύσιμο (προθερμασμένο μείγμα βιοαερίου-αέρα και diesel).

Στον κάτωθι Πίνακα 16 παρατίθενται οι τιμές των μεταβλητών των προαναφερόμενων μοντέλων.

Πίνακας 16 – Τιμές των Μοντέλων Τεχνητής Νοημοσύνης που χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία βιοαερίου

Μοντέλο	Έξοδοι	R^2	MSE	Βιβλιογραφικές Παραπομπές
ABNN-PSO	Ισχύς ηλεκτρικής γεννήτριας βιοαερίου	0,98567 (εκπαίδευση) 0,98513 (δοκιμή)	0,0010507	Abdurrahman et al., 2024
FBPNN/ NSGA-II	Καθαρότητα CH_4 στο ε.π.	0,9975±0,0002	0,0022	Bahrun et al., 2025b
	Ανάκτηση CH_4 στο ε.π.	0,9928±0,0003	0,0059	
	Παραγωγικότητα κλίνης	0,9988±0,0004	0,0000	
	Έργο κύκλου	0,9959±0,0003	0,4943	
ANN (neuro-regression)/ MDE, MNM, MSA, MRS	Ηλεκτρική ισχύς από συνολικό πληθυσμό ζώων	0,951 (εκπαίδευση) 0,994 (δοκιμή)	Δεν αναφέρεται	Ceylan et al., 2023

συνέχεια Πίνακα 16

Μοντέλο	Έξοδοι	R ²	MSE	Βιβλ. Παραπ.
FFNN/RSM	Αθροιστικός όγκος βιοαερίου (mL)	0,9999	143 mL ² ,	Chang et al., 2025
	Απόδοση CH ₄ (L CH ₄ /g VS)	0,9999	2,5 L ² CH ₄ /g ² VS	
FFNN/ BRBP	Αφαίρεση COD (αναερόβια χώνευση)	0,998	0,48	Chen et al., 2022
	Καθαρότητα CH ₄ (αναερόβια χώνευση)	0,983	0,43	
	Απόδοση CH ₄ (αναερόβια χώνευση)	0,990	0,0000206	
	Αφαίρεση COD (αερόβια χώνευση)	0,997	1,0288	
	Αφαίρεση BOD (αερόβια χώνευση)	0,981	0,6047	
	Αφαίρεση TSS (αερόβια χώνευση)	0,995	0,5560	
ANFIS	Παραγωγή βιοαερίου	0,9771	0,0226	Chong et al., 2023
	Απόδοση CH ₄	0,9810	0,0188	
	Συνολικά	0,9791	0,0207	
FFNN/SuperPro Designer v. 9.0	συγκέντρωση H ₂ S	0,90	0,0068	Clifford et al., 2024
Πειραματική ανάλυση/ ANN	BTE (%)	0,984	0,3844	Girmay et al., 2025
	BSFC (kg/kWh)	0,977	0,000324	
	BP (kW)	0,981	0,0121	
	CO (%κ.ο.)	0,965	0,000144	
	HO (ppm)	0,968	18,49	
SVR/ RBF	παραγωγή βιοαερίου	0,893	0,0047	Isenkul et al., 2025
ANN	BP	0,998,	0,0003515 - 0,00544501	Prabhu et al., 2021
	BTE	0,990		
	BSEC	0,996		
	BSDC	0,985		
	BSBC	0,995		
	EGT	0,996		
	CO ₂	0,978		
	CO	0,991		
	CH ₄	0,974		
	NO _x	0,994		
	HC	0,995		

6. Μονάδα παραγωγής βιοαερίου στην Περιφερειακή Ενότητα Βοιωτίας

6.1 Γενικά στοιχεία

Η μελέτη περίπτωσης της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας αφορά την AGROMEG AE, μονάδα παραγωγής βιοαερίου από αγροτικές πρώτες ύλες προς συμπαραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας. Η μονάδα κατασκευάστηκε από την εταιρεία PK ENERGY, η οποία έχει ως αντικείμενο τη μελέτη και κατασκευή μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας εφαρμόζοντας ένα Σύστημα Διαχείρισης Ποιότητας που πληροί τις απαιτήσεις του προτύπου ΕΛΟΤ EN ISO 9001:2008 για τη διασφάλιση της ποιότητας προϊόντων και υπηρεσιών. Για τον σχεδιασμό των έργων βιοαερίου, η εταιρεία συνεργάζεται με την entec biopower Germany GmbH, η οποία είναι γνωστή στην παγκόσμια αγορά για την υψηλή ποιότητά της στην κατασκευή σύγχρονων μονάδων βιοαερίου. Η εν λόγω μονάδα ισχύος 1 MW βρίσκεται στην Τανάγρα Βοιωτίας, στη θέση <https://maps.app.goo.gl/vrWiN41RYkGFGmz58> (Google maps, 2026), έχει έκταση 22.280 m² και λειτουργεί από τον Απρίλιο του 2024 (Εικόνα 2).

Για τη ζύμωση χρησιμοποιούνται μεικτά υποστρώματα που προέρχονται από κτηνοτροφικές και πτηνοτροφικές μονάδες, γαλακτοκομεία, τυροκομεία, ελαιοτριβεία, βιομηχανία τροφίμων, κ.τ.λ.

Σκοπός της μονάδας είναι να παράγει βιοαέριο υψηλής θερμιδικής αξίας από υπόστρωμα αποτελούμενο από ζωικά και φυτικά απόβλητα δυναμικότητας 45.000 t/έτος με εισερχόμενη ξηρά ουσία κατά μέσο όρο 15,1%.



Εικόνα 2 - Μονάδα παραγωγής βιοαερίου στην Τανάγρα Βοιωτίας (PK ENERGY, 2026)

6.2 Εγκαταστάσεις /Εξοπλισμός

Η μονάδα διαθέτει κατασκευές, κτίρια, συστήματα σωληνώσεων, εξοπλισμούς επεξεργασίας, μετρήσεων και ελέγχου που λειτουργούν αυτόματα ή χειροκίνητα. Αναλυτικά, οι εγκαταστάσεις περιλαμβάνουν:

- Δύο πίστες αποθήκευσης στερεών πρώτων υλών (Εικόνα 3)



Εικόνα 3 - Πίστες αποθήκευσης στερεών πρώτων υλών (προσωπικό αρχείο, 06/04/2026)

- Δεξαμενή υποδοχής υγρής πρώτης ύλης (Εικόνα 4)

Η δεξαμενή υποδοχής είναι κατασκευασμένη από οπλισμένο σκυρόδεμα με οροφή από σκυρόδεμα και έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Όγκος (μεικτή χωρητικότητα): 200 m^3
- Καθαρός όγκος (χωρητικότητα λειτουργίας): 180 m^3
- Εσωτερική διάμετρος: 8 m
- Εσωτερικό ύψος: 4 m

Η δεξαμενή υποδοχής είναι υπόγεια με 2 θυρίδες παρακολούθησης διαστάσεων 1,3 m x 0,8 m και φρεάτιο αντλίας διαστάσεων 0,8 m x 0,8 m x 0,3 m. Το εσωτερικό της καλύπτεται μερικώς από επένδυση για προστασία έναντι διάβρωσης του σκυροδέματος. Η δεξαμενή διαθέτει τον εξής τεχνικό εξοπλισμό:

- Υποβρύχια αντλία ισχύος 11 kW
- Υποβρύχιο αναμείκτη ισχύος 9 kW
- Μετρητή στάθμης
- Διακόπτη ορίου στάθμης



Εικόνα 4 - Υπόγεια δεξαμενή υποδοχής υγρής πρώτης ύλης (προσωπικό αρχείο, 06/04/2026)

- Σύστημα τροφοδοσίας στερεών με τροφοδότη υγρών (Εικόνες 5α, β και γ)

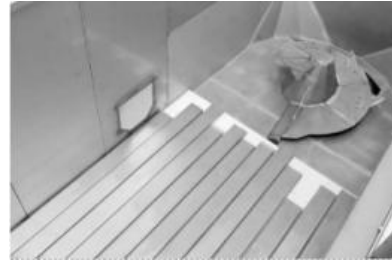
Το σύστημα τροφοδοσίας είναι το εξειδικευμένο σύστημα BIG-Mix όγκου 55 m³, το οποίο περιλαμβάνει αντλία τροφοδοσίας υγρών και διακρίνεται για τη χαμηλή ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για επεξεργασία μεγάλων όγκων δύσκολων υποστρωμάτων, όπως ενσίρωμα χόρτου, στερεή κοπριά, σακχαρότευτλα, πράσινα απόβλητα, κ.τ.λ. Ράβδοι ώθησης από ανοξείδωτο χάλυβα τοποθετημένες επάνω στο δάπεδο του συστήματος τροφοδοσίας και κινούμενες μέσω υδραυλικών κυλίνδρων μεταφέρουν το υπόστρωμα σε μία ζώνη ανάμειξης και ρύθμισης της δόσης όπου εκεί υποβάλλεται σε επεξεργασία. Κατακόρυφοι κοχλίες ανάμειξης από ανοξείδωτο χάλυβα προσαρμοσμένοι με λεπίδες κοπής από ανοξείδωτο χάλυβα χρησιμοποιούνται για την προετοιμασία των στερεών υποστρωμάτων. Μεταφορικός κοχλίας μεταφέρει εν συνεχεία το επεξεργασμένο υπόστρωμα. Το τελικό μείγμα αντλείται μέσω αντλίας ανάμειξης της οποίας το κέλυφος έχει μία μεγάλη ορθογώνια χοάνη, αποσπώμενο κωνικό θάλαμο τροφοδοσίας και μία ράβδο σύζευξης με μεταφορικό κοχλία. Έτσι, εξασφαλίζεται μία βέλτιστη τροφοδοσία των υποστρωμάτων στα μεταφορικά στοιχεία. Για αραιώση δύναται να προστίθεται σε αυτή την αντλία ανάμειξης φρέσκο νερό ή υγρό χωνεμένο υπόλειμμα από τον πρώτο χωνευτήρα.

Το σύστημα τροφοδοσίας διαθέτει σύστημα ζύγισης των υποστρωμάτων και σύστημα PLC για τον έλεγχο των ράβδων ώθησης και της ζώνης ανάμειξης και ρύθμισης της δόσης των υποστρωμάτων.

Το δάπεδο του τροφοδότη είναι πλαστικό που εξασφαλίζει χαμηλή τριβή μεταξύ ράβδων ώθησης και δαπέδου.



(α)



(β)



(γ)

Εικόνες 5 - (α) και (γ) Σύστημα τροφοδοσίας BIG-Mix, (Πηγή: PK ENERGY, προσωπικό αρχείο, 06/04/2026) (β) χαλύβδινες ράβδοι ώθησης και χαλύβδινοι κατακόρυφοι κοχλίες ανάμειξης στο εσωτερικό (Konrad Pumpe GmbH, 2026)

- Αντιδραστήρας χώνευσης (Εικόνα 6)

Ο αντιδραστήρας χώνευσης είναι κατασκευασμένος από οπλισμένο σκυρόδεμα και είναι θερμαινόμενος και μονωμένος. Είναι τοποθετημένος μερικώς (4 m) κάτω από το έδαφος, είναι αεριοστεγής και το εσωτερικό του καλύπτεται μερικώς από επένδυση για προστασία έναντι διάβρωσης του σκυροδέματος.

Τα χαρακτηριστικά του είναι:

- Όγκος (μεικτή χωρητικότητα): 4.247 m^3
- Καθαρός όγκος (χωρητικότητα λειτουργίας): 3.823 m^3
- Εσωτερική διάμετρος: 26 m
- Εσωτερικό ύψος: 8 m
- Θυρίδα πρόσβασης: 800 x 800 mm
- Φρεάτιο αντλίας: 0,8 m x 0,8 m x 0,5 m

- Μόνωση: πολυστυρένιο 80 mm
- Επένδυση

Ο τεχνικός εξοπλισμός του αντιδραστήρα περιλαμβάνει:

- Ανακουφιστική βαλβίδα πίεσης
- 3 πλευρικούς αναμείκτες ATEX, τύπου Biobull, έκαστος έχει ισχύ 11 kW
- Εσωτερική θέρμανση της δεξαμενής με 32 θερμαντικούς δακτυλίου
- Μετρητής στάθμης
- Μετρητής θερμοκρασίας
- Διακόπτης ορίου στάθμης
- 2 οπτικούς υαλοδείκτες τύπου bull-eye DN300 με σύνδεση έκπλυσης.



Εικόνα 6 - Βιοαντιδραστήρας χώνευσης (προσωπικό αρχείο, 06/04/2026)

- Αντιδραστήρας μεταχώνευσης (Εικόνα 7)

Ο αντιδραστήρας μεταχώνευσης, όπως και ο αντιδραστήρας χώνευσης, είναι κατασκευασμένος από οπλισμένο σκυρόδεμα και είναι θερμαινόμενος και μονωμένος. Είναι τοποθετημένος μερικώς (4 m) κάτω από το έδαφος, είναι αεριοστεγής και το εσωτερικό του καλύπτεται μερικώς από επένδυση για προστασία έναντι διάβρωσης του σκυροδέματος.

Τα χαρακτηριστικά του είναι:

- Όγκος (μεικτή χωρητικότητα): 4.247 m^3
- Καθαρός όγκος (χωρητικότητα λειτουργίας): 3.823 m^3

- Εσωτερική διάμετρος: 26 m
- Εσωτερικό ύψος: 8 m
- Θυρίδα πρόσβασης: 800 x 800 mm
- Φρεάτιο αντλίας: 0,8 m x 0,8 m x 0,5 m
- Μόνωση: πολυστυρένιο 80 mm
- Επένδυση

Ο τεχνικός εξοπλισμός του αντιδραστήρα περιλαμβάνει:

- Ανακουφιστική βαλβίδα πίεσης
- 3 πλευρικούς αναμείκτες ATEX, τύπου Biobull, έκαστος έχει ισχύ 11 kW
- Εσωτερική θέρμανση της δεξαμενής με 32 θερμαντικούς δακτυλίου
- Μετρητής στάθμης
- Μετρητής θερμοκρασίας
- Διακόπτης ορίου στάθμης
- 2 οπτικούς υαλοδείκτες τύπου bull-eye DN300 με σύνδεση έκπλυσης.



Εικόνα 7 - Κάτοψη βιοαντιδραστήρων χώνευσης (αριστερά), μεταχώνευσης (δεξιά) και δεξαμενής υποδοχής υγρής πρώτης ύλης (PK ENERGY, 2026)

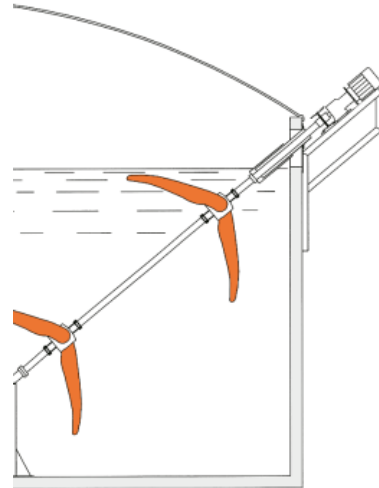
- Αναδευτήρες (Εικόνες 8α και β)

Οι αναδευτήρες που χρησιμοποιούνται για να αναμειγνύουν τα υποστρώματα και να επιτυγχάνουν την επαρκή επαφή τους με τα βακτήρια μέσα στις δεξαμενές, είναι τύπου BIOBULL®. Πρόκειται για 2 αναδευτήρες, τοποθετημένους στους βιοαντιδραστήρες χώνευσης και μεταχώνευσης και σχεδιασμένους να χειρίζονται μία μεγάλη ποικιλία

δύσκολων υποστρωμάτων με πολύ υψηλές συγκεντρώσεις ξηράς ουσίας και ίνες, όπως ενσιρώματα ολόκληρων καλλιεργειών. Λόγω της μεγάλης διαμέτρου τους και της χαμηλής περιστροφικής ταχύτητάς τους οι προπέλες παράγουν υψηλή ωστική δύναμη και δύναμη κυκλοφορίας με χαμηλή κατανάλωση ισχύος. Ως αποτέλεσμα, επιτυγχάνονται μειώσεις της απαιτούμενης ενέργειας και του λειτουργικού κόστους.



(α)



(β)

Εικόνες 8 - (α) Αναδευτήρας τύπου BIOBULL[®] τοποθετημένος στον βιοαντιδραστήρα μεταχώνευσης (προσωπικό αρχείο, 06/04/2026), (β) Σχέδιο του αναδευτήρα μέσα στον βιοαντιδραστήρα (Πηγή: PK ENERGY)

- Κάλυμμα μεμβράνης δεξαμενής

Το κάλυμμα των δεξαμενών είναι σχεδιασμένο για την αποθήκευση του βιοαέριου. Ο αντιδραστήρας χώνευσης καλύπτεται με θολωτή μεμβράνη διπλού στρώματος, μία εξαιρετικά στιβαρή, ανθεκτική και αποτελεσματική κατασκευή. Το εξωτερικό στρώμα της μεμβράνης παρέχει προστασία στο εσωτερικό στρώμα από έντονα περιβαλλοντικά και καιρικά φαινόμενα εξασφαλίζοντας μία μεγάλη διάρκεια ζωής και υψηλό βαθμό κατακράτησης του αερίου στο εσωτερικό. Το εξωτερικό στρώμα υποστηρίζεται από συνεχή ροή αέρα μέσω ενός φυσητήρα αέρα με αποτέλεσμα να μπορεί να διατηρεί σταθερή την πίεση του συστήματος. Το εσωτερικό στρώμα μπορεί να κινείται πάνω-κάτω ανάλογα με τον όγκο του αερίου που βρίσκεται εντός του.

- Φρέαρ συμπυκνωμάτων νερού (Εικόνα 9)

Το φρέαρ συμπυκνωμάτων νερού είναι μία δεξαμενή, η οποία χρησιμοποιείται ως

ενδιάμεσος χώρος αποθήκευσης των συμπυκνωμάτων νερού που συλλέγονται από το βιοαέριο μετά τη ψύξη του μέσα στους σωλήνες αερίου και των συμπυκνωμάτων νερού μετά από την αφύγρανση. Ένας παρακαμπτήριος σωλήνας εξόδου από τον σωλήνα αερίου μεταφέρει τα συμπυκνώματα νερού απευθείας στη δεξαμενή μέσα στην οποία η στήλη νερού που συλλέγεται λειτουργεί ως ένα στρώμα φραγμού έναντι του χώρου του αερίου. Αυτή η «πίεση ρευστού φράγματος» είναι τουλάχιστον πενταπλάσια της πίεσης αερίου μέσα στους σωλήνες αερίου. Ακολουθεί άντληση του νερού που έχει συλλεχθεί μέσα στο φρεάτιο και μεταφορά του στη δεξαμενή υποδοχής. Προκειμένου να επιτυγχάνεται αποτελεσματική ψύξη, οι σωλήνες συμπυκνωμάτων νερού, όπως επίσης και η δεξαμενή, τοποθετούνται υπογείως. Η δεξαμενή είναι κατασκευασμένη από σκυρόδεμα και έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Ύψος: 2 m
- Διάμετρος: 1 m
- Μεικτή χωρητικότητα: 1,8 m³
- Χωρητικότητα λειτουργίας: 1 m³

Ο τεχνικός εξοπλισμός της δεξαμενής συμπυκνωμάτων διαθέτει:

- Μετρητή στάθμης
- Αντλία εκροής με αντιεκρηκτική πιστοποίηση ATEX ισχύος 1,25 kW.



Εικόνα 9 - Φρέαρ συμπυκνωμάτων νερού (προσωπικό αρχείο, 06/04/2026)

- Τεχνικό κτίριο (Εικόνες 10α και β)

Το τεχνικό κτίριο βρίσκεται μεταξύ του αντιδραστήρα χώνευσης και του αντιδραστήρα

μεταχώνευσης και περιλαμβάνει μηχανολογικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό (αντλιοστάσιο, συστήματα διακοπών και ελέγχου, σύστημα πίεσης αέρα, το σύστημα αποθείωσης με νωπό αέρα, βαλβίδες και άλλα όργανα).



(α)



(β)

Εικόνες 10 - Τεχνικό κτίριο (α) εξωτερική άποψη του κτιρίου, (β) αντλιοστάσιο εντός του τεχνικού κτιρίου (προσωπικό αρχείο, 06/04/2026)

- Σύστημα θέρμανσης δεξαμενών

Οι αντιδραστήρες χώνευσης και μεταχώνευσης είναι εξοπλισμένοι με θερμαντικούς δακτυλίους ώστε να εξασφαλίζεται μία σταθερή θερμοκρασία μέσα σε αυτούς ίση, κατά προσέγγιση, με 50°C για μία βέλτιστη ζύμωση. Μέσα στο τεχνικό κτίριο βρίσκεται το κεντρικό σύστημα κατανομής θερμότητας, το οποίο μεταφέρει τη σωστή ποσότητα θερμότητας μέσω αντλιών θερμότητας στους θερμαντικούς δακτυλίους μέσα στις δεξαμενές. Προκειμένου να εξασφαλίζεται η σωστή ροή σε μία επαρκή θερμοκρασία χρησιμοποιούνται αισθητήρες θερμοκρασίας και βαλβίδες ανάμειξης. Η θερμότητα που προέρχεται από το σύστημα ΣΗΘ μεταφέρεται μέσω χαλύβδινων σωλήνων και χρησιμοποιείται για τις εσωτερικές ανάγκες της μονάδας.

- Σύστημα διαχωρισμού (Εικόνα 11)

Η μονάδα είναι εξοπλισμένη με διαχωριστή τοποθετημένο σε χαλύβδινη πλατφόρμα επάνω από τη δεξαμενή αποθήκευσης και κοντά στις δύο λιμνοδεξαμενές. Ο διαχωριστής δέχεται χωνεμένο υπόλειμμα από τον αντιδραστήρα μεταχώνευσης και διαχωρίζει το στερεό υλικό με περιεκτικότητα σε ξηρά ουσία περίπου 25%, το οποίο εναποτίθεται επάνω σε πλατφόρμα από σκυρόδεμα. Το υγρό υπόλειμμα που προκύπτει από τον διαχωρισμό, συλλέγεται πρώτα στη μικρή λιμνοδεξαμενή αποθήκευσης

χωνεμένου υπολείμματος. Η ρύθμιση της ροής εξασφαλίζεται μέσω μίας υδραυλικής κυψέλης φορτίου τοποθετημένης στην είσοδο σύνδεσης του διαχωριστή. Για να αποτρέπεται η υπερχειλίση χρησιμοποιείται ένας πρόσθετος διακόπτης ορίου στάθμης.



Εικόνα 11 - Σύστημα διαχωρισμού (προσωπικό αρχείο, 06/04/2026)

- Λιμνοδεξαμενές αποθήκευσης υγρού χωνεμένου υπολείμματος (Εικόνες 12, 13)
Η μονάδα διαθέτει δύο παρακείμενες ανοικτές λιμνοδεξαμενές, μία μικρή λιμνοδεξαμενή (lagoon 1) (Εικόνα 13), στην οποία αποθηκεύεται προσωρινά το υγρό υπόλειμμα αφού διαχωριστεί στο σύστημα διαχωριστή και μία μεγαλύτερη λιμνοδεξαμενή (lagoon 2) (Εικόνα 12, 13), στην οποία μεταφέρεται τελικά το υγρό υπόλειμμα από τη μικρή λιμνοδεξαμενή με τελικό σκοπό την άντληση και μεταφορά του μέσω βυτίου σε γειτονικούς αγρούς.



Εικόνα 12 - Άποψη της μεγάλης λιμνοδεξαμενής (2) αποθήκευσης υγρού χωνεμένου υπολείμματος (προσωπικό αρχείο, 06/04/2026)



Εικόνα 13 - Λιμνοδεξαμενές 1 και 2 αποθήκευσης υγρού χωνεμένου υπολείμματος (PK ENERGY, 2026)

- Σύστημα αποθείωσης του παραγόμενου βιοαέριου· επιτυγχάνεται με τρεις τρόπους:

α) Χημική μέθοδος: προσθήκη οξειδίων σιδήρου

Οξείδια σιδήρου προστίθενται στην εισροή, αντιδρούν με το παραγόμενο υδρόθειο και σχηματίζουν αδιάλυτα άλατα θειούχου σιδήρου. Στην Εικόνα 14 φαίνεται το υπόστρωμα πριν από την εισαγωγή του μέσα στον βιοαντιδραστήρα χώνευσης, αναμειγμένο με οξείδια σιδήρου.



Εικόνα 14 - Μέθοδος αποθείωσης μέσω προσθήκης οξειδίων του σιδήρου (προσωπικό αρχείο, 06/04/2026)

β) Βιολογική μέθοδος : εμφύσηση ατμοσφαιρικού οξυγόνου

Για την απομάκρυνση του βλαβερού υδρόθειου από το βιοαέριο εφαρμόζεται εμφύσηση ατμοσφαιρικού οξυγόνου στον χώρο αερίου μέσα στους αντιδραστήρες χώνευσης και μεταχώνευσης μέσω φυσητήρα. Το υδρόθειο οξειδώνεται σε στοιχειακό θείο το μεγαλύτερο μέρος του οποίου επιστρέφει στην υγρή φάση μέσα στους χωνευτές δρώντας ως ένα ορυκτό για τα αναερόβια βακτήρια. Ο φυσητήρας αποθείωσης είναι ένας συμπιεστής πλευρικού καναλιού σε συνεχή λειτουργία. Σύστημα διανομής

αποτελούμενο από τρεις εξόδους σωλήνων από ανοξείδωτο χάλυβα είναι συνδεδεμένο με την πλευρά πίεσης του συμπιεστή (ένας σωλήνας συνδέεται με τον χώρο αερίου του αντιδραστήρα χώνευσης, ένας με τον χώρο αερίου του αντιδραστήρα μεταχώνευσης και ένας με τη δεξαμενή αποθήκευσης χωνεμένου υπολείμματος). Βαλβίδες ρυθμίζουν την παροχή του ατμοσφαιρικού οξυγόνου. Μετρητές ροής εγκατεστημένοι σε όλους τους σωλήνες ελέγχουν την ογκομετρική ροή η οποία ανέρχεται κατά προσέγγιση στο 2% της αναμενόμενης παραγωγής βιοαερίου. Βαλβίδες μονής κατεύθυνσης τοποθετημένες στο σύστημα σωλήνων είναι συνδεδεμένες απευθείας με τις δεξαμενές ώστε να εμποδίζουν μία ανάστροφη ροή του βιοαερίου μέσα στους σωλήνες αποθείωσης. Η απομάκρυνση συμπυκνωμάτων που πέφτουν μέσα στους σωλήνες αποθείωσης πραγματοποιείται με σε χαμηλά σημεία στο σύστημα αγωγών αέρα.

γ) Φίλτρο ενεργού άνθρακα

Το φίλτρο (Εικόνα 15) χρησιμοποιείται για να διαχωρίζει το υδρόθειο και τα σιλοξάνια από το βιοαέριο μέσω απορρόφησής τους επάνω σε επεξεργασμένο ενεργό άνθρακα. Για την αφαίρεση του υδρόθειου λαμβάνει χώρα φυσικοχημική διεργασία κατά την οποία το υδρόθειο μετατρέπεται σε στοιχειακό θείο και συγκεντρώνεται επάνω στην πορώδη επιφάνεια του ενεργού άνθρακα. Για να αφαιρεθούν τα σιλοξάνια εφαρμόζεται μία φυσική διεργασία. Ο χρησιμοποιημένος ενεργός άνθρακας αποβάλλεται από το φίλτρο και η ποσότητά του ελέγχεται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας μέσω αεροστεγούς βαλβίδας ολίσθησης.



Εικόνα 15 - Φίλτρο ενεργού άνθρακα (προσωπικό αρχείο, 06/04/2026)

- Σύστημα ελέγχου PLC

Το σύστημα PLC, το οποίο βρίσκεται στο κτίριο ανάμεσα στις δεξαμενές και στο δωμάτιο ελέγχου, ελέγχει όλες τις ηλεκτρικές συσκευές και μετρήσεις με σκοπό να παρέχει μία διεπαφή εύκολη στην χρήση, μία επισκόπηση των διεργασιών και να διευκολύνει τη στρατηγική ασφάλειας παρακολουθώντας και καταγράφοντας παραμέτρους των διεργασιών, σήματα συναγερμού και αρχεία. Μέσω μίας οθόνης αναπαράγονται σε σχηματική μορφή όλα τα στοιχεία της εγκατάστασης και παρέχονται πληροφορίες σχετικά με τα επίπεδα των διεργασιών, τις θέσεις των βαλβίδων, τις θερμοκρασίες, κ.τ.λ. Κάθε λειτουργία των διεργασιών μπορεί να απομονώνεται, να εκτελείται χειροκίνητα ή αυτοματοποιημένα.

- Σύστημα επεξεργασίας αερίου

Το βιοαέριο πριν από την εισαγωγή μέσα στη μονάδα ΣΗΘ υποβάλλεται σε ψύξη για την αφύγρανση του αερίου και περαιτέρω αποθείωση μέσω του φίλτρου ενεργού άνθρακα, όπως περιγράφηκε ανωτέρω, ώστε να εξασφαλίζεται η πλήρης δέσμευση του υδρόθειου και να αποτρέπεται, έτσι, ακόμη και η ελάχιστη έκλυσή του στην ατμόσφαιρα.

- Σύστημα ψύξης του αερίου

Ο εξοπλισμός ψύξης εξασφαλίζει την αφύγρανση και ξήρανση του βιοαερίου και αποτελείται από εναλλάκτη θερμότητας τύπου κελύφους-σωλήνα (shell and tube). Καθώς η ροή αέρα ψύχεται, το νερό συμπυκνώνεται και μπορεί να αφαιρείται από το αέριο. Το συσσωρευμένο συμπύκνωμα μπορεί να αποβάλλεται μέσω ενός δοχείου συλλογής συμπυκνωμάτων με έλεγχο στάθμης και αντλία συμπυκνωμάτων. Το νερό ψύξης παρέχεται από αερόψυκτο ψύκτη.

- Σύστημα ανάλυσης αερίου

Η συσκευή ανάλυσης εγκαθίσταται στο δωμάτιο ελέγχου και παρέχει συνεχή ανάλυση του βιοαερίου με σκοπό να εξασφαλίζει ότι η ποιότητα του παραγόμενου αερίου είναι ασφαλής ενώ ταυτόχρονα παρέχει ανατροφοδότηση στη διεργασία της ζύμωσης. Τα υπό εξέταση αέρια είναι μεθάνιο, διοξείδιο του άνθρακα, οξυγόνο και υδρόθειο. Μία σταθερή περιεκτικότητα του βιοαερίου σε μεθάνιο μεταξύ 52% και 55% αποτελεί ένδειξη σωστής λειτουργίας της αναερόβιας διεργασίας. Η ανάλυση της περιεκτικότητας του βιοαερίου σε υδρόθειο είναι ένας δείκτης σωστής λειτουργίας της διεργασίας αποθείωσης.

- Μονάδα συνδυασμένης παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΘ)

Η μονάδα ΣΗΘ (Εικόνα 16) αποτελείται από ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος που περιλαμβάνει μηχανή 999 kWel Jenbacher συνδεδεμένη με γεννήτρια Jenbacher. Η μηχανή αερίου 999 kWel Jenbacher αποτελεί μία αποτελεσματική και έτοιμη προς χρήση λύση που διατίθεται σε συσκευασία container στιβαρής και συμπαγούς αρχιτεκτονικής ενώ επιτυγχάνει ταυτόχρονα υψηλή συνολική απόδοση, μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και του λειτουργικού κόστους, εξοικονόμηση χώρου και μεγάλη διάρκεια ζωής.

Το σύστημα ΣΗΘ είναι σχεδιασμένο ώστε να καταναλώνει το παραγόμενο βιοαέριο και να το μετατρέπει σε ηλεκτρική και θερμική ενέργεια. Μέρος της ενέργειας που παράγεται, χρησιμοποιείται για τη θέρμανση των αντιδραστήρων, όπως επίσης και στο σύστημα ψύξης και την εξωτερική μονάδα αποθείωσης. Το σύστημα ΣΗΘ είναι συνδεδεμένο αφενός με τους σωλήνες αερίου και θέρμανσης και αφετέρου με το δημόσιο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

Το container είναι εξοπλισμένο με:

- Σύστημα συναγερμού καπνού με ανιχνευτήρες μέσα στον χώρο του μηχανολογικού εξοπλισμού
- Συσκευή ειδοποίησης για διαρροή αερίου μέσα στον χώρο του μηχανολογικού εξοπλισμού
- Σύστημα αερισμού
- Σύστημα καυσαερίων
- Ερμάρια για βοηθητικά συστήματα κίνησης
- Πίνακα ελέγχου για τη γεννήτρια και βοηθητικά συστήματα
- Εσωτερικό φωτισμό στο container

- Φλόγα αερίου (Εικόνα 17)

Η φλόγα αερίου είναι αναγκαία σε έκτακτες περιπτώσεις όπου οι προσωρινοί χώροι αποθήκευσης του βιοαερίου (αεροφυλάκια στους χωνευτήρες) είναι πλήρεις και η παραγωγή βιοαερίου είναι υψηλότερη από την κατανάλωσή του. Επειδή, λοιπόν, υπάρχει κίνδυνος έκλυσης του βιοαερίου στην ατμόσφαιρα, καθίσταται αναγκαία η καύση της περίσσειάς του που δεν χρησιμοποιείται στη μονάδα ΣΗΘ ώστε να εξασφαλίζεται η ασφαλής απομάκρυνσή του.



Εικόνα 16 - Μονάδα ΣΗΘ (PK ENERGY, 2026)



Εικόνα 17 - Πυρσός καύσης βιοαέριου (προσωπικό αρχείο, 06/04/2026)

6.3 Υποστρώματα

Η ετήσια ποσότητα πρώτων υλών, οι οποίες εισέρχονται στη μονάδα και χρησιμοποιούνται ως υποστρώματα για τους βιοαντιδραστήρες, είναι περίπου 45.000 τόνοι.

Τα χρησιμοποιούμενα υποστρώματα είναι υγρή κοπριά αγελάδων, κοπριά από κοτόπουλα πάχυνσης, τυρόγαλο, διφασικός ελαιοπυρήνας, κατσίγαρος, υπολείμματα φρούτων, κλπ.

Μία ενδεικτική ημερήσια τροφοδοσία είναι: 3 t αλεσμένος καρπός καλαμποκιού, 50 t πούλπα πορτοκαλιού, 8 t κοπριά κοτόπουλων πάχυνσης και 13t συμπυκνωμένος ορός γάλακτος.

Στον κάτωθι Πίνακα 17 παρουσιάζονται τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά κάποιων ενδεικτικών εισερχομένων πρώτων υλών.

Πίνακας 17 - Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά ενδεικτικών εισερχόμενων πρώτων υλών (Τροποποίηση από Πηγή: PK ENERGY)

		Ορός	Καλαμπόκι σπασμένο	Πούλπα πορτοκαλιού	Κουτσολιά
TS	Μέση τιμή (g/kg)	284,4	901,5	300,9	719,4
	Τυπική απόκλιση (g/kg)	-	0,8	-	-
VS	Μέση τιμή (g/kg)	279,9	836,3	225,4	541,8
	Τυπική απόκλιση (g/kg)	-	27,9	-	-
Υγρασία	(%)	71,5	9,8	69,9	28,1
pH		4,13	-	-	-
EC	(mS/cm)	16,35	-	-	-
COD	(g/L)	288	-	-	-
Απόδοση	(m ³ /tn)	194	650	145	312

TS: ολικά στερεά

VS: πτητικά στερεά

EC: ηλεκτρική αγωγιμότητα

COD: χημική απαίτηση οξυγόνου

6.4 Διαδικασία παραγωγής

Τα οχήματα που μεταφέρουν τις πρώτες ύλες στη μονάδα αποτελούνται από φορτηγά, τα οποία μεταφέρουν στερεές πρώτες ύλες, και βυτία, τα οποία μεταφέρουν υγρές πρώτες ύλες. Κατά την έλευση τους στη μονάδα διέρχονται από τροχόλουτρο προκειμένου να απολυμανθούν οι τροχοί τους και στη συνέχεια οδηγούνται στην πλάστιγγα ζύγισης όπου πραγματοποιείται η ζύγιση των μεταφερόμενων πρώτων υλών.

Η υγρή πρώτη ύλη μεταφέρεται στην υπόγεια δεξαμενή υποδοχής (Εικόνα 4) όπου παραμένει εκεί έως ότου μεταφερθεί στον βιοαντιδραστήρα χώνευσης μέσω της υποβρύχιας αντλίας.

Η στερεά πρώτη ύλη εκφορτώνεται στις δύο πίστες αποθήκευσης (Εικόνα 3) όπου αποθηκεύεται προσωρινά έως ότου μεταφερθεί στο σύστημα τροφοδοσίας (Εικόνα 5), μέσα στο οποίο επιτυγχάνεται η ανάμειξη και η ομογενοποίηση του στερεού υποστρώματος και, εφόσον χρειάζεται, η αραίωσή του με υγρό χωνεμένο υπόλειμμα που προέρχεται από τον βιοαντιδραστήρα χώνευσης. Ακολουθεί η απευθείας μεταφορά της στερεάς πρώτης ύλης μέσα στον πρώτο χωνευτήρα ανά 2 ώρες.

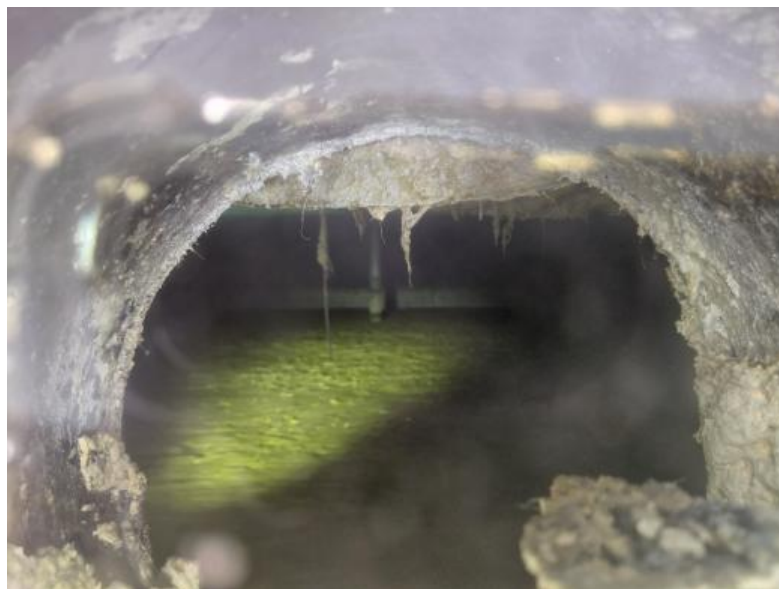
Αναερόβια χώνευση

Η παροχή των στερεών και υγρών υποστρωμάτων μέσα στον πρώτο βιοαντιδραστήρα χώνευσης (D₁) πραγματοποιείται μέσω σωλήνα τροφοδοσίας στο επάνω μέρος του βιοαντιδραστήρα (Σχήμα 4). Μετά τη μεταφορά των υποστρωμάτων στον D₁, ξεκινάει η κύρια βιοχημική διαδικασία αποσύνθεσης υπό θερμόφιλες συνθήκες (κατά προσέγγιση, 50°C). Η χώνευση μέσα στον βιοαντιδραστήρα χώνευσης D₁ διαρκεί 28 ημέρες.

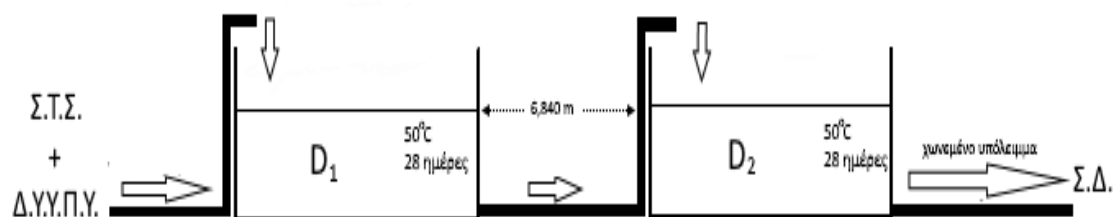
Τα φρέσκα υποστρώματα αναμειγνύονται με τα ήδη υπάρχοντα μέσα στη δεξαμενή και αφού θερμανθούν, αρχίζει η διεργασία της ζύμωσής τους μετά από αρκετές ημέρες (Εικόνα 18). Η βαθμιαία αποδόμηση των οργανικών συστατικών των υποστρωμάτων επιτυγχάνεται με την παρουσία διαφορετικών βακτηριακών στελεχών. Η παραγωγή του βιοαερίου πραγματοποιείται στο τελευταίο στάδιο της αποσύνθεσης. Τα υποστρώματα τείνουν να έχουν χαμηλότερη πυκνότητα από το νερό και, έτσι, το μη χωνεμένο υπόλειμμα παραμένει στα ανώτερα στρώματα. Κατά τη διάρκεια της

αποδόμησης της οργανικής ύλης, η πυκνότητα των υποστρωμάτων αυξάνεται σταδιακά με συνέπεια να βυθίζονται αργά προς τα κατώτερα στρώματα.

Από τη μονάδα καθορίζεται ένα συγκεκριμένο όριο στάθμης μέσα στον D₁, για παράδειγμα, 6,840 μέτρα. Όταν το περιεχόμενο του D₁ φτάσει το όριο αυτό, αρχίζει η μετάγγιση του περιεχομένου από τον D₁ προς τον βιοαντιδραστήρα μεταχώνευσης (D₂). Η άντληση των υποστρωμάτων από τον D₁ προς τον D₂ πραγματοποιείται μέσω σωλήνα άντλησης στο κάτω μέρος του D₁ ενώ η παροχή τους στον D₂ πραγματοποιείται στο επάνω μέρος του D₂ (Σχήμα 4). Η μεταφορά των υποστρωμάτων στη δεξαμενή μεταχώνευσης πραγματοποιείται μέσω του κεντρικού δικτύου άντλησης, το οποίο βρίσκεται μέσα στο τεχνικό κτίριο ανάμεσα στους δύο βιοαντιδραστήρες. Η χώνευση μέσα στον D₂ διαρκεί επίσης 28 ημέρες, περίπου στην ίδια θερμοκρασία. Όταν το περιεχόμενο μέσα στον D₂ φτάσει το ίδιο όριο στάθμης (6,840 μέτρα), αρχίζει η μεταφορά του από τον D₂ μέσω σωλήνα στο κάτω μέρος του D₂ (Σχήμα 4) προς τη δεξαμενή αποθήκευσης χωνεμένου υπολείμματος. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για τις ουσίες που δεν έχουν αποδομηθεί έως ότου παρέλθει ο κατάλληλος χρόνος παραμονής και ολοκληρωθεί η ζύμωσή τους. (Ο σχεδιασμός του Σχήματος 4 βασίστηκε σε στοιχεία που δόθηκαν από την εταιρεία).



Εικόνα 18 - Διεργασία αναερόβιας χώνευσης στο εσωτερικό του αντιδραστήρα χώνευσης (προσωπικό αρχείο, 06/04/2026)



Σχήμα 4 - Ροή πρώτης ύλης από το σύστημα τροφοδοσίας στερεών (Σ.Τ.Σ.) και τη δεξαμενή υποδοχής υγρής πρώτης ύλης (Δ.Υ.Υ.Π.Υ.) έως το σύστημα διαχωρισμού (Σ.Δ.) μέσω σωλήνων άντλησης

Παραγωγή χωνεμένου υπολείμματος

Το υγρό υπόστρωμα που διαχωρίζεται στο σύστημα διαχωρισμού μεταφέρεται πρώτα στη μικρή λιμνοδεξαμενή αποθήκευσης χωνεμένου υπολείμματος (lagoon 1) μέσα στην οποία παραμένει 30 ημέρες. Ακολουθεί μεταφορά του υπολείμματος από τη μικρή λιμνοδεξαμενή προς την παρακείμενη της λιμνοδεξαμενή (lagoon 2) από την οποία τελικά αντλείται το υγρό χωνεμένο υπόλειμμα μέσω του βυτίου της μονάδας και διατίθεται δωρεάν στους γειτονικούς αγρούς (Εικόνα 19). Η μονάδα δε διαθέτει τμήμα παστερίωσης. Αντ' αυτού, όπως προαναφέρθηκε, η πρώτη ύλη παραμένει 28 ημέρες στον αντιδραστήρα χώνευσης και 28 ημέρες στον αντιδραστήρα μεταχώνευσης, δηλαδή, συνολικά 56 ημέρες στους δύο αντιδραστήρες περίπου στους 50°C και επιπλέον 30 ημέρες πρώτα στη μικρή λιμνοδεξαμενή αποθήκευσης υγρού χωνεμένου υπολείμματος προτού καταλήξει στη μεγάλη λιμνοδεξαμενή αποθήκευσης υγρού χωνεμένου υπολείμματος και, τέλος, με μεταφορά του μέσω βυτίου στις αγροτικές καλλιέργειες της περιοχής όπου χρησιμοποιείται ως λίπασμα.

Το στερεό κλάσμα, μετά τον διαχωρισμό μεικτού υπολείμματος στο σύστημα διαχωρισμού, πέφτει επάνω σε πλατφόρμα και αποθηκεύεται σε χώρο αποθήκευσης για να διατεθεί κι αυτό δωρεάν σε αγρούς της περιοχής όπου χρησιμοποιείται, επίσης, ως λίπασμα.

Η ποσότητα των υποστρωμάτων που εισέρχονται στον βιοαντιδραστήρα χώνευσης D₁ είναι ίση με την ποσότητα των υποστρωμάτων που εισέρχονται στον βιοαντιδραστήρα μεταχώνευσης D₂ και ίση με την ποσότητα που εξέρχεται ως στερεό και υγρό χωνεμένο υπόλειμμα. Όπως προαναφέρθηκε, η ποσότητα των υποστρωμάτων

που εισέρχονται στη μονάδα ετησίως είναι 45.000 τόνοι, άρα, η ποσότητα χωνεμένου υπολείμματος που εξέρχεται ετησίως είναι, επίσης, 45.000 τόνοι, εκ των οποίων το 6% είναι στερεό και το υπόλοιπο 94% υγρό χωνεμένο υπόλειμμα.



Εικόνα 19 - Άντληση υγρού χωνεμένου υπολείμματος από τη μεγάλη λιμνοδεξαμενή μέσω βυτίου της μονάδας προς διάθεση σε γειτονικούς αγρούς (προσωπικό αρχείο, 06/04/2026)

Παραγωγή βιοαερίου / ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας

Το βιοαέριο που παράγεται κατά την αναερόβια χώνευση μέσα στους δύο αντιδραστήρες χώνευσης και μεταχώνευσης αποθηκεύεται προσωρινά στη στέγη των δεξαμενών που αποτελείται από θολωτή μεμβράνη διπλού στρώματος (αεροφυλάκιο). Ακολουθεί εξαγωγή του παραγόμενου βιοαερίου από το αεροφυλάκιο του αντιδραστήρα μεταχώνευσης μέσω σωλήνα (Εικόνα 20). Κατά την εξαγωγή του, το βιοαέριο έχει θερμοκρασία περίπου 45°C -50°C και πολύ υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία, η οποία μπορεί να προκαλεί διάβρωση και βλάβες στη μονάδα ΣΗΘ. Η αφαίρεση υδρατμών από το βιοαέριο δύναται να επιτυγχάνεται με τη ψύξη του, η οποία προκαλεί τη δημιουργία συμπυκνωμάτων νερού. Έτσι, η μεταφορά του βιοαερίου προς τη μονάδα ΣΗΘ πραγματοποιείται μέσω υπόγειου σωλήνα ώστε να μειώνεται η θερμοκρασία του, περίπου στους 20°C και, έτσι, να συμπυκνώνεται ένα μέρος των υδρατμών που περιέχονται στο βιοαέριο. Στην Εικόνα 21α φαίνεται το σημείο στο οποίο ο υπόγειος σωλήνας μεταφοράς του βιοαερίου που μεταφέρει το βιοαέριο από τον αντιδραστήρα μεταχώνευσης γίνεται υπέργειος και οδηγεί το βιοαέριο στη μηχανή.



Εικόνα 20 - Σωλήνας εξαγωγής βιοαερίου από το αεροφυλάκιο του αντιδραστήρα μεταχώνευσης (προσωπικό αρχείο, 06/04/2026)

Πριν από την εισαγωγή του μέσα στη μονάδα ΣΗΘ, το βιοαέριο διέρχεται από το σύστημα ψύξης αερίου (Εικόνες 21 (α) και (β)) που αποτελείται από εναλλάκτη θερμότητας και ψύχει περαιτέρω το βιοαέριο μειώνοντας τη θερμοκρασία του περίπου στους 5°C. Έτσι επιτυγχάνεται η αφύγρανση/ξήρανση του βιοαερίου ενώ τα συμπυκνώματα νερού που έχουν δημιουργηθεί, απομακρύνονται από παγίδα συμπυκνωμάτων και καταλήγουν στο φρεάτιο συμπυκνωμάτων νερού μέσα στο οποίο αποθηκεύονται προσωρινά για να οδηγηθούν τελικά στη δεξαμενή υποδοχής.



(α)



(β)

Εικόνες 21 - Σύστημα ψύξης βιοαερίου (α) σωλήνας μεταφοράς του βιοαερίου στη μονάδα ΣΗΘ και (β) εναλλάκτης θερμότητας (προσωπικό αρχείο, 06/04/2026)

Μετά το στάδιο της αφύγρανσης ακολουθεί η τελική διαδικασία αποθείωσης του βιοαερίου μέσω φίλτρου ενεργού άνθρακα (Εικόνα 22). Το φίλτρο ενεργού άνθρακα είναι τοποθετημένο πριν από τη μονάδα ΣΗΘ και αφαιρεί σχεδόν όλο το υδροθείο που έχει απομείνει στο βιοαέριο μετά από τις δύο προηγούμενες διαδικασίες αποθείωσης, δηλαδή, τη χρήση σιδήρου και τη βιολογική αποθείωση. Η αποθείωση του βιοαερίου προφυλάσσει τις μηχανές ΣΗΘ και το περιβάλλον από τα αρνητικά χαρακτηριστικά του υδροθείου, δηλαδή τη δυσοσμία, την τοξικότητα και διαβρωτικότητα του.



Εικόνα 22 - Μεταφορά του βιοαερίου στο φίλτρο ενεργού άνθρακα μετά από τη ξήρανσή του (προσωπικό αρχείο, 06/04/2026)

Τέλος, το καθαρισμένο και ξηρό βιοαέριο μεταφέρεται στη μονάδα συνδυασμένης παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΘ) όπου εκεί διοχετεύεται σε Μηχανή Εσωτερικής Καύσεως (ΜΕΚ) 999 kWel Jenbacher (Εικόνα 23) για την καύση του και περαιτέρω μετατροπή της παραγόμενης μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική μέσω συνδεδεμένης γεννήτριας Jenbacher (Εικόνα 24). Η θερμότητα που παράγεται στη μονάδα ΣΗΘ από τα καυσάεiria της μηχανής, το νερό ψύξης χιτωνίου του κινητήρα, το λιπαντικό έλαιο, ανακτάται από μονάδα ανάκτησης θερμότητας και

χρησιμοποιείται ως ζεστό νερό για τη θέρμανση εσωτερικών τμημάτων της μονάδας, όπως για τη θέρμανση των χωνευτήρων.

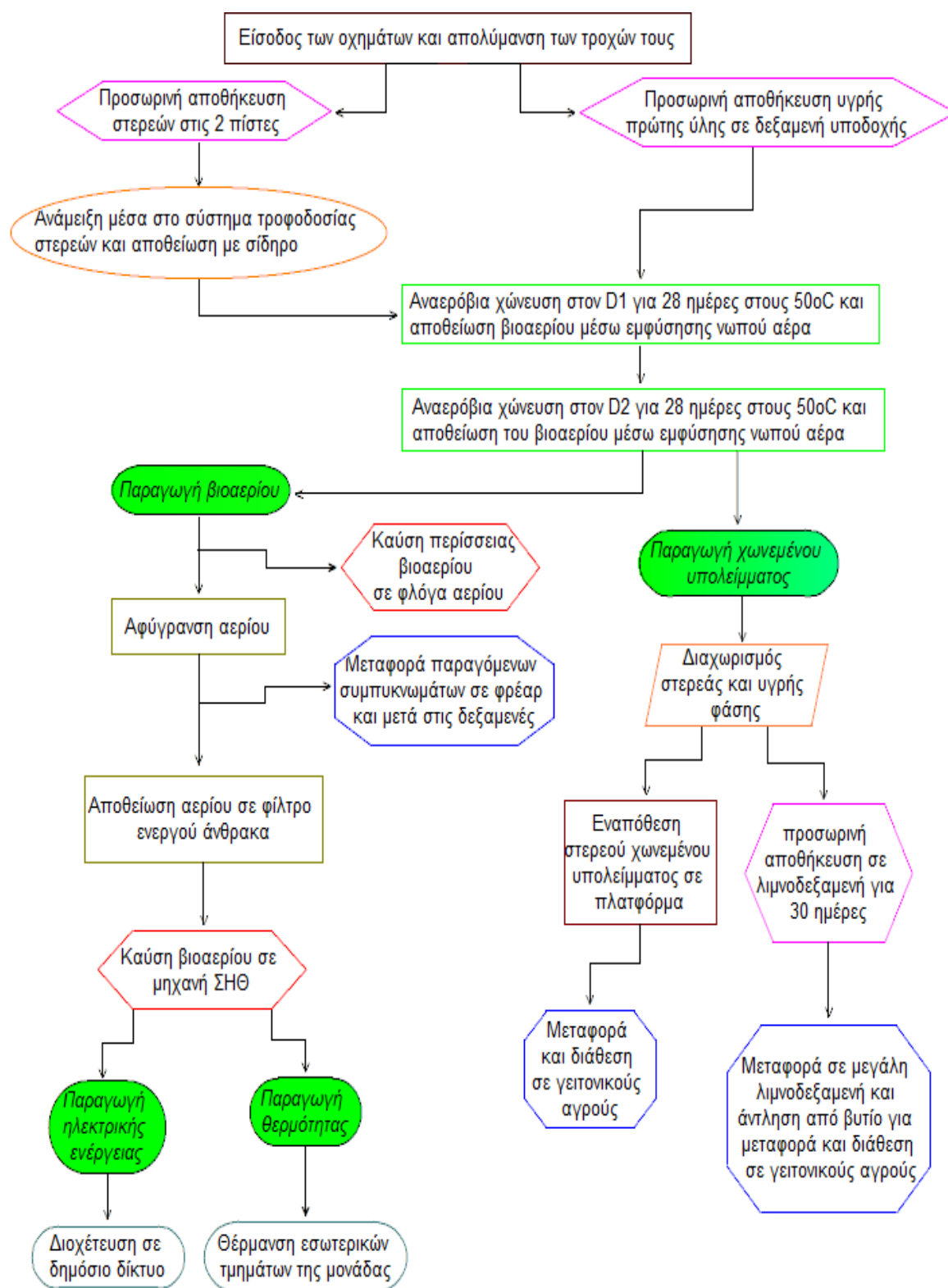
Στην περίπτωση που η παραγόμενη ποσότητα βιοαερίου είναι υψηλότερη από την κατανάλωσή του και οι προσωρινές αποθήκες αερίου μέσα στους χωνευτήρες (αεροφυλάκια) είναι πλήρεις χρησιμοποιείται φλόγα αερίου (πυρσός) για την ασφαλή απομάκρυνσή του.

Όλη η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς χαμηλής τάσης διοχετεύεται στο δημόσιο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας αφού πρώτα ανυψωθεί σε ηλεκτρική ισχύ μέσης τάσης μέσω μετασχηματιστή.

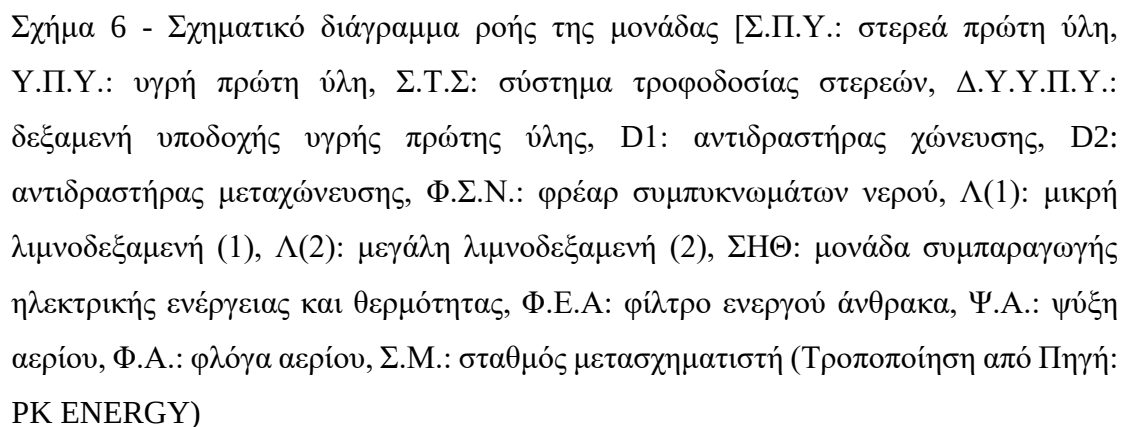


Εικόνα 23 – (α) Μηχανή Εσωτερικής Καύσεως (MEK) 999 kWel Jenbacher, (β) Γεννήτρια Jenbacher (προσωπικό αρχείο, 06/04/2026)

Το σχήμα 5 παρουσιάζει ένα διάγραμμα ροής όλων των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στην εν λόγω μονάδα συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας και το Σχήμα 6 παρουσιάζει ένα σχηματικό διάγραμμα της μονάδας. (Ο σχεδιασμός του Σχήματος 5 βασίστηκε σε στοιχεία που δόθηκαν από την εταιρεία).



Σχήμα 5 - Διάγραμμα ροής διαδικασιών της μονάδας βιοαερίου



Στην υπό εξέταση μονάδα συμπαραγωγής 999 kWel Jenbacher, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι 8.300.000 kWhel./έτος, ενώ η θερμική ενέργεια είναι 4.940.000 kWhtherm./έτος. Η ολική απόδοση της μονάδας ΣΗΘ είναι 64,3%, ενώ η απόδοση που αντιστοιχεί στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι 40,3% και η απόδοση που αντιστοιχεί στην παραγόμενη θερμική ενέργεια είναι 24%.

Στον κάτωθι Πίνακα 18 παρουσιάζονται αναλυτικά κάποια τεχνικά στοιχεία της

μονάδας ΣΗΘ .

Πίνακας 18 - Τεχνικά στοιχεία της μονάδας ΣΗΘ (Τροποποίηση από Πηγή: PK ENERGY)

		100%
Ισχύς εισόδου	kW	2.478
Όγκος αερίου	Nm ³ /h	551
Μηχανική ισχύς εξόδου	kW	1.031
Ηλεκτρική ισχύς εξόδου	kW el.	999
Ανακτώμενη θερμική ισχύς εξόδου (υπολογισμένη με γλυκόλη 37%)		
- Ενδιάμεσος ψύκτης 1 ^{ου} σταδίου	kW	140
- Λιπαντικό έλαιο	kW	117
- Νερό ψύξης χιτωνίου κινητήρα	kW	337
Ολική ανακτώμενη θερμική ισχύς	kW	594
Ολική παραγόμενη ισχύς εξόδου (ηλεκτρική+θερμική)	kW total	1.593
Θερμότητα προς απαγωγή (υπολογισμένη με γλυκόλη 37%)		
- Ενδιάμεσος ψύκτης 2 ^{ου} σταδίου	kW	94
- Λιπαντικό έλαιο	kW	----
- Θερμότητα επιφάνειας	kW	89
Ειδική κατανάλωση καυσίμου μηχανής για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας	kWh/kWel. h	2,48
Ειδική κατανάλωση καυσίμου μηχανής	kWh/kWh	2,40
Κατανάλωση λιπαντικού ελαίου	kg/h	0,31
Απόδοση ηλεκτρικής ενέργειας	%	40,3
Απόδοση θερμικής ενέργειας	%	24,0
Ολική απόδοση	%	64,3

Ο κάτωθι Πίνακας 19 δημιουργήθηκε με βάση στοιχεία που δόθηκαν από την εταιρεία. Στον εν λόγω πίνακα φαίνονται τα κόστη και έσοδα της μονάδας βιοαερίου.

Πίνακας 19 - Οικονομικά στοιχεία της μονάδας βιοαερίου (Πηγή: PK ENERGY)

Κόστος επένδυσης	Κόστος λειτουργίας	Έσοδα
4,5 εκ. €	1 εκ €/έτος	1,9 εκ €/έτος

Χρηματιστήριο ενέργειας

Το Ελληνικό Χρηματιστήριο Ενέργειας Α.Ε. (EXE Α.Ε.) ιδρύθηκε στις 18/06/2018 και ορίστηκε από την Ελληνική Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ) ως Ορισθείς Διαχειριστής Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας με αρμοδιότητα τη διαχείριση και λειτουργία των Αγορών του σε καθημερινή βάση.

Το EXE διαχειρίζεται τη λειτουργία της Αγοράς Επόμενης Ημέρας και της Ενδοημερήσιας Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας παρέχοντας πλατφόρμες στις οποίες λαμβάνουν χώρα οι ενεργειακές συναλλαγές και παρέχοντας τους κανονισμούς που διέπουν αυτές. Οι τιμές διαμορφώνονται με βάση την προσφορά, τη ζήτηση και τον ανταγωνισμό μεταξύ αγοραστών και πωλητών ενέργειας υπό την εποπτεία του EXE.

Σε περιπτώσεις όπου οι τιμές πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας στον ΔΕΔΔΗΕ (Διαχειριστής Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας) διαμορφώνονται να είναι μηδενικές για κάποιες ώρες της επόμενης ημέρας, η μονάδα επιλέγει ως οικονομικά συμφέρουσα λύση να διακόπτει τη λειτουργία του συστήματος ΣΗΘ για αυτές τις ώρες. Την ημέρα της επίσκεψης (06/04/2026) η μονάδα ΣΗΘ δεν λειτούργησε από τις 10.00 έως 18.00.

7. Συμπεράσματα

Οι περισσότερες χώρες έχουν αναγνωρίσει τα τελευταία χρόνια τον σημαντικό ρόλο που παίζει η τεχνολογία βιοαερίου στη μετάβαση σε βιώσιμα ενεργειακά συστήματα. Οι βασικότεροι λόγοι είναι η ενεργειακή ανασφάλεια που έχει ενταθεί από τον ολοένα και αυξανόμενο κίνδυνο εξάντλησης φυσικών πόρων, από τις πολεμικές συγκρούσεις και τη γεωπολιτική αστάθεια που φαίνεται να μετατρέπεται σε νέα σταθερά της παγκόσμιας κοινωνίας, καθώς επίσης και η ανάγκη μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, αξιοποίησης των οργανικών αποβλήτων και, τελικά, υλοποίησης της έννοιας της κυκλικής οικονομίας. Από την παρούσα διπλωματική εργασία εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Τα ανεπαρκή οικονομικά κίνητρα και κρατικά μέτρα στήριξης, η γραφειοκρατία (βραδείες αδειοδοτικές διαδικασίες, αποζημιώσεις) έχουν εμποδίσει την πλήρη ενεργειακή αξιοποίηση του τεράστιου δυναμικού βιομάζας που διαθέτει η Ελλάδα.
- Από τους 146 σταθμούς βιοαερίου που υπάρχουν σήμερα στην Ελλάδα, μόνο οι 6 έχουν εκδηλώσει ενδιαφέρον για μετατροπή βιοαερίου σε βιομεθάνιο. Εκτιμάται ότι το 2030, η παραγωγή βιομεθανίου θα είναι αρκετά χαμηλότερη από 2 bcm/έτος.
- Την περίοδο 2021-2023, λόγω φιλόδοξων στόχων που τέθηκαν για το 2030 και λόγω σχεδιασμού εθνικών στρατηγικών, σε αρκετές χώρες (Ευρώπη, Ινδία, Κίνα) εκδηλώθηκε ενδιαφέρον προς την τεχνολογία βιοαερίου.
- Το 2023 επιταχύνθηκε η παραγωγή βιοαερίου στις ΗΠΑ χάρη στις μεγάλες φορολογικές πιστώσεις και στην Ευρώπη χάρη στα αναθεωρημένα τιμολόγια.
- Στη Γερμανία, η οποία εξακολουθεί να είναι η μεγαλύτερη αγορά βιοαερίου και βιομεθανίου, θα ληφθούν ένα πλήθος μέτρων, όπως η μετατροπή μεγαλύτερων μονάδων σε μονάδες βιομεθανίου και η χρήση bio-CNG και bio-LNG για τις μεταφορές. Αναμένεται αύξηση μόνο του βιομεθανίου 19% μεταξύ 2025-2060.
- Η παραγωγή βιομεθανίου ευνοήθηκε σε χώρες, όπως η Ιταλία, με πολιτικές που προωθούν την κατασκευή καινούριων μονάδων βιομεθανίου ή τροποποίηση των υπάρχουσών μονάδων βιοαερίου. Η Ιταλία είναι η 2η μεγαλύτερη αγορά βιοαερίου στην Ευρώπη· σχεδόν όλο το βιομεθάνιο χρησιμοποιείται στις μεταφορές.
- Οι προβλέψεις για την Ευρώπη δείχνουν ότι θα μπορέσει να επιτύχει με συνδυασμένη παραγωγή το 68% του στόχου των 35 bcm σύμφωνα με το σχέδιο REPower EU.
- Η παραγωγή βιοαερίου μπόρεσε να αυξηθεί (α) με προσθήκη 25 mg IONP/g VS σε μείγμα υποστρωμάτων CM και OMW με λόγο ανάμειξης CM:OMW = 25:75 (παραγωγή βιοαερίου 0,339 Nm³/kg VS) και (β) με προεπεξεργασία σε υπόστρωμα OMW μέσω διεργασίας Fenton με συγκέντρωση H₂O₂ ίση με 2g/kgVS και λόγο Fe²⁺/H₂O₂ = 0,006 (παραγωγή βιοαερίου 0,311 Nm³/kg VS).
- Τα υβριδικά συστήματα ΣΗΘ που περιλαμβάνουν κι άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες, συμβάλλουν στην ενίσχυση της ευστάθειας και αξιοπιστίας του δικτύου, τον περιορισμό των εκπομπών άνθρακα και την ενίσχυση της τοπικής οικονομίας.

- Υψηλή απόδοση αφαίρεσης υδρόθειου από βιοαέριο ($690 \text{ mg H}_2\text{S/g}$ προσροφητή) επιτεύχθηκε με διεργασία προσρόφησης σε ενεργό άνθρακα που παρασκευάστηκε με σύνθεση από τοπικά διαθέσιμη βιομάζα αποτελούμενη από φλοιό ευκαλύπτου και χρησιμοποιώντας KOH ως αντιδραστήριο.
- Οι ανόργανες μεμβράνες από αλουμίνα και ζεόλιθο, οι κεραμικές μεμβράνες, οι πολυμερικές μεμβράνες, οι μεμβράνες μεικτής μήτρας, οι μεμβράνες ανθρακούχων μοριακών κοσκίνων, οι μεμβράνες με ασύμμετρες δομές προσφέρουν υψηλή ικανότητα διαχωρισμού κατά την αναβάθμιση του βιοαερίου.
- Σε δοκιμή δέσμευσης CO_2 με μεμβράνες πριν και μετά από την καύση του βιοαερίου δεσμεύτηκε σχεδόν όλη η ποσότητα του CO_2 (99,60%) παρέχοντας, έτσι, τη δυνατότητα παραγωγής πράσινου υδρογόνου.
- Οι υψηλοί συντελεστές προσδιορισμού και τα πολύ μικρά μέσα τετραγωνικά σφάλματα που προκύπτουν με συνδυαστικά μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης, όπως ABNN-PSO, FBPNN/NSGA-II, FFNN/BRBP, παρέχουν ακρίβεια στις προβλέψεις επιδραστικών μεταβλητών εισόδου (π.χ., πίεση εισόδου και ρυθμός ροής του βιοαερίου, περιεκτικότητα σε μεθάνιο) που παρουσιάζουν διακυμάνσεις με σκοπό να βελτιστοποιείται η απόδοση μίας μονάδας βιοαερίου.
- Μελετήθηκε μονάδα παραγωγής βιοαερίου ΣΗΘ 999 kW_{el} στην Βοιωτία, η οποία έχει μία ενδεικτική ημερήσια τροφοδοσία, περίπου, 74 t (π.χ., ορός γάλακτος), ολική απόδοση ίση με 64,3%, παράγει ποσότητα βιοαερίου 3.995.000 Nm³/έτος, ηλεκτρική ενέργεια 8.300.000 kWh_{el}./έτος (απόδοση 40,3%) και θερμική ενέργεια 4.940.000 kWh_{therm}./έτος (απόδοση 24%). Τα έσοδά της είναι 1,9 εκ €/έτος.

Βιβλιογραφία

Ξένη βιβλιογραφία

- Abdurrahman, A., Sutiarso, L., Ainuri, M., Ushada, M., Islam, P., 2024. Adaptive Back-Propagation Neural Network and Particle Swarm Optimization-Based Approach for Optimizing the Output Power Biogas Fueled Electric Generator. IEEE Access 12, 132303-132316. doi: 10.1109/ACCESS.2024.3459950.
- Aguilloso, G., Arpia, K., Khan, M., Sapico, Z.A., Lopez, E.C.R., 2024. Recent Advances in Membrane Technologies for Biogas Upgrading. Engineering Proceedings 67, 1-21. <https://doi.org/10.3390/engproc2024067057>.
- Al Bkour Alrawashdeh, K., Al-Samraie, L.A., Al Issa, H.A., Qasem, I., Hussien, A.A., Al-Zboon, K.K., Damseh, R.A., Gul, E., 2022a. Prediction and Optimization of Biogas Production from OMW Digestion Using Fenton Pre-Treatment Process with Particle Swarm Optimization. International Journal of Design & Nature and Ecodynamics 17, 157-168. <https://doi.org/10.18280/ijdne.170201>.
- Al Bkour Alrawashdeh, K., Al-Zboon, K.K., Al Rabadi, S., Gul, E., AL-Samraie, L.A., Ali, R., Al-Tabbal, J.A., 2022b. Impact of Iron oxide nanoparticles on sustainable production of biogas through anaerobic co-digestion of chicken waste and wastewater. Frontiers in Chemical Engineering 4, 1-11. doi: 10.3389/fceng.2022.974546.
- Alvarez, D.J.C., García, J.A.C., Bustinza, J.C.L., Pérez, B.R., Alvarez, Y.C., Borges, R.J., 2025. Improved biogas production by anaerobic co-digestion of whey and bovine manure: A case study in Montevideo-Peru. 23rd LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: “Engineering, Artificial Intelligence, and Sustainable Technologies in service of society”, 1-10. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2025.1.1.661>.
- Atelge, M.R., Senol, H., Djaafri, M., Hansu, T.A., Krisa, D., Atabani, A., Eskicioglu, C., Muratçobanoğlu, H., Unalan, S., Kalloum, S., Azbar, N., Kivrak, H.D., 2021. A Critical Overview of the State-of-the-Art Methods for Biogas Purification and Utilization Processes. Sustainability 13, 1-39. <https://doi.org/10.3390/su132011515>.
- Bahrn, M.H.V., Bono, A., Othman, N., Zaini, M.A.A., 2025a. Simultaneous production during biogas upgrading: Foundational insights from numerical simulation of dual-reflux pressure swing adsorption. Next Energy 7, 1-8.

- <https://doi.org/10.1016/j.nxener.2025.100242>.
- Bahrn, M.H.V., Bono, A., Othmana, N., Zaini, M.A.A., 2025b. Neural network-assisted multi-objective optimization of dual-reflux pressure swing adsorption in biogas upgrading. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 100, 2541–2560. <https://doi.org/10.1002/jctb.7879>.
- Bakkaloglu, S., Lowry, D., Fisher, R.E., France, J.L., Brunner, D., Chen, H., Nisbet, E.G., 2021. Quantification of methane emissions from UK biogas plants. *Waste Management* 124, 82–93. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.01.011>.
- Baldé, H., Wagner-Riddle, C., MacDonald, D., VanderZaag, A., 2022. Fugitive methane emissions from two agricultural biogas plants. *Waste Management* 151, 123–130. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.07.033>.
- Bao, Y., Fu, Y., Wang, C., Wang, H., 2021. An effective integrated system used in separating for anaerobic digestate and concentrating for biogas slurry. *Environmental Technology* 42, 4434–4443. <https://doi.org/10.1080/09593330.2020.1761457>.
- Beschkov, V., Angelov, I., Stefanov, S., Ljutzkanov, L., 2025. An Integrated Sulfide Removal Approach from a Substrate for Biogas Production and the Simultaneous Production of Electricity. *Clean Technology* 7, 1-12. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol7030077>.
- Bryant, I.M., Osei-Marfo, M., 2021. Innovative Designs in Household Biogas Digester in Built Neighbourhoods, in: Sikora, A. (Ed.), *Anaerobic Digestion in Natural and Built Environments*. IntechOpen. 1-11. <https://www.intechopen.com/chapters/76104>.
- Bruna, M., Eduardo, E., Mantovani, F.L., Fábio, O., José, B.I., 2024. Empirical modeling of H₂S removal from biogas by chemical absorption in electrochemically prepared solutions containing iron ions. *Environmental Progress and Sustainable Energy* 43, 1-8. <https://doi.org/10.1002/ep.14435>.
- Bühler, M., Häni, C., Ammann, C., Brönnimann, S., Kupper, T., 2022. Using the inverse dispersion method to determine methane emissions from biogas plants and wastewater treatment plants with complex source configurations. *Atmospheric Environment: X* 13, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2022.100161>.
- Calbry-Muzyka, A., Madi, H., Rüschi-Pfund, F., Gandiglio, M., Biollaz, S., 2022.

- Biogas composition from agricultural sources and organic fraction of municipal solid waste. *Renewable Energy* 181, 1000-1007. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.09.100>.
- Camarillo, C.I.S., Aguilar-Aguilar, F.A., Mena-Cervantes, V.Y., Hernández-Altamirano, R., 2026. Integrated co-digestion and dual fixed-bed $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Ca}(\text{OH})_2$ biogas upgrading using fruit and vegetable waste and cattle manure. *Biomass and Bioenergy* 211, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2026.109159>.
- Cermak, L., Pechouckova, E., Marounek, M., Paulova, T., 2025. Pathogenic bacteria in biogas plants using cattle, swine, and poultry manure. *Veterinarni Medicina* 70, 151–155. <https://doi.org/10.17221/47/2024-VETMED>.
- Ceylan, A.B., Aydın, L., Nil, M., Mamur, H., Polatoğlu, İ., Sözen, H., 2023. A new hybrid approach in selection of optimum establishment location of the biogas energy production plant. *Biomass Conversion and Biorefinery* 13, 5771–5786. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01532-8>.
- Chai, A., Wong, Y.S., Ong, S.A., Lutpi1, N.A., Sam, S.T., Kee, W.C., Eng, K.M., 2022. Kinetic model discrimination on the biogas production in thermophilic co-digestion of sugarcane vinasse and water hyacinth. *Environmental Science and Pollution Research* 29, 61298–61306. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20251-9>.
- Chang, P.Y., Chan, Y.J., Arumugasamy, S.K., Wan, Y.K., Lim, J.W., 2025. Optimisation of anaerobic digestion of palm oil mill effluent with biochar addition: Synergistic application of Artificial neural network and response Surface Methodology. *Fuel* 398, 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.135514>.
- Chen, W.Y., Chan, Y.J., Lim, J.W., Liew, C.S., Mohamad, M., Ho, C.D., Usman, A., Lisak, G., Hara, H., Tan, W.N., 2022. Artificial Neural Network (ANN) Modelling for Biogas Production in Pre-Commercialized Integrated Anaerobic-Aerobic Bioreactors (IAAB). *Water* 14, 1-36. <https://doi.org/10.3390/w14091410>.
- Chithra, R., Ramesh, K.R., Parthiban, K.T., Sekar, I., Subramanian, P., 2025. A review of appropriate use of agroforestry residues for biogas production and prospects. *Plant Science Today* 12, 1-11. <https://doi.org/10.14719/pst.7449>.
- Chong, D.J.S., Chan, Y.J., Arumugasamy, S.K., Yazdi, S.K., Lim, J.W., 2023. Optimisation and performance evaluation of response surface methodology (RSM), artificial neural network (ANN) and adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS)

- in the prediction of biogas production from palm oil mill effluent (POME). *Energy* 266, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126449>.
- Clifford, J.L., Chan, Y.J., Yusof, M.A.B.M, Tiong, T.J., Lim, S.S., Lee, C.S., Tong, W.Y., 2024. Predictive Modelling of H₂S Removal from Biogas Generated from Palm Oil Mill Effluent (POME) Using a Biological Scrubber in an Industrial Biogas Plant: Integration of Artificial Neural Network (ANN) and Process Simulation. *Food Technology and Biotechnology* 63, 124–133. <https://doi.org/10.17113/ftb.63.02.25.8792>.
- Croce, B., Rocchetti, L., Rossi, M., Caresana, F., Pelagalli, L., Comodi, G., 2025. Techno-Economic Analysis of a Hybrid Renewable Energy System (HRES) with Biogas-Powered. Combined Heat and Power (CHP) and Photovoltaic (PV) Systems. *Journal of Physics: Conference Series* 3143, 1-12. doi:10.1088/1742-6596/3143/1/012003.
- Ćurčić, S., Milićević, D., Kilibarda, N., Peulić, A., 2025. Assessing Biogas Production Potential from Organic Waste and Livestock Byproducts in a Serbian Municipality: Implications for Sustainable Food Systems. *Sustainability* 17, 1-19. <https://doi.org/10.3390/su17073144>.
- De Loma-Osor, I., Borge-Diez, D., 2023. Electrical Resilience in Residential Microgrids Powered by Biogas Micro-Combined Heat and Power (Micro-CHP) Systems. *Engineering Proceedings* 37, 1-6. <https://doi.org/10.3390/ECP2023-14613>.
- Di Mario, J., Ranucci, A., Gambelli, A.M., Rallini, M., Priolo, D., Brienza, M., Puglia, D., Del Buono, D., Gigliotti, G., 2025. Biogas Production from Olive Oil Mill Byproducts: A Comparative Study of Two Treatments for Pursuing a Biorefinery Approach. *Agriculture* 15, 1-20. <https://doi.org/10.3390/agriculture15212204>.
- Eze J.I, Agbo, K.E., 2010. Maximizing the potentials of biogas through upgrading. *American Journal Of Scientific And Industrial Research* 1, 604-609. doi:10.5251/ajsir.2010.1.3.604.609.
- Feiz, R., Larsson, M., Ekstrand, E.M., Hagman, L., Ometto, F., Tonderski, K., 2021. The role of biogas solutions for enhanced nutrient recovery in biobased industries—three case studies from different industrial sectors. *Resources, Conservation &*

- Recycling 175, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105897>.
- Figaj, R., 2024. Energy and Economic Sustainability of a Small-Scale Hybrid Renewable Energy System Powered by Biogas, Solar Energy, and Wind. *Energies* 17, 1-16. <https://doi.org/10.3390/en17030706>.
- Fredenslund, A.M., Gudmundsson, E., Falk, J.M., Scheutz, C., 2023. The Danish national effort to minimise methane emissions from biogas plants. *Waste Management* 157, 321–329. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.12.035>.
- Galloni, M., Di Marcoberardino, G., 2024. Biogas Upgrading Technology: Conventional Processes and Emerging Solutions Analysis. *Energies* 17, 1-29. <https://doi.org/10.3390/en17122907>.
- Ghimire, A., Gyawali, R., Lens, P.N.L., Lohani, S.P., 2021. Technologies for removal of hydrogen sulfide (H₂S) from biogas, in: Aryal, N., Ottosen, L.D.M., Kofoed, M.V.W., Pant, D. (Eds.), *Emerging Technologies and Biological Systems for Biogas Upgrading*. Academic Press, 295-320. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822808-1.00011-8>.
- Giedraityte, A., Rimkevicius, S., Marciukaitis, M., Radziukynas, V., Bakas, R., 2025. Hybrid Renewable Energy Systems—A Review of Optimization Approaches and Future Challenges. *Applied Sciences* 15, 1-30. <https://doi.org/10.3390/app15041744>.
- Girmay, H., Yeneneh, K., Gopal, R., 2025. Comprehensive analysis and prediction of biogas-diesel dual fuel combustion in direct injection diesel engines: Experimental and artificial neural network approach. *Results in Engineering* 28, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107773>.
- Goshe, E.K., Gebremedhine, M. G., Hailu, A.M., Negie, Z. W., 2025. Anaerobic co-digestion of brewery wastewater and soybean processing industry sludge to enhance biogas production. *Scientific African* 30, 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2025.e02986>.
- Hosseini, S.E., Wahid, M.A., 2014. Development of biogas combustion in combined heat and power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 40, 868–875. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.204>.
- Isenkul, M.E., Güneş-Durak, S., Kocak, Y.P., Pir, I., Tüfekci, M., Türkoğlu Demirkol,

- G., Sevgen, S., Seyhan Çiğgin, A., Tüfekci, N., 2025. Predicting biogas production in real scale anaerobic digester under dynamic conditions with machine learning approach. *Environmental Research Communications* 7, 1-13. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ade03b>.
- Jasiński, T., Jasiński, J., Czekala, W., 2024. Practices in Biogas Plant Operation: A Case Study from Poland, in: Czekala, W. (Ed.), *Waste Management, Energy Production and Carbon Footprint Reduction*. John Wiley & Sons Ltd, UK, 1-35. <https://doi.org/10.1002/9781119863946.ch15>.
- Jiménez-Come, M.J., Gallero, F.J.G., Gómez, P.Á., Baladés, J.D.M., 2023. Corrosion Behaviour Modelling Using Artificial Neural Networks: A Case Study in Biogas Environment. *Metals* 13, 1-19. 1811. <https://doi.org/10.3390/met13111811>.
- Kaparaju, P., Rintala, J., 2013. Generation of heat and power from biogas for stationary applications: boilers, gas engines and turbines, combined heat and power (CHP) plants and fuel cells, in: Wellinger, A., Murphy, J., Baxter, D. (Eds.), *The Biogas Handbook*, Woodhead Publishing Limited, 404-427. <https://doi.org/10.1533/9780857097415.3.404>.
- Khan, M.U., Sarwar, A., Dutta, N., Arslan, M., 2024. The Biogas Use, in: Czekala, W. (Ed.), *Waste Management, Energy Production and Carbon Footprint Reduction*. John Wiley & Sons Ltd, 117-140. <https://doi.org/10.1002/9781119863946.ch6>.
- Khosravani, H., Meshksar, M., Rahimpour, H.R., Rahimpour, M.R., 2023. Introduction to syngas products and Applications, in: Rahimpour, M.R., Makarem, M.A., Meshksar, M. (Eds.), *Advances in Synthesis Gas: Methods, Technologies and Applications*. Elsevier Inc., 3-25. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91878-7.00014-9>.
- Lamoh, M.M., Joy, E.J., Rashid, M., Islam, S., Hashmi, S., 2020. Biogas Production Optimization from Palm Oil Mill Effluent: Experiments with Anaerobic Reactor. *International Journal Of Integrated Engineering* 12, 261-270. doi: <https://doi.org/10.30880/ijie.2020.12.03.030>.
- L'hospital, V., de Araujo, L.G., Schuurman, Y., Guilhaume, N., Farrusseng, D., 2024. Direct biogas reforming to turquoise H₂ and carbon material in a catalytic fluidised-bed reactor. *New Journal of Chemistry* 48, 9656–9662.

- <https://doi.org/10.1039/d4nj00846d>.
- Liu, Z., Ming, G.M., Su, J., 2023. Performance Testing and Case Studies of Rural Household Biogas Micro-CHP Systems. E3S Web of Conferences 466, 1-5. 8th International Conference on Advances in Energy and Environment Research & Clean Energy and Energy Storage Technology Forum (ICAEER & CEEST 2023). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346601005>.
- Lupu, M., Soloviov, N., Viziru, V., Uzun, G., Corcimari, M., Speian, A., 2026. Biogas use in CHP and Transport Sector: A Comparative Study. Conference: 2025 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN), 160-165. doi: 10.1109/SIELMEN67352.2025.11260720.
- Martinez-Burgos, W.J., Sydney, E.B., Medeiros, A.B.P., Magalhães, A.I., de Carvalho, J.C., Karp, S.G., de Souza Vandenberghe, L.P., Letti, L.A.J., Soccol, V.T., de Melo Pereira, G.V., Rodrigues, C., Woiciechowski, A.L., Soccol, C.R., 2021. Agro-industrial wastewater in a circular economy: Characteristics, impacts and applications for bioenergy and biochemical. Bioresource Technology 341, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125795>.
- Muradin, M., 2022. The Environmental Assessment of Biomass Waste Conversion to Sustainable Energy in the Agricultural Biogas Plant, in: Kłos, Z.S., Kałkowska, J., Kasprzak, J. (Eds.), Towards a Sustainable Future - Life Cycle Management. Challenges and Prospects. Springer, 133-142. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-77127-0>.
- Naquash, A., Agarwal, N., Nizami, M., Nga, N.N., Aziz, M., Lee, M., 2024. Unlocking the potential of cryogenic biogas upgrading technologies integrated with bio-LNG production: A comparative assessment. Applied Energy 371, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123720>.
- Nzouebet, W.A.L., Wafo, G.V.D., Sali, M., Koffi, P.K., Niwagaba, C.B., 2025. Anaerobic digestion technology for the treatment of slaughterhouse wastewater and its fertilizer potential on Zea mays (L.) under tropical conditions. Discover Environment 3, 1-21. <https://doi.org/10.1007/s44274-025-00344-1>.
- Panbechi, B., Hajinezhad, A., Moosavian, S.F., Fattahi, R., 2025. Enhancing the enviro-economic viability of biogas-solar hybrid systems: Strategies for sustainable

- energy development in Iran. *Energy Strategy Reviews* 58, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2025.101671>.
- Pera, L., Gandiglio, M., Marocco, P., Pumiglia, D., Santarelli, M., 2024. Trace contaminants in biogas: Biomass sources, variability and implications for technology applications. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 12, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114478>.
- Prabhu, A.V., Alagumalai, A., Jodat, A., 2021. Artificial neural networks to predict the performance and emission parameters of a compression ignition engine fuelled with diesel and preheated biogas–air mixture. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 145, 1935–1948. <https://doi.org/10.1007/s10973-021-10683-9>.
- Proskynitopoulou, V., Vourros, A., Garagounis, I., Lorentzou, S., Zouboulis, A., Panopoulos, K., 2026. Integrated digestate management: Contaminant control, valorisation and circular pathways. *Journal of Environmental Management* 405, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2026.129629>.
- Prussi, M., Julea, A., Lonza, L., Thiel, C., 2021. Biomethane as alternative fuel for the EU road sector: analysis of existing and planned infrastructure. *Energy Strategy Reviews* 33, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100612>.
- Sahota, S., Lombardi, L., Singh, D., O'Donoghue, C., Geoghegan, C., Rova, U., Christakopoulos, P., Matsakas, L., Sarkar, O., 2026. CO₂ from biogas: valorisation, economic and environmental impacts in circular carbon systems. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* 25, 1-30. <https://doi.org/10.1007/s11157-025-09755-1>.
- Savran, M., 2024. Modeling and Optimization of Copper Tube Drawing Process Parameters Based on Neuro-Regression and Stochastic Search Techniques. *International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches* 8, 846-858. <https://as-proceeding.com/index.php/ijanser>.
- Sawalha, H., Maghalseh, M., Qutaina, J., Junaidi, K., Rene, E.R., 2020. Removal of hydrogen sulfide from biogas using activated carbon synthesized from different locally available biomass wastes - a case study from Palestine. *Bioengineered* 11, 607-618. <https://doi.org/10.1080/21655979.2020.1768736>.
- Slavica, P., Ivica, M., Dragica, R., Milios, J., Slobodan, J., Vladislav, N., 2022. Testing

- the energy efficiency of CHP engines and cost-effectiveness of biogas plant operation. IET Renewable Power Generation 17, 555–562. doi: 10.1049/rpg2.12614.
- Tamburini, M., Perneti, R., Anelli, M., Oddone, E., Morandi, A., Osuchowski, A., Villani, S., Montomoli, C., Monti, M.C., 2023. Analysing the Impact on Health and Environment from Biogas Production Process and Biomass Combustion: A Scoping Review. International Journal of Environmental Research and Public Health 20, 1-29. <https://doi.org/10.3390/ijerph20075305>.
- Tamburrano, G., Pumiglia, D., Ferrario, A.M., Santoni, F., Borello, D., 2024. Analysis of the performances of a solid oxide fuel cell fed by biogas in different plant configurations: An integrated experimental and simulative approach. International journal of hydrogen energy 52, 745-760. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.07.324>.
- Tshemese, Z., Deenadayalu, N., Linganis, L.Z., Chetty, M., 2023. An Overview of Biogas Production from Anaerobic Digestion and the Possibility of Using Sugarcane Wastewater and Municipal Solid Waste in a South African Context. Applied System Innovation, 6, 1-17. <https://doi.org/10.3390/asi6010013>.
- Thanos, D., Maragkaki, A., Venieri, D., Fountoulakis, M., Manios, T., 2021. Enhanced Biogas Production in Pilot Digesters Treating a Mixture of Olive Mill Wastewater and Agro-industrial or Agro-livestock By-Products in Greece. Waste and Biomass Valorization 12, 135–143. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-00963-0>.
- Torres, R.Á., Marín, D., del Rosario Rodero, M., Pascual, C., González-Sánchez, A., de Godos Crespo, I., Lebrero, R., Torre, R.M., 2020. Biogas treatment for H₂S, CO₂, and other contaminants removal, in: Soreanu, G., Dumont, É. (Eds.), From Biofiltration To Promising Options In Gaseous Fluxes Biotreatment. Elsevier, 153-176. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819064-7.00008-X>.
- Uzuner, S., Cekmecelioglu, D., 2016. Comparison of artificial neural networks (ANN) and adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) models in simulating polygalacturonase production. BioResources 11, 8676-8685. doi: 10.15376/biores.11.4.8676-8685.
- Visca A., Caracciolo, A.B., Grenni, P., Patrolecco, L., Rauseo, J., Massini, G.,

- Miritana, V.M., Spataro, F., 2021. Anaerobic Digestion and Removal of Sulfamethoxazole, Enrofloxacin, Ciprofloxacin and Their Antibiotic Resistance Genes in a Full-Scale Biogas Plant. *Antibiotics* 10, 1-13. <https://doi.org/10.3390/antibiotics10050502>.
- Wasajja, H., Lindeboom, R.E.F., Spanjers, H., Aravind, P.V., van Lier, J.B., 2026. In-Situ H₂S reduction in biogas fuel for solid oxide fuel cell applications by using cow urine. *Bioresource Technology Reports* 33, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2026.102546>.
- Wei, L., Zhao, W., Feng, L., Li, J., Xia, X., Yu, H., Liu, Y., 2024. Anaerobic Digestion Process and Biogas Production, in: Czekala, W. (Ed.), *Waste Management, Energy Production and Carbon Footprint Reduction*. John Wiley & Sons Ltd, 1-35. <https://doi.org/10.1002/9781119863946.ch1>.
- Wu, Z., Chen, J., Chen, Z., Gong, H., Guo, X., Chen, L., 2025. Feasibility study of polydimethylsiloxane (PDMS) membranes for siloxane removal from biogas. *Separation and Purification Technology* 379, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.135047>.
- Xu, J., Jiang, L., Li, R., Wu, Y., 2025. Life Cycle Assessment of a Cassava-Based Ethanol–Biogas–CHP System: Unlocking Negative Emissions Through WDGS Valorization. *Sustainability* 17, 1-22. <https://doi.org/10.3390/su17178007>.
- Zantedeschi, S., Valenti, F., Maraldi, M., Martinez, G.A., Tura, M., Valli, E., 2025. Effect of blending olive leaves and olive mill wastewater on the potential biogas production. *Biomass and Bioenergy* 202, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108201>.
- Zhao, X., Joseph, B., Kuhn, J., Ozcan, S., 2020. Biogas Reforming to Syngas: A Review. *iScience* 23, 1-46. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.101082>.
- Zhao, M., Zhao, H., Zhao, M., 2023. Particle Swarm Optimization Algorithm With Adaptive Two-Population Strategy. *IEEE Access* 11, 62242- 62260. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3287859.

Ιστοσελίδες

- ALFA, 2023. Unlocking the biogas potential of livestock farming-Overview of the Greek market condition. <https://alfaep.eu/wp-content/uploads/2023/07/Overview->

- of-the-Greek-market-condition.pdf (επίσκεψη: 7 Ιουνίου 2026).
- Clarke Energy, 2026. Τετραπαραγωγή. <https://www.clarke-energy.com/el/gas-engines/quadgeneration/> (επίσκεψη 7 Ιουνίου 2026).
- EBA Statistical Report, 2025. Fueling Europe's clean path to independence. <https://www.europeanbiogas.eu/publication/eba-statistical-report-2025/> (επίσκεψη: 7 Ιουνίου 2026).
- Energypress, 2026. «Πόσο κοντά» για βιομεθάνιο βρίσκονται οι 146 εν λειτουργία σταθμοί βιοαερίου. <https://energypress.gr/index.php/news/poso-konta-gia-biomethanio-briskontai-oi-146-en-leitoyrgia-stathmoi-bioaerioy-i-analysi-tis> (επίσκεψη: 12 Ιουνίου 2026).
- European Biogas Association, 2025. Decoding Biogases: Made in Europe, Sustainable, and Affordable. <https://www.europeanbiogas.eu/publication/decoding-biogases-2025/> (επίσκεψη: 7 Ιουνίου 2026).
- European Commission, 2026. Renewable Energy Directive. https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive_en (επίσκεψη 7 Ιουνίου 2026).
- Google maps, 2026. 38°20'00.3"N 23°30'33.5"E. <https://maps.app.goo.gl/vrWiN41RYkGFGmz58> (επίσκεψη 7 Ιουνίου 2026).
- International Energy Agency, 2025. Renewables 2025. <https://www.iea.org/reports/renewables-2025> (επίσκεψη: 7 Ιουνίου 2026).
- Konrad Pumpe GmbH, 2026. BIG-Mix. <https://pumpegmbh.de/index.php/en/products/biogas-technology/big-mix> (επίσκεψη 7 Ιουνίου 2026).
- Liberal.gr, 2026. Βιομεθάνιο: Το σχέδιο των 2,6 δις. Ευρώ της ΕΕ και η ευκαιρία για την Ελλάδα. <https://www.liberal.gr/energeia/biomethanio-shedio-ton-26-dis-eyro-tis-ee-kai-i-eykairia-gia-tin-ellada> (επίσκεψη: 11 Ιουνίου 2026).
- PK ENERGY, 2026. AGROMEG A.E. <https://www.pk-energy.gr/portfolio-items/agromeg-a-e/> (επίσκεψη 7 Ιουνίου 2026).
- Φύλλα Εφημερίδας της Κυβερνήσεως, 2026. ΦΕΚ Α' 67/05.05.2026. <https://www.gov.gr/ipiresies/dikaiousune/nomothesia/phulla-ephemeridas-tes-kuberneses-phek> (επίσκεψη 7 Ιουνίου 2026).