



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Χημικών Μηχανικών

Τομέας Σύνθεσης και Ανάπτυξης Βιομηχανικών Διαδικασιών

Εργαστήριο Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας

**Διδακτορική διατριβή**  
**Ολοκληρωμένη αξιοποίηση στερεών**  
**οργανικών αποβλήτων προς παραγωγή**  
**βιοαερίου σε πιλοτικής κλίμακας**  
**Περιοδικό Αναερόβιο Χωνευτήρα με**  
**Ανακλαστήρες (PABR) και παραγωγή**  
**εδαφοβελτιωτικού**

Δρ. Ιωάννης Μιχαλόπουλος

Χημικός Μηχανικός ΕΜΠ, MSc., Ph.D

Αθήνα, 2017



## Ευχαριστίες

Η εκπόνηση μίας διδακτορικής διατριβής είναι μια ενδιαφέρουσα και δημιουργική διαδικασία, ωστόσο σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να αποδειχτεί αρκετά επίπονη και περίπλοκη. Αισθάνομαι, λοιπόν, το χρέος να ευχαριστήσω τους ανθρώπους, χωρίς τη στήριξη και τη βοήθεια των οποίων η ολοκλήρωσή της θα ήταν αδύνατη.

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω τις πιο θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα αυτής της διατριβής καθηγητή ΕΜΠ κ. Γεράσιμο Λυμπεράτο. Η βαθιά επιστημονική γνώση του αντικειμένου, η καθοδήγηση, οι συμβουλές του και η στήριξη που μου παρείχε απλόχερα έπαιξαν καταλυτικό ρόλο σε όλη την πορεία εκπόνησης της διατριβής μου. Η μεθοδικότητα του τρόπου σκέψης του, η δημιουργικότητα και οι ιδέες του διεύρυναν τους ορίζοντές μου και αποτελούν για εμένα οδηγό για το παρόν και το μέλλον.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον καθηγητή ΕΜΠ κ. Απόστολο Βλυσίδη και τον καθηγητή ΕΜΠ κ. Δημήτρη Κέκο των οποίων η συνεισφορά και οι επιστημονικές συμβουλές υπήρξαν πολύτιμες σε όλη τη διάρκεια της διατριβής μου.

Ιδιαίτερα, επίσης, ευχαριστώ τα υπόλοιπα μέλη της επταμελούς εξεταστικής μου επιτροπής: Τον καθηγητή ΕΜΠ κ. Βασίλειο Τσιχριντζή, τον επίκουρο καθηγητή του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών κ. Απόστολο Κουτίνα, τον επίκουρο καθηγητή ΕΜΠ κ. Κωνσταντίνο Νουτσόπουλο και τον επίκουρο καθηγητή ΕΜΠ κ. Ευάγγελο Τόπακα για την τιμή που μου έκαναν να συμμετάσχουν στην κρίση της διδακτορικής μου διατριβής.

Θερμές ευχαριστίες θέλω επίσης να εκφράσω στους συναδέλφους και καλούς φίλους μου, υποψήφιους διδάκτορες του εργαστηρίου Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας, Γιώργο Σεϊντή και Δημήτρη Μαθιουδάκη. Η καθημερινή μας συνεργασία και η βοήθεια που μου προσέφεραν ανιδιοτελώς σε όλη τη διάρκεια της διδακτορικής μου διατριβής ήταν ανεκτίμητες.

Επιπλέον, ευχαριστώ ιδιαιτέρως την Δρ. Κωνσταντίνα Παπαδοπούλου, τους συναδέλφους μου Γιώργο και Χρήστο Λύτρα, Πόπη Παπανικόλα, Δήμητρα Χατζηκωνσταντίνου και συνολικά την ερευνητική ομάδα του εργαστηρίου Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας, διότι χωρίς τη βοήθειά τους και την άριστη συνεργασία μας δε θα ήταν εφικτή η εκπόνηση της διατριβής μου.

Δε θα μπορούσα να παραλείψω τους προπτυχιακούς φοιτητές: Σοφία Μιχαλακίδη, Ηλία Πρεμέτη, Θεόφιλο Καμπερίδη, Θανάση Γούμενο και το μεταπτυχιακό φοιτητή Γιώργο Δημητρέλλο, χωρίς την καθημερινή δουλειά των οποίων θα ήταν αδύνατη η διεξαγωγή των πειραμάτων και η παραγωγή του μεγάλου όγκου των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Τέλος, οφείλω το πιο μεγάλο «ευχαριστώ» στους δικούς μου ανθρώπους. Στο Δημήτρη Καλιαμπάκο, που ανέκαθεν αποτέλεσε για εμένα πρότυπο και παράδειγμα προς μίμηση και στάθηκε και στέκεται στο πλευρό μου σε όλη την πορεία μου. Στη σύντροφό μου, Στέλλα, για τη στήριξη που μου προσέφερε απλόχερα σε όλη την προσπάθειά μου και γιατί χωρίς τη συμβολή της πολλές φορές μέσα από προσωπικές θυσίες η ολοκλήρωση αυτής της διατριβής θα ήταν αδύνατη. Στην αδερφή μου, Θάλεια, που ήταν δίπλα μου όποτε τη χρειαζόμουν. Και φυσικά, πάνω από όλα στους γονείς μου, Πάνο και Βένη, για όλα αυτά που μου προσέφεραν και μου προσφέρουν στη ζωή μου.

*Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από την Ανωτάτη Σχολή Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνωμών του συγγραφέα. (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202)*

## Περίληψη

Η κλιματική αλλαγή είναι μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις που καλείται να αντιμετωπίσει η ανθρωπότητα σήμερα, καθώς και τα επόμενα χρόνια και η αποτελεσματικότητα των τεχνολογιών, αλλά και συνολικά των πολιτικών που θα εφαρμοστούν, θα κρίνει σε μεγάλο βαθμό το μέλλον της ζωής στη Γη. Το μοντέλο ανάπτυξης που κυριαρχούσε κατά τις προηγούμενες δεκαετίες στηριζόταν στην κατασπατάληση των φυσικών πόρων με καταστροφικές συνέπειες για τα οικοσυστήματα και θα πρέπει να αντικατασταθεί από ένα ολιστικό μοντέλο με άξονες τη διατήρηση των φυσικών πόρων και συνολικά την προστασία του περιβάλλοντος. Η έρευνα που αφορά τη διαχείριση των αποβλήτων και την αξιοποίησή τους με σκοπό την ανάκτηση ενέργειας ή και τη μετατροπή τους σε προϊόντα υψηλής προστιθέμενης αξίας μπορεί αναμφίβολα να συμβάλει στην κατεύθυνση αυτή.

Στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής αναπτύχθηκε μια μέθοδος για την ολοκληρωμένη αξιοποίηση διαφορετικών τύπων στερεών οργανικών αποβλήτων προς παραγωγή βιοαερίου μέσω αναερόβιας χώνευσης/συγχώνευσης σε πιλοτικής κλίμακας Περιοδικό Αναερόβιο Χωνευτήρα με Ανακλαστήρες (Periodic Anaerobic Baffled Reactor - PABR) σε συνδυασμό με την παραγωγή εδαφοβελτιωτικού σε εργαστηριακό κομποστοποιητή κλειστού τύπου. Η καινοτομία της μεθόδου έγκειται στο διαχωρισμό της υγρής (εκχύλισμα) από τη στερεή φάση 2 ειδών οργανικών αποβλήτων (κτηνοτροφικών αποβλήτων και οικιακών ζυμώσιμων απορριμμάτων) με σκοπό την παραγωγή βιοαερίου από το εκχύλισμα στον ταχύρρυθμο PABR και την παραγωγή εδαφοβελτιωτικού από το στερεό υπόλειμμα του διαχωρισμού.

Ο PABR είναι ένας καινοτόμος βιοαντιδραστήρας 4 διαμερισμάτων που -σε εργαστηριακή κλίμακα- έχει αποδειχθεί ότι έχει τη δυνατότητα να επεξεργάζεται απόβλητα υπό υψηλούς ρυθμούς οργανικής φόρτισης, ενώ ταυτόχρονα χαρακτηρίζεται από την ευελιξία του να προσομοιάζει συνθήκες πλήρους ανάμειξης ή συνθήκες εμβολικής ροής (ή «ενδιάμεσες» καταστάσεις), ανάλογα με την επιλογή της βασικής παραμέτρου λειτουργίας του, δηλαδή της περιόδου εναλλαγής του διαμερίσματος τροφοδοσίας (T). Δεδομένου ότι η λειτουργία του PABR μελετήθηκε σε πιλοτική κλίμακα για πρώτη φορά, πριν από τη διεξαγωγή των πειραμάτων αναερόβιας χώνευσης κρίθηκε απαραίτητη η διερεύνηση των υδραυλικών του χαρακτηριστικών.

Για τη μελέτη της υδραυλικής συμπεριφοράς του πιλότου πραγματοποιήθηκαν πειράματα κατανομής χρόνου παραμονής (RTD tests) και μελετήθηκε απόκριση του αντιδραστήρα σε βηματική επιβολή στην τροφοδοσία (προσθήκη ιχνηθέτη χρωστικής ουσίας E124). Αποδείχθηκε ότι –υπό σταθερό υδραυλικό χρόνο παραμονής (HRT)- όταν το σημείο τροφοδοσίας εναλλάσσεται, ο αντιδραστήρας προσομοιάζει συνθήκες πλήρους ανάμειξης, ενώ όταν το σημείο τροφοδοσίας είναι σταθερό, η ροή προσεγγίζει την εμβολική. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων συγκρίθηκαν με προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν σε τρισδιάστατο μοντέλο του αντιδραστήρα που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Comsol Multiphysics. Το μοντέλο προσομοίωσε ικανοποιητικά τη συμπεριφορά του αντιδραστήρα, ενώ επιπλέον αποδείχθηκε ότι με αύξηση του λόγου HRT/T ο πιλότος προσομοιάζει συνθήκες πλήρους ανάμειξης, ενώ με μείωση του λόγου HRT/T η ροή τείνει προς την εμβολική.

Τη διερεύνηση των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών του PABR ακολούθησαν τα εργαστηριακά πειράματα αναερόβιας χώνευσης και κομποστοποίησης. Κατά τον πρώτο κύκλο, μελετήθηκε η δυνατότητα ταυτόχρονης παραγωγής βιοαερίου από το εκχύλισμα μίγματος κτηνοτροφικών αποβλήτων με παραγωγή εδαφοβελτιωτικού από το στερεό υπόλειμμα της προεπεξεργασίας, στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος με τίτλο «Ανάπτυξη πολυπαραμετρικού μαθηματικού μοντέλου για τη βελτιστοποίηση του ενεργειακού σχεδιασμού σε ορεινές περιοχές». Τα απόβλητα συλλέχθηκαν από την περιοχή του δήμου Μετσόβου και το μίγμα παρασκευάστηκε με κατάλληλες αναλογίες ώστε να είναι αντιπροσωπευτικό της ετήσιας παραγωγής αποβλήτων της περιοχής. Τα πειράματα αναερόβιας συγχώνευσης απέδειξαν ότι είναι εφικτή η παραγωγή 21-30L βιοαερίου ανά kg μίγματος, με μέση σύσταση σε μεθάνιο της τάξης του 65-70% σε υδραυλικό χρόνο παραμονής έως και 6 ημέρες. Παράλληλα, από τη βελτιστοποίηση της διεργασίας της κομποστοποίησης αποδείχθηκε ότι είναι δυνατή η παραγωγή υψηλής ποιότητας εδαφοβελτιωτικού (δείκτης ανάπτυξης 77,8%) από το στερεό υπόλειμμα, αναμειγμένο με υπόλειμμα επεξεργασίας ξύλου σε αναλογία 5:2 κατά βάρος).

Κατά το δεύτερο κύκλο πειραμάτων μελετήθηκε η παραγωγή βιοαερίου και εδαφοβελτιωτικού από ζυμώσιμα οικιακά απορρίμματα του δήμου Χαλανδρίου, στα πλαίσια του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος με τίτλο «WASTE4Think», Horizon 2020. Τα ζυμώσιμα απορρίμματα κουζίνας υποβλήθηκαν αρχικά σε ξήρανση και τεμαχισμό με αποτέλεσμα την παραγωγή ενός καινοτόμου προϊόντος που ονομάζεται FORBI (Food Residue Biomass). Αποδείχθηκε ότι είναι εφικτή η παραγωγή έως και 158L βιοαερίου ανά kg FORBI από το εκχύλισμα σε υδραυλικό χρόνο παραμονής έως και 10 ημέρες με ταυτόχρονη παραγωγή εδαφοβελτιωτικού υψηλής ποιότητας από το στερεό υπόλειμμα αναμειγμένου με υπολείμματα επεξεργασίας ξύλου (δείκτης ανάπτυξης 76,7%). Επίσης, διερευνήθηκε η δυνατότητα παραγωγής βιοαερίου και εδαφοβελτιωτικού από το FORBI χωρίς την παρεμβολή του σταδίου προεπεξεργασίας και αποδείχθηκε ότι ο PABR είναι ικανός να επεξεργαστεί αιώρημα του FORBI με παραγωγικότητα σε βιοαέριο έως και 531L/kg<sub>FORBI</sub> σε υδραυλικό χρόνο παραμονής έως και 5 ημέρες. Από τα πειράματα κομποστοποίησης του FORBI αποδείχθηκε ότι η χρήση του χωρίς την παρεμβολή του σταδίου διαχωρισμού έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση του θερμοκρασιακού προφίλ της διεργασίας, ωστόσο η απουσία του διογκωτικού παράγοντα (πριονίδι) είχε αρνητική επίδραση στο επίπεδο ωριμότητας και καταλληλότητας του τελικού προϊόντος.

Τέλος, με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα της διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης πραγματοποιήθηκε μαθηματική μοντελοποίηση με τη χρήση του λογισμικού Aquasim. Οι δύο τύποι μοντέλων που αναπτύχθηκαν (ένα απλό κινητικό μοντέλο Monod με λεπτομερή προσομοίωση της λειτουργίας του PABR και ένα μοντέλο ADM1 με την παραδοχή ότι ο PABR συμπεριφέρεται ως CSTR) περιέγραψαν ικανοποιητικά τη συμπεριφορά του αντιδραστήρα, προβλέποντας τη διαφορά του χρόνου κατακράτησης των στερεών στο εσωτερικό των διαμερισμάτων του αντιδραστήρα από τον υδραυλικό χρόνο παραμονής και στις δύο περιπτώσεις.

## Summary

Climate change is today - and will be in the future- one of the most severe challenges for humanity. The development of efficient technologies in parallel with the establishment of an appropriate inclusive policy framework are among the most crucial means available to our societies in their effort to tackle climate change and preserve life on earth. The prevailing development model of the last decades has been linked to valuable natural resources depletion that had devastating effects on natural ecosystems and should therefore be replaced by a holistic development model that will be based on the conservation of natural resources and the protection of environment as a whole. The scientific research on waste management and in particular the research focused on energy recovery of waste or the material recovery through transformation of waste to products of high added value may and will indisputably contribute to this direction.

In this dissertation, an integrated valorisation scheme for different kinds of solid organic waste has been developed in order to produce biogas, through the anaerobic digestion and co-digestion process in a pilot scale Periodic Anaerobic Baffled Reactor (PABR) and high quality fertilizer, through aerobic composting in a lab scale in-vessel composter. This dissertation's innovative approach lies on the separation of the liquid fraction (extract) from the solid fraction of two different kinds of organic waste (a mixture of different types of animal manure and municipal biodegradable waste) with the aim to produce biogas (biomethane) from the anaerobic digestion of the extract in a high-rate system (PABR) and high quality fertilizer from the solid residues of the pre-treatment step of the process.

The Periodic Anaerobic Baffled Reactor (PABR) is a novel high-rate 4-compartment bioreactor. It has been proved that -at lab scale- the PABR has the ability to operate at high organic loading rates, while the variation of the feedstock compartment switching frequency (or equivalently the switching period (T), i.e. the time for switching the feed to all compartments) allows flexibility in its operation. The PABR can be operated as a simple ABR, if the switching frequency is set to zero, and, in the extreme case of very high switching frequency, as a single-compartment upflow bioreactor. Given that operation of the PABR was studied at pilot scale for the first time in this dissertation, it was essential to study its hydraulic characteristics prior to the anaerobic digestion experiments.

In order to study the hydraulic behaviour of the pilot-scale PABR, experimental residence time distribution test (RTD) have been conducted and the response of the outlet of the reactor was investigated as a result of a step input at the inlet (by introducing a non-reactive tracer, synthetic red dye, code name E124) at the inlet. It was proved that -at a constant Hydraulic Retention Time (HRT)- the reactor simulates complete mixing when the feedstock compartment is switched (low T values) and it functions as plug flow when no switching is conducted. Comsol Multiphysics was used for the simulation of the RTD tests in 3D. The experimental results were compared to the computational data and the model was validated. Furthermore, more simulations were performed for extreme HRT/T values and HRT-T combinations and it was shown that the reactor functions either as a plug flow in low values of HRT/T, or as a CSTR in high HRT/T values.

After the study of the hydrodynamic behavior of the pilot, anaerobic digestion and composting experiments were conducted. During the first experimental phase, the possibility of combined biogas and compost production from animal by-products was investigated, within the framework of the project “Development of a multiparametric model for optimizing energy planning on mountainous areas”. A mixture of different types of waste was produced considering the annual waste production of Metsovo, Greece, in a representative way. The mixture was subjected in a solids/liquid separation step. The extract was used as a feedstock for the production of biogas, while the solid fraction was used as substrate for the production of compost. By the experimental data acquired from the anaerobic co-digestion procedure it was proved that biogas can be produced from the extract at a rate of 21-30L/kg<sub>mixture</sub>, with an average methane content of 65-70% at an HRT of 6d. It was also shown that - through the optimization of the composting process- high quality fertilizer (compost) can be produced from the solid fraction of the pretreatment step (Germination Index 77.8%), mixed with sawdust (2:5 w/w sawdust per waste solid fraction).

During the second experimental phase, the possibility of combined biogas and compost production from biodegradable household waste collected from the municipality of Halandri was investigated, within the framework of the european research project “WASTE4Think”, Horizon 2020. The food residue was shredded and dried leading to a novel product called FORBI (Food Residue Biomass). It was shown that biogas can be produced from the extract of FORBI at a maximum rate of 158L/kg<sub>FORBI</sub> at a minimum HRT of 10d. It was also proved that high quality fertilizer (compost) can be produced from the solid fraction of the pretreatment step (Germination Index 76.7%), mixed with sawdust. Furthermore, the possibility of biogas and compost production from FORBI, without the solids/liquid separation step. It was proved that the PABR is able to process the suspension of FORBI at a maximum biogas production rate of 531L/kg<sub>FORBI</sub> and an HRT of 5d. By the experimental data acquired during the FORBI composting procedure, it was shown that the temperature profile of the process is improved when the solids/liquid separation is not included, while the absence of the bulking agent (sawdust) has a negative effect on the maturity levels of the final product.

Finally, mathematical modeling was conducted using Aquasim software, based on the experimental results of the anaerobic digestion experiments. Two types of mathematical models were developed (a simple Monod with a detailed simulation of the operation of the PABR and an ADM1 model based on the assumption that the PABR simulates the behavior of a CSTR) which were able to sufficiently simulate the behavior of the reactor, while describing the difference between the solids retention times and the hydraulic retention times in both cases.



## Περιεχόμενα

<b>Κεφάλαιο 1 Στερεά οργανικά απόβλητα και νομοθετικό πλαίσιο .....</b>	<b>1</b>
1.1 Εισαγωγή .....	2
1.2 Το ζήτημα των στερεών οργανικών αποβλήτων. Κτηνοτροφικά απόβλητα και αστικά οργανικά υπολείμματα .....	3
1.3 Η διαχείριση των στερεών οργανικών αποβλήτων στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας.....	5
1.4 Τεχνολογίες για την επεξεργασία και αξιοποίηση στερεών οργανικών αποβλήτων .....	7
1.4.1 Κομποστοποίηση.....	7
1.4.2 Βιολογική Επεξεργασία .....	8
1.4.3 Καύση .....	9
1.4.4 Πυρόλυση.....	10
1.5 Ευρωπαϊκό νομοθετικό πλαίσιο για την παραγωγή βιοαερίου.....	11
1.6 Κτηνοτροφικά απόβλητα. Νομοθεσία, διαχείριση, δυναμικό .....	13
1.6.1 Νομοθεσία/ Οδηγίες .....	13
1.6.2 Δυναμικό – Υπάρχουσα Κατάσταση.....	15
1.7 Αστικά οργανικά υπολείμματα. Νομοθεσία, διαχείριση, δυναμικό.....	15
1.7.1 Νομοθεσία/ Οδηγίες .....	15
1.7.2 Δυναμικό – Υπάρχουσα Κατάσταση.....	17
1.8 Παραδείγματα ολοκληρωμένης διαχείρισης οργανικών αποβλήτων .....	17
1.8.1 Κτηνοτροφικά απόβλητα .....	17
1.8.2 Αστικά οργανικά υπολείμματα .....	18
<b>Κεφάλαιο 2 Αναερόβια χώνευση και κομποστοποίηση .....</b>	<b>21</b>
2.1 Αναερόβια Χώνευση.....	22
2.1.1 Γενικά .....	22
2.1.2 Μικροβιολογία-Βιοχημεία Αναερόβιας Χώνευσης.....	24
2.1.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης .....	26
2.1.4 Παράμετροι Λειτουργίας αναερόβιας χώνευσης .....	29
2.1.5 Συστήματα αναερόβιας χώνευσης.....	30
2.1.6 Μαθηματική μοντελοποίηση της αναερόβιας χώνευσης.....	36
2.2 Κομποστοποίηση .....	43
2.2.1 Εισαγωγή.....	43

2.2.2	Η διαδικασία της κομποστοποίησης.....	45
2.2.3	Επίδραση φυσικών και χημικών παραμέτρων στη διαδικασία της κομποστοποίησης .....	46
2.2.4	Συστήματα κομποστοποίησης .....	49
<b>Κεφάλαιο 3 Υδραυλικός χαρακτηρισμός και προσομοίωση .....</b>		<b>55</b>
3.1	Εισαγωγή .....	56
3.2	Σχεδιασμός αντιδραστήρων και ρευστομηχανική μελέτη .....	57
3.2.1	Σχεδιασμός χημικών αντιδραστήρων .....	57
3.2.2	Ρευστομηχανική μελέτη.....	58
3.3	Υδραυλικός χαρακτηρισμός συστημάτων .....	60
3.3.1	Το μοντέλο των δοχείων στη σειρά .....	62
3.3.2	Υδραυλικός Νεκρός Όγκος .....	64
3.4	Πρόγραμμα προσομοίωσης Comsol Multiphysics® .....	64
<b>Κεφάλαιο 4 Πειράματα κατανομής χρόνου παραμονής και προσομοίωση .....</b>		<b>67</b>
4.1	Εργαστηριακά Πειράματα Κατανομής Χρόνου Παραμονής.....	68
4.1.1	Ιχνηθέτης.....	68
4.1.2	Πειραματική διάταξη .....	69
4.1.3	Αποτελέσματα εργαστηριακών πειραμάτων.....	70
4.2	Τρισδιάστατη προσομοίωση υδραυλικής συμπεριφοράς σε περιβάλλον Comsol Multiphysics.....	72
4.2.1	Κατασκευή της γεωμετρίας.....	73
4.2.2	Ορισμός των υλικών.....	81
4.2.3	Διαμόρφωση των μοντέλων για τη μελέτη της ροής.....	81
4.2.4	Δημιουργία πλέγματος.....	84
4.2.5	Διαμόρφωση της μελέτης .....	85
4.2.6	Αποτελέσματα προσομοιώσεων.....	89
<b>Κεφάλαιο 5 Αναλυτικές μέθοδοι και πειραματικές διατάξεις .....</b>		<b>101</b>
5.1	Αναλυτικές Μέθοδοι .....	102
5.1.1	Μέτρηση pH .....	102
5.1.2	Μέτρηση Ολικής Αλκαλικότητας (Total Alkalinity, TA) .....	102
5.1.3	Προσδιορισμός ολικών και πτητικών αιωρούμενων και μη στερεών (TSS/TS, VSS/VS).....	102
5.1.4	Προσδιορισμός ελεύθερου αέριου χώρου (F.A.S.).....	103
5.1.5	Προσδιορισμός του χημικώς απαιτούμενου οξυγόνου (COD) σε υδαρές δείγμα.....	103
5.1.6	Προσδιορισμός του ολικού οργανικού άνθρακα (TOC).....	104

5.1.7	Προσδιορισμός αμμωνίας και ολικού αζώτου κατά Kjeldahl .....	104
5.1.8	Προσδιορισμός της φυτοτοξικότητας .....	105
5.1.9	Προσδιορισμός πτητικών λιπαρών οξέων .....	106
5.1.10	Προσδιορισμός της παροχής του βιοαερίου .....	106
5.1.11	Προσδιορισμός Περιεκτικότητας Μεθανίου στο Βιοαέριο (% κ.ό.).....	107
5.2	Πειραματικές διατάξεις.....	107
5.2.1	Αναερόβια χώνευση.....	107
5.2.2	Κομποστοποίηση.....	110
<b>Κεφάλαιο 6 Αναερόβια συγχώνευση κτηνοτροφικών αποβλήτων σε πιλοτικής κλίμακας PABR.....</b>		<b>115</b>
6.1	Εισαγωγή .....	116
6.2	Καταγραφή υπάρχουσας κατάστασης περιοχής Δ. Μετσόβου .....	117
6.3	Δειγματοληψία και χαρακτηρισμός.....	121
6.4	Περιγραφή πειραματικών κύκλων αναερόβιας συγχώνευσης .....	123
6.4.1	Παρασκευή διαλύματος τροφοδοσίας .....	123
6.4.2	Πειράματα αναερόβιας χώνευσης σε πιλοτικής κλίμακας PABR .....	125
6.5	Εκκίνηση PABR .....	127
6.6	Αποτελέσματα.....	127
6.6.1	Κύκλος 1 .....	127
6.6.2	Κύκλος 2 .....	131
6.6.3	Κύκλος 3 .....	135
6.6.4	Κύκλος 4 .....	140
6.6.5	Σύνοψη αποτελεσμάτων για τους 4 πειραματικούς κύκλους λειτουργίας .....	144
6.7	Μοντελοποίηση με τη χρήση του υπολογιστικού εργαλείου Aquasim 2.0 .....	145
6.7.1	Μοντελοποίηση με απλή κινητική Monod (Κύκλος 1).....	145
6.7.2	Μοντελοποίηση με το Anaerobic Digestion Model No 1 – ADM1 (Κύκλοι 3 και 4).....	146
<b>Κεφάλαιο 7 Αναερόβια χώνευση οικιακών ζυμώσιμων απορριμμάτων σε πιλοτικής κλίμακας PABR.....</b>		<b>153</b>
7.1	Εισαγωγή .....	154
7.2	Το ευρωπαϊκό ερευνητικό έργο «WASTE4Think» .....	157
7.2.1	Περιγραφή και στόχοι .....	157
7.2.2	Το WASTE4Think στο Χαλάνδρι.....	159
7.3	Περιγραφή πειραματικών κύκλων αναερόβιας συγχώνευσης με τροφοδοσία FORBI .....	162

7.4	Αποτελέσματα πειραματικών κύκλων .....	164
7.4.1	Κύκλος 1 .....	164
7.4.2	Κύκλος 2 .....	169
7.4.3	Κύκλος 3 .....	173
7.4.4	Κύκλος 4 .....	177
7.4.5	Κύκλος 5 .....	181
7.4.6	Σύνοψη αποτελεσμάτων για τους 5 πειραματικούς κύκλους λειτουργίας .....	186
7.5	Μοντελοποίηση με το Anaerobic Digestion Model No 1 – ADM1.....	187
<b>Κεφάλαιο 8 Κομποστοποίηση κτηνοτροφικών αποβλήτων και οικιακών ζυμώσιμων απορριμμάτων.....</b>		<b>191</b>
8.1	Εισαγωγή .....	192
8.2	Πειραματική διαδικασία .....	193
8.2.1	Περιγραφή πειραματικών κύκλων (tests).....	194
8.3	Αποτελέσματα πειραμάτων κομποστοποίησης.....	200
8.3.1	Αποτελέσματα κύκλων πειραμάτων με πρώτη ύλη τα κτηνοτροφικά απόβλητα .....	200
8.3.2	Αποτελέσματα κύκλων πειραμάτων με πρώτη ύλη τα ζυμώσιμα οικιακά απορρίμματα.....	213
8.4	Σύνοψη και συζήτηση.....	223
<b>Κεφάλαιο 9 Συμπεράσματα .....</b>		<b>225</b>
<b>Κεφάλαιο 10 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα .....</b>		<b>229</b>
<b>Βιβλιογραφία.....</b>		<b>231</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ I (Η δομή του ADM1).....</b>		<b>245</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ II (Ευρετήριο εικόνων) .....</b>		<b>247</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ III (Ευρετήριο πινάκων).....</b>		<b>249</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ IV (Ευρετήριο σχημάτων) .....</b>		<b>250</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ V (Κατάλογος συντομογραφιών).....</b>		<b>258</b>

## **Κεφάλαιο 1**

# **Στερεά οργανικά απόβλητα και νομοθετικό πλαίσιο**

## 1.1 Εισαγωγή

Κάθε χρόνο περίπου 13 δισεκατομμύρια τόνοι βιομάζας καταναλώνονται παγκοσμίως για να χρησιμοποιηθούν στους τομείς της διατροφής, της παραγωγής ενέργειας καθώς και ως πρώτη ύλη για διάφορα προϊόντα. Πέραν της βιομάζας που καταναλώνεται ως πρώτη ύλη, διάφοροι τύποι βιομάζας παράγονται ως απόβλητα και παραπροϊόντα σε σημαντικούς βιομηχανικούς κλάδους όπως ο κτηνοτροφικός και ο αλιευτικός κλάδος, οι βιομηχανίες τροφίμων και υφασμάτων, η βιοτεχνολογία, το εμπόριο αλλά οργανικά απόβλητα και παραπροϊόντα προκύπτουν επίσης και στο τελικό στάδιο της κατανάλωσης προϊόντων και ενέργειας. Είναι, λοιπόν, προφανές ότι η βιομάζα είτε ως πρώτη ύλη είτε ως τελικό προϊόν είτε ως παραπροϊόν και απόβλητο εμφανίζεται στο σύνολο της εφοδιαστικής αλυσίδας της παγκόσμιας οικονομικής δραστηριότητας [1]. Είναι χαρακτηριστικό ότι η αξία που παράγεται παγκοσμίως σε ετήσια βάση και αφορά τη βιομάζα αντιστοιχεί σε 12,5 τρισεκατομμύρια δολάρια, ή περίπου 17% του παγκόσμιου Ακαθάριστου Εθνικού Προϊόντος. Στο άμεσο μέλλον μάλιστα, η ετήσια κατανάλωση βιομάζας αναμένεται να αυξηθεί ραγδαία: Μόνο για την κάλυψη των διατροφικών αναγκών των ανθρώπων παγκοσμίως αναμένεται να υπάρξει αύξηση σε κατανάλωση τροφής κατά 55% έως το 2050.

Ωστόσο, η ραγδαία αύξηση στην κατανάλωση της βιομάζας στις διάφορες μορφές της, όσο και συνολικά των οργανικών προϊόντων δημιουργεί τεράστιες προκλήσεις για τη μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας της χρήσης της οργανικής ύλης και την αξιοποίηση των παραγόμενων αποβλήτων και παραπροϊόντων σε κάθε στάδιο της εφοδιαστικής αλυσίδας. Είναι χαρακτηριστικό ότι το ένα τρίτο του συνόλου των τροφίμων που παράγονται παγκοσμίως χάνονται ή απορρίπτονται σε χωματερές. Ταυτόχρονα, στο σύνολο της εφοδιαστικής αλυσίδας προκύπτουν απώλειες σε φυσικό κεφάλαιο καθώς επίσης και αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Μερικά παραδείγματα των συνεπειών αυτών είναι τα εξής [1]:

- Η βιομηχανία τροφίμων κατατάσσεται τρίτη στην εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου (μέσω υπολογισμού του συνολικού οργανικού της αποτυπώματος) μετά από τις ΗΠΑ και την Κίνα.
- Περίπου το ένα τέταρτο των εκτάσεων γης παγκοσμίως υποβαθμίζονται λόγω της διάθεσης οργανικών αποβλήτων κοστίζοντας περίπου 40 δισεκατομμύρια δολάρια παγκοσμίως.
- Η υπερσυσσώρευση θρεπτικών συστατικών στον υδροφόρο ορίζοντα μέσω των υπόγειων και υπέργειων ρευμάτων οδηγεί στην ανάπτυξη του φαινομένου το ευτροφισμού, δημιουργώντας χιλιάδες νεκρές θαλάσσιες ζώνες σε όλα τα θαλάσσια οικοσυστήματα.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή στοχεύει στην ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου σχεδίου αξιοποίησης οργανικών αποβλήτων με έμφαση στα στερεά οργανικά απόβλητα που παράγονται:

- i. Ως παραπροϊόντα των κτηνοτροφικών διεργασιών (μίγμα κοπριάς χοιροστασίου, βοοειδών κρεατοπαραγωγής και γαλακτοπαραγωγής, αιγοπροβάτων, πτηνοτροφείου και αποβλήτων τυροκομείου)
- ii. Ως αστικά οργανικά υπολείμματα και πιο συγκεκριμένα υπολείμματα τροφών.

## 1.2 Το ζήτημα των στερεών οργανικών αποβλήτων. Κτηνοτροφικά απόβλητα και αστικά οργανικά υπολείμματα

Όπως, ήδη αναλύθηκε, η ραγδαία αύξηση της κατανάλωσης βιομάζας παγκοσμίως δημιουργεί μεγάλες προκλήσεις για την όσο το δυνατόν αποδοτικότερη χρήση της. Στην παρούσα διδακτορική διατριβή, έμφαση δίνεται στη διαχείριση και χρήση της οργανικής ύλης που χρησιμοποιείται και παράγεται στους τομείς της κτηνοτροφίας και της σίτισης στο αστικό περιβάλλον.

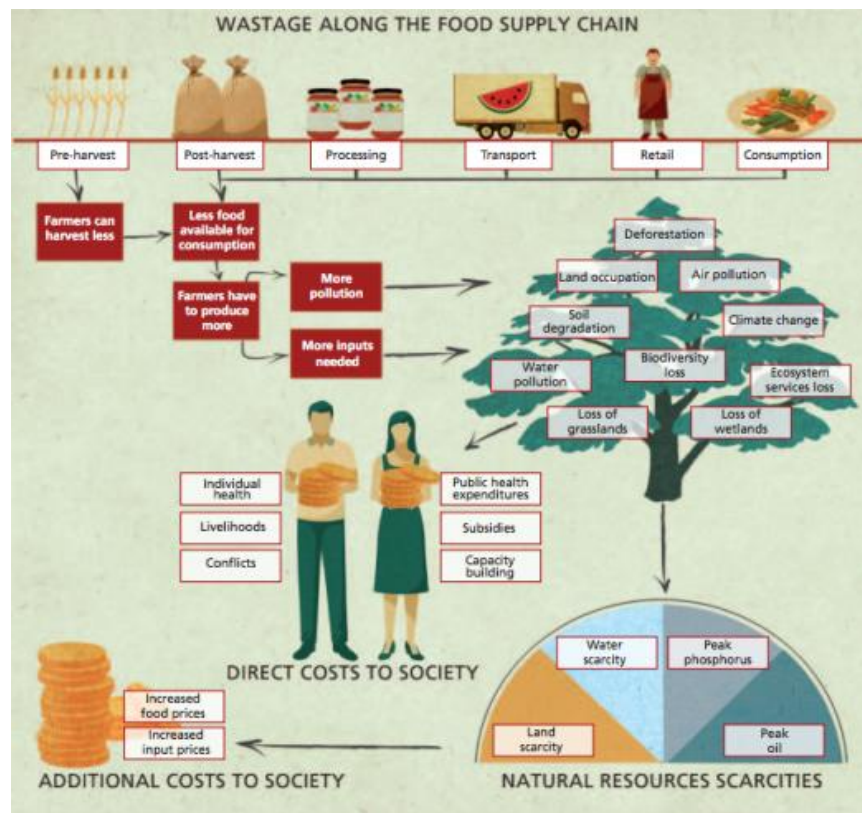
Η ραγδαία ανάπτυξη και βιομηχανοποίηση της κτηνοτροφικής παραγωγής τα τελευταία χρόνια έχει οδηγήσει τον κτηνοτροφικό κλάδο σε μία συνεχώς αυξανόμενη αποδοτικότητα και παραγωγή, δημιουργώντας παράλληλα σημαντικές περιβαλλοντικές προκλήσεις. Πιο συγκεκριμένα μπορούν να διακριθούν τα εξής πιθανά περιβαλλοντικά προβλήματα, ως αποτέλεσμα της έντασης της κτηνοτροφικής παραγωγής [2]:

- **Ρύπανση εδαφών:** Αν και παραδοσιακά η ζωική κοπριά θεωρείται ευεργετική για την ποιότητα των καλλιεργήσιμων εδαφών, η επαναλαμβανόμενη εφαρμογή κοπριάς σε ποσότητες μεγαλύτερες των αναγκών των καλλιεργειών οδηγεί σε υπερσυσσώρευση τόσο θρεπτικών συστατικών όσο και βαρέων μετάλλων. Η αύξηση της συγκέντρωσης θρεπτικών συστατικών στο έδαφος μπορεί μέσω σύνθετων χημικών διεργασιών να οδηγήσει στη ρύπανση τόσο της ατμόσφαιρας όσο και του υδροφόρου ορίζοντα.
- **Ρύπανση υδροφόρου ορίζοντα:** Η υπερσυσσώρευση θρεπτικών συστατικών στο έδαφος μπορεί να οδηγήσει στη ρύπανση του υδροφόρου ορίζοντα μέσω υπόγειων και υπέργειων ρευμάτων νερού και άρα στην αύξηση της έντασης του φαινομένου του ευτροφισμού. Παράλληλα, η αύξηση της συγκέντρωσης χημικών στον υδροφόρο ορίζοντα (π.χ. αμμωνία) είναι συχνά τοξική για διάφορα είδη ζωής των υδάτινων οικοσυστημάτων.
- **Ατμοσφαιρική ρύπανση:** Η κτηνοτροφική παραγωγή υψηλής έντασης συμβάλλει σημαντικά στην ρύπανση της ατμόσφαιρας μέσω των αέριων ρυπαντών (διοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο, υποξείδιο του αζώτου κ.α.) που εκλύονται από τα συστήματα εξαερισμού των βιομηχανικών μονάδων. Επιπλέον της ρύπανσης του ατμοσφαιρικού αέρα, η έκλυση αμμωνίας από τα συστήματα εξαερισμού προκαλεί δυσάρεστη οσμή στις κτηνοτροφικές περιοχές υψηλής έντασης.
- **Κλιματική αλλαγή:** Η έκλυση στην ατμόσφαιρα αερίων όπως το μεθάνιο και τα νιτρικά οξείδια, που συνδέονται με τον κτηνοτροφικό κλάδο συντελεί στην όξυνση του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής, καθώς επίσης και της φωτοχημικής ρύπανσης και του φαινομένου της τρύπας του όζοντος. Σύμφωνα με δεδομένου του παγκόσμιου οργανισμού τροφίμων το 35% της παγκόσμιας έκλυσης αερίων του θερμοκηπίου, οφείλεται στην κτηνοτροφική παραγωγή και τη γεωργία.
- **Ασθένειες και κίνδυνοι για τη δημόσια υγεία:** Τα κτηνοτροφικά απόβλητα αποτελούν ιδανικά υποστρώματα για την ανάπτυξη παθογόνων μικροοργανισμών, όπως βακτήρια, ιοί και άλλα παράσιτα. Η ανάπτυξη παθογόνων μικροοργανισμών στις κτηνοτροφικές μονάδες μπορεί να συνδεθεί με πολλούς κινδύνους για τη δημόσια υγεία καθώς η επιμόλυνση των τροφών με μικρόβια όπως τα Salmonella, E. Coli, Campylobacter καθώς και το μικρόβιο που είναι υπεύθυνο για τη σπογγώδη εγκεφαλοπάθεια μπορεί να οδηγήσει στην έξαρση σοβαρών

πανδημικών ασθενειών. Επίσης, πιθανή είναι η επιμόλυνση του υδροφόρου ορίζοντα με τα ίδια μικρόβια και επομένως η ακαταλληλότητα του νερού ως πόσιμου.

Τα παραπάνω αποδεικνύουν ότι η όσο το δυνατόν βέλτιστη διαχείριση (και αξιοποίηση) των κτηνοτροφικών αποβλήτων είναι απαραίτητη για να αποφευχθούν ή τουλάχιστον να αμβλυθούν οξύτερα περιβαλλοντικά προβλήματα. Η παρούσα διδακτορική διατριβή επιχειρεί να συμβάλει στην έρευνα για την ανάπτυξη συστημάτων διαχείρισης κτηνοτροφικών αποβλήτων, υιοθετώντας βέλτιστες πρακτικές.

Από την άλλη πλευρά όσον αφορά τα αστικά οργανικά υπολείμματα, ο ιδιαίτερα μεγάλος όγκος υπολειμμάτων τροφών που καταλήγουν σε ΧΥΤΑ και ΧΥΤΥ καταδεικνύει την ανάγκη ανάπτυξης συστημάτων ολοκληρωμένης διαχείρισης υπολειμμάτων τροφών. Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Τροφίμων, περίπου το ένα τρίτο της ποσότητας τροφίμων που παράγεται παγκοσμίως σε διάφορα στάδια της εφοδιαστικής αλυσίδας είτε δεν υφίσταται καμία διαχείριση είτε καταλήγει σε ΧΥΤΑ και ΧΥΤΥ [3]. Στην Εικόνα 1.2.1 παρουσιάζεται η σπατάλη που εμφανίζεται στο σύνολο της εφοδιαστικής αλυσίδας στον τομέα των τροφίμων.



Εικόνα 1.2.1 Σπατάλη τροφίμων κατά μήκος της εφοδιαστικής αλυσίδας [4]

Η σπατάλη αυτή επιφέρει σημαντικές οικονομικές, κοινωνικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η ραγδαία αύξηση του παγκοσμίου πληθυσμού τις τελευταίες δεκαετίες καθώς και η αναμενόμενη εξακολουθούμενη τάση του φαινομένου αυτού, οδηγεί αναπόφευκτα σε ανάλογη αύξηση των απαιτήσεων σε τρόφιμα παγκοσμίως, κάτι που με τη σειρά του συνδέεται με αύξηση στην κατανάλωση



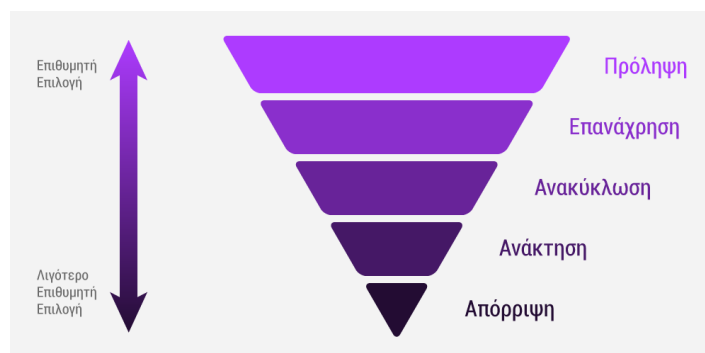
φυσικών πόρων (γη, νερό, ενέργεια, κλπ) [5]. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι περισσότερο από το 70% της κατανάλωσης νερού παγκοσμίως προέρχεται από την γεωργία και την κτηνοτροφία. Το ίδιο ισχύει και με την χρήση της γης καθώς τεράστιες εκτάσεις γης χρησιμοποιούνται προς όφελος της παραγωγής τροφής.

Εκτός της σπατάλης, η ίδια η αναποτελεσματική διαχείριση των υπολειμμάτων τροφών μπορεί να προκαλέσει σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα. Πιο συγκεκριμένα, η απόθεση υπολειμμάτων τροφών σε ΧΥΤΑ οδηγεί στην έκλυση μεθανίου και διοξειδίου του άνθρακα (αέρια του θερμοκηπίου) ως προϊόντα της βιολογικής αποικοδόμησης που υφίστανται. Είναι χαρακτηριστικό το γεγονός ότι η μισή από την συνολική ποσότητα διοξειδίου που εκλύεται στην ατμόσφαιρα λόγω των αποβλήτων, προέρχεται από απόβλητα τροφίμων. Επιπλέον, η ποσότητα του οργανικού φορτίου που είναι αποθηκευμένη (embedded carbon) στα τρόφιμα, λόγω των προηγούμενων σταδίων του κύκλου ζωής τους (παραγωγή, διανομή κ.ο.κ) σπαταλάται μαζί με την αντίστοιχη ποσότητα τροφίμων. Επιπλέον, το σύνολο το δραστηριοτήτων που αφορούν στην παραγωγή τροφίμων συνδέονται με την έκλυση αερίων του θερμοκηπίου και άρα με την κλιματική αλλαγή. Επομένως, η αποφυγή της σπατάλης αυτών των τεράστιων ποσοτήτων τροφίμων, θα μπορούσε να συμβάλει αποφασιστικά στην άμβλυνση του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής [5].

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, η παρούσα διδακτορική διατριβή επιχειρεί να συμβάλει στην έρευνα για την ανάπτυξη συστημάτων που με αποτελεσματικό, οικονομικό και φιλικό προς το περιβάλλον τρόπο, θα συνεισφέρουν στην διαχείριση και αξιοποίηση των στερεών οργανικών αποβλήτων προς παραγωγή ενέργειας καθώς και προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας.

### 1.3 Η διαχείριση των στερεών οργανικών αποβλήτων στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας

Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή νομοθεσία και την παγκόσμια επιστημονική κοινότητα, η ολοκληρωμένη διαχείριση των αποβλήτων βασίζεται στην ιδέα της “ιεράρχησης διαχείρισης αποβλήτων” (Εικόνα 1.3.1).



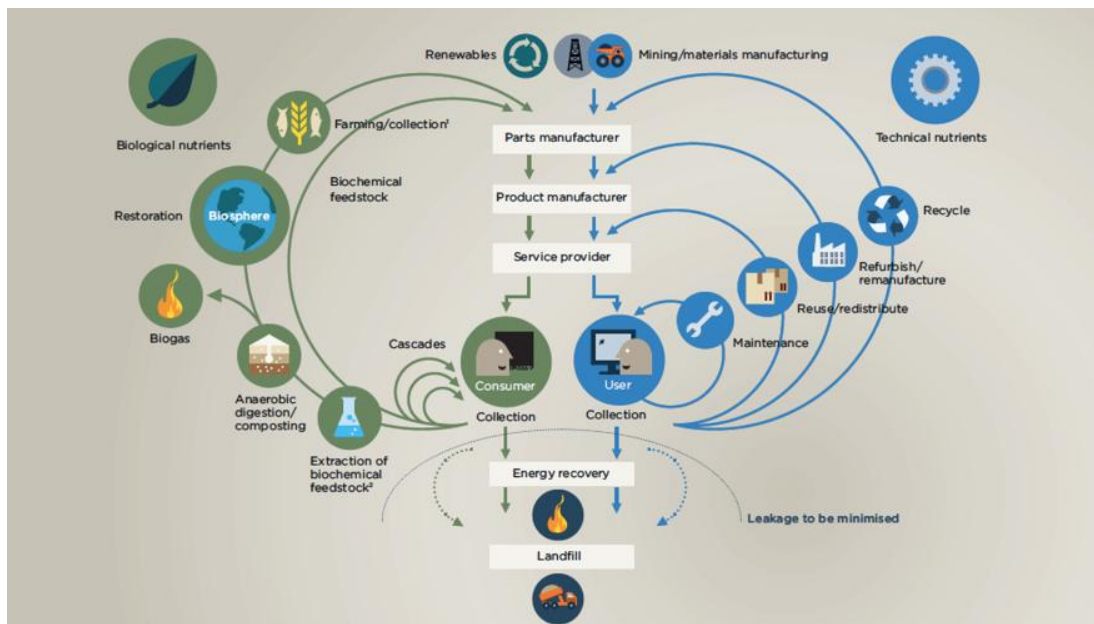
Εικόνα 1.3.1 Πυραμίδα ιεράρχησης για τη διαχείριση αποβλήτων (Ευρωπαϊκή Οδηγία 2008/98/EC)

Από την ανάστροφη πυραμίδα ιεράρχησης για τη διαχείριση αποβλήτων, προκύπτει ότι η απόρριψη των αποβλήτων σε Χώρους Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ) είναι η λιγότερο προτιμητέα μέθοδος διαχείρισης. Η ιεράρχηση αυτή προκύπτει από την αξιολόγηση των πλεονεκτημάτων κάθε

“σκαλοπατιού” της πυραμίδας βάσει του επιπέδου αξιοποίησης των αποβλήτων (μέσω της επαναχρησιμοποίησης και ανακύκλωσης υλικών ή της ανάκτησης ενέργειας) και της ελαχιστοποίησης των ποσοτήτων που καταλήγουν σε ΧΥΤΑ. Η παρούσα διδακτορική διατριβή επικεντρώνεται στις επιλογές διαχείρισης στερεών οργανικών αποβλήτων που συνδυάζουν την ανακύκλωση των οργανικών στοιχείων των αποβλήτων με τεχνολογίες που οδηγούν σε ανάκτηση ενέργειας μέσω βιολογικών μεθόδων επεξεργασίας.

Η κυκλική οικονομία ως έννοια έρχεται να αντιπαρατεθεί με το σημερινό γραμμικό πρότυπο παραγωγής και κατανάλωσης προϊόντων που βασίζεται στο τρίπτυχο ‘παραλαβή πρώτων υλών, μεταποίηση, διάθεση’. Το γραμμικό αυτό πρότυπο βασίζεται στην κατανάλωση μεγάλων ποσοτήτων, χαμηλού κόστους και εύκολα προσβάσιμων πρώτων υλών και ενέργειας και ευθύνεται σε σημαντικό βαθμό για την κατασπατάληση των φυσικών πόρων. Η βασική ιδέα γύρω από την κυκλική οικονομία αφορά στην ανάπτυξη προϊόντων και διεργασιών, τα οποία από το σχεδιασμό τους θα είναι κατάλληλα ώστε στο τέλος του κύκλου ζωής τους να είναι δυνατή η επιδιόρθωση και ανάκτηση πρώτων υλών. Τα βασικά πλεονεκτήματα της κυκλικής οικονομίας έγκεινται στο γεγονός ότι ενισχύει τη συντήρηση του φυσικού κεφαλαίου του πλανήτη (natural capital), βελτιστοποιεί την απόδοση της χρήσης των πόρων ενώ παράλληλα μειώνει τους συστημικούς οικονομικούς κινδύνους καθώς βελτιστοποιεί τη διαχείριση των μη-ανανεώσιμων πόρων [6].

Σύμφωνα με το Ellen MacArthur Foundation το βασικό χαρακτηριστικό της Κυκλικής Οικονομίας είναι το γεγονός ότι “Τίποτα δε θεωρείται απόβλητο”. Τα προϊόντα και οι διεργασίες σχεδιάζονται με τρόπο που να προβλέπει την αξιοποίηση των υλικών μετά το τέλος του κύκλου ζωής τους. Σημείο κλειδί αποτελεί η ανάγκη αξιοποίησης των υλικών με την ελάχιστη δυνατή δαπάνη ενέργειας και τη μέγιστη κατά το δυνατόν διατήρηση της ποιότητας των υλικών αυτών.



Εικόνα 1.3.2 Σχηματική απεικόνιση κυκλικής οικονομίας [1]

Η υιοθέτηση μίας κυκλικής προσέγγισης στην διαχείριση της οργανικής ύλης είναι εξαιρετικά σημαντική [7]. Μέσω μεθόδων διαχείρισης οργανικών αποβλήτων όπως είναι η αναερόβια χώνευση, καθίσταται δυνατή η παραγωγή καύσιμης ύλης, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται το αποτύπωμα του άνθρακα μέσα από την καύση του μεθανίου και τη μετατροπή του σε διοξείδιο του άνθρακα. Επιπλέον, μέσω της κομποστοποίησης οργανικών υπολειμμάτων παράγεται υψηλής ποιότητας εδαφοβελτιωτικό το οποίο μειώνει τις ανάγκες της καλλιεργήσιμης γης για άρδευση, ενώ ταυτόχρονα μειώνει τις ανάγκες χρήσης χημικών λιπασμάτων. Ταυτόχρονα, η εφαρμογή εδαφοβελτιωτικού στη γη αυξάνει τον αποθηκευμένο άνθρακα των εδαφών και βοηθά στη διεργασία της φωτοσύνθεσης. Τέλος, η αποφυγή διάθεσης οργανικών αποβλήτων σε ΧΥΤΑ μειώνει σημαντικά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου προς την ατμόσφαιρα.

Σύμφωνα με τον A. Masullo, η υιοθέτηση της λογικής του μοντέλου της κυκλικής οικονομίας σε διάφορες φάσεις του κύκλου ζωής της οργανικής ύλης μπορεί να επιδράσει θετικά στο περιβάλλον και τα διάφορα οικοσυστήματα. Μερικά παραδείγματα φαίνονται παρακάτω:

- i. Η χρήση βιομεθανίου ως καύσιμο, το οποίο έχει προέλθει από την αξιοποίηση ενός τόνου οργανικού αποβλήτου μπορεί να αποτρέψει την εκπομπή στην ατμόσφαιρα έως και 155,5kg ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα.
- ii. Η μείωση της χρήση χημικών λιπασμάτων μέσω της χρήσης εδαφοβελτιωτικού υλικού προερχόμενου από κομποστοποίηση μπορεί να μειώσει την εκπομπή στην ατμόσφαιρα έως και 35,7kg ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα για κάθε τόνο οργανικού αποβλήτου.
- iii. Συνολικά -σύμφωνα με τον A. Masullo- από την ολοκληρωμένη διαχείριση ενός τόνου οργανικού αποβλήτου μπορεί να επιτευχθεί μείωση εκπομπών στην ατμόσφαιρα έως και 196,2kg ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα.

Συμπερασματικά, το υπάρχον γραμμικό μοντέλο οικονομικής ανάπτυξης συνδέεται με κατασπατάληση των φυσικών πόρων. Η σταδιακή μετάβαση από την υπάρχουσα γραμμική οικονομία σε μια όσο το δυνατόν περισσότερο κυκλική οικονομία δύναται να συμβάλει στην ελαχιστοποίηση της εξάρτησης από τους φυσικούς πόρους και ταυτόχρονα της παραγωγής αποβλήτων, επιφέροντας ευεργετικές συνέπειες για όλα τα οικοσυστήματα και συνολικά για το περιβάλλον. Στην κατεύθυνση αυτή επιχειρεί να συμβάλει η παρούσα διδακτορική διατριβή, στο πλαίσιο της οποίας αναλύεται η ανάπτυξη μιας μεθόδου για την ολοκληρωμένη διαχείριση 2 ειδών στερεών οργανικών αποβλήτων: των κτηνοτροφικών αποβλήτων και των αστικών οργανικών υπολειμμάτων.

## **1.4 Τεχνολογίες για την επεξεργασία και αξιοποίηση στερεών οργανικών αποβλήτων**

### **1.4.1 Κομποστοποίηση**

Η κομποστοποίηση ως διεργασία αναφέρεται στη βιολογική αποδόμηση και εν συνεχεία σταθεροποίηση οργανικών υποστρωμάτων, υπό ελεγχόμενες συνθήκες οι οποίες είναι κατάλληλες για την ανάπτυξη θερμοφιλικών θερμοκρασιών λόγω της βιολογικά παραγόμενης θερμότητας [8]. Το τελικό προϊόν της διεργασίας ονομάζεται κομπόστ και είναι ένα στερεό μίγμα πλούσιο σε θρεπτικά

συστατικά, κατάλληλο για χρήση σε πολλές διαφορετικές εφαρμογές ως εδαφοβελτιωτικό ή υπόστρωμα για ανάπτυξη φυτών καθώς και για χρήση για αισθητικούς λόγους στο έδαφος.



**Εικόνα 1.4.1** Σειράδια σε μονάδα κομποστοποίησης ανοιχτού τύπου [9]

Το κομπόστ, σε σύγκριση με προϊόντα άλλων μεθόδων βιοσταθεροποίησης συνδέεται με μειωμένη συγκέντρωση αμμωνίας και επιτρέπει την απελευθέρωση της με πιο αργό ρυθμό, κατάλληλο για την ανάπτυξη φυτών. Ως εδαφοβελτιωτικό, μπορεί να αυξήσει την χωρητικότητα του εδάφους σε νερό καθιστώντας το πιο σταθερό σε περίπτωση πλημμυρών, καθώς επίσης και βελτιώνει τις συνθήκες οξυγόνωσης του εδάφους.

Η κομποστοποίηση, όπως αναλύθηκε, είναι μια μέθοδος που έχει πολλά συγκριτικά πλεονεκτήματα που συνδέονται κυρίως με το τελικό προϊόν της αλλά εμφανίζει και κάποιους τεχνικούς και λειτουργικούς περιορισμούς που παρουσιάζονται συνοπτικά κάτωθι:

- i. Περιορισμένη δυνατότητα απομάκρυνσης ανόργανων υλικών (όπως όπως βαρέα μέταλλα)
- ii. Καθορισμός της ποιότητας του τελικού προϊόντος από το είδος και την ποιότητα των αποβλήτων που χρησιμοποιούνται
- iii. Η βιοδιεργασία χαρακτηρίζεται από σημαντικούς χρονικούς περιορισμούς
- iv. Απαραίτητη η ρύθμιση και ο έλεγχος της διεργασίας καθώς τυχόν αστοχία μπορεί να οδηγήσει σε αποτυχία, η οποία συχνά μπορεί να είναι ιδιαίτερα ακριβή
- v. Ανάγκη για μεγάλες εκτάσεις για την εφαρμογή κομποστοποίησης σε σειράδια

#### **1.4.2 Βιολογική Επεξεργασία**

Η αναερόβια χώνευση είναι η μία βιολογική διεργασία μέσω της οποίας οργανική ύλη μετατρέπεται σε βιοαέριο (δηλαδή σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα) με τη συνδυασμένη δράση μικτού πληθυσμού αναερόβιων μικροοργανισμών απουσία οξυγόνου. Συνοπτικά η αντίδραση που λαμβάνει χώρα κατά την αναερόβια χώνευση οργανικής ύλης είναι:



Μερικά από τα πλεονεκτήματα της αναερόβιας χώνευσης που την καθιστούν μία δημοφιλή μέθοδο επεξεργασίας και αξιοποίησης οργανικών αποβλήτων είναι τα παρακάτω:

- Χαμηλή παραγωγή κυτταρικής μάζας
- Παραγωγή ενέργειας (μεθάνιο)
- Χαμηλό λειτουργικό κόστος
- Κατάλληλα για ισχυρά οργανικά απόβλητα
- Υψηλό ποσοστό απομάκρυνσης οργανικού φορτίου

Αερόβια επεξεργασία οργανικών αποβλήτων: Μέσω της αερόβιας επεξεργασίας οργανικών αποβλήτων είναι δυνατόν να αποδομηθεί μεγαλύτερος αριθμός οργανικών ενώσεων, ωστόσο η μεταφορά οξυγόνου από την αέρια στην υγρή φάση του αποβλήτου είναι περιορισμένη. Ως εκ τούτου, η αερόβια βιολογική επεξεργασία επιλέγεται μόνο σε περιπτώσεις αραιών και σε μεγάλο βαθμό διαλυτοποιημένων υλικών. Επίσης, η αερόβια αναπνοή παρουσιάζει ιδιαίτερα υψηλή απόδοση σε παραγωγή βιομάζας με αποτέλεσμα ένα μεγάλο ποσοστό του οργανικού άνθρακα να χρησιμοποιείται στην ανάπτυξη μικροβιακών κυττάρων. Όσον αφορά τον ίδιο το σχεδιασμό μίας μονάδας αερόβιας επεξεργασίας οργανικών αποβλήτων, η παραγωγή περίσσειας ιλύος αποτελεί σοβαρό πρόβλημα καθώς πρέπει να αναπτύσσεται μέθοδος σταθεροποίησης, απομάκρυνσης και διάθεσής της σε ειδικά σχεδιασμένους χώρους. Όλα τα παραπάνω καθιστούν τις αερόβιες μεθόδους ασύμφωρες και αναποτελεσματικές για τη διαχείριση αποβλήτων υψηλού οργανικού περιεχομένου και επομένως σπάνια επιλέγονται στις περιπτώσεις αυτές [10].

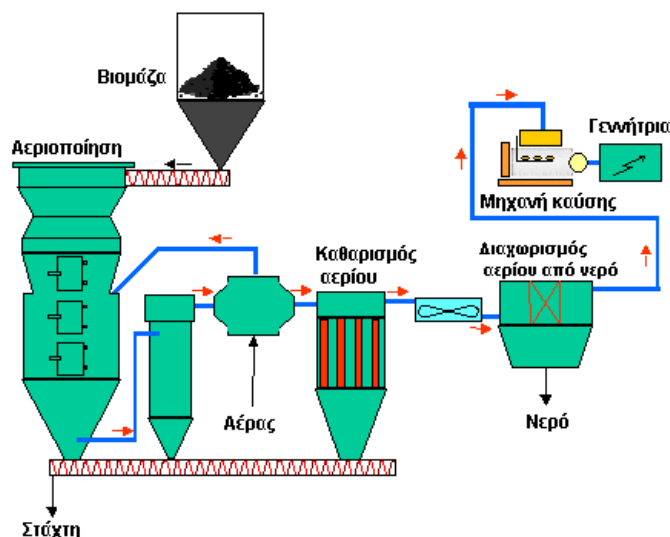


Εικόνα 1.4.2 Μονάδα βιολογικής επεξεργασίας αποβλήτων [11]

### 1.4.3 Καύση

Ως καύση ορίζεται η θερμική επεξεργασία οργανικών αποβλήτων μέσω οξείδωσης σε υψηλή θερμοκρασία και χρησιμοποιείται για τη μετατροπή τοξικών και επικίνδυνων οργανικών αποβλήτων προς ανόργανη ύλη. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα που προκύπτει από την επιλογή επεξεργασίας

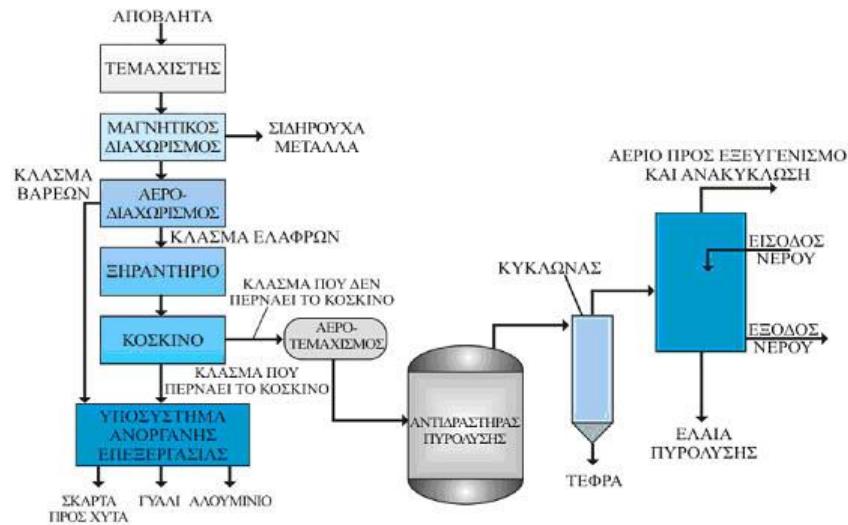
αποβλήτων μέσω μίας προσεκτικά σχεδιασμένης μονάδας καύσης είναι ότι οδηγεί στην ολοκληρωμένη επεξεργασία του οργανικού αποβλήτου, καθώς το μετατρέπει πλήρως σε ανόργανη ύλη. Ωστόσο, ένα σημαντικό μειονέκτημα της καύσης ως μεθόδου επεξεργασίας οργανικών αποβλήτων είναι η υψηλές απαιτήσεις σε ενέργεια, κάτι που τείνει να εξαιρεθεί μέσω των συστημάτων ανάκτησης θερμότητας που έχουν αναπτυχθεί και εντάσσονται στις μονάδες καύσης. Μία ολοκληρωμένη μονάδα καύσης εκτός από τον θάλαμο καύσης περιλαμβάνει επίσης μονάδες ανάκτησης ενέργειας και παραπροϊόντων της καύσης [12].



Εικόνα 1.4.3 Διάγραμμα ροής διεργασίας καύσης οργανικών αποβλήτων [11]

#### 1.4.4 Πυρόλυση

Η πυρόλυση είναι μία θερμοχημική μέθοδος αποικοδόμησης οργανικών αποβλήτων σε υψηλή θερμοκρασία και απουσία οξυγόνου. Σε σύγκριση με την καύση, η πυρόλυση πραγματοποιείται σε χαμηλότερη θερμοκρασία και οδηγεί σε χαμηλότερες εκπομπές αερίων ρύπων. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της πυρόλυσης αποτελεί το γεγονός ότι προσφέρει ευελιξία στην παραγωγή στερεών, υγρών και αερίων παραπροϊόντων μέσω της τροποποίησης των λειτουργικών συνθηκών της διεργασίας, όπως είναι η θερμοκρασία και ο ρυθμός θέρμανσης. Παράλληλα, προσφέρει τη δυνατότητα παραγωγής βιο-καυσίμων υψηλής πυκνότητας ταυτόχρονα με την ανάκτηση υψηλής αξίας χημικών προϊόντων [13].



Εικόνα 1.4.4 Διάγραμμα ροής διεργασίας πυρόλυσης οργανικών αποβλήτων [14]

## 1.5 Ευρωπαϊκό νομοθετικό πλαίσιο για την παραγωγή βιοαερίου

Ως βιοαέριο ορίζεται το αέριο προϊόν που παράγεται από την βιολογική μετατροπή οργανικών ουσιών και αποτελεί μίγμα αερίων, κυρίως μεθανίου, διοξειδίου του άνθρακα και υδρόθειου. Η συχνότερη χρήση του αερίου είναι η καύση του προς παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας, με απόδοση 6 kWh/m<sup>3</sup> βιοαερίου. Σημαντικό χαρακτηριστικό που καθορίζει την ποιότητα και άρα την απόδοση του βιοαερίου είναι η καθαρότητα του ως προς το υδρόθειο (H<sub>2</sub>S). Πιο συγκεκριμένα, βιοαέριο με υψηλή συγκέντρωση σε υδρόθειο αφενός δεν έχει μεγάλη θερμιδική αξία και αφετέρου μπορεί να επηρεάσει την ίδια τη μηχανή καύσης προκαλώντας της βλάβες [15].

Το βιοαέριο θεωρείται μία καθαρή και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και ως εκ τούτου θα μπορούσε να αποτελέσει την μορφή ενέργειας που θα αντικαταστήσει τις συμβατικές μορφές ενέργειας, όπως είναι τα ορυκτά καύσιμα. Τα ορυκτά καύσιμα λόγω της προέλευσης τους είναι μη ανανεώσιμα και άρα η διαθέσιμη ποσότητα αυτών είναι συγκεκριμένη. Επιπλέον, η χρήση τους επιβαρύνει σημαντικά και πολυδιάστατα το περιβάλλον [16].

Γενικά, η τεχνολογία του βιοαερίου αποτελεί μία ιδιαίτερα ελκυστική επιλογή για την αξιοποίηση μίας πληθώρας τύπων βιομάζας ενώ ταυτόχρονα υποστηρίζει την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών. Χαρακτηριστικά πλεονεκτήματα του βιοαερίου ως εναλλακτική πηγή ενέργειας είναι τα παρακάτω:

1. Τα ολοκληρωμένα και προσεκτικά σχεδιασμένα συστήματα βιοαερίου ενισχύουν την προστασία του περιβάλλοντος και την μείωση της σπατάλης φυσικών πόρων.
2. Μέσω των τεχνολογιών αξιοποίησης οργανικών αποβλήτων προς παραγωγή βιοαερίου επιτυγχάνεται τόσο η διαχείριση των οργανικών αποβλήτων, όσο και η ταυτόχρονη παραγωγή ενέργειας και εδαφοβελτιωτικού υλικού (κομπόστ) υψηλής ποιότητας.
3. Οι τεχνολογίες παραγωγής βιοαερίου είναι σχετικά απλές.

4. Τέλος, σε αντίθεση με άλλες πηγές ανανεώσιμης ενέργειας, για το βιοαέριο δεν υπάρχουν γεωγραφικοί περιορισμοί.

Όλα τα παραπάνω στοιχεία έχουν οδηγήσει τις τελευταίες δεκαετίες την παγκόσμια επιστημονική κοινότητα καθώς και τις κυβερνήσεις και τους διεθνείς οργανισμούς σε ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον σχετικά με τη βελτιστοποίηση των τεχνολογιών παραγωγής και χρήσης του βιοαερίου καθώς και στην αύξηση της συμμετοχής του βιοαερίου στο ενεργειακό μίγμα παγκοσμίως.

Το Δεκέμβριο του 2016, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή εξέδωσε την αναφορά με τίτλο “Optimal use of biogas from waste streams” με σκοπό την ανάλυση του δυναμικού και των συνεπακόλουθων ευκαιριών που θα προκύψουν στην Ευρώπη όσον αφορά την παραγωγή βιοαερίου μέσω αναερόβιας χώνευσης με ορίζοντα το 2030 [17]. Στο κείμενο αυτό αναφέρεται ότι για το 2014 η συνολική παραγωγή βιοαερίου αντιστοιχεί σε 14,9 εκατομμύρια τόνους ισοδύναμου πετρελαίου, όταν το 2005 η αντίστοιχη τιμή ήταν 4 εκατομμύρια τόνοι. Η σημαντική αυτή αύξηση φαίνεται και από το ποσοστό συμμετοχής του βιοαερίου στη συνολική ποσότητα των ΑΠΕ που είναι 7.6%.

Το κείμενο αναφέρεται επιπλέον στα εμπόδια για την ανάπτυξη του βιοαερίου στην Ευρώπη, διαχωρίζοντας ανά περίπτωση τα κράτη-μέλη με βάση την ωριμότητα της αγοράς βιοαερίου ως συνάρτηση των εγκατεστημένων μονάδων. Σε αυτήν την κατηγοριοποίηση η Ελλάδα συμπεριλαμβάνεται στην ομάδα των ανώριμων αγορών. Ανεξάρτητα από το επίπεδο ωριμότητας για όλες τις χώρες, η ύπαρξη, η σταθερότητα και η αξιοπιστία της νομοθεσίας και του πολιτικού πλαισίου θεωρείται μείζονος σημασίας. Μάλιστα, φαίνεται ότι υπάρχει ευθεία συσχέτιση μεταξύ των οικονομικών κινήτρων που δίνονται και του αριθμού των εγκατεστημένων μονάδων. Επίσης, σημαντικό ρόλο παίζουν οι στόχοι που θέτουν οι εθνικές κυβερνήσεις για την ανάπτυξη ΑΠΕ. Συγκεκριμένα, χώρες με φιλόδοξους στόχους φαίνεται πως παρουσιάζουν καλύτερα αποτελέσματα στην ανάπτυξη μονάδων παραγωγής βιοαερίου. Όσον αφορά χώρες όπως η Ελλάδα, που κατατάσσονται στις ανώριμες αγορές, πολύ σημαντικός παράγοντας φαίνεται πως είναι το δυναμικό της εκάστοτε χώρας, καθώς και άλλοι οικονομικοί παράγοντες όπως η υψηλή ανεργία ή η ενεργειακή φτώχεια.

Από την άλλη πλευρά, ακόμα και σήμερα παρατηρούνται σημαντικά εμπόδια στην ανάπτυξη του βιοαερίου στην Ευρώπη. Η έλλειψη αξιόπιστου και σταθερού νομικού πλαισίου αναγνωρίζεται ως το σημαντικότερο εμπόδιο στην ανάπτυξη του βιοαερίου και στους τρεις τύπους αγορών. Επίσης, η πολυπλοκότητα και διάρκεια των γραφειοκρατικών διαδικασιών τονίζεται ως σημαντικό εμπόδιο στην περαιτέρω ανάπτυξη του βιοαερίου, καθώς καθιστά δύσκολη τόσο την αδειοδότηση και χρηματοδότηση των μονάδων, όσο και την ανάπτυξη επιμέρους συστημάτων χρήσης του βιοαερίου. Παράλληλα, η έλλειψη στρατηγικής και μακροπρόθεσμων στόχων σε πολλά από τα κράτη-μέλη οδηγεί σε σπασμωδικές και άρα αναποτελεσματικές κινήσεις, που δεν ευνοούν την ανεμπόδιτη ανάπτυξη του βιοαερίου. Τέλος, όσον αφορά το τεχνολογικό κομμάτι, η έλλειψη λύσεων για την οικονομικά βιώσιμη και περιβαλλοντικά φιλική διαχείριση των παραπροϊόντων της παραγωγής βιοαερίου, καθιστά πολλές φορές ασύμφορη την εγκατάσταση αντίστοιχων μονάδων.



Οι Ευρωπαϊκές Οδηγίες που σχετίζονται με την παραγωγή βιοαερίου αφορούν ένα μεγάλο εύρος θεματικών ενοτήτων: ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, κλιματική αλλαγή, γεωργία, κτηνοτροφία, μεταφορές κοκ. Αυτό αποδεικνύει τη διεύθυνση που μπορεί να έχει το βιοαέριο ως εναλλακτική πηγή ενέργειας σε μία σειρά τομέων της οικονομίας, καθώς και το ρόλο που θα μπορούσε να επιτελέσει για την αντιμετώπιση διαφόρων ειδών περιβαλλοντικών προβλημάτων.

- Εναλλακτικές πηγές ενέργειας: οι οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης αφορούν κυρίως στο ποσοστό της διεύθυνσης του βιοαερίου στο συνολικό μερίδιο της ενέργειας που καταναλώνεται, όσο και στην ενέργεια που καταναλώνεται συγκεκριμένα στον τομέα των μεταφορών. Επίσης, το πακέτο για την "Καθαρή Ενέργεια στις Μεταφορές" (The Clean Power for Transport package) αναλύει μία πλήρη στρατηγική για τη χρήση εναλλακτικών καυσίμων και αποσκοπεί στην αύξηση των πρατηρίων καυσίμων που εμπορεύονται και εναλλακτικά καύσιμα.
- Κλιματική αλλαγή: Ο σημαντικότερος παράγοντας ενίσχυσης του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής είναι η έκλυση αερίων του θερμοκηπίου. Ως εκ τούτου μία σειρά από οδηγίες τις ΕΕ αφορά σε μέσα μείωσης αυτών των εκπομπών, σε δραστηριότητες όπως οι μεταφορές, η κτηνοτροφία, η γεωργία και άλλες. Η χρήση του βιοαερίου ως εναλλακτικής καύσιμης ύλης δίνει αυτή τη δυνατότητα, της μείωσης δηλαδή των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.
- Απόβλητα: Η Ευρωπαϊκές Οδηγίες που σχετίζονται με τη διαχείριση των αποβλήτων και την ανακύκλωση είναι συχνά σχετικές και με την παραγωγή βιοαερίου, καθώς μέσω αυτών υπολογίζονται οι διαθέσιμες για παραγωγή βιοαερίου ποσότητες πρώτης ύλης όπως είναι τα οργανικά απόβλητα.

## **1.6 Κτηνοτροφικά απόβλητα. Νομοθεσία, διαχείριση, δυναμικό**

### **1.6.1 Νομοθεσία/ Οδηγίες**

Η διαχείριση των κτηνοτροφικών αποβλήτων άπτεται της σχετικής εθνικής και κοινοτικής νομοθεσίας. Σύμφωνα με το Εθνικό Σχέδιο Αποβλήτων του Υπουργείου Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής, οι στρατηγικές για τη διαχείριση των γεωργοκτηνοτροφικών αποβλήτων περιλαμβάνουν [18]:

- Την επιδίωξη για πλήρη ανάκτηση τους, με προτεραιότητα την ανάκτηση στους τομείς της γεωργίας.
- Την καθιέρωση της συνεργασίας με τη βιομηχανία ανακύκλωσης βιοαποικοδομήσιμων αποβλήτων.
- Τη βέλτιστη αξιοποίηση του ενεργειακού περιεχομένου των γεωργοκτηνοτροφικών αποβλήτων.
- Τη διασφάλιση της περιβαλλοντικά ορθής διαχείρισης των απορριμμάτων γεωργικής και κτηνοτροφικής παραγωγής
- Την ενημέρωση και ευαισθητοποίηση των παραγωγών γεωργικών και κτηνοτροφικών προϊόντων, σχετικά με τα οφέλη (οικονομικά και άλλα) που μπορεί να αποφέρει η σύννομη διαχείριση των εν λόγω αποβλήτων.

Στη συνέχεια το ίδιο έγγραφο του ΥΠΕΚΑ αναφέρει πως η διαχείριση των κτηνοτροφικών αποβλήτων αποτελεί ευθύνη των παραγωγών, οι οποίοι ακολουθώντας τους Κώδικες Ορθής Γεωργικής Πρακτικής μπορούν είτε να διαθέσουν τα απόβλητα κτηνοτροφικής εκμετάλλευσης στο έδαφος για λίπανση, είτε σε περιπτώσεις μεγάλων κτηνοτροφικών μονάδων σε μονάδες κομποστοποίησης.

Το Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων σε εγκύκλιο του που υιοθετεί τις αρχές τις αντίστοιχης κοινοτικής οδηγίας (Καν. 1069/2009/ΕΚ) ορίζει ότι η διασπορά κόπρου στο έδαφος μπορεί να γίνει μόνο κατόπιν σχετικής επεξεργασίας (βιοσταθεροποίηση, χώνευση κλπ.) και μόνο εφόσον η αντίστοιχη αρμόδια αρχή κρίνει ότι δεν εγκυμονούν κινδύνους στην υγεία των ανθρώπων και των ζώων [19]. Η διαχείριση, λοιπόν, της νωπής κόπρου μπορεί να γίνει μόνο με έναν από τους ακόλουθους τρόπους:

1. Σε εγκεκριμένες μονάδες λιπασματοποίησης ή παραγωγής βιοαερίου
2. Σε εγκεκριμένες μονάδες για την παρασκευή οργανικών λιπασμάτων ή βελτιωτικών εδάφους
3. Σε εγκεκριμένη μονάδα παστερίωσης
4. Εντός της κτηνοτροφικής εκμετάλλευσης ή του σφαγείου σύμφωνα με τον Κώδικα Ορθής Γεωργικής Πρακτικής για χρήση ως λίπασμα σε καλλιεργούμενα εδάφη ή για την ανάπτυξη αυτοφυούς βλάστησης σε εκτάσεις εδαφικού-φυτικού φίλτρου

Στην κατεύθυνση της ολοκληρωμένης διαχείρισης των γεωργοκτηνοτροφικών αποβλήτων το ΥΠΕΚΑ έχει θέσει τον εξής εξειδικευμένο στόχο, με ορίζοντα το 2020: Πλήρης ανάπτυξη δικτύου συλλογής βιοαποικοδομήσιμων αποβλήτων γεωργοκτηνοτροφικής προέλευσης για την ανάκτηση προς όφελος της γεωργίας, της παραγωγής προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας, ή την παραγωγής ενέργειας [20], [21].

Βάσει των σχετικών κοινοτικών οδηγιών περί μονάδων παραγωγής λιπασμάτων και βιοαερίου (Κανονισμός (ΕΚ) 1069/2009 και Κανονισμός (ΕΚ) 142/2011) οι προϋποθέσεις λειτουργίας των μονάδων βιοαερίου στηρίζονται σε τρεις άξονες [22]:

- Ασφαλής Προμήθεια κτηνοτροφικών αποβλήτων: η υποδοχή στην εγκατάσταση πρέπει να γίνεται με τρόπο ώστε οι συνδεδεμένοι κίνδυνοι (ασθένειες, μολύνσεις, ρύπανση) να μπορούν να μειωθούν ή να εξαλειφθούν.
- Ασφαλής Διαχείριση: ώστε το τελικό προϊόν να είναι ακίνδυνο. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ελέγχων σχετικών με τη βιοασφάλεια των χώρων, τις βασικές αρχές λειτουργίας της εγκατάστασης, του εξοπλισμού επεξεργασίας, των προτύπων επεξεργασίας, των μικροβιολογικών προδιαγραφών καθώς και των απαιτήσεων υγιεινής. Ως εκ τούτου, η ελάχιστες απαιτήσεις για τις μονάδες παραγωγής βιοαερίου είναι ότι πρέπει: α. να διαθέτουν μονάδα παστερίωσης/εξυγίανσης με ενσωματωμένο σύστημα ασφαλείας για την πρόληψη ανεπαρκούς θέρμανσης στην περίπτωση που κρίνεται ότι η πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται αποτελεί υπόστρωμα κατάλληλο για την ανάπτυξη παθογόνων μικροοργανισμών, β. να βρίσκονται μακριά από εκτρεφόμενα ζώα, γ. να περιλαμβάνουν ή να συνεργάζονται με εξωτερικό αναλυτικό εργαστήριο.

- Ασφαλής τελική χρήση: που αφορά την αποθήκευση και τους τυχόν περιορισμούς στην τελική χρήση των προϊόντων.

### 1.6.2 Δυναμικό – Υπάρχουσα Κατάσταση

Στον παρακάτω πίνακα εμφανίζονται τα στοιχεία του Γεωτεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας σχετικά το δυναμικό των κτηνοτροφικών αποβλήτων (καθώς και τον αποβλήτων μεταποίησης γάλακτος-τυροκομείου) [23]:

**Πίνακας 1.6.1** Δυναμικό κτηνοτροφικών αποβλήτων και αποβλήτων μεταποίησης γάλακτος στην Ελλάδα [23]

Προέλευση	Αριθμός μονάδων	Δυναμικότητα	Απόβλητα (τόνοι/έτος)
Βουστάσια	26.295	755.665 βοοειδή	13.601.970
Χοιροτροφεία	3.299	147.920 χοιρομητέρες	2.277.072
Πτηνοτροφεία	1972	33.875.054	813.001
Μεταποίηση γάλακτος	696	1.175.319	822.723
Σύνολο			17.514.766

Είναι χαρακτηριστικό ότι σύμφωνα με το ΥΠΕΚΑ και με έτος αναφοράς το 2011 δε διατίθενται επίσημα στοιχεία, σχετικά με την υφιστάμενη διαχείριση των κτηνοτροφικών αποβλήτων. Η μη επίσημη καταγραφή των δεδομένων αυτών αποδεικνύει την αδυναμία της πολιτείας να αναπτύξει ένα οργανωμένο σχέδιο για τη διαχείριση των γεωργοκτηνοτροφικών αποβλήτων, που αποτελούν ένα ιδιαίτερα σημαντικό κλάσμα του συνόλου των παραγόμενων οργανικών αποβλήτων στην Ελλάδα. Μάλιστα, αναφέρεται ότι η υφιστάμενη κατάσταση χαρακτηρίζεται από ελλείψεις στην καταγραφή των παραγόμενων ποσοτήτων, ενώ η ανεξέλεγκτη (ή σχεδόν ανεξέλεγκτη) διάθεση στο έδαφος και η ανοιχτή καύση αποτελούν τις κυρίαρχες πρακτικές διαχείρισης.

Η έρευνα αυτή του Γεωτεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος αναφέρει πως η ολοκληρωμένη διαχείριση και αξιοποίηση των κτηνοτροφικών αποβλήτων στην Ελλάδα θα μπορούσε να οδηγήσει την παραγωγή 348MW εγκατεστημένης ισχύος. Ωστόσο, σύμφωνα με αντίστοιχη μελέτη του Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ), στην Ελλάδα υπάρχουν συνολικά 28 μονάδες παραγωγής βιοαερίου συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 57,1MW. Το ποσοστό συνεισφοράς των κτηνοτροφικών αποβλήτων στο σύνολο της ενεργειακής αξιοποίησης του βιοαερίου στην Ελλάδα ανέρχεται σε 80%. Ο ΔΕΔΔΗΕ αναμένεται μέσα στα επόμενα χρόνια να κρίνει 369 αιτήσεις μονάδων παραγωγής βιοαερίου συνολικής ισχύος 352MW. Από αυτές αποδεκτές έχουν γίνει ήδη αποδεκτές οι 83. Γενικά, υπάρχει η αισιοδοξία ότι τα αμέσως επόμενα χρόνια η ενεργειακή αξιοποίηση του βιοαερίου θα αυξηθεί σημαντικά [20].

## 1.7 Αστικά οργανικά υπολείμματα. Νομοθεσία, διαχείριση, δυναμικό

### 1.7.1 Νομοθεσία/ Οδηγίες

Ως αστικά οργανικά υπολείμματα ορίζονται τα πράσινα απόβλητα κήπων και πάρκων, τα υπολείμματα τροφίμων, τα απόβλητα χαρτιού και τα βιοαποικοδομήσιμα πλαστικά. Η Ελλάδα ως κράτος-μέλος της ΕΕ έχει ενσωματώσει την κοινοτική νομοθεσία για τα απόβλητα στο εθνικό δίκαιο. Το γεγονός αυτό

συνεπάγεται ότι έχει υιοθετήσει το σύνολο των ποσοτικών στόχων για μείωση των αποβλήτων που καταλήγουν σε ΧΥΤΑ και ΧΥΤΥ και κυρίως σε Χώρους Ανεξέλεγκτης Διάθεσης Αποβλήτων (ΧΑΔΑ) καθώς επίσης και τις αντίστοιχες τεχνικές προδιαγραφές για τους διάφορους τρόπους διαχείρισης, από τη συλλογή και μεταφορά έως και την τελική ασφαλή διάθεση.

Σύμφωνα με το Εθνικό Σχέδιο Αποβλήτων [18] οι βασικοί άξονες του σχεδιασμού για τη διαχείριση των Αστικών Στερεών Αποβλήτων είναι οι εξής:

- Η πλήρης ανάπτυξη δικτύων χωριστής συλλογής ανακυκλώσιμων υλικών και βιοαποβλήτων.
- Η ανάπτυξη μικρής κλίμακας αποκεντρωμένων μονάδων ανάκτησης προδιαλεγμένων βιοαποβλήτων.
- Η ανάπτυξη δικτύων επεξεργασίας υπολειπόμενων σύμμεικτων ΑΣΑ.

Ως έτος ορόσημο για την επίτευξη των στόχων του Σχεδιασμού Διαχείρισης ΑΣΑ έχει τεθεί το 2020. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι στόχοι αυτοί, όπως τους έχει ορίσει το ΥΠΕΚΑ:

**Πίνακας 1.7.1** Στόχοι ανακύκλωσης για το έτος αναφοράς 2020 [18]

Υλικά	Σύνολο	Σύνολο	Ανάκτηση με μηχανική επεξεργασία τελική διάθεση				Σύνολο	Ανάκτηση με μηχανική επεξεργασία τελική διάθεση			
			προδιαλογή	ανάκτηση	διάθεση	σύνολο		προδιαλογή	ανάκτηση	διάθεση	σύνολο
οργανικά	2560500	2560500	1024200	1024200	512100	1536300	100%	40%	40%	20%	60%
χαρτί/χαρτόνι	1823200	2560500	1664325	256050	640125	896175	100%	65%	10%	25%	35%
πλαστικά	803400										
μέταλλα	225400										
γυαλί	248500										
ξύλο	265800	265800	132900	79740	53160	132900	100%	50%	30%	20%	50%
λουπά ανακτίσημα	393200	93200	65240	4660	23300	27960	100%	70%	5%	25%	30%
λουπά		300000	0	0	300000	300000	100%	0%	0%	100%	100%
σύνολο	5780000	5780000	2886665	1364650	1528685	2893335	100%	50%	24%	26%	50%
σύνολο	5780000	5780000	4251315		1528685		100%	74%		26%	

Η διασφάλιση της επίτευξης των στόχων, αποτελεί την κατ' ελάχιστον βασική προτεραιότητα κατά την ανάπτυξη των δικτύων ανάκτησης. Επιπροσθέτως στον Πίνακα 1.7.1 εμφανίζονται οι παραγόμενες ποσοότητες ΑΣΑ, όπως προβλέπονται για το έτος αναφοράς 2020. Αξίζει να αναφερθεί, ότι για το 2015 το ποσοστό ανακύκλωσης στην Ελλάδα σύμφωνα με τα στοιχεία της Eurostat [24] άγγιζε το 10%, όντας το χαμηλότερο σε σύγκριση με τα υπόλοιπα κράτη-μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Μετά την υγειονομική ταφή που δε θεωρείται πλέον αποδεκτή ως μέθοδος διαχείρισης, η βιολογική επεξεργασία θεωρείται η φθηνότερη με κόστος 50 ευρώ ανά τόνο, ενώ η καύση-αποτέφρωση κοστίζει 100 ευρώ ανά τόνο. Το κόστος της διαχείρισης επηρεάζεται από μία σειρά παραμέτρων. Η σημαντικότερη παράμετρος για την επίτευξη των στόχων αυτών και εν γένει για την ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου και αποτελεσματικού συστήματος διαχείρισης των ΑΣΑ είναι η ανάπτυξη συστημάτων και η ευαισθητοποίηση των πολιτών στο θέμα της διαλογής στην πηγή. Πιο συγκεκριμένα, τόσο στο γενικό σχέδιο του ΥΠΕΚΑ όσο και στα επιμέρους σχέδια της αποκεντρωμένης διοίκησης, τονίζεται η σημασία της διαλογής στην πηγή ώστε η ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων να είναι οικονομικά βιώσιμη και επωφελής. Για την επίτευξη του στόχου της αύξησης της διαλογής στην πηγή απαιτείται η ταυτόχρονη κάλυψη δύο προϋποθέσεων:

- i. Η ανάπτυξη και βελτιστοποίηση δικτύων διαλογής και μεταφοράς διαλεγμένων ΑΣΑ. Δηλαδή, η ανάπτυξη δικτύων κάδων που θα δέχονται ξεχωριστά τα διάφορα ρεύματα ΑΣΑ και η βελτιστοποίηση των δικτύων μεταφοράς προς τις κεντρικές μονάδες συλλογής αποβλήτων.
- ii. Η ανάπτυξη κοινωνικής συνείδησης.

### **1.7.2 Δυναμικό – Υπάρχουσα Κατάσταση**

Σύμφωνα με μελέτη που εκδόθηκε από τη WWF το 40% των οικιακών απορριμμάτων στην Ελλάδα αντιστοιχεί σε βιοαποικοδομήσιμα απόβλητα [25]. Η στοχοθεσία του ΥΠΕΚΑ εξειδικεύεται ακόμα περισσότερο για το ρεύμα των βιοαποικοδομήσιμων αποβλήτων (BAA) και αφορά στην εκτροπή τους από την ταφή. Πιο συγκεκριμένα αναφέρεται ότι από τους 2.934.000 τόνους BAA που προβλέπεται ότι θα παραχθούν στην Ελλάδα το 2020, το 60% (1.775.000 τόνοι) θα πρέπει να εκτραπούν από την ταφή μέσω δικτύων χωριστής συλλογής αποβλήτων, ενώ και το υπόλοιπο 40% (1.159.000 τόνοι) θα πρέπει να εκτρέπεται της ταφής μέσω των δικτύων των σύμμεικτων ΑΣΑ μέσω επεξεργασίας. Συμπερασματικά, το ΥΠΕΚΑ θέτει ως στόχο το 100% των BAA να έχουν εκτραπεί από την ταφή μέχρι το 2020.

Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων, το ΥΠΕΚΑ έχει θέσει ένα οργανόγραμμα με ορίζοντα το έτος αναφοράς 2020. Το οργανόγραμμα αυτό περιλαμβάνει μία σειρά από δέσμες μέτρων: νομοθετικά, οργανωτικά-διοικητικά, έργα υποδομών, οικονομικά μέτρα, ανάπτυξη προδιαγραφών, προτύπων και μελετών. Η ανάπτυξη λεπτομερούς οργανογράμματος για την επίτευξη των στόχων της διαχείρισης των ΑΣΑ αποδεικνύει τη σημασία που δίνουν οι ελληνικές κυβερνήσεις στην ανάπτυξη και εφαρμογή ενός ολοκληρωμένου συστήματος διαχείρισης των ΑΣΑ.

## **1.8 Παραδείγματα ολοκληρωμένης διαχείρισης οργανικών αποβλήτων**

### **1.8.1 Κτηνοτροφικά απόβλητα**

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα ολοκληρωμένης διαχείρισης κτηνοτροφικών αποβλήτων είναι η φάρμα AA Dairy στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής [26]. Η AA Dairy είναι εγκατεστημένη στην πόλη Candor της Νέας Υόρκης και έχει δυναμικότητα 600 αγελάδων. Το 1998 ύστερα από έντονα παράπονα των περιοίκων σχετικά με την έκλυση μυρωδιάς από τη φάρμα αποφασίστηκε η ανάπτυξη συστήματος διαχείρισης των αποβλήτων του κτηνοτροφείου. Συγκεκριμένα, αναπτύχθηκε σύστημα αναερόβιας χώνευσης του υγρού κλάσματος των αποβλήτων συνδυασμένο με μονάδα κομποστοποίησης του στερεού κλάσματος. Τα οφέλη της φάρμας από την ανάπτυξη του συστήματος αυτού ήταν πολλαπλά:

- i. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας μέσω του βιοαερίου, μείωσε σημαντικά το ενεργειακό κόστος της μονάδας. Πιο συγκεκριμένα, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται για την κάλυψη των αναγκών της μονάδας, ενώ η περίσσεια αυτής διατίθεται στο τοπικό δίκτυο ηλεκτροδότησης.
- ii. Το παραγόμενο εδαφοβελτιωτικό αξιοποιήθηκε ως παράπλευρη πηγή κέρδους για τη μονάδα. Η φάρμα ανέπτυξε τη δική της μάρκα εδαφοβελτιωτικού υλικού, το οποίο και διαθέτει στην τοπική αγορά.
- iii. Η υγρή εκροή του αναερόβιου χωνευτήρα ήταν κατάλληλη για χρήση ως νερό άρδευσης.

Συμπερασματικά, η φάρμα AA Dairy κατάφερε αναπτύσσοντας ένα ολοκληρωμένο σύστημα αναερόβιας χώνευσης και κομποστοποίησης των αποβλήτων της, αφενός να βελτιώσει την εικόνα της στην τοπική κοινωνία και αγορά και αφετέρου να πετύχει σημαντικά οικονομικά οφέλη ως αποτέλεσμα αυτής της επιλογής. Επίσης, η περίπτωση της AA Dairy αποδεικνύει ότι η ανάπτυξη συστήματος ολοκληρωμένης διαχείρισης των αποβλήτων, μπορεί να είναι οικονομικά βιώσιμη και για μονάδες μικρής ή μεσαίας δυναμικότητας.

### **1.8.2 Αστικά οργανικά υπολείμματα**

Ένα από τα χαρακτηριστικότερα παραδείγματα δημοτικών αρχών που επιδεικνύοντας διάθεση και χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες πρακτικές διαχείρισης μπόρεσαν να αναπτύξουν ένα ιδιαίτερα αποτελεσματικό σύστημα διαχείρισης αστικών οργανικών αποβλήτων μας δίνει η πόλη του Μιλάνου [1]. Πιο συγκεκριμένα, το 2011 η νεοεκλεγείσα δημοτική αρχή θεώρησε ότι το 35% δεν ήταν ικανοποιητικό ως ποσοστό προδιαλεγμένης αποκομιδής αστικών απορριμμάτων. Μάλιστα, στόχος της δημοτικής αρχής ήταν να επεκταθεί η προδιαλεγμένη αποκομιδής των υπολειμμάτων τροφών που μέχρι τότε πραγματοποιούνταν αποκλειστικά για τις επιχειρήσεις εστίασης να επεκταθεί και στα νοικοκυριά. Απώτερος σκοπός της δημοτικής αρχής ήταν η ανάπτυξη ενός προγράμματος παραγωγής βιοαερίου και εδαφοβελτιωτικού υλικού (κομπόστ) από τα αστικά οργανικά απορρίμματα. Ως εκ τούτου, το πρώτο βήμα ήταν η προώθηση μίας ενημερωτικής καμπάνιας που συνδυάστηκε με την παροχή ειδικού κάδου και κουζίνας καθώς και βιοαποικοδομήσιμων σακουλών στα νοικοκυριά της πόλης.

Η συλλογή των υπολειμμάτων τροφών πραγματοποιείται δύο φορές την εβδομάδα και στη συνέχεια πραγματοποιείται μεταφορά σε τέσσερις σταθμούς μεταφόρτωσης που βρίσκονται κατά μήκος της πόλης. Στη συνέχεια, τα οργανικά απόβλητα μεταφέρονται στις εγκαταστάσεις ολοκληρωμένης διαχείρισης οργανικών αποβλήτων που βρίσκονται στην πόλη και αποτελούνται από μία μονάδα αναερόβιας χώνευσης και μία μονάδα κομποστοποίησης. Μέσω αυτής της πρωτοβουλίας το ποσοστό προδιαλεγμένης συλλογής απορριμμάτων για το Μιλάνο εκτοξεύθηκε στο 54%, καθώς το σύνολο του πληθυσμού (1,4 εκατομμύρια κάτοικοι) συμμετέχουν στο πρόγραμμα αυτό. Τα οφέλη για την πόλη του Μιλάνου ήταν πολλαπλά καθώς όχι μόνο κατάφερε να μειώσει σημαντικά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου αλλά ταυτόχρονα πέτυχε σημαντική μείωση στο ανά τόνο κόστος διαχείρισης των οργανικών αποβλήτων της πόλης από 100 ευρώ στα 70 ευρώ.



**Εικόνα 1.8.1** Όχημα συλλογής οργανικών υπολειμμάτων, πλατεία Duomo, Μιλάνο

Η περίπτωση του Μιλάνου είναι κατάλληλη για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων:

- Η ενημέρωση των πολιτών σχετικά με τους στόχους και τα οφέλη από την ανάπτυξη ολοκληρωμένου συστήματος διαχείρισης αστικών αποβλήτων είναι καθοριστική για την επιτυχία οποιουδήποτε εγχειρήματος.
- Ο συνδυασμός αναερόβιας χώνευσης και κομποστοποίησης -όπως μελετάται στην παρούσα διδακτορική διατριβή- αποτελεί μία δημοφιλή επιλογή λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει.
- Ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης αποβλήτων δύναται να προσφέρει πολλαπλά οφέλη για την τοπική κοινωνία, τόσο περιβαλλοντικά όσο και οικονομικά.





## **Κεφάλαιο 2**

### **Αναερόβια χώνευση και κομποστοποίηση**

## 2.1 Αναερόβια Χώνευση

### 2.1.1 Γενικά

Η Αναερόβια Χώνευση (Anaerobic Digestion) είναι μια βιολογική διεργασία κατά τη διάρκεια της οποίας σύνθετα οργανικά στοιχεία αποσυντίθεται απουσία μοριακού οξυγόνου από διάφορους τύπους αναερόβιων μικροοργανισμών. Η διεργασία της ΑΧ είναι κοινή σε πολλά φυσικά περιβάλλοντα όπως τα ιζήματα θαλάσσιου ύδατος, το στομάχι των μηρυκαστικών ή τα έλη τύρφης. Σε μία μονάδα βιοαερίου, το αποτέλεσμα της διεργασίας της ΑΧ είναι το βιοαέριο και το χωνεμένο υπόλειμμα. Όταν το υπόστρωμα για την ΑΧ είναι ένα ομοιογενές μείγμα από δύο ή περισσότερους τύπους πρώτων υλών (π.χ. ζωικές υδαρείς κοπριές και οργανικά απόβλητα από τις βιομηχανίες τροφίμων) τότε έχουμε την λεγόμενη «συγχώνευση» ή «συνδυασμένη χώνευση», η οποία είναι συνήθης σε πολλές από τις εφαρμογές του βιοαερίου σήμερα [27].

Η αναερόβια χώνευση ιστορικά απαντάται από τον 10ο αιώνα, όταν οι Ασύριοι τη χρησιμοποιούσαν για να ζεσταίνουν νερό. Στη συνέχεια το 17ο αιώνα ο Alessandro Volta παρατήρησε την εκπομπή, από ιζήματα του πυθμένα μιας βαλτώδους λίμνης, αερίων τα οποία συνέλεξε και απέδειξε ότι ήταν εύφλεκτα. Αυτό οδήγησε την επιστημονική κοινότητα στο συμπέρασμα ότι είναι δυνατή η παραγωγή μεθανίου με βιολογικές διεργασίες. Η πρώτη βιομηχανική εφαρμογή της αναερόβιας χώνευσης αφορά την επεξεργασία υγρών αποβλήτων στην πόλη Έξτερ της Μεγάλης Βρετανίας το 1890.

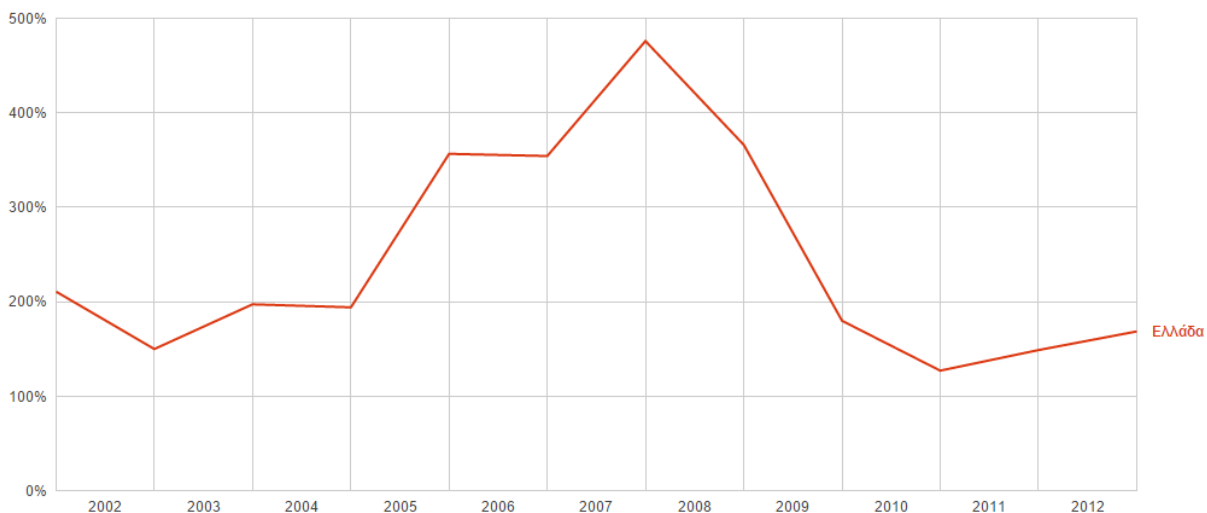
Η σύγχρονη κοινωνία και το μοντέλο παραγωγής που ακολουθείται παράγει τεράστιες ποσότητες αποβλήτων. Η ορθολογική διαχείριση αποτελεί μέγιστη αναγκαιότητα στην κατεύθυνση της προστασίας του περιβάλλοντος, της υγείας των ανθρώπων και των ζώων αλλά και της αξιοποίησης με όρους αειφορίας των αποβλήτων αυτών. Η αναερόβια χώνευση είναι ιδανική για την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων και καλύπτει πλήρως τους παραπάνω στόχους [28].

Η αναερόβια χώνευση είναι μια διεργασία που εμφανίζει σημαντικά πλεονεκτήματα, στην κατεύθυνση της επεξεργασίας αποβλήτων [29]:

- Παράγεται βιοαέριο το οποίο είναι δυνατόν να καθαριστεί από τις ανεπιθύμητες προσμίξεις ή να καεί ως έχει σε ειδικούς καυστήρες δίνοντας θερμότητα και ηλεκτρική ενέργεια, και άρα μειώνοντας το κόστος επένδυσης για την εγκατάσταση [30].
- Απαιτεί μικρή δαπάνη ενέργειας για την επεξεργασία των αποβλήτων.
- Σε σχέση με την αερόβια χώνευση εμφανίζει μειωμένες απαιτήσεις σε θρεπτικά, που χρειάζονται για την ανάπτυξη της κατάλληλης καλλιέργειας.
- Επιτυγχάνεται υψηλή απομάκρυνση του οργανικού φορτίου (COD).
- Είναι κατάλληλη για ισχυρά αγροτοβιομηχανικά απόβλητα.
- Είναι δυνατόν μέσω της αναερόβιας χώνευσης να παραχθεί υψηλής ποιότητας κομπόστ, κατάλληλο για τη λίπανση καλλιεργήσιμων εδαφών.

Ειδικότερα, όσον αφορά το τελευταίο πλεονέκτημα που αναφέρεται, είναι σημαντικό ειδικά στην Ελλάδα που αποτελεί μία χώρα με έντονο γεωργικό χαρακτήρα να αναφερθεί ότι η παραγωγή λιπασμάτων μέσω της αναερόβιας χώνευσης θα επιφέρει σημαντικά οικονομικά οφέλη, σε μία

οικονομία που έχει πληγεί σοβαρά, ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια. Παρατηρώντας το Σχήμα 2.1.1 κανείς αντιλαμβάνεται ότι η μείωση του χάσματος ανάμεσα στην κατανάλωση και την ιδιοπαραγωγή λιπασμάτων στην Ελλάδα, μπορεί να μειώσει σε μεγάλο βαθμό της εισαγωγή λιπασμάτων που αυξάνει ιδιαίτερως το κόστος της γεωργικής παραγωγής.



**Σχήμα 2.1.1** Κατανάλωση λιπασμάτων, % της συνολικής παραγωγής, [31]

Αντίστοιχα, τα σημαντικότερα μειονεκτήματα της διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης είναι:

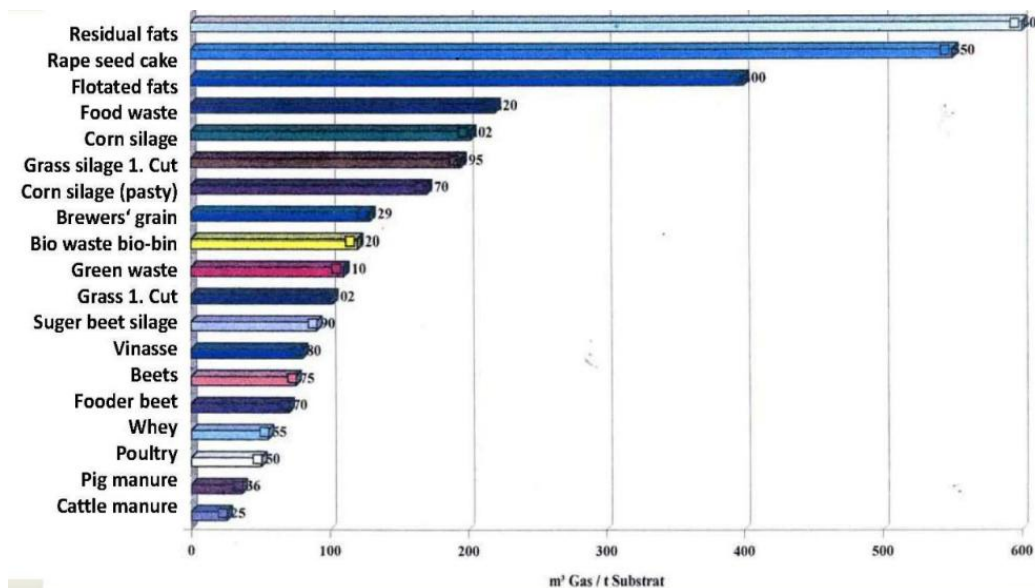
- Απαιτεί μεγάλο χρονικό διάστημα ο εγκλιματισμός της μικροβιακής καλλιέργειας και γενικά αποτελεί πιο αργή διεργασία συγκριτικά με την αερόβια επεξεργασία [32].
- Οι μεθανογόνοι μικροοργανισμοί των καλλιεργειών εμφανίζουν σχετικά μεγάλη ευαισθησία σε ένα ευρύ φάσμα τοξικών ενώσεων.
- Απαιτείται περαιτέρω επεξεργασία των εκρών, δηλαδή του υπολείμματος της διεργασίας.

Κατάλληλα υποστρώματα για τη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης θεωρούνται ένα πλήθος τύπων βιομάζας:

- Κτηνοτροφικά απόβλητα
- Γεωργικά υπολείμματα και υποπροϊόντα
- Οργανικά απόβλητα που μπορούν να υποστούν χώνευση από τρόφιμα και αγροτοβιομηχανίες (φυτικής και ζωικής προέλευσης)
- Το οργανικό κλάσμα των αστικών αποβλήτων και των υπολειμμάτων εστίασης (φυτικής και ζωικής προέλευσης)
- Λυματολάσπη
- Ενεργειακές καλλιέργειες (π.χ. αραβόσιτος, μίσχανθος, σόργος, τριφύλλι)

Η παραγωγικότητα μεθανίου αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα κριτήρια αξιολόγησης των διαφορετικών υποστρωμάτων της ΑΧ. Ως εκ τούτου, η ζωική στερεή κοπριά, η οποία έχει σχετικά

χαμηλή τιμή παραγωγικότητας μεθανίου στην πράξη δεν υφίσταται αναερόβια χώνευση μόνη της. Αντίθετα, χρησιμοποιείται ως υπόστρωμα αναερόβιας συγχώνευσης με άλλα υποστρώματα, όπως είναι η υδαρής κοπριά ή το τυρόγαλα που χαρακτηρίζονται από ικανοποιητική παραγωγικότητα βιοαερίου. Αντίθετα, τα απορρίμματα τροφίμων αποτελούν ένα από τα καταλληλότερα υποστρώματα ως προς την παραγωγικότητα σε βιοαέριο. Στο Σχήμα 2.1.2 παρουσιάζεται το μεθανογόνο δυναμικό διαφορετικών οργανικών υποστρωμάτων αναερόβιας χώνευσης.



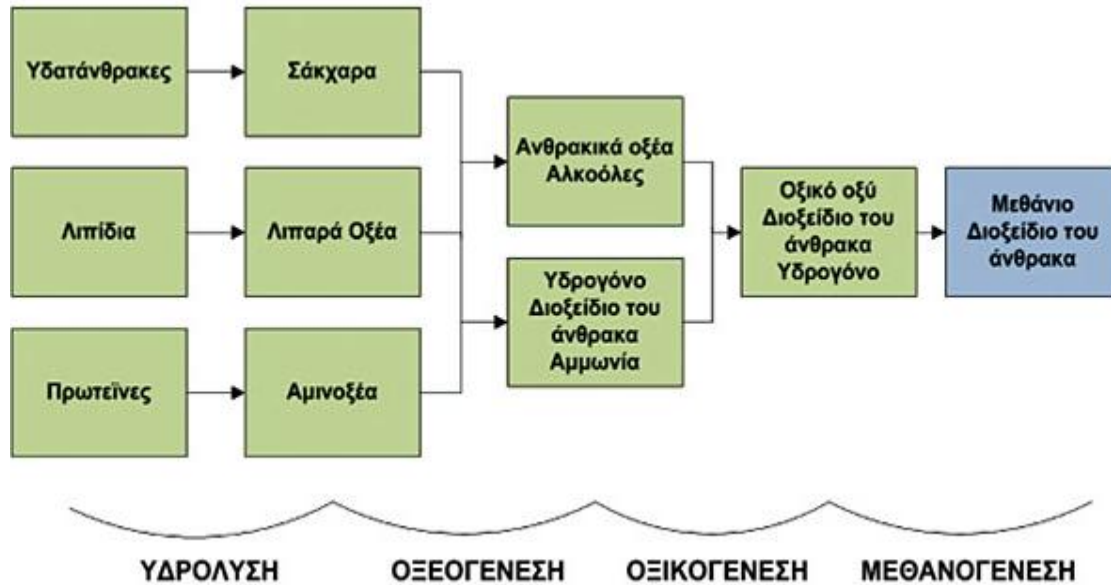
Σχήμα 2.1.2 Μεθανογόνο Δυναμικό διαφορετικών υποστρωμάτων αναερόβιας χώνευσης [33]

### 2.1.2 Μικροβιολογία-Βιοχημεία Αναερόβιας Χώνευσης

Τα βασικά προϊόντα αυτής της διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης είναι το βιοαέριο και το χωνεμένο υπόλειμμα. Το βιοαέριο είναι αέριο καύσιμο, αποτελούμενο κυρίως από μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα. Το χωνεμένο υπόλειμμα είναι το αποσυντιθέμενο υπόστρωμα, επακόλουθο της παραγωγής του βιοαερίου, το οποίο έπειτα από κατάλληλη επεξεργασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό και νερό άρδευσης.

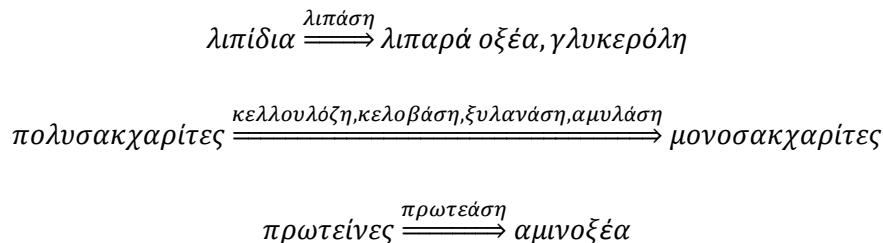
Η διεργασία σχηματισμού των τελικών προϊόντων της αναερόβιας χώνευσης αποτελεί συνδυασμό σταδίων, στα οποία το αρχικό υπόστρωμα συνεχώς διασπάται σε μικρότερα στοιχεία, μέσω της συνδυασμένης δράσης διαφορετικών ειδικών ομάδων μικροοργανισμών, οι οποίοι αποσυνθέτουν σταδιακά τα προϊόντα των προηγούμενων σταδίων. Στο Σχήμα 2.1.3 παρουσιάζεται ένα απλουστευμένο διάγραμμα της διεργασίας της ΑΧ και διακρίνονται τα τέσσερα κύρια στάδια της διεργασίας:

- i. Η υδρόλυση
- ii. Η οξεογένεση
- iii. Η οξικογένεση
- iv. Η μεθανογένεση



Σχήμα 2.1.3 Διάσπαση της οργανικής ύλης κατά την Αναερόβια Χώνευση

Η υδρόλυση είναι θεωρητικά το πρώτο βήμα της ΑΧ, κατά τη διάρκεια της οποίας η σύνθετη οργανική ουσία (πολυμερή) αποσυντίθεται σε μικρότερα στοιχεία (μονο- και ολιγομερή). Τα πολυμερή, όπως οι υδατάνθρακες, τα λιπίδια, τα νουκλεϊκά οξέα και οι πρωτεΐνες, μετατρέπονται σε γλυκόζη, γλυκερίνη, πουρίνες, πυριδίνες, κ.λπ. Τα υδρολυτικά βακτήρια εκκρίνουν υδρολυτικά ένζυμα, μετατρέποντας τα βιοπολυμερή σε απλούστερες και διαλυτές ενώσεις, ως εξής:



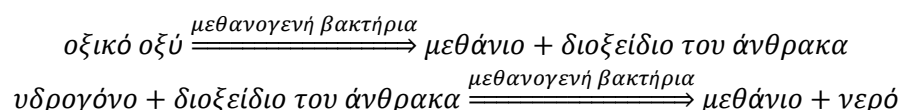
Μια μεγάλη ποικιλία μικροοργανισμών εμπλέκονται στην υδρόλυση, η οποία πραγματοποιείται από τα εξωένζυμα, που παράγονται από τους μικροοργανισμούς εκείνους που αποσυνθέτουν το αδιάλυτο μοριακό υλικό. Τα προϊόντα που προκύπτουν από την υδρόλυση αποσυντίθενται περαιτέρω από τους εμπλεκόμενους μικροοργανισμούς και χρησιμοποιούνται για τις δικές τους διεργασίες μεταβολισμού.

Κατά τη διάρκεια της οξεογένεσης, τα προϊόντα της υδρόλυσης μετατρέπονται από οξεογενή βακτηρίδια σε μεθανογενή υποστρώματα. Τα απλά σάκχαρα, τα αμινοξέα και τα λιπαρά οξέα υποβιβάζονται σε οξικό οξύ, διοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο (70%), καθώς επίσης και σε πτητικά λιπαρά οξέα (VfAs) και αλκοόλες (30%).

Κατά τη διάρκεια της οξικογένεσης, τα προϊόντα της οξεογένεσης που δεν μπορούν να μετατραπούν άμεσα σε μεθάνιο από τα μεθανογενή βακτηρίδια μετατρέπονται σε μεθανογενή υποστρώματα. Τα

πητικα λιπαρά οξέα και οι αλκοόλες οξειδώνονται σε μεθανογενή υποστρώματα, όπως οξικό οξύ, υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα. Τα πητικα λιπαρά οξέα με αλυσίδες άνθρακα με περισσότερους από δύο δεσμούς και οι αλκοόλες με αλυσίδες άνθρακα με περισσότερους από ένα δεσμό οξειδώνονται σε οξικό οξύ και υδρογόνο. Η παραγωγή του υδρογόνου αυξάνει την μερική πίεσή του. Αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως «υπόλειμμα» της οξικογένεσης και εμποδίζει το μεταβολισμό των οξικογενών βακτηρίων. Κατά τη διάρκεια της μεθανογένεσης, το υδρογόνο μετατρέπεται σε μεθάνιο. Η οξικογένεση και η μεθανογένεση συνήθως λαμβάνουν χώρα παράλληλα, ως συμβίωση δύο ομάδων οργανισμών.

Η παραγωγή του μεθανίου και του διοξειδίου του άνθρακα από ενδιάμεσα προϊόντα πραγματοποιείται από τα μεθανογενή βακτήρια. Το 70% του διαμορφωμένου μεθανίου προέρχεται από οξικό οξύ, ενώ το υπόλοιπο 30% παράγεται από τη μετατροπή του υδρογόνου και του CO<sub>2</sub> σύμφωνα με την ακόλουθη αντίδραση:



Η μεθανογένεση είναι ένα κρίσιμο βήμα σε ολόκληρη τη διεργασία της χώνευσης, δεδομένου ότι είναι η πιο αργή βιοχημική αντίδραση της διεργασίας. Η μεθανογένεση επηρεάζεται σοβαρά από τις συνθήκες λειτουργίας. Η σύνθεση της πρώτης ύλης, ο ρυθμός τροφοδοσίας, η θερμοκρασία και το pH είναι παραδείγματα παραγόντων που επηρεάζουν τη μεθανογένεση. Η υπερπλήρωση του χωνευτή, οι αλλαγές θερμοκρασίας ή η μεγάλη είσοδος οξυγόνου οδηγούν συνήθως στον τερματισμό της παραγωγής μεθανίου [27].

### 2.1.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης

Η αναερόβια χώνευση είναι μία αρκετά ευαίσθητη διεργασία και η αποδοτικότητα της εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από ορισμένες κρίσιμης σημασίας παραμέτρους, οι οποίες αφορούν τις συνθήκες που θεωρούνται κατάλληλες για την ανάπτυξη των αναερόβιων μικροοργανισμών.

#### Θερμοκρασία

Κατάλληλα για την αναερόβια χώνευση θεωρούνται τρία διαφορετικά θερμοκρασιακά εύρη, από τα οποία προκύπτει και ο ελάχιστος χρόνος παραμονής της διεργασίας, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.1.1

Πίνακας 2.1.1 Θερμικά στάδια και χαρακτηριστικοί χρόνοι παραμονής

Θερμικό Στάδιο	Θερμοκρασίες Διεργασίας	Ελάχιστος Χρόνος Παραμονής
Ψυχρόφιλο	<20°C	70-80 ημέρες
Μεσόφιλο	30-42°C	30-40 ημέρες
Θερμόφιλο	43-55°C	15-20 ημέρες

Αν και οι θερμόφιλες διεργασίες προσφέρουν αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των άλλων, όπως:

- Αποτελεσματική καταστροφή παθογόνων μικροοργανισμών
- Υψηλότερο ποσοστό αύξησης μεθανογενών βακτηρίων
- Μειωμένος χρόνος παραμονής
- Βελτιωμένη ικανότητα χώνευσης
- Καλύτερη διάσπαση στερεών υποστρωμάτων και καλύτερη χρήση των υποστρωμάτων
- Καλύτερη δυνατότητα διαχωρισμού των υγρών και στερεών κλασμάτων

Τα μειονεκτήματα της θερμοφιλής διεργασίας είναι τόσο σημαντικά ώστε συχνά να προτιμάται η μεσόφιλη:

- Σημαντικός βαθμός αστάθειας
- Αυξημένη ζήτηση ενέργειας
- Υψηλότερος κίνδυνος παρεμπόδισης της αμμωνίας (αύξηση τοξικότητας της αμμωνίας μέσω της αύξησης της θερμοκρασίας)

## pH

Η ρύθμιση του pH σε ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης, εφόσον από αυτό επηρεάζεται η αύξηση των μεθανογενών μικροοργανισμών και μπορεί να έχει επιπτώσεις στο διαχωρισμό μερικών ενώσεων που είναι ιδιαίτερα σημαντικές για τη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης (αμμωνία, σουλφίδιο, οργανικά οξέα). Συγκεκριμένα, ο σχηματισμός του μεθανίου πραγματοποιείται μέσα σε ένα σχετικά μικρό εύρος τιμών, μεταξύ 5,5 και 8,5 (βέλτιστο εύρος είναι το 7-8) για τους περισσότερους μεθανογενείς οργανισμούς. Από αυτό συμπεραίνουμε ότι οι μεθανογόνοι μικροοργανισμοί είναι αρκετά ευαίσθητοι ως προς την οξύτητα του περιβάλλοντος τους. Να σημειωθεί ότι οι οξικογενείς μικροοργανισμοί συγκεκριμένα έχουν, σε πολλές περιπτώσεις, μια χαμηλότερη τιμή του βέλτιστου pH. Όσον αφορά τη μεσόφιλη χώνευση, που όπως αναφέρθηκε προτιμάται συνήθως, το βέλτιστο εύρος pH είναι μεταξύ 6,5-8 και η διεργασία παρεμποδίζεται σημαντικά σε τιμές πέραν του 6 και του 8,3.

Η τιμή του pH μπορεί να αυξηθεί στη διάρκεια της διεργασίας εξαιτίας της αμμωνίας που παράγεται κατά τη διάσπαση των πρωτεϊνών, ή από την παρουσία αμμωνίας στο ίδιο το ρεύμα της τροφοδοσίας, ενώ η συσσώρευση πτητικών λιπαρών οξέων (VFAs) μειώνει την τιμή του pH. Ως εκ τούτου είναι σημαντικό να υπάρχει μέθοδος ελέγχου της τιμής του pH στους αναερόβιους αντιδραστήρες. Αυτό συμβαίνει κυρίως μέσω του συστήματος ανάσχεσης διττανθρακικών αλάτων. Επομένως, η τιμή του pH των χωνευτών βιοαερίου εξαρτάται από τη μερική πίεση του CO<sub>2</sub> και τη συγκέντρωση αλκαλικών και όξινων συστατικών στην υγρή φάση. Εάν συσσωρεύονται βάσεις ή οξέα, η ικανότητα ανάσχεσης ισοσταθμίζει τις αλλαγές στο pH μέχρι ένα ορισμένο επίπεδο. Όταν ξεπερνιέται η ικανότητα ανάσχεσης του συστήματος, εμφανίζονται δραστικές αλλαγές στις τιμές του pH, εμποδίζοντας εξ' ολοκλήρου τη διεργασία. Για το λόγο αυτό δεν μπορεί να προταθεί μια τιμή του pH ως αυτόνομη παράμετρος ελέγχου της διεργασίας.

## Πτητικά λιπαρά οξέα (VFAs)

Η ευστάθεια της διεργασίας της ΑΧ επηρεάζεται από τη συγκέντρωση των ενδιάμεσων προϊόντων όπως είναι τα πτητικά λιπαρά οξέα (VFAs). Τα VFAs είναι ενδιάμεσες ενώσεις (οξικά, προπιονικά, βουτυρικά, γαλακτικά άλατα), που παράγονται κατά τη διάρκεια της οξικογένεσης, με μια αλυσίδα άνθρακα από έξι ή λιγότερα άτομα. Στις περισσότερες περιπτώσεις, αστάθεια στη διεργασία θα οδηγήσει στη συσσώρευση VFAs μέσα στο χωνευτή, και αυτό μπορεί να οδηγήσει σε πτώση της τιμής του pH. Η συσσώρευση VFAs, εντούτοις, δεν εκφράζεται πάντοτε ως πτώση του pH, λόγω της ικανότητας ανάσχεσης μερικών τύπων βιομάζας. Για παράδειγμα η ζωική στερεή κοπριά έχει ένα πλεόνασμα αλκαλικότητας, το οποίο σημαίνει ότι η συσσώρευση VFAs πρέπει να υπερβεί ένα ορισμένο επίπεδο προτού να μπορέσει να ανιχνευθεί λόγω της σημαντικής μείωσης της τιμής του pH. Σε ένα τέτοιο σημείο, η συγκέντρωση οξέων στο χωνευτή θα είναι τόσο υψηλή ώστε η διεργασία της ΑΧ θα έχει ήδη εμποδιστεί σημαντικά.

Η εμπειρία δείχνει ότι δύο διαφορετικοί χωνευτές μπορεί να συμπεριφέρονται τελείως διαφορετικά ως προς την ίδια συγκέντρωση VFAs, με την έννοια ότι η συγκεκριμένη συγκέντρωση VFAs μπορεί να είναι βέλτιστη για μία δεξαμενή χώνευσης, αλλά ανασταλτική για μία άλλη. Μια από τις πιθανές εξηγήσεις είναι το γεγονός ότι η σύνθεση των πληθυσμών μικροοργανισμών ποικίλλει από χωνευτή σε χωνευτή. Για το λόγο αυτό, όπως και στην περίπτωση του pH, η συγκέντρωση των VFA δεν μπορεί να προταθεί ως μια αυτόνομη παράμετρος ελέγχου της διεργασίας.

## Αμμωνία

Η αμμωνία ( $\text{NH}_3$ ) είναι μια σημαντική ένωση, με ιδιαίτερη λειτουργία στη διεργασία της ΑΧ. Είναι μια σημαντική θρεπτική ουσία που χρησιμεύει ως προδρομικό υλικό των τροφίμων και των λιπασμάτων και κανονικά συναντάται ως αέριο, με τη χαρακτηριστική έντονη οσμή. Οι πρωτεΐνες είναι η κύρια πηγή αμμωνίας στη διεργασία της ΑΧ.

Η πολύ υψηλή συγκέντρωση αμμωνίας μέσα στο χωνευτή, ειδικότερα η ελεύθερη αμμωνία (στη μη ιονισμένη μορφή της), είναι υπεύθυνη για την παρεμπόδιση της διεργασίας. Το γεγονός αυτό είναι σύνηθες στην αναερόβια χώνευση της ζωικής στερεής κοπριάς, λόγω της υψηλής συγκέντρωσης αμμωνίας που προέρχεται από την ουρία. Γι' αυτό το λόγο, η συγκέντρωση της αμμωνίας πρέπει να διατηρείται κάτω από 80 mg/l. Τα μεθανογενή βακτήρια είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στην παρεμπόδιση από την αμμωνία. Η συγκέντρωση της ελεύθερης αμμωνίας είναι ευθέως ανάλογη προς τη θερμοκρασία, οπότε υφίσταται αυξημένος κίνδυνος παρεμπόδισης λόγω της αμμωνίας των διεργασιών ΑΧ που λαμβάνουν χώρα στις θερμοφιλες θερμοκρασίες, σε σύγκριση με τις μεσόφιλες. Η συγκέντρωση ελεύθερης αμμωνίας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$[\text{NH}_3] = \frac{[\text{T} - \text{NH}_3]}{\left(1 + \frac{H^+}{k_a}\right)}$$

όπου  $[\text{NH}_3]$  και  $[\text{T} - \text{NH}_3]$  είναι οι συγκεντρώσεις της ελεύθερης και της συνολικής αμμωνίας, αντίστοιχα, και  $k_a$  είναι η σταθερά διαχωρισμού, με τιμές που αυξάνονται με τη θερμοκρασία. Αυτό σημαίνει ότι το



αυξανόμενο pH και η αυξανόμενη θερμοκρασία θα οδηγήσουν σε αυξανόμενη παρεμπόδιση, δεδομένου ότι οι παράγοντες αυτοί αυξάνουν το ποσοστό της ελεύθερης αμμωνίας. Όταν μια διεργασία παρεμποδίζεται από την αμμωνία, μια αύξηση στη συγκέντρωση των  $VfA$  θα οδηγήσει σε μείωση του pH. Αυτό αλληλοαναιρεί εν μέρει την επίδραση της αμμωνίας, λόγω της μείωσης στη συγκέντρωση της ελεύθερης αμμωνίας.

### **Ιχνοστοιχεία, θρεπτικές ουσίες και τοξικές ενώσεις**

Τα ιχνοστοιχεία όπως το σίδηρο, το νικέλιο, το κοβάλτιο, το σελήνιο, το μολυβδαίνιο ή το βολφράμιο είναι εξίσου σημαντικά για την αύξηση και την επιβίωση των μικροοργανισμών της αναερόβιας. Η βέλτιστη αναλογία των θρεπτικών στοιχείων άνθρακα, αζώτου, φωσφόρου, και θείου (C:N:P:S) είναι 600:15:5:1. Η ανεπαρκής παροχή θρεπτικών ουσιών και ιχνοστοιχείων, καθώς επίσης και η πάρα πολύ υψηλή δυνατότητα χώνευσης του υποστρώματος μπορούν να προκαλέσουν παρεμπόδιση και διαταραχές στη διεργασία της ΑΧ.

Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει τη δραστηριότητα των αναερόβιων μικροοργανισμών είναι η παρουσία τοξικών ενώσεων. Αυτές μπορούν να μεταφερθούν στο σύστημα ΑΧ μαζί με την πρώτη ύλη, αλλά μπορούν επίσης να παραχθούν κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Είναι δύσκολη η εφαρμογή κατώτατων οριακών τιμών για τις τοξικές ουσίες, αφενός μεν επειδή αυτές μπορούν συχνά να δεσμευθούν με χημικές διεργασίες και αφετέρου επειδή οι αναερόβιοι μικροοργανισμοί είναι σε θέση να προσαρμοστούν, εντός ορισμένων ορίων, στις περιβαλλοντικές συνθήκες, στην προκειμένη περίπτωση στην παρουσία τοξικών ενώσεων.

### **2.1.4 Παράμετροι Λειτουργίας αναερόβιας χώνευσης**

#### **Οργανικό φορτίο**

Η κατασκευή των μονάδων βιοαερίου απαιτεί ένα συνδυασμό οικονομικών και τεχνικών εκτιμήσεων. Η μέγιστη παραγωγή βιοαερίου που λαμβάνεται από την πλήρη χώνευση του υποστρώματος θα απαιτούσε ένα μεγάλο υδραυλικό χρόνο παραμονής (ΥΧΠ) και ένα αντίστοιχο μέγεθος χωνευτή. Στην πράξη, η επιλογή του συστήματος (π.χ. το μέγεθος και ο τύπος του χωνευτή) βασίζεται σε έναν συμβιβασμό μεταξύ της μέγιστης παραγωγής βιοαερίου και της οικονομικής βιωσιμότητας της μονάδας. Από αυτή την άποψη, το οργανικό φορτίο είναι μια σημαντική παράμετρος λειτουργίας, η οποία δείχνει πόση οργανική ξηρή ουσία μπορεί να τροφοδοτηθεί στον χωνευτή, ανά  $m^3$  όγκου και μονάδα χρόνου, σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$B_r = \frac{m * c}{V_r}$$

Όπου:

$B_r$ : οργανικό φορτίο ( $kg/d * m^3$ )

$m$ : μάζα τροφοδοτούμενου υποστρώματος ανά μονάδα χρόνου ( $kg/d$ )

$c$ : συγκέντρωση οργανικής ουσίας (%)

$V_R$ : όγκος αναερόβιου χωνευτή

### **Υδραυλικός χρόνος παραμονής (HRT, hydraulic retention time)**

Η πιο σημαντική παράμετρος για τη διαστασιολόγηση του χωνευτή είναι ο υδραυλικός χρόνος παραμονής, μία παράμετρος δηλαδή η οποία αφορά στο μέσο χρονικό διάστημα κατά το οποίο διατηρείται το υπόστρωμα μέσα στη δεξαμενή του χωνευτή. Ο HRT σχετίζεται με τον όγκο του αναερόβιου χωνευτή ( $V_R$ ) και τον όγκο του υποστρώματος που τροφοδοτείται στη μονάδα του χρόνου, σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$HRT = \frac{V_R}{V}$$

Όπου,

$V_R$ : ο όγκος του χωνευτή ( $m^3$ )

$V$ : ο όγκος του υποστρώματος που τροφοδοτείται στη μονάδα του χρόνου ( $m^3/d$ )

Σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση, όσο αυξάνεται το οργανικό φορτίο θα μειώνεται το HRT. Ο χρόνος παραμονής πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος για να εξασφαλιστεί ότι η ποσότητα των βακτηρίων που αφαιρείται με το χωνεμένο υπόλειμμα δεν θα είναι υψηλότερη από την ποσότητα των αναπαραγόμενων βακτηρίων. Παράλληλα, ο HRT πρέπει να ρυθμίζεται με τρόπο ώστε να οδηγεί σε ικανοποιητική παραγωγικότητα βιοαερίου, η οποία μειώνεται όσο αυξάνεται ο HRT.

#### **2.1.5 Συστήματα αναερόβιας χώνευσης**

Από τους σημαντικότερους παράγοντες για την αποτελεσματική λειτουργία της αναερόβιας χώνευσης, είναι η επιλογή του κατάλληλου συστήματος που θα χρησιμοποιηθεί.

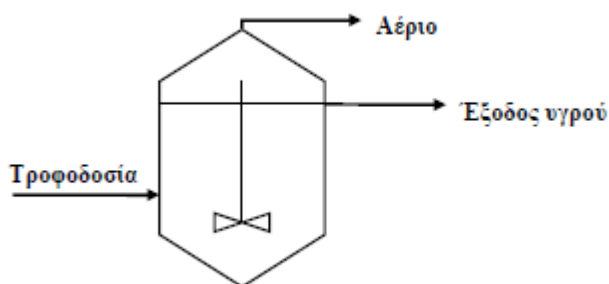
Κριτήρια για την επιλογή του κατάλληλου συστήματος είναι το τεχνοοικονομικό κόστος και τα φυσικά, χημικά, βιολογικά χαρακτηριστικά του προς επεξεργασία αποβλήτου.

Ένα αποδοτικό αναερόβιο σύστημα πρέπει να έχει τα εξής τεχνικά χαρακτηριστικά [28], [29]:

- Υψηλή κατακράτηση της ενεργού βιομάζας στον αντιδραστήρα, κατά την διάρκεια της λειτουργίας του.
- Επαρκής επαφή μεταξύ της βιομάζας και του διαθέσιμου προς χώνευση απόβλητου.
- Υψηλούς ρυθμούς αντιδράσεων και απουσία περιορισμών από φαινόμενα μεταφοράς.
- Ικανότητα προσαρμογής της βιομάζας σε διαφορετικούς τύπους αποβλήτων.
- Επικράτηση ευνοϊκών περιβαλλοντικών συνθηκών για όλα τα είδη των μικροοργανισμών, στις επιβαλλόμενες λειτουργικές συνθήκες.

### 2.1.5.1 Αντιδραστήρας πλήρους ανάμιξης (Continuous Stirred Tank Reactor, CSTR)

Η ιστορία εξέλιξης των αναερόβιων χωνευτήρων είναι στενά συνδεδεμένη με την προσπάθεια συσσώρευσης όσο το δυνατόν υψηλότερων συγκεντρώσεων ενεργούς αναερόβιας βακτηριακής μάζας μέσα στον χωνευτήρα, έτσι ώστε ο ρυθμός αποδόμησης των οργανικών υποστρωμάτων να μεγιστοποιηθεί και συνεπώς να ελαχιστοποιηθεί το κόστος εφαρμογής της αναερόβιας χώνευσης. Στόχος ήταν να σχεδιαστούν αντιδραστήρες όπου ο χρόνος παραμονής της βιομάζας να μην ελέγχεται από το χρόνο παραμονής του αποβλήτου [34], [35]. Χρονολογικά, αρχικά αναπτύχθηκαν αναερόβιες δεξαμενές πλήρους ανάδευσης οι οποίες μπορούν να επεξεργαστούν απόβλητα με υψηλές συγκεντρώσεις στερεών, αλλά απαιτούσαν μεγάλους χρόνους παραμονής, κα άρα δεν μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε απόβλητα με χαμηλό ρυπαντικό φορτίο [34]–[36].

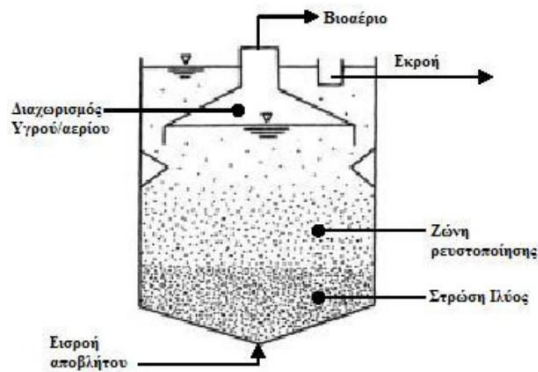


Σχήμα 2.1.4 Αναερόβιος χωνευτήρας πλήρους ανάμιξης

Για να αυξηθεί ο χρόνος παραμονής των στερεών ανεξάρτητα από τον υδραυλικό χρόνο παραμονής, οι πλήρους ανάδευσης αντιδραστήρες εξελίχθηκαν σε αντιδραστήρες πλήρους ανάδευσης με ανακυκλοφορία της λάσπης. Το κύριο πρόβλημα της εφαρμογής αυτής είναι ο δύσκολος διαχωρισμός της λάσπης από το επεξεργασμένο απόβλητο. Παρόλα αυτά παραμένει μια ικανοποιητική λύση για απόβλητα που περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις αιωρούμενων στερεών ή/και λιπών. [34], [35]

### 2.1.5.2 Αντιδραστήρας ανοδικής ροής διαμέσου στρώσης ιλύος (Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor, UASB)

Στην δεκαετία του 1970, στην Ολλανδία, ο Lettinga και οι συνεργάτες του ανέπτυξαν ένα ταχύρρυθμο αντιδραστήρα που ονομάζεται UASB. Ο αντιδραστήρας UASB είναι ένας αναερόβιος αντιδραστήρας που τροφοδοτείται από τον πυθμένα. Μπορεί να διαιρεθεί σε τέσσερα μέρη (από τον πυθμένα προς την κορυφή): τη στρώση ιλύος, τη ζώνη ρευστοποίησης (fluidized zone), τον διαχωριστή υγρής/ αέριας απορροής και τη ζώνη κατακρήσσης (Σχήμα 2.1.5). Στο διαμέρισμα της στρώσης ιλύος λαμβάνει χώρα το στάδιο της υδρόλυσης. Ο UASB είναι μακράν ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος ταχύρρυθμος αναερόβιος αντιδραστήρας για την επεξεργασία αστικών και βιομηχανικών λυμάτων.



**Σχήμα 2.1.5** Ο αντιδραστήρας UASB και τα διάφορα μέρη του

Ο UASB αντιδραστήρας βασίζεται στο ότι η αναερόβια ιλύς έχει εγγενώς καλές ιδιότητες καθίζησης, εφόσον η ιλύς δεν έχει υποστεί υψηλή μηχανική ανάδευση. Η ίση κατανομή της ροής ιλύος και η επαρκώς υψηλή ταχύτητα ανόδου (up flow velocity) παρέχουν επαρκή ανάδευση στο σύστημα, σε συνδυασμό με την ανάδευση που προκαλεί η ανοδική πορεία του βιοαερίου που παράγεται. Η βιομάζα διατηρείται ως στρώση ιλύος ή ως μήτρα κροκίδων (granule matrix), και διατηρείται σε αιώρηση (suspension) με τον έλεγχο της ταχύτητας ανόδου.

Οι αντιδραστήρες UASB παρουσιάζουν τα παρακάτω πλεονεκτήματα [29], [37]:

- Λειτουργούν σε υψηλή συγκέντρωση βιομάζας και μεγάλους χρόνους παραμονής στερεών
- Ο σχεδιασμός τους είναι σχετικά απλός
- Δημιουργούνται ευνοϊκές συνθήκες για μεταφορά μάζας
- Απαιτείται μικρός όγκος χωνευτήρων
- Είναι εφικτή υψηλή απόδοση αφαίρεσης οργανικού φορτίου
- Παρουσιάζουν σταθερότητα σε διακυμάνσεις τροφοδοσίας, λόγω αυξημένης συγκέντρωσης βιομάζας
- Η έκλυση βιοαερίου εξασφαλίζει ομοιόμορφες συνθήκες λειτουργίας στο εσωτερικό του αντιδραστήρα
- Ευνοείται ο σχηματισμός συμπαγών κόκκων βιομάζας.

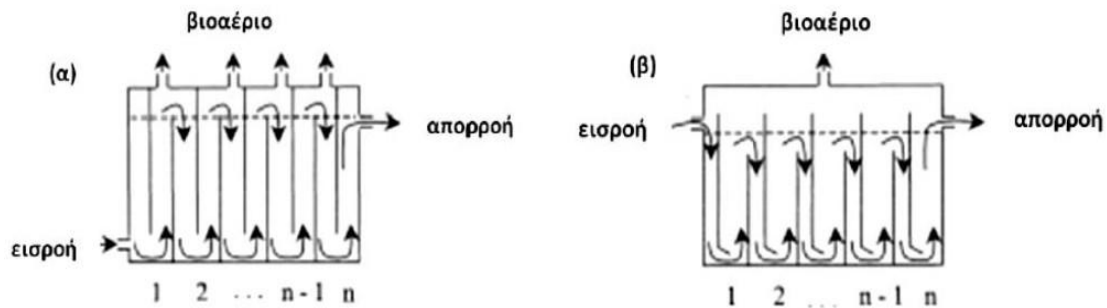
Τα μειονεκτήματα των UASB είναι τα εξής:

- Τα χαρακτηριστικά καθίζησης επηρεάζουν την απόδοση της διεργασίας
- Δεν είναι κατάλληλοι για απόβλητα με υψηλή συγκέντρωση στερεών

- Ο σχηματισμός συμπαγών κόκκων βιομάζας απαιτεί τον έλεγχο και τη ρύθμιση πολλών λειτουργικών παραμέτρων.

### 2.1.5.3 Αντιδραστήρας με ανακλαστήρες (Anaerobic Baffled Reactor, ABR)

Ένας τύπος ταχύρυθμου αντιδραστήρα είναι ο αναερόβιος αντιδραστήρας με ανακλαστήρες (ABR), που αναπτύχθηκε από τον McCarty και τους συνεργάτες του στο Πανεπιστήμιο του Stanford. Ο ABR αποτελεί μια σειρά αντιδραστήρων ανοδικής ροής διαμέσου στρώσεως ιλύος (UASB), επειδή χωρίζεται σε πολλά διαμερίσματα (Σχήμα 2.1.6).



**Σχήμα 2.1.6** Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης και τρόπου λειτουργίας ενός αντιδραστήρα ABR. Στα αριστερά του σχήματος βρίσκεται το αρχικό σχέδιο του ABR αντιδραστήρα και στα δεξιά της εικόνας το πλέον σύνηθες σχέδιο

Ένας τυπικός ABR αντιδραστήρας αποτελείται από μια σειρά από κατακόρυφους ανακλαστήρες που κατευθύνουν τα απόβλητα αρχικά προς τα κάτω και ύστερα πάνω από τους ανακλαστήρες αυτούς καθώς το απόβλητο κατευθύνεται από την είσοδο προς την απορροή. Η ροή αυτή του αποβλήτου (ανοδική και καθοδική) μειώνει την έκπλυση των βακτηρίων, γεγονός το οποίο επιτρέπει στον ABR να διατηρεί ενεργή βιολογική λάσπη χωρίς τη χρήση οποιωνδήποτε μέσων σταθεροποίησης (fixed media). Τα βακτήρια στο εσωτερικό του αντιδραστήρα έχουν την τάση να αυξάνονται και να καθιζάνουν, και ταυτόχρονα να παραγάγουν βιοαέριο σε κάθε διαμέρισμα, αλλά συνήθως κινούνται προς την έξοδο του αντιδραστήρα με ένα σχετικά αργό ρυθμό, με αποτέλεσμα ο αντιδραστήρας συχνά να παρουσιάζει SRT 100 ημέρες με HRT 20 ώρες. Η αργή οριζόντια κίνηση των αποβλήτων δίνει χρόνο στο απόβλητο να έρθει σε επαφή με την ενεργό βιομάζα καθώς αυτό διέρχεται μέσα από ABR αντιδραστήρες, οι οποίοι συνήθως παρουσιάζουν σύντομους υδραυλικούς χρόνους παραμονής (6-20 ώρες).

Ο ABR παρουσιάζει τα παρακάτω πλεονεκτήματα [29], [37]:

- Χαρακτηρίζεται από απλό σχεδιασμό και φθηνή κατασκευή
- Δεν απαιτείται ιδιαίτερη κατασκευή για διαχωρισμό βιοαερίου-στερεών-υγρού
- Η εναλλασσόμενη ανοδική και καθοδική ροή ελαχιστοποιεί την έκπλυση της βιομάζας

- Μπορεί να λειτουργήσει για μεγάλα χρονικά διαστήματα χωρίς να είναι απαραίτητη η αφαίρεση περίσσειας λάσπης
- Είναι σταθερός σε διαταραχές της οργανικής ή της υδραυλικής φόρτισης.

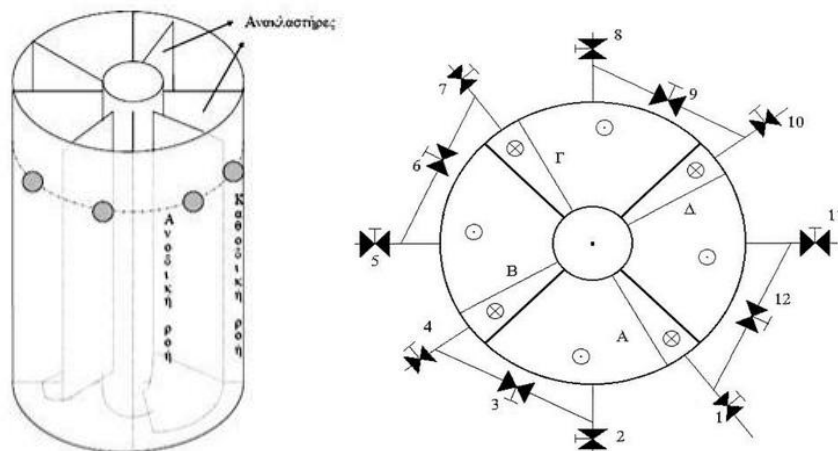
Τα μειονεκτήματα του ABR είναι:

- Είναι κατάλληλος μόνο για τη χώνευση αποβλήτων με μικρή συγκέντρωση στερεών
- Η κατακράτηση βιομάζας εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά καθίζησης
- Ο χρόνος παραμονής των στερεών εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τον υδραυλικό χρόνο παραμονής.

Ο αντιδραστήρας τύπου ABR στηρίζεται στην ίδια αρχή λειτουργίας με τον αντιδραστήρα τύπου UASB, δηλαδή στην κατακράτηση της βιομάζας. Υπό προϋποθέσεις, ο ABR, θα μπορούσε να περιγραφεί από έναν αριθμό χωνευτήρων UASB σε σειρά [38], [39]. Υδροδυναμικά ο UASB προσεγγίζει τον αντιδραστήρα συνεχούς λειτουργίας με ανάδευση τύπου CSTR, ενώ ο ABR με την προϋπόθεση ότι η παραγωγή βιοαερίου είναι έντονη [37], [38], [40], μπορεί να προσομοιωθεί από έναν αριθμό CSTR στη σειρά ίσο με τον αριθμό των διαμερισμάτων του [38], [39], [41]. Προφανώς, όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των διαμερισμάτων του, τόσο περισσότερο ο ABR προσεγγίζει τον αυλωτό αντιδραστήρα (PFR).

#### **2.1.5.4 Περιοδικός Αναερόβιος Αντιδραστήρας με Ανακλαστήρες PABR (Periodic Anaerobic Baffled Reactor)**

Ο αντιδραστήρας PABR (Periodic Anaerobic Baffled Reactor) αναπτύχθηκε από τους Γεράσιμο Λυμπεράτο και Ιωάννη Σκιαδά στο Εργαστήριο Βιοχημικής Μηχανικής και Τεχνολογίας Περιβάλλοντος (Παν/μο Πατρών, Τμ. Χημικών Μηχανικών). Είναι ένας ταχύρυθμος, ευέλικτος αντιδραστήρας, ο οποίος μπορεί να επεξεργάζεται υψηλά οργανικά φορτία με μικρούς χρόνους παραμονής. Ο PABR αποτελείται από δύο (2) ομόκεντρα κυλινδρικά κομμάτια. Ο χώρος ανάμεσα στους δύο ομόκεντρους κυλίνδρους χωρίζεται σε τέσσερα (4) διαμερίσματα (compartments), έτσι ώστε η διάταξή του να μοιάζει με αυτή του ABR, μόνο που τα διαμερίσματα βρίσκονται σε κυκλική διάταξη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1.7.

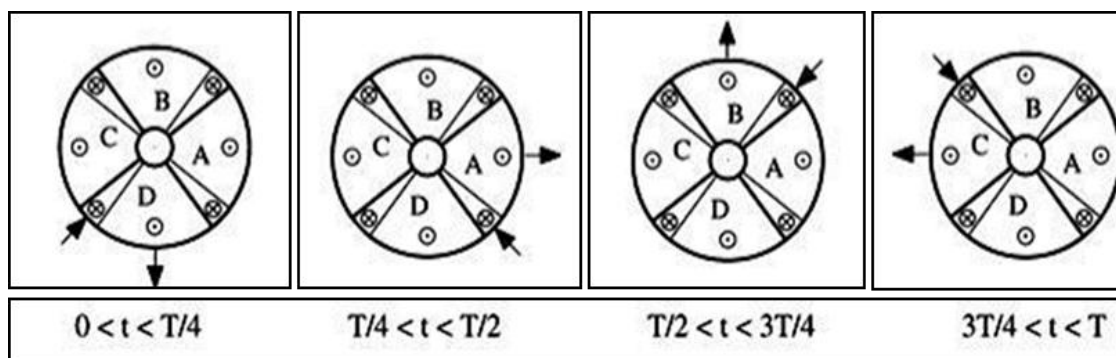


**Σχήμα 2.1.7** Δομή Περιοδικού Αναερόβιου Χωνευτήρα με Ανακλαστήρες (Αριστερά: Η πρόσοψη, Δεξιά: Η κάτοψη του PABR)

Κάθε διαμέρισμα, όπως και στον αντιδραστήρα τύπου ABR, αποτελείται από δύο τμήματα: το τμήμα καθοδικής ροής (down flow section) και το τμήμα ανοδικής ροής (up flow section). Η τροφοδοσία εισέρχεται στο εκάστοτε διαμέρισμα μέσω μιας οπής στο πάνω μέρος του καθοδικού τμήματος, ανέρχεται στο ανοδικό τμήμα, εξέρχεται αυτού, και στη συνέχεια εισέρχεται στο επόμενο διαμέρισμα με τη βοήθεια εξωτερικών σωληνώσεων. Τέλος, εξέρχεται του αντιδραστήρα από το ανοδικό τμήμα του διαμερίσματος από όπου γίνεται η απορροή (effluent). Η ροή μεταξύ των διαμερισμάτων πραγματοποιείται σύμφωνα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού.

Χαρακτηριστικό του αντιδραστήρα αυτού είναι η κυκλική εναλλαγή (αντίθετα από τη ροή) των διαμερισμάτων που τροφοδοτούνται. Η εναλλαγή αυτή πραγματοποιείται με τη βοήθεια βανών (switching valves), οι οποίες είναι τοποθετημένες κατάλληλα στο σύστημα των εξωτερικών σωληνώσεων. Εκτρέποντας κατάλληλα τη ροή, οι βάνες ελέγχουν εάν το ρευστό που εξέρχεται από το τμήμα ανοδικής ροής ενός διαμερίσματος θα μεταφερθεί στο επόμενο διαμέρισμα ή θα αποτελέσει απορροή. Αντίστοιχα οι βάνες ελέγχουν εάν το καθοδικό μέρος ενός διαμερίσματος θα τροφοδοτηθεί με την απορροή του προηγούμενου ή από καινούργια τροφοδοσία.

Αναλυτικότερα (Σχήμα 2.1.8) όταν το διαμέρισμα που τροφοδοτείται είναι το Α (κάτω αριστερά), τότε το διαμέρισμα από το οποίο εξέρχεται η απορροή είναι το Δ, με τις βάνες 1, 3, 6, 9, 11, 12 να είναι ανοικτές και τις υπόλοιπες κλειστές. Ομοίως όταν στο διαμέρισμα Δ γίνεται η τροφοδοσία, η απορροή εξέρχεται από το διαμέρισμα Γ κ.ο.κ. Το διαμέρισμα τροφοδοσίας αντίθετα από τη φορά των δεικτών του ρολογιού σύμφωνα με μια περίοδο εναλλαγής  $T_{switch}$ , επομένως ανά ένα τέταρτο της περιόδου αυτής αλλάζει το τροφοδοτούμενο διαμέρισμα.



**Σχήμα 2.1.8** Περιοδική αλλαγή των διαμερισμάτων τροφοδοσίας και εναλλαγής

Η συχνότητα εναλλαγής της τροφοδοσίας του αντιδραστήρα αποτελεί μία από τις κύριες παραμέτρους της λειτουργίας του αντιδραστήρα. Στην ακραία περίπτωση όπου η συχνότητα εναλλαγής είναι μηδέν, ο αντιδραστήρας συμπεριφέρεται σαν αντιδραστήρας ABR, ενώ όταν η συχνότητα εναλλαγής τείνει στο άπειρο, η λειτουργία του αντιδραστήρα προσομοιάζει τη λειτουργία ενός αντιδραστήρα UASB. Ρυθμίζοντας έτσι την συχνότητα εναλλαγής της τροφοδοσίας σε μία ενδιάμεση τιμή, ο αντιδραστήρας λειτουργεί σε μια κατάσταση «ενδιάμεση» (“something between”) των δύο ακραίων καταστάσεων, γεγονός που του προσδίδει το πλεονέκτημα της ευελιξίας.

Τα πλεονεκτήματα του PABR όπως αυτά αναφέρονται από τους Ι. Σκιαδά και Γ. Λυμπεράτο είναι κατά κύριο λόγο η ευελιξία στη λειτουργία του, η δυνατότητα χρήσης του εσωτερικού κυλίνδρου ως εναλλάκτη θερμότητας ενώ τέλος ελαχιστοποιεί τις θερμικές απώλειες λόγω του σχήματος του (ελάχιστη επιφάνεια ανά μονάδα όγκου).

### 2.1.6 Μαθηματική μοντελοποίηση της αναερόβιας χώνευσης

Η μαθηματική μοντελοποίηση της διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης είναι ένα ζήτημα που απασχολεί την επιστημονική κοινότητα για περισσότερες από 4 δεκαετίες. Ιδιαίτερα από τις αρχές της δεκαετίας του 1970, η ανάγκη βελτιστοποίησης των συστημάτων αναερόβιας χώνευσης αποτέλεσε κίνητρο στην κατεύθυνση της διερεύνησης της μαθηματικής περιγραφής αυτής της εξαιρετικά πολύπλοκης διεργασίας [42], [43], με πάνω από 750 σχετικές επιστημονικές δημοσιεύσεις κατά το χρονικό διάστημα από το 1972 έως το 2006 [44].

Όπως προαναφέρθηκε, η διεργασία της αναερόβιας χώνευσης αποτελείται από 4 βασικά στάδια (υδρόλυση, οξεογένεση, οξικογένεση και μεθανογένεση) στα οποία δρουν πολλά διαφορετικά είδη μικροοργανισμών, που παράγουν ένα πλήθος ενδιάμεσων προϊόντων, ανάλογα με το μεταβολικό μονοπάτι. Η φύση του υποστρώματος, τα είδη των μικροοργανισμών, οι σχέσεις μεταξύ τους, καθώς και ο τρόπος ανάπτυξης των πληθυσμών τους είναι παράμετροι που εν δυνάμει συμβάλλουν στο βαθμό πολυπλοκότητας κατά τη μαθηματική περιγραφή της διεργασίας, ανάλογα με το επίπεδο λεπτομέρειας που επιλέγεται κατά περίπτωση [45].

Άμεση συνέπεια της πολυπλοκότητας που χαρακτηρίζει τη διεργασία είναι η ανάπτυξη μιας πληθώρας μαθηματικών μοντέλων ανάλογα με το σκοπό για τον οποίο σχεδιάστηκαν. Ανάμεσα στα μοντέλα αυτά, υπάρχουν συγκριτικά απλά μοντέλα που αναπτύχθηκαν πχ αποκλειστικά για τον υπολογισμό της



μέγιστης θεωρητικής παραγωγικότητας του βιοαερίου, άλλα λαμβάνουν υπόψη τους ρυθμούς αποικοδόμησης ή χώνευσης των διάφορων συστατικών από τη βιομάζα, ενώ άλλα περιγράφουν τα στάδια της διεργασίας και την κινητική των αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα σε αυτά με μεγαλύτερη λεπτομέρεια [42].

Στην προσπάθεια μαθηματικής μοντελοποίησης της αναερόβιας χώνευσης εκτός από το βαθμό λεπτομέρειας κατά την περιγραφή της διεργασίας, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και το επίπεδο λεπτομέρειας κατά την περιγραφή του συστήματος στο οποίο λαμβάνει χώρα η διεργασία, καθώς και ο βαθμός πολυπλοκότητας που χαρακτηρίζει το σύστημα. Για παράδειγμα, ένας συμβατικός αντιδραστήρας τύπου CSTR χαρακτηρίζεται από χαμηλό βαθμό πολυπλοκότητας ως προς την περιγραφή της λειτουργίας του. Αντιθέτως, ο αντιδραστήρας τύπου PABR χαρακτηρίζεται από αυξημένο βαθμό πολυπλοκότητας λόγω του σχεδιασμού του (4 διαμερίσματα, περιοδική εναλλαγή του διαμερίσματος τροφοδοσίας και εξόδου, κατακράτηση βιομάζας λόγω βαρύτητας κλπ).

Με βάση τα παραπάνω, τα μοντέλα αναερόβιας χώνευσης θα μπορούσαν να χωριστούν σε 4 κατηγορίες, ανάλογα με το βαθμό λεπτομέρειας κατά την περιγραφή της διεργασίας και του συστήματος που χρησιμοποιείται (Πίνακας 2.1.2).

**Πίνακας 2.1.2** Κατηγοριοποίηση μοντέλων με βάση το βαθμό πολυπλοκότητας

	<b>Απλό σύστημα AX</b>	<b>Σύνθετο σύστημα AX</b>
<b>Απλή περιγραφή διεργασίας</b>	Μοντέλο τύπου <b>A</b>	Μοντέλο τύπου <b>B</b>
<b>Λεπτομερής περιγραφή διεργασίας</b>	Μοντέλο τύπου <b>Γ</b>	Μοντέλο τύπου <b>Δ</b>

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή πραγματοποιήθηκε μαθηματική μοντελοποίηση της διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης 2 ειδών στερεών οργανικών αποβλήτων (κτηνοτροφικών και οικιακών) σε πιλοτικό αντιδραστήρα τύπου PABR. Για την μοντελοποίηση χρησιμοποιήθηκαν (κατά περίπτωση) δύο ειδών μοντέλα, μοντέλο τύπου B και Γ.

Στην περίπτωση του μοντέλου τύπου B που εφαρμόστηκε με βάση τα πειραματικά δεδομένα ενός από τους πειραματικούς κύκλους λειτουργίας κατά την αναερόβια συγχώνευση εκχυλίσματος από μίγμα κτηνοτροφικών αποβλήτων (Κεφάλαιο 6) προσομοιώθηκε η πολυπλοκότητα της λειτουργίας του PABR (εναλλαγή των διαμερισμάτων τροφοδοσίας και εκροής) και χρησιμοποιήθηκε ένα απλοποιημένο μοντέλο με βάση την κινητική Monod.

Το μοντέλο τύπου Γ εφαρμόστηκε στην περίπτωση 2 πειραματικών κύκλων για την αναερόβια συγχώνευση εκχυλίσματος από μίγμα κτηνοτροφικών αποβλήτων, καθώς και με βάση τα πειραματικά

δεδομένα που αφορούν στην αναερόβια χώνευση του FORBI (βλ. Κεφάλαιο 7). Στις περιπτώσεις αυτές, έγινε η παραδοχή ότι ο PABR προσομοιώνει την υδραυλική συμπεριφορά ενός αντιδραστήρα πλήρους ανάμειξης συνεχούς έργου (CSTR) με τη συνθήκη ότι ο χρόνος παραμονής των στερεών διαφέρει από τον υδραυλικό χρόνο παραμονής. Η παραδοχή αυτή στηρίζεται στα ευρήματα της μελέτης της υδραυλικής συμπεριφοράς του πιλότου, που παρουσιάζεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4. Το μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Anaerobic Digestion Model no.1 (ADM1) [46].

Στις δύο περιπτώσεις, τα μοντέλα επιλύθηκαν με τη χρήση του υπολογιστικού εργαλείου Aquasim 2.0. Η χρήση μοντέλου τύπου A αποφεύχθηκε γιατί οδηγεί σε υπεραπλούστευση της διεργασίας και θεωρήθηκε ότι δε θα είχε προστιθέμενη ερευνητική αξία, καθώς δε λαμβάνει υπόψη αφενός τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του PABR, αφετέρου δεν περιγράφει την πολυπλοκότητα που χαρακτηρίζει τη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης. Από την άλλη, το μοντέλου τύπου Δ αυξάνει σημαντικά το βαθμό πολυπλοκότητας και ταυτόχρονα αυξάνει κατακόρυφα τις υπολογιστικές απαιτήσεις. Η ανάπτυξη ενός τέτοιου μοντέλου για την περιγραφή της διεργασίας σε αντιδραστήρα τύπου PABR θα μπορούσε να αποτελέσει αντικείμενο μελέτης σε επόμενη έρευνα.

#### **2.1.6.1 Απλό κινητικό μοντέλο Monod**

Στο απλοποιημένο μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε κατά τη μοντελοποίηση ενός εκ των πειραματικών κύκλων της διεργασίας της αναερόβιας συγχώνευσης εκχυλίσματος από μίγμα κτηνοτροφικών αποβλήτων έγιναν οι παρακάτω υποθέσεις [45]:

- Η διεργασία της αναερόβιας χώνευσης μπορεί να περιγραφεί ικανοποιητικά από ένα μοντέλο το οποίο υποθέτει κατανάλωση ενός θρεπτικού υποστρώματος για την παραγωγή βιομάζας.
- Τα βήματα της διάσπασης της σωματιδιακής οργανικής ύλης και της υδρόλυσης των μακρομορίων στα αντίστοιχα μονομερή τους παρακάμπτονται
- Ως υπόστρωμα θεωρείται το συνολικό διαλυτό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (sCOD)
- Κατά τη διεργασία καταναλώνεται το θρεπτικό υπόστρωμα (sCOD) για την ανάπτυξη της βιομάζας και την ταυτόχρονη παραγωγή βιοαερίου
- Η ανάπτυξη της βιομάζας ακολουθεί κινητική τύπου Monod, που περιγράφεται από το μαθηματικό τύπο:

$$\mu = \frac{\mu_{max}S}{K_S+S}$$

Όπου:

$\mu$ : ρυθμός ανάπτυξης μικροοργανισμών ( $g_{βιομάζας} \cdot L^{-1} \cdot h^{-1}$ )

$\mu_{max}$ : μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης ( $h^{-1}$ )

$K_S$ : σταθερά κορεσμού ( $g_{υποστρώματος} \cdot L^{-1}$ )

$S$ : υπόστρωμα ( $g_{υποστρώματος} \cdot L^{-1}$ )

Οι βασικές εξισώσεις που περιγράφουν την κατανάλωση υποστρώματος και την ανάπτυξη της βιομάζας στο μοντέλο είναι οι εξής:

$$r_X = \mu X = \frac{\mu_{max} S}{K_S + S} X$$
$$r_S = -\frac{\mu X}{Y_{X/S}} \times \frac{\mu_{max} S}{K_S + S} X$$

Όπου:

X: Η συγκέντρωση της βιομάζας στο εσωτερικό του αντιδραστήρα ( $\text{g.L}^{-1}$ )

Οι constant variables (σταθερές μεταβλητές) όπως εισήχθησαν στο μοντέλο -που επιλύθηκε με τη βοήθεια του υπολογιστικού εργαλείου Aquasim- ήταν η συγκέντρωση του sCOD, ο μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης  $\mu_{max}$ , η σταθερά κορεσμού  $K_S$ , η ογκομετρική παροχή του συστήματος  $Q_{in}$  (από την οποία καθορίζεται ο υδραυλικός χρόνος παραμονής), η περίοδος εναλλαγής του διαμερίσματος εισόδου της τροφοδοσίας του PABR  $T_p$ , η αρχική συγκέντρωση της βιομάζας  $X_{B_{ini}}$ , και η σταθερά παραγωγής βιομάζας  $Y_{X/S}$ .

Όπως προαναφέρθηκε, το απλοποιημένο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε διότι ο βαθμός πολυπλοκότητας κατά την περιγραφή του τρόπου λειτουργίας του PABR ήταν αυξημένος. Η λειτουργία του PABR περιγράφηκε ως εξής [47]:

Χρησιμοποιήθηκαν συνολικά οκτώ εικονικά διαμερίσματα (4 διαμερίσματα καθοδικής ροής και αντίστοιχα 4 διαμερίσματα ανοδικής ροής). Ο ωφέλιμος όγκος του αντιδραστήρα (77L) διαμοιράστηκε στα 4 διαμερίσματα ανόδου, καθώς η μεταβολική δραστηριότητα πραγματοποιείται σε αυτά, ενώ τα διαμερίσματα καθόδου θεωρήθηκαν αμελητέου όγκου (0,01L). Επίσης, στο μοντέλο περιλαμβάνονται 4 εικονικά διαμερίσματα που προσομοιώνουν την τροφοδοσία και 4 εικονικά διαμερίσματα που προσομοιώνουν τη σύνδεση της εξόδου του εκάστοτε διαμερίσματος με την τροφοδοσία του επόμενου. Τέλος, σχεδιάστηκε ένα διαμέρισμα συνολικής απορροής στο οποίο συγκεντρώνεται η συνολική εκροή του PABR, επίσης αμελητέου όγκου.

Με τον τρόπο αυτό προσομοιώθηκε η ροή στο εσωτερικό των διαμερισμάτων του PABR. Επισημαίνεται ότι το ρεύμα εξόδου του κάθε διαμερίσματος διαχωρίζεται (με τη χρήση διακλάδωσης – bifurcation) σε ένα ρεύμα που καταλήγει στη συνολική απορροή και σε ένα άλλο που συνεχίζει την πορεία του στο διαμέρισμα καθόδου του επόμενου διαμερίσματος. Εάν το εν προκειμένω διαμέρισμα είναι το διαμέρισμα εκροής, τότε μόνο το ρεύμα που καταλήγει στη συνολική απορροή είναι ενεργό. Σε καμία περίπτωση δεν είναι ενεργά και τα 2 ρεύματα ταυτόχρονα.

Η εναλλαγή των παραπάνω ρευμάτων, καθώς και η εναλλαγή των ρευμάτων τροφοδοσίας πραγματοποιείται με τη χρήση 4 μεταβλητών ( $a_1, a_2, a_3, a_4$ ). Οι μεταβλητές αυτές λαμβάνουν περιοδικά τις τιμές 0 ή 1 (0 όταν το διαμέρισμα στο οποίο αναφέρονται λειτουργεί ως ενδιάμεσο διαμέρισμα τότε λαμβάνουν την τιμή 0, ενώ όταν το διαμέρισμα είναι διαμέρισμα εκροής λαμβάνουν την τιμή 1). Η μεταβλητή  $a_1$  λαμβάνει δηλαδή την τιμή 1 κατά το πρώτο τέταρτο της περιόδου εναλλαγής και οι άλλες μεταβλητές μηδενίζονται κ.ο.κ..

Στις μεταβλητές του μοντέλου εισήχθη ένας στοιχειομετρικός συντελεστής  $Y_{meth}$  που εκφράζει το μεθανογόνο δυναμικό του υποστρώματος, η τιμή του οποίου ορίστηκε ίση με  $6,69011L_{μεθανίου}/L_{αντιδραστήρα}/g_{COD}$  [48]. Ομοίως ο στοιχειομετρικός συντελεστής  $Y_{X/S}$  ορίστηκε ίσος με 0,05 [49] και η αρχική συγκέντρωση του sCOD στα διαμερίσματα του αντιδραστήρα ήταν 1,46g/L.

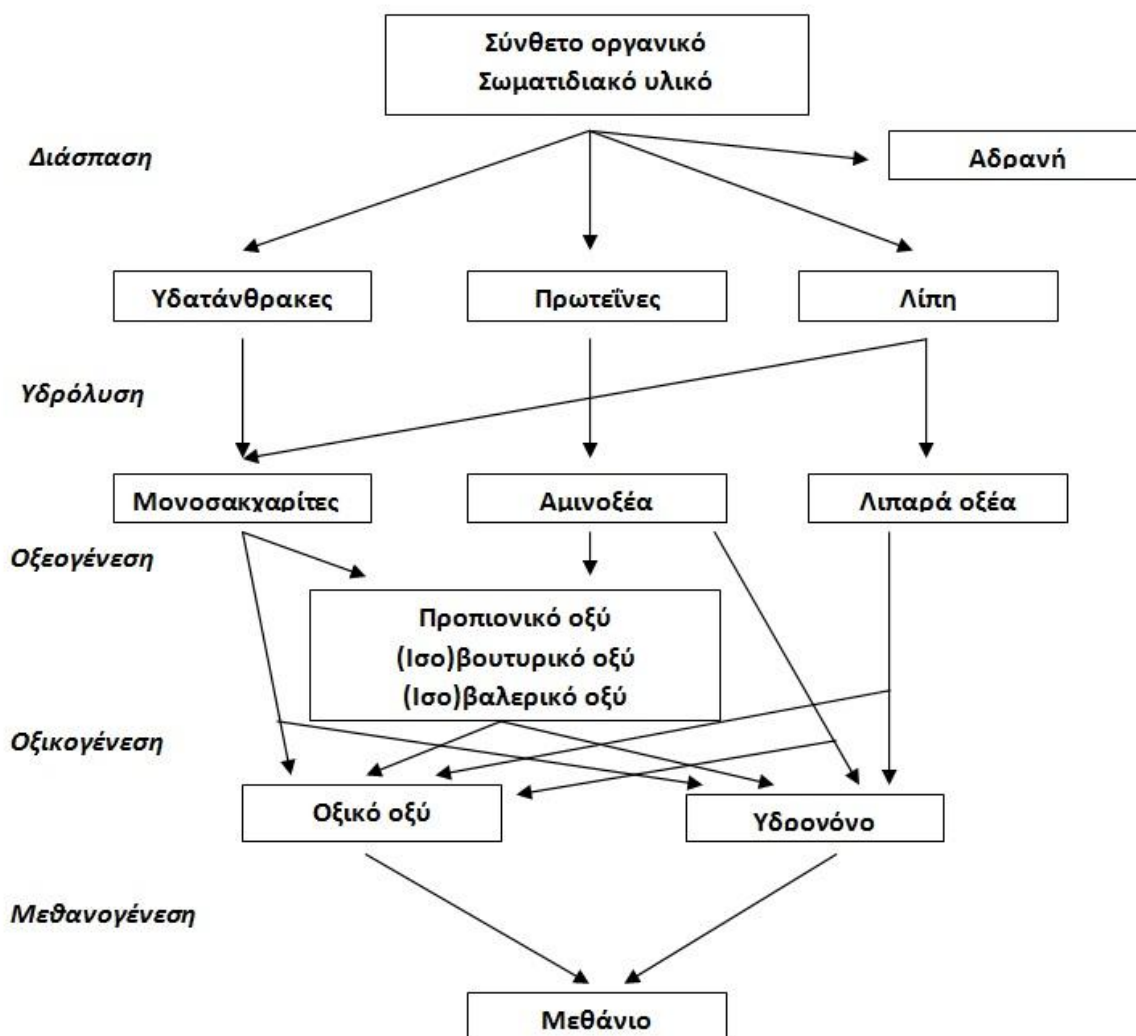
Η συμπεριφορά του PABR ως προς την κατακράτηση στερεών στο εσωτερικό του προσομοιώθηκε με την εισαγωγή μίας νέας μεταβλητής, του συντελεστή κατακράτησης βιομάζας  $R_b$ , που εκφράζει το ποσοστό της βιομάζας που κατακρατάται στο εσωτερικό του χωνευτήρα σε σχέση με την εκροή. Ο συντελεστής αυτός πρακτικά εκφράζει τη διαφορά του χρόνου παραμονής των στερεών (SRT) από τον υδραυλικό χρόνο παραμονής (HRT), που είναι ένα από τα πιο βασικά χαρακτηριστικά της λειτουργίας του PABR.

Ο συντελεστής κατακράτησης βιομάζας  $R_b$ , ο μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης  $\mu_{max}$ , η σταθερά κορεσμού  $K_s$  και η αρχική συγκέντρωση της βιομάζας  $X_{B_{INI}}$  στο εσωτερικό των διαμερισμάτων υπολογίστηκαν από το μοντέλο, μέσω της προσαρμογής του στα πειραματικά δεδομένα του πρώτου κύκλου λειτουργίας της αναερόβιας συγχώνευσης εκχυλίσματος από μίγμα κτηνοτροφικών αποβλήτων (Κεφάλαιο 6).

#### **2.1.6.2 Anaerobic Digestion Model 1 (ADM1)**

Το Anaerobic Digestion Model no.1 (ADM1) [46] περιγράφει τις 5 βιοχημικές φάσεις (συμπεριλαμβανομένων και των βιολογικών ενζύμων) που λαμβάνουν χώρα μέσα σε ένα αναερόβιο χωνευτήρα, δηλαδή τις 4 βασικές φάσεις (υδρόλυση, οξεογένεση, οξικογένεση, μεθανογένεση) καθώς και τη διάσπαση, ένα μη βιολογικό βήμα που προηγείται της υδρόλυσης. Η διεργασία συνοπτικά περιγράφεται ως εξής:

Κατά τη φάση της διάσπασης, το σύνθετο, οργανικό υπόστρωμα μετατρέπεται σε αδρανή, υδατάνθρακες, πρωτεΐνες και λίπη. Κατά την υδρόλυση, τα μόρια των υδατανθράκων, των λιπιδίων και των πρωτεϊνών μετατρέπονται σε λιπαρά οξέα μακράς αλυσίδας (LCFAs), αμινοξέα και σάκχαρα. Ακολούθως, κατά την οξεογένεση, παράγονται πτητικά λιπαρά οξέα (VFAs) δηλαδή προπιονικό, βουτυρικό και μικρές ποσότητες οξικού οξέος. Κατά την οξικογένεση, τα VFAs μετατρέπονται σε οξικό οξύ. Τέλος, το οξικό οξύ μετατρέπεται σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα, κατά τη φάση της μεθανογένεσης (Σχήμα 2.1.9).



**Σχήμα 2.1.9** Οι φάσεις και τα προϊόντα της Αναερόβιας Χώνευσης, όπως περιγράφονται από το ADM1

Από τα συνολικά 26 στοιχεία που λαμβάνονται υπόψη στο μοντέλο, μία σημαντική ομάδα αποτελεί η βιομάζα. Στο ADM1 υπάρχουν 7 διαφορετικοί τύποι βακτηριακών ομάδων που καταναλώνουν 8 διαφορετικά στοιχεία (LCFAs, αμινοξέα, σάκχαρα, βαλερικό, βουτυρικό, προπιονικό και οξικό οξύ, καθώς και υδρογόνο) [44]. Στις ενδοκυτταρικές βιοχημικές αντιδράσεις που περιγράφουν την κατανάλωση των υποστρωμάτων χρησιμοποιείται κινητική Monod, ενώ ο θάνατος της βιομάζας αναπαρίσταται με κινητική πρώτης τάξης. Επιπλέον, οι μικροβιακές διεργασίες καθορίζονται από την κατανάλωση των υποστρωμάτων και όχι από τη μικροβιακή ανάπτυξη. Επίσης, το μοντέλο περιλαμβάνει και διάφορες παρεμποδιστικές λειτουργίες που περιλαμβάνουν το pH (επηρεάζει όλες τις ομάδες μικροοργανισμών), το υδρογόνο (οξικογόνες ομάδες) και την ελεύθερη αμμωνία (ακετοκλαστικοί μεθανογόνοι μικροοργανισμοί) [50].

Εκτός από τις βιοχημικές μετατροπές, στο ADM1 λαμβάνονται υπόψη και 2 από τις 3 βασικές φυσικοχημικές μετατροπές που συνήθως περιλαμβάνονται στα μαθηματικά μοντέλα της αναερόβιας

χώνευσης, δηλαδή τις αντιδράσεις ισορροπίας οξέος-βάσεως και τις ισορροπίες υγρής-αέριας φάσης. Οι μεταβλητές που περιλαμβάνονται στο μοντέλο παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα Ι.

Σημειώνεται ότι οι μεταβλητές δυναμικής περιγράφουν τη συμπεριφορά των διαλυτών (αναπαρίστανται με  $S$ ) και των σωματιδιακών (αναπαρίστανται με  $X$ ) συστατικών του συστήματος. Επίσης, το μοντέλο διατηρεί το ισοζύγιο φορτίου ανάμεσα στα ιοντικά είδη, συμπεριλαμβανομένων των ανόργανων κατιόντων και ανιόντων και των κατιόντων υδρογόνου [46], [50].

Για την προσομοίωση της κατακράτησης βιομάζας από τον PABR, ορίστηκε η παράμετρος  $tres_x$ , η οποία εκφράζει τον επιπλέον χρόνο παραμονής των στερεών (SRT) και του υδραυλικού χρόνου παραμονής (HRT). Παρά το γεγονός ότι ο PABR προσομοιώνεται στο μοντέλο ως αντιδραστήρας CSTR, η κατακράτηση της βιομάζας λόγω του ιδιαίτερου τρόπου λειτουργίας του PABR δε θα μπορούσε να παραληφθεί, καθώς αποτελεί ένα από τα βασικότερα χαρακτηριστικά του.

### 2.1.6.3 Το λογισμικό Aquasim

Το λογισμικό Aquasim αναπτύχθηκε από τον δρ. Peter Reichert και τους συνεργάτες του στο Ελβετικό Ινστιτούτο «Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology» (EAWAG) και είναι κατάλληλο για την προσομοίωση υδατικών συστημάτων. Είναι σχεδιασμένο για την επίλυση διαφορικών και αλγεβρικών εξισώσεων βάσει του αλγορίθμου DASSL [50], [51]. Ο προσδιορισμός της βέλτιστης τιμής των παραμέτρων πραγματοποιείται με το μαθηματικό κριτήριο της ελαχιστοποίησης του αθροίσματος των τετραγώνων των σταθμισμένων αποκλίσεων με βάση την τιμή της τυπικής απόκλισης:

$$x^2(p) = \sum_{i=1}^n \left( \frac{y_{meas,i} - y_i(p)}{\sigma_{meas,i}} \right)^2$$

Όπου:

$y_{meas,i}$ : Η τιμή της πειραματικής μέτρησης

$\sigma_{meas,i}$ : Η τυπική της απόκλιση

$y_i(p)$ : Η υπολογιζόμενη τιμή του μοντέλου, που αντιστοιχεί στη μέτρηση και υπολογίζεται στο χρόνο και στη θέση της αντίστοιχης μέτρησης

$p$ : Οι παράμετροι του μοντέλου

$n$ : Ο αριθμός των πειραματικών δεδομένων

Η τυπική απόκλιση των μετρήσεων επιλέγεται να είναι ίδια για όλες τις διαθέσιμες μετρήσεις, καθώς κάθε μία εξ αυτών θεωρείται εξίσου αξιόπιστη. Επίσης η τυπική απόκλιση της κάθε κατάστασης του μοντέλου γ δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial y}{\partial p_i}\right)^2 \sigma_{p_i}^2}$$

Όπου:

$p_i$ : Οι παράμετροι από τις οποίες εξαρτάται κάθε κατάσταση του μοντέλου

$\sigma_{p_i}$ : Η τυπική απόκλιση κάθε παραμέτρου

Το  $\sigma_{p_i}$  ορίζεται κατά την έναρξη της διαδικασίας του προσδιορισμού. Το Aquasim ελαχιστοποιεί το άθροισμα των τετραγώνων της παραπάνω εξίσωσης υπό τον περιορισμό  $p_{\min,i} \leq p_i \leq p_{\max,i}$ , όπου  $p_{\min,i}$  και  $p_{\max,i}$ : η ελάχιστη και η μέγιστη αντίστοιχα τιμή των παραμέτρων του μοντέλου  $p_i$  και πρέπει να καθοριστούν πριν από την έναρξη της διαδικασίας προσδιορισμού τους [50].

Η ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγώνων των σταθμισμένων αποκλίσεων γίνεται επιλέγοντας μεταξύ δύο διαθέσιμων αλγορίθμων, τον αλγόριθμο simplex και τον αλγόριθμο της χορδής (secant). Η μέθοδος simplex έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να εφαρμοστεί ακόμα και στην περίπτωση όπου οι αρχικές τιμές των παραμέτρων είναι πολύ μακριά από αυτές που οδηγούν στην ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγώνων, δηλαδή όταν οι αρχικές τιμές απέχουν πολύ από τις λύσεις. Αντίθετα, η μέθοδος secant αντιμετωπίζει πρόβλημα με τις μη ακριβείς τιμές αλλά οδηγεί πιο γρήγορα και εγγύτερα σε ένα καλά καθορισμένο ελάχιστο, δηλαδή σε μία βέλτιστη λύση.

## 2.2 Κομποστοποίηση

### 2.2.1 Εισαγωγή

Κομποστοποίηση (composting<sup>1</sup>) είναι η βιολογική αποικοδόμηση και σταθεροποίηση οργανικών υποστρωμάτων, κάτω από συνθήκες που επιτρέπουν την ανάπτυξη θερμοφιλικών θερμοκρασιών ως αποτέλεσμα της βιολογικά παραγόμενης θερμότητας, προς παραγωγή κομπόστ (compost), ενός τελικού προϊόντος σταθερού και απαλλαγμένου από παθογόνους μικροοργανισμούς και σπόρους φυτών, κατάλληλου για χρήση ως εδαφοβελτιωτικού [52].

Παρότι υπάρχουν δύο μέθοδοι κομποστοποίησης, η αερόβια και η αναερόβια, ο όρος κομποστοποίηση ταυτίζεται παγκοσμίως με την αερόβια κομποστοποίηση γιατί έχει επικρατήσει έναντι της αναερόβιας που έχει τα εξής κύρια μειονεκτήματα:

1. Κατά την αναερόβια κομποστοποίηση κύρια προϊόντα είναι το μεθάνιο ( $CH_4$ ), το διοξείδιο του άνθρακα ( $CO_2$ ) και πολλαπλές ενδιάμεσες ενώσεις χαμηλού μοριακού βάρους όπως αλκοόλες και οργανικά οξέα.
2. Κατά την αναερόβια κομποστοποίηση παράγεται σημαντικά χαμηλότερη ποσότητα ενέργειας ανά μονάδα μάζας υποστρώματος.
3. Κατά την αναερόβια κομποστοποίηση, η πιθανότητα έκλυσης δυσάρεστων οσμών αυξάνεται.

<sup>1</sup> Από τη λατινική λέξη compositum που σημαίνει επισυνάπτω, συνθέτω, συσσωρεύω

Για τους λόγους αυτούς σχεδόν όλα τα συστήματα κομποστοποίησης είναι αερόβια [52].

Από την οπτική γωνία της χημικής μηχανικής, η (αερόβια) κομποστοποίηση είναι η διεργασία της διάσπασης της οργανικής ύλης υπό αερόβιες συνθήκες [53]. Μία τυπική διεργασία κομποστοποίησης περιλαμβάνει μια σειρά σταδίων που περιλαμβάνουν ταχεία αύξηση της θερμοκρασίας (άνω των 45°C), διατήρηση της θερμοκρασίας στη θερμόφιλη περιοχή για κάποιες ημέρες και στη συνέχεια σταδιακή επαναφορά της θερμοκρασίας του υποστρώματος σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος [54]. Κατά τη διάρκεια της διεργασίας, βακτήρια, μύκητες και άλλοι μικροοργανισμοί μετατρέπουν την οργανική ύλη σε ένα χρήσιμο προϊόν που ονομάζεται κομπόστ (compost). Οι βιοαποικοδομήσιμες οργανικές ενώσεις που περιέχονται στο υπόστρωμα διασπώνται ενώ ένα τμήμα της υπολειπόμενης οργανικής ύλης μετατρέπεται σε χουμικές ενώσεις [53]. Τα κύρια προϊόντα του βιολογικού μεταβολισμού κατά την αερόβια κομποστοποίηση (που είναι το αντικείμενο της παρούσας διατριβής) είναι το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ), το νερό ( $\text{H}_2\text{O}$ ) και η θερμότητα [52].



**Εικόνα 2.2.1** Η διεργασία της αερόβιας κομποστοποίησης [8]

Πρώτες ύλες για την παραγωγή κομπόστ (compost) είναι κυρίως γεωργικά απόβλητα, απόβλητα του βιομηχανικού τομέα γεωργικών ειδών, καθώς και οργανικά υπολείμματα ζυμώσιμων αποβλήτων [55], [56]. Η κομποστοποίηση είναι μια μορφή σταθεροποίησης των αποβλήτων, μια διαδικασία όμως που απαιτεί ελεγχόμενες συνθήκες αερισμού και υγρασίας για την επίτευξη θερμοφιλικών θερμοκρασιών.

Τα κύρια πλεονεκτήματα της κομποστοποίησης και της διάθεσης του κομπόστ στο έδαφος, όπως περιγράφονται από την Αμερικανική Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος [57] είναι τα εξής:

- Ο εμπλουτισμός του εδάφους
- Η βελτίωση της δυνατότητας συγκράτησης της υγρασίας από το έδαφος
- Η καταστολή των ασθενειών των φυτών και η αντιμετώπιση των παρασίτων
- Η μείωση της ανάγκης σε χημικά λιπάσματα
- Η παραγωγή ευεργετικών βακτηρίων και μυκήτων που διασπούν την οργανική ύλη προς παραγωγή χουμικών ενώσεων πλούσιων σε θρεπτικά συστατικά
- Η μείωση της παραγωγής μεθανίου από τα ΧΥΤΑ με αποτέλεσμα τη βελτίωση του αποτυπώματος άνθρακα.



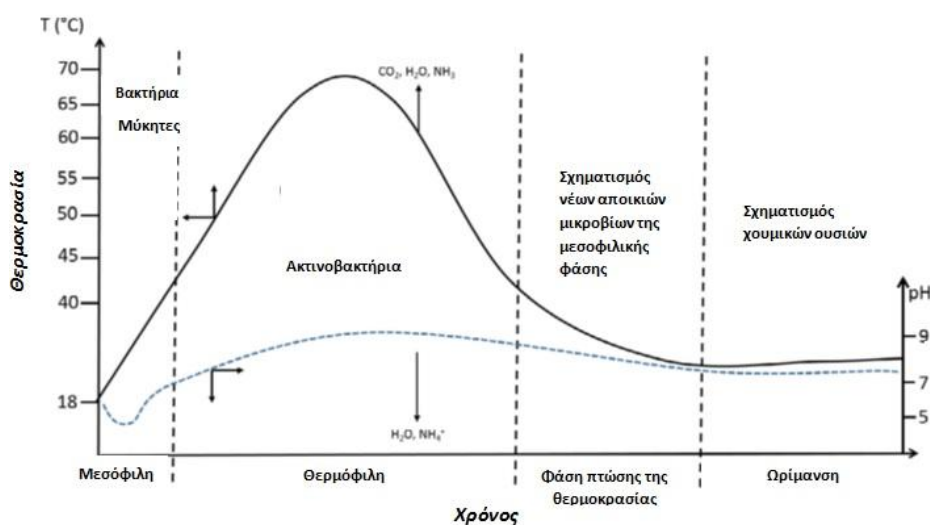
## 2.2.2 Η διαδικασία της κομποστοποίησης

Είναι γενικώς αποδεκτό ότι η κομποστοποίηση είναι μια διαδικασία τεσσάρων διακριτών φάσεων, με βάση το θερμοκρασιακό εύρος του υποστρώματος σε κάθε φάση [58].

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2.1 [55] οι τέσσερις φάσεις της κομποστοποίησης (η μεσόφιλη, η θερμοφιλή, η φάση πτώσης της θερμοκρασίας και η φάση ωρίμανσης) δεν χαρακτηρίζονται μόνο από διαφορετικά θερμοκρασιακά εύρη αλλά και από την ανάπτυξη διαφορετικών μικροοργανισμών.

Οι μικροοργανισμοί που απαιτούνται για την κομποστοποίηση βρίσκονται παντού στο φυσικό περιβάλλον και είναι στην πλειοψηφία τους αερόβιοι [8]. Τόσο ο σχεδιασμός όσο και η σωστή λειτουργία ενός συστήματος κομποστοποίησης συνδέονται άρρηκτα με την κατάλληλη εναλλαγή των μικτών μικροβιακών πληθυσμών που αναπτύσσονται κατά τις διαφορετικές φάσεις της κομποστοποίησης [8].

Το επίπεδο κατανόησής μας σε σχέση με τη μικροβιολογία της κάθε φάσης στηρίζεται μέχρι σήμερα κυρίως σε μελέτες που έχουν γίνει με χρήση παραδοσιακών μεθόδων όπως πχ. η απομόνωση και ο προσδιορισμός των βακτηρίων, συμπεριλαμβανομένων ακτινοβακτηρίων και μυκήτων σύμφωνα με τον Miller (1996) όπως αναφέρεται από τον Ryckeboer [59], [60].



**Σχήμα 2.2.1** Οι φάσεις της κομποστοποίησης και οι κυριότερες ομάδες μικροοργανισμών σε κάθε φάση [55]

Κατά τη μεσόφιλη φάση αρχίζει η αποσύνθεση του οργανικού φορτίου στην οποία τη μεγαλύτερη επίδραση έχουν τα βακτήρια και οι μύκητες που αναπτύσσονται κατά τη φάση αυτή με σκοπό την υδρόλυση των εύκολα αφομοιώσιμων θρεπτικών συστατικών. Συγκεκριμένα, τα μεσόφιλα βακτήρια αναλαμβάνουν την υδρόλυση των σακχάρων, των αμινοξέων και των λιπιδίων [55], [61], [62]. Ενδεικτικά, στις θερμοκρασίες της μεσοφιλικής φάσης μεταξύ 15 °C και 35 °C αναπτύσσονται κυρίως τα μεσόφιλα βακτήρια των οικογενειών Pseudomonaceae, Erythrobacteraceae, Comamonadaceae, Enterobacteriaceae, Streptomycetaceae, και Caulobacteraceae.

Η μεταβολική δραστηριότητα των μικροοργανισμών της μεσόφιλης φάσης συμβάλλει στη ραγδαία αύξηση της θερμοκρασίας και οδηγεί στη μετάβαση στη θερμόφιλη φάση και την σταδιακή αντικατάσταση των μεσόφιλων μικροοργανισμών από τους θερμόφιλους, αφού οι πρώτοι είναι λιγότερο ανταγωνιστικοί στις υψηλές θερμοκρασίες [55], [58]. Ενώ κατά την πρώτη φάση λαμβάνει χώρα η αποδόμηση απλών συστατικών όπως σάκχαρα, πρωτεΐνες και λίπη, κατά τη θερμόφιλη φάση η ανάπτυξη των ακτινοβακτηρίων (ή ακτινομυκήτων) καθιστά εφικτή την αποδόμηση των πιο σύνθετων οργανικών συστατικών όπως η κυτταρίνη, ημικυτταρίνη και λιγνίνη. Πέραν της αποσύνθεσης σύνθετων κυττάρων λόγω των ειδικών ενζύμων τους, τα ακτινοβακτήρια – και η υψηλή θερμοκρασία- συμβάλλουν επιπλέον παράλληλα και στην εξουδετέρωση των παθογόνων μικροοργανισμών που υπάρχουν στα αρχικά υποστρώματα, μέσω της αντιβιοτικής δράσης τους [58], [61], [63], [64]. Οι ακτινομύκητες που αναπτύσσονται κατά τη θερμόφιλη φάση της κομποστοποίησης ανήκουν κυρίως στα γένη *Thermoactinomycetacea*, *Thermomonosporaceae*, and *Pseudonocardiaceae* [55], [58], [61]

Η μεγάλης διάρκειας δεύτερη φάση της κομποστοποίησης (θερμόφιλη φάση ) ακολουθείται από τη φάση πτώσης της θερμοκρασίας που αναφέρεται και ως 2η μεσόφιλη φάση, κατά την οποία δημιουργούνται εκ νέου αποικίες μεσόφιλων μικροοργανισμών [54]. Η σταδιακή εξάντληση των υποστρωμάτων κατά την έντονη μεταβολική δραστηριότητα της θερμόφιλης φάσης οδηγεί στη μείωση της δραστηριότητας των θερμόφιλων οργανισμών και στην επανεμφάνιση των μεσόφιλων μικροοργανισμών. Οι αποικίες των μεσόφιλων οργανισμών αυτής της φάσης προέρχονται είτε από επιβιώσαντα σπόρια είτε από περιοχές του κομπόστ που παρέμειναν προστατευμένες από τις υψηλές θερμοκρασίες της θερμόφιλης φάσης είτε, τέλος, από εξωτερικό εμβολιασμό [54].

Η εξέλιξη της μικροβιολογίας που χαρακτηρίζει τη διαδικασία της κομποστοποίησης ολοκληρώνεται στην τέταρτη και τελική φάση της ωρίμανσης του κομπόστ . Κατά τη διάρκεια της φάσης ωρίμανσης σύμφωνα με τον Insam, η ποιότητα του υποστρώματος υποβαθμίζεται και η σύνθεση του μικροβιακού πληθυσμού μεταβάλλεται στο σύνολό της [58]. Συνήθως, η αναλογία των μυκήτων αυξάνεται ενώ των βακτηρίων μειώνεται και παράλληλα σχηματίζονται και επικρατούν τελικά τα συστατικά που δεν είναι πλέον βιοαποικοδομήσιμα (όπως τα μόρια λιγνίνης-χούμους). Η παρουσία σημαντικού αριθμού βακτηρίων του γένους *Arthrobacter* αποτελεί μικροβιολογική παράμετρο αξιολόγησης της ωριμότητας του κομπόστ [65]. Η διάρκεια της φάσης ωρίμανσης είναι συνήθως μεγάλη και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη φύση του υποστρώματος [66]. Σε συστήματα κλειστού τύπου όπου η διεργασία πραγματοποιείται μέσα σε αντιδραστήρες, κατά τη φάση της ωρίμανσης το υπόστρωμα μεταφέρεται συνήθως έξω από τον αντιδραστήρα και η παρακολούθηση των φυσικοχημικών παραμέτρων πραγματοποιείται με μικρότερη συχνότητα σε σχέση με τις προηγούμενες φάσεις. Κατά τη φάση αυτή, είναι απαραίτητη η διασφάλιση κατάλληλων συνθηκών υγρασίας και αερισμού ώστε να λαμβάνει χώρα η αργή μεταβολική δραστηριότητα που χαρακτηρίζει αυτή τη φάση [67].

### **2.2.3 Επίδραση φυσικών και χημικών παραμέτρων στη διαδικασία της κομποστοποίησης**

Η διάρκεια των φάσεων της κομποστοποίησης που περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα εξαρτάται από τη φύση του οργανικού υλικού που κομποστοποιείται και από την απόδοση της διεργασίας η οποία καθορίζεται από πολλές διαφορετικές φυσικοχημικές παραμέτρους [60].

Συνοπτικά, οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διαδικασία της κομποστοποίησης, σύμφωνα με τους είναι η συγκέντρωση θρεπτικών και η αναλογία C/N στα υποστρώματα και οι περιβαλλοντικές παράμετροι (θερμοκρασία, pH, αερισμός, υγρασία) [68].

### **2.2.3.1 Υποστρώματα (συγκέντρωση θρεπτικών συστατικών και αναλογία C/N)**

Η διαθεσιμότητα θρεπτικών συστατικών σε κατάλληλη συγκέντρωση και αναλογία είναι απαραίτητη στο μίγμα που πρόκειται να κομποστοποιηθεί. Ωστόσο, σύμφωνα με τους L.F. Diaz και G.M. Savage, σημαντική είναι όχι μόνο η παρουσία ικανοποιητικών ποσοτήτων θρεπτικών συστατικών αλλά και η διαθεσιμότητά τους σε τέτοια μορφή που να μπορεί να αφομοιωθεί από το μικροβιακό πληθυσμό. Η ικανότητα αφομοίωσης των θρεπτικών συστατικών εξαρτάται από τα ένζυμα του κάθε μικροοργανισμού [68]. Η διαδικασία της κομποστοποίησης είναι το αποτέλεσμα της δυναμικής διαδοχής διαφορετικών ομάδων μικροοργανισμών, όπου η μια ομάδα ετοιμάζει τα θρεπτικά συστατικά που είναι κατάλληλα να αφομοιωθούν από την επόμενη ομάδα. Στα θρεπτικά συστατικά που είναι απαραίτητα για την διαδικασία της κομποστοποίησης ανήκουν ο άνθρακας (C), το άζωτο (N), ο φώσφορος (P) και το Κάλιο (K) ενώ απαραίτητα είναι και ιχνοστοιχεία όπως το κοβάλτιο (Co), το μαγγάνιο (Mn), το μαγνήσιο (Mg), ο χαλκός (Cu), και άλλα. Το ασβέστιο (Ca) δεν είναι ανήκει ούτε στα θρεπτικά συστατικά αμιγώς ούτε και στα ιχνοστοιχεία. Λειτουργεί ως ενδιάμεσο ρυθμιστικό συστατικό απέναντι σε διάφορες αλλαγές όπως πχ η αλλαγή στα επίπεδα του pH [68].

Η αναλογία οργανικού άνθρακα σε σχέση με το συνολικό άζωτο είναι μια από τις πιο σημαντικές παραμέτρους της συνολικής ισορροπίας των θρεπτικών συστατικών ενώ για τα υπόλοιπα θρεπτικά συστατικά η εμπειρία έχει καταδείξει ότι συνήθως υπάρχουν διαθέσιμα σε οποιοδήποτε τυπικό οργανικό απόβλητο σε επαρκείς ποσότητες και αναλογίες. Η αναλογία C/N είναι ένας λόγος (αδιάστατο μέγεθος) που επηρεάζει σημαντικά την ταχύτητα της βιοαποικοδόμησης και η ιδανική αναλογία C/N στο αρχικό μίγμα είναι περίπου 25–30 [68]. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της κομποστοποίησης, ο λόγος αυτός μειώνεται σημαντικά καθώς μέρος του οργανικού άνθρακα δεσμεύεται στο CO<sub>2</sub> που εκλύεται κατά τη μικροβιακή εξάτμιση, ενώ το άζωτο ανακυκλώνεται [60], [65].

Τόσο ο άνθρακας όσο και το άζωτο αποτελούν πηγές ενέργειας για τη διατήρηση και την ανάπτυξη των μικροβίων. Αν κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της κομποστοποίησης περιοριστεί η πηγή αζώτου, τότε ο ρυθμός αποσύνθεσης θα επιβραδυνθεί. Αν η παροχή αζώτου είναι σε περίσσεια, τότε μπορεί να διαφύγει στην ατμόσφαιρα υπό μορφή αμμωνίας ή να εκπλυθεί στο έδαφος ως νιτρικό αμμώνιο [65].

### **2.2.3.2 Περιβαλλοντικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη διαδικασία της κομποστοποίησης**

#### **Θερμοκρασία**

Όπως έχει αναφερθεί εκτενώς στην προηγούμενη ενότητα, η θερμοκρασία είναι ένας από τους πιο σημαντικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες που επηρεάζουν τη διαδικασία της κομποστοποίησης και συμβάλλει καθοριστικά στην ανάπτυξη της κατάλληλης μικροβιολογίας που είναι απαραίτητη για την παραγωγή του κομπόστ.

Το θερμοκρασιακό εύρος κάθε φάσης ποικίλει στη βιβλιογραφία ως εξής:

1. Η μεσόφιλη φάση χαρακτηρίζεται από ραγδαία αύξηση της θερμοκρασίας και κυμαίνεται μεταξύ 10- 42°C κατά τους Bonito et al, 25–40°C κατά τον Insam και 15-35°C κατά τον Sánchez [55], [62], [69]
2. Η θερμόφιλη φάση, κατά την οποία αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες εκτεταμένης διάρκειας κυμαίνεται μεταξύ 45°C –70°C κατά τους Bonito et al, 35–65°C κατά τον Insam [58]
3. Η φάση πτώσης της θερμοκρασίας ή μέση μεσόφιλη φάση είναι η φάση κατά την οποία η θερμοκρασία του μίγματος προσεγγίζει σταδιακά τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος
4. Η φάση ωρίμανσης είναι η φάση κατά την οποία το υπόστρωμα σταθεροποιείται σε τιμές κοντά στη θερμοκρασία περιβάλλοντος και ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του υποστρώματος μπορεί να διαρκέσει για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Το θερμοκρασιακό προφίλ της διεργασίας της κομποστοποίησης είναι μια από τις πιο καθοριστικές παραμέτρους για την απομάκρυνση των παθογόνων μικροοργανισμών όσο και για την ποιότητα του παραγόμενου κομπόστ. Για το λόγο αυτό , η βελτιστοποίηση του θερμοκρασιακού προφίλ της κομποστοποίησης δύο διαφορετικών ειδών αποβλήτων (οικιακά, κτηνοτροφικά) αποτέλεσε το κυρίαρχο ζητούμενο μιας σειράς πειραμάτων.

### **pH**

Σύμφωνα με τους de Bertoldi et al (1983), είναι δυνατό να κομποστοποιηθεί οργανική ύλη με μεγάλο εύρος pH (από 3 μέχρι 11), ωστόσο το βέλτιστο εύρος που ενδείκνυται για κομποστοποίηση είναι μεταξύ 5.5 και 8.0. Ενώ το σχετικά ουδέτερο pH είναι προτιμητέο για την ανάπτυξη των βακτηρίων, οι μύκητες ωστόσο αναπτύσσονται καλύτερα σε σχετικά όξινο pH [68], [70].

Κατά την έναρξη της διεργασίας το pH μπορεί να μειωθεί λόγω της δράσης των βακτηρίων της μεσόφιλης φάσης που διασπούν τους διαλύτες και τις εύκολα αποδομήσιμες ουσίες ενώ όταν η φάση της οξίνισης ολοκληρωθεί το pH τείνει να αυξηθεί μέχρι την περιοχή 8-8.5.

Ενώ στην περίπτωση της αναερόβιας χώνευσης τα επίπεδα pH που είναι κρίσιμα έχουν μικρό εύρος (6.5–7.5), το εύρος της επιτρεπόμενης διακύμανσης του pH στην περίπτωση της κομποστοποίησης είναι πολύ ευρύ και επομένως σπάνια έχουν προκύψει δυσκολίες εξαιτίας πολύ υψηλών ή αντίθετα πολύ χαμηλών επιπέδων pH [68]. Άλλωστε, όπως έχει καταγραφεί και από τους Khan et al (2009), παρότι το pH είναι σημαντική παράμετρος για την εξέλιξη των βιολογικών συστημάτων φαίνεται να μην επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τα συστήματα κομποστοποίησης [8], [71].

### **Αερισμός**

Η παροχή κατάλληλης ποσότητας οξυγόνου είναι πολύ σημαντική κατά τη διαδικασία της κομποστοποίησης που δεν είναι παρά μια διαδικασία βιολογικής οξειδωσης. Επιπλέον όμως της αναγκαιότητας του οξυγόνου για την αποσύνθεση των οργανικών ενώσεων από τους αερόβιους μικροοργανισμούς, ο κατάλληλος αερισμός είναι πολύ σημαντικός και για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας του κομπόστ ενώ επιδρά επίσης και στην υγρασία.

Η απουσία κατάλληλου αερισμού είναι ικανή να οδηγήσει σε συνολική αποτυχία του συστήματος και για αυτό το λόγο υπάρχουν διαθέσιμες τεχνολογίες που εξασφαλίζουν την κατάλληλη παροχή οξυγόνου στη μάζα του κομποστ και έχουν σχεδιαστεί για το σκοπό αυτό ειδικά συστήματα.

### **Υγρασία**

Το ποσοστό υγρασίας μέσα στο υλικό που κομποστοποιείται είναι από τις σημαντικότερες και πιο ευαίσθητες παραμέτρους της διεργασίας. Οι μικροοργανισμοί δρουν πάνω σε λεπτές υγρές στιβάδες που βρίσκονται στο περίβλημα της επιφάνειας των σωματιδίων. Από την άλλη, αν το ποσοστό υγρασίας είναι πολύ ψηλό είναι πιθανό να επηρεαστεί η επάρκεια του αερισμού του μίγματος. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό το ποσοστό υγρασίας να είναι τέτοιο ώστε να ικανοποιεί και τις δύο ανάγκες του συστήματος. Τέτοιο θεωρείται ένα ποσοστό μεταξύ 45-60% [52], [72], [73].

Στην περίπτωση που το ποσοστό υγρασία είναι υψηλότερο από 60% επηρεάζεται η δομή του υλικού, καθώς οι πόροι μεταξύ των σωματιδίων πληρώνονται με νερό, και άρα εμποδίζεται ο αερισμός του υλικού. Αποτέλεσμα αυτού είναι η δημιουργία αναερόβιων συνθηκών που οδηγεί σε μείωση του ρυθμού αποδόμησης της οργανικής ύλης και έκλυση δυσάρεστων οσμών. Από την άλλη, αν το ποσοστό υγρασία είναι χαμηλότερα του 45%, το υλικό ξηραίνεται και έτσι μπλοκάρεται η μικροβιακή δράση, οδηγώντας σε τελικό προϊόν χαμηλής ποιότητας.

Βασικός παράγοντας που επηρεάζει το ποσοστό υγρασίας της διεργασίας είναι η ίδια η θερμότητα που εκλύεται από την μικροβιακή δραστηριότητα που λαμβάνει χώρα. Η θερμότητα αυτή οδηγεί στην εξάτμιση ποσοτήτων νερού και άρα τη μείωση της περιεχόμενης υγρασίας. Έτσι, από αρχικό ποσοστό 40-60%, μπορεί η υγρασία στο τέλος της διεργασίας να πέσει στο 35-40%.

#### **2.2.4 Συστήματα κομποστοποίησης**

Η μεγάλη πλειοψηφία των συστημάτων κομποστοποίησης μπορεί να ενταχθεί σε δύο ευρείες κατηγορίες [52]:

1. Ανοιχτού τύπου - Συστήματα σειραδίων
2. Κλειστού τύπου (σε δοχείο, "in-vessel")

Η βασική διαφορά μεταξύ των δύο τύπων είναι ότι στην περίπτωση των σειραδίων το υπόστρωμα τοποθετείται σε μεγάλους σωρούς (συνήθως ύψους μεταξύ 1,5 και 2,5 μέτρων), ενώ στην περίπτωση του κλειστού τύπου η διεργασία πραγματοποιείται μέσα σε κλειστό αντιδραστήρα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι και στις δύο κατηγορίες αντιδραστήρων, εξαιρετικής σημασίας παράμετρος λειτουργίας είναι ο αερισμός, καθώς αποτελεί ίσως την σημαντικότερη παράμετρο όσον αφορά την ίδια τη διεργασία της κομποστοποίησης. Επίσης, κατά το σχεδιασμό και τη συντήρηση ενός συστήματος βιοσταθεροποίησης οργανικών αποβλήτων λαμβάνονται υπόψη οι παρακάτω σημαντικοί παράγοντες [8]:

- Όσο το δυνατόν ελαχιστοποίηση του βάρους και του όγκου των αρχικών υλικών
- Έλεγχος παραμέτρων λειτουργίας (θερμοκρασία, υγρασία κλπ)

- Εξουδετέρωση παθογόνων μικροοργανισμών
- Ελαχιστοποίηση οχλήσεων (εκπομπές αερίων, οσμές, αιωρούμενα σωματίδια)

#### **2.2.4.1 Ανοιχτά συστήματα κομποστοποίησης**

Σύμφωνα με την Εταιρεία Προστασίας του Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής τα ανοιχτά συστήματα κομποστοποίησης μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο μεθόδους [74].

##### **Σύστημα Κομποστοποίησης Περιστρεφόμενων Σειραδίων**

Η USEPA σημειώνει ότι η συγκεκριμένη μέθοδος προτιμάται σε περιπτώσεις όπου μεγάλες ποσότητες οργανικών αποβλήτων (όπως κλαδέματα, υγρά και ζωικά παραπροϊόντα) χρήζουν διαχείρισης (π.χ μεγάλες κοινότητες ή εργοστάσια επεξεργασίας τροφίμων). Μέσω της κομποστοποίησης περιστρεφόμενων σειραδίων είναι δυνατόν να παραχθούν μεγάλες ποσότητες εδαφοβελτιωτικού υλικού (κομπόστ).

Η διαδικασία κομποστοποίησης μέσω αυτής της τεχνολογίας περιλαμβάνει τη δημιουργία μεγάλων σωρών, οι οποίες ονομάζονται σειράδια, και τον περιοδικό αερισμό τους μέσω είτε χειροκίνητης είτε μηχανικής περιστροφής των σωρών. Όπως αναφέρθηκε, το ύψος των σειραδίων πρέπει να είναι μεταξύ 1.5 και 2.5 μέτρων, ώστε να μπορούν να εκλύουν ικανοποιητική ποσότητα θερμότητας και άρα να διατηρούν τη θερμοκρασία στα απαραίτητα για τη διεργασία επίπεδα, ενώ ταυτόχρονα να μην είναι τόσο μεγάλα ώστε να εμποδίζουν τον ικανοποιητικό αερισμό του υλικού [8].



**Εικόνα 2.2.2** Σύστημα μηχανικής ανάδευσης σειραδίων [75]

Η επιτυχής κομποστοποίηση μέσω της συγκεκριμένης μεθόδου απαιτεί την υπέρβαση μίας σειράς προκλήσεων [74]:

- Αναγκαία είναι η διάθεση συχνά μεγάλης έκτασης για την τοποθέτηση των σειραδίων
- Κατά τη διάρκεια βροχερών περιόδων, το σχήμα των σειραδίων πρέπει να τροποποιείται κατάλληλα ώστε να διοχετεύει το νερό εκτός του υλικού και όχι στο εσωτερικό των σειραδίων
- Ως μεγάλης κλίμακας διεργασία η συγκεκριμένη μέθοδος υπόκειται σε μία σειρά νομικών κανονισμών λειτουργίας, ενώ και το παραγόμενο εδαφοβελτιωτικό υλικό (κομπόστ) υπόκειται σε συγκεκριμένα πρότυπα σχετικά με τη συγκέντρωση βακτηρίων και βαρέων μετάλλων

- Η έκλυση αερίων και οσμών πρέπει να ελέγχεται, ενώ οι περίοικοι πρέπει να ενημερώνονται σχετικά με τη διεργασία, τα οφέλη της καθώς και τους κανονισμούς υγιεινής και ασφάλειας που ακολουθούνται

### **Σύστημα κομποστοποίησης αεριζόμενων στατικών σωρών**

Η τεχνοτροπία κομποστοποίησης στατικών σωρών αντικαθιστά την περιστροφή των σωρών με τον μηχανικό αερισμό αυτών [76]. Σύμφωνα με την USEPA (2014), η μέθοδος των αεριζόμενων στατικών σωρών είναι ικανή να παράξει εδαφοβελτιωτικό υλικό σχετικά γρήγορα (εντός τριών με έξι μηνών) και θεωρείται περισσότερο κατάλληλη για ομοιογενή μίγματα οργανικών αποβλήτων όπως είναι τα κλαδέματα και τα Αστικά Στερεά Απόβλητα (υπολείμματα τροφών, χαρτιά κλπ). Ωστόσο η συγκεκριμένη μέθοδος δε θεωρείται κατάλληλη για ζωικά παραπροϊόντα και υπολείμματα βιομηχανιών τροφίμων.

Για την επίτευξη ικανοποιητικού αερισμού γίνεται χρήση διογκωτικού υλικού (όπως πριονίδια και τεμαχισμένες εφημερίδες) ώστε να καθίσταται δυνατή η κίνηση του αέρα μέσα στον όγκο των αποβλήτων. Στο τέλος της διεργασίας το διογκωτικό υλικό αφαιρείται μέσω αισχαρισμού. Γενικά, οι στατικοί σωροί έχουν σχήμα πυραμίδας με ύψος έως 3 μέτρα, ενώ οι διαστάσεις της βάσης κυμαίνονται μεταξύ των 12 και 15 μέτρων. Η εξωτερική επιφάνεια του σωρού καλύπτεται με έτοιμο λιπασματοποιημένο υλικό, που δρα ως θερμομονωτικό καθώς και ως μονωτικό των οσμών.



**Εικόνα 2.2.3** Σύστημα αεριζόμενων στατικών σωρών

Η απουσία περιστροφής των σωρών καθιστά αναγκαία την καταγραφή και τον έλεγχο των λειτουργικών παραμέτρων της διεργασίας, ώστε να μην αστοχήσει η διεργασία. Επιπλέον, ο ελεγχόμενος αερισμός των σωρών καθιστά δυνατή την αύξηση του ύψους των σωρών κάτι που μειώνει τις ανάγκες σε εκτάσεις γης σε σχέση με την μέθοδο των περιστρεφόμενων σωρών. Από την άλλη πλευρά, οι ανάγκες σε εξοπλισμό και προσωπικό αυξάνουν σημαντικά το κόστος της διεργασίας.

#### **2.2.4.2 Κλειστά συστήματα κομποστοποίησης**

Τα κλειστά συστήματα κομποστοποίησης αποτελούνται από κυλινδρικούς (και σπανίως ορθογώνιους) πύργους, όγκου από 400m<sup>3</sup> έως 1800m<sup>3</sup>. Μερικές φορές οι κομποστοποιητές κλειστού τύπου αποτελούνται από πολυώροφους πύργους, ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη ανάμιξη του υλικού. Ειδικός εξοπλισμός χρησιμοποιείται για την τροφοδότηση του αντιδραστήρα από την κορυφή του και στη συνέχεια το μίγμα τροφοδοσίας κινείται λόγω βαρύτητας προς τον πυθμένα του πύργου. Για τον αερισμό του αντιδραστήρα εμφυσείται αέρας κατ' αντιρροή προς το υλικό που τροφοδοτείται. Επιπλέον, το υλικό που βρίσκεται μέσα στον αντιδραστήρα υπόκειται σε διαρκή ή περιοδική μηχανική ανάδευση ώστε να αερίζεται επαρκώς στο σύνολο του όγκου του [8].

Στα πλεονεκτήματα των κλειστών συστημάτων κομποστοποίησης συγκαταλέγονται η δυνατότητα του να επεξεργαστούν μεγάλες ποσότητες οργανικού αποβλήτου χωρίς να απαιτούν μεγάλο όγκο καθώς και η δυνατότητα του να επεξεργαστούν σχεδόν όλους τους τύπους οργανικής ύλης (κρέας, κτηνοτροφικά απόβλητα κλπ). Επίσης στα κλειστά συστήματα κομποστοποίησης ο απαιτούμενος χρόνος επεξεργασίας είναι σημαντικά μικρότερος, καθώς απαιτούνται μόλις μερικές εβδομάδες για την ολοκλήρωση της διεργασίας [74]

Τα κλειστά συστήματα κομποστοποίησης, λόγω των μικρών αναγκών σε χώρο συχνά θεωρούνται ιδανικά για επιχειρήσεις, σχολεία κοκ που επιθυμούν να επεξεργαστούν τα οργανικά απόβλητα που παράγουν επί τόπου. Να σημειωθεί επίσης ότι λόγω της μηδενικής εκπομπής οσμών τα συστήματα αυτά θεωρούνται ιδανικά για κομποστοποίηση αποβλήτων σε μέρη που βρίσκονται πολλοί άνθρωποι.

Τα κλειστά συστήματα κομποστοποίησης χωρίζονται γενικά σε δύο κατηγορίες [8]:

##### **Οριζόντιοι κλειστοί κομποστοποιητές:**

Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει τόσο στατικούς όσο και αναδευόμενους κομποστοποιητές σε ένα μεγάλο εύρος διαστάσεων. Συνήθως τοποθετούνται με τρόπο ώστε να εμφανίζουν μικρή κλίση ως προς το έδαφος, κάτι που αποσκοπεί στην διευκόλυνση της κίνησης του υλικού στο εσωτερικό των αντιδραστήρων.

Τέτοιου τύπου συστήματα χρησιμοποιούνται για τη κομποστοποίηση πολλών διαφορετικών υποστρωμάτων (π.χ αστικά στερεά απορρίμματα, λυματολάσπη, υπολείμματα επεξεργασίας κρεάτων κοκ). Ο χρόνος παραμονής μπορεί να είναι από 1 έως 7 εβδομάδες και η διεργασία ακολουθείται συνήθως από ένα στάδιο ωρίμανσης του τελικού προϊόντος.

##### **Αντιδραστήρες περιστρεφόμενου τυμπάνου:**

Οι αντιδραστήρες αυτού του τύπου συχνά αναφέρονται ως χωνευτήρες και η κομποστοποίηση των οργανικών αποβλήτων όταν πραγματοποιείται σε αυτούς είναι μια δυναμική διεργασία. Ο όγκος των αντιδραστήρων αυτών μπορεί να φτάσει και τα 500m<sup>3</sup>. Το κυλινδρικό σχήμα των αντιδραστήρων ευνοεί την περιστροφική κίνηση τους, η οποία ενισχύει την ομογενοποίηση και κατάτμηση του οργανικού υλικού που κομποστοποιείται. Η ταχύτητα και η συχνότητα της περιστροφής-ανάδευσης εξαρτάται από τις απαιτήσεις του προς κομποστοποίηση μίγματος. Για παράδειγμα, στην περίπτωση κομποστοποίησης υδαρών υλικών η υψηλή ταχύτητα περιστροφής ευνοεί την συμπίεση τους. Ως εκ



τούτου το προϊόν είναι, μετά το τέλος της διεργασίας, καλύτερα ομογενοποιημένο και περισσότερο ξηρό, διευκολύνοντας έτσι την απομάκρυνση αδρανών και άλλων ανεπιθύμητων υλικών.



**Εικόνα 2.2.4** Κομποστοποιητής περιστρεφόμενου τυμπάνου

Το μεγαλύτερο ίσως πλεονέκτημα των αντιδραστήρων αυτού του τύπου είναι ο σημαντικά μικρότερος απαιτούμενος χρόνος παραμονής και μπορεί να διαρκεί από λίγες ώρες έως μερικές μέρες. Ωστόσο, όπως είναι αναμενόμενο σε τόσο μικρό χρόνο παραμονής δεν προλαβαίνει να ολοκληρωθεί η μικροβιακή δράση και επομένως για την πλήρη αποδόμηση της οργανικής ύλης απαιτείται η περαιτέρω βιοσταθεροποίηση του μίγματος σε κάποιο άλλο σύστημα.



# **Κεφάλαιο 3**

## **Υδραυλικός χαρακτηρισμός και προσομοίωση**

### 3.1 Εισαγωγή

Η αναερόβια χώνευση αποτελεί μια επαρκώς θεμελιωμένη τεχνολογία για την επεξεργασία οργανικών αποβλήτων που αντιμετωπίζει διαρκείς προκλήσεις όσον αφορά το σχεδιασμό των χωνευτήρων. Οι ταχύρρυθμοι βιοαντιδραστήρες έχουν τη δυνατότητα να λειτουργήσουν σε ιδιαίτερα χαμηλούς υδραυλικούς χρόνους παραμονής (HRTs) και υψηλούς χρόνους παραμονής στερεών (SRTs) και διαδραμάτισαν πολύ σημαντικό ρόλο στη ραγδαία εξάπλωση της συγκεκριμένης τεχνολογίας, με πάνω από 900 μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις στον κόσμο κατά τα τέλη της δεκαετίας του '90 [77], [78]. Δύο βασικοί τύποι τέτοιων βιοαντιδραστήρων είναι ο αντιδραστήρας UASB (Upflow Anaerobic Sludge Bed) που σχεδιάστηκε από τον Lettinga και τους συνεργάτες του το 1980 [36] και ο αντιδραστήρας ABR (Anaerobic Baffled Reactor) που σχεδιάστηκε από το McCarty και τους συνεργάτες του [41], [79]. Σε αυτούς τους τύπους βιοαντιδραστήρων, το απόβλητο έρχεται σε επαφή με τη μεγάλη ενεργή βιολογική μάζα καθώς διαπερνά τον αντιδραστήρα και η εκροή είναι σχετικά απαλλαγμένη από βιολογικά στερεά [41]. Η μελέτη, λοιπόν, της ρεολογικής συμπεριφοράς τέτοιων συστημάτων είναι απαραίτητη, καθώς επηρεάζει τον τύπο ανάμιξης στο εσωτερικό των αντιδραστήρων και κατ' επέκταση την απόδοσή τους.

Αρκετές μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί με στόχο την προσομοίωση και μοντελοποίηση των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών σε εργαστηριακής και πιλοτικής κλίμακας αντιδραστήρες τύπου UASB και ABR. Οι Gobicki και Stuckey (1992) έκαναν μια σειρά πειραμάτων Κατανομής Χρόνου Παραμονής (Residence Time Distribution tests) με σκοπό την περιγραφή της ροής σε μια σειρά αντιδραστήρων τύπου ABR, με ή χωρίς βιομάζα στο εσωτερικό τους, σε διάφορους υδραυλικούς χρόνους παραμονής [39]. Ακολούθως, προσομοίωσαν τα αποτελέσματα σε μοντέλα «διάχυσης» ή «δοχείων σε σειρά» [80]. Από τα μοντέλα που προέκυψαν από αυτή τη διαδικασία αναπτύχθηκε μια σημαντική μέθοδος για τον προσδιορισμό του τύπου ροής και του «νεκρού χώρου» (“dead space”) στο εσωτερικό των αντιδραστήρων. Όμοια πειραματική μέθοδος εφαρμόστηκε για τον προσδιορισμό υδροδυναμικών χαρακτηριστικών κλασικών ABR [81]–[85] ή σε παρόμοιες κατασκευές από τους [86], [87]. Αντίστοιχα, στη βιβλιογραφία εντοπίζεται σειρά μελετών για την υδροδυναμική συμπεριφορά αντιδραστήρων τύπου UASB και αντίστοιχων τροποποιημένων τύπων αντιδραστήρων [88]–[93].

Υπάρχουν επίσης αρκετές βιβλιογραφικές αναφορές όσον αφορά τη μελέτη της ροής και τον τύπο ανάμιξης στο εσωτερικό διαφορετικών τύπων αντιδραστήρων σε χημικές και βιολογικές διεργασίες με τη χρήση θεωρίας Κατανομής Χρόνου Παραμονής και της Υπολογιστικής Μηχανικής Ρευστών (Computational Fluid Dynamics – CFD) ως εργαλείο προσομοίωσης [94]–[100]. Ο Patel και οι συνεργάτες του (2010) εφάρμοσαν ανάλυση CFD για τη διερεύνηση την επίδραση της ανάμιξης στο θερμικό πολυμερισμό στυρενίου σε εργαστηριακό αντιδραστήρα CSTR με κατασκευή τρισδιάστατου (3D) μοντέλου [101]. Επίσης, οι Qi et al (2013) και Plascencia-Jatomea et al. (2015) πραγματοποίησαν πειράματα με ιχνηθέτη και με τη χρήση θεωρίας Κατανομής Χρόνου Παραμονής και CFD απέδωσαν ένα λεπτομερές πρότυπο ροής νερού κατά την επεξεργασία φίλτρων άμμου και σε αντιδραστήρα τύπου MABR (Membrane-Aerated Biofilm Reactor) αντίστοιχα [96], [102].

Ωστόσο, η βιβλιογραφία που αφορά υπολογιστικές προσομοιώσεις της ροής είναι σχετικά περιορισμένη [103]–[105]. Το ίδιο συμβαίνει και με τη βιβλιογραφία που αφορά τη μελέτη των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών ενός καινοτόμου αντιδραστήρα βασισμένου στο σχεδιασμό του ABR,

του Περιοδικού Αναερόβιου Χωνευτήρα με Ανακλαστήρες (Periodic Anaerobic Baffled Reactor – PABR) [106], [107]. Ο PABR, που αποτελεί αντικείμενο της παρούσας μελέτης, είναι ένας καινοτόμος αντιδραστήρας που σχεδιάστηκε από τους Skiadas και Lyberatos (1998). Αποτελεί, όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 2 έναν ταχύρρυθμο αντιδραστήρα που παρουσιάζει μεγάλη ευελιξία στη λειτουργία του και μπορεί να επεξεργαστεί απόβλητα με υψηλές οργανικές φορτίσεις σε χαμηλούς υδραυλικούς χρόνους παραμονής. Οι Liu et al. (2007) πραγματοποίησαν πειράματα κατανομής χρόνου παραμονής τόσο σε κενούς από βιομάζα όσο και σε εν λειτουργία αντιδραστήρες PABR υπό υδραυλικούς χρόνους παραμονής 2 ημερών με σκοπό τη διερεύνηση των νεκρών χώρων και των τύπων ροής σε διάφορους ρυθμούς οργανικής φόρτισης και σε διάφορους συνδυασμούς συχνοτήτων και τρόπων εναλλαγής του διαμερίσματος τροφοδοσίας. Συμπεράναν ότι ο τύπος ροής βρισκόταν ανάμεσα στην πλήρη ανάμειξη και την εμβολική ροή σε όλους τους συνδυασμούς που δοκιμάστηκαν [107].

Με δεδομένο ότι ο αντιδραστήρας που μελετάται στην παρούσα διατριβή είναι ένας νέος πιλοτικής κλίμακας PABR με τροποποιήσεις στο σχεδιασμό του (βλ. Κεφάλαιο 2), ο προσδιορισμός την υδραυλικής συμπεριφοράς του και των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών του είναι βασική προϋπόθεση για την επιλογή των βέλτιστων παραμέτρων λειτουργίας κατά τις διεργασίες που θα ακολουθήσουν (Κεφάλαια 6 και 7) αλλά και γενικότερα στην κατεύθυνση βελτιστοποίησης της γεωμετρίας του. Η μελέτη του τύπου ανάμειξης και του νεκρού χώρου στο εσωτερικό του ενεργού όγκου ενός αντιδραστήρα είναι εξαιρετικά σημαντική, διότι δύναται να επηρεάσει αποφασιστικά την απόδοσή του κατά τη διεργασία [108].

Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακά πειράματα Κατανομής Χρόνου Παραμονής με ιχνηθέτη και αναπτύχθηκε για πρώτη φορά ένα τρισδιάστατο μοντέλο του αντιδραστήρα σε περιβάλλον Comsol Multiphysics®, με βάση το οποίο έγιναν προσομοιώσεις σε διαφορετικούς συνδυασμούς HRT και T. Από το συνδυασμό των πειραματικών αποτελεσμάτων και των προσομοιώσεων, προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα για το προφίλ της ανάμειξης και τους νεκρούς χώρους στο εσωτερικό του αντιδραστήρα.

## **3.2 Σχεδιασμός αντιδραστήρων και ρευστομηχανική μελέτη**

### **3.2.1 Σχεδιασμός χημικών αντιδραστήρων**

Χημικός αντιδραστήρας καλείται ένα δοχείο ειδικά σχεδιασμένο ώστε να φιλοξενήσει μια χημική αντίδραση. Εντός αυτού τα αντιδρώντα θα μετατραπούν σε προϊόντα με την αντίστοιχη έκλυση ή απορρόφηση θερμότητας.

Ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας που επιθυμείται οι αντιδραστήρες κατατάσσονται σε μια από τις τρεις ακόλουθες κατηγορίες: αντιδραστήρες συνεχούς έργου, όπου υπάρχει συνεχόμενη τροφοδότηση και απομάκρυνση υλικών, αντιδραστήρες διαλείποντος έργου, δηλαδή με ασυνεχή λειτουργία και αντιδραστήρες ημιαλειπόντος έργου, που λειτουργούν μεταξύ των δύο προηγούμενων τύπων και για κάποια υλικά του αντιδραστήρα η λειτουργία είναι συνεχής και για άλλα ασυνεχής [109].

Η ταξινόμηση των αντιδραστήρων μπορεί επίσης να γίνει ανάλογα με τον αριθμό των φάσεων που υπάρχουν στο εσωτερικό τους, δηλαδή σε μονοφασικούς και πολυφασικούς. Επιπλέον, κατανέμονται ανάλογα με την ύπαρξη καταλύτη ή όχι.

Τέλος δύναται να διαχωριστούν με βάση το σχήμα τους, σε δοχεία πλήρους ανάμειξης, αυλωτούς αντιδραστήρες όπου θεωρείται ότι αναπτύσσεται εμβολική ροή, κλιβάνους και πύργους με πληρωτικά υλικά [109].

Προκειμένου να επιλεγεί ένα από τα είδη αντιδραστήρα που προαναφέρθηκαν για να κατασκευαστεί για μια διεργασία, είναι απαραίτητο να είναι γνωστές οι πληροφορίες για τη χημική αντίδραση που θα συμβαίνει εντός του συστήματος, δηλαδή η κινητική της αντίδρασης, η παραγωγή ή απαίτησή της σε ενέργεια, η επίτευξη ή όχι ισορροπίας, η ανάγκη για μηχανική ανάδευση και γενικότερα ο τρόπος με τον οποίο θα έρθουν σε επαφή τα αντιδρώντα μεταξύ τους ή με τον καταλύτη. Επίσης, πρέπει να είναι γνωστό αν θα είναι στην ίδια φάση τα αντιδρώντα και αν θα προκύπτουν νέες φάσεις κατά την αντίδραση καθώς και πώς θα αλληλεπιδρούν μεταξύ τους.

Εφόσον συγκεντρωθούν οι απαραίτητες πληροφορίες επιλέγεται ο κατάλληλος τύπος αντιδραστήρα με βάση και τις υπάρχουσες γνώσεις για τη συγκεκριμένη διεργασία, στη συνέχεια επιλέγονται οι συνθήκες που πραγματοποιείται βέλτιστα η αντίδραση και υπολογίζεται η επιθυμητή απόδοση. Γίνεται διαστασιολόγηση του αντιδραστήρα και υπολογίζεται η απόδοσή του, παράλληλα λαμβάνονται υπόψιν παράγοντες ασφαλείας όπως η απομόνωση επικίνδυνων αντιδραστηρίων ή προϊόντων. Δημιουργείται ένα μηχανικό σχέδιο του αντιδραστήρα και επιλέγονται τα υλικά για την κατασκευή του, κατόπιν βελτιστοποιούνται τα σχέδια λαμβάνοντας υπόψιν και οικονομικούς παράγοντες, όπως ελαχιστοποίηση πάγιου και λειτουργικού κόστους της διεργασίας. Τελευταίο βήμα είναι η εκτίμηση του κόστους του αντιδραστήρα που σχεδιάστηκε [110].

## 3.2.2 Ρευστομηχανική μελέτη

### 3.2.2.1 Έρπουσα ροή

Η ροή εντός του αντιδραστήρα χαρακτηρίστηκε ως έρπουσα επειδή ο αριθμός Reynolds που υπολογίστηκε ήταν πολύ μικρότερος της μονάδας. Ο αριθμός Reynolds είναι ο λόγος των δυνάμεων αδράνειας προς τις ιξώδεις δυνάμεις που δρουν πάνω στο ρευστό και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R_e = \frac{\rho u D_H}{\mu}$$

#### Εξίσωση 3.2.1 Υπολογισμός Αριθμού Reynolds

όπου, «ρ» είναι η πυκνότητα του ρευστού, «u» η μέση ταχύτητα του ρευστού, «D<sub>H</sub>» η υδραυλική διάμετρος του αγωγού (παραδείγματος χάριν, η εσωτερική διάμετρος σε περίπτωση που είναι κυκλικός) και «μ» είναι το δυναμικό ιξώδες του ρευστού. Στην έρπουσα ροή υπερσχύουν οι ιξώδεις δυνάμεις σε ολόκληρο το πεδίο της ροής [111].

Χαρακτηριστικά παραδείγματα στα οποία παρουσιάζεται έρπουσα ροή ή ροή Stokes είναι η ροή βαρέων κλασμάτων πετρελαίου, ροή μελιού και οι κινήσεις μικροοργανισμών και βακτηρίων στο νερό και στον αέρα που ανήκουν επίσης σε αυτή την κατηγορία.

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση του μοντέλου της ταχύτητας του ρευστού εντός του αντιδραστήρα είναι οι παρακάτω:

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{g}$$

### Εξίσωση 3.2.2 Η Εξίσωση Navier – Stokes

Η πρώτη είναι η εξίσωση Navier – Stokes, μπορεί να εφαρμοστεί σε περιπτώσεις νευτωνικού ρευστού, ασυμπίεστης ροής και σταθερού ιξώδους. Το αριστερό σκέλος αποτελεί την υλική παράγωγο της ταχύτητας, δηλαδή τον ολικό ρυθμό μεταβολής της ταχύτητας ως προς έναν παρατηρητή ο οποίος ακολουθεί το κινούμενο ρευστό. Στη παρούσα διατριβή η ταχύτητα θεωρείται οιονεί στατικό μέγεθος σε σύγκριση με τη συγκέντρωση του ιχνηθέτη, καθώς η ταχύτητα του νερού επιτυγχάνει μόνιμες συνθήκες ροής πολύ πιο γρήγορα από την πλήρη κατανομή της συγκέντρωσης του ιχνηθέτη σε όλο τον όγκο του αντιδραστήρα. Αυτός είναι ο λόγος που μηδενίζεται [111]. Στο δεξί σκέλος, ο ένας όρος αναφέρεται στη πίεση, ο δεύτερος στο ιξώδες και ο τελευταίος όρος του δεύτερου σκέλους αναφέρεται στη βαρυτική δύναμη που ασκείται στο ρευστό.

Η δεύτερη εξίσωση που χρησιμοποιείται είναι η συνθήκη ασυμπίεστης ροής, δηλαδή οι μεταβολές της πυκνότητας σε όλο το πεδίο ροής είναι αμελητέες [111]:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

### Εξίσωση 3.2.3 Συνθήκη Ασυμπίεστης Ροής

#### 3.2.2.2 Συναγωγή και Διάχυση

Στο σύστημα που υπάρχει μια διαλυμένη ουσία μέσα σε ένα ρευστό προκαλείται διάχυση της ουσίας από βαθμίδες υψηλότερης συγκέντρωσης σε γειτονικές βαθμίδες με χαμηλότερη συγκέντρωση. Εάν παράλληλα υπάρχει κίνηση στον κύριο όγκο του ρευστού, τότε και η συναγωγή θα συνεισφέρει στην ροή των χημικών ουσιών. Για την μοντελοποίηση της μεταφοράς του ιχνηθέτη εντός του αντιδραστήρα που είναι πληρωμένος με νερό παρατηρούνται και τα δύο φαινόμενα οπότε χρησιμοποιείται ο συνδυασμός των εξισώσεων Διάχυσης και Συναγωγής [112].

Η εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται παρακάτω:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \underline{u} \cdot \nabla c = D \nabla^2 c$$

**Εξίσωση 3.2.4:** Μεταφοράς Μάζας με Συναγωγή και Διάχυση

- Με «c» συμβολίζεται η συγκέντρωση του ιχνηθέτη
- Ως «D» συμβολίζεται ο συντελεστής διάχυσης της ουσίας που χρησιμοποιείται. Συνήθως περιγράφει ζεύγη ουσιών, δηλαδή όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της μιας ουσίας σε σχέση με την άλλη τόσο γρήγορα διαχέεται η μια στην άλλη
- Με «u» συμβολίζεται η μέση ταχύτητα της μεταβλητής που μελετάται, καθώς κινείται στον κύριο όγκο του ρευστού Στην προκειμένη περίπτωση είναι αυτή του νερού που κινείται από διαμέρισμα σε διαμέρισμα του αντιδραστήρα

Από τους όρους της εξίσωσης 3.2.4 ο πρώτος όρος του αριστερού σκέλους περιγράφει τη μεταβολή της συγκέντρωσης του ιχνηθέτη με το πέρασ του χρόνου, ο δεύτερος όρος του αριστερού σκέλους περιγράφει την κίνηση λόγω της συναγωγής, ενώ ο τελευταίος όρος την κίνηση λόγω διάχυσης.

### 3.3 Υδραυλικός χαρακτηρισμός συστημάτων

Οι δύο ακραίοι τύποι ιδανικής ροής είναι η εμβολική και η ροη πλήρους ανάμιξης. Συχνά οι διεργασίες σχεδιάζονται ώστε να προσεγγίζουν είτε τον ένα ή τον άλλο τρόπο λειτουργίας, γιατί είναι απλοί στο χειρισμό.

Από τους τύπους ιδανικής ροής προκύπτει ότι είτε τα σωματίδια που εισέρχονται την ίδια χρονική στιγμή θα παραμένουν στον αντιδραστήρα το ίδιο χρονικό διάστημα (plug flow), είτε θα αναμειγνύονται εντελώς με την εισαγωγή τους και θα εξέρχονται από αυτόν έχοντας διανύσει διαφορετικά χρονικά διαστήματα εντός του αντιδραστήρα. Σε κάθε μια από τις παραπάνω περιπτώσεις ο μέσος χρόνος παραμονής υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\bar{t} = \frac{V}{Q}$$

**Εξίσωση 3.3.1** Μέσος Χρόνος Παραμονής

Εξαρτάται όπως φαίνεται από τον όγκο του αντιδραστήρα V (m<sup>3</sup>) και την παροχή του ρευστού Q (mol/m<sup>3</sup>). Καλείται και Υδραυλικός Χρόνος Παραμονής (Hydraulic Retention Time) και είναι ο χρόνος που θα χρειαστεί για να διέλθει μέσα από τον αντιδραστήρα ποσότητα ρευστού ίση με τον όγκο του.

Μαζί με τον HRT ως παράμετρο λειτουργίας του συστήματος χρησιμοποιείται η περίοδος εναλλαγής των διαμερισμάτων (T).

Στην πραγματικότητα υπάρχουν διαφορές από τους ιδανικούς τύπους ροής. Ο τύπος της ροής καθορίζεται κυρίως από τρεις παράγοντες [80]:



- Η κατανομή χρόνων παραμονής του υλικού που ρέει μέσα από τη συσκευή,
- Η τάση του ρευστού να σχηματίζει συσσωματώματα καθώς και η τάση ομάδων μορίων να κινούνται μαζί,
- Η πρωιμότητα και η υστέρηση της ανάμειξης του υλικού μέσα στο δοχείο.

Η απόκλιση από την ιδανική ροή μπορεί να οφείλεται είτε στη ροή του ρευστού μέσα από διαύλους (bypass), από την ανακύκλωση ή τον σχηματισμό στάσιμων («νεκρών») περιοχών εντός του δοχείου, κάτι το οποίο πρέπει να αποφεύγεται για όλα τα είδη χημικού εξοπλισμού.

Όπως προαναφέρθηκε στην περίπτωση της πραγματικής ροής τα σωματίδια του ρευστού ακολουθούν διαφορετικές πορείες εντός του αντιδραστήρα, οπότε και θα εξέρχονται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές παρά την ταυτόχρονη είσοδό τους. Η κατανομή των χρόνων αυτών ονομάζεται κατανομή χρόνου εξόδου «E» ή κατανομή χρόνου παραμονής του ρευστού και έχει μονάδες χρόνου<sup>-1</sup> (t<sup>-1</sup>) [80]:

$$\int_0^{\infty} E dt = 1$$

### Εξίσωση 3.3.2 Κατανομή Χρόνου Παραμονής (t<sup>-1</sup>)

Πειραματικά η κατανομή χρόνου παραμονής (Residence Time Distribution, RTD) προσδιορίζεται με εισαγωγή στον αντιδραστήρα αδρανούς χημικής ουσίας μορίου ή ατόμου που αποκαλείται ιχνηθέτης και στη συνέχεια μέτρηση της συγκέντρωσης του ιχνηθέτη στο ρεύμα εξόδου του αντιδραστήρα συναρτήσει του χρόνου. Ο ιχνηθέτης, εκτός του ότι πρέπει να είναι εύκολα ανιχνεύσιμο, μη ενεργό χημικό είδος, θα πρέπει να έχει φυσικές ιδιότητες παρόμοιες με αυτές του ρευστού που πληροί τον αντιδραστήρα και να είναι πλήρως διαλυτό σε αυτό. Επιπλέον, πρέπει να μην προσροφάται στις επιφάνειες του αντιδραστήρα ώστε η συμπεριφορά του ιχνηθέτη να προσομοιάζει όσο το δυνατό βέλτιστα τη συμπεριφορά του ρευστού εντός του αντιδραστήρα. Τα συνηθέστερα είδη ιχνηθετών αποτελούν έγχρωμα και ραδιενεργά υλικά όπως και αδρανή αέρια. Οι δύο περισσότερο χρησιμοποιούμενες μέθοδοι εισαγωγής του ιχνηθέτη στον αντιδραστήρα είναι η παλμική επιβολή και η βηματική επιβολή [113].

Για την περίπτωση της παλμικής επιβολής προσδιορίζεται η κατανομή «E» μεταβάλλοντας μια παράμετρο στιγμιαία και μελετάται ο χρόνος και ο τρόπος που θα σταθεροποιηθεί η τιμή της παραμέτρου αυτής. Για τη μελέτη της Κατανομής Χρόνου Παραμονής στον PABR αυτό επιτυγχάνεται εισάγοντας στιγμιαία μια δόση ιχνηθέτη στο ρεύμα τροφοδοσίας και μετρώντας τη συγκέντρωσή του στο ρεύμα της εξόδου. Η βηματική επιβολή επιτυγχάνεται αλλάζοντας το ρευστό εισόδου σε ρευστό που περιέχει και ιχνηθέτη, σε μια γνωστή συγκέντρωση, και καταγράφεται η συγκέντρωση στην έξοδο του αντιδραστήρα [80].

Η βηματική μέθοδος εφαρμόζεται ευκολότερα σε σχέση με την παλμική και δεν απαιτεί τη γνώση της αρχικής ποσότητας ιχνηθέτη στη τροφοδοσία του αντιδραστήρα. Όμως, για να επιτευχθεί η βηματική επιβολή απαιτείται μεγάλη ποσότητα ιχνηθέτη και η διατήρηση της συγκέντρωσής του στην τροφοδοσία σταθερή.

Στη παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκε η βηματική επιβολή στις προσομιώσεις καθώς με τον ίδιο τρόπο διεξήχθησαν τα πειράματα στον PABR και για την καλύτερη σύγκριση μεταξύ των πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων.

Η κατανομή χρόνου παραμονής για βηματική επιβολή στο σύστημα συμβολίζεται ως «F» και ισούται με:

$$F = \frac{C_i}{C_{max}}$$

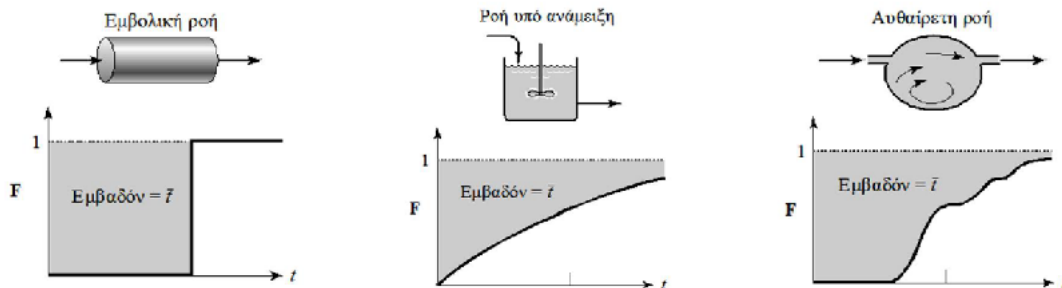
**Εξίσωση 3.3.3** Κατανομή Χρόνου Παραμονής για Βηματική Επιβολή

Επίσης, οι δύο κατανομές συνδέονται από τη ακόλουθη σχέση:

$$\frac{dF}{dt} = E$$

**Εξίσωση 3.3.4** Εξάρτηση μεταξύ των δύο κατανομών

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται η απόκριση σε βηματική επιβολή σε τρεις αντιδραστήρες που αναπτύσσουν διαφορετικά είδη ροής:



**Σχήμα 3.3.1** Είδη ροής και η αντίστοιχη απόκριση σε Βηματική Επιβολή [80]

### 3.3.1 Το μοντέλο των δοχείων στη σειρά

Η ροή μέσα στον αντιδραστήρα μπορεί να προσομιωθεί από κάποιο μοντέλο και στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν οι πληροφορίες για την κλιμάκωση του μεγέθους του αντιδραστήρα, για την ανίχνευση προβλημάτων στις ροές και για τη σύγκριση με αντίστοιχες πειραματικές προκειμένου να αναπτυχθεί καλύτερο μοντέλο για πιο ολοκληρωμένο σχεδιασμό. Δύο χαρακτηριστικά μοντέλα για μελέτη πραγματικών ροών είναι το μοντέλο διασποράς και το μοντέλο των δοχείων στη σειρά, που είναι και τα δύο εύχρηστα [80].

Στην παρούσα διατριβή επιλέχθηκε το μοντέλο πλήρους αναμίξιμων δοχείων στη σειρά για τη μελέτη των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την προσομοίωση. Η κατανομή «F» για N ιδανικά αναδευόμενα δοχεία σε σειρά δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$F(t) = \frac{C_i}{C_{MAX}} = 1 - e^{-N_R \theta_i} \cdot \left[ 1 + N_R \theta_i + \frac{1}{2!} (N_R \theta_i)^2 + \dots + \frac{1}{(N_R - 1)!} (N_R \theta_i)^{N_R - 1} \right]$$

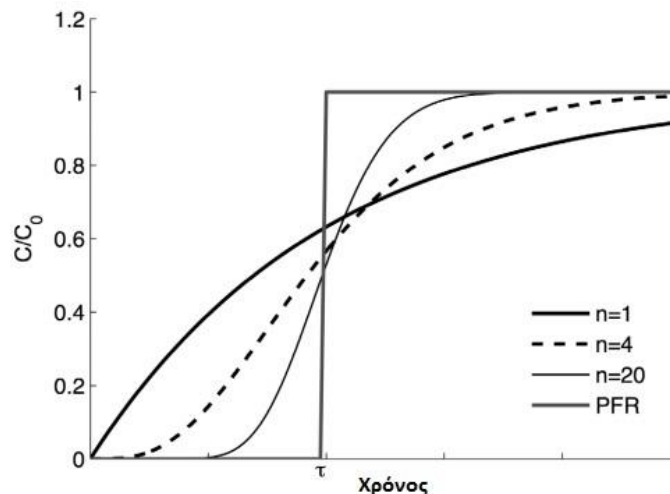
**Εξίσωση 3.3.5:** Υπολογισμού της κατανομής "F"

Όπου με «θ<sub>i</sub>» συμβολίζεται ο αδιάστατος χρόνος με βάση το χώρο-χρόνο αντιδραστήρα,

$$\theta_i = \frac{t_i}{\tau}$$

**Εξίσωση 3.3.6:** Λόγος της χρονικής στιγμής "i" με τον Μέσο Χρόνο Παραμονής

Με «C<sub>i</sub>» συμβολίζεται η συγκέντρωση του ιχνηθέτη στην έξοδο του διαμερίσματος που χρησιμοποιείται την χρονική στιγμή «t<sub>i</sub>» και «C<sub>max</sub>» είναι η μέγιστη τιμή της συγκέντρωσης του ιχνηθέτη που παρατηρείται κατά τη διάρκεια του πειράματος. Με «N» παρουσιάζεται ο αριθμός των αντιδραστήρων πλήρους ανάμειξης στη σειρά. Στο Σχήμα 3.3.2 φαίνονται οι διαφορετικές αποκρίσεις σε βηματική επιβολή ανάλογα με το αν αντιδραστήρας συμπεριφέρεται ως πλήρους ανάμειξης, εμβολικής ροής ή μεταξύ των δύο.



**Σχήμα 3.3.2** Διάγραμμα "F - θ<sub>i</sub>" σε Βηματικές Επιβολές ανάλογα με τον αριθμό Αντιδραστήρων Πλήρους Ανάμειξης στη σειρά [114]

Η τρόπος χρήσης της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ο εξής. Υπολογίζονται για κάθε χρονική στιγμή το δεύτερο και το τρίτο σκέλος της εξίσωσης 3.3.6, χρησιμοποιώντας τιμές για το N από 1 έως 15. Στη συνέχεια, λαμβάνεται το τετράγωνο της διαφοράς κάθε χρονικής στιγμής μεταξύ των αποτελεσμάτων

των δύο όρων. Τέλος, αθροίζονται οι διαφορές για κάθε τιμή του N και επιλέγεται το ελάχιστο από τα αθροίσματα, οπότε προκύπτει και ο ισοδύναμος αριθμός αντιδραστήρων πλήρους ανάμειξης στη σειρά που χαρακτηρίζει τη συμπεριφορά του συστήματος.

### 3.3.2 Υδραυλικός Νεκρός Όγκος

Ο νεκρός όγκος εμφανίζεται στα σημεία που η ροή παρεμποδίζεται όπως πάνω σε ανακλαστές, σε κοιλότητες και γωνίες του δοχείου που μπορούν να σχηματιστούν και δίνες ή στα σημεία του δοχείου που βρίσκονται κοντά σε διαύλους από τους οποίους δεν ξεφεύγει εύκολα ο ιχνηθέτης, όπως και από τις δίνες, οπότε κάποιες περιοχές κατακρατούν τον ιχνηθέτη ενώ κάποια ρεύματα εντός του δοχείου δεν τον αφήνουν να απλωθεί σε ολόκληρο τον όγκο του δοχείου.

Έχει αποδειχθεί ότι ο υδραυλικός «νεκρός» όγκος αυξάνει με την αύξηση του αριθμού Reynolds [115], οπότε αναμένεται το φαινόμενο να ενταθεί σε χαμηλούς Υδραυλικούς Χρόνους Παραμονής (HRT).

Στην παρούσα διατριβή ο «νεκρός» όγκος του αντιδραστήρα για τους διάφορους HRT που προσομοιώθηκαν υπολογίστηκε από τον παρακάτω τύπο:

$$V_d = \left(1 - \frac{\bar{t}}{HRT}\right) \cdot 100\%$$

**Εξίσωση 3.3.7:** Υπολογισμού "Νεκρού" Όγκου

Με « $\bar{t}$ » συμβολίζεται ο μέσος χρόνος παραμονής που υπολογίζεται με τη σειρά του από τον τύπο:

$$\bar{t} = \sum_1^n \frac{t_i \cdot C_i}{C_i}$$

**Εξίσωση 3.3.8:** Τρόπος Υπολογισμού Μέσου Χρόνου Παραμονής, για την Εξίσωση 3.4.1

Με « $C_i$ » συμβολίζεται η συγκέντρωση τη χρονική στιγμή « $t_i$ » και « $n$ » είναι το πλήθος ζευγών συγκέντρωσης-χρονικών στιγμών που έχουν προκύψει είτε από πειραματική διαδικασία είτε από προσομοίωση.

### 3.4 Πρόγραμμα προσομοίωσης Comsol Multiphysics®

Το Comsol Multiphysics® αποτελεί ένα διαδραστικό περιβάλλον για μοντελοποίηση και στη συνέχεια επίλυση προβλημάτων φυσικής και μηχανικής, που χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method) σε συνδυασμό με περιορισμό σφάλματος, χρησιμοποιώντας αριθμητικούς επιλύτες καθώς και προσαρμοζόμενο πλέγμα. Το πλεονέκτημα του Comsol Multiphysics® είναι η δυνατότητα επέκτασης συμβατικών μοντέλων για ένα τύπο «physics» σε «multiphysics» / πολυφασικά μοντέλα που έχουν την ικανότητα να επιλύσουν συζευγμένα επιστημονικά φαινόμενα. Το πρόγραμμα προσφέρει ενσωματωμένες βιβλιοθήκες επιστημονικών δεδομένων και ιδιοτήτων υλικών, αριθμητικούς επιλύτες, εργαλεία επεξεργασίας αποτελεσμάτων όπως και τη δυνατότητα ορισμού του

μοντέλου από σχετικές φυσικές ποσότητες, όπως ιδιότητες υλικών, φορτίων, περιορισμών, πηγών και ροών, αντί για τον καθορισμό των εξισώσεων που διέπουν το μοντέλο. Επίσης, δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να αντιστοιχίσει τις παραπάνω ιδιότητες σε οποιαδήποτε επιφάνεια, όγκο ελέγχου, σημείο ή και άκρο [116].

Πρόσβαση στο Comsol Multiphysics® είναι δυνατή είτε με την απόκτηση του προϊόντος και τη χρήση του μέσω της γραφικής επιφάνειας για το χρήστη είτε μέσω του προγραμματισμού ενός «script» για τη χρήση του μέσω της γλώσσας προγραμματισμού «Java» ή του «Matlab».

Η διαδικασία μοντελοποίησης στο πρόγραμμα Comsol Multiphysics® συνοψίζεται στα παρακάτω κυρίως βήματα [116]:

- Ορισμός του φαινομένου ή και ο συνδυασμός των φαινομένων, παραδείγματος χάριν Μεταφορά Ρευστού και παράλληλα Μεταφορά Θερμότητας. Για τη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε η έκδοση 5.2 (Version 5.2). Μερικές μόνο από τις επιλογές για την επιλογή των φαινομένων παρουσιάζονται στη συνέχεια: Ακουστικά φαινόμενα, Ηλεκτρομαγνητικά Φαινόμενα, Μεταφορά Χημικών Ειδών, Ηλεκτροχημικά Φαινόμενα, Μεταφορά Ρευστών, Μεταφορά Θερμότητας, Επίλυση Διαφορικών Εξισώσεων κ.α.
- Ορισμός του είδους της μελέτης, δηλαδή αν θα εξαρτάται από το χρόνο ή θα είναι σε μόνιμες συνθήκες.
- Ορισμός της γεωμετρίας, όπου δημιουργείται η γεωμετρία του προς επίλυση προβλήματος ή εισάγεται μια έτοιμη γεωμετρία από κάποιο σχεδιαστικό πρόγραμμα όπως το Auto-CAD.
- Εισαγωγή των υλικών, από τις ενσωματωμένες βιβλιοθήκες που περιέχει το πρόγραμμα. Επιλέγονται τα υλικά και αντιστοιχίζονται στους όγκους ή στις επιφάνειες ή εισάγονται οι ιδιότητές του σε περίπτωση που το υλικό δεν περιέχεται στην έκδοση του προγράμματος.
- Ορισμός των φυσικών σχέσεων, των παραμέτρων και των τυχών περιορισμών καθώς και η επιλογή των χωρίων της γεωμετρίας που εφαρμόζονται.
- Ορισμός του πλέγματος. Επιτυγχάνεται είτε με αυτόματη δημιουργία ενός πλέγματος, όπου ο χρήστης επιλέγει μόνο το μέγεθος των στοιχείων ή με τη δημιουργία ενός πλέγματος από το χρήστη που προσαρμόζει το πλέγμα ανάλογα με την ακρίβεια των λύσεων σε συγκεκριμένα σημεία, τις επιδόσεις του υπολογιστή που χρησιμοποιεί και τη χρονική διάρκεια επίλυσης του προβλήματος που αποσκοπεί.
- Εξατομίκευση της μελέτης. Είναι το τελευταίο βήμα πριν από την επίλυση του προβλήματος. Επιλέγεται ο αριθμητικός επιλύτης (solver), καθορίζονται οι αρχικές τιμές των μεταβλητών, επιλέγεται αν κριθεί απαραίτητο ξεχωριστό πλέγμα και πιθανές επεκτάσεις της μελέτης.

Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την επίλυση του προβλήματος είναι το τελευταίο βήμα της μοντελοποίησης. Τα αποτελέσματα εξάγονται είτε σε διαγράμματα είτε σε εικόνες πάνω στη γεωμετρία είτε και με τη μορφή βίντεο με σκοπό τη περαιτέρω ανάλυσή τους.



**Κεφάλαιο 4**  
**Πειράματα κατανομής χρόνου παραμονής**  
**και προσομοίωση**

#### 4.1 Εργαστηριακά Πειράματα Κατανομής Χρόνου Παραμονής

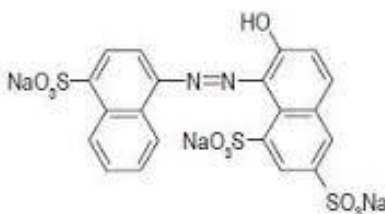
Η κατανομή του χρόνου παραμονής είναι, όπως προαναφέρθηκε, ένας από τους βασικότερους παράγοντες που καθορίζουν τον τύπο της ανάμειξης στο εσωτερικό ενός αντιδραστήρα. Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα πειράματα κατανομής χρόνου παραμονής (RTD tests) που πραγματοποιήθηκαν στον πιλοτικής κλίμακας PABR, με σκοπό τη διερεύνηση των υδροδυναμικών του χαρακτηριστικών και της υδραυλικής του συμπεριφοράς. Επιπλέον, παρουσιάζεται αναλυτικά η κατασκευή τρισδιάστατου μοντέλου του αντιδραστήρα σε περιβάλλον Comsol Multiphysics, το οποίο εν συνεχεία χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση των εργαστηριακών πειραμάτων, αλλά και για τη διερεύνηση της υδραυλικής συμπεριφοράς του αντιδραστήρα σε διαφορετικούς συνδυασμούς παραμέτρων λειτουργίας (HRT και T).

##### 4.1.1 Ιχνηθέτης

Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε ως ιχνηθέτης η ουσία Ponceau 4R με χημική ονομασία (λατινικά)

*Trisodium-2-Hydroxy-1-(4-Sulfonato-1-Naphthylazo)-6,8-Naphthalenedisulfonate,*

χημικό τύπο  $C_{20}H_{11}N_2Na_3O_{10}S_3$  και συντακτικό τύπο όπως φαίνεται στο ακόλουθο Σχήμα.



Σχήμα 4.1.1 τύπος ιχνηθέτη Ponceau 4R [3]

Πρόκειται για συνθετική, ερυθρή χρωστική ουσία που παρασκευάζεται σε μορφή σκόνης και χρησιμοποιείται ως πρόσθετο στη ζαχαροπλαστική και στη βιομηχανία τροφίμων με την κωδική ονομασία E124 [117]. Έχει μοριακό βάρος 604,48 g/mol και συντελεστή διάχυσης στο νερό  $D_c = 4 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Για την παρακολούθηση της συγκέντρωσης του ιχνηθέτη στην έξοδο του αντιδραστήρα χρησιμοποιήθηκε φωτομετρική ανάλυση με χρήση φορητού φασματοφωτόμετρου της εταιρείας HACH με κωδική ονομασία DR 2800™, αφού ο ιχνηθέτης είναι ερυθρού χρώματος και παρουσιάζει μέγιστη απορρόφηση στα 505-510nm. Για την εύρεση της εξάρτησης μεταξύ συγκέντρωσης και απορρόφησης κατασκευάστηκαν υδατικά διαλύματα του ιχνηθέτη, γνώστης συγκέντρωσης, και μετρήθηκε η απορρόφηση. Μέσω επεξεργασίας των αποτελεσμάτων σε περιβάλλον Microsoft Office Excel κατασκευάστηκαν οι καμπύλες αναφοράς, οι οποίες στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν για τη μετατροπή



των τιμών απορρόφησης των δειγμάτων σε τιμές συγκέντρωσης. Στη συνέχεια παρασκευάστηκε η τροφοδοσία υδατικού διαλύματος Ponceau 4R γνωστής συγκέντρωσης.

#### 4.1.2 Πειραματική διάταξη

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στον πιλοτικής κλίμακας PABR, ενεργού όγκου 77L. Η συχνότητα εναλλαγής του διαμερίσματος τροφοδοσίας ρυθμιζόταν μέσω ενός πίνακα PLC με τον οποίο ήταν συνδεδεμένες οι 12 αυτόματες ηλεκτροβάνες που είναι συνδεδεμένες στις εξωτερικές σωληνώσεις του αντιδραστήρα.

Το διάλυμα της τροφοδοσίας για τη διεξαγωγή των πειραμάτων ήταν υδατικό διάλυμα του ιχνηθέτη, συγκέντρωσης  $1\text{mol/m}^3$  και για την παρασκευή του χρησιμοποιήθηκε νερό δικτύου. Το δοχείο της τροφοδοσίας είχε όγκο 120L. Η περισταλτική αντλία που χρησιμοποιήθηκε είχε μέγιστη παροχή ίση με 1L/h και ήταν τύπου SEKO SPA (type PR1). Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων διεξάγονταν περιοδικά έλεγχοι και βαθμονομήσεις της αντλίας με σκοπό τη διασφάλιση της σταθερής τροφοδότησης του συστήματος.



**Εικόνα 4.1.1** Πειραματική διάταξη πιλοτικού PABR όπου φαίνονται: 1. ο αντιδραστήρας, 2. οι συστοιχίες των ηλεκτροβανών, 3. το δοχείο τροφοδοσίας, 4. η δοσομετρική αντλία, 5. το δοχείο συλλογής της εκροής, 6. ο σωλήνας τροφοδοσίας και 7. η εκροή του αντιδραστήρα

Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής που επελέγη για τα πειράματα ήταν ίσος με 4d. Σύμφωνα με προηγούμενες προσομοιώσεις [48] και πειράματα [118]–[120] σε εργαστηριακής κλίμακας PABR, ο συγκεκριμένος τύπος αντιδραστήρα παρουσιάζει βέλτιστη απόδοση (όσον αφορά την παραγωγικότητα σε βιοαέριο σε σχέση με το ρυθμό οργανικής φόρτισης) σε ιδιαίτερα χαμηλούς χρόνους παραμονής της τάξης των 3 έως 5 ημερών.

Η πειραματική μελέτη για την κατανομή χρόνου παραμονής πραγματοποιήθηκε σε 2 βήματα:

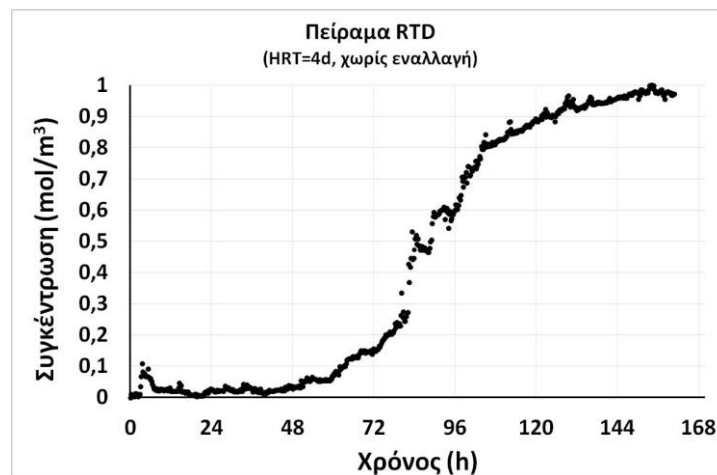
- Το πρώτο πείραμα πραγματοποιήθηκε με HRT=4d, χωρίς εναλλαγή του διαμερίσματος εισόδου της τροφοδοσίας, δηλαδή ο αντιδραστήρας λειτούργησε ως τυπικός ABR τεσσάρων διαμερισμάτων
- Το δεύτερο πείραμα πραγματοποιήθηκε με HRT=4d, με περίοδο εναλλαγής του διαμερίσματος εισόδου της τροφοδοσίας (T) ίση με 2d.

Τα δύο πειράματα ήταν πειράματα βηματικής επιβολής. Ο αντιδραστήρας αρχικά πληρώθηκε με νερό βρύσης και στη συνέχεια τροφοδοτήθηκε για 12 ημέρες (δηλαδή για 3 χρόνους παραμονής) ή ως τη στιγμή που η συγκέντρωση εξόδου εξισώθηκε με τη συγκέντρωση εισόδου. Η παρακολούθηση της συγκέντρωσης του ιχνηθέτη στην έξοδο του αντιδραστήρα πραγματοποιήθηκε με τη χρήση φωτόμετρου τύπου HACH-DR 2800<sup>TM</sup>. Η μετατροπή της απορρόφησης των δειγμάτων σε μονάδες συγκέντρωσης του ιχνηθέτη στο υδατικό διάλυμα, πραγματοποιήθηκε με τη χρήση πρότυπης καμπύλης βαθμονόμησης συγκέντρωσης-απορρόφησης που αναπτύχθηκε με υδατικά διαλύματα ιχνηθέτη σε συγκεντρώσεις από 0mol/m<sup>3</sup> έως 1mol/m<sup>3</sup>. Η μέγιστη απορρόφηση του ιχνηθέτη παρατηρείται στα 508nm [117]. Τέλος, η δειγματοληψία στην εκροή του αντιδραστήρα πραγματοποιείτο κάθε 15min για όλη τη διάρκεια των 2 πειραματικών κύκλων.

### 4.1.3 Αποτελέσματα εργαστηριακών πειραμάτων

#### 4.1.3.1 HRT=4d, Χωρίς εναλλαγή του διαμερίσματος τροφοδοσίας

Η καμπύλη της κατανομής του χρόνου παραμονής για το πείραμα με σταθερή είσοδο και έξοδο του αντιδραστήρα, παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1.2.



**Σχήμα 4.1.2** Απόκριση του PABR σε βηματική επιβολή της συγκέντρωσης εισόδου με HRT=4d και χωρίς εναλλαγή του διαμερίσματος εισόδου της τροφοδοσίας

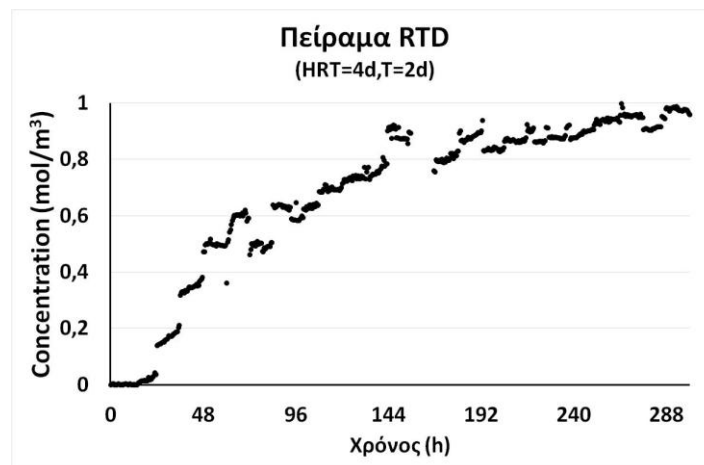
Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 4.1.2, το συνολικό χρονικό διάστημα του πειράματος ήταν μικρότερο των 12d (δηλαδή των 3 χρόνων παραμονής), καθώς η συγκέντρωση εξόδου εξισώθηκε με τη συγκέντρωση της εισόδου σε μικρότερο χρονικό διάστημα. Η απόκριση του συστήματος στη βηματική

επιβολή, δηλαδή η καμπύλη της συγκέντρωσης εξόδου, προσομοιάζει περισσότερο, όπως αναμενόταν, τη συμπεριφορά ενός αντιδραστήρα εμβολικής ροής (PFR).

Η καμπύλη παρουσιάζει μεγάλο χρονικό διάστημα όπου οι συγκεντρώσεις είναι πρακτικά μηδενικές, απότομη αύξηση της συγκέντρωσης εξόδου περίπου κατά τη χρονική στιγμή που ολοκληρώνεται ένας HRT ( $t=96\text{h}$ ) και εν συνεχεία ταχεία εξίσωση της συγκέντρωσης εξόδου με τη συγκέντρωση εισόδου. Ο ισοδύναμος αριθμός αντιδραστήρων συνεχούς λειτουργίας πλήρους ανάδευσης σε σειρά ( $N_R$ ) υπολογίστηκε ίσος με 16, επιβεβαιώνοντας το γεγονός ότι ο αντιδραστήρας λειτουργεί πρακτικά υπό συνθήκες εμβολικής ροής. Επιπλέον, ο νεκρός χώρος ( $V_d$ ) υπολογίστηκε ίσος με 25%. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζουν σημαντική απόκλιση από τα ευρήματα προηγούμενης μελέτης σε εργαστηριακής κλίμακας PABR [107], όπου σε ανάλογες συνθήκες λειτουργίας το  $N_R$  υπολογίστηκε ίσο με 7,15 και το  $V_d$  ίσο με 9,11%, γεγονός που αποτελεί ένδειξη ότι η κλιμάκωση μεγέθους σε συνδυασμό με τις τροποποιήσεις στη γεωμετρία του πιλότου οδηγούν σε διαφοροποιήσεις στον τύπο ροής και στη διαμόρφωση των νεκρών όγκων στο εσωτερικό του. Σημαντική είναι και η απόκλιση σε σχέση με τα αποτελέσματα από τα πειράματα του Σκιαδά Ι. (1998) σε PABR ενεργού όγκου 6L ( $N_R=4$ ) και 15L ( $N_R=5$ ), που πραγματοποιήθηκαν ωστόσο με πολύ χαμηλότερους χρόνους παραμονής (2h και 4h), γεγονός που ενδεχομένως επιδρά σημαντικά στις συνθήκες ανάμειξης [121].

#### 4.1.3.2 HRT=4d, T=2d

Κατά το πείραμα όπου πραγματοποιήθηκε εναλλαγή του διαμερίσματος εισόδου με συχνότητα 12h, δηλαδή με  $T=2\text{d}$ , η κατανομή της συγκέντρωσης του ιχνηθέτη σε σχέση με το χρόνο παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1.3.



Σχήμα 4.1.3 Απόκριση του PABR σε βηματική επιβολή της συγκέντρωσης εισόδου με HRT=4d και T=2d)

Στο Σχήμα παρατηρείται ότι η συγκέντρωση εξόδου εξισώθηκε με τη συγκέντρωση εισόδου μετά από διάστημα ίσο με 3 HRT δηλαδή διάστημα ίσο με 12d. Εφαρμόζοντας το μοντέλο δοχείων σε σειρά στα πειραματικά αποτελέσματα, προέκυψε ότι ο ισοδύναμος αριθμός αντιδραστήρων CSTR σε σειρά ( $N_R$ ) που περιγράφει βέλτιστα την υδραυλική συμπεριφορά του συστήματος είναι ίσος με 1, δηλαδή υπό τις συγκεκριμένες παραμέτρους λειτουργίας ο αντιδραστήρας πρακτικά συμπεριφέρεται ως αντιδραστήρας συνεχούς λειτουργίας και πλήρους ανάμειξης. Το αποτέλεσμα αυτό παρουσιάζει

σημαντική απόκλιση από τη μελέτη των [107], όπου ο  $N_R$  υπολογίστηκε ίσος με 6,93, όμως στα εν λόγω πειράματα ο HRT ήταν ίσος με 2d και η περίοδος εναλλαγής (T) ίση με 4d, ενώ η εναλλαγή πραγματοποιήθηκε με τη φορά της ροής.

Τέλος, ο νεκρός χώρος ( $V_d$ ) υπολογίστηκε ίσος με 39,64%, σημαντικά χαμηλότερος επίσης από τα αποτελέσματα της μελέτης των Liu et al. (2007) ( $V_d=7,57\%$ ), με τις τιμές ωστόσο να μην είναι ευθέως συγκρίσιμες λόγω των διαφορετικών συνθηκών λειτουργίας [107].

Από τους 2 κύκλους πειραμάτων για την κατανομή του χρόνου παραμονής του αντιδραστήρα, επιβεβαιώνεται πειραματικά η ευελιξία του πιλότου να λειτουργεί προσομοιάζοντας αποτελεσματικά τους δύο ιδανικούς τύπους ανάμειξης (πλήρης ανάμειξη ή εμβολική ροή) ανάλογα με τις παραμέτρους λειτουργίας που επιλέγονται. Ειδικότερα, από τα πειράματα φαίνεται ότι ο πιλότος μπορεί λειτουργήσει ως αντιδραστήρας πλήρους ανάμειξης στην περίπτωση που πραγματοποιείται συχνή εναλλαγή του διαμερίσματος τροφοδοσίας και ως αντιδραστήρας PFR στην περίπτωση που δεν πραγματοποιείται εναλλαγή.

**Πίνακας 4.1.1** Σύνοψη αποτελεσμάτων των πειραμάτων RTD

	HRT=4d, T=2d	HRT=4d, Χωρίς εναλλαγή
$C_{max}$ (mol/m <sup>3</sup> )	1	1
$N_R$	1	16
$V_d$ (%)	39.64	25.02

## 4.2 Τρισδιάστατη προσομοίωση υδραυλικής συμπεριφοράς σε περιβάλλον

### Comsol Multiphysics

Τα εργαστηριακά πειράματα κατανομής χρόνου παραμονής επιβεβαίωσαν τη δυνατότητα του πιλότου να λειτουργεί στις εναλλακτικά στις δύο ιδανικές καταστάσεις ροής, την εμβολική ή την πλήρη ανάμειξη, ανάλογα με την επιλογή της περιόδου εναλλαγής του διαμερίσματος τροφοδοσίας. Τα πειράματα αυτά πραγματοποιήθηκαν σε συγκεκριμένο χρόνο παραμονής (HRT=4d), ο οποίος επίσης ενδέχεται να επηρεάζει τις συνθήκες ανάμειξης στο εσωτερικό του αντιδραστήρα. Η πραγματοποίηση πειραμάτων κατανομής χρόνου παραμονής σε πολλούς διαφορετικούς συνδυασμούς λειτουργικών παραμέτρων είναι μια χρονοβόρος διαδικασία, η οποία θα μπορούσε να αποφευχθεί με την κατασκευή ενός μοντέλου, το οποίο μέσω της χρήσης ηλεκτρονικού υπολογιστή θα μπορούσε να προσομοιάσει τη υδραυλική συμπεριφορά του αντιδραστήρα σε πολλαπλούς συνδυασμούς λειτουργικών παραμέτρων.

Το μοντέλο αυτό, θα μπορούσε εν συνεχεία να φανεί χρήσιμο στη διαδικασία βελτιστοποίησης της γεωμετρίας του αντιδραστήρα ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε διεργασίας με σκοπό την περαιτέρω κλιμάκωση μεγέθους του πιλότου σε βιομηχανική κλίμακα.

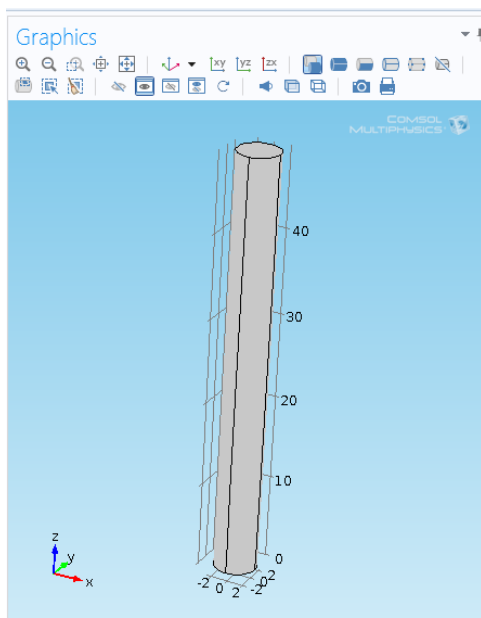
Για το σκοπό αυτό, επιχειρήθηκε η κατασκευή τρισδιάστατου μοντέλου της γεωμετρίας του πιλότου σε περιβάλλον Comsol Multiphysics. Αρχικά επιχειρήθηκε η επαλήθευση του μοντέλου με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα και εν συνεχεία πραγματοποιήθηκαν περαιτέρω προσομοιώσεις σε

διάφορους συνδυασμούς λειτουργικών παραμέτρων με σκοπό τη μελέτη της επίδρασής τους στην υδραυλική συμπεριφορά του πιλότου. Στην παρούσα ενότητα, παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία κατασκευής του τρισδιάστατου μοντέλου, καθώς και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

#### 4.2.1 Κατασκευή της γεωμετρίας

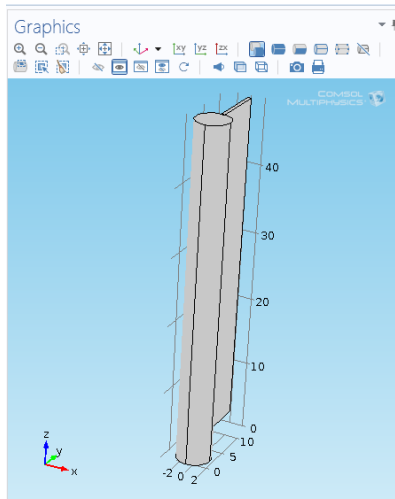
Ο ορισμός της γεωμετρίας αποτελεί το πρώτο κρίσιμο βήμα για τη συνέχεια της προσομοίωσης. Στόχος είναι η αναπαράσταση του χώρου στο οποίο δρα το ρευστό. Αυτό θα πρέπει επιτυγχάνεται με τη χρησιμοποίηση των κατά το δυνατόν απλούστερων γεωμετρικών σχημάτων και την όσο το δυνατόν μικρότερη επεξεργασία τους με άλγεβρα Boole, έτσι ώστε να προκύψουν λιγότεροι βαθμοί ελευθερίας και να μειωθεί ο χρόνος των υπολογισμών.

Το σχέδιο επιλέχθηκε να κατασκευαστεί σε τρισδιάστατη απεικόνιση, διότι το ρευστό δρα στον τρισδιάστατο χώρο μέσω των σωληνώσεων και των διαμερισμάτων του PABR. Ορίστηκε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων και ως αρχή των αξόνων το κέντρο των ομόκεντρων κυλίνδρων. Αρχικά κατασκευάζεται ο εσωτερικός κύλινδρος (bath) των PABR με την εντολή Geometry → Cylinder (Εικόνα 4.2.1).



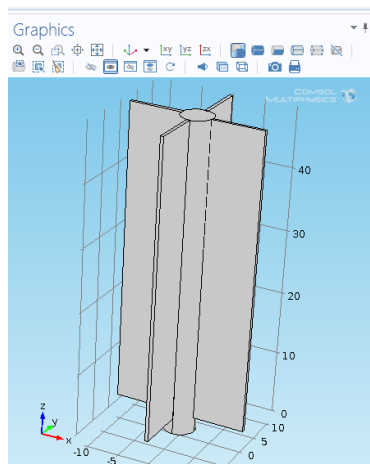
**Εικόνα 4.2.1** Γεωμετρία εσωτερικού κυλίνδρου εργαστηριακού PABR (Comsol)

Στη συνέχεια κατασκευάζονται τα τοιχώματα που χωρίζουν τον αντιδραστήρα σε διαμερίσματα (Wall) και τα τοιχώματα των ανακλαστήρων (Baffle) μέσω της εντολής Block (Εικόνα 4.2.2) Τα Baffles τοποθετούνται 9,8cm πάνω από τον πυθμένα και 0,1 cm προς το εσωτερικό του κυλίνδρου. Η τελευταία κίνηση γίνεται για να μη δημιουργηθούν άσκοπες γραμμές (edges) κατά τη συναρμολόγηση των στοιχείων.

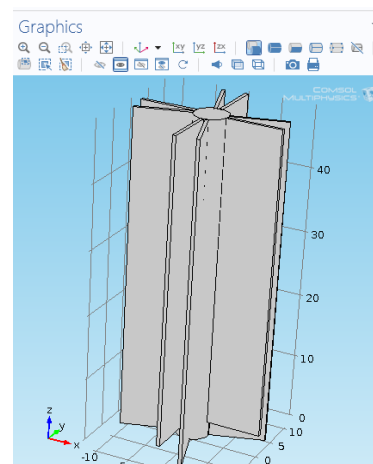


**Εικόνα 4.2.2** Γεωμετρία τοιχωμάτων ανακλαστήρα (Baffle) εργαστηριακού PABR

Για να αποφευχθεί η κατασκευή του κάθε τοιχώματος ξεχωριστά, επιλέγεται η εντολή Geometry → Transforms → Rotate και για το κατασκευασμένο τοίχωμα του ανακλαστήρα (Rotate 1) (Εικόνα 4.2.3) και του διαμερίσματος (Rotate 2) (Εικόνα 4.2.4) ορίζεται ως βήμα περιστροφής οι 90 μοίρες. Οι τιμές του βήματος είναι τέτοιες ώστε η κλίση των τοιχωμάτων των ανακλαστήρων (Baffle) σε σχέση με αυτά των διαμερισμάτων να είναι 19 μοίρες.

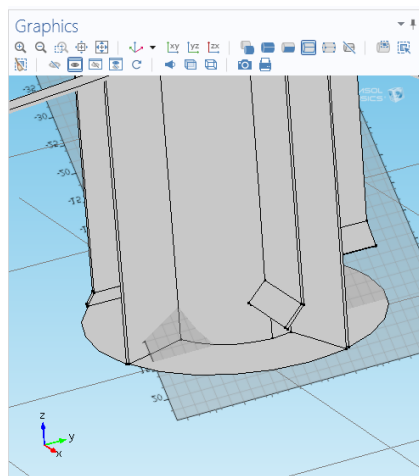


**Εικόνα 4.2.3** Κατασκευή τοιχωμάτων ανακλαστήρων (Baffle) με εντολή Rotate



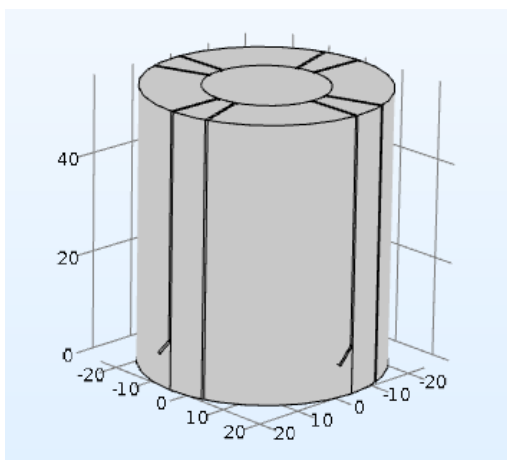
**Εικόνα 4.2.4** Κατασκευή τοιχωμάτων διαμερισμάτων (Wall) με εντολή Rotate

Η κατασκευή των ανακλαστήρων απαιτούσε την εργασία πάνω στην επιφάνεια των τοιχωμάτων των ανακλαστήρων. Αυτό κατέστη δυνατό με την εντολή Geometry → Work plane. Η επιφάνεια των ανακλαστήρων έχει σχήμα ορθογώνιου παραλληλογράμμου. Οι ανακλαστήρες έχουν κλίση ως προς τα θετικά του άξονα z των τοιχωμάτων κατά 137 μοίρες (Εικόνα 4.2.5). Για την κατασκευή του ανακλαστήρα σχεδιάστηκε τόξο του κύκλου 36 μοιρών σε μορφή Solid με βάση την εντολή Plane Geometry → Rectangle από το πεδίο Work plane.



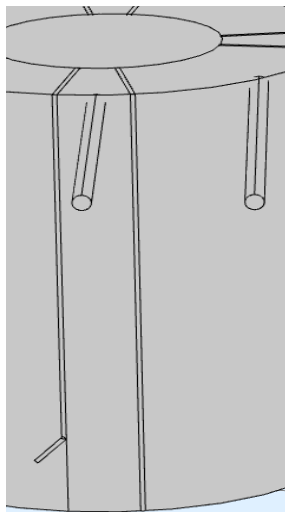
**Εικόνα 4.2.5** Κατασκευή ανακλαστήρων με Χρήση Work Plane

Η διαδικασία συνεχίστηκε με την κατασκευή του εξωτερικού κυλίνδρου του αντιδραστήρα με χρήση της εντολής Cylinder (Εικόνα 4.2.6).



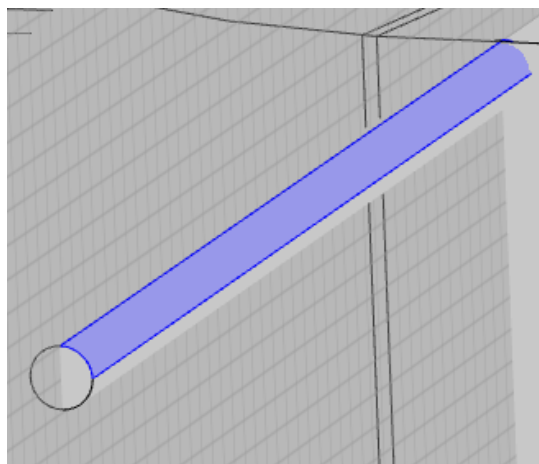
**Εικόνα 4.2.6** Το εξωτερικό τοίχωμα του αντιδραστήρα

Σε αυτό το μοντέλο προστέθηκαν οι σωληνώσεις που ενώνουν τα διαμερίσματα μεταξύ τους, αλλά παράλληλα λειτουργούν και ως βάνες για την εναλλαγή του σημείου τροφοδοσίας και συνεπώς του αντίστοιχου διαμερίσματος. Πιο συγκεκριμένα, τοποθετήθηκαν δύο ευθείες παράλληλες σωληνώσεις.



**Εικόνα 4.2.7** Τοποθέτηση σωληνώσεων εισόδου - εξόδου στο μοντέλο του αντιδραστήρα

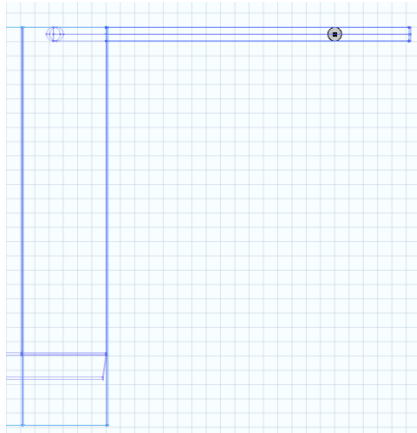
Για την σύζευξη των δύο σωληνώσεων χρησιμοποιήθηκε η εισαγωγή ενός περιβάλλοντος εργασίας (Work Plane), πάνω στον άξονα που διέρχεται από το κέντρο του κυλίνδρου και κάθετο στη κορυφή του αντιδραστήρα. Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται ο τρόπος τοποθέτησης του περιβάλλοντος εργασίας χρησιμοποιώντας έναν άξονα και μια επιφάνεια για τον ακριβή ορισμό της θέσης του.



**Εικόνα 4.2.8** Εισαγωγή "Work Plane" χρησιμοποιώντας τη χρωματισμένη επιφάνεια

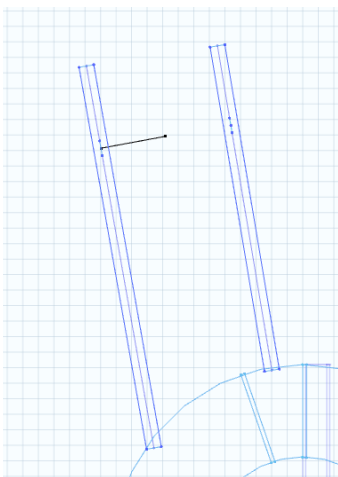
Αντιστοίχως, προστέθηκε ένα δεύτερο περιβάλλον εργασίας στον δεύτερο σωλήνα. Ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιήθηκαν τα δύο περιβάλλοντα εργασίας είναι γιατί επιτρέπουν την εισαγωγή ενός σχήματος δύο διαστάσεων επάνω στο ανεπτυγμένο σε τρεις διαστάσεις μοντέλο. Επιλέχθηκε στο Work Plane > Plane Geometry και στη συνέχεια την εισαγωγή κύκλου, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, δίνεται η ακτίνα του να είναι ίση με την ακτίνα της σωληνώσεως και να απέχει από τον αντιδραστήρα όσο απέχουν και οι βάνες από αυτόν.





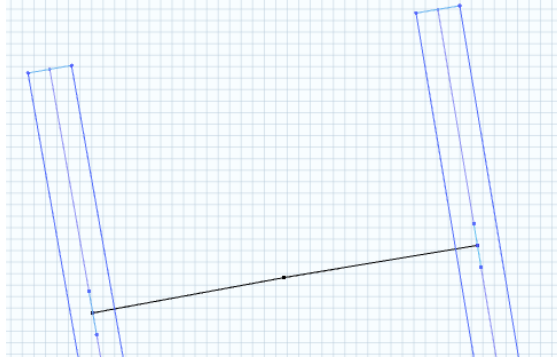
**Εικόνα 4.2.9** Εισαγωγή σημείου σύζευξης στο "Work Plane", σωληνώσεων εισόδου - εξόδου

Επίσης, εισήχθη και ένα τρίτο περιβάλλον εργασίας το οποίο όμως τοποθετήθηκε πάνω στον άξονα «xy» και σε ύψος ίσο με αυτό των σωλήνων εισόδου και εξόδου. Αυτή τη φορά στην επιλογή της γεωμετρίας Plane Geometry, επιλέχθηκε το Bezier Polygon και προστέθηκε ένα γραμμικό κομμάτι (linear segment) που έχει ως αρχή το κέντρο ενός εκ των δύο κύκλων που ορίστηκαν νωρίτερα και τέλος το μέσο της μεταξύ τους απόστασης.



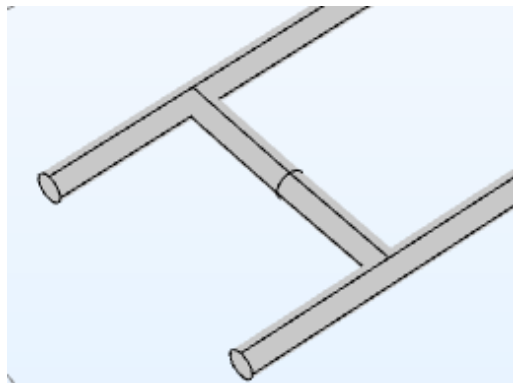
**Εικόνα 4.2.10** Κατασκευή Ευθύγραμμου Τμήματος, πάνω στο οποίο θα δημιουργηθεί ο σωλήνας σύζευξης εισόδου-εξόδου

Όμοια, εισήχθη και το δεύτερο Bezier Polygon επιλέγοντας πάλι ευθύγραμμο τμήμα μόνο που έχει ως αφετηρία το κέντρο του δεύτερου κύκλου και τέλος, πάλι, το μέσο μεταξύ των δύο κύκλων. Το αποτέλεσμα που προκύπτει παρουσιάζεται στην εικόνα που ακολουθεί:



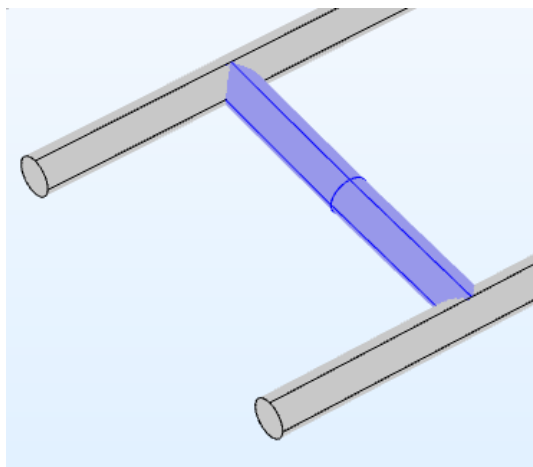
**Εικόνα 4.2.11** Ολοκλήρωση του Ευθύγραμμου Τμήματος, πάνω στο οποίο θα δημιουργηθεί ο σωλήνας σύζευξης εισόδου - εξόδου

Η σύζευξη μεταξύ των δύο σωλήνων ολοκληρώθηκε με την εντολή Sweep από τη Γεωμετρία, η οποία δέχεται μια επιφάνεια και έναν άξονα, κατά μήκος του οποίου επιμηκύνεται η επιφάνεια δημιουργώντας τρισδιάστατα σχήματα. Επιλέχθηκε η επιφάνεια καθώς και ο άξονας πάνω στον οποίο δημιουργήθηκε το πρώτο μισό του σωλήνα. Επαναλήφθηκαν τα ίδια βήματα και για το δεύτερο κύκλο με το υπόλοιπο μισό του ευθύγραμμου τμήματος που δημιουργήθηκε από τα περιβάλλοντα εργασίας. Προέκυψε το ακόλουθο αποτέλεσμα:



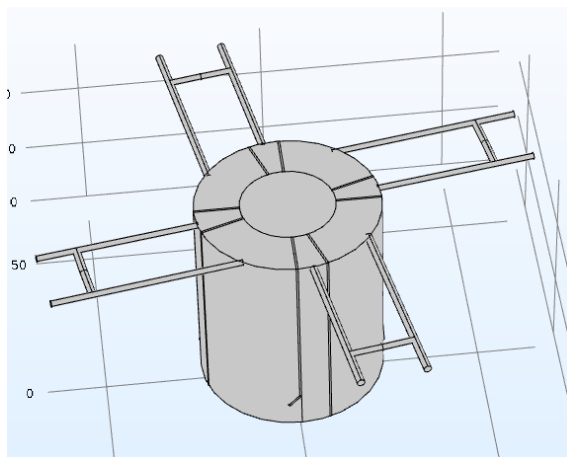
**Εικόνα 4.2.12** Αποτέλεσμα Δημιουργίας Σωλήνωσης Σύζευξης

Στη συνέχεια, προστέθηκε από Geometry>Booleans and Partitions η επιλογή Union, που ενώνει δύο αντικείμενα, στη συγκεκριμένη περίπτωση διατηρήθηκε η εσωτερική επιφάνεια, η οποία χρειαζόταν για την εισαγωγή συνθηκών προκειμένου να προσομοιωθούν οι βάνες. Επιλέχθηκαν, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.2.13 τα δύο Sweeps και με την ενέργεια αυτή κατέστη δυνατή η ένωσή τους.



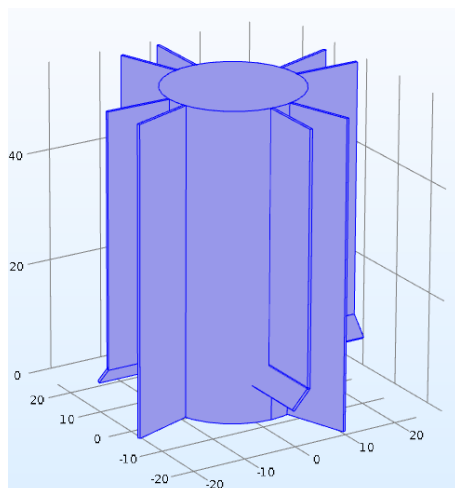
**Εικόνα 4.2.13** Ένωση Σωληνώσεων Εισόδου - Εξόδου - Σύζευξης

Αφού επιτεύχθηκε η σύζευξη δύο σωληνώσεων εκκρεμούσε η ένωση των υπόλοιπων ζευγών. Από την επιλογή *Geometry > Transforms* επιλέχθηκε η ενέργεια *Rotate* και η ένωση που δημιουργήθηκε και ορίστηκε το εύρος των μοιρών που θα γινόταν η περιστροφή. Ορίστηκε επίσης ένα βήμα για τη περιστροφή, καθορίζοντας ανά πόσες μοίρες θα τοποθετείται το επιλεγμένο αντικείμενο. Παρατίθεται το τελικό αποτέλεσμα:



**Εικόνα 4.2.14** Τοποθέτηση του Σωλήνα Σύζευξης σε κάθε διαμέρισμα του Αντιδραστήρα

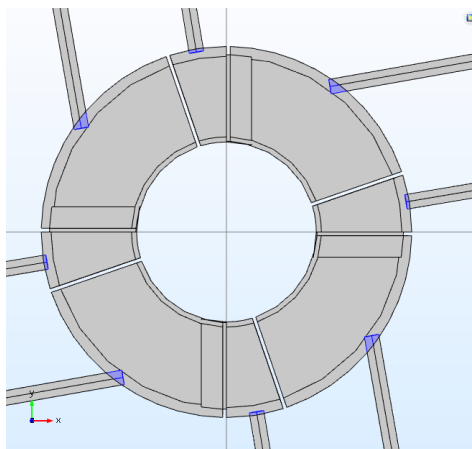
Με την γεωμετρία να έχει ολοκληρωθεί επιλέχθηκε ο όγκος στον οποίο γίνεται η ροή και επικεντρώνεται η μελέτη, εξαιρώντας έτσι τον εσωτερικό κύλινδρο και τα πτερύγια, απλοποιώντας την γεωμετρία, προκειμένου να απλοποιηθεί το πρόβλημα. Αυτό επιτεύχθηκε από το *Geometry > Booleans and Partitions* με την ενέργεια *Difference*, επιλέγοντας τους εξωτερικούς όγκους και αφαιρώντας από αυτούς τους εσωτερικούς που αναφέρθηκαν. Στη συνέχεια, απεικονίζεται ο όγκος που αφαιρέθηκε με την ενέργεια *Difference*:



**Εικόνα 4.2.15** Όγκος του Αντιδραστήρα που Εξαιρέθηκε από του Υπολογισμούς

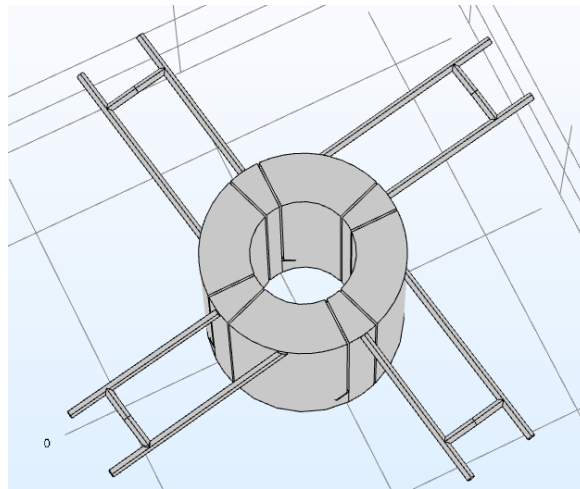
Πριν ολοκληρωθεί η δημιουργία της γεωμετρίας με την εντολή Form Union, αφαιρέθηκαν συγκεκριμένες επιφάνειες που βρίσκονταν εντός του όγκου ροής υγρού και θα επιβάρυναν το πρόβλημα. Οι συγκεκριμένες επιφάνειες βρίσκονται στα σημεία που χρησιμοποιήθηκε η εντολή Sweep καθώς και στα σημεία που ενώνονται οι σωλήνες με τον κύριο κύλινδρο του αντιδραστήρα.

Στην εικόνα που παρατίθεται γίνεται αντιληπτό ποιες είναι αυτές οι επιφάνειες. Η εντολή που χρησιμοποιήθηκε βρίσκεται στη Geometry > Virtual Operations > Ignore Faces. Μετά τη συγκεκριμένη προσθήκη επιλέγονται οι ανεπιθύμητες επιφάνειες που θα αγνοηθούν.



**Εικόνα 4.2.16** Επιφάνειες που εξαιρέθηκαν από τη Γεωμετρία, στην Ένωση Σωληνώσεων - Δοχείου

Τελικά προέκυψε η γεωμετρία που θα χρησιμοποιηθεί για τους υπολογισμούς και παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα:



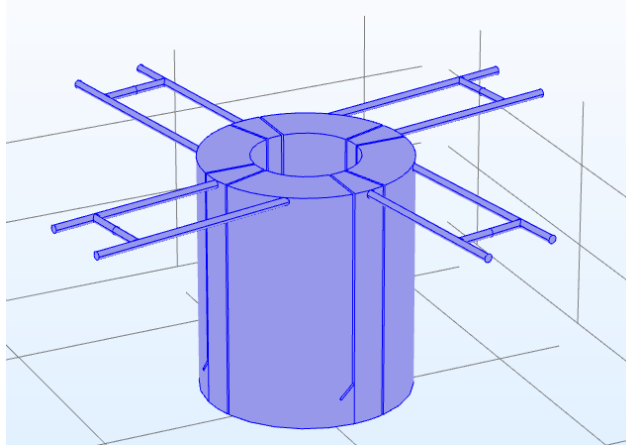
Εικόνα 4.2.17 Τελική Εικόνα της Γεωμετρίας του Μοντέλου

#### 4.2.2 Ορισμός των υλικών

Μετά το καθορισμό της γεωμετρίας ακολούθησε ο ορισμός των υλικών στους διάφορους όγκους (Domains) και στις επιφάνειες/όρια (Boundaries) του αντιδραστήρα. Χρησιμοποιώντας τη βιβλιοθήκη υλικών του Comsol Multiphysics®, από τα «Built-in» στοιχεία επιλέχθηκε το νερό σε υγρή μορφή (Water, liquid) και ο χάλυβας (Steel AISI 4340). Το νερό προτιμήθηκε γιατί τα πειράματα RTD διεξήχθησαν στον αντιδραστήρα με υδατικό διάλυμα παρουσία ιχνηθέτη ενώ ο χάλυβας γιατί το κέλυφος του αντιδραστήρα αποτελείται από ανοξείδωτο ατσάλι. Μετά την επιλογή των υλικών, ακολούθησε η αντιστοίχισή τους στον εκάστοτε όγκο και επιφάνεια. Για τον χάλυβα έγινε η παραδοχή ότι και οι σωληνώσεις είναι κατασκευασμένες από αυτόν.

#### 4.2.3 Διαμόρφωση των μοντέλων για τη μελέτη της ροής

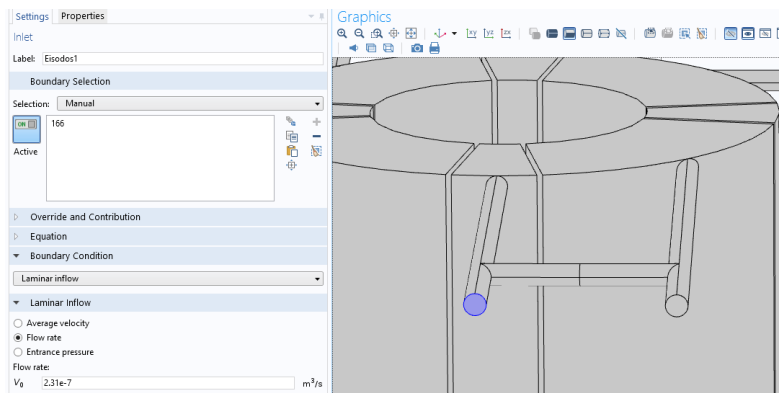
Μετά τον καθορισμό των υλικών για τους όγκους του αντιδραστήρα πρέπει να αποφασιστεί ο τύπος της ροής εντός του και ο τρόπος που γίνεται η διάχυση του ιχνηθέτη. Υπολογίστηκε ο αριθμός Reynolds ( $Re=0,89$ ) και έγινε η παραδοχή ότι η ροή είναι της μορφής Stokes ή Creeping flow. Επιλέγοντας το μοντέλο και την επιλογή «Add Physics» και στη συνέχεια «Fluid Flow > Single Phase Flow > Creeping Flow». Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα, καθορίζονται τα πεδία ορισμού (Domains) για τη συγκεκριμένη ροή που είναι όλος ο όγκος του αντιδραστήρα. Η ροή θεωρείται ασυμπίεστη καθώς δεν μεταβάλλεται η πυκνότητα του νερού.



**Εικόνα 4.2.18** Επιλογή Όγκου Ελέγχου για τον ορισμό της ροής του νερού

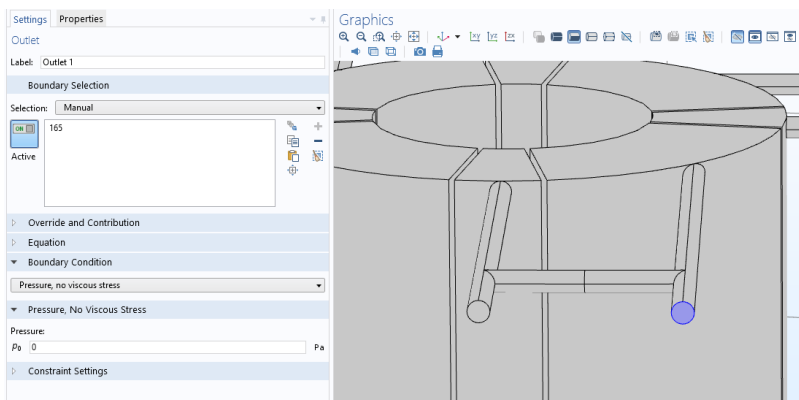
Αφού καθορίστηκαν οι ιδιότητες του ρευστού επιλέχθηκε η συνθήκη μη ολίσθησης «No Slip» για τα τοιχώματα και τους σωλήνες του μοντέλου και οι τιμές για τη πυκνότητα και το ιξώδες του νερού αυτόματα λαμβάνονται από το υλικό που ορίστηκε στον συγκεκριμένο όγκο ελέγχου.

Στη συνέχεια, επιλέγοντας το «Creeping Flow» και «Inlet» προστέθηκαν τέσσερις οριακές συνθήκες που αντιπροσωπεύουν τις τέσσερις εισόδους του αντιδραστήρα, πιο συγκεκριμένα επιλέχθηκε «Laminar Inflow», δηλαδή η στρωτή ροή χωρίς συνθήκες αντιρροής και δόθηκε ο ρυθμός της ροής υπολογισμένος για κάθε διαφορετικό χρόνο παραμονής. Αντιστοιχίστηκαν οι συνθήκες αυτές με τις επιφάνειες που υπάρχει εισροή υγρού:

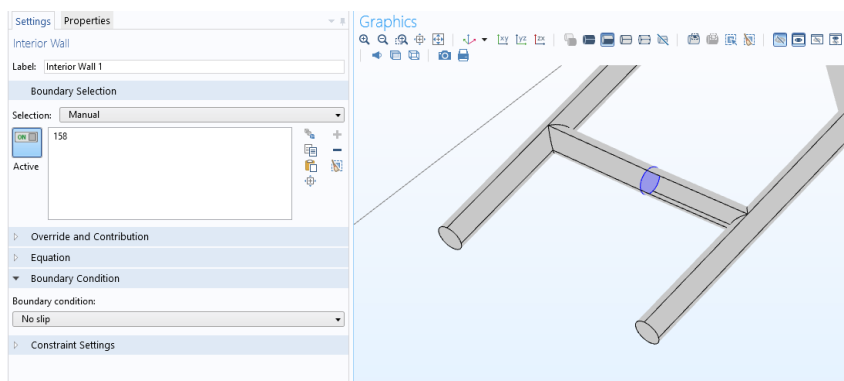


**Εικόνα 4.2.19** Επιφάνεια Εισόδου, εισροής του υδατικού διαλύματος ιχνηθέτη

Επίσης, προστέθηκαν και τέσσερις έξοδοι, «Outlet», με τον ίδιο τρόπο όπως οι Είσοδοι και δόθηκε η συνθήκη «Pressure, No Viscous Stress», γιατί η εκροή γίνεται σε ατμοσφαιρική πίεση και εξαρτάται μόνο από την ταχύτητα εισόδου. Αντιστοιχίστηκαν οι τέσσερις συνθήκες με τις επιφάνειες που γίνεται η εκροή του υγρού:



**Εικόνα 4.2.20** Επιφάνεια Εξόδου, εκροής του υδατικού διαλύματος ιχνηθέτη



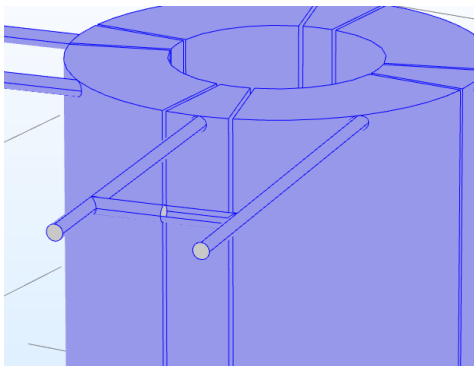
**Εικόνα 4.2.21** Επιλογή Ενδιάμεσης Επιφάνειας για τη φραγή της ροής

Η τελευταία συνθήκη που προστέθηκε σχετικά με τη ροή του ρευστού εντός του αντιδραστήρα είναι αυτή μέσα από την οποία προσομοιώνονται οι βάνες. Επιλέχθηκε «Creeping Flow > Interior Wall» και προστέθηκαν τέσσερα εσωτερικά τοιχώματα. Κατόπιν επιλέγονται και προσδίδεται η οριακή συνθήκη «No Slip» καθώς δεν επιθυμείται ολίσθηση στη συγκεκριμένη επιφάνεια. Για την εφαρμογή της συγκεκριμένης συνθήκης επιλέχθηκε στη γεωμετρία η επιφάνεια που διατηρήθηκε από τη σύζευξη των δύο «Sweeps», δηλαδή το μέσο του σωλήνα που ενώνει τις σωληνώσεις εισόδου και εξόδου, όπως φαίνεται παρακάτω:

Για την πλήρη περιγραφή του πειράματος Κατανομής Χρόνου Παραμονής είναι απαραίτητη και η προσθήκη του μοντέλου «Transport of Diluted Species». Η μάζα του ιχνηθέτη μεταφέρεται εντός του νερού με το μηχανισμό της συναγωγής, οπότε επιλέχθηκε «Convection» στους μηχανισμούς μεταφοράς και σημειώθηκαν όλοι οι όγκοι του αντιδραστήρα ως ενεργοί όγκοι όπως έγινε με το νερό. Η διάχυση θεωρείται ιστροπική και ο συντελεστής διάχυσης ίσος με  $4e-10 \text{ (m}^2/\text{s)}$ .

Όπως στη ροή του νερού επιλέχθηκαν τα τοιχώματα από τα οποία δε διέρχεται το υγρό έτσι και με τη μεταφορά του ιχνηθέτη επιλέχθηκαν οι επιφάνειες που δε διαπερνώνται και η επιλογή αυτών απεικονίζεται παρακάτω. Επιλέχθηκαν όλα τα τοιχώματα του αντιδραστήρα και των σωληνώσεων

εκτός από τις επιφάνειες που έχουν οριστεί ως είσοδοι, έξοδοι ή τα ενδιάμεσα τοιχώματα στις συζεύξεις:



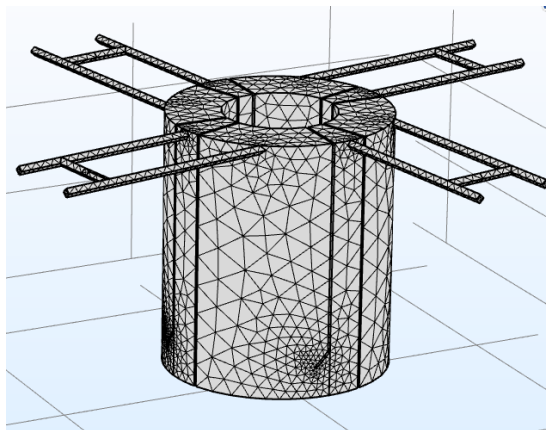
**Εικόνα 4.2.22** Μη διαπερατές Επιφάνειες από τον ιχνηθέτη

Φαίνεται η εξαίρεση των επιφανειών που διαπερνώνται από τον ιχνηθέτη, σκιαγραφημένες με γκρι χρώμα.

Αφού ορίστηκαν οι βασικές συνθήκες για τη μεταφορά του ιχνηθέτη πρέπει να οριστούν οι είσοδοι και οι έξοδοί του, που είναι ίδιες με τις αντίστοιχες εισόδους και εξόδους του ρευστού. Προστίθενται από επιλογή του «Transport of Diluted Species» τέσσερις «Inflows» και τέσσερις «Outflows» και αντιστοιχίζονται στις επιφάνειες των εισόδων και των εξόδων. Επιπλέον ορίστηκε η τιμή της συγκέντρωσης του ιχνηθέτη ίση με  $1 \text{ mol/m}^3$ .

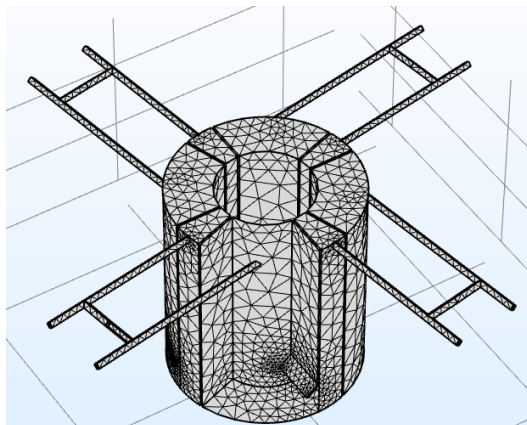
#### 4.2.4 Δημιουργία πλέγματος

Μετά τον πλήρη ορισμό του προβλήματος και πριν την επιλογή του τρόπου επίλυσής του διαμορφώθηκε το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων. Έγινε επιλογή ελεγχόμενου πλέγματος από το πρόγραμμα χωρίς να παρεμβαίνει ο χρήστης στη δημιουργία του πέρα από την επιλογή μεγέθους των στοιχείων με τραχύ μέγεθος που μειώνει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων αλλά επίσης μειώνει το χρόνο που απαιτεί η επίλυση του κάθε υπολογισμού και μειώνει και την απαίτηση σε υπολογιστική ισχύ. Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνονται τα αποτελέσματα της δημιουργίας του πλέγματος:



**Εικόνα 4.2.23** Πλέγμα που κατασκευάστηκε στο Μοντέλο





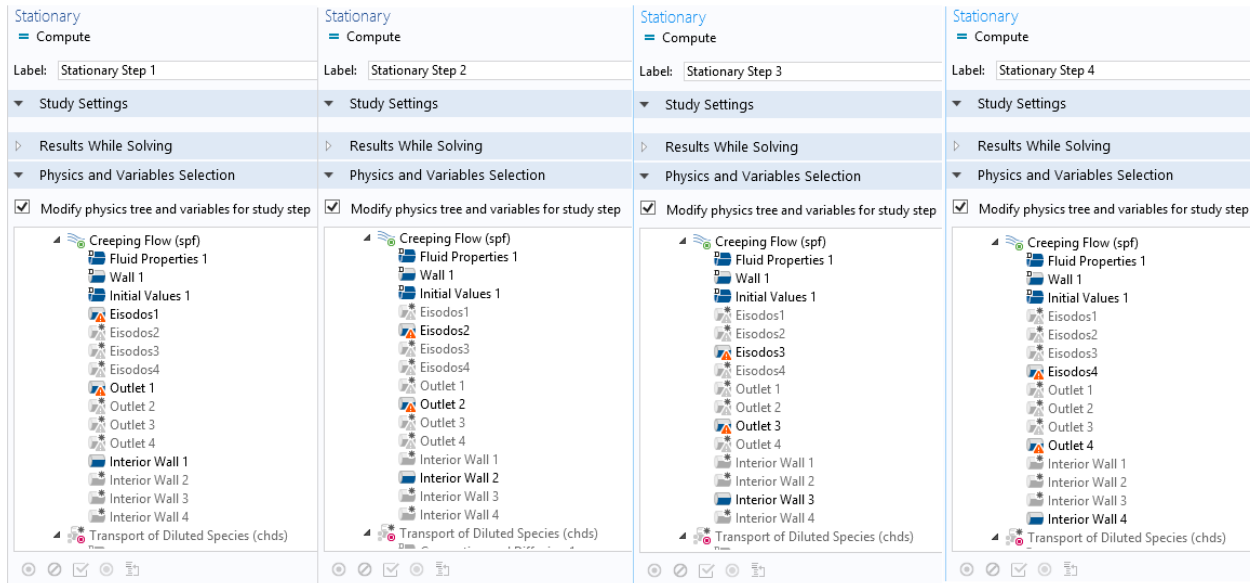
**Εικόνα 4.2.24** Πλέγμα που κατασκευάστηκε στο μοντέλο, με προβολή του εσωτερικού μέρους του διαμερίσματος

#### **4.2.5 Διαμόρφωση της μελέτης**

Θα αποτελείται από δύο μέρη η επίλυση του προβλήματος που έχει καταστρωθεί ως τώρα. Το πρώτο μέρος αφορά την επίλυση του προβλήματος σε μόνιμες συνθήκες χωρίς προσθήκη ιχνηθέτη για να εξαχθεί το προφίλ της ταχύτητας και στη συνέχεια το δεύτερο μέρος θα χρησιμοποιεί τα ήδη υπολογισμένα προφίλ της ταχύτητας για να υπολογίσει σε εξαρτημένες από το χρόνο συνθήκες τη διάχυση του ιχνηθέτη εντός του αντιδραστήρα.

##### **4.2.5.1 Μόνιμες συνθήκες**

Προστίθεται ένα «Stationary Study» και στη συνέχεια επιλέγεται και προστίθενται και άλλα τρία «Stationary Study Steps». Χρειάζονται τέσσερα από αυτά γιατί υπάρχουν τέσσερα προφίλ ταχύτητας, κάθε ένα από τα οποία προκύπτει από ένα ζεύγος εισόδου-εξόδου. Για να ενεργοποιηθούν απομονωμένα τα ζεύγη εισόδου-εξόδου-μεσαίου τοιχώματος χρησιμοποιείται η δυνατότητα τροποποίησης των φυσικών σχέσεων που ορίστηκαν στη «Μελέτη της ροής». Επιλέγοντας το «Step 1: Stationary» και την αντίστοιχη δυνατότητα «Modify Physics Tree and Variables for Study Step» απενεργοποιείται πλήρως το κομμάτι «Transport of Diluted Species» μαζί με τις τρεις εισόδους, τις τρεις εξόδους και τα τρία ενδιάμεσα τοιχώματα που δεν χρησιμοποιούνται. Γίνονται αντίστοιχες τροποποιήσεις στα υπόλοιπα τρία «Study Steps» δηλαδή απενεργοποιούνται κάθε φορά όλες οι εισοδοί, οι εξοδοί και τα ενδιάμεσα τοιχώματα εκτός από μια πλευρά από τις τέσσερις ανάλογα με την εναλλαγή διαμερισμάτων στον αντιδραστήρα. Παρατίθενται εικόνες με τα τέσσερα «Study Steps» και τις επιλογές που έχουν γίνει σε καθένα από αυτά:

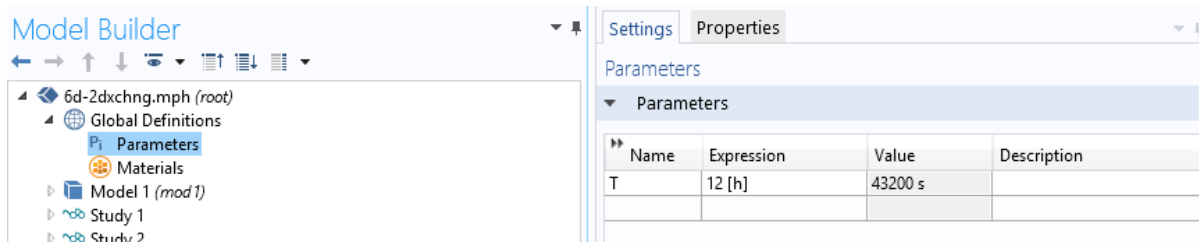


**Εικόνα 4.2.25** Εναλλαγή των Εισόδων - Εξόδων - Ενδιάμεσων Τοιχωμάτων

Στη συνέχεια πραγματοποιείται η διαμόρφωση του επιλύτη, επιλέγοντας το «Solver Configuration» και προσθέτοντας έναν «Stationary Solver», εμφανίζονται περαιτέρω επιλογές. Με την εξής σειρά επιλέγονται «Compile Equations: Stationary», «Dependent Variables», «Solvers > Stationary Solver 1», «Other > Solution Store» τέσσερις φορές μία για κάθε «Study Step». Στη συνέχεια, αντιστοιχίζονται τα «Study Steps» για το εκάστοτε «Compile Equations: Stationary», «Dependent Variables», «Stationary Solver» και χρησιμοποιείται το «Solution Store» για την αποθήκευση κάθε λύσης, οπότε και προκύπτουν τα τέσσερα προφίλ ταχύτητας.

#### 4.2.5.2 Μεταβατικές συνθήκες

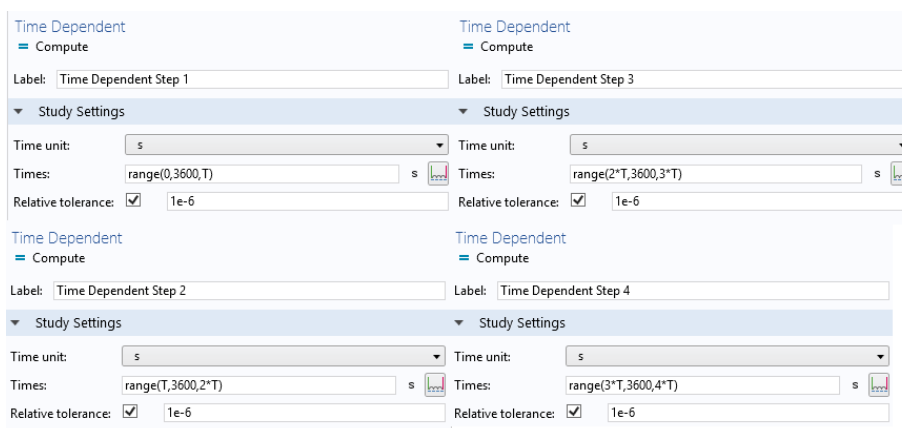
Αρχικά, για να διευκολυνθεί η εισαγωγή διαφορετικών χρόνων λειτουργίας για το κάθε διαμέρισμα ανάλογα με τη συχνότητα λειτουργίας προστίθεται μια παράμετρος που θα μεταβάλλεται. Ανάλογα αν χρειάζεται ο χρόνος λειτουργίας του διαμερίσματος να είναι 12 ώρες ή 24 ώρες, αυτό επιτυγχάνεται επιλέγοντας το «Parameters» που βρίσκεται κάτω από το «Global Definitions» και όπως φαίνεται στη παρακάτω εικόνα χρησιμοποιείται η μεταβλητή «T», όπου αλλάζοντας την τιμή της μπορούν να προσομοιωθούν διαφορετικοί χρόνοι εναλλαγής του κάθε διαμερίσματος.



**Εικόνα 4.2.26** Εισαγωγή Παραμέτρου για την διευκόλυνση της μεταβολής της Περιόδου Εναλλαγής

Ο ολικός χρόνος που γίνεται το κάθε τρέξιμο είναι τρεις φορές ο χρόνος παραμονής του, δηλαδή για τέσσερις ημέρες χρόνο παραμονής θα χρειαστεί το τρέξιμο να είναι για δώδεκα ημέρες. Ανάλογα με το πόσες ώρες επιθυμείται να είναι ο χρόνος εναλλαγής των διαμερισμάτων επηρεάζονται και τα αντίστοιχα «Time Dependent Studies» που θα χρειαστούν, δηλαδή για  $T_{\text{διαμερίσματος}}=12$  ώρες και Χρόνο Παραμονής = 4 ημέρες θα χρειαστούν 48 ώρες, δηλαδή για το μισό χρόνο παραμονής χρειάζονται τέσσερα «Time Dependent Studies», άρα για ένα πλήρη χρόνο παραμονής στον αντιδραστήρα απαιτούνται οχτώ «Time Dependent Studies». Επομένως, για διάρκεια πειράματος ίση με τρεις φορές το χρόνο παραμονής απαιτούνται συνολικά 24 «Time Dependent Studies». Αντίστοιχα υπολογίζεται και για τους υπόλοιπους συνδυασμούς Χρόνου Παραμονής με Συχνότητα Εναλλαγής.

Μετά την εισαγωγή των «Time Dependent Studies» επιλέγεται το πρώτο και ορίζεται το εύρος του χρόνου για το οποίο θα τρέξει καθώς και το βήμα, για το δεύτερο «Time Dependent Study» διατηρείται ίδιο το βήμα και χρησιμοποιείται ο τελικός χρόνος του προηγούμενου «Time Dependent Study» ως αρχικός και τοποθετείται και το επιθυμητό τέλος αυτού, ανάλογα συμπληρώνονται οι χρόνοι τρεξίματος των υπόλοιπων «Time Dependent Studies». Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται ο καθορισμός των χρονικών ορίων σε ένα πρόβλημα με περίοδο εναλλαγής ίσο με 12 ώρες.



**Εικόνα 4.2.27** Ορισμός χρονικών ορίων, χρησιμοποιώντας τη Παράμετρο της Περιόδου Εναλλαγής

Σε κάθε μια καθορίζεται βήμα ίσο με 1 ώρα, δηλαδή ζητείται καταγραφή της λύσης κάθε 3600 δευτερόλεπτα. Ο επιλύτης αφήνεται να βηματίζει ελεύθερα χωρίς να εξαρτάται από το βήμα που ορίζεται για την παρουσίαση των λύσεων.

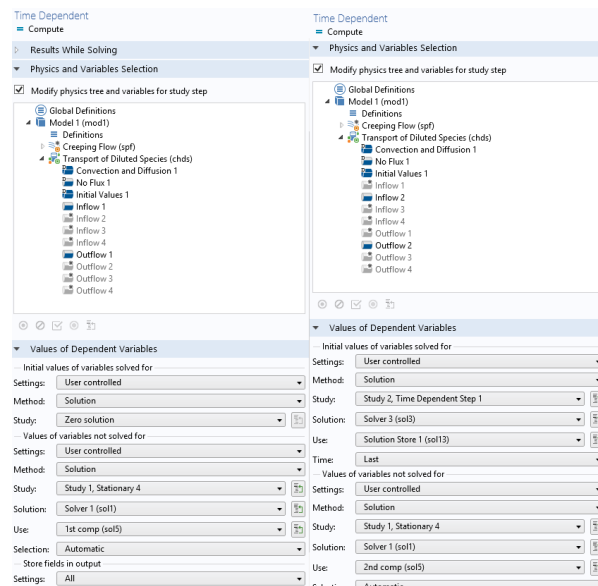
Ακολουθεί η επιλογή «Modify Physics Tree and Variables for Study Step». Αυτήν τη φορά απενεργοποιείται η μελέτη των ροών «Creeping Flow» και ενεργοποιείται η μελέτη διάχυσης του ιχνηθέτη «Transport of Diluted Species», επιλέγοντας να διατηρηθούν ως ενεργά το «Inflow 1 & Outflow 1» καθώς υπάρχει εισαγωγή του ιχνηθέτη από το πρώτο διαμέρισμα.

Στους υπολογισμούς με Μεταβατικές Συνθήκες χρόνου πρέπει να οριστούν οι αρχικές τιμές των μεταβλητών που επιλύονται και οι αντίστοιχες αρχικές τιμές των μεταβλητών που δεν επιλύονται. Στο συγκεκριμένο «Study» δεν υπάρχουν αρχικές τιμές για τις συγκεντρώσεις καθώς είναι το πρώτο επομένως γίνεται η επιλογή «Method: Initial Solution, Study: Zero Solution», ξεκινάει η επίλυση από

την αρχή. Επιπλέον, ορίστηκαν οι τιμές για τις μεταβλητές που δεν επιλύονται, δηλαδή για την ταχύτητα, καθώς έχει απενεργοποιηθεί όπως προαναφέρθηκε. Αυτό επιτυγχάνεται επιλέγοντας «Initial Values of Variables not Solved for» και επιλέγοντας «Method: Solution > Study: Study 1 > Solution: Solver 1 > Use: Stored Solution 1», οδηγείται το πρόγραμμα στον Επιλύτη σε Μόνιμες Συνθήκες (Solver 1) και στην λύση για το πρώτο προφίλ ταχύτητας, με είσοδο και έξοδο από το πρώτο διαμέρισμα του αντιδραστήρα.

Στο δεύτερο «Time Dependent Study» με τις κατάλληλες αλλαγές στο εύρος του χρόνου που απεικονίζονται παραπάνω, διατηρείται απενεργοποιημένο το «Creeping Flow» και αντίστοιχα απενεργοποιούνται τα «Inflow 1 & Outflow 1» και ενεργοποιούνται τα «Inflow 2 & Outflow 2» αφού η τροφοδοσία στον αντιδραστήρα γίνεται από το δεύτερο διαμέρισμα. Επιπροσθέτως, πρέπει να χρησιμοποιηθεί και ως αρχική τιμή η λύση του προηγούμενου «Time Dependent Study» για τη συγκέντρωση του ιχνηθέτη που υπάρχει ήδη εντός του αντιδραστήρα. Αυτή τη φορά στο μενού επιλογής Αρχικών Τιμών κάτω από «Initial Values of Variables Solved for», της μεταβλητής της συγκέντρωσης, επιλέγεται «Method: Solution > Study: Study 2 > Solver : Solver 3 > Use: Solution Store 1 > Time: Last», δηλαδή χρησιμοποιείται μέθοδος αρχικής τιμής, από τη μελέτη για Χρονικά Μεταβαλλόμενες Συνθήκες (Study 2), με τον αντίστοιχο επιλύτη (Solver 3), την λύση που αποθηκεύτηκε από το πρώτο «Time Dependent Study» (Solution Store 1) και παίρνοντας αρχική τιμή από την τελευταία χρονική στιγμή της αποθηκευμένης λύσης (Time: Last).

Ορίζονται τιμές για τις μεταβλητές που δεν επιλύονται ή «Variables not Solved for», κατά αντιστοιχία με το πρώτο «Time Dependent Study» επιλέγεται «Method: Solution > Study: Study 1 > Solution: Solver 1 > Use: Stored Solution 2», χρησιμοποιώντας αυτή τη φορά τη δεύτερη αποθηκευμένη λύση σε Μόνιμες Συνθήκες, του προφίλ ταχύτητας για την εισαγωγή και εξαγωγή του νερού από το δεύτερο διαμέρισμα του αντιδραστήρα. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνονται οι αλλαγές που έγιναν στο «Physics Tree» καθώς και στις μεταβλητές που χρησιμοποιούνται:



Εικόνα 4.2.28 Ορισμός των Χρησιμοποιούμενων Μεταβλητών

Με τον ίδιο τρόπο συμπληρώνονται και τα υπόλοιπα «Time Dependent Studies» χρησιμοποιώντας κάθε φορά ως αρχική τιμή τη τελευταία λύση του προηγούμενου, επιλέγοντας παράλληλα το κατάλληλο προφίλ ταχύτητας από τα τέσσερα που έχουν υπολογιστεί, ένα για κάθε διαμέρισμα του αντιδραστήρα, αλλάζοντας κατάλληλα το εύρος του Χρόνου τρεξίματος κάθε φορά και ενεργοποιώντας την κατάλληλη είσοδο και έξοδο του ιχνηθέτη.

Μετά τον ορισμό των «Time Dependent Studies», επιλέγεται το «Solver Configuration» και ο αντίστοιχος Επιλύτης και εφαρμόζονται οι ίδιες ενέργειες με τον Επιλύτη για τις Μόνιμες Συνθήκες, δηλαδή προσθέτοντας έναν «Time Dependent Solver», εμφανίζονται περαιτέρω επιλογές. Με την εξής σειρά επιλέγονται «Compile Equations: Time Dependent», «Dependent Variables», «Solvers > Time Dependent Solver 1», «Other > Solution Store» και προστίθενται από μια φορά με αυτή τη σειρά για κάθε «Time Dependent Study».

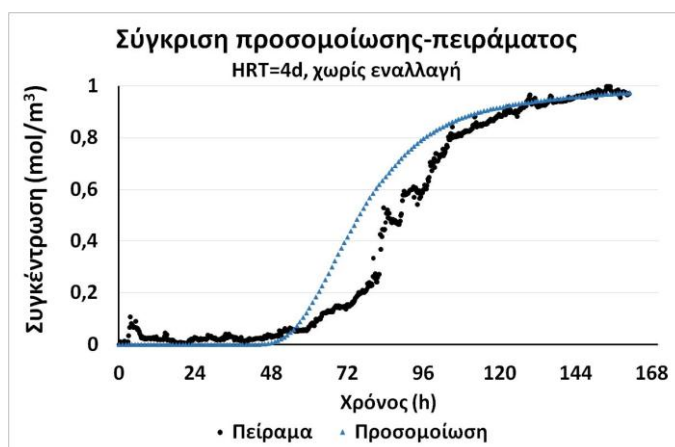
## 4.2.6 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

### 4.2.6.1 Επαλήθευση μοντέλου

#### ➤ HRT=4d, Χωρίς εναλλαγή του σημείου τροφοδοσίας

Όπως προαναφέρθηκε, στόχος των πρώτων προσομοιώσεων ήταν η επαλήθευση του μοντέλου (model validation) με βάση τα αποτελέσματα των εργαστηριακών πειραμάτων. Για το σκοπό αυτό, εισήχθησαν στο μοντέλο οι κατάλληλες παράμετροι με σκοπό την προσομοίωση των 2 εργαστηριακών πειραμάτων. Έτσι, ορίστηκε κατάλληλη ταχύτητα ροής ( $2.31 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ ) για την προσομοίωση υδραυλικού χρόνου παραμονής ίσου με 4d και κατά την πρώτη προσομοίωση δεν πραγματοποιήθηκε εναλλαγή του διαμερίσματος εισόδου της τροφοδοσίας, ενώ κατά τη δεύτερη προσομοίωση επελέγη εναλλαγή με συχνότητα 12h ( $T=2d$ ). Η συγκέντρωση του ιχνηθέτη στην είσοδο ορίστηκε ίση με  $1 \text{ mol}/\text{m}^3$ .

Τα αποτελέσματα που αφορούν την προσομοίωση χωρίς εναλλαγή του σημείου τροφοδοσίας, παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.2.1, συγκρινόμενα με τα πειραματικά αποτελέσματα του αντίστοιχου πειράματος, προς διευκόλυνση της εξαγωγής συμπερασμάτων.

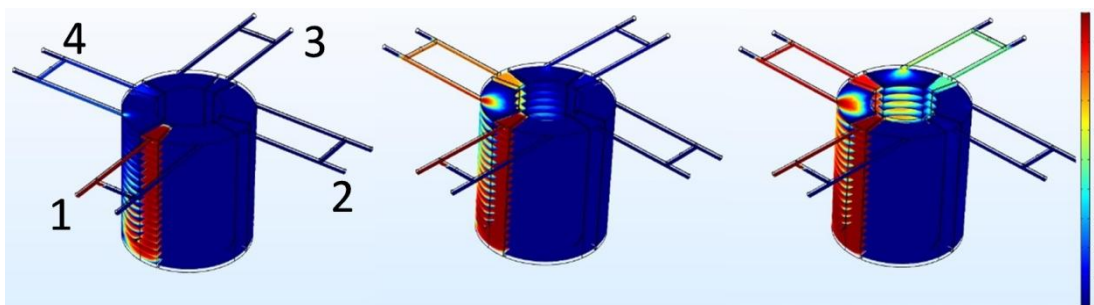


**Σχήμα 4.2.1** Αποτελέσματα προσομοίωσης και σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα για λειτουργία με HRT=4d, χωρίς εναλλαγή του σημείου τροφοδοσίας

Παρατηρείται ότι η καμπύλη συγκεντρώσεων του μοντέλου προσομοιάζει ικανοποιητικά τις πειραματικές τιμές. Το χρονικά διάστημα κατά το οποίο παρατηρούνται μηδενικές συγκεντρώσεις πρακτικά ταυτίζεται στις δύο καμπύλες. Η μεγαλύτερη απόκλιση παρατηρείται στις κλίσεις των καμπυλών κατά το διάστημα που οι συγκεντρώσεις αυξάνονται, ωστόσο η μέγιστη τιμή της συγκέντρωσης (δηλαδή η ταύτιση της συγκέντρωσης εξόδου με αυτή της εισόδου) επιτυγχάνεται πρακτικά την ίδια χρονική στιγμή.

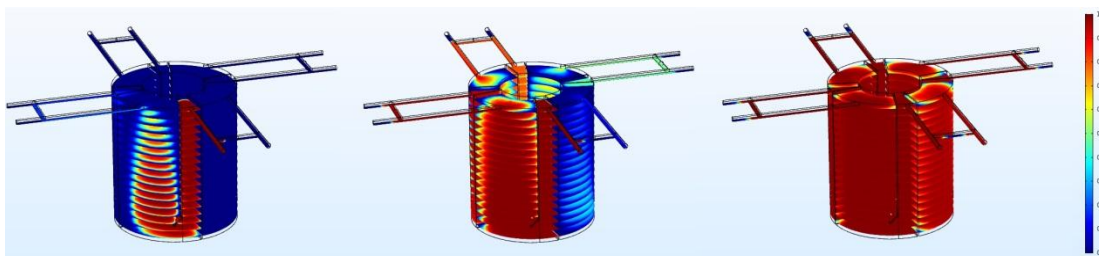
Ο ισοδύναμος αριθμός δοχείων σε σειρά ( $N_R$ ) που περιγράφει βέλτιστα τη συμπεριφορά του αντιδραστήρα κατά την προσομοίωση του πειράματος χωρίς εναλλαγή υπολογίστηκε ίσος με 10, γεγονός που αποδεικνύει τη προσέγγιση των συνθηκών ανάμειξης στο προφίλ της εμβολικής ροής. Το ποσοστό του νεκρού χώρου υπολογίστηκε ίσο με 35,44%.

Η κατανομή της συγκέντρωσης του ιχνηθέτη στο εσωτερικό του αντιδραστήρα κατά τις πρώτες 36 ώρες της προσομοίωσης παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.2.29.



**Εικόνα 4.2.29** Κατανομή της συγκέντρωσης του ιχνηθέτη στο εσωτερικό του αντιδραστήρα. Από αριστερά προς τα δεξιά, στιγμιότυπα για τις χρονικές στιγμές  $t=12h$ ,  $t=24h$ ,  $t=36h$

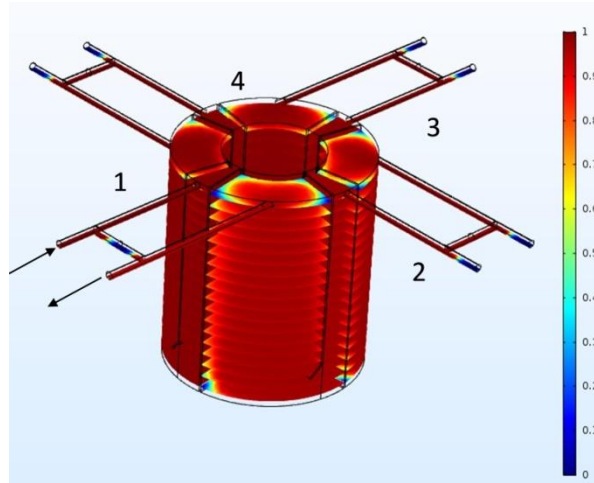
Στην Εικόνα 4.2.30 παρουσιάζεται το στιγμιότυπο κατά τη χρονική στιγμή  $t=56h$ , δηλαδή κατά τη χρονική στιγμή που η συγκέντρωση εξόδου λαμβάνει την πρώτη μη μηδενική τιμή της.



**Εικόνα 4.2.30** Στιγμιότυπο κατά τη χρονική στιγμή  $t=56h$  (μεσαίο στιγμιότυπο) σε σύγκριση με την εικόνα του αντιδραστήρα σε  $t=12h$  (αριστερά) και  $t=168h$  (δεξιά)

Καθώς τα διαμερίσματα εισόδου της τροφοδοσίας και εκροής παραμένουν σταθερά, ο αντιδραστήρας πληρώνεται σταδιακά σε ολόκληρο τον όγκο του από τον ιχνηθέτη με αποτέλεσμα το χρώμα να

μεταβάλλεται από βαθύ μπλε σε βαθύ κόκκινο. Μετά από 168h προσομοίωσης, το στιγμιότυπο που προκύπτει από το μοντέλο, παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.2.31.

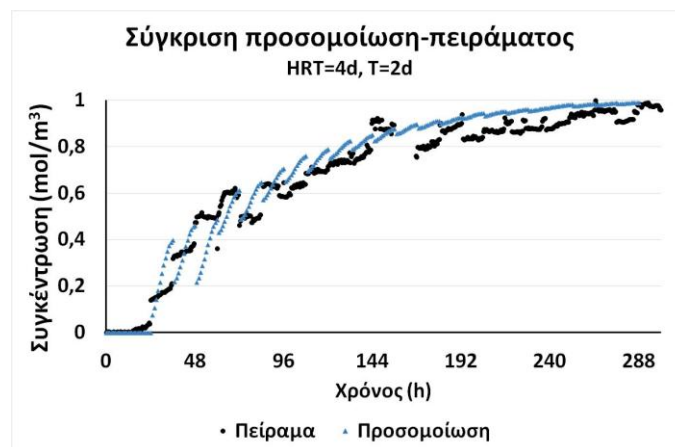


**Εικόνα 4.2.31** Στιγμιότυπο προσομοίωσης τη χρονική στιγμή  $t=168h$

Ο ιχνηθέτης έχει διαχυθεί σε σχεδόν ολόκληρο τον όγκο του αντιδραστήρα, με εξαίρεση τις γωνίες που σχηματίζονται στις ενώσεις των κάθετων διαχωριστικών με το κέλυφος του ενεργού όγκου, όπου παρουσιάζονται χαρακτηριστικά και οι νεκροί χώροι του. Πρακτικά όμως, το εσωτερικό του αντιδραστήρα έχει πληρωθεί εξ ολοκλήρου με τον ιχνηθέτη και η συγκέντρωση στην έξοδο έχει σχεδόν ταυτιστεί με τη συγκέντρωση εισόδου.

➤ **HRT=4d, T=2d**

Κατά τη δεύτερη προσομοίωση, επιχειρήθηκε η προσομοίωση του πειράματος με υδραυλικό χρόνο παραμονής ίσο με 4d και περίοδο εναλλαγής ίση με 2d. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σε σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.2.2.

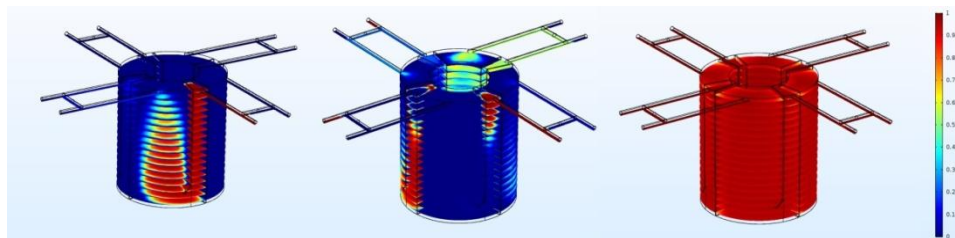


**Σχήμα 4.2.2** Αποτελέσματα προσομοίωσης και σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα για λειτουργία με HRT=4d και T=2d

Παρατηρείται ότι το προφίλ των συγκεντρώσεων του ιχνηθέτη στην έξοδο του αντιδραστήρα συναρτίζεται του χρόνου που προκύπτει από την προσομοίωση παρουσιάζουν ικανοποιητική σύγκλιση με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα. Το χρονικό διάστημα κατά το οποίο οι συγκεντρώσεις παραμένουν μηδενικές είναι όμοιο και στις δύο περιπτώσεις, ενώ η αύξηση της συγκέντρωσης ακολουθεί, με μικρές διακυμάνσεις την ίδια συμπεριφορά, έως ότου ταυτιστεί με τη συγκέντρωση εισόδου μετά από το πέρας τριών υδραυλικών χρόνων παραμονής.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση επιβεβαιώνουν τα ευρήματα του πειράματος. Ο ισοδύναμος αριθμός των δοχείων σε σειρά που περιγράφουν βέλτιστα την υδραυλική συμπεριφορά του αντιδραστήρα υπολογίστηκε ίσος με 1, ταυτιζόμενος με τα αποτελέσματα του πειράματος. Ο αντιδραστήρας προσομοιάζει τη συμπεριφορά ενός αντιδραστήρα συνεχούς λειτουργίας και πλήρους ανάμειξης. Ο νεκρός χώρος κατά την προσομοίωση υπολογίστηκε ίσος με 38,59%, δηλαδή πρακτικά επίσης ταυτιζόμενος με τον νεκρό χώρο που προέκυψε από τα πειραματικά αποτελέσματα (απόκλιση της τάξης του 1%).

Ενδεικτικά, παρουσιάζεται το προφίλ της συγκέντρωσης του ιχνηθέτη κατά τις χρονικές στιγμές  $t=12h$  (πρώτη εναλλαγή),  $t=25h$  (πρώτη μη μηδενική συγκέντρωση στην έξοδο) και  $t=288h$  (πέρας του πειράματος και της προσομοίωσης) (Εικόνα 4.2.32).



Εικόνα 4.2.32 Στιγμιότυπα προσομοίωσης για  $t=12h$  (αριστερά),  $t=25h$  (μέση),  $t=288h$  (δεξιά)

#### 4.2.6.2 Επίδραση των $HRT$ , $T$ και του λόγου $HRT/T$

Η επαλήθευση του μοντέλου μέσω της σύγκρισης των πειραματικών δεδομένων με τα αποτελέσματα των αντίστοιχων προσομοιώσεων, ειδικά για την περίπτωση όπου πραγματοποιείται εναλλαγή του σημείου τροφοδοσίας, ακολουθήθηκε από μία σειρά προσομοιώσεων. Ο βασικός σκοπός ήταν η εκτίμηση της επίδρασης διαφορετικών συνδυασμών παραμέτρων λειτουργίας στην υδραυλική συμπεριφορά του PABR. Οι παράμετροι λειτουργίας, η επίδραση των οποίων μελετήθηκε, ήταν ο υδραυλικός χρόνος παραμονής ( $HRT$ ) και η περίοδος εναλλαγής του διαμερίσματος τροφοδοσίας ( $T$ ).

Για την καλύτερη επεξεργασία των δεδομένων και τη διευκόλυνση εξαγωγής συμπερασμάτων, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις κατηγοριοποιήθηκαν με βάση το λόγο  $HRT/T$ . Στον Πίνακα 4.2.1 παρουσιάζονται οι συνδυασμοί των παραμέτρων λειτουργίας που επελέγησαν για την εκτέλεση των προσομοιώσεων, ταξινομημένα με βάση το λόγο  $HRT/T$  κατά αύξουσα σειρά.



**Πίνακας 4.2.1** Παράμετροι λειτουργίας και αντίστοιχοι λόγοι HRT/T κατά τις προσομοιώσεις

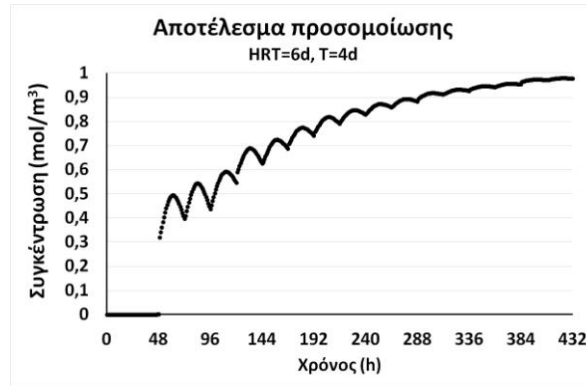
HRT (d)	T (d)	HRT/T
10.65	42.16	0.25
6	12	0.5
4	5.3	0.75
4	4	1
6	4	1.5
10.65	4	2.5
6	2	3
8.7	2	4.35
20	4	5
20	2	10

Ο χρόνος προσομοίωσης σε όλες τις περιπτώσεις ήταν ίσος με 3 υδραυλικούς χρόνους παραμονής. Οι συνδυασμοί αυτοί επελέγησαν με σκοπό τη μελέτη της υδραυλικής συμπεριφοράς σε ακραίες τιμές του λόγου HRT/T (πολύ μικρότερες της μονάδας ή πολύ μεγαλύτερες) και επιπλέον για τη μελέτη του τύπου ανάμειξης στο εσωτερικό του PABR σε υδραυλικούς χρόνους παραμονής υπό τους οποίους στη συνέχεια θα λειτουργήσει ο αντιδραστήρας με πραγματικά απόβλητα. Η μελέτη υδραυλικής συμπεριφοράς του αντιδραστήρα είναι κρίσιμη για τη μαθηματική μοντελοποίηση της διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης, η οποία παρουσιάζεται σε επόμενα κεφάλαια.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν για τους συγκεκριμένους συνδυασμούς παραμέτρων λειτουργίας. Παρουσιάζονται αναλυτικά 3 περιπτώσεις προσομοίωσης, σε 2 ακραίες περιπτώσεις του λόγου HRT/T (HRT/T=0,25 και HRT/T=10) καθώς και μία προσομοίωση κατά την οποία ο λόγος HRT/T είναι κοντά στη μονάδα. Στη συνέχεια παρατίθενται συνοπτικά τα αποτελέσματα των υπόλοιπων προσομοιώσεων, καθώς -κατά περίπτωση- παρουσιάζουν ανάλογη συμπεριφορά με κάποια από τις 3 προαναφερθείσες περιπτώσεις.

➤ **HRT/ T=1,5**

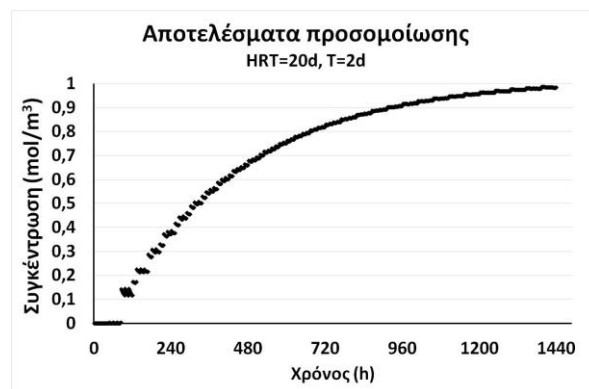
Στην περίπτωση αυτή ο υδραυλικός χρόνος παραμονής ορίστηκε ίσος με 6d και η περίοδος εναλλαγής στις 4d. Η μέγιστη συγκέντρωση στην έξοδο παρατηρήθηκε σε χρόνο προσομοίωσης  $t=18d$ , δηλαδή στο τέλος της προσομοίωσης, και ήταν ίση με  $0,978\text{mol/m}^3$  ενώ το  $N_R$  υπολογίστηκε ίσο με 1, γεγονός που σημαίνει ότι ο αντιδραστήρας προσομοιάζει την υδραυλική συμπεριφορά ενός αντιδραστήρα CSTR. Η κατανομή της συγκέντρωσης του ιχνηθέτη στην έξοδο του αντιδραστήρα συναρτηθεί του χρόνου προσομοίωσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2.3.



**Σχήμα 4.2.3** Κατανομή συγκέντρωσης του ιχνηθέτη στην έξοδο του αντιδραστήρα συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης για HRT=6d και T=4d

➤ **HRT/ T=10**

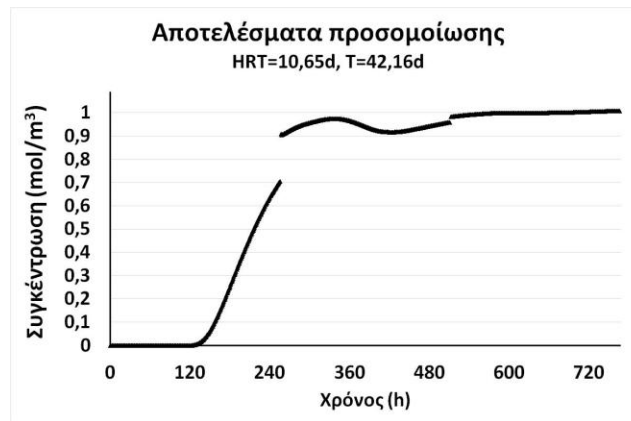
Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής ορίστηκε ίσος με 20d και η περίοδος εναλλαγής ίση με 2d. Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2.4, η μέγιστη συγκέντρωση του ιχνηθέτη που παρατηρήθηκε στην έξοδο του αντιδραστήρα ήταν 0,987mol/m<sup>3</sup>, δηλαδή το 98,7% της συγκέντρωσης του ιχνηθέτη στην είσοδο. Η απόκριση του συστήματος στη βηματική επιβολή προσομοιάζει την απόκριση ενός αντιδραστήρα CSTR. Επιπλέον, τα αποτελέσματα είναι ανάλογα με την περίπτωση του πειράματος με HRT=4d και T=2d, ένδειξη ότι το προφίλ ανάμειξης στο εσωτερικό του πιλότου δεν επηρεάστηκε σημαντικά από την αλλαγή του υδραυλικού χρόνου παραμονής, όσο η περίοδος εναλλαγής παρέμεινε σταθερή. Ο αριθμός των δοχείων σε σειρά ( $N_R$ ) που προσομοιάζουν βέλτιστα την υδραυλική συμπεριφορά του πιλότου είναι ίσος με 1, ενώ το ποσοστό του νεκρού χώρου ( $V_d$ ) υπολογίστηκε ίσο με 39%.



**Σχήμα 4.2.4** Κατανομή συγκέντρωσης του ιχνηθέτη στην έξοδο του αντιδραστήρα συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης για HRT=20d και T=2d

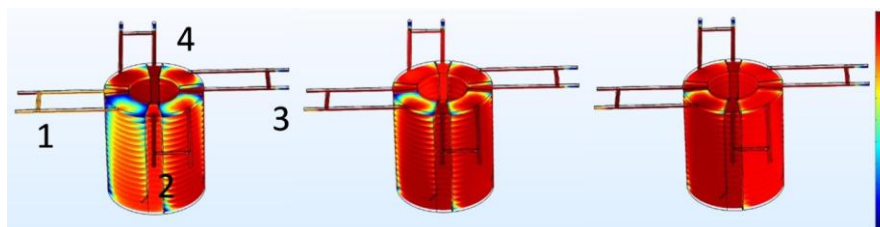
➤ **HRT/ T=0,25**

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ο υδραυλικός χρόνος παραμονής ορίστηκε ίσος με 10,65d και η περίοδος εναλλαγής ίση με 42,16d. Ο λόγος HRT/T ήταν ίσος με 0,25, που είναι ο μικρότερος που προσομοιώθηκε. Στο Σχήμα 4.2.5 παρουσιάζεται η απόκριση του αντιδραστήρα στη βηματική επιβολή.



**Σχήμα 4.2.5** Κατανομή συγκέντρωσης του ιχνηθέτη στην έξοδο του αντιδραστήρα συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης για HRT=10,65d και T=42,16d

Υπό τις παρούσες παραμέτρους λειτουργίας, ο αντιδραστήρας φαίνεται να προσομοιάζει την υδραυλική συμπεριφορά ενός αντιδραστήρα PFR, με μεγάλο χρονικό διάστημα μηδενικών τιμών της συγκέντρωσης του ιχνηθέτη στην έξοδο, ακολουθούμενο από απότομη αύξηση έως την εξίσωση της συγκέντρωσης εισόδου με τη συγκέντρωση εξόδου. Ανάμεσα στις χρονικές στιγμές  $t=256h$  και  $t=512h$ , δηλαδή ανάμεσα στις ημέρες 10 και 20, η συγκέντρωση του ιχνηθέτη στην έξοδο παρουσιάζει διακύμανση. Η συμπεριφορά αυτή προκύπτει από τη διαφορά μεταξύ υδραυλικού χρόνου παραμονής και της περιόδου εναλλαγής. Από τη στιγμή που ο αντιδραστήρας τροφοδοτείται για μεγάλο χρονικό διάστημα χωρίς αλλαγή του σημείου εισόδου της τροφοδοσίας, το «προφίλ» διάχυσης του ιχνηθέτη στο εσωτερικό του αντιδραστήρα τείνει να σταθεροποιηθεί. Με την αλλαγή του σημείου εισόδου, το προφίλ αυτό διαταράσσεται, οδηγώντας στην παρατηρούμενη διακύμανση στην έξοδο του αντιδραστήρα. Μετά από χρονικό διάστημα 3 χρόνων παραμονής, η συγκέντρωση του ιχνηθέτη στην έξοδο ταυτίστηκε με τη συγκέντρωση εισόδου ( $C_{max}=1mol/m^3$ ) (Εικόνα 4.2.33).



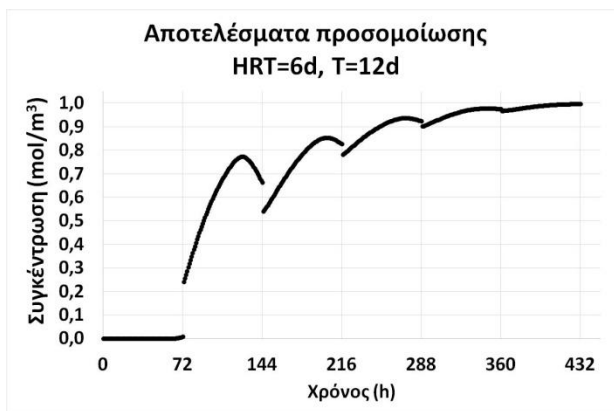
**Εικόνα 4.2.33** Απεικόνιση της κατανομής του ιχνηθέτη στο εσωτερικό του πιλότου τις χρονικές στιγμές (από αριστερά)  $t=257h$ ,  $t=336h$  και  $t=432h$

Ο ισοδύναμος αριθμός δοχείων σε σειρά ( $N_R$ ) που περιγράφουν βέλτιστα την υδραυλική συμπεριφορά του συστήματος υπολογίστηκε ίσος με 9, επιβεβαιώνοντας την τάση του συστήματος να λειτουργεί

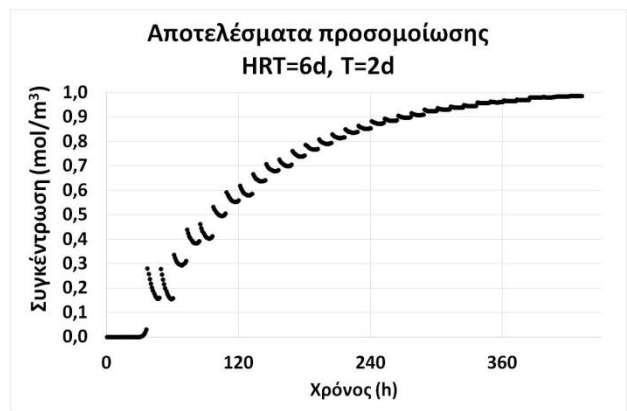
«εγγύτερα» στην εμβολική ροή όταν η περίοδος εναλλαγής είναι μεγάλη. Τέλος, το ποσοστό του νεκρού χώρου ( $V_d$ ) υπολογίστηκε ίσο με 35,9%.

➤ **Σύνοψη αποτελεσμάτων προσομοιώσεων**

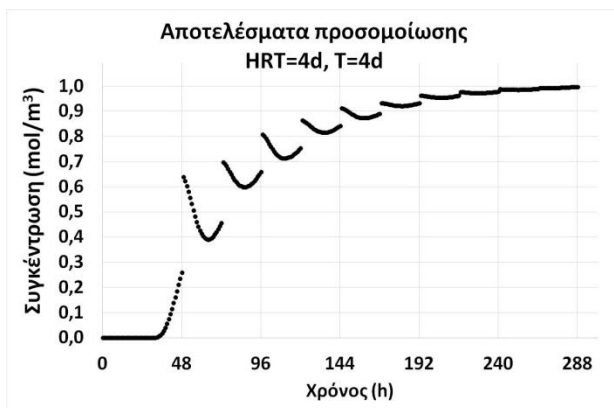
Όπως προαναφέρθηκε, στα πλαίσια της διερεύνησης της υδραυλικής συμπεριφοράς του πιλότου, πραγματοποιήθηκε ένας σημαντικός αριθμός προσομοιώσεων σε διάφορους συνδυασμούς HRT και T, οι οποίες -κατά περίπτωση- προσομοιάζουν τη συμπεριφορά του αντιδραστήρα σε μία από τις 2 ακραίες (μεγάλες ή μικρές τιμές του λόγου HRT/T) ή τη συμπεριφορά του όταν ο λόγος HRT/T προσεγγίζει τη μονάδα. Στα Σχήματα 4.2.6-4.2.12 παρουσιάζονται οι καμπύλες συγκέντρωσης-χρόνου που αφορούν στην απόκριση του αντιδραστήρα στη βηματική επιβολή για κάθε συνδυασμό λειτουργικών παραμέτρων που πραγματοποιήθηκε προσομοίωση.



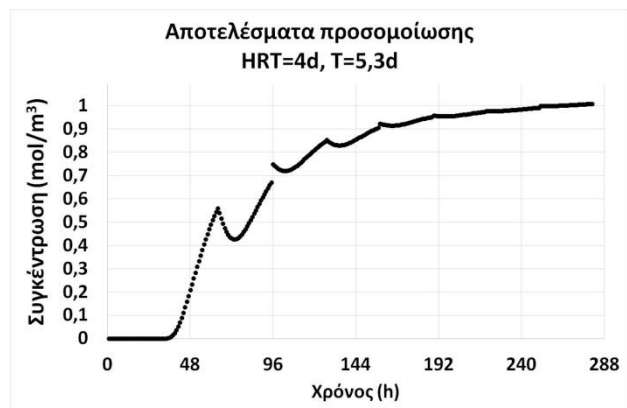
**Σχήμα 4.2.6** Κατανομή συγκέντρωσης του ιχνηθέτη στην έξοδο του αντιδραστήρα συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης για HRT=6d και T=4d



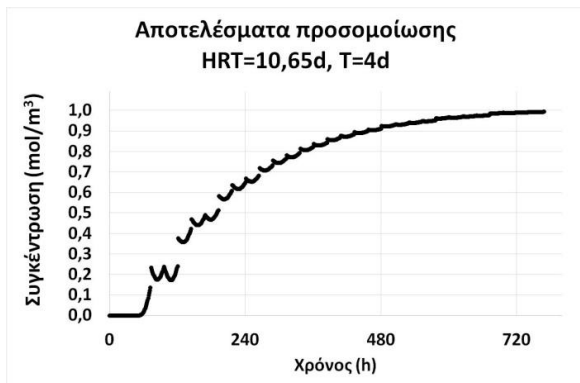
**Σχήμα 4.2.7** Κατανομή συγκέντρωσης του ιχνηθέτη στην έξοδο του αντιδραστήρα συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης για HRT=6d και T=2d



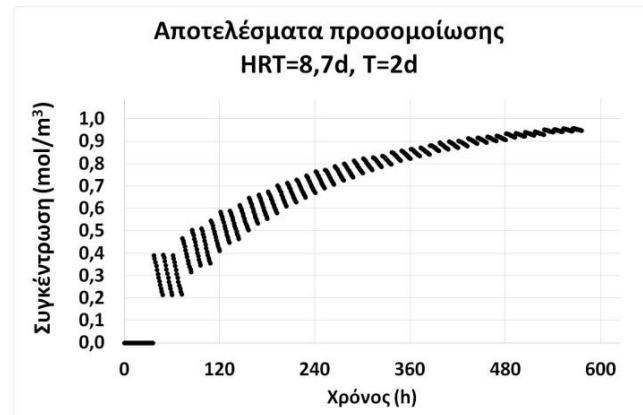
**Σχήμα 4.2.8** Κατανομή συγκέντρωσης του ιχνηθέτη στην έξοδο του αντιδραστήρα συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης για HRT=4d και T=4d



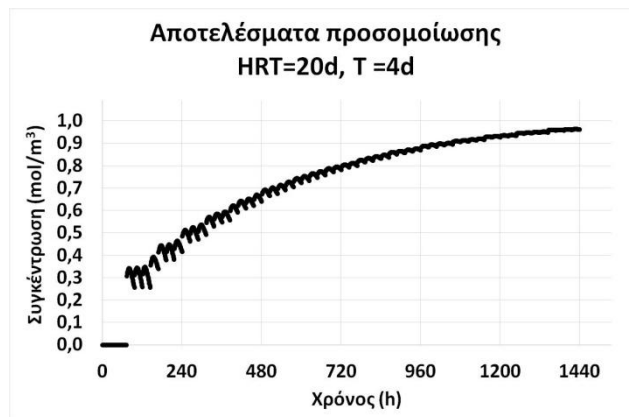
**Σχήμα 4.2.9** Κατανομή συγκέντρωσης του ιχνηθέτη στην έξοδο του αντιδραστήρα συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης για HRT=4d και T=5,3d



**Σχήμα 4.2.10** Κατανομή συγκέντρωσης του ιχνηθέτη στην έξοδο του αντιδραστήρα συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης για HRT=10,65d και T=4d



**Σχήμα 4.2.11** Κατανομή συγκέντρωσης του ιχνηθέτη στην έξοδο του αντιδραστήρα συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης για HRT=8,7d και T=52d



**Σχήμα 4.2.12** Κατανομή συγκέντρωσης του ιχνηθέτη στην έξοδο του αντιδραστήρα συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης για HRT=20d και T=4d

Στον Πίνακα 4.2.2 παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα όλων των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν, ταξινομημένα κατά αύξουσα σειρά του λόγου HRT/T. Με  $C_{max}$  συμβολίζεται η μέγιστη παρατηρούμενη συγκέντρωση του ιχνηθέτη στην έξοδο του αντιδραστήρα για κάθε προσομοίωση (που παρατηρήθηκε στο τέλος όλων των προσομοιώσεων). Με  $N_R$  συμβολίζεται ο αριθμός των δοχείων σε σειρά που περιγράφουν βέλτιστα την υδραυλική συμπεριφορά του συστήματος για κάθε συνδυασμό και με  $V_d$  το ποσοστό του «νεκρού χώρου».

**Πίνακας 4.2.2** Συνοπτικά αποτελέσματα προσομοιώσεων για διάφορους συνδυασμούς HRT και T κατά αύξουσα σειρά του λόγου HRT/T

HRT (d)	T (d)	HRT/T	$C_{max}$	$N_R$	$V_d$ (%)
4	$\infty$	-	1	10	35.44
10.65	42.16	0.25	1	9	35.88
6	12	0.5	0.997	2	37.38
4	5.3	0.75	1	3	36.38
4	4	1	0.997	2	37.54
6	4	1.5	0.978	1	39.1
4	2	2	0.99	2	38.59
10.65	4	2.5	0.994	2	38.22
6	2	3	0.987	2	38.24
8.7	2	4.35	0.958	1	39.91
20	4	5	0.964	1	40.78
20	2	10	0.987	1	39

Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά τον υπολογισμό του  $N_R$  σε κάθε περίπτωση, συμπεραίνεται ότι ο αντιδραστήρας τείνει να συμπεριφέρεται ως αντιδραστήρας CSTR στις περιπτώσεις που ο λόγος HRT/T είναι ίσος ή μεγαλύτερος του 1, ανεξάρτητα από τις μεταβολές του HRT και με μικρές αλλαγές της περιόδου εναλλαγής T. Καθώς ο λόγος HRT/T μειώνεται σε τιμές χαμηλότερες της μονάδας και καθώς τείνει στο μηδέν, ο αριθμός των δοχείων σε σειρά που περιγράφουν βέλτιστα την υδραυλική συμπεριφορά του αντιδραστήρα αυξάνεται, καθώς η ροή στο εσωτερικό του τείνει να προσομοιάσει αυτήν ενός PFR.

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του PABR, όπως έχουν αναπτυχθεί στο παρελθόν σε σειρά εργασιών και δημοσιεύσεων που αφορούν PABR εργαστηριακής κλίμακας, είναι η ευελιξία του να μεταβάλει την υδραυλική του συμπεριφορά ανάμεσα στους δύο ιδανικούς τύπους ανάμειξης (πλήρης ανάμειξη και εμβολική ροή) μέσω της μεταβολής των λειτουργικών παραμέτρων και κυρίως της περιόδου εναλλαγής. Τα πειράματα και οι σειρά προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν, απέδειξαν ότι ο πιλοτικής κλίμακας PABR με τροποποιημένο σχέδιο είναι επίσης ικανός να «κινείται» ανάμεσα στους δύο ιδανικούς τύπους ανάμειξης.

Στον Πίνακα 4.2.2, παρουσιάζονται και οι μέγιστες παρατηρηθείσες τιμές της συγκέντρωσης του ιχνηθέτη στην έξοδο του αντιδραστήρα για κάθε προσομοίωση. Οι τιμές της μέγιστης συγκέντρωσης παρουσιάζουν ελαφρά πτωτική τάση καθώς αυξάνεται ο λόγος HRT/T, αλλά σε όλες τις περιπτώσεις είναι μεγαλύτερες του 95% της συγκέντρωσης εισόδου με το πέρασ 3 χρόνων παραμονής.

Τέλος, το ποσοστό του «νεκρού χώρου» κυμάνθηκε ανάμεσα στο 35% και 40%. Παρόλα αυτά, δεν υπάρχει συσχέτιση σε σχέση με το λόγο HRT/T. Ο νεκρός χώρος επηρεάζεται κυρίως από τη γεωμετρία και την κλίμακα του αντιδραστήρα.

Τα ευρήματα της μελέτης της υδραυλικής συμπεριφοράς του πιλότου, μπορούν να αξιοποιηθούν κατά τη διαδικασία μαθηματικής μοντελοποίησης της αναερόβιας χώνευσης. Για παράδειγμα η χρήση του Anaerobic Digestion Model 1 – ADM1 [46] προϋποθέτει αντιδραστήρα συνεχούς λειτουργίας πλήρους

ανάμειξης και αποδεικνύεται ότι το συγκεκριμένο μαθηματικό μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί -με τροποποιήσεις- για την προσομοίωση διεργασίας στον πιλότο, όπως παρουσιάζεται στα Κεφάλαια 6 και 7.





**Κεφάλαιο 5**  
**Αναλυτικές μέθοδοι και πειραματικές**  
**διατάξεις**

## 5.1 Αναλυτικές Μέθοδοι

Για το χαρακτηρισμό της τροφοδοσίας στην αρχή και κατά τη διάρκεια των πειραματικών κύκλων, καθώς επίσης και της λειτουργίας του PABR και του κομποστοποιητή χρησιμοποιήθηκε σειρά αναλυτικών τεχνικών, οι οποίες απαιτούνται για τον προσδιορισμό συγκεκριμένων μεγεθών. Οι τεχνικές αυτές περιγράφονται παρακάτω [8], [29].

### 5.1.1 Μέτρηση pH

Η μέτρηση του pH σε υδατικά διαλύματα (π.χ. από τα διαμερίσματα του PABR, την εκροή και την τροφοδοσία) πραγματοποιήθηκε μέσω της εμβάπτισης του ηλεκτροδίου ενός φορητού, βαθμονομημένου, ηλεκτρονικού pH-μέτρου (inoLab WTW series pH 720) σε δείγμα όγκου 10ml.

Η μέτρηση του pH σε στερεά δείγματα (κομπόστ, δείγματα από τα επί μέρους είδη αποβλήτων) πραγματοποιήθηκε μέσω της εμβάπτισης του ηλεκτροδίου του pH-μέτρου σε αιώρημα 3g του δείγματος σε 30ml νερού, μετά από ανάδευση 5 λεπτών.

### 5.1.2 Μέτρηση Ολικής Αλκαλικότητας (Total Alkalinity, TA)

Η μέτρηση της ολικής αλκαλικότητας γίνεται με βάση τη μέθοδο που παρουσιάζεται στο βιβλίο: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater [122]. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, εκφράζει την ικανότητα ενός διαλύματος να "εξουδετερώνει" οξέα και αντιστοιχεί στο άθροισμα όλων των βασικών ενώσεων στο διάλυμα. Συνήθως το μεγαλύτερο ποσοστό της αλκαλικότητας ενός αποβλήτου οφείλεται στα ανθρακικά ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), στα όξινα ανθρακικά ( $\text{HCO}_3^-$ ) και στα ιόντα υδροξυλίου ( $\text{OH}^-$ ). Άλλες ενώσεις οι οποίες συνεισφέρουν στην αύξηση της αλκαλικότητας είναι τα βορικά, τα φωσφορικά και τα πυριτικά άλατα.

Γνωστός όγκος δείγματος (συνήθως ίσος με 10ml), που βρίσκεται υπό επαρκή ανάδευση, τιτλοδοτείται με πρότυπο διάλυμα οξέος (συνήθως διάλυμα θεικού οξέος κανονικότητας 0.1N) μέχρι του ισοδυναμίου σημείου του, όπου το pH-μετρο δείχνει την τιμή 4.5. Η τιμή της ολικής αλκαλικότητας τότε, εκφρασμένη σε  $\text{mg}_{\text{CaCO}_3/\text{L}}$  δίνεται από την εξίσωση:

$$\text{Ολική Αλκαλικότητα} = \frac{A}{V} * N * 50000$$

όπου A είναι τα ml οξέος που χρησιμοποιήθηκαν για την τιτλοδότηση, V ο όγκος του δείγματος σε ml και N η κανονικότητα του οξέος.

### 5.1.3 Προσδιορισμός ολικών και πτητικών αιωρούμενων και μη στερεών (TSS/TS, VSS/VS)

Ο προσδιορισμός των ολικών και πτητικών αιωρούμενων στερεών πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με την αντίστοιχη μέθοδο [122]. Ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS) χαρακτηρίζονται τα μη διηθούμενα στερεά. Για τον προσδιορισμό τους, γνωστή ποσότητα καλώς αναμεμιγμένου δείγματος (συνήθως 10ml) διηθείται σε προζυγισμένο ηθμό ινών υάλου. Το υλικό που κατακρατείται στον ηθμό ξηραίνεται μέχρι σταθερού βάρους σε φούρνο στους 103–105°C. Η αύξηση του βάρους του ηθμού αντιπροσωπεύει τα ολικά αιωρούμενα στερεά. Τα πτητικά αιωρούμενα στερεά (VSS) αποτελούν το κλάσμα των ολικών αιωρούμενων στερεών, το οποίο εξαερώνεται στους 550°C. Για τον προσδιορισμό τους, ο ηθμός στον οποίο έχουν κατακρατηθεί τα ολικά αιωρούμενα στερεά πυρακτώνεται, μέχρι σταθερού βάρους σε

πυραντήριο στους 550°C. Η μείωση του βάρους του ηθμού αντιστοιχεί στα πτητικά αιωρούμενα στερεά.

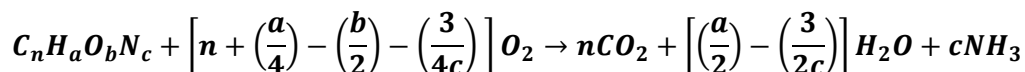
Για τον προσδιορισμό των ολικών και πτητικών στερεών ακολουθήθηκε όμοια διαδικασία, με παράλειψη του βήματος της διήθησης. Αντί του προζυγισμένου ηθμού ινών υάλου, χρησιμοποιήθηκαν κάψες εξάτμισης των 100ml κατασκευασμένες από πορσελάνη.

#### 5.1.4 Προσδιορισμός ελεύθερου αέριου χώρου (F.A.S.)

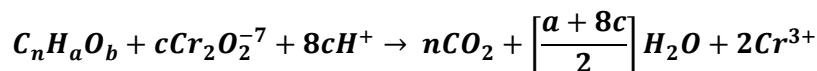
Για τον προσδιορισμό του ελεύθερου αέριου χώρου (Free Air Space, FAS) του υποστρώματος κατά τα πειράματα κομποστοποίησης, η διαδικασία περιλάμβανε την τοποθέτηση μιας ποσότητας υλικού σε ογκομετρικό σωλήνα και ακολούθως την προσθήκη γνωστού όγκου απεσταγμένου ύδατος. Ο ελεύθερος αέριος χώρος (FAS) προσδιοριζόταν ως το ποσοστό του όγκου του ύδατος που εισχωρούσε και παρέμενε στους πόρους του μίγματος [52].

#### 5.1.5 Προσδιορισμός του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (COD) σε υδαρές δείγμα

Ο προσδιορισμός του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (Chemical Oxygen Demand, COD) χρησιμοποιείται για την μέτρηση της οργανικής ισχύος και αντιστοιχεί στη συνολική ποσότητα του οξυγόνου που απαιτείται για την πλήρη οξείδωση του άνθρακα σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό σύμφωνα με την ακόλουθη αντίδραση:



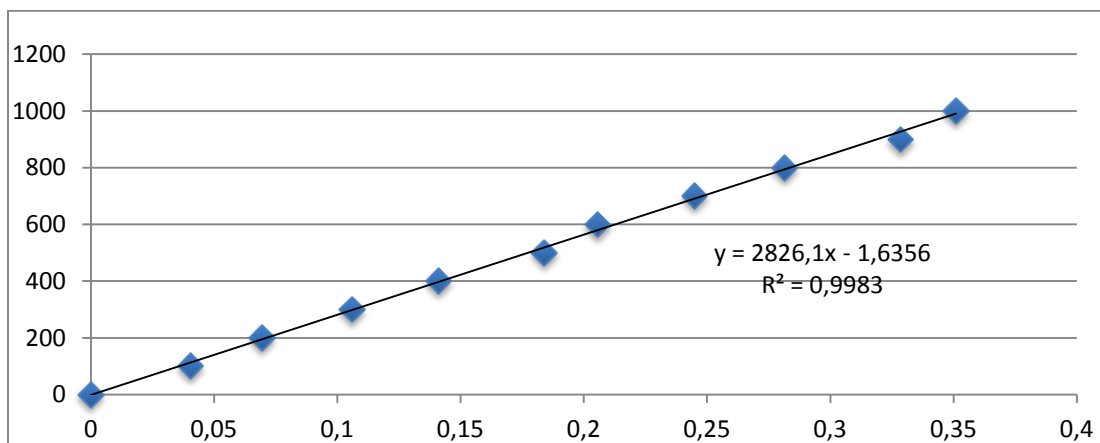
Βασίζεται στο γεγονός ότι όλες οι οργανικές ενώσεις εκτός κάποιων εξαιρέσεων, μπορούν να οξειδωθούν με τη δράση κάποιου ισχυρά οξειδωτικού μέσου σε όξινο περιβάλλον. Η οξείδωση του οργανικού υλικού ενός διαλύματος (με την προϋπόθεση ότι δεν περιέχει  $2g^{Cl^-}/L$ ) γίνεται από περίσσεια διχρωμικού καλίου ( $K_2Cr_2O_7$ ) με θέρμανση στους 148°C και σε ισχυρά όξινες συνθήκες (παρουσία  $H^+$ ). Ως καταλύτης, για την οξείδωση των πτητικών αλειφατικών ενώσεων χρησιμοποιείται θειικός άργυρος ( $AgSO_4$ ). Η αντίδραση οξείδωσης του οργανικού υλικού από τα διχρωμικά ιόντα περιγράφεται γενικά από την εξίσωση:



$$\text{Όπου, } c = \frac{2}{3}n + \frac{1}{6}n - \frac{1}{3}b$$

Ο προσδιορισμός του διαλυτού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (Soluble Chemical Oxygen Demand, sCOD) γίνεται με τη μέθοδο κλειστής επαναροής με φωτομέτρηση στα 600nm σε ηλεκτρονικό φωτόμετρο τύπου Hach Lange (DR2800), όπως περιγράφεται στο βιβλίο 'Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater'. Να σημειωθεί ότι η επαναροή είναι απαραίτητη εξαιτίας της ύπαρξης πτητικών οργανικών ενώσεων, οι οποίες κάτω από τις συνθήκες θέρμανσης μπορούν να διαφύγουν. Η μέθοδος βασίζεται στην φωτομέτρηση των ιόντων  $Cr^{3+}$ , τα οποία προκύπτουν έπειτα από την οξείδωση του οργανικού υλικού από το  $K_2Cr_2O_7$  και προφανώς όσο περισσότερο διχρωμικό κάλιο έχει αντιδράσει τόσο μεγαλύτερη η απορρόφηση που λαμβάνεται κατά την φωτομέτρηση. Ο ποσοτικός

προσδιορισμός της συγκέντρωσης του διαλυτού COD γίνεται με την αναγωγή της απορρόφησης σε συγκέντρωση, με τη βοήθεια “πρότυπης καμπύλης” βαθμονόμησης. Η καμπύλη αυτή προκύπτει με τη φωτομέτρηση πρότυπων δειγμάτων γνωστού COD και η βαθμονόμηση του φασματοφωτομέτρου επαναλαμβάνεται κάθε φορά που καταναλώνεται πλήρως η ποσότητα διαλύματος  $K_2Cr_2O_7$ . Ενδεικτικά δίνεται μία από τις καμπύλες που προέκυψαν από τη βαθμονόμηση του φασματοφωτομέτρου στο Σχήμα 5.1.1.



Σχήμα 5.1.1 Καμπύλη βαθμονόμησης φασματοφωτομέτρου Hach Lange DR2800- 26/11/2014

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα η συνάρτηση απορρόφησης-COD που προκύπτει από τη βαθμονόμηση είναι:

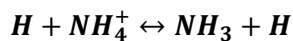
$$y = 2826,1x - 1,6356$$

### 5.1.6 Προσδιορισμός του ολικού οργανικού άνθρακα (TOC)

Ο ολικός οργανικός άνθρακας (Total Organic Carbon, TOC) και ο ανόργανος άνθρακας (Inorganic Carbon, IC), προσδιορίστηκαν ποσοτικά στο δείγμα με τη βοήθεια αναλυτικής συσκευής μέτρησης οργανικού και ανόργανου άνθρακα (SHIMADZU TOC-VCHS) του Εργαστηρίου Γενικής Χημείας του τομέα Χημικών Επιστημών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

### 5.1.7 Προσδιορισμός αμμωνίας και ολικού αζώτου κατά Kjeldahl

Ο προσδιορισμός της αμμωνίας έγινε με τη μέθοδο της απόσταξης όπως περιγράφεται στο βιβλίο Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater [122]. Στο προς ανάλυση δείγμα προστίθεται ρυθμιστικό διάλυμα τετραβορικού νατρίου ( $Na_2B_4O_7$ ) και υδροξειδίου του νατρίου και ρυθμίζεται το pH στο 9.5 με πυκνό διάλυμα υδροξειδίου του νατρίου, με αποτέλεσμα να μεταφέρεται η χημική ισορροπία των ιόντων αμμωνίου προς τα δεξιά.



Στη συνέχεια ακολουθεί απόσταξη, μέχρι να συλλεχθεί όγκος αποστάγματος ίσος με το 70-80% του αρχικού όγκου του δείγματος. Το απόσταγμα συλλέγεται μέσα σε μία κωνική φιάλη που περιέχει διάλυμα βορικού οξέος ( $H_3BO_3$ ) και δείκτη. Ο δείκτης είναι διάλυμα προπανόλης με τις χρωστικές

ουσίες methyl blue και methyl red. Το διάλυμα αυτό κατακρατεί την αμμωνία που περιέχεται στο απόσταγμα, μετατρέποντας τη σε ιόντα αμμωνίου. Στο τέλος της απόσταξης, προσδιορίζεται η ισοδύναμη ποσότητα αμμωνίας στο διάλυμα με τιτλοδότηση του αποστάγματος με πρότυπο διάλυμα θειικού οξέος. Η μέθοδος Kjeldahl προσδιορίζει το άζωτο που βρίσκεται στην οξειδωτική βαθμίδα-3 και έγινε σύμφωνα με τις οδηγίες του Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater [122]. Χρησιμοποιήθηκε συσκευή μικρο-Kjeldahl με φιάλες χωρητικότητας 50 ml δείγματος. Η βασική αρχή του προσδιορισμού είναι η εξής: παρουσία θειικού οξέος (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), θειικού καλίου(K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) και θειικού υδραργύρου (HgSO<sub>4</sub>) και κάτω από θερμοκρασία βρασμού του θειικού οξέος (340°C), το οργανικό άζωτο και η ελεύθερη αμμωνία μετατρέπονται σε αμμωνιακό άλας(NH<sub>4</sub>HSO<sub>4</sub>), αφού προηγηθεί οξείδωση (χώνευση) του οργανικού υλικού. Μετά το τέλος της χώνευσης, προστίθεται αντιδραστήριο υδροξειδίου του νατρίου για την ανύψωση της τιμής του pH και αντιδραστήριο θειοθειικού νατρίου (Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·5H<sub>2</sub>O) για τη διάσπαση των συμπλόκων του υδραργύρου με τα αμμωνιόντα, και ακολουθεί απόσταξη. Η αποσταχθείσα αμμωνία κατακρατείται από διάλυμα βορικού οξέος και δείκτη. Η ποσότητα της προσδιορίζεται εν συνεχεία με τιτλοδότηση με πρότυπο διάλυμα θειικού οξέος 0.02 N.

### 5.1.8 Προσδιορισμός της φυτοτοξικότητας

Η φυτοτοξικότητα, η φυτοθεραπευτικότητα και ο δείκτης ανάπτυξης του τελικού προϊόντος της διαδικασίας της κομποστοποίησης μετρήθηκαν με την εξής μέθοδο: 10 ml εκχυλίσματος του τελικού προϊόντος (κομπόστ) τοποθετούνται πάνω από διηθητικό χαρτί σε τρυβλίο Petri και 10 σπόροι κάρδαμου (*Lepidium sativum*) διασπείρονται πάνω από αυτό, σε διακριτή απόσταση μεταξύ τους. Ως τυφλό χρησιμοποιείται ένα τρυβλίο με απιονισμένο νερό 10ml. Τα τρυβλία μονώνονται με κολλητική ταινία ώστε να αποφευχθούν απώλειες υγρασίας και τοποθετούνται σε ξηρό και σκιερό μέρος. Χρησιμοποιούνται 3 τυφλά και 5 επαναλήψεις από κάθε δείγμα κομπόστ. Μετά από 2 ημέρες μετρούνται οι σπόροι που φύτεψαν σε κάθε τρυβλίο και ο μέσος όρος αυτών σε σχέση με τον μέσο όρο των τυφλών δείχνει το αν το προϊόν είναι φυτοτοξικό ή μη (>80%). Μετά από 8 ημέρες μετρούνται τα μήκη των στελεχών των φυτών και ο μέσος όρος αυτών σε σχέση με τον μέσο όρο των τυφλών δείχνει αν το προϊόν είναι φυτοθεραπευτικό. Τα δύο αυτά ποσοστά συνδυασμένα χρησιμοποιούνται ώστε να υπολογιστεί ο δείκτης ανάπτυξης (GI). Παρόμοιες μέθοδοι χαρακτηρισμού χρησιμοποιούνται σε πολλές μελέτες [123], [124].

Η φυτοτοξικότητα ή μη ενός τελικού, σταθεροποιημένου προϊόντος (κομπόστ) υπολογίζεται από το πόσα σπόρια βλάστησαν σε διάστημα 2 ημερών σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\text{Σχετικός δείκτης βλάστησης(\%)} = \frac{\text{αριθμός σπορίων που βλάστησαν στο δείγμα}}{\text{αριθμός σπορίων που βλάστησαν στο τυφλό}} \times 100$$

Η φυτοθεραπευτικότητα ή μη ενός τελικού σταθεροποιημένου προϊόντος (κομπόστ) υπολογίζεται από το πόση ανάπτυξη υπήρξε στα σπόρια που βλάστησαν σε διάστημα 8 ημερών σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\text{Σχετική ανάπτυξη στελέχους (\%)} = \frac{\text{μ. ο. μήκους στελεχών στο δείγμα}}{\text{μ. ο. μήκους στελεχών στο τυφλό}} \times 100$$

Τέλος, συνδυάζοντας τα δύο παραπάνω μεγέθη υπολογίζεται ο δείκτης ανάπτυξης (Growth Index, GI) ενός τελικού προϊόντος ως εξής:

$$GI = \frac{(\% \text{ σχετικός δείκτης βλάστησης}) \times (\% \text{ σχετικός δείκτης ανάπτυξης})}{100}$$

### 5.1.9 Προσδιορισμός πτητικών λιπαρών οξέων

Η μέτρηση των πτητικών λιπαρών οξέων πραγματοποιήθηκε σε αέριο χρωματογράφο SHIMADZU GC-2010 plus με ανιχνευτή φλόγας ιονισμού και η διαδικασία ήταν η εξής: Σε 1ml διηθημένου δείγματος προστίθενται 30μl H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (20% κατά όγκο). Στη συνέχεια το δείγμα αναμειγνύεται και ακολουθεί φυγοκέντρηση και μικροδιήθηση (με φίλτρο Whatman 0,2μm). Το δείγμα οδηγείται στο χρωματογράφο όπου 10μl εγχέονται με ειδική μικροσύριγγα. Η στήλη διαχωρισμού είναι τριχοειδής (Agilent Technologies HP-FFAP, 30m x 0.53mm x 1μm φιλμ) και ο αυτόματος δειγματολήπτης είναι του τύπου SHIMADZU AOC-20s). Η αρχική θερμοκρασία του θαλάμου της στήλης είναι 105°C. Στη συνέχεια ο θάλαμος θερμαίνεται έως τους 160°C με ρυθμό 15°C/min και στη συνέχεια ως τους 225°C (όπου διατηρείται για 3 λεπτά) με ρυθμό 20°C/min. Το φέρον αέριο είναι το Ήλιο με παροχή 30ml/min και η θερμοκρασία του ανιχνευτή είναι σταθερή στους 230°C. Από τη διαδικασία αυτή προκύπτει το χρωματογράφημα που αντιστοιχεί στο δείγμα και στη συνέχεια, με τη χρήση πρότυπων καμπυλών, πραγματοποιείται ο ποιοτικός και ποσοτικός προσδιορισμός των πτητικών λιπαρών οξέων που περιέχονται στο δείγμα.

### 5.1.10 Προσδιορισμός της παροχής του βιοαερίου

Η μέτρηση της παροχής του βιοαερίου ήταν συνεχής. Για τον προσδιορισμό της ημερήσιας παροχής του βιοαερίου χρησιμοποιήθηκε ειδική διάταξη (Εικόνα 5.1.1), αποτελούμενη από έναν υάλινο σωλήνα σχήματος «U» πληρωμένο με ορυκτέλαιο, έναν πλωτήρα και μια τρίοδη ηλεκτροβάννα συνδεδεμένη με τον πίνακα PLC.



Εικόνα 5.1.1 Η διάταξη μέτρησης του παραγόμενου βιοαερίου (κλικογράφος)

Το παραγόμενο βιοαέριο οδηγείτο μέσω ειδικών σωληνώσεων αερίου στον υάλινο σωλήνα. Ο όγκος του βιοαερίου που κατέληγε στη μία πλευρά του σωλήνα εκτόπιζε ίσο όγκο ορυκτέλαιου προς την

πλευρά του πλωτήρα. Όταν η στάθμη του ορυκτελαίου εκτοπίσει τον πλωτήρα, το PLC καταγράφει 1 «κλικ» και δίνει ταυτόχρονα εντολή στην ηλεκτροβάννα να απελευθερώσει την ποσότητα του βιοαερίου στην ατμόσφαιρα. Ο όγκος του κάθε κλικ προκύπτει από τη διαδικασία της βαθμονόμησης του συστήματος. Με το πέρας κάθε 24ώρου, καταγραφόταν ο αριθμός των «κλικ» του πλωτήρα και ο μετρητής του PLC μηδενιζόταν, ώστε να καταγράψει την παραγωγή του επόμενου 24ώρου.

#### **5.1.11 Προσδιορισμός Περιεκτικότητας Μεθανίου στο Βιοαέριο (% κ.ό.)**

Ο προσδιορισμός του ποσοστού του μεθανίου στο βιοαέριο κατά τα πειράματα αναερόβιας χώνευσης με τροφοδοσία μίγμα κτηνοτροφικών αποβλήτων πραγματοποιήθηκε με μία διάταξη που κατασκευάστηκε στο Εργαστήριο Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας της σχολής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ [125], [126].

Η λειτουργία της διάταξης έχει ως εξής: Ογκομετρημένη ποσότητα βιοαερίου διοχετεύεται σε γυάλινο δοχείο πληρωμένο με κορεσμένο διάλυμα υδροξειδίου του νατρίου (NaOH) και καταλήγει σε ογκομετρικό κύλινδρο, ο οποίος συνδέεται με τον πρώτο δοχείο με τη λογική των συγκοινωνούντων δοχείων. Στο διάλυμα του NaOH κατακρατάται το CO<sub>2</sub> δημιουργώντας ίζημα και έτσι στον ογκομετρικό κύλινδρο καταλήγει μόνο το μεθάνιο απεμπλουτισμένο από το διοξείδιο του άνθρακα. Η διαφορά του όγκου του βιοαερίου που εμβολιάζεται στο δοχείο με την αύξηση του όγκου στον ογκομετρικό κύλινδρο δίνει προσεγγιστικά την ποσότητα του μεθανίου στο δείγμα του βιοαερίου. Το ποσοστό μεθανίου στο βιοαέριο δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\%CH_4 = \frac{\text{όγκος εμβολιασμού} - \text{αύξηση όγκου στον ογκομετρικό κύλινδρο}}{\text{όγκος εμβολιασμού}}$$

Κατά τα πειράματα αναερόβιας χώνευσης με τροφοδοσία ζυμώσιμα οικιακά απορρίμματα, για τον προσδιορισμό του μεθανίου στο βιοαέριο, χρησιμοποιήθηκε αέριος χρωματογράφος της εταιρίας Shimadzu (GC-2014). Η στήλη διαχωρισμού (Carboxen 1000) ήταν μήκους 5m και εσωτερικής διαμέτρου 2,1mm. Ο θάλαμος του χρωματογράφου βρισκόταν αρχικά σε θερμοκρασία 40 °C. Για την εύρεση του ποσοστού μεθανίου χρησιμοποιήθηκε θερμοκρασιακό πρόγραμμα στην στήλη (διάρκειας περίπου 25 λεπτών), στο οποίο αρχικά η θερμοκρασία της στήλης ήταν στους 40 °C, αυξανόταν σταδιακά με ρυθμό 10 °C ανά λεπτό μέχρι τους 185 °C, και στη συνέχεια παρέμενε σταθερή για 5 λεπτά. Ο προσδιορισμός της σύστασης του βιοαερίου σε μεθάνιο πραγματοποιήθηκε με τη χρήση πρότυπης καμπύλης βαθμονόμησης.

## **5.2 Πειραματικές διατάξεις**

### **5.2.1 Αναερόβια χώνευση**

Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε κατά την πειραματική διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης, αποτελείται από τα εξής στοιχεία:

- Αντιδραστήρα PABR πιλοτικής κλίμακας ενεργού όγκου 77L
- 12 αυτόματες ηλεκτρονικές
- 1 ψυγείο συντήρησης της τροφοδοσίας σε χαμηλή θερμοκρασία με ενσωματωμένο αναδευτήρα

- 1 περισταλτική αντλία
- Timer περιοδικής λειτουργίας συνδεδεμένο σε σειρά με την περισταλτική αντλία
- Κλικογράφος (διάταξη ογκομέτρησης παραγόμενου βιοαερίου)
- Αισθητήριο θερμοκρασίας
- Ηλεκτρονικό πίνακα ελέγχου (PLC), συνδεδεμένο με της αυτόματες ηλεκτρονικές βάνες, τον κλικογράφο και το αισθητήριο θερμοκρασίας
- Θερμοσίφωνα

Ο αντιδραστήρας που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα της αναερόβιας χώνευσης ήταν ο πιλοτικής κλίμακας PABR, ενεργού όγκου 77L. Ο αντιδραστήρας τύπου PABR, όπως προαναφέρθηκε, αναπτύχθηκε στα από τους Γ. Λυμπεράτο και Ι. Σκιαδά. Στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής του Ι. Σκιαδά, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε μεταξύ άλλων ένας εργαστηριακής κλίμακας PABR ενεργού όγκου 15L. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων που διενεργήθηκαν στην πορεία των ετών που ακολούθησαν στο συγκεκριμένο αντιδραστήρα ήταν εξαιρετικά ενθαρρυντικά, καθώς ο εργαστηριακής κλίμακας PABR απέδωσε ικανοποιητικά κατά την επεξεργασία μιας σειράς οργανικών αποβλήτων υπό υψηλούς ρυθμούς οργανικής φόρτισης και υδραυλικούς χρόνους παραμονής ακόμα και χαμηλότερους από 4 ημέρες.

Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής μελετήθηκε η παραγωγή βιοαερίου από αναερόβια χώνευση/συγχώνευση 2 ειδών στερεών οργανικών αποβλήτων (κτηνοτροφικών και οικιακών ζυμώσιμων) σε ένα αντιδραστήρα, το σχέδιο του οποίου αποτελεί κλιμάκωση μεγέθους του εργαστηριακού PABR.

Η βασική μετατροπή στο σχέδιο του πιλότου σε σχέση με τον εργαστηριακό PABR αφορά στον τρόπο με τον οποίο διατηρείται η θερμοκρασία στο εσωτερικό του αντιδραστήρα. Στον εργαστηριακό αντιδραστήρα, το υδατόλουτρο για τη διατήρηση της θερμοκρασίας είναι εξωτερικό και ο αντιδραστήρας ήταν εμβαπτισμένος σε αυτό. Κατά το σχεδιασμό του πιλότου, το υδατόλουτρο τοποθετήθηκε στον εσωτερικό κύλινδρο, ενώ ο εξωτερικός ομόκεντρος κύλινδρος αποτελεί τον ενεργό όγκο του. Το εσωτερικό υδατόλουτρο είναι συνδεδεμένο με έναν θερμοσίφωνα μέσω σωληνώσεων από PVC. Το ζεστό νερό κυκλοφορεί στο κλειστό σύστημα υδατόλουτρου-θερμοσίφωνα με τη βοήθεια κυκλοφορητή και η ροή (και κατ'επέκταση η θερμοκρασία) ρυθμίζεται μέσω ενός αισθητηρίου θερμοκρασίας στο εσωτερικό του ενεργού όγκου, συνδεδεμένου με έναν πίνακα PLC. Βασικός στόχος αυτής της μετατροπής κατά την κλιμάκωση ήταν η ανάπτυξη ενός σχεδίου ρεαλιστικού σε σχέση με τις ανάγκες της βιομηχανίας. Όλα τα πειράματα αναερόβιας χώνευσης πραγματοποιήθηκαν σε μεσόφιλες συνθήκες (35°C).





**Εικόνα 5.2.1** Ο πιλοτικής κλίμακας Περιοδικός Αναερόβιος Χωνευτήρας με Ανακλαστήρες

Ο όγκος της αέριας φάσης του πιλότου ήταν ίσος με 20L. Ο αντιδραστήρας είναι κατασκευασμένος από ανοξείδωτο χάλυβα και οι εξωτερικές σωληνώσεις απαρτίζονται από τμήματα σκληρού PVC (3/4"), συνδεδεμένες με 12 αυτόματες ηλεκτροβάνες. Οι ηλεκτροβάνες ήταν συνδεδεμένες με ηλεκτρονικό πίνακα ελέγχου PLC, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα αυτόματου καθορισμού της συχνότητας εναλλαγής του διαμερίσματος εισόδου της τροφοδοσίας. Στο μέσο του ύψους των 4 διαμερισμάτων υπάρχουν χειροκίνητες βάνες δειγματοληψίας της υγρής φάσης, ενώ στο πώμα του αντιδραστήρα 4 οπές συνδεδεμένες με σωλήνωση που καταλήγει στον κλικογράφο για τη συλλογή και μέτρηση του παραγόμενου βιοαερίου.



**Εικόνα 5.2.2** Το ηλεκτρονικό σύστημα παρακολούθησης και ελέγχου του συστήματος (PLC)

Η παροχή της τροφοδοσίας πραγματοποιείτο με χρονοδιακόπτη ο οποίος έδινε περιοδικά εντολή On/Off σε περισταλτική αντλία SEKO SPA (τύπου PR1). Με κατάλληλη βαθμονόμηση της αντλίας και του χρονοδιακόπτη ρυθμιζόταν ο υδραυλικός χρόνος παραμονής του συστήματος. Κατά τη βαθμονόμηση ελήφθησαν υπόψη 2 παράμετροι: Αφενός διασφαλίστηκε ότι η παροχή της αντλίας είναι επαρκής για την τροφοδότηση των αιωρούμενων στερεών στον αντιδραστήρα. Αφετέρου, το διάστημα κατά το οποίο η αντλία λάμβανε την εντολή Off διατηρήθηκε στα χαμηλότερα δυνατά επίπεδα, ώστε να διασφαλίζονται συνθήκες συνεχούς λειτουργίας.

Η τροφοδοσία βρισκόταν διαρκώς υπό ψύξη στους  $4^{\circ}\text{C}$  για την αποφυγή ανάπτυξης συνθηκών ευνοϊκών για την αποδόμηση του οργανικού φορτίου της και αλλοίωσης των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών της. Το ψυγείο της τροφοδοσίας είχε ενσωματωμένο μοτέρ με σκοπό τη διαρκή μηχανική ανάδευση για την αποφυγή της καθίζησης των αιωρούμενων στερεών που πιθανόν θα μπορούσε να διακόψει την ομαλή τροφοδότηση του αντιδραστήρα και να οδηγήσει τη διεργασία σε αστοχία.



**Εικόνα 5.2.3** Το ψυγείο διατήρησης και ανάδευσης της τροφοδοσίας

Η δειγματοληψία πραγματοποιούνταν ανά 2 ή 3 ημέρες λειτουργίας και δείγματα λαμβάνονταν από το εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων, από την εκροή του αντιδραστήρα και από την τροφοδοσία. Από το εσωτερικό του αντιδραστήρα τα δείγματα (30ml ανά δείγμα) λαμβάνονταν από τις βάνες δειγματοληψίας που είναι τοποθετημένες στο μέσο του ύψους των 4 διαμερισμάτων ανόδου, ενώ το δείγμα της εκροής λαμβανόταν από τη σωλήνωση που εκείνη τη χρονική στιγμή αντιστοιχούσε στο διαμέρισμα εξόδου. Η δειγματοληψία γινόταν σε τυχαίες χρονικές στιγμές για την αποφυγή συστηματικών σφαλμάτων.

## **5.2.2 Κομποστοποίηση**

Κατά την πειραματική διαδικασία της κομποστοποίησης χρησιμοποιήθηκε πειραματική διάταξη που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής της Κων. Πάκου στο Τμήμα Χημικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών, υπό την επίβλεψη του καθηγητή Γ. Λυμπεράτου. Ο αντιδραστήρας (κομποστοποιητής) που χρησιμοποιήθηκε ήταν κλειστού τύπου εργαστηριακής κλίμακας, ωφέλιμου

όγκου 28L (Εικόνα 5.2.4). Είχε κυλινδρικό σχήμα με διάμετρο 30cm και μήκος 40cm και ήταν κατασκευασμένος από ανοξείδωτο χάλυβα. Για τον περιορισμό των θερμικών απωλειών, το σώμα του αντιδραστήρα ήταν καλυμμένο από ένα στρώμα αφρού πολουρεθάνης καθώς και ένα στρώμα αλουμινοκουβέρτας.



**Εικόνα 5.2.4** Ο εργαστηριακός κομποστοποιητής κλειστού τύπου

Η παρακολούθηση και ο έλεγχος της διεργασίας κατά τη διάρκεια των πειραμάτων πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή συνδεδεμένου με πίνακα PLC. Ο αντιδραστήρας είχε ενσωματωμένο ένα σύστημα μηχανικής ανάδευσης το οποίο ανάδευε το υλικό στο εσωτερικό του αντιδραστήρα ανά τακτά χρονικά διαστήματα, προκαθορισμένα από το πρόγραμμα (1 φορά ανά 24 ώρες, συνθέστερα πριν από τη δειγματοληψία). Επίσης, υπήρχε η δυνατότητα ενεργοποίησης της χειροκίνητης ανάδευσης σε περιπτώσεις που κρινόταν απαραίτητη. Στα περισσότερα πειράματα η ανάδευση γινόταν χειροκίνητα, μία φορά ανά 24ωρο, ώστε να ελέγχεται πλήρως η ομογενοποίηση του μίγματος.



**Εικόνα 5.2.5** Το μοτέρ της μηχανικής ανάδευσης στο πίσω μέρος του αντιδραστήρα

Το επάνω μέρος του αντιδραστήρα (καπάκι) ήταν κατάλληλα σχεδιασμένο ώστε στο εσωτερικό του να υπάρχουν αυλάκια προκειμένου να διευκολυνθεί η συλλογή των συμπυκνωμάτων των υδρατμών από την αέρια φάση του αντιδραστήρα.



**Εικόνα 5.2.6** Το ειδικά σχεδιασμένο καπάκι του αντιδραστήρα

Στο κάτω μέρος του αντιδραστήρα ήταν υπήρχε μια διάτρητη μεταλλική επιφάνεια για τη διευκόλυνση της διάχυσης του αέρα, που διοχετευόταν μέσω ειδικής οπής με τη χρήση αντλίας. Η επιφάνεια αυτή παρείχε επίσης τη δυνατότητα της διαφυγής των στραγγισμάτων, τα οποία συλλέγονταν μέσω μίας βάνας στο εμπρόσθιο μέρος του αντιδραστήρα.



**Εικόνα 5.2.7** Η διάτρητη μεταλλική επιφάνεια στο κάτω μέρος του αντιδραστήρα και το σύστημα ανάδευσης

Στο εμπρόσθιο μέρος του αντιδραστήρα υπήρχε ειδική θύρα για τη συλλογή των δειγμάτων, καθώς και αισθητήριο θερμοκρασίας. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, διαπιστώθηκε ότι το αισθητήριο της θερμοκρασίας, λόγω της μικρής απόστασής του από το εξωτερικό περίβλημα δεν είχε τη δυνατότητα να καταγράψει αντιπροσωπευτικά τη θερμοκρασία του υλικού. Για το λόγο αυτό, το αισθητήριο εισήχθη στον πυρήνα του υποστρώματος μέσω ειδικής οπής στο καπάκι του αντιδραστήρα. Επιπλέον, μέσω εξωτερικού αισθητηρίου θερμοκρασίας ήταν δυνατή η συνεχής καταγραφή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

Τα δείγματα λαμβάνονταν σε ημερήσια βάση κατά την περίοδο που οι θερμοκρασία του υλικού βρισκόταν στη θερμόφιλη περιοχή, ενώ από την περίοδο της επαναφοράς της θερμοκρασίας του υλικού στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, η δειγματοληψία γινόταν συνήθως ανά 3-4 ημέρες. Το υλικό παρέμενε στο εσωτερικό του κομποστοποιητή μέχρι να διαπιστωθεί ότι η θερμοκρασία του ταυτίζεται με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και στη συνέχεια -κατά την ωρίμανση- μεταφερόταν σε ειδικά διαμορφωμένο χώρο στο εσωτερικό του χώρου του εργαστηρίου.



## **Κεφάλαιο 6**

### **Αναερόβια συγχώνευση κτηνοτροφικών αποβλήτων σε πιλοτικής κλίμακας PABR**

## 6.1 Εισαγωγή

Τα κτηνοτροφικά απόβλητα είναι τα παραπροϊόντα της κτηνοτροφίας, που είναι μια σημαντική δραστηριότητα με έντονες κοινωνικές και οικονομικές επιδράσεις στις αγροτικές περιοχές [127]. Το συγκεκριμένο είδος αποβλήτων χαρακτηρίζεται γενικά από υψηλό περιεχόμενο σε αναερόβια βακτήρια και υψηλά επίπεδα υγρασία, καθώς επίσης έχει τη δυνατότητα να χωνευθεί χωρίς την προσθήκη ιχνοστοιχείων.

Για πολλούς λόγους ωστόσο, η εγκατάσταση ενός αναερόβιου χωνευτήρα σε επίπεδο ατομικής κτηνοτροφικής επιχείρησης καθίσταται σε αρκετές περιπτώσεις ασύμφορη. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η αναερόβια συγχώνευση, δηλαδή η συνεπεξεργασία διαφορετικών ως προς την προέλευση, τη σύσταση και την εποχικότητα ειδών αποβλήτων, σε μια κεντρική μονάδα είναι η βέλτιστη και πιο βιώσιμη λύση, προσφέροντας μάλιστα τη δυνατότητα διαχείρισης μεγάλων ποσοτήτων από τα απόβλητα αυτά.

Ο συνδυασμός της αναερόβιας χώνευσης με την κομποστοποίηση είναι μία από τις αποτελεσματικότερες μεθόδους ολοκληρωμένης διαχείρισης και αξιοποίησης των κτηνοτροφικών παραπροϊόντων [128]. Στα συμβατικά συστήματα, χωνευτήρες τύπου CSTR χρησιμοποιούνται συνήθως για την παραγωγή βιοαερίου, ενώ το στερεό κλάσμα του χωνεμένου υπολείμματος οδηγείται σε κομποστοποίηση. Η συμβατική αυτή προσέγγιση του συνδυασμού αναερόβιας χώνευσης-κομποστοποίησης απαιτεί συνήθως ιδιαίτερα υψηλούς υδραυλικούς χρόνους παραμονής κατά τη λειτουργία του χωνευτήρα και κατ'επέκταση αυξημένο κόστος κατασκευής. Εναλλακτικά, ο διαχωρισμός του υγρού και του στερεού κλάσματος των αποβλήτων αυτών ως στάδιο προεπεξεργασίας, θα μπορούσε να προσφέρει τη δυνατότητα της επεξεργασίας τους από ταχύρρυθμα συστήματα αναερόβιας χώνευσης -όπως στην προκειμένη ο PABR- σε ιδιαίτερα χαμηλούς υδραυλικούς χρόνους παραμονής (μικρότερους των 10 ημερών), με ταυτόχρονη παραγωγή σημαντικών ποσοτήτων εδαφοβελτιωτικού υψηλής ποιότητας από το στερεό κλάσμα [129]. Μία τέτοια προσέγγιση δεν αξιοποιεί φυσικά το σύνολο του μεθανογόνου δυναμικού της οργανικής ύλης, ωστόσο θα μπορούσε να αποτελέσει μία οικονομικά βιώσιμη λύση, ιδιαίτερα για τις ορεινές, απομακρυσμένες περιοχές.

Ο διαχωρισμός υγρού-στερεού με σκοπό την παραγωγή βιοαερίου από το υγρό κλάσμα είναι μια πρακτική που έχει εφαρμοστεί και στο παρελθόν. Για παράδειγμα στην Ιταλία, εφαρμόστηκε ο διαχωρισμός υγρού-στερεού ως στάδιο προεπεξεργασίας κοπριάς προερχόμενης από χοιροστάσιο με σκοπό την παραγωγή βιοαερίου από αντιδραστήρα τύπου SBR (Sequencing Batch Reactor) σε βιομηχανική κλίμακα [130].

Η συνδυασμένη επεξεργασία κτηνοτροφικών αποβλήτων με σκοπό την παραγωγή βιοαερίου (από το υγρό) και εδαφοβελτιωτικού (από τα στερεά) έχει προταθεί και συστήνεται από μια σειρά ερευνητικών προγραμμάτων και ειδικών του τομέα [131]–[133] και έχει εφαρμοστεί σε ορισμένες περιπτώσεις. Μία από αυτές είναι η περίπτωση του Hengelo στην Ολλανδία [134], όπου ένας αντιδραστήρας εμβολικής ροής είναι συνδεδεμένος με ένα μεγάλο σύστημα κομποστοποίησης. Μία άλλη περίπτωση συνδυασμού αναερόβιας χώνευσης και κομποστοποίησης εντοπίζεται στην περιοχή Järna της Σουηδίας [135], όπου μία πρότυπη μονάδα παραγωγής βιοαερίου παράγει ταυτόχρονα βιοαέριο και στερεό εδαφοβελτιωτικό από κοπριά. Τέλος, μια παρόμοια μονάδα συνδυασμένης παραγωγής βιοαερίου και



εδαφοβελτιωτικού έχει εγκατασταθεί και λειτουργεί στην Ιταλία [136] από την επεξεργασία στερεών αστικών αποβλήτων.

Ένας από τους βασικούς στόχους της παρούσας διατριβής ήταν η ανάπτυξη μιας καινοτόμου μεθόδου ολοκληρωμένης διαχείρισης κτηνοτροφικών αποβλήτων και αποβλήτων τυροκομείου μέσω της παραγωγής βιοαερίου από ταχύρρυθμο πιλοτικό βιοαντιδραστήρα τύπου PABR με ταυτόχρονη παραγωγή υψηλής ποιότητας εδαφοβελτιωτικού. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, αναπτύχθηκε ένα στάδιο προεπεξεργασίας για το διαχωρισμό του υγρού από το στερεό κλάσμα των αποβλήτων, με σκοπό την παραγωγή βιοαερίου από το υγρό και εδαφοβελτιωτικού από το στερεό. Το στάδιο προεπεξεργασίας ήταν απαραίτητο διότι, όπως προαναφέρθηκε, ο PABR είναι ένας ταχύρρυθμος βιοαντιδραστήρας, άρα δεν μπορεί να επεξεργαστεί απόβλητα με συγκεντρώσεις ολικών στερεών άνω του 5% [137].

Η πειραματική διαδικασία που αφορά στην παραγωγή βιοαερίου, που παρουσιάζεται στο παρόν κεφάλαιο, αναπτύχθηκε εν μέρει στα πλαίσια του προγράμματος ΑΕΝΑΟΣ (Ανάπτυξη πολυπαραμετρικού μαθηματικού μοντέλου για τη βελτιστοποίηση του ενεργειακού σχεδιασμού σε Ορεινές περιοχές). Η περιοχή μελέτης του ερευνητικού έργου ήταν ο δήμος Μετσόβου.

Για την ανάπτυξη της ολοκληρωμένης μεθόδου διαχείρισης ήταν απαραίτητη αρχικά η καταγραφή της υπάρχουσας κατάστασης ως προς τις ετήσιες παραγόμενες ποσότητες κτηνοτροφικών αποβλήτων από την περιοχή μελέτης με ταυτόχρονη συλλογή χρήσιμης εμπειρίας από την επαφή με τους ντόπιους παραγωγούς. Με βάση την καταγραφή της υπάρχουσας κατάστασης, υπολογίστηκαν οι ετήσιες παραγόμενες ποσότητες ανά είδος κτηνοτροφικού αποβλήτου για το δήμο Μετσόβου και παρασκευάστηκε μίγμα τροφοδοσίας αντιπροσωπευτικό ως προς τις ποσότητες αυτές με σκοπό τη διασφάλιση της ασφάλειας εφοδιασμού σε περίπτωση εγκατάστασης βιομηχανικής κλίμακας μονάδας στην περιοχή μελέτης. Στη συνέχεια ακολούθησε συλλογή αντιπροσωπευτικών ποσοτήτων αποβλήτων από τις τοπικές κτηνοτροφικές μονάδες και πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές αναλύσεις με σκοπό το φυσικοχημικό χαρακτηρισμό του κάθε είδους αποβλήτου. Τέλος, το υγρό κλάσμα του μίγματος οδηγήθηκε στον πιλοτικό PABR και πραγματοποιήθηκαν πειράματα αναερόβιας χώνευσης με σκοπό τη μελέτη της λειτουργίας του συστήματος υπό τη μέγιστη δυνατή οργανική φόρτιση.

Η διαδικασία καταγραφής της υπάρχουσας κατάστασης ως προς την ετήσια παραγωγή κτηνοτροφικών αποβλήτων στο δήμο Μετσόβου, της δειγματοληψίας και του χαρακτηρισμού των ρευμάτων και τα αποτελέσματα των πειραμάτων αναερόβιας χώνευσης παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο, ενώ σε επόμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 8) παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία της κομποστοποίησης του στερεού κλάσματος του σταδίου διαχωρισμού.

## **6.2 Καταγραφή υπάρχουσας κατάστασης περιοχής Δ. Μετσόβου**

Η καταγραφή της υπάρχουσας κατάστασης κινήθηκε σε δύο βασικούς άξονες: Στην επικαιροποίηση των βιβλιογραφικών δεδομένων που καταγράφηκαν στο ερευνητικό έργο του ΜΕ.Κ.Δ.Ε όσον αφορά την ποσότητα των κτηνοτροφικών αποβλήτων και των αποβλήτων τυροκομείου της περιοχής και στην επαφή με τους ντόπιους παραγωγούς για την καταγραφή κυρίως των προβλημάτων που σχετίζονται με τη διαχείριση των αποβλήτων τους.

Μέσω επιτόπιας έρευνας διαπιστώθηκε ότι ο αριθμός των χοίρων είναι αυξημένος σε σχέση με τα καταγεγραμμένα δεδομένα της προηγούμενης έρευνας, καθώς προστέθηκε και ο μεγάλος αριθμός των χοιρομητέρων (9.000) που ανήκουν στην χοιροτροφική επιχείρηση ΠΑΠΠΑΣ Α.Β.Ε.Ε. που εδράζεται σε απόσταση περίπου 18 χιλιομέτρων από το Μέτσοβο. Η επιχείρηση δήλωσε πρόθυμη για προσφορά των αποβλήτων της στο σενάριο κατασκευής μονάδας παραγωγής βιοαερίου στην περιοχή του Μετσόβου.

Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι η μοναδική εγκατάσταση αγελάδων γαλακτοπαραγωγής της περιοχής που ανήκει στους Αφους Βαδεβούλη φιλοξενεί 140 αγελάδες γαλακτοπαραγωγής. Έτσι, ο αρχικά καταγεγραμμένος αριθμός των 1.104 βοοειδών χωρίστηκε σε 140 αγελάδες γαλακτοπαραγωγής και 964 βοοειδή κρεατοπαραγωγής.

Από τις συγκεκριμένες τροποποιήσεις, η παραγωγή κτηνοτροφικών αποβλήτων ανά είδος της ευρύτερης περιοχής του Μετσόβου διαμορφώθηκε όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.2.1.

**Πίνακας 6.2.1** Παραγόμενη ποσότητα κτηνοτροφικών αποβλήτων (ανά προέλευση) ευρύτερου δήμου Μετσόβου

Είδος ζώου	Αριθμός	Συνολικά απόβλητα/ημέρα (tn)	Συνολικά Απόβλητα/έτος (tn)*
<b>Αιγοπρόβατα</b>	1.535	4,91	1.792
<b>Πουλερικά</b>	1.256.550	63,33	15.832
<b>Χοίροι</b>	9.850	4,88	20.640
<b>Αγελάδες γαλακ/γής</b>	140	7,7	2.812
<b>Βοοειδή κρεατ/γής</b>	964	20,35	3.663
<b>Σύνολο</b>	-	101,17	44739
*Ημέρες εκτροφής για αιγοπρόβατα, χοίρους, αγελάδες γαλακ/γής=365, πουλερικά=250, βοοειδή κρεατ/γής=180			

Η εκτροφή των διαφόρων εσταβλισμένων ζώων όπως φαίνεται και στην υποσημείωση του Πίνακα 3.6 εμφανίζει εποχικότητα, η οποία οφείλεται κυρίως σε κλιματικούς παράγοντες.

Η ετήσια παραγωγή αποβλήτων τυροκομείου παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.2.2.

**Πίνακας 6.2.2** Ετήσια παραγόμενη ποσότητα υπολειμμάτων από τυροκομική δραστηριότητα του ιδρύματος Τοσίτσα

Είδος	Ποσότητα (lt/έτος)	Διαθεσιμότητα	Υπολείμματα (tn/έτος)
<b>Τυρόγαλο</b>	1.745.500	50%	873

Η καταγραφή των δεδομένων επικεντρώθηκε στα κτηνοτροφικά απόβλητα και στα υπολείμματα τυροκομείου, καθώς κρίθηκε ότι το προς συγχώνευση μίγμα θα πρέπει να αποτελείται από συναφή απόβλητα ως προς την χημική τους σύσταση, καθώς ο ΡΑΒΡ βρίσκεται σε πιλοτικό στάδιο και οποιαδήποτε χημική «ανομοιογένεια» θα μπορούσε να οδηγήσει τη διεργασία σε αστοχία. Σε επόμενο

στάδιο θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί σειρά πειραμάτων για τον έλεγχο της απόδοσης αναερόβιας συγχώνευσης αγροτικών και κτηνοτροφικών αποβλήτων.

Οι παραγόμενες ποσότητες αποβλήτων ανά είδος ζώου στηρίχθηκαν σε βιβλιογραφικά δεδομένα και παρουσιάζονται στους Πίνακες 6.2.3 και 6.2.4.

**Πίνακας 6.2.3** Παραγόμενη οργανική ύλη από εντατική κτηνοτροφία [138]

Είδος ζώου	Αριθμός	lt αποβλήτων /κgr Ζ.Β*	Απόβλητα ανά μονάδα ζώου (lt)	Απόβλητα / ημέρα (lt)	Απόβλητα ημέρα σε τν	Ποσότητα Ξ.Ο τν/ έτος	Ποσότητα οΞ.Ο τν/ έτος	Ποσότητα VS τν/ έτος	Παραγόμενο Βιοαέριο m <sup>3</sup> / έτος
Αιγοπρόβατα	1.535	0,040	3,2	4.912	4,91	448	358,4	-	161.280
Πουλερικά	1.256.550	0,056	0,05	63.330	63,33	3.166,5	-	2.533,2	886.620-1.519.920
Χοίροι	850	0,058	5,8	4.930	4,88	178	-	142,4	35.600-71.200
Σύνολο				73.172	73,12	3.792,5			1.083.500-1.752.400

Σημείωση: Ημέρες εκτροφής για αιγοπρόβατα=365, πουλερικά=250, χοίροι=365

**Πίνακας 6.2.4** Παραγωγή φρέσκιας πρώτης ύλης ανά 1000kg Ζώντος Βάρους την ημέρα [138]

Παράμετρος	Μονάδα	Αγελάδες γαλκτ/γής	Βοοειδή κρεο/γής	Χοίροι	Πρόβατα/ αίγες	Πτηνά (κρεο/γής)
Συνολική κοπριά	kg	86	58	84	40	85
Πυκνότητα	Kg/m <sup>3</sup>	990	1.000	990	1.000	1.000
Ολικά στερεά	kg	12	8,5	11	11	22
Πτητικά στερεά	kg	10	7,2	8,5	9,2	17

Τυπικές τιμές ζώντος βάρους για στις οποίες αναφέρονται οι παραπάνω τιμές είναι: αγελάδας γαλακτοπαραγωγής, 640kg; Μοσχάρια κρεοπαραγωγής, 360kg; Χοίροι, 61kg; Πρόβατα, 27kg, Αίγες, 64kg; πτηνά κρεοπαραγωγής, 0.9kg

Σε επόμενο στάδιο, όπως προαναφέρθηκε, πραγματοποιήθηκαν επισκέψεις σε ντόπιους παραγωγούς (Πίνακας 6.2.5) με σκοπό τη συλλογή εμπειρίας από τις δυσκολίες που παρουσιάζονται κατά τη διαχείριση των παραγόμενων ανά μονάδα αποβλήτων (καθώς και για την καταγραφή της διαθεσιμότητας από πλευράς τους να διαθέσουν τα απόβλητά τους σε ενδεχόμενη κατασκευή μονάδας βιοαερίου στην περιοχή), για την καταγραφή των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της κάθε μονάδας και, τέλος, για την πραγματοποίηση της συλλογής αντιπροσωπευτικών προς εργαστηριακή ανάλυση δειγμάτων.

**Πίνακας 6.2.5 Συνοπτικά αποτελέσματα ερωτηματολογίου**

Επωνυμία	Κώστας Μπούμπας	Δημήτρης Μπούμπας	Αφοι Βαδεβούλη	Α. Παπαγγελής	"Τυροκομείο-Ιδρύματος Βαρώνου Μιχαήλ Τσιτσά"	Παππάς ΑΒΕΕ
Είδος	Αιγοπρόβατα	Πουλερικά	Αγελάδες Γαλακτοπαραγωγής	Βοσειδή κρεατοπαραγωγής	Τυροκομείο	Χοιρινά κρεατοπαραγωγής
Αριθμός ζώων	300	9000	140	50	-	9000
Σύσταση αποβλήτου	Κοπριά	Κοπριά-άχυρο ξύλο	Κοπριά	Κοπριά	Τυρόγαλα	Κοπριά-νερό
Εποχικότητα	Μεγαλύτερες ποσότητες το χειμώνα	-	-	-	Μεγαλύτερες ποσότητες το καλοκαίρι	-
Διαχείριση-αποβλήτου	Διάθεση στο λιβάδι ως κοπριά, καλλιέργεια τριφυλλιού	1 κύκλος παραγωγής	Βόθρος- διαχωριστής- απορροφητικός βόθρος	Κοπροσωρός- χώνευση	Καθημερινή μεταφορά αποβλήτου σε κτηνοτροφική μονάδα/ Απόσταση 40km	Αποθήκευση σε στεγανό βόθρο για συλλογή κατάλληλης ποσότητας
Είδος τροφής	Χορτάρι, τριφύλλι, άχυρο, καλαμπόκι	Σιτηρέσιο	Τριφύλλι, άχυρο, καλαμπόκι, σόδα, κριθάρι, μελάσα (2tn/ημέρα)	Σανό	-	Δημητριακά, ιχθυάλευρο
Κόστος διαχείρισης	-	150€/κύκλο παραγωγής	Μεταφορά-ενοίκιαση χωραφίου/διάθεσης/5000€/χρόνο+700€ ενοίκιο+45000€ αρχικό κόστος αγοράς εξοπλισμού	-	Μεταφορικά	Μηχαν/κός εξοπλισμός, κόστος β'βάθμιου 50000€
Θεωρείτε ότι η διαχείριση του αποβλήτου αποτελεί πρόβλημα για την επιχείρησή σας;	όχι	όχι	ναι	όχι	ναι	ναι
Προβλήματα με περιοίκους	όχι	όχι	όχι	όχι	όχι	οσμές
Διαθεσιμότητα	μάλλον όχι	ναι	ναι	ναι	ναι	ναι

Τα στοιχεία που συνελέγησαν είναι ενδεικτικά, οποιαδήποτε γενίκευση θα πρέπει να πραγματοποιείται με επιφύλαξη. Πάντως, η πλειοψηφία των παραγωγών εντόπισε προβλήματα σχετικά με τη διαχείριση των αποβλήτων. Για το λόγο αυτό οι παραγωγοί δήλωσαν σχεδόν στο σύνολό τους διαθέσιμοι να παραχωρήσουν τα απόβλητά τους στο ενδεχόμενο κατασκευής μονάδας παραγωγής βιοαερίου στην περιοχή, είτε λόγω του υψηλού κόστους διαχείρισης που αντιμετωπίζουν, είτε λόγω του αυξημένου φόρτου εργασίας που απαιτείται καθημερινά για τη διαχείριση.



**Εικόνα 6.2.1** Κτηνοτροφικές εγκαταστάσεις και διαχείριση κτηνοτροφικών αποβλήτων στην περιοχή του Μετσόβου

### 6.3 Δειγματοληψία και χαρακτηρισμός

Η δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε με σκοπό να ανακτηθούν αντιπροσωπευτικά δείγματα από τα απόβλητα κάθε μονάδας, τόσο από πλευράς σύστασης όσο και από πλευράς χρόνου παραμονής του αποβλήτου στην εκάστοτε κτηνοτροφική μονάδα. Τα στερεά απόβλητα συνελέγησαν σε πλαστικές σακούλες, ενώ τα δείγματα συνελέγησαν από 10-15 διαφορετικά σημεία των κοπροσορών με στόχο τη μεγαλύτερη δυνατή αντιπροσωπευτικότητα. Τα υγρά/υδαρή δείγματα συνελέγησαν σε πλαστικά δοχεία, ακολουθώντας την ίδια πρακτική.

Τα απόβλητα μεταφέρθηκαν εντός 24ώρου στο Εργαστήριο Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας της σχολής Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ για να υποβληθούν σε χημικές αναλύσεις. Οι ποσότητες που συνελέγησαν ήταν επαρκείς για όλη τη διάρκεια των πειραματικών κύκλων και διατηρήθηκαν στην κατάψυξη για την αποφυγή της αλλοίωσης των φυσικοχημικών τους χαρακτηριστικών. Η διαδικασία της δειγματοληψίας, τόσο κατά τη συλλογή όσο και κατά τη δειγματοληψία με σκοπό το χαρακτηρισμό τους, πραγματοποιήθηκε με βάση τα πρότυπα της Υπηρεσίας Προστασίας του Περιβάλλοντος των ΗΠΑ [57].

Πιο συγκεκριμένα, κατά την εργαστηριακή δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε τετραμερισμός των στερεών και υδαρών τύπων αποβλήτων έως τελικής μάζας ίσης με 100g ώστε το προς χαρακτηρισμό δείγμα να έχει τη μεγαλύτερη δυνατή αντιπροσωπευτικότητα. Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν εις τριπλούν.



**Εικόνα 6.3.1** Τα δείγματα προς ανάλυση και χαρακτηρισμό ανά είδος αποβλήτου

#### **Σχήμα 3.4** Τα δείγματα σε περιβάλλον εργαστηρίου

Τα δείγματα των αποβλήτων υποβλήθηκαν σε εργαστηριακό έλεγχο με σκοπό τον προσδιορισμό του ποσοστού υγρασίας, των ολικών και πτητικών τους στερεών, του pH, του ολικού οργανικού τους φορτίου, του ολικού και του διαλυτού αζώτου, του ολικού φωσφόρου και τέλος του δυναμικού βιοαερίου ξεχωριστά για κάθε είδος. Τα βασικά αποτελέσματα των χαρακτηρισμών παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.3.1.

**Πίνακας 6.3.1** Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά κτηνοτροφικών αποβλήτων περιοχής Δ. Μετσόβου

Τύπος αποβλήτου	Υγρασία (%)	VS (g/g <sub>νυπού</sub> )	pH (20°C)	tCOD/VS (g/g <sub>vs</sub> )
<b>Βοοειδή (κρεατοπαραγωγής)</b>	74,7±0,4	0,2±0,01	8,74±0,1	0,92±0,06
<b>Πουλερικά</b>	61,9±2,1	0,34±0,03	7,45±0,08	0,79±0,06
<b>Αιγοπρόβατα</b>	74,2±0,4	0,23±0,01	7,44±0,01	0,95±0,08
<b>Αγελάδες (γαλακτοπαραγωγής)</b>	87,8±0,1	0,1±0,001	8,68±0,07	1,47±0,13
<b>Χοίροι</b>	86,3±0,2	0,09±0,003	7,3±0,05	1,59±0,03
<b>Τυρόγαλο</b>	93±0,1	0,05±0,001	6,03±0,07	1,51±0,03

Με βάση την υγρασία τους, τα απόβλητα των βοοειδών κρεατοπαραγωγής, των πουλερικών και των αιγοπροβάτων χαρακτηρίζονται ως στερεά απόβλητα, αυτά των αγελάδων γαλακτοπαραγωγής και του χοιροστασίου ως υδαρή και το τυρόγαλο ως υγρό απόβλητο.

Το ποσοστό των πτητικών στερεών είναι αρκετά μεγάλο για όλα τα είδη αποβλήτων, με τιμές που κυμαίνονται από 65% έως και 90%. Σημειώνεται ότι τα πτητικά στερεά συνήθως θεωρείται ότι είναι τα στερεά αυτά που κατά κύριο λόγο χωνεύονται από βακτήρια.

Τα απόβλητα των πουλερικών, των χοίρων και των αιγοπροβάτων έχουν ουδέτερο pH. Τα απόβλητα των βοοειδών χαρακτηρίζονται ελαφρώς αλκαλικά, υποδεικνύοντας αυξημένη ποσότητα αμμωνίας, γεγονός σχετικά αναμενόμενο αφού περιέχουν μεγάλο ποσοστό ουρίας λόγω του τρόπου αποθήκευσης και συλλογής τους. Τέλος, το τυρόγαλο είναι ελαφρώς όξινο, λόγω της παρουσίας γαλακτικού οξέος.

## 6.4 Περιγραφή πειραματικών κύκλων αναερόβιας συγχώνευσης

### 6.4.1 Παρασκευή διαλύματος τροφοδοσίας

Κατά την προετοιμασία του διαλύματος τροφοδοσίας ελήφθη υπόψη η ετήσια παραγωγή της περιοχής μελέτης με σκοπό την παρασκευή ενός αντιπροσωπευτικού μίγματος. Το κριτήριο αυτό ελήφθη υπόψη κατά τους 2 πρώτους κύκλους λειτουργίας, η πειραματική διαδικασία των οποίων πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού έργου ΑΕΝΑΟΣ. Κατά τους επόμενους 2 κύκλους λειτουργίας, το μίγμα τροφοδοσία τροποποιήθηκε ως προς τη σύσταση ανά είδος αποβλήτου, με σκοπό τη μελέτη της συμπεριφοράς του συστήματος κατά την απότομη μεταβολή της σύστασης της τροφοδοσίας σε συνδυασμό με αύξηση της οργανικής φόρτισης. Τα χαρακτηριστικά και οι παράμετροι λειτουργίας που αφορούν το σχεδιασμό των 4 πειραματικών κύκλων λειτουργίας παρουσιάζονται αναλυτικά σε επόμενη ενότητα.

Στον Πίνακα 6.4.1 παρουσιάζεται η σύσταση του μίγματος αποβλήτων για κάθε πειραματικό κύκλο αναερόβιας χώνευσης.

**Πίνακας 6.4.1** Σύσταση τροφοδοσίας ανά τύπο αποβλήτου (w/w) για κάθε πειραματικό κύκλο λειτουργίας του PABR

Τύπος αποβλήτου	Κύκλοι 1 & 2 (%)	Κύκλοι 3 & 4 (%)
Βοοειδή (κρεατοπαραγωγής)	3,9	-
Πουλερικά	34,7	73,8
Αιγοπρόβατα	6,2	-
Αγελάδες (γαλακτοπαραγωγής)	8	23
Χοίροι	45,3	-
Τυρόγαλο	1,9	3,2
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

Όπως προαναφέρθηκε, ο PABR είναι ένας ταχύρρυθμος βιοαντιδραστήρας που δύναται να λειτουργεί με εξαιρετική αποτελεσματικότητα σε ιδιαίτερα χαμηλούς υδραυλικούς χρόνους παραμονής, ωστόσο παρουσιάζει δυσκολία (όπως τα περισσότερα ταχύρρυθμα συστήματα) να επεξεργαστεί απόβλητα με συγκεντρώσεις ολικών στερεών άνω του 5%. Το μίγμα που παρήχθη και στις δύο περιπτώσεις που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.4.1 ήταν υδαρές στερεό, με ολικά στερεά της τάξης του 70-80% κατά βάρος.

Για τη διασφάλιση της μείωσης της συγκέντρωσης των στερεών στην τροφοδοσία του αντιδραστήρα σε συνδυασμό με την απομάκρυνση σωματιδίων μεγάλης διαμέτρου που θα μπορούσαν να προκαλέσουν τεχνικά προβλήματα (φράξιμο σωληνώσεων), αναπτύχθηκε μία μέθοδος διαχωρισμού υγρού-στερεού. Σκοπός της μεθόδου προεπεξεργασίας ήταν συν τοις άλλοις η ανάκτηση του κατά το δυνατόν μεγαλύτερου μέρους του βιοαποδομήσιμου κλάσματος του μίγματος ώστε να τροφοδοτηθεί απαλλαγμένο από στερεά στον πιλότο για την παραγωγή βιοαερίου. Το στερεό υπόλειμμα της προεπεξεργασίας οδηγήθηκε σε εργαστηριακής κλίμακας κομποστοποιητή ενεργού όγκου 28L, όπως περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 8.

Το στάδιο προεπεξεργασίας περιελάμβανε την αιώρηση του μίγματος σε νερό θερμοκρασίας 60°C (για τη μεγιστοποίηση της βαθμού διαλυτοποίησης των οργανικών ενώσεων) υπό ισχυρή ανάδευση για 30min και στη συνέχεια τη διήθησή του υπό πίεση με τη χρήση υφασμάτινου φίλτρου (cloth filter). Στον Πίνακα 6.4.2 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του υγρού κλάσματος (εκχύλισμα) που προέκυψε από την αιώρηση 1kg μίγματος σε 5L νερού και εν συνεχεία τη διήθησή του υπό πίεση με τη χρήση του φίλτρου.

**Πίνακας 6.4.2** Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά εκχυλίσματος του μίγματος τροφοδοσίας

<b>pH</b>	7,46±0,1
<b>TSS (g/L)</b>	5,72±0,11
<b>Αγωγιμότητα (S/cm)</b>	3,93±0,7
<b>VSS(g/L)</b>	4,60±0,07
<b>sCOD (g/L)</b>	3,46±0,01
<b>tCOD(g/L)</b>	11,02±0,5
<b>TS(g/L)</b>	9,4±0,47
<b>VS(g/L)</b>	7,14±0,3
<b>Ολικοί υδατάνθρακες (g/L)</b>	1,19±0,05
<b>Διαλυτοί υδατάνθρακες (g/L)</b>	0,28±0,014
<b>Ολικό άζωτο κατά Kjeldahl (mg/L)</b>	631±1,4
Αμμωνιακό άζωτο (mg/L)	378,8±2,1
Οργανικό άζωτο (mg/L)	252,2±1,4
<b>Ολικός φώσφορος (mg/L)</b>	120,4±2,8
Ορθοφωσφορικά $PO_4^{3-}P$ (mg/L)	41,5±2,1
Οργανικός φώσφορος (mg/L)	78,9±2,8

Στον Πίνακα 6.4.3 παρουσιάζονται οι ποσότητες του μίγματος των αποβλήτων που αιωρήθηκαν ανά λίτρο νερού δικτύου σε κάθε πειραματικό κύκλο λειτουργίας, καθώς και το ποσοστό του ολικού χημικά απαιτούμενου που ανακτήθηκε στο εκχύλισμα μετά από τη διαδικασία της προεπεξεργασίας.



**Πίνακας 6.4.3** Μάζα μίγματος τροφοδοσίας και ποσοστό ανάκτησης οργανικού φορτίου για κάθε πειραματικό κύκλο

Πειραματικός κύκλος	Μάζα μίγματος ανά L νερού (g/L)	Ποσοστό ανάκτησης tCOD στο εκχύλισμα
1	100	66%
2	100	44%
3	170	58%
4	170	46%

#### **6.4.2 Πειράματα αναερόβιας χώνευσης σε πιλοτικής κλίμακας PABR**

Ο σχεδιασμός των πειραμάτων αναερόβιας συγχώνευσης πραγματοποιήθηκε με βασικό στόχο τη μελέτη της δυνατότητας παραγωγής βιοαερίου από εκχύλισμα μίγματος κτηνοτροφικών αποβλήτων με απόβλητο τυροκομείου σε έναν καινοτόμο βιοαντιδραστήρα τύπου PABR πιλοτικής κλίμακας. Ειδικότερα, όπως προαναφέρθηκε, επιχειρήθηκε η λειτουργία του αντιδραστήρα υπό διαρκώς αυξανόμενους ρυθμούς οργανικής φόρτισης με σκοπό τη μελέτη της απόδοσης του συστήματος σε κάθε πειραματικό κύκλο και κυρίως κατά τους πειραματικούς κύκλους όπου ο υδραυλικός χρόνος παραμονής είναι ο ελάχιστος δυνατός.

Βασική παράμετρος για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας του συστήματος ήταν η μελέτη της συμπεριφοράς του κατά τη διαδικασία απότομης μεταβολής ορισμένων βασικών παραμέτρων λειτουργίας του (πχ HRT, OLR, ή αλλαγή της σύστασης στην τροφοδοσία). Ειδικά στην περίπτωση της αναερόβιας χώνευσης κτηνοτροφικών αποβλήτων σε βιομηχανική κλίμακα, η εποχικότητα που χαρακτηρίζει την παραγωγή των αποβλήτων λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του τρόπου παραγωγής τους, επηρεάζει άμεσα το σχεδιασμό των εγκαταστάσεων και των συστημάτων επεξεργασίας τους. Για το λόγο αυτό, μελετήθηκε η συμπεριφορά του πιλότου υπό απότομες αλλαγές στις συνθήκες λειτουργίας τους με σκοπό τη μελέτη της σταθερότητάς του.

Κατά τον πρώτο πειραματικό κύκλο λειτουργίας, στόχος ήταν ο εγκλιματισμός της μικτής καλλιέργειας των μικροοργανισμών που προϋπήρχε στα διαμερίσματα του αντιδραστήρα στο νέο απόβλητο. Για το λόγο αυτό επελέγη υψηλός υδραυλικός χρόνος παραμονής και ταυτόχρονα χαμηλή συγκέντρωση χημικά απαιτούμενου οξυγόνου στο εκχύλισμα με το οποίο τροφοδοτήθηκε το σύστημα. Πιο συγκεκριμένα, ο χρόνος παραμονής (HRT) ρυθμίστηκε στις 22,3d και η περίοδος εναλλαγής (T) στις 2d (συνδυασμός που όπως παρουσιάζεται και στο κεφάλαιο 4 προσομοιάζει τη λειτουργία του πιλότου σε αντιδραστήρα συνεχούς έργου πλήρους ανάμειξης) με το μέσο tCOD της τροφοδοσίας να ισούται με 13,4g/L και το ρυθμό οργανικής φόρτισης (OLR) να διαμορφώνεται στα 0,6g<sub>COD</sub>/L<sub>reactor</sub>/d. Η διάρκεια του πρώτου πειραματικού κύκλου ήταν 148 ημέρες.

Κατά το δεύτερο πειραματικό κύκλο λειτουργίας, μελετήθηκε η συμπεριφορά του πιλότου μετά από απότομο -σχεδόν- υποδιπλασιασμό του HRT στις 10,65d. Η μέση συγκέντρωση του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου στην τροφοδοσία μειώθηκε στα 8,8g/L με το ρυθμό οργανικής φόρτισης να αυξάνεται στα 0,8g<sub>COD</sub>/L<sub>reactor</sub>/d. Η συνολική διάρκεια του δεύτερου πειραματικού κύκλου ήταν 78d. Η περίοδος εναλλαγής διατηρήθηκε στις 2d, με στόχο η υδραυλική συμπεριφορά του πιλότου να προσομοιάζει σε αντιδραστήρα CSTR.

Κατά τη μετάβαση από το δεύτερο στον τρίτο πειραματικό κύκλο πραγματοποιήθηκαν 2 απότομες μεταβολές των λειτουργικών παραμέτρων του συστήματος με σκοπό τη μελέτη της συμπεριφοράς του μετά από τη διαταραχή. Πιο συγκεκριμένα, η σύσταση του μίγματος τροφοδοσίας μεταβλήθηκε (βλ. Ενότητα 6.4.1) ενώ αυξήθηκε και το οργανικό περιεχόμενο της τροφοδοσίας σε 20,3g/L ( $OLR=1.91g_{COD}/L_{reactor}/d$ ). Οι υπόλοιπες λειτουργικές παράμετροι (HRT και T) διατηρήθηκαν σταθερές, με σκοπό τη μελέτη της απόκρισης του συστήματος σε μεταβολή της σύστασης και του φορτίου υπό σταθερές συνθήκες ανάμειξης. Η διάρκεια του τρίτου πειραματικού κύκλου ήταν 59 ημέρες.

Τέλος, κατά τον τέταρτο πειραματικό κύκλο λειτουργίας επιχειρήθηκε η λειτουργία του πιλότου σε ιδιαίτερα χαμηλό υδραυλικό χρόνο παραμονής της τάξης των 6d με σκοπό τη μελέτη της συμπεριφοράς του συστήματος υπό συνθήκες υψηλής ογκομετρικής παροχής. Το μέσο tCOD της τροφοδοσίας ήταν 16,2g/L με το ρυθμό οργανικής φόρτισης να διαμορφώνεται στα 2,69g<sub>COD</sub>/L<sub>reactor</sub>/d. Η διάρκεια του πειραματικού κύκλου ήταν 65 ημέρες.

Τα πειράματα με τροφοδοσία εκχύλισμα μίγματος κτηνοτροφικών αποβλήτων και αποβλήτου τυροκομείου διήρκεσαν συνολικά ένα ημερολογιακό έτος. Τα αποτελέσματα από την παρακολούθηση του συστήματος και τις εργαστηριακές αναλύσεις που πραγματοποιούνταν ανά τακτά χρονικά διαστήματα σε όλη τη διάρκεια των πειραμάτων, παρουσιάζονται αναλυτικά στην επόμενη ενότητα. Στον Πίνακα 6.4.4 συνοψίζονται οι παράμετροι λειτουργίας και τα βασικά χαρακτηριστικά της τροφοδοσίας για κάθε πειραματικό κύκλο λειτουργίας.

**Πίνακας 6.4.4** Σύνοψη παραμέτρων λειτουργίας για τους πειραματικούς κύκλους με τροφοδοσία εκχύλισμα μίγματος κτηνοτροφικών αποβλήτων και αποβλήτων τυροκομείου

	Κύκλος 1	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4
<b>HRT (d)</b>	22,3	10,65	10,65	6
<b>T (d)</b>	2	2	2	2
<b>Ογκομετρική παροχή (L/d)</b>	3,45	7,23	7,23	12,83
<b>Μέσο tCOD<sub>τροφοδοσίας</sub> (g-COD/L)</b>	13,4	8,8	20,3	16,2
<b>Ρυθμός οργανικής φόρτισης (g-COD/L/d)</b>	0,6	0,8	1,91	2,69
<b>Ημέρες λειτουργίας (d)</b>	148	78	59	65

## 6.5 Εκκίνηση PABR

Η αναερόβια ιλύς που χρησιμοποιήθηκε για την εκκίνηση του συστήματος συλλέχθηκε από το Κέντρο Επεξεργασίας Λυμάτων Μεταμόρφωσης (ΚΕΛΜ). Συνολικά, συνελήγησαν 80L ιλύος χωρισμένα σε τέσσερις φιάλες των 20L. Σημείο συλλογής της ιλύος ήταν η εκροή της μονάδας επεξεργασίας του ΚΕΛΜ. Η αναερόβια ιλύς είχε pH ίσο με  $7,59 \pm 0,25$  ( $25^{\circ}\text{C}$ ), ενώ τα ολικά και τα πτητικά αιωρούμενα στερεά της ήταν  $12,34 \pm 2,25\text{g/L}$  και  $3,98 \pm 1,26\text{g/L}$  αντίστοιχα. Αρχικά, τροφοδοτήθηκε κάθε διαμέρισμα από την αντίστοιχη βάνα εισόδου (ο PABR ήταν αρχικά άδειος) με 20L ιλύος, αφήνοντας ανοιχτές μόνο τις βάνες εξόδου του βιοαερίου και έχοντας όλες τις υπόλοιπες βάνες κλειστές. Στη συνέχεια το κάθε διαμέρισμα τροφοδοτήθηκε με 962,5ml δ/τος τροφοδοσίας. Συνολικά, πληρώθηκαν τον PABR με 83,85L, δηλαδή με 6,85L πάνω από τον ωφέλιμο όγκο του, για να μειωθεί όσο το δυνατόν ο κενός χώρος του αερίου πάνω από την επιφάνεια του υγρού εντός του PABR. Η μέθοδος αυτή αποσκοπεί στην δημιουργία κατά το δυνατόν αναερόβιων συνθηκών. Στη συνέχεια, τέθηκε σε λειτουργία η θέρμανση του bath και ο αντιδραστήρας λειτούργησε σε batch συνθήκες για 48 ώρες, ώστε να καθιζάνει η ιλύς και να καταναλωθεί το μεγαλύτερο μέρος του οργανικού φορτίου.

## 6.6 Αποτελέσματα

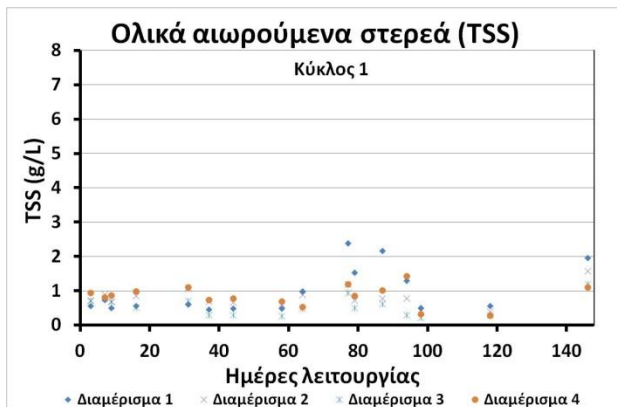
Βασικός στόχος των πειραμάτων για την αναερόβια συγχώνευση του μίγματος κτηνοτροφικών αποβλήτων και του αποβλήτου τυροκομείου (τυρόγαλα) αποτέλεσε ο έλεγχος της απόδοσης του αντιδραστήρα σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο ρυθμό οργανικής φόρτισης (Organic Loading Rate – OLR), είτε μέσω της αύξησης του οργανικού περιεχομένου της τροφοδοσίας, είτε μέσω της μείωσης του HRT. Η πειραματική διαδικασία χωρίστηκε σε 4 πειραματικούς κύκλους.

Παρακάτω, παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά τη διάρκεια των 4 πειραματικών κύκλων λειτουργίας του PABR.

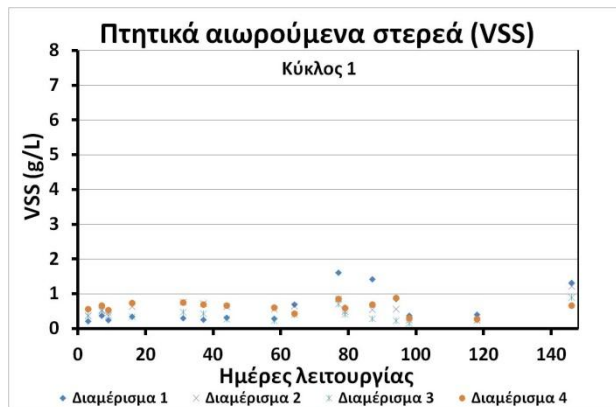
### 6.6.1 Κύκλος 1

Κατά τον πρώτο κύκλο (Κύκλος 1) ο υδραυλικός χρόνος παραμονής ορίστηκε στις 22,3d και η περίοδος εναλλαγής στις 2d, με μέσο tCOD της τροφοδοσίας ίσο με  $13,4\text{g/L}$  ( $\text{OLR} = 0,6\text{g}_{\text{COD}}/\text{L}_{\text{reactor}}/\text{d}$ ). Η συνολική διάρκεια του πρώτου πειραματικού κύκλου ήταν ίση με 148 ημέρες.

Ο PABR επέδειξε εξαιρετική σταθερότητα στη λειτουργία του κατά τη διάρκεια του πρώτου πειραματικού κύκλου. Η συγκέντρωση των ολικών αιωρούμενων στερεών κυμάνθηκε κάτω από το  $1\text{g/L}$  σχεδόν σε ολόκληρο το διάστημα των 148 ημερών στα 4 διαμερίσματα του αντιδραστήρα (Σχήμα 6.6.1). Παρόμοια συμπεριφορά παρουσίασαν και τα πτητικά αιωρούμενα στερεά, που κυμάνθηκαν μεσοσταθμικά στα  $0,6\text{g/L}$  (Σχήμα 6.6.2).

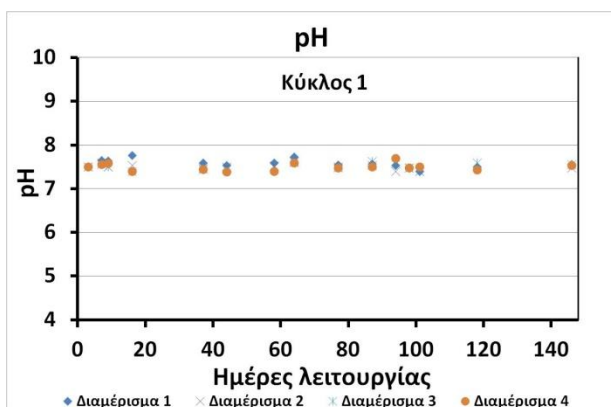


**Σχήμα 6.6.1** Συγκέντρωση ολικών αιωρούμενων στερεών στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του πρώτου πειραματικού κύκλου

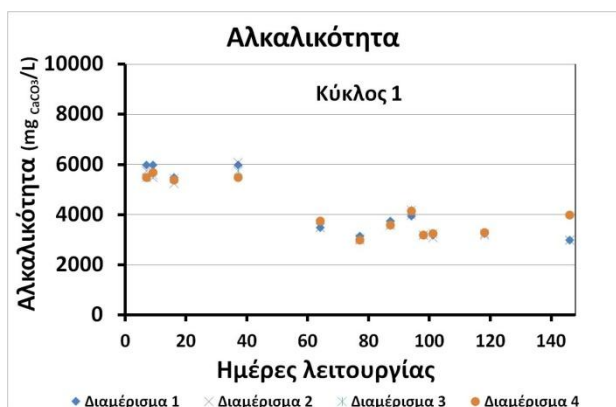


**Σχήμα 6.6.2** Συγκέντρωση πτητικών αιωρούμενων στερεών στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του πρώτου πειραματικού κύκλου

Το pH παρουσίασε σταθερή συμπεριφορά και κυμάνθηκε στην περιοχή 7,5-7,6 (Σχήμα 6.6.3), παρά το γεγονός ότι τα επίπεδα της αλκαλικότητας παρουσίασαν τάση μείωσης από τα επίπεδα των 5.500-6.000mg<sub>CaCO3</sub>/L έως την περιοχή 3.500-4.000mg<sub>CaCO3</sub>/L (Σχήμα 6.6.4) στην περιοδική μόνιμη κατάσταση του αντιδραστήρα στις τελευταίες μέρες του πειραματικού κύκλου. Σημειώνεται ότι σε όλη τη διάρκεια των πειραμάτων επεξεργασίας του εκχυλίσματος των κτηνοτροφικών αποβλήτων και του αποβλήτου τυροκομείου, δε χρησιμοποιήθηκε ρυθμιστικό διάλυμα για το pH.

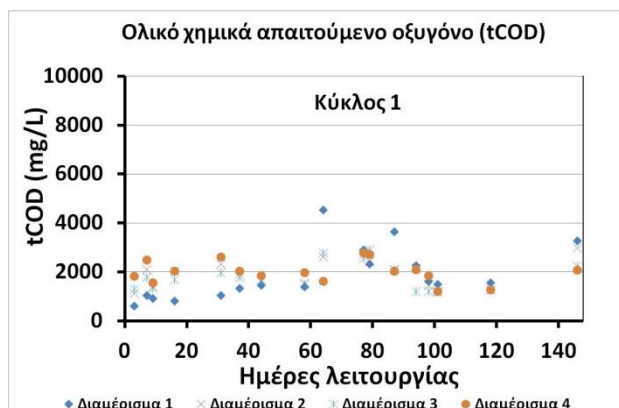


**Σχήμα 6.6.3** Διακύμανση του pH στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του πρώτου πειραματικού κύκλου

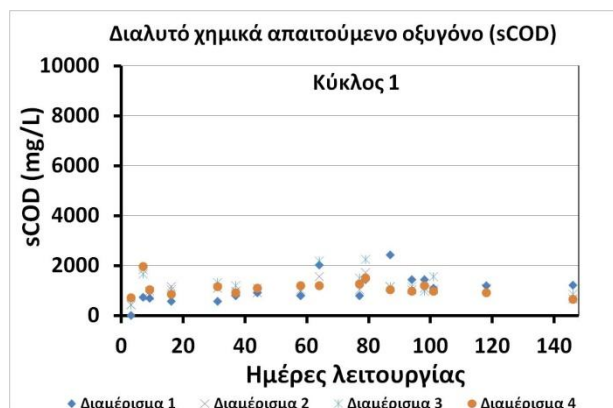


**Σχήμα 6.6.4** Διακύμανση της αλκαλικότητας στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του πρώτου πειραματικού κύκλου

Τα επίπεδα του ολικού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (tCOD) στα 4 διαμερίσματα του PABR παρουσίασαν ελαφρά αυξητική τάση κατά τους 3 πρώτους HRT του πειραματικού κύκλου 1, αλλά στη συνέχεια σταθεροποιήθηκαν στην περιοχή 1,5g/L έως 2g/L κατά τη διάρκεια της περιοδικής μόνιμης λειτουργίας (Σχήμα 6.6.5). Αντίστοιχη συμπεριφορά, με μικρότερη διακύμανση, παρουσίασε το διαλυτό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (sCOD), οι τιμές του οποίου κυμάνθηκαν περί το 1g/L κατά τις τελευταίες ημέρες του πειραματικού κύκλου (Σχήμα 6.6.6).

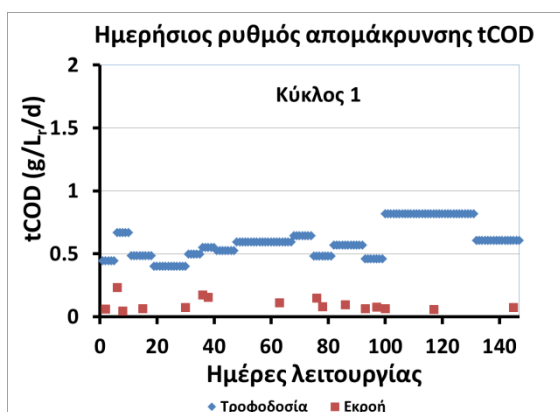


**Σχήμα 6.6.5** Ολικό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του πρώτου πειραματικού κύκλου

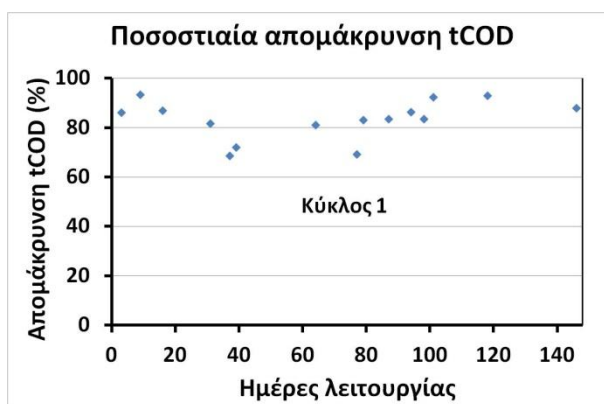


**Σχήμα 6.6.6** Διαλυτό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του πρώτου πειραματικού κύκλου

Στο Σχήμα 6.6.7 παρουσιάζεται η σύγκριση του ρυθμού οργανικής φόρτισης του συστήματος σε σύγκριση με τα επίπεδα του οργανικού περιεχομένου της εκροής του αντιδραστήρα ανά μονάδα όγκου αντιδραστήρα σε ημερήσια βάση και στο Σχήμα 6.6.8 η διακύμανση της απόδοσης του συστήματος ως προς την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου κατά τη διάρκεια του πειραματικού κύκλου αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι η ποσοστιαία απομάκρυνση του tCOD παρουσιάζει πτωτική τάση έως το πέρας 3 HRT, αλλά στη συνέχεια προσεγγίζει το 90% κατά την περιοδική μόνιμη κατάσταση του συστήματος. Η μέση ποσοστιαία απομάκρυνση tCOD κατά τη διάρκεια ολόκληρου του πρώτου πειραματικού κύκλου ήταν 83,7%.



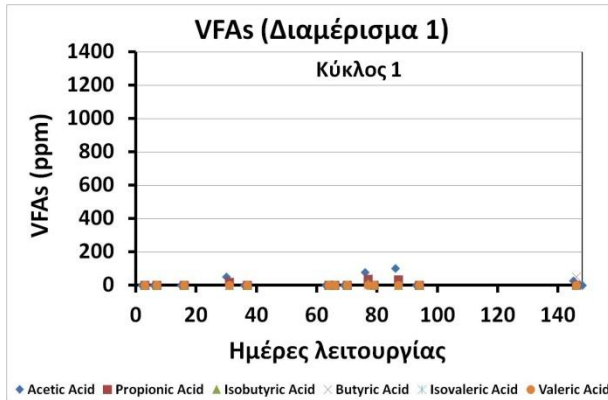
**Σχήμα 6.6.7** Σύγκριση ρυθμού οργανικής φόρτισης με το οργανικό περιεχόμενο της εκροής κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου



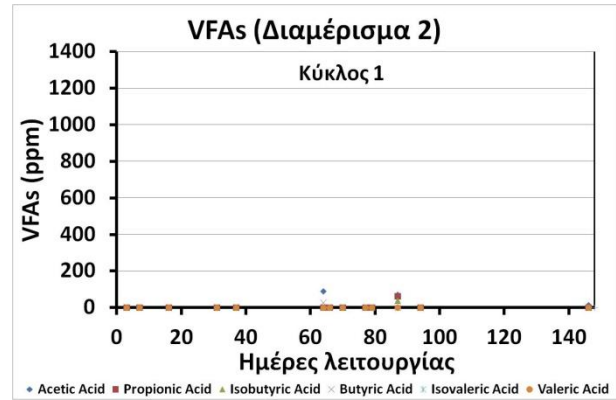
**Σχήμα 6.6.8** Απόδοση του PABR ως προς την απομάκρυνση οργανικού φορτίου κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου

Η υψηλή απόδοση του αντιδραστήρα ως προς την απομάκρυνση του tCOD αποτελεί ένδειξη ότι το σύστημα δεν τελεί υπό κινητικό περιορισμό. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται από τις σχεδόν μηδενικές συγκεντρώσεις πτητικών λιπαρών οξέων (VFAs) κατά τη διάρκεια του πειραματικού κύκλου στα 4 διαμερίσματα του PABR (Σχήματα 6.6.9-6.6.13). Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η μέση συγκέντρωση οξικού οξέος στα 4 διαμερίσματα κυμάνθηκε στα  $17,3 \pm 12 \text{ mg/L}$ , ενώ η συγκέντρωση των VFAs μακρύτερης

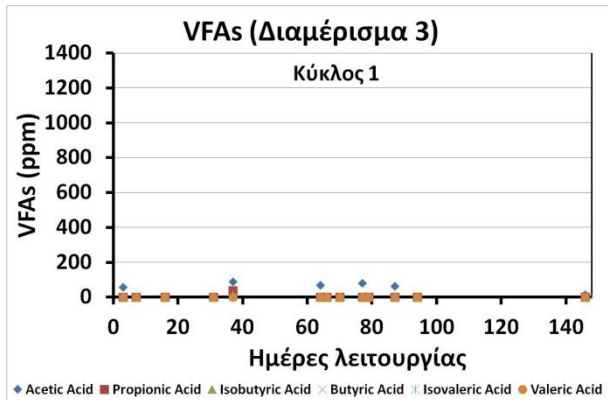
αλυσίδα κυμάνθηκε ως επί το πλείστον χαμηλότερα από τα όρια ανίχνευσης της μεθόδου προσδιορισμού.



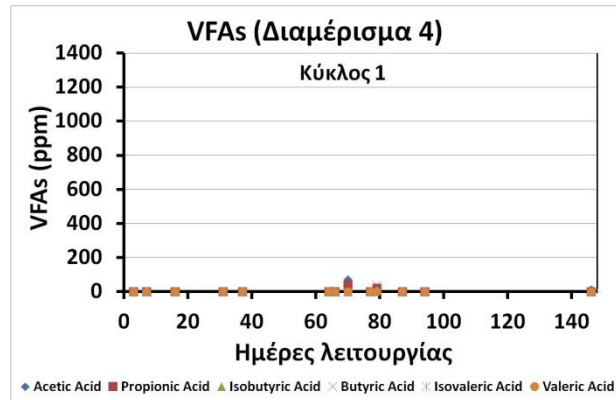
Σχήμα 6.6.9 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 1 κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου



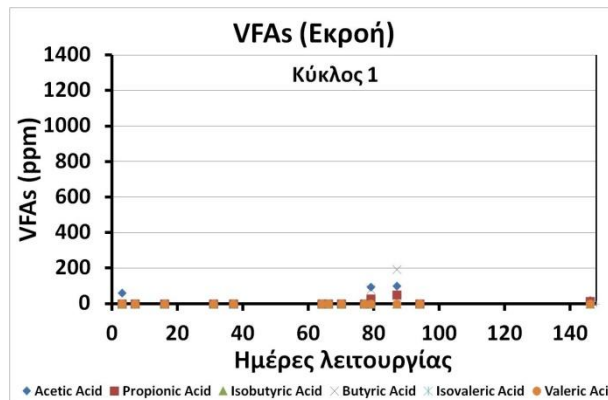
Σχήμα 6.6.10 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 2 κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου



Σχήμα 6.6.11 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 3 κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου

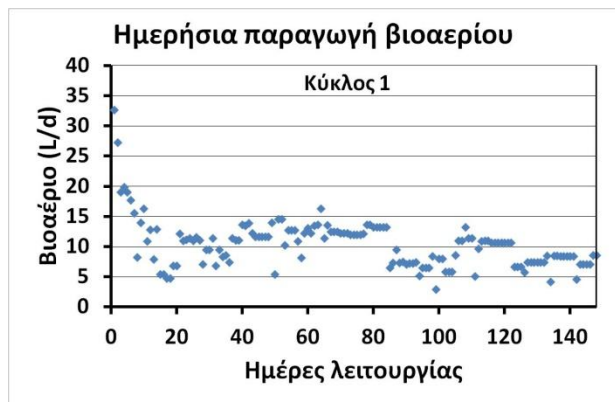


Σχήμα 6.6.12 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 4 κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου

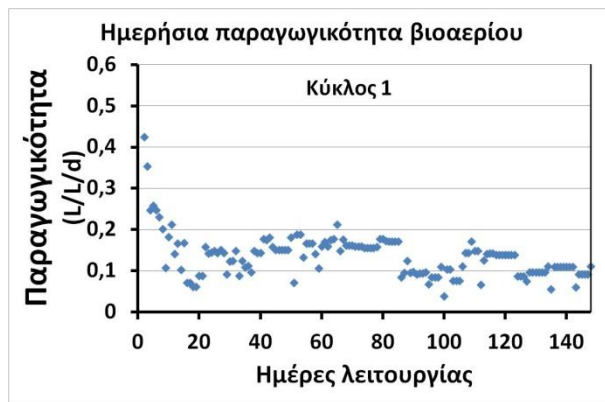


Σχήμα 6.6.13 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στην εκροή κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου

Τέλος, στο Σχήμα 6.6.14 παρουσιάζεται η ημερήσια παραγωγή βιοαερίου και στο Σχήμα 6.6.15 η παραγωγικότητα του αντιδραστήρα σε βιοαέριο ανηγμένη σε μονάδα όγκου αντιδραστήρα ανά ημέρα αντίστοιχα. Η μέση ημερήσια παραγωγή βιοαερίου ήταν  $10,4 \pm 3,9 \text{ L/d}$  και η μέση ανηγμένη παραγωγικότητα ήταν  $0,14 \pm 0,05 \text{ L/L/d}$ , με μέση σύσταση σε μεθάνιο της τάξης του 65,4%. Η παραγωγικότητα βιοαερίου ανά μονάδα μάζας (σε υγρή βάση) του αρχικού μίγματος κτηνοτροφικών αποβλήτων ήταν  $30 \text{ L/kg}$ .



Σχήμα 6.6.14 Ημερήσια παραγωγή βιοαερίου κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου

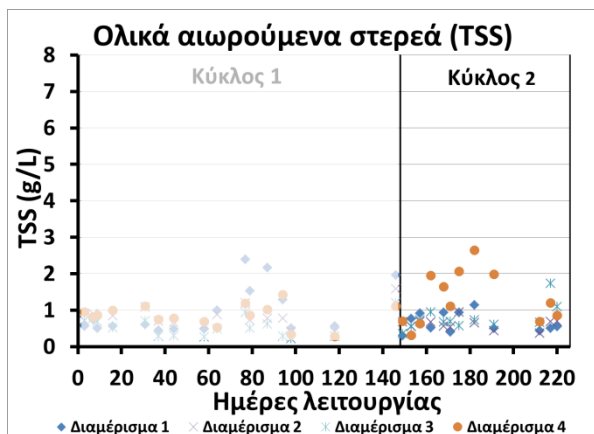


Σχήμα 6.6.15 Ημερήσια παραγωγικότητα βιοαερίου κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου

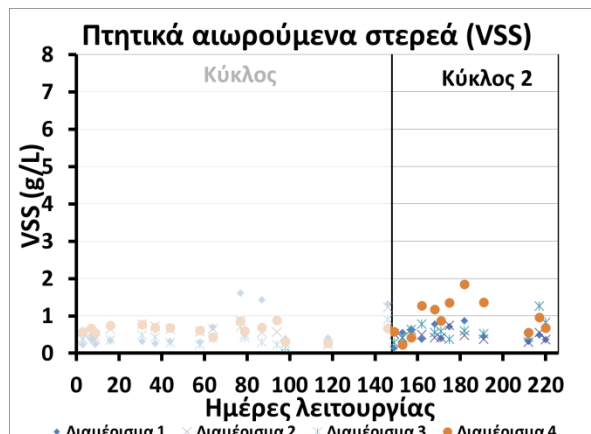
## 6.6.2 Κύκλος 2

Κατά το δεύτερο πειραματικό κύκλο ο ρυθμός οργανικής φόρτισης αυξήθηκε μέσω της μείωσης του HRT στις 10,65 ημέρες. Το μέσο tCOD της τροφοδοσίας ήταν  $8,8 \text{ g/L}$  με το ρυθμό οργανικής φόρτισης να κυμαίνεται μεσοσταθμικά στα  $0,8 \text{ g}_{\text{COD}}/\text{L}_{\text{reactor}}/\text{d}$ . Η διάρκεια του δεύτερου κύκλου ήταν 78 ημέρες.

Ο PABR ανταποκρίθηκε με σταθερότητα στον απότομο υποδιπλασιασμό του υδραυλικού χρόνου παραμονής. Η συγκέντρωση των ολικών αιωρούμενων στερεών παρέμεινε ουσιαστικά σταθερή σε σχέση με τον Κύκλο 1. Εξαίρεση αποτέλεσε το διαμέρισμα 4, στο οποίο η συγκέντρωση των ολικών στερεών παρουσίασε προσωρινή αύξηση στα επίπεδα περίπου των  $2 \text{ g/L}$  λόγω λειτουργικού προβλήματος στην έξοδό του (φράξιμο σωλήνωσης εξόδου) (Σχήμα 6.6.16). Το λειτουργικό πρόβλημα επιλύθηκε και τα επίπεδα της συγκέντρωσης επανήλθαν κατά τις τελευταίες ημέρες του πειραματικού κύκλου 2. Όμοια συμπεριφορά παρατηρήθηκε και στα επίπεδα των πτητικών αιωρούμενων στερεών στα 4 διαμερίσματα του αντιδραστήρα, που κυμάνθηκαν μεσοσταθμικά στα  $0,63 \pm 0,3 \text{ g/L}$  (Σχήμα 6.6.17).

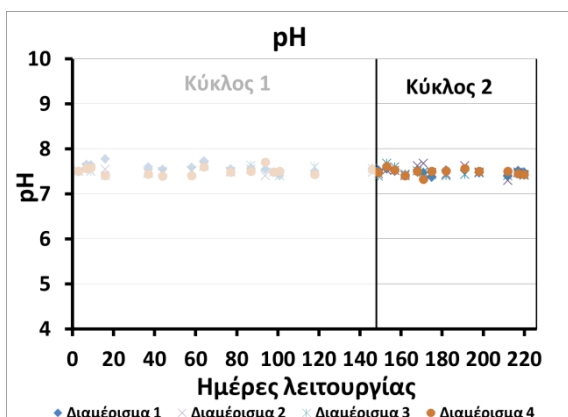


**Σχήμα 6.6.16** Συγκέντρωση ολικών αιωρούμενων στερεών στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του δεύτερου πειραματικού κύκλου

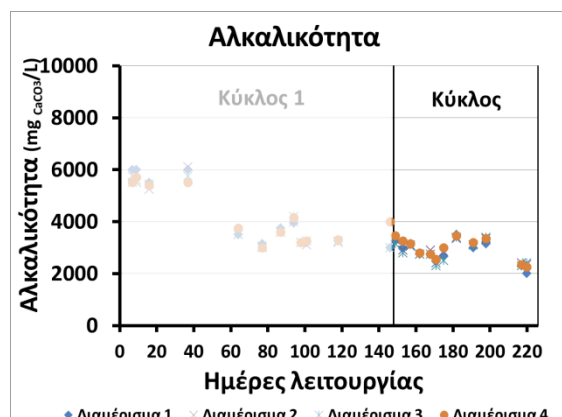


**Σχήμα 6.6.17** Συγκέντρωση πτητικών αιωρούμενων στερεών στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του δεύτερου πειραματικού κύκλου

Το pH παρέμεινε ουσιαστικά μεσοσταθμικά σταθερό στο εσωτερικό του αντιδραστήρα, δηλαδή κυμάνθηκε στην περιοχή  $7,5 \pm 0,1$  (Σχήμα 6.6.18). Η αλκαλικότητα στο εσωτερικό του αντιδραστήρα παρουσίασε επίσης σταθεροποιητική τάση σε σχέση με τη συμπεριφορά της κατά τον πειραματικό κύκλο 1, κυμαινόμενη στην περιοχή  $2.900 \pm 80 \text{mg}_{\text{CaCO}_3}/\text{L}$  (Σχήμα 6.6.19).



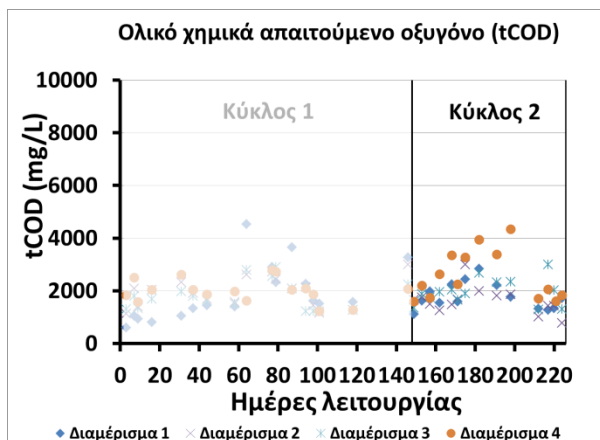
**Σχήμα 6.6.18** Διακύμανση του pH στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του δεύτερου πειραματικού κύκλου



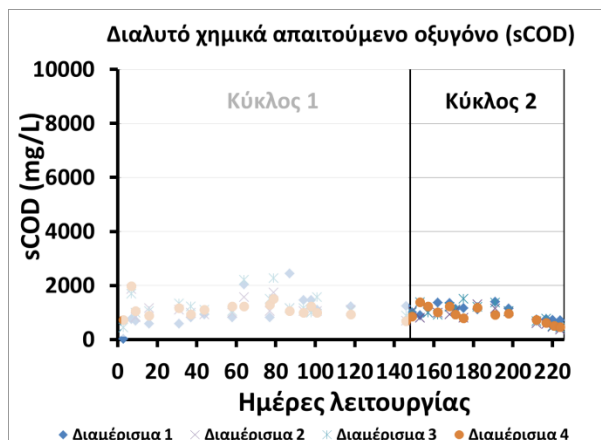
**Σχήμα 6.6.19** Διακύμανση της αλκαλικότητας στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του δεύτερου πειραματικού κύκλου

Τα επίπεδα του ολικού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (tCOD) στα 4 διαμερίσματα του PABR παρουσίασαν ξανά ελαφρά αυξητική τάση κατά τους 3 πρώτους HRT του πειραματικού κύκλου 2, αντίστοιχα με τον πειραματικό κύκλο 1. Στη συνέχεια σταθεροποιήθηκαν στην περιοχή  $1,5 \text{g}/\text{L}$  έως  $2 \text{g}/\text{L}$  κατά τη διάρκεια της περιοδικής μόνιμης λειτουργίας (Σχήμα 6.6.20). Αντίστοιχη συμπεριφορά, παρουσίασε το διαλυτό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (sCOD), οι τιμές του οποίου κυμάνθηκαν περί το  $1 \text{g}/\text{L}$  κατά τις τελευταίες ημέρες του πειραματικού κύκλου (Σχήμα 6.6.21).



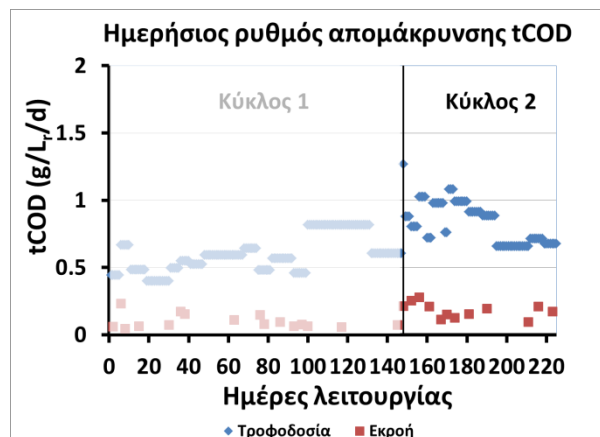


**Σχήμα 6.6.20** Ολικό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του δεύτερου πειραματικού κύκλου

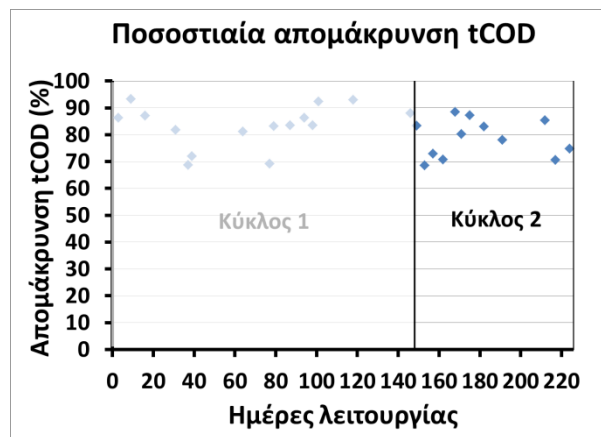


**Σχήμα 6.6.21** Διαλυτό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του δεύτερου πειραματικού κύκλου

Η απόδοση του συστήματος όσον αφορά την ποσοστιαία απομάκρυνση tCOD παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.6.22. Η μέση ποσοστιαία απομάκρυνση ολικού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου ήταν ελαφρά χαμηλότερη σε σχέση με τον πειραματικό κύκλο 1 και κυμάνθηκε μεσοσταθμικά στο 78,1%, όμως παρέμεινε αρκετά υψηλή, λαμβάνοντας υπόψη το χαμηλό υδραυλικό χρόνο παραμονής. Η σύγκριση του ρυθμού οργανικής φόρτισης του συστήματος σε σύγκριση με τα επίπεδα του οργανικού περιεχομένου της εκροής του αντιδραστήρα ανά μονάδα όγκου αντιδραστήρα σε ημερήσια βάση παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.6.23 και είναι ενδεικτική της δυνατότητας του PABR να απομακρύνει με ιδιαίτερη σταθερότητα το μεγαλύτερο μέρος του οργανικού φορτίου προς παραγωγή βιοαερίου παρά την απότομη μεταβολή του υδραυλικού χρόνου παραμονής.



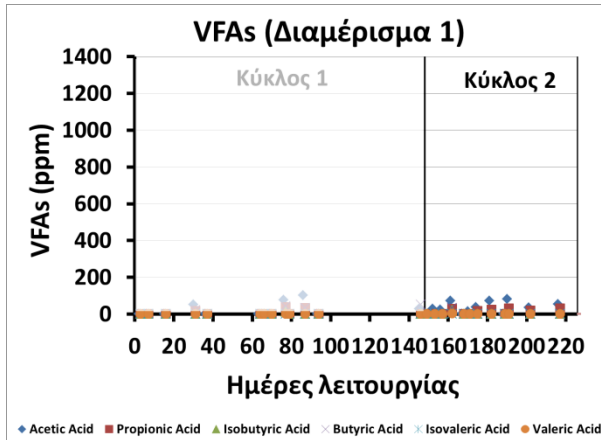
**Σχήμα 6.6.22** Σύγκριση ρυθμού οργανικής φόρτισης με το οργανικό περιεχόμενο της εκροής κατά τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου



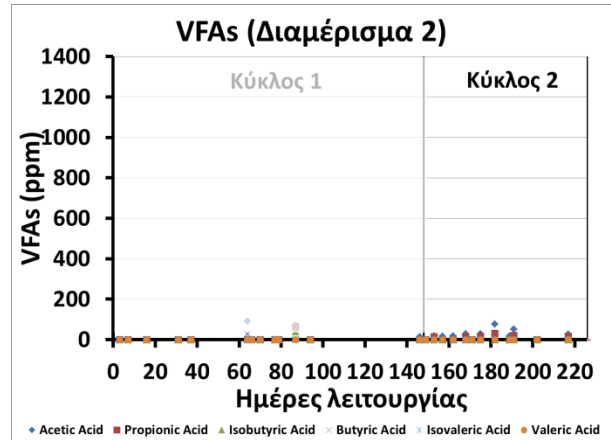
**Σχήμα 6.6.23** Απόδοση του PABR ως προς την απομάκρυνση οργανικού φορτίου κατά τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου

Όσον αφορά τα επίπεδα συγκεντρώσεων των VFAs στο εσωτερικό των διαμερισμάτων του αντιδραστήρα, παρατηρήθηκε ελαφρά αύξηση στις συγκεντρώσεις του οξικού και του προπιονικού οξέος (με μέσες συγκεντρώσεις  $35,2 \pm 15 \text{ mg/L}$  και  $13,8 \pm 5.2 \text{ mg/L}$  αντίστοιχα) με τις συγκεντρώσεις των πτητικών λιπαρών οξέων μακρύτερης αλυσίδας να παραμένουν σε επίπεδα χαμηλότερα από τα όρια ανίχνευσης της μεθόδου προσδιορισμού (Σχήματα 6.6.2-6.6.28). Το σύστημα, παρά τον χαμηλό χρόνο

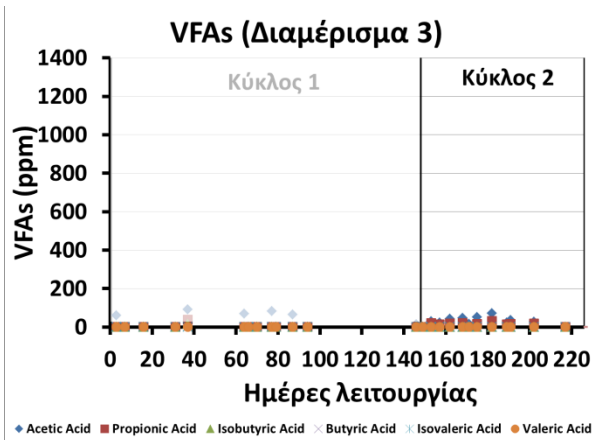
παραμονής, δεν παρουσιάζει κινητικούς περιορισμούς, με αποτέλεσμα να προσφέρεται η δυνατότητα για περαιτέρω αύξηση του ρυθμού οργανικής φόρτισης.



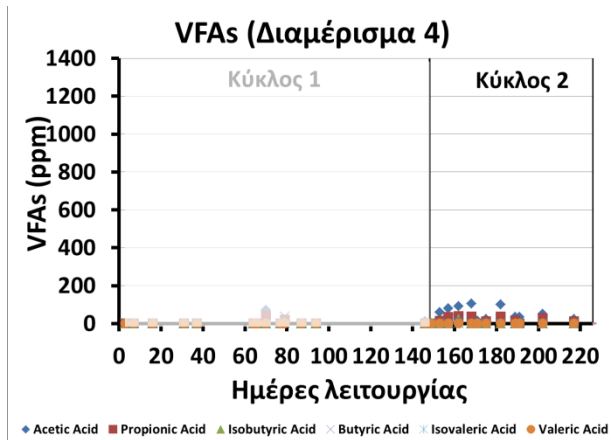
**Σχήμα 6.6.24** Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 1 κατά τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου



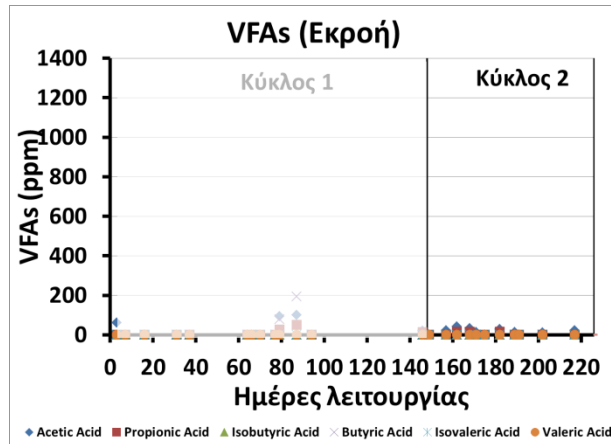
**Σχήμα 6.6.25** Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 2 κατά τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου



**Σχήμα 6.6.26** Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 3 κατά τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου

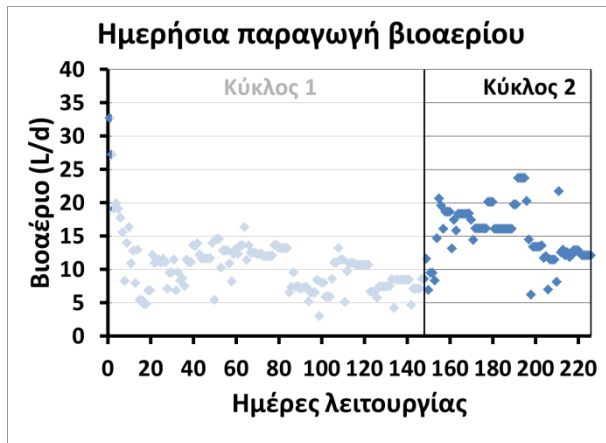


**Σχήμα 6.6.27** Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 4 κατά τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου

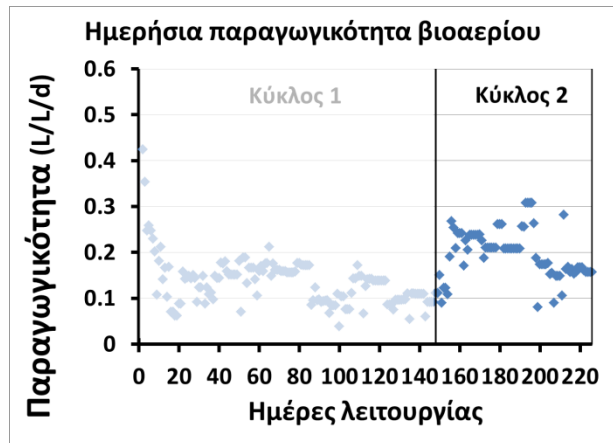


**Σχήμα 6.6.28** Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στην εκροή κατά τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου

Τέλος, στα (Σχήματα 6.6.29, 6.6.30) παρουσιάζονται η ημερήσια παραγωγή βιοαερίου και η παραγωγικότητα του αντιδραστήρα σε βιοαέριο ανηγμένη σε μονάδα όγκου αντιδραστήρα ανά ημέρα αντίστοιχα. Η μέση ημερήσια παραγωγή βιοαερίου ήταν  $15,2 \pm 3,9 \text{ L/d}$  και η μέση ανηγμένη παραγωγικότητα ήταν  $0,2 \pm 0,05 \text{ L/L/d}$ , με μέση σύσταση σε μεθάνιο της τάξης του 65%. Η παραγωγικότητα βιοαερίου ανά μονάδα μάζας (σε υγρή βάση) του αρχικού μίγματος κτηνοτροφικών αποβλήτων ήταν  $21 \text{ L/kg}$ , ελαφρώς χαμηλότερη σε σχέση με τον κύκλο 1.



**Σχήμα 6.6.29** Ημερήσια παραγωγή βιοαερίου κατά τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου



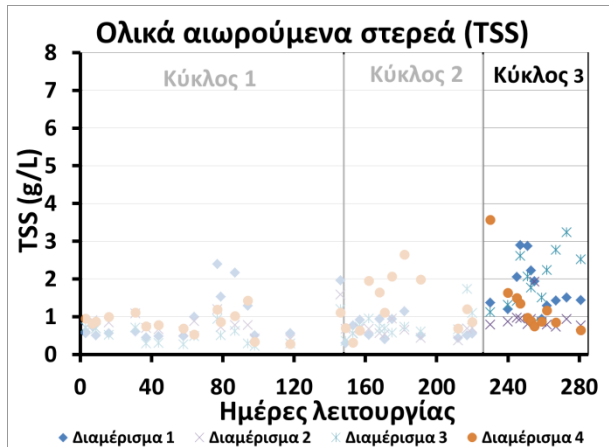
**Σχήμα 6.6.30** Ημερήσια παραγωγικότητα βιοαερίου κατά τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου

### 6.6.3 Κύκλος 3

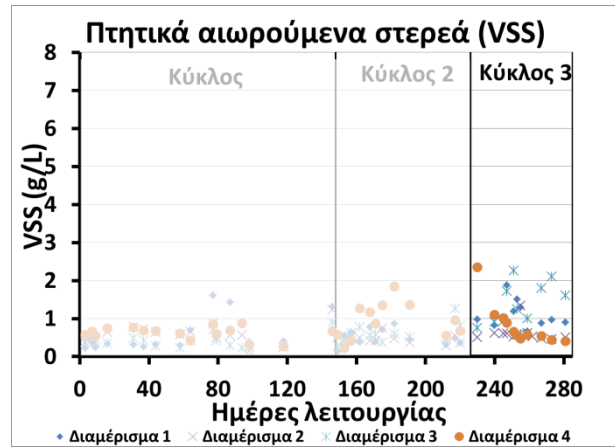
Στον τρίτο πειραματικό κύκλο, ο ρυθμός οργανικής φόρτισης αυξήθηκε ( $\text{OLR} = 1.91 \text{ g}_{\text{COD}}/\text{L}_{\text{reactor}}/\text{d}$ ) μέσω της αύξησης του μέσου tCOD της τροφοδοσίας στα  $20,3 \text{ g/L}$  με τις υπόλοιπες λειτουργικές παραμέτρους να διατηρούνται σταθερές (HRT και T) και η διάρκεια ήταν 59 ημέρες.

Η απότομη αύξηση της οργανικής φόρτισης στο σύστημα, συνετέλεσε σε περιορισμένη αύξηση των ολικών αιωρούμενων στερεών στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων (Σχήμα 6.6.31). Η μέση

συγκέντρωση των TSS στο εσωτερικό του αντιδραστήρα ήταν  $1,5 \pm 0,4 \text{ g/L}$  σε όλη τη διάρκεια του τρίτου πειραματικού κύκλου. Όμοια συμπεριφορά παρουσίασαν και τα πτητικά αιωρούμενα στερεά, με μέση συγκέντρωση ίση με  $0,94 \pm 0,3 \text{ g/L}$  (Σχήμα 6.6.32).

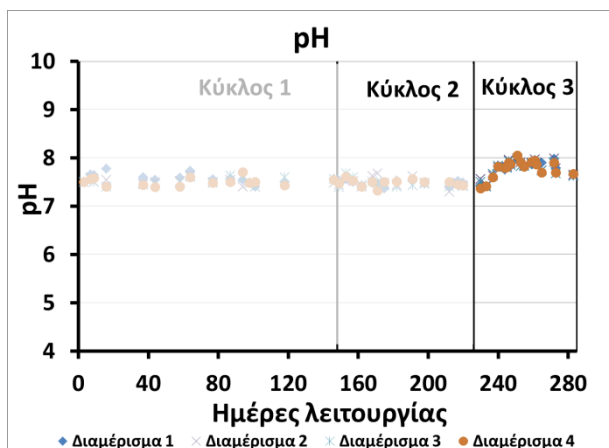


Σχήμα 6.6.31 Συγκέντρωση ολικών αιωρούμενων στερεών στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τρίτου πειραματικού κύκλου

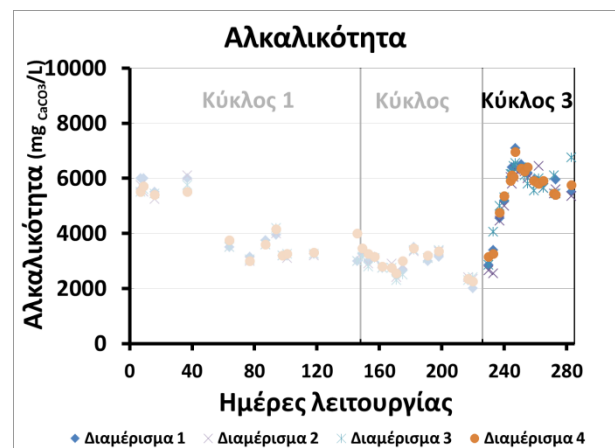


Σχήμα 6.6.32 Συγκέντρωση πτητικών αιωρούμενων στερεών στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τρίτου πειραματικού κύκλου

Το pH παρουσίασε αυξητική τάση κατά τις πρώτες μέρες του πειραματικού κύκλου (Σχήμα 6.6.33), πιθανότατα λόγω του υψηλού περιεχομένου σε ολικό άζωτο αποβλήτου πτηνοτροφείου [139], [140] που, όπως αναφέρθηκε (Ενότητα 6.4.1), συμμετείχε πλέον με ένα ποσοστό 73,8% στο μίγμα της τροφοδοσίας. Η τιμή του προσέγγισε το 8, όμως κατά την μόνιμη περιοδική λειτουργία στις τελευταίες μέρες του πειραματικού κύκλου σταθεροποιήθηκε χωρίς την προσθήκη ρυθμιστικού διαλύματος. Αντίστοιχη τάση παρουσίασε και η αλκαλικότητα στο εσωτερικό των διαμερισμάτων (Σχήμα 6.6.34), προσεγγίζοντας αρχικά την τιμή  $7000 \text{ mg}_{\text{CaCO}_3}/\text{L}$ , αλλά κατά την περιοδική μόνιμη λειτουργία σταθεροποιήθηκε στην περιοχή  $5720 \pm 40 \text{ mg}_{\text{CaCO}_3}/\text{L}$ .

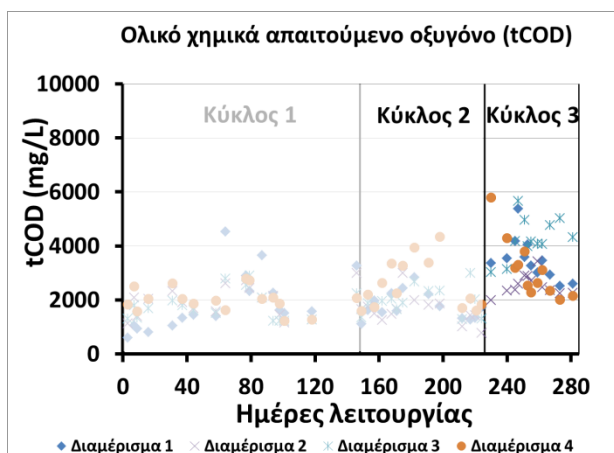


Σχήμα 6.6.33 Διακύμανση του pH στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τρίτου πειραματικού κύκλου

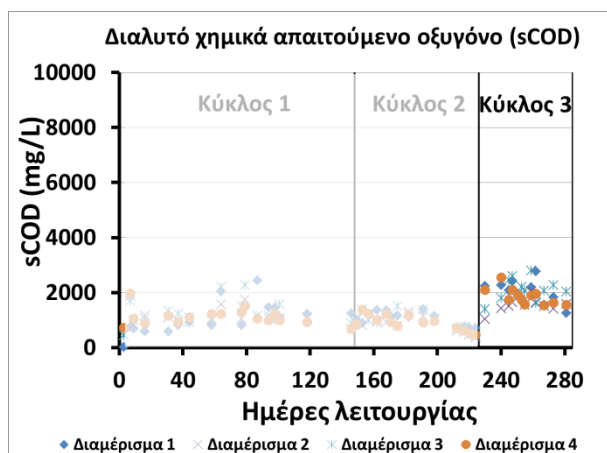


Σχήμα 6.6.34 Διακύμανση της αλκαλικότητας στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τρίτου πειραματικού κύκλου

Προσωρινή τάση συσσώρευσης παρουσίασε και το μέσο οργανικό φορτίο στο εσωτερικό των διαμερισμάτων. Το μέσο ολικό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο προσέγγισε την περιοχή 4-5g/L κατά τις πρώτες ημέρες μετά από την απότομη αύξηση της οργανικής φόρτισης, ωστόσο κατά την περιοδική μόνιμη λειτουργία στις τελευταίες ημέρες του πειραματικού κύκλου σταθεροποιήθηκε κατά μέσο όρο στην περιοχή 2-2,5g/L (Σχήμα 6.6.35). Όμοια συμπεριφορά παρουσίασε και το διαλυτό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο, το οποίο σταθεροποιήθηκε στην περιοχή 1,5-2g/L κατά την περιοδική μόνιμη λειτουργία (Σχήμα 6.6.36).

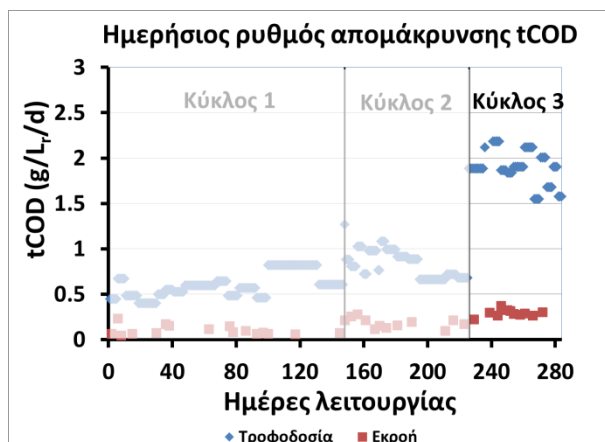


**Σχήμα 6.6.35** Ολικό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τρίτου πειραματικού κύκλου

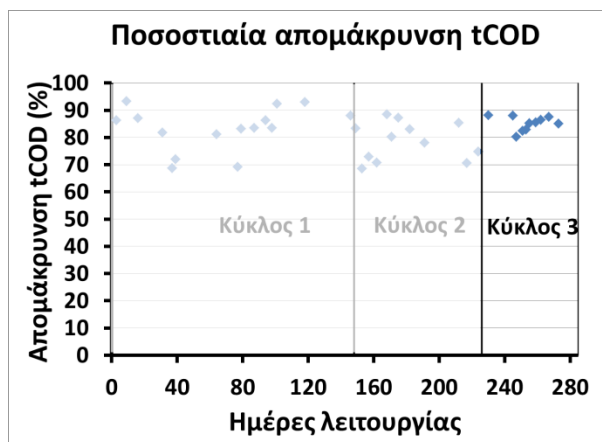


**Σχήμα 6.6.36** Διαλυτό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τρίτου πειραματικού κύκλου

Η απόδοση του συστήματος ως προς την απομάκρυνση οργανικού φορτίου ήταν η υψηλότερη σε σχέση με όλους τους πειραματικούς κύκλους κατά τον κύκλο 3, επιβεβαιώνοντας τα ευρήματα του Ι. Σκιαδά για την περίπτωση του εργαστηριακής κλίμακας PABR, όπου προέκυψε το συμπέρασμα ότι ο PABR αποδίδει βέλτιστα σε υψηλές τιμές οργανικής φόρτισης [121]. Στο Σχήμα 6.6.37 παρουσιάζεται η σύγκριση της οργανικής φόρτισης με το οργανικό περιεχόμενο της εκροής σε ημερήσια βάση. Στο Σχήμα 6.6.38 παρουσιάζεται η διακύμανση της ποσοστιαίας απομάκρυνσης οργανικού φορτίου κατά τη διάρκεια του τρίτου πειραματικού κύκλου, η οποία μεσοσταθμικά κυμάνθηκε στο 84,8%, δηλαδή λαμβάνοντας την υψηλότερη τιμή από όλους τους πειραματικούς κύκλους που αφορούν την επεξεργασία του μίγματος κτηνοτροφικών αποβλήτων με απόβλητο τυροκομείου.

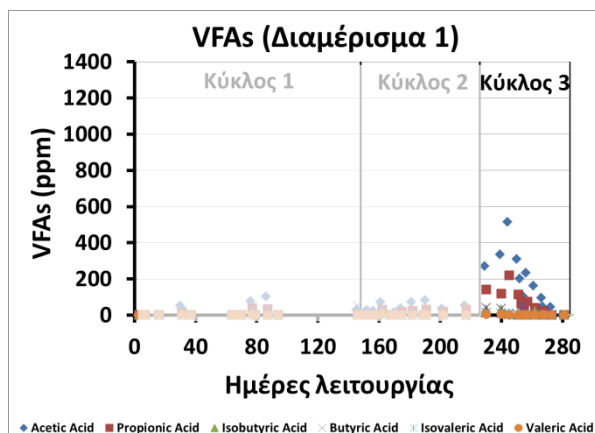


Σχήμα 6.6.37 Σύγκριση ρυθμού οργανικής φόρτισης με το οργανικό περιεχόμενο της εκροής κατά τη διάρκεια του τρίτου κύκλου

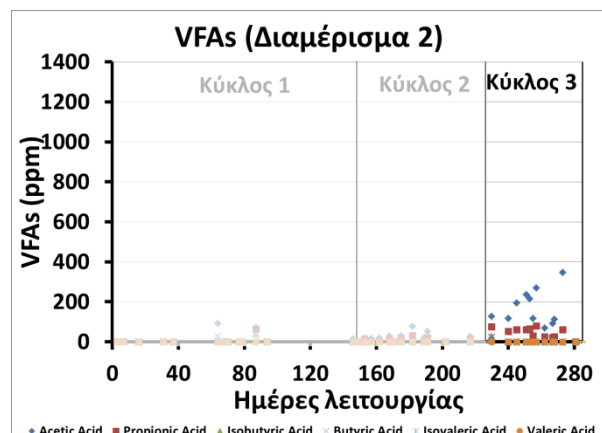


Σχήμα 6.6.38 Απόδοση του PABR ως προς την απομάκρυνση οργανικού φορτίου κατά τη διάρκεια του τρίτου κύκλου

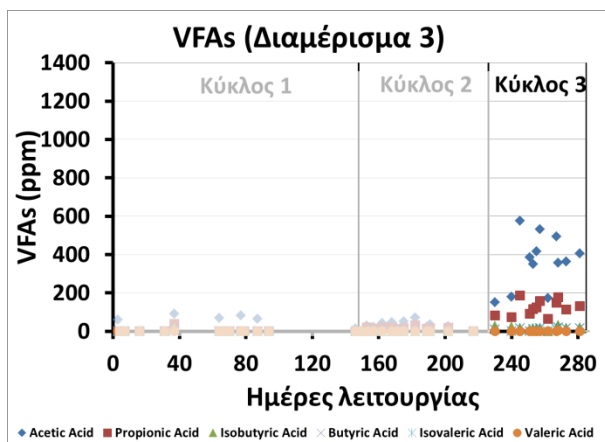
Η απότομη αύξηση του οργανικού φορτίου της τροφοδοσίας σε συνδυασμό με το χαμηλό χρόνο παραμονής, οδήγησε σε αύξηση της συγκέντρωσης του οξικού και του προπιονικού οξέος στα 4 διαμερίσματα του αντιδραστήρα (Σχήματα 6.6.39-6.6.43). Ειδικά για το οξικό οξύ, προσωρινά παρατηρήθηκε αύξηση της συγκέντρωσης, ειδικά τις πρώτες ημέρες μετά τη μεταβολή του ρυθμού οργανικής φόρτισης. Στη συνέχεια όμως αυτή περιορίστηκε και δεν παρατηρήθηκε περαιτέρω τάση συσσώρευσης, με την τιμή του κατά μέσο όρο να ισούται με  $217 \pm 149 \text{ mg/L}$ , ενώ αυτή του προπιονικού οξέος ίση με  $76,8 \pm 45,6 \text{ mg/L}$ . Τα υπόλοιπα VFAs παρέμειναν ως επί το πλείστον χαμηλότερα από τα όρια ανίχνευσης της μεθόδου προσδιορισμού.



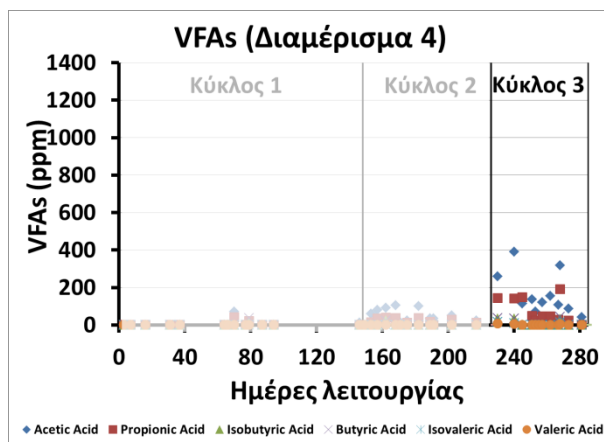
Σχήμα 6.6.39 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 1 κατά τη διάρκεια του τρίτου κύκλου



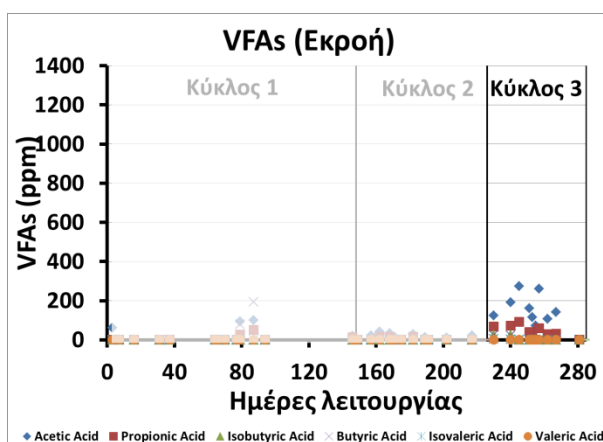
Σχήμα 6.6.40 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 2 κατά τη διάρκεια του τρίτου κύκλου



Σχήμα 6.6.41 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 3 κατά τη διάρκεια του τρίτου κύκλου

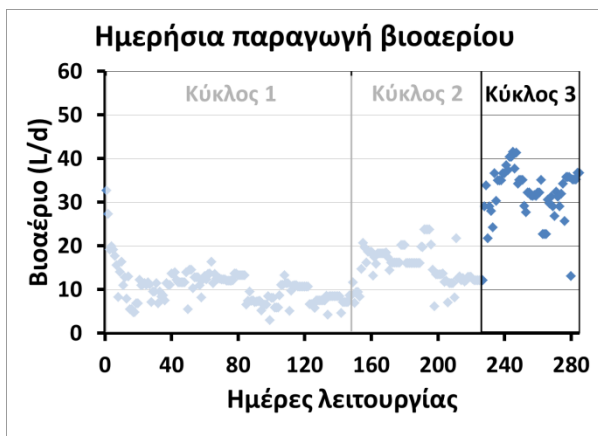


Σχήμα 6.6.42 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 4 κατά τη διάρκεια του τρίτου κύκλου

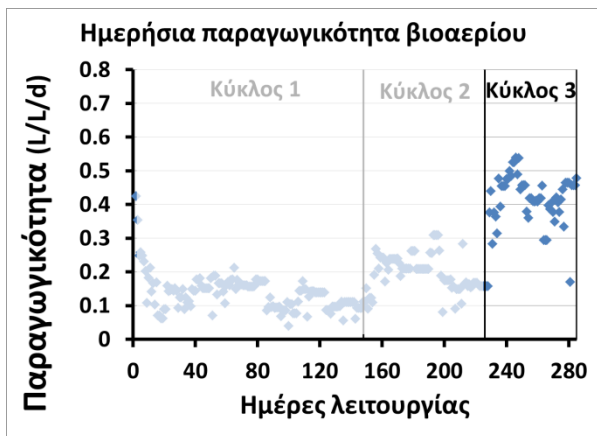


Σχήμα 6.6.43 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στην εκροή κατά τη διάρκεια του τρίτου κύκλου

Η παραγωγή βιοαερίου (Σχήμα 6.6.44) υπερδιπλασιάστηκε σε σχέση με τον κύκλο 2 σε ημερήσια βάση και κατά μέσο όρο ήταν ίση με  $32,0 \pm 5,9 \text{ L/d}$  και αντίστοιχα η παραγωγικότητα ανά μονάδα όγκου αντιδραστήρα ήταν  $0,41 \pm 0,07 \text{ L/L/d}$  (Σχήμα 6.6.45), με μέση περιεκτικότητα σε μεθάνιο ίση με 67,5%. Τέλος, η παραγωγικότητα βιοαερίου ανά μονάδα μάζας (σε υγρή βάση) του αρχικού μίγματος κτηνοτροφικών αποβλήτων ήταν  $25 \text{ L/kg}$ , ελαφρώς αυξημένη σε σχέση με τον κύκλο 2.



Σχήμα 6.6.44 Ημερήσια παραγωγή βιοαερίου κατά τη διάρκεια του τρίτου κύκλου

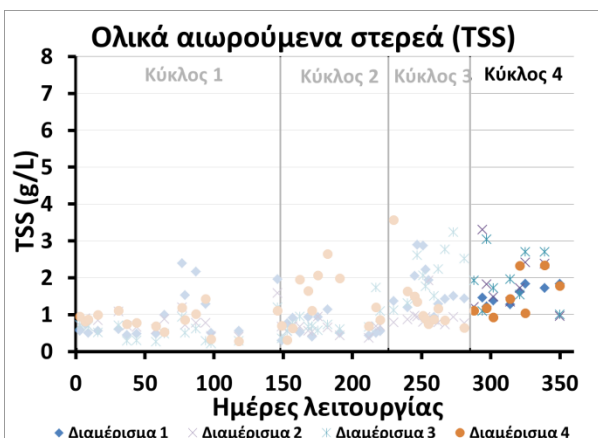


Σχήμα 6.6.45 Ημερήσια παραγωγικότητα βιοαερίου κατά τη διάρκεια του τρίτου κύκλου

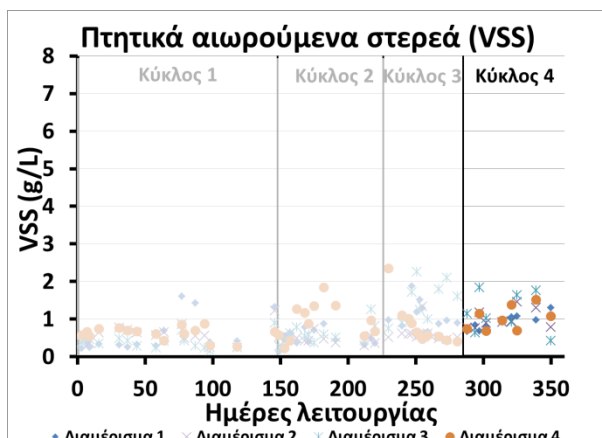
#### 6.6.4 Κύκλος 4

Κατά τον τέταρτο πειραματικό κύκλο, ο υδραυλικός χρόνος παραμονής μειώθηκε στις 6 ημέρες και το μέσο tCOD της τροφοδοσίας ήταν 16,2g/L, με αποτέλεσμα ο μέσος ρυθμός οργανικής φόρτισης να διαμορφωθεί στα 2,69<sub>gCOD/L<sub>reactor</sub>/d</sub>. Η συνολική διάρκεια του πειραματικού Κύκλου 4 ήταν 65 ημέρες.

Η μείωση του υδραυλικού χρόνου παραμονής δεν επηρέασε σημαντικά τη συγκέντρωση των ολικών (Σχήμα 6.6.46) και των πτητικών (Σχήμα 6.6.47) αιωρούμενων στερεών αντίστοιχα, σε σχέση με τον τρίτο κύκλο λειτουργίας. Η μέση συγκέντρωση των TSS ήταν 1,7±0,2mg/L και αυτή των VSS ήταν 1,3±0,4g/L.



Σχήμα 6.6.46 Συγκέντρωση ολικών αιωρούμενων στερεών στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τέταρτου πειραματικού κύκλου

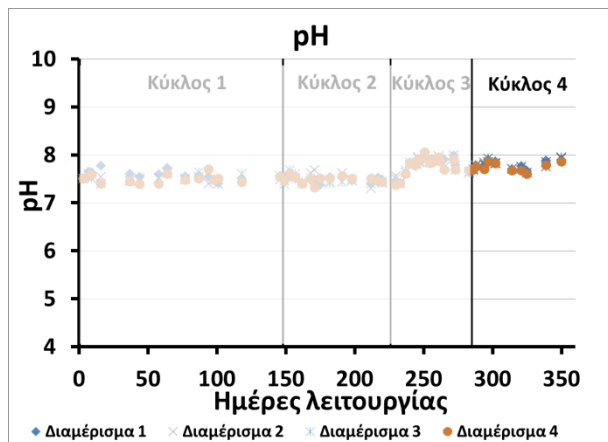


Σχήμα 6.6.47 Συγκέντρωση πτητικών αιωρούμενων στερεών στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τέταρτου πειραματικού κύκλου

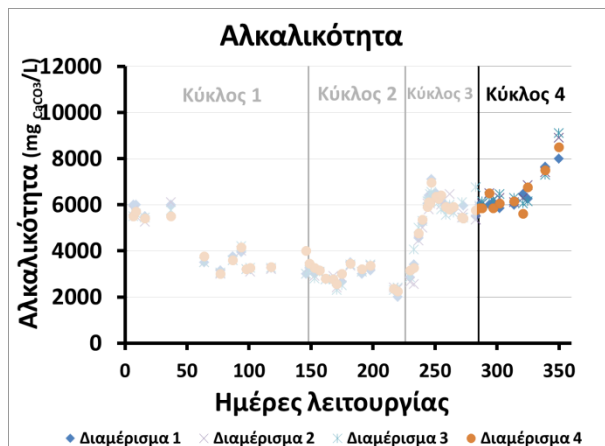
Η μέση τιμή του pH παρουσίασε αυξητική τάση κατά τη διάρκεια του τέταρτου πειραματικού κύκλου (Σχήμα 6.6.48), δηλαδή συμπεριφορά παρόμοια με αυτή του πειραματικού κύκλου 3. Προσέγγισε την ανώτατη τιμή του 8, αλλά σταθεροποιήθηκε χωρίς την προσθήκη ρυθμιστικού διαλύματος. Το υψηλό περιεχόμενο του μίγματος αποβλήτων σε απόβλητο πτηνοτροφείου σε συνδυασμό με τον υψηλό



ρυθμό οργανικής φόρτισης συνετέλεσαν σε αύξηση στα επίπεδα της αλκαλικότητας στο εσωτερικό του χωνευτήρα, με τις τιμές της να παρουσιάζουν διαρκή άνοδο σε όλη τη διάρκεια του κύκλου λειτουργίας (Σχήμα 6.6.49). Οι ανώτατες τιμές της αλκαλικότητας (στην περιοχή 8000-9000mg<sub>CaCO3</sub>/L) παρατηρήθηκαν στο τέλος του πειράματος.

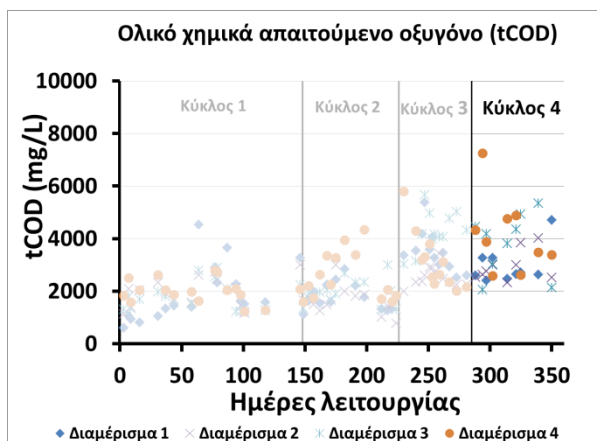


**Σχήμα 6.6.48** Διακύμανση του ρΗ στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τέταρτου πειραματικού κύκλου

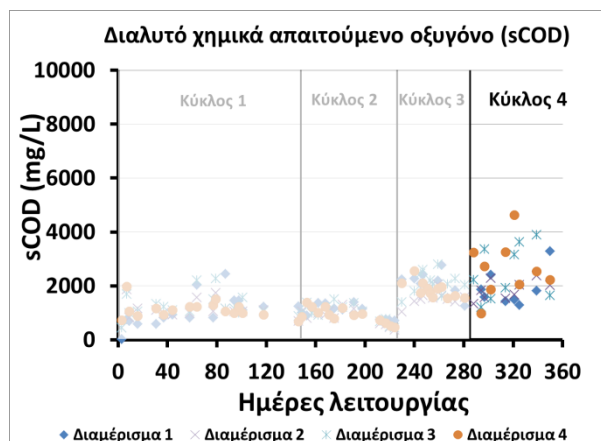


**Σχήμα 6.6.49** Διακύμανση της αλκαλικότητας στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τέταρτου πειραματικού κύκλου

Η μέση συγκέντρωση ολικού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου ήταν επίσης αυξημένη κατά τη διάρκεια του τέταρτου πειραματικού κύκλου (Σχήμα 6.6.50) στα 4 διαμερίσματα του αντιδραστήρα με μέση τιμή τα 3,46±0,7g/L ενώ αυξημένα ήταν και τα επίπεδα του διαλυτού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου με μέση τιμή τα 2,59±0,63g/L (Σχήμα 6.6.51).



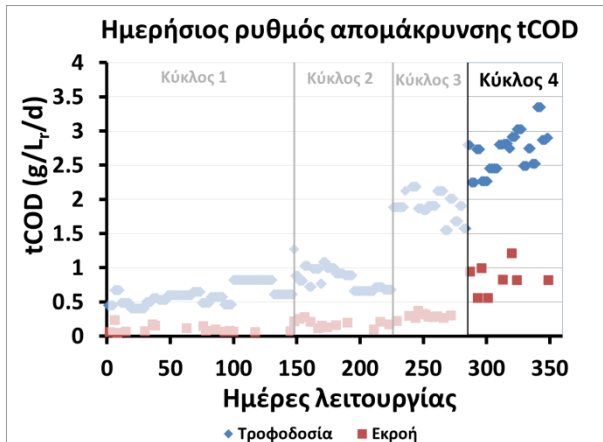
**Σχήμα 6.6.50** Ολικό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τέταρτου πειραματικού κύκλου



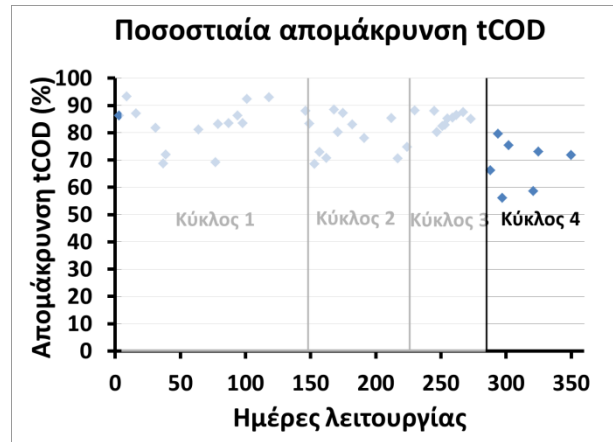
**Σχήμα 6.6.51** Διαλυτό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τέταρτου πειραματικού κύκλου

Η απόδοση του συστήματος ως προς την απομάκρυνση οργανικού φορτίου ήταν αισθητά χαμηλότερη, σε σχέση με τους υπόλοιπους πειραματικούς κύκλους. Στο Σχήμα 6.6.52 παρουσιάζεται η σύγκριση της οργανικής φόρτισης με το οργανικό περιεχόμενο της εκροής σε ημερήσια βάση. Στο Σχήμα 6.6.53

παρουσιάζεται η διακύμανση της ποσοστιαίας απομάκρυνσης οργανικού φορτίου κατά τη διάρκεια του τέταρτου πειραματικού κύκλου, η οποία μεσοσταθμικά κυμάνθηκε στο 68,8%, δηλαδή λαμβάνοντας τη χαμηλότερη τιμή από όλους τους πειραματικούς κύκλους.

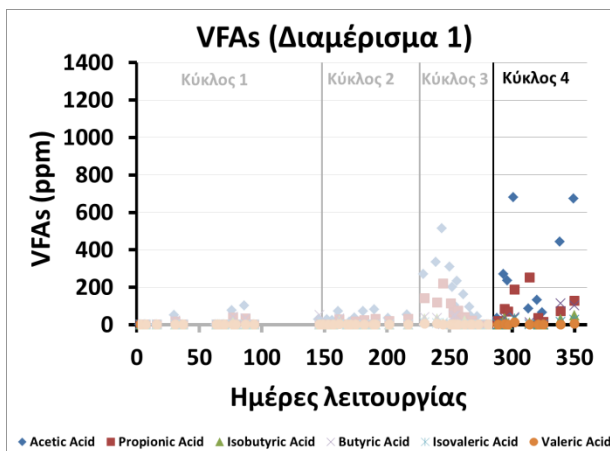


Σχήμα 6.6.52 Σύγκριση ρυθμού οργανικής φόρτισης με το οργανικό περιεχόμενο της εκροής κατά τη διάρκεια του τέταρτου κύκλου

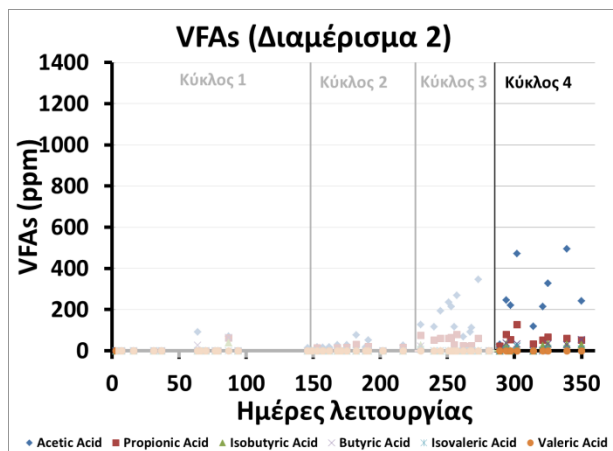


Σχήμα 6.6.53 Απόδοση του PABR ως προς την απομάκρυνση οργανικού φορτίου κατά τη διάρκεια του τέταρτου κύκλου

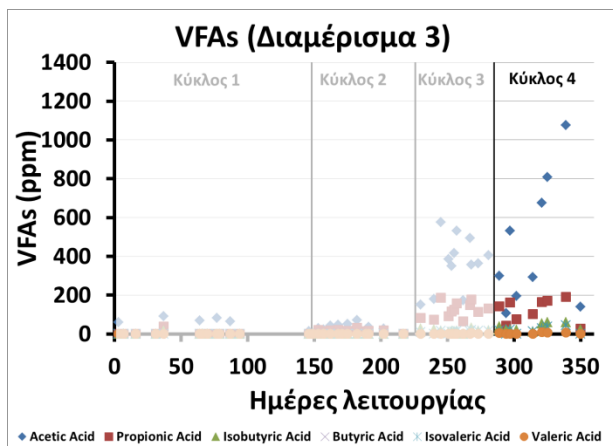
Το σύστημα εμφάνισε κινητικούς περιορισμούς και αυτό είναι εμφανές και από τη συσσώρευση των πτητικών λιπαρών οξέων που παρατηρήθηκε στο εσωτερικό των διαμερισμάτων αλλά και στη έξοδο του αντιδραστήρα (Σχήματα 6.6.54-6.6.58). Η μέση συγκέντρωση του οξικού οξέος στα 4 διαμερίσματα του αντιδραστήρα ήταν  $360,4 \pm 97,6 \text{ mg/L}$ , ενώ οι μέσες συγκεντρώσεις του προπιονικού, του ισοβουτυρικού, του βουτυρικού, του ισοβαλερικού και του βαλερικού οξέος ήταν  $101 \pm 97.6 \text{ mg/L}$ ,  $26.4 \pm 9 \text{ mg/L}$ ,  $39.9 \pm 14.3 \text{ mg/L}$ ,  $14.6 \pm 9.3 \text{ mg/L}$  και  $2.6 \pm 2 \text{ mg/L}$  αντίστοιχα.



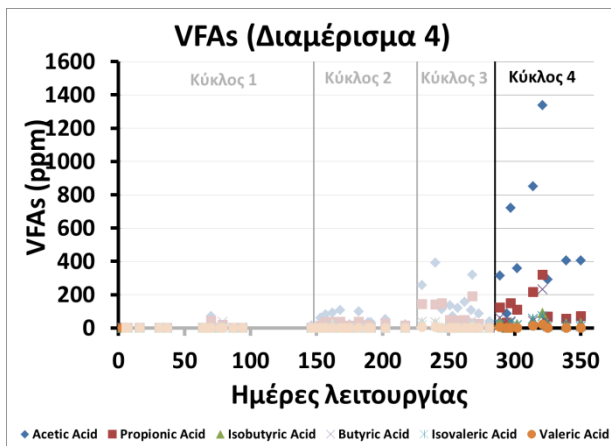
Σχήμα 6.6.54 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 1 κατά τη διάρκεια του τέταρτου κύκλου



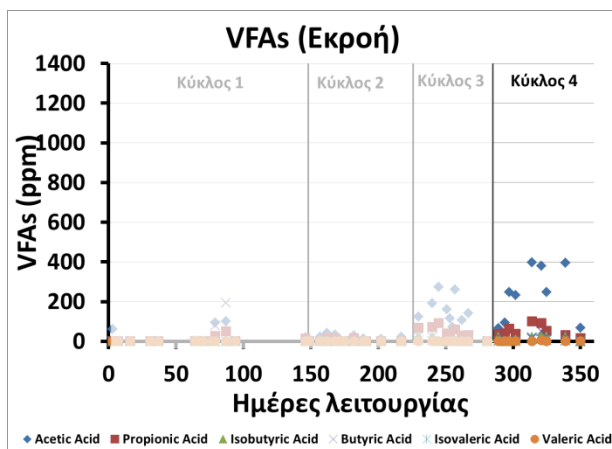
Σχήμα 6.6.55 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 2 κατά τη διάρκεια του τέταρτου κύκλου



Σχήμα 6.6.56 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 3 κατά τη διάρκεια του τέταρτου κύκλου

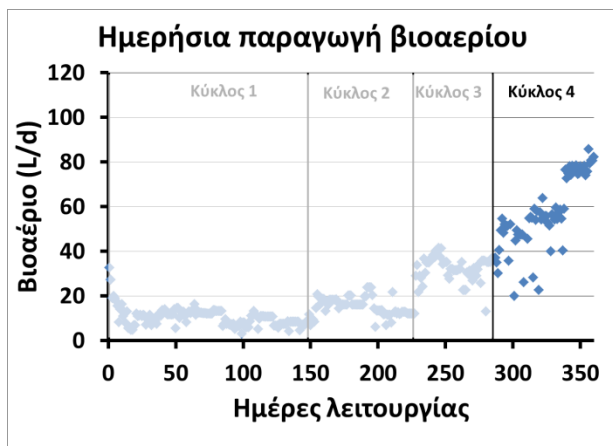


Σχήμα 6.6.57 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 4 κατά τη διάρκεια του τέταρτου κύκλου

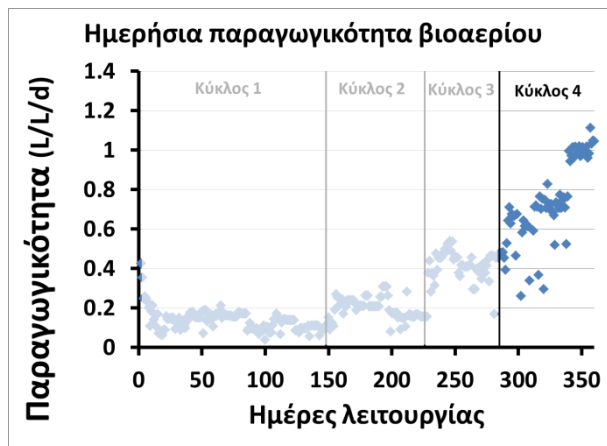


Σχήμα 6.6.58 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στην εκροή κατά τη διάρκεια του τέταρτου κύκλου

Η μέση ημερήσια παραγωγή βιοαερίου ήταν 53,91L/d (26L ανά kg αρχικού μίγματος) σε όλη τη διάρκεια του τέταρτου κύκλου λειτουργίας με μέση περιεκτικότητα σε μεθάνιο ίση με 65%, όμως κατά την περιοδική μόνιμη κατάσταση στο τέλος του πειραματικού κύκλου η μέση ημερήσια παραγωγή βιοαερίου 76,3L/d (34L ανά kg αρχικού μίγματος) (Σχήμα 6.6.59). Η διαφοροποίηση του υδραυλικού χρόνου παραμονής σε σχέση με το χρόνο παραμονής των στερεών λόγω του τρόπου λειτουργίας του PABR είναι μία πιθανή εξήγηση της συμπεριφοράς του συστήματος ως προς την παραγωγή βιοαερίου (βλ. Ενότητα 2.1.6). Τέλος, η διακύμανση της ημερήσιας παραγωγικότητας του αντιδραστήρα σε βιοαέριο, παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.6.60 με μέση τιμή τα  $0,7 \pm 0,2 \text{ L/L}_r/\text{d}$ .



Σχήμα 6.6.59 Ημερήσια παραγωγή βιοαερίου κατά τη διάρκεια του τέταρτου κύκλου



Σχήμα 6.6.60 Ημερήσια παραγωγικότητα βιοαερίου κατά τη διάρκεια του τέταρτου κύκλου

### 6.6.5 Σύνοψη αποτελεσμάτων για τους 4 πειραματικούς κύκλους λειτουργίας

Στόχος των πειραμάτων ήταν, όπως προαναφέρθηκε μελέτη της δυνατότητας παραγωγής βιοαερίου από εκχύλισμα μίγματος κτηνοτροφικών αποβλήτων με απόβλητο τυροκομείου σε έναν καινοτόμο βιοαντιδραστήρα τύπου PABR πιλοτικής κλίμακας. Ο αντιδραστήρας επέδειξε εξαιρετική σταθερότητα σε όλη τη διάρκεια των πειραμάτων και παρά τις απότομες μεταβολές στις παραμέτρους λειτουργίας του, στο ρυθμό οργανικής φόρτισης και στη σύσταση του μίγματος της τροφοδοσίας επέδειξε ικανότητα άμεσης προσαρμογής.

Στον Πίνακα 6.6.1 παρουσιάζονται συνοπτικά τα βασικά αποτελέσματα των 4 πειραματικών κύκλων λειτουργίας που αφορούν στην αναερόβια συγχώνευση μίγματος κτηνοτροφικών αποβλήτων με απόβλητο τυροκομείου και οι βασικές παράμετροι λειτουργίας για κάθε πειραματικό κύκλο.

Πίνακας 6.6.1 Σύνοψη αποτελεσμάτων πειραματικής διαδικασίας αναερόβιας συγχώνευσης κτηνοτροφικών αποβλήτων και αποβλήτου τυροκομείου

	Κύκλος 1	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4
HRT (d)	22,3	10,65	10,65	6
T (d)	2	2	2	2
Ημέρες λειτουργίας (d)	148	78	59	65
Μέσο tCOD <sub>τροφοδοσίας</sub> (g/L)	13,4	8,8	20,3	16,2
Ρυθμός οργανικής φόρτισης (g <sub>COD</sub> /L <sub>αντιδραστήρα</sub> /d)	0,6	0,8	1,91	2,69
tCOD <sub>εκροής</sub> (g/L)	2,18	1,92	3,1	5,04
Απομάκρυνση tCOD (%)	83,7	78,1	84,8	68,8
Παραγωγικότητα βιοαερίου (L <sub>βιοαερίου</sub> /L <sub>αντιδραστήρα</sub> /d)	0,14	0,2	0,41	0,68
Παραγωγικότητα (L <sub>βιοαερίου</sub> /kg <sub>μίγματος</sub> )	30	21	25	26
Περιεχόμενο μεθανίου (%)	65	65	67,5	65

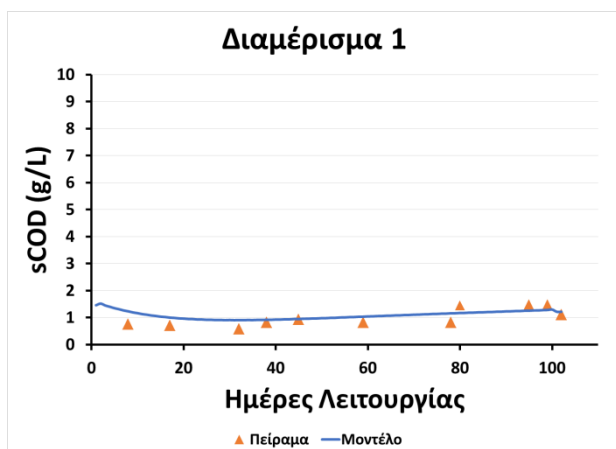
## 6.7 Μοντελοποίηση με τη χρήση του υπολογιστικού εργαλείου Aquasim 2.0

Η μαθηματική μοντελοποίηση της διεργασίας που αφορά στην αναερόβια χώνευση εκχυλίσματος από μίγμα κτηνοτροφικών αποβλήτων και αποβλήτου τυροκομείου πραγματοποιήθηκε με δύο διαφορετικούς τρόπους, όπως περιγράφηκε στην Ενότητα 2.1.6.

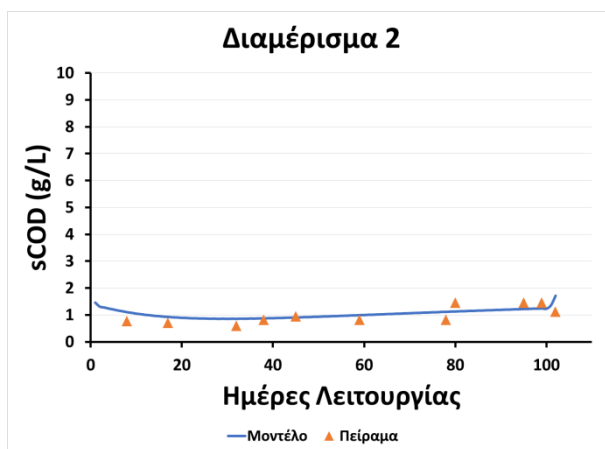
### 6.7.1 Μοντελοποίηση με απλή κινητική Monod (Κύκλος 1)

Κατά τον πρώτο τρόπο μοντελοποίησης, γίνεται η παραδοχή ότι η κατανάλωση της οργανικής ουσίας πραγματοποιείται ακολουθώντας απλή κινητική Monod (απλοποιημένο μοντέλο) με ταυτόχρονη όμως προσομοίωση της σχετικής περιπλοκότητας που παρουσιάζει ο PABR στη λειτουργία του (δηλαδή προσομοίωση της εναλλαγής του διαμερίσματος τροφοδοσίας και εκροής) σε συνδυασμό με την εισαγωγή του συντελεστή κατακράτησης βιομάζας. Ο συγκεκριμένος τρόπος μοντελοποίησης της αναερόβιας χώνευσης έχει αποδειχθεί στο παρελθόν αρκετά αποτελεσματικός ως προς την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του συστήματος [47]. Με τον τρόπο αυτό, επιχειρήθηκε η μοντελοποίηση του Κύκλου 1 των πειραμάτων που αφορούν στα κτηνοτροφικά απόβλητα και το απόβλητο τυροκομείου, με σκοπό την περιγραφή του ρυθμού κατανάλωσης της οργανικής ύλης και ταυτόχρονα των υπολογισμό του συντελεστή κατακράτησης βιομάζας ( $R_b$ ), της σταθεράς κορεσμού ( $K_s$ ), του μέγιστου ειδικού ρυθμού ανάπτυξης ( $\mu_{max}$ ), καθώς και της αρχικής συγκέντρωσης βιομάζας ( $X_{B_{ini}}$ ) που υπολογίστηκε μέσα από την προσαρμογή του μοντέλου (data fitting) στα πειραματικά δεδομένα.

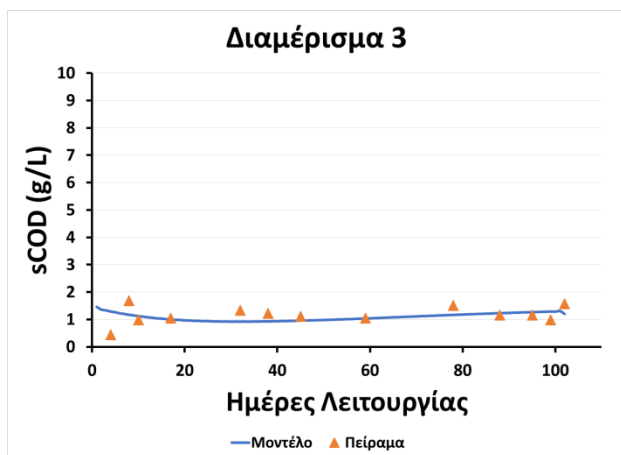
Τα αποτελέσματα του μοντέλου ως προς τη συμπεριφορά της συγκέντρωσης του διαλυτού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου στα 4 διαμερίσματα του χωνευτήρα κατά τον πειραματικό Κύκλο 1, παρουσιάζονται στα Σχήματα 6.7.1-6.7.4.



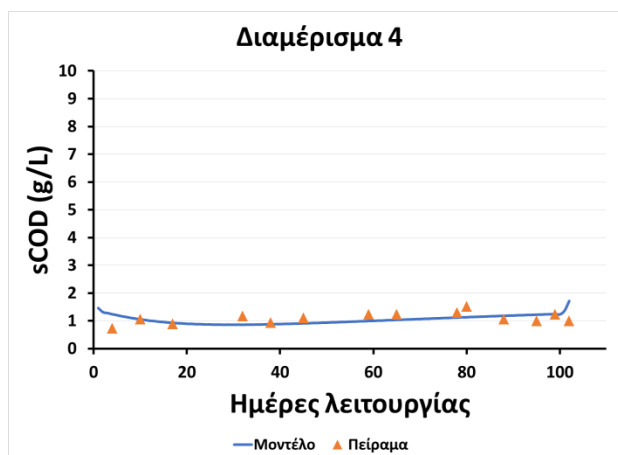
Σχήμα 6.7.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου με πειραματικές μετρήσεις διαλυτού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου στο Διαμέρισμα 1 κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου λειτουργίας



Σχήμα 6.7.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου με πειραματικές μετρήσεις διαλυτού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου στο Διαμέρισμα 2 κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου λειτουργίας



**Σχήμα 6.7.3** Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου με πειραματικές μετρήσεις διαλυτού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου στο Διαμέρισμα 3 κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου λειτουργίας



**Σχήμα 6.7.4** Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου με πειραματικές μετρήσεις διαλυτού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου στο Διαμέρισμα 4 κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου λειτουργίας

Από τα αποτελέσματα της προσαρμογής του μοντέλου στα πειραματικά δεδομένα γίνεται αντιληπτό ότι το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του συστήματος είναι ικανό να περιγράψει επαρκώς το προφίλ της συγκέντρωσης του διαλυτού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου στα 4 διαμερίσματα του αντιδραστήρα κατά τη διάρκεια του πρώτου πειραματικού κύκλου. Η εισαγωγή του συντελεστή κατακράτησης βιομάζας για την προσομοίωση της λειτουργίας του PABR ήταν σημαντική ώστε το μοντέλο να περιγράψει τη λειτουργία του. Από την προσαρμογή στα πειραματικά δεδομένα προέκυψε η βέλτιστη τιμή του  $R_b$ , που υπολογίστηκε ίση με 0,465. Η βέλτιστη τιμή της σταθερά κορεσμού ( $K_s$ ) προέκυψε ίση με 0,1034 $g_{COD}/L$  και η βέλτιστη τιμή του μέγιστου ειδικού ρυθμού κατανάλωσης ( $\mu_{max}$ ) υπολογίστηκε ίση με 0,0732 $d^{-1}$ . Τέλος η αρχική συγκέντρωση βιομάζας ( $X_{B_{ini}}$ ) υπολογίστηκε ίση με 0,126 $g/L$ .

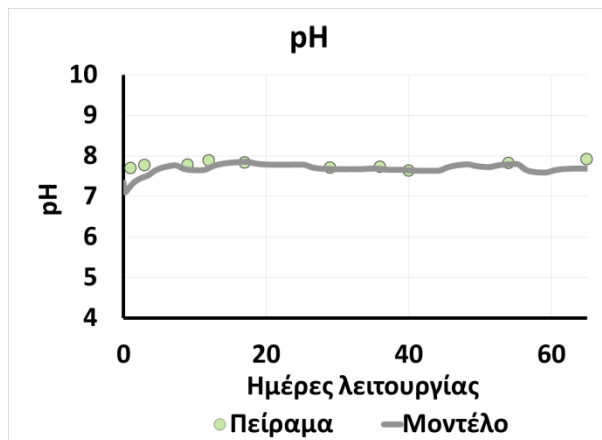
### 6.7.2 Μοντελοποίηση με το Anaerobic Digestion Model No 1 – ADM1 (Κύκλοι 3 και 4)

Κατά το δεύτερο τρόπο μοντελοποίησης, που εφαρμόστηκε για τους πειραματικούς κύκλους 3 και 4, γίνεται η παραδοχή ότι ο PABR συμπεριφέρεται ως αντιδραστήρας τύπου CSTR. Η συγκεκριμένη παραδοχή μπορεί να θεωρηθεί σχετικά ακριβής σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά τη μοντελοποίηση της υδραυλικής συμπεριφοράς με χρήση του υπολογιστικού προγράμματος COMSOL Multiphysics (βλ. Κεφάλαιο 4). Με δεδομένο, λοιπόν, ότι η λειτουργία του αντιδραστήρα «απλοποιείται», επιλέγεται η μοντελοποίηση με χρήση του Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1) [46].

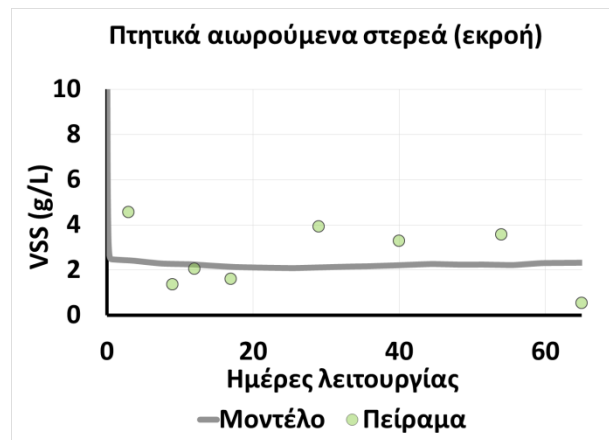
Όπως προαναφέρθηκε, κατά τον πειραματικό Κύκλο 4 ο PABR λειτούργησε με ιδιαίτερη σταθερότητα παρά τον εξαιρετικά χαμηλό υδραυλικό χρόνο παραμονής (HRT=6d) και παρά τους κινητικούς περιορισμούς που παρουσιάστηκαν. Με βάση τα αποτελέσματα του πειραματικού κύκλου 4 αναπτύχθηκε ένα τροποποιημένο μοντέλο ADM1 σε περιβάλλον Aquasim 2.0 με σκοπό την προσομοίωση της διεργασίας. Με δεδομένο ότι ο αντιδραστήρας αντιμετωπίστηκε ως αντιδραστήρας συνεχούς λειτουργίας και πλήρους ανάμιξης, υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές των παραμέτρων στα 4

διαμερίσματα του χωνευτήρα για κάθε ημέρα λειτουργίας που πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις και επιχειρήθηκε η προσομοίωση του μοντέλου σε αυτές τις τιμές. Τα πειραματικά δεδομένα από τις μέσες τιμές των μετρήσεων των pH, VSS, COD, VFAs και της παραγωγικότητας του βιοαερίου του Κύκλου 4 σε σύγκριση με την πρόβλεψη του μοντέλου για κάθε μία από τις συγκεκριμένες παραμέτρους, παρουσιάζονται στα Σχήματα 6.7.5-6.7.12.

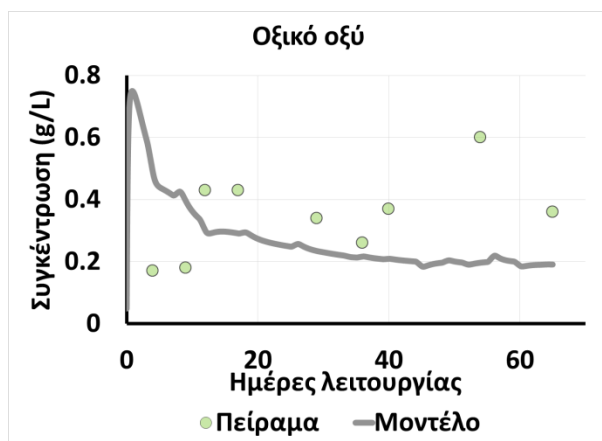
Τα πειραματικά δεδομένα του pH, του sCOD και των VFAs αντιστοιχούν στις μέσες τιμές των 4 διαμερισμάτων του αντιδραστήρα σε διάφορες χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια του κύκλου λειτουργίας, ενώ οι πειραματικές τιμές των tCOD και VSS αφορούν τις τιμές της εκροής. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι με βάση τις παραδοχές του μοντέλου, τα διαλυτά στοιχεία της εκροής ταυτίζονται με αυτά στο εσωτερικό του αντιδραστήρα, ενώ τα μη διαλυτά διαφέρουν, λόγω της διαφοράς του υδραυλικού χρόνου παραμονής με το χρόνο παραμονής των στερεών. Η εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου πραγματοποιήθηκε με βάση τα αποτελέσματα του πειραματικού κύκλου, κατά τις προτάσεις των Batstone et al (2002).



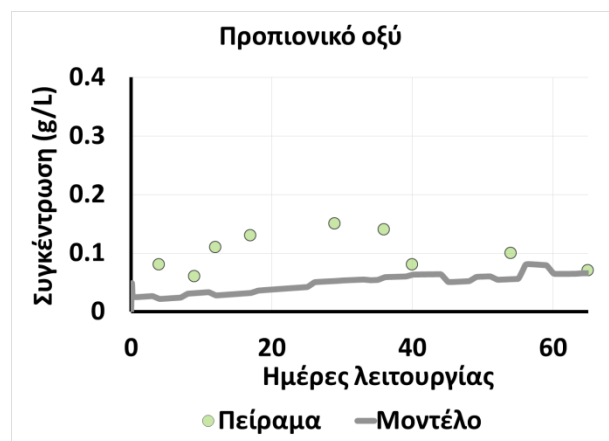
Σχήμα 6.7.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου ADM1 με το πειραματικό μέσο pH κατά τον τέταρτο κύκλο λειτουργίας



Σχήμα 6.7.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου ADM1 με τις πειραματικές τιμές των πτητικών αιωρούμενων στερεών της εκροής κατά τον τέταρτο κύκλο λειτουργίας

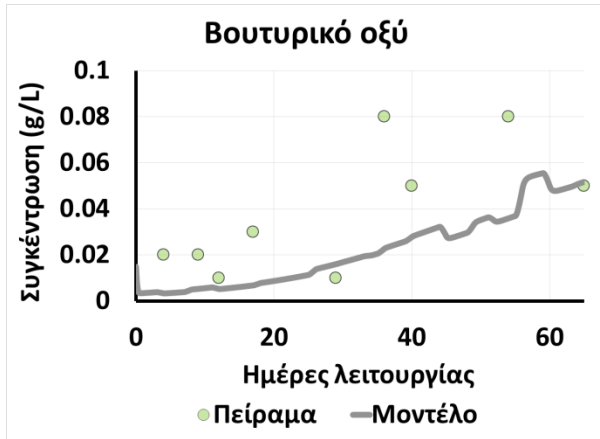


Σχήμα 6.7.7 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου ADM1 με τις πειραματικές μέσες τιμές του οξικού οξέος κατά



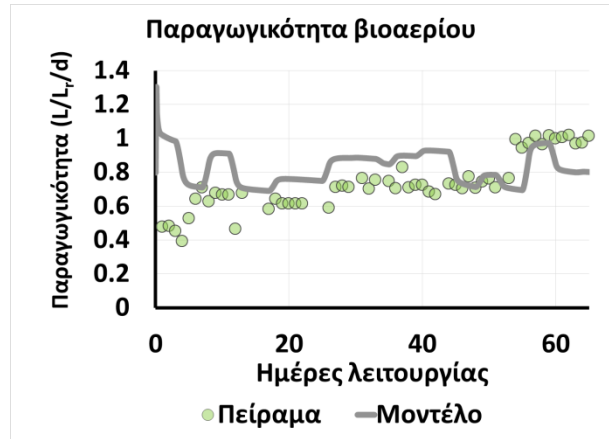
Σχήμα 6.7.8 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου ADM1 με τις πειραματικές μέσες τιμές του προπιονικού οξέος

τον τέταρτο κύκλο λειτουργίας

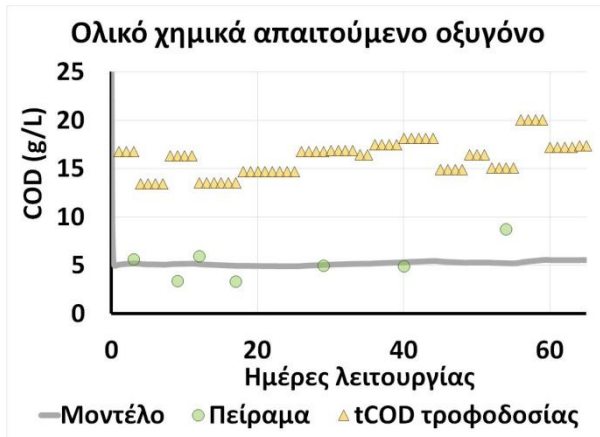


Σχήμα 6.7.9 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου ADM1 με τις πειραματικές μέσες τιμές του βουτυρικού οξέος κατά τον τέταρτο κύκλο λειτουργίας

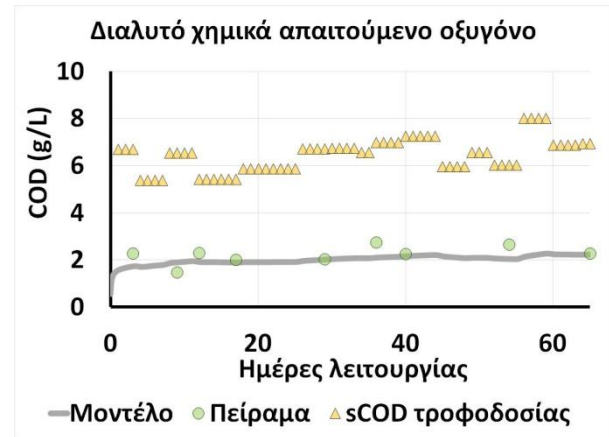
κατά τον τέταρτο κύκλο λειτουργίας



Σχήμα 6.7.10 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου ADM1 με τις πειραματικές τιμές της παραγωγικότητας του βιοαερίου κατά τον τέταρτο κύκλο λειτουργίας



Σχήμα 6.7.11 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου ADM1 με τις πειραματικές τιμές του ολικού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου στην εκροή κατά τον τέταρτο κύκλο λειτουργίας



Σχήμα 6.7.12 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου ADM1 με τις πειραματικές μέσες τιμές του διαλυτού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου κατά τον τέταρτο κύκλο λειτουργίας

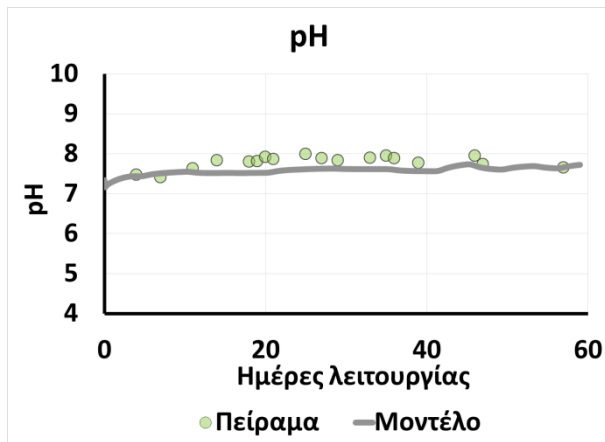
Το μοντέλο προσομοιώνει ικανοποιητικά τη μέση τιμή του pH (Σχήμα 6.7.5), των VFAs (Σχήματα 6.7.7-6.7.9), καθώς και τη μέση συγκέντρωση των πτητικών αιωρούμενων στερεών στην εκροή του χωνευτήρα (Σχήμα 6.7.6). Επίσης, παρέχει ακριβή προσομοίωση της αποτελεσματικότητας του PABR ως προς την απομάκρυνση του ολικού και του διαλυτού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.7.11 και στο Σχήμα 6.7.12 αντίστοιχα. Τα πειραματικά δεδομένα δεν παρουσιάζουν ταλαντώσεις (ως αποτέλεσμα της περιοδικής εναλλαγής του διαμερίσματος τροφοδοσίας και εκροής) παρά το γεγονός ότι κατά τη διάρκεια του πειραματικού κύκλου επιτυγχάνονται σταθερή περιοδική κατάσταση στο σύστημα. Αυτό συμβαίνει διότι τα δεδομένα αντιστοιχούν σε δείγματα που ελήφθησαν σε διάφορα τυχαία χρονικά σημεία κατά τη διάρκεια των ημερών λειτουργίας του πειραματικού



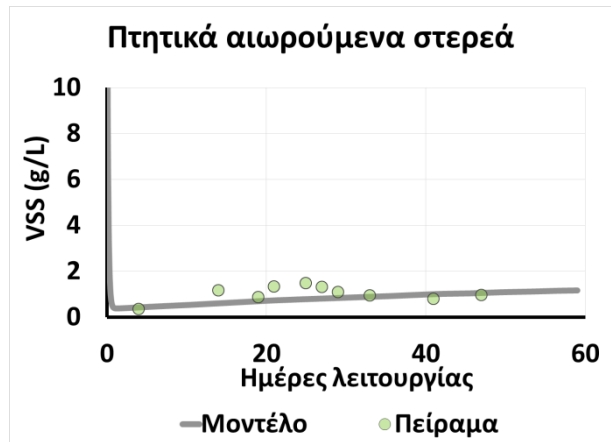
κύκλου. Η σχετικά μεγάλη τυπική απόκλιση που εμφανίζεται σε ορισμένες από τις παραμέτρους που μετρήθηκαν (και παρουσιάζονται αναλυτικά στην Ενότητα 6.6) είναι προφανώς αποτέλεσμα του γεγονότος ότι τα δείγματα δε λαμβάνονταν σε όμοιες χρονικές στιγμές σε σχέση με την περίοδο λειτουργίας. Από την άλλη πλευρά, το μοντέλο προσομοιώνει τη συμπεριφορά του PABR ως αντιδραστήρα τύπου CSTR, βασιζόμενο στην ιδέα του συντελεστή κατακράτησης της βιομάζας, όπως περιγράφεται από τους [48]. Για το λόγο αυτό, το μοντέλο προβλέπει μέσες τιμές για τις παραμέτρους που παρουσιάζονται στα Σχήματα 6.7.5-6.7.12, τόσο για το εσωτερικό του αντιδραστήρα, όσο και για την εκροή. Έτσι, οι ταλαντώσεις που οφείλονται στην περιοδική λειτουργία του PABR δεν προβλέπονται από το μοντέλο.

Η παράμετρος  $t_{res\_x}$  υπολογίστηκε από το μοντέλο ίση με 18,9d, γεγονός που σημαίνει ότι ο πραγματικός χρόνος παραμονής των στερεών είναι ίσος με 24,9d (HRT=6d). Η κατακράτηση των στερεών στο εσωτερικό του αντιδραστήρα είναι πιθανότητα, όπως προαναφέρθηκε, μια εξήγηση για την αυξανόμενη παραγωγικότητα του βιοαερίου κατά τις πρώτες ημέρες λειτουργίας του αντιδραστήρα κατά τον πειραματικό Κύκλο 4 (Σχήμα 6.7.10). Ωστόσο, το μοντέλο προσομοιώνει ικανοποιητικά τη μετρούμενη παραγωγικότητα του βιοαερίου κατά τις τελευταίες ημέρες λειτουργίας του Κύκλου 4.

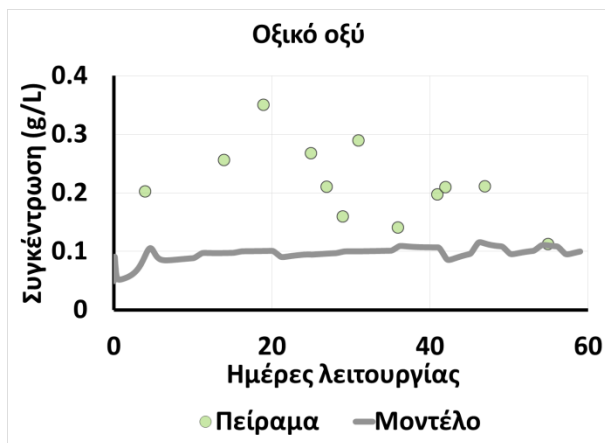
Ακολούθως, το μοντέλο ADM1 που αναπτύχθηκε με βάση τα αποτελέσματα του Κύκλου 4, επαληθεύτηκε (model validation) πάνω στα αποτελέσματα που προέκυψαν από την παρακολούθηση της λειτουργίας του αντιδραστήρα κατά τον πειραματικό Κύκλο 3. Οι μοναδικές μεταβλητές που υποβλήθηκαν σε “parameter estimation”, δηλαδή οι μοναδικές μεταβλητές που βελτιστοποιήθηκαν κατά τη διαδικασία προσομοίωσης του μοντέλου στα νέα πειραματικά δεδομένα ήταν οι αρχικές συνθήκες που επικρατούν στο εσωτερικό του χωνευτήρα καθώς και η μεταβλητή  $t_{res\_x}$  (λόγω του διαφορετικού χρόνου παραμονής που επικρατούσε κατά τον Κύκλο 3 – HRT=10.65d). Τα πειραματικά δεδομένα των εργαστηριακών αναλύσεων κατά τον Κύκλο 3 σε σύγκριση με την πρόβλεψη του μοντέλου, παρουσιάζονται στα Σχήματα 6.7.13-6.7.20. Στην περίπτωση του κύκλου 3, όπως συνέβη και στην περίπτωση του κύκλου 4, τα πειραματικά δεδομένα του pH, του sCOD και των VFAs αντιστοιχούν στις μέσες τιμές των 4 διαμερισμάτων του αντιδραστήρα σε διάφορες χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια του κύκλου λειτουργίας, ενώ οι πειραματικές τιμές των tCOD και VSS αφορούν τις τιμές της εκροής. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι με βάση τις παραδοχές του μοντέλου, τα διαλυτά στοιχεία της εκροής ταυτίζονται με αυτά στο εσωτερικό του αντιδραστήρα, ενώ τα μη διαλυτά διαφέρουν, λόγω της διαφοράς του υδραυλικού χρόνου παραμονής με το χρόνο παραμονής των στερεών.



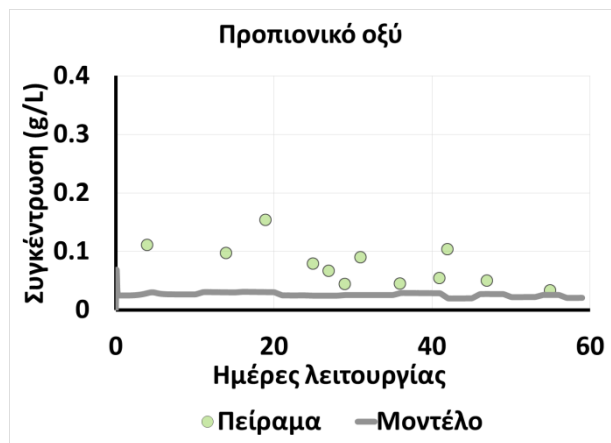
Σχήμα 6.7.13 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου ADM1 με το πειραματικό μέσο pH κατά τον τρίτο κύκλο λειτουργίας



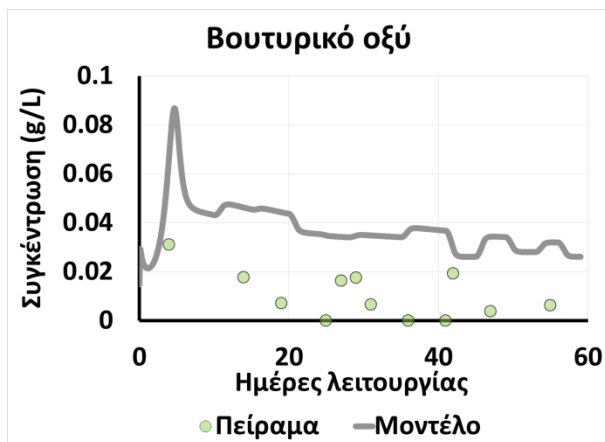
Σχήμα 6.7.14 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου ADM1 με τις πειραματικές τιμές των πτητικών αιωρούμενων στερεών της εκροής κατά τον τρίτο κύκλο λειτουργίας



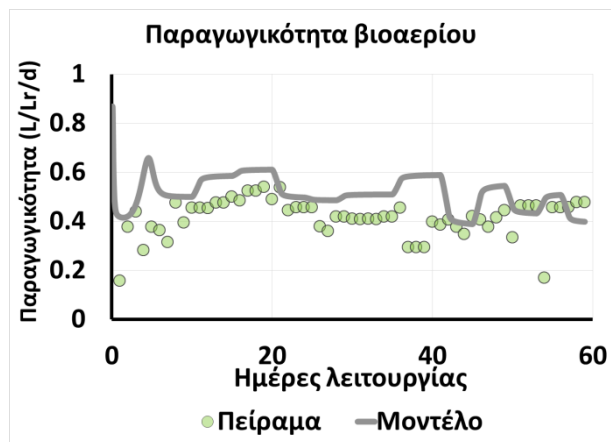
Σχήμα 6.7.15 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου ADM1 με τις πειραματικές μέσες τιμές του οξικού οξέος κατά τον τρίτο κύκλο λειτουργίας



Σχήμα 6.7.16 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου ADM1 με τις πειραματικές μέσες τιμές του προπιονικού οξέος κατά τον τρίτο κύκλο λειτουργίας

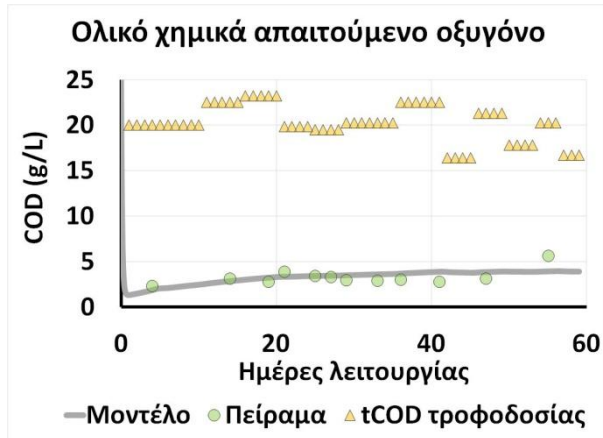


Σχήμα 6.7.17 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου



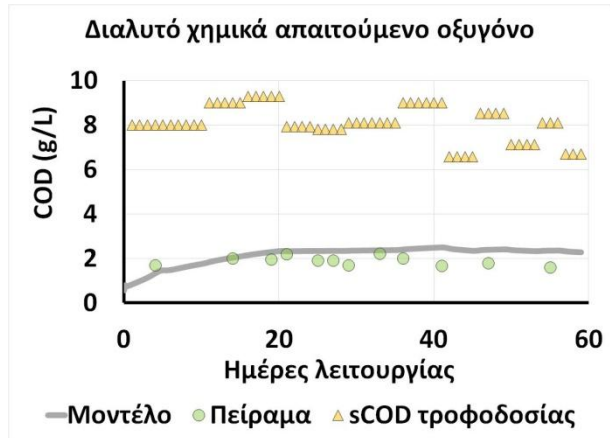
Σχήμα 6.7.18 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου

ADM1 με τις πειραματικές μέσες τιμές του βουτυρικού οξέος κατά τον τρίτο κύκλο λειτουργίας



**Σχήμα 6.7.19** Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου ADM1 με τις πειραματικές τιμές του ολικού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου στην εκροή κατά τον τρίτο κύκλο λειτουργίας

ADM1 με τις πειραματικές τιμές της παραγωγικότητας του βιοαερίου κατά τον τρίτο κύκλο λειτουργίας



**Σχήμα 6.7.20** Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου ADM1 με τις πειραματικές μέσες τιμές του διαλυτού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου κατά τον τρίτο κύκλο λειτουργίας

Η πρόβλεψη του μοντέλου ως προς τα επίπεδα του pH και των VFAs στο εσωτερικό των διαμερισμάτων, καθώς ως προς τη συγκέντρωση των πτητικών αιωρούμενων στερεών στην εκροή του χωνευτήρα είναι ικανοποιητική σε σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα. Το μοντέλο είναι επίσης ικανό να προβλέψει με εξαιρετική ακρίβεια τη συμπεριφορά του συστήματος ως προς την απομάκρυνση του ολικού και του διαλυτού χημικά απαιτούμενου. Η πρόβλεψη του μοντέλου όσον αφορά την παράμετρο  $tres_x$  ήταν ίση με 104,7d, δηλαδή ο μέσος χρόνος παραμονής των στερεών στον αντιδραστήρα προβλέπεται ίσος με 115,35d (HRT=10,65d).



## **Κεφάλαιο 7**

**Αναερόβια χώνευση οικιακών ζυμώσιμων  
απορριμμάτων σε πιλοτικής κλίμακας PABR**

## 7.1 Εισαγωγή

Η αναερόβια χώνευση θεωρείται ως μια από τις καλύτερες περιβαλλοντικά φιλικές εναλλακτικές διαχείρισης των οικιακών αποβλήτων τροφίμων λόγω των περιορισμένων περιβαλλοντικών αποτυπωμάτων [141] και των υψηλών δυνατοτήτων σε ανάκτηση ενέργειας [141]–[144] και παραγωγής εδαφοβελτιωτικού [142], [145], [146]. Η χρήση της στην Ευρώπη συνεχώς αυξάνεται, με αποτέλεσμα το 2015 η αναφερόμενη δυναμικότητα από 290 μεγάλης κλίμακας μονάδες παραγωγής μεθανίου να αγγίζει τους 9 εκατομμύρια τόνους αποβλήτων ανά έτος [147]. Το 95 % αυτών των μονάδων είναι μονοβάθμια, δηλαδή οι διεργασίες της υδρόλυσης, οξικογένεσης, οξυογένεσης και μεθανογένεσης συμβαίνουν ταυτόχρονα μέσα στον αντιδραστήρα [147]. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια έχουν ερευνηθεί και αναπτυχθεί διβάθμια ή πολυβάθμια συστήματα με στόχο την επίτευξη μόνιμων συνθηκών κάτω από υψηλούς ρυθμούς οργανικής φόρτισης [148]. Τα συστήματα αυτά είναι πολύπλοκα στο σχεδιασμό, αφού περιλαμβάνουν τη χρήση δυο (υδρόλυση-οξικογένεση στον πρώτο και μεθανογένεση στον δεύτερο) ή τριών (υδρόλυση, οξικογένεση και μεθανογένεση) αντιδραστήρων σε σειρά.

Οι Zhang et al. (2016, 2017) ανέπτυξαν ένα αναερόβιο αντιδραστήρα τριών διαμερισμάτων. Η απόδοση σε μεθάνιο ήταν 24%–54% μεγαλύτερη σε σύγκριση με συστήματα ενός ή δυο σταδίων [149]–[151]. Οι Yangyang Li et al. (2017) και Yeqing Li et al. (2017) δημιούργησαν ένα διβάθμιο αναερόβιο σύστημα μεμβρανών, συνδυάζοντας ένα κλασικό αντιδραστήρα τύπου CSTR και έναν αντιδραστήρα μεμβρανών [152], [153]. Οι Wu et al. (2016) πρότειναν ένα καινοτόμο σύστημα δυο σταδίων, όπου ο πρώτος αντιδραστήρας λειτουργούσε σε όξινη συνθήκη (pH=4) και η εκροή τροφοδοτούσε έναν αντιδραστήρα τύπου UASB για παραγωγή μεθανίου [154]. Οι Yan et al. (2016) εξέτασαν την επίδραση της ανακύκλωσης του μεθανίου στην παραγωγικότητα ενός μεθανογόνου UASB [155]. Επίσης οι Wu et al. (2015) ανέπτυξαν μια διεργασία τριών σταδίων που αποτελούνταν από το στάδιο της υδρόλυσης, της αλκοολικής ζύμωσης της υγρής εκροής και της αναερόβιας χώνευσης του υπολειμματος της υδρόλυσης. Βρήκαν ότι η διεργασία αυτή πέτυχε αύξηση κατά 27% στο ρυθμό αποδόμησης των οικιακών αποβλήτων τροφίμων, μείωση κατά 51,8% στις ενεργειακές απαιτήσεις για τη λειτουργία του συστήματος και 17,6% βελτίωση στη συνολική απόδοση σε ενέργεια, σε σύγκριση με διεργασίες ενός σταδίου [156], [157].

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή εξετάστηκε η διαχείριση του προϊόντος FORBI (Food Residue Biomass), ένα προϊόν που παράγεται από τη θερμική και μηχανική επεξεργασία υπολειμμάτων κουζίνας, στα πλαίσια του προγράμματος «WASTE4Think», Horizon 2020. Η επεξεργασία του FORBI πραγματοποιήθηκε με χρήση ενός καινοτόμου αναερόβιου αντιδραστήρα PABR, πιλοτικής κλίμακας. Η χρήση του αποτελεί καινοτομία στον τομέα διαχείρισης οικιακών αποβλήτων τροφίμων, αφού ο PABR συνδυάζει τη δυνατότητα λειτουργίας ταυτόχρονα όλων των διεργασιών της αναερόβιας χώνευσης, με αποτέλεσμα την αποφυγή πολύπλοκων συστημάτων που η επιτυχία του κάθε σταδίου εξαρτάται από το προηγούμενο. Επίσης έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί σε χαμηλούς αλλά και υψηλούς ρυθμούς οργανικής φόρτισης και χαμηλούς υδραυλικούς χρόνους παραμονής, καθιστώντας τον ιδανική λύση για την αποδόμηση ενός υποστρώματος πλούσιου σε εύκολα αποικοδομήσιμο οργανικό φορτίο, όπως είναι το FORBI.

Η προεπεξεργασία των οικιακών αποβλήτων τροφίμων είναι πολλές φορές αναγκαία, ώστε το προϊόν που θα τροφοδοτήσει τον αντιδραστήρα να είναι εύκολα αποικοδομήσιμο. Η μηχανική προεπεξεργασία μέσω άλεσης απελευθερώνει την κυτταρική μάζα και αυξάνει την ειδική επιφάνεια. Η μεγάλη ειδική επιφάνεια επιτρέπει την καλύτερη επαφή μεταξύ του υποστρώματος και των αναερόβιων βακτηρίων και βελτιώνει έτσι την αναερόβια διεργασία [158], [159]. Οι Izumi et al. (2010) μελέτησαν τη σχέση μεταξύ του μεγέθους των σωματιδίων και της συσσώρευσης VFA στην αναερόβια χώνευση [160]. Βρήκαν ότι η απόδοση σε μεθάνιο αυξήθηκε κατά 28% όταν το μέγεθος των σωματιδίων μειώθηκε από 0,843 mm στα 0,391 mm. Παρόλα αυτά η περαιτέρω μείωση του μεγέθους οδηγεί σε υπερβολική συσσώρευση των VFA και κατ'επέκταση σε μείωση της απόδοσης σε μεθάνιο [159].

Η θερμική προεπεξεργασία χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση της υγρασίας. Επίσης οδηγεί στη διαλυτοποίηση περίπλοκων δομών και βελτιώνει τη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης [161]–[163]. Η υδρόλυση, η οποία αποτελεί το στάδιο παρεμπόδισης, επηρεάζεται θετικά, όπως και ο χρόνος παραμονής που μπορεί να μειωθεί λόγω της θερμικής προεπεξεργασίας [164]. Με βάση τους δυο τρόπους επεξεργασίας, στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής και για την παραγωγή του προϊόντος FORBI, χρησιμοποιήθηκε ένας συνδυασμός ξήρανσης και άλεσης των αρχικών οικιακών αποβλήτων τροφίμων με χρήση ειδικού μηχανολογικού εξοπλισμού.

Η μέθοδος τροφοδότησης των οικιακών απορριμμάτων τροφίμων που βρίσκονται κυρίως σε στερεή κατάσταση σε έναν αναερόβιο χωνευτήρα αποτελεί αντικείμενο έρευνας. Οι τεχνολογίες που έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία αφορούν κυρίως την κατάσταση υπό την οποία τροφοδοτείται το απόβλητο στα συστήματα, δηλαδή αν το απόβλητο θα βρίσκεται σε ξηρή κατάσταση, ημιξηρή κατάσταση ή σε υγρή κατάσταση (αιώρημα). Στην Ιταλία κατασκευάστηκαν δυο μονάδες μεγάλης κλίμακας που βασίζονται στην αναερόβια χώνευση ημιξηρής κατάστασης (20% ξηρή μάζα) και λειτούργησαν σε θερμοφιλικές συνθήκες. Από τα πειράματα που διεξήχθησαν αναφέρεται ότι η μονάδα είναι ικανή να παράγει περίπου 2500 m<sup>3</sup>/d βιοαέριο και 39 tn/d χωνεμένη λάσπη (10% ξηρή μάζα) από 500 τόνους οικιακών στερεών αποβλήτων. Στη συνέχεια η αφυδατωμένη χωνεμένη λάσπη οδηγείται σε συγκομποστοποίηση με φρέσκο οργανικό κλάσμα για την παραγωγή κομπόστ ανώτερης ποιότητας (55% ξηρή μάζα) [164]–[166].

Οι Cho, Park και Chang (1995) χρησιμοποίησαν έναν αναερόβιο χωνευτήρα διακοπτόμενης λειτουργίας και στερεής κατάστασης και πέτυχαν απόδοση σε μεθάνιο 472mL/g<sub>VS</sub> τροφοδοσίας [167]. Αντίστοιχα αποτελέσματα παρουσίασαν οι Kim et al. (2006) που κατασκευάσαν έναν αντιδραστήρα τριών σταδίων (223 mL<sub>CH4</sub>/g διαλυτού COD που αποικοδομείται) [168], οι Liu et al. (2009) με αντιδραστήρα διακοπτόμενης λειτουργίας (716mL CH<sub>4</sub>/g<sub>VS</sub> μίγματος τροφοδοσίας) [169], οι Nagao et al. (2012) με αναερόβιο χωνευτήρα υγρής κατάστασης (455mL/g<sub>VS</sub>) [170] και οι Mashad & Zhang (2010) με έναν υβριδικό αντιδραστήρα στερεής-υγρής κατάστασης (302 mL/g<sub>VS</sub>) [171]. Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι προτιμάται η λύση της αναερόβιας χώνευσης στερεής κατάστασης από την υγρή για τη διαχείριση των οικιακών αποβλήτων τροφίμων, διότι παρουσιάζουν συγκέντρωση στερεών άνω του 15% [164].

Παρόλα αυτά, όπως αναφέρθηκε αντίστοιχα στο Κεφάλαιο 6 για τα κτηνοτροφικά απόβλητα, η παρούσα διδακτορική διατριβή έχει ως βασικό στόχο την εφαρμογή ενός ολοκληρωμένου συστήματος αξιοποίησης του προϊόντος FORBI. Με γνώμονα αυτό σχεδιάστηκαν οι μέθοδοι με τις οποίες το FORBI θα τροφοδοτούσε τον αντιδραστήρα PABR, που είναι ένα ταχύρρυθμο σύστημα που δε δύναται να επεξεργαστεί απόβλητα με συγκέντρωση ολικών στερεών άνω του 5%.

Η πρώτη μέθοδος αφορά στην εφαρμογή του ολοκληρωμένου συστήματος που αναπτύχθηκε για την επεξεργασία των κτηνοτροφικών αποβλήτων για την επεξεργασία του FORBI. Ειδικότερα, πραγματοποιήθηκε αιώρηση του FORBI σε νερό δικτύου σε κατάλληλη αναλογία, ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή συγκέντρωση σε οργανικό φορτίο και την ανάδευση του μίγματος για χρονικό διάστημα 30min. Στη συνέχεια το μίγμα εκχυλίστηκε με σύστημα διήθησης υπό πίεση. Το υγρό εκχύλισμα ήταν απαλλαγμένο από στερεά και οδηγήθηκε σε αναερόβια χώνευση, ενώ το στερεό κλάσμα οδηγήθηκε στον κομποστοποιητή. Ο συνδυασμός των διεργασιών της αναερόβιας χώνευσης και της κομποστοποίησης για τη διαχείριση του υγρού και του στερεού κλάσματος οικιακών αποβλήτων τροφίμων, αντίστοιχα, είναι δημοφιλής λόγω της ανάκτησης ενέργειας μέσω της αναερόβιας χώνευσης και της ανακύκλωσης θρεπτικών συστατικών μέσω της κομποστοποίησης.

Σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος παρατηρείται μια αύξηση στον αριθμό των χωρών που επεξεργάζονται είτε με τη μέθοδο της κομποστοποίησης, είτε με αναερόβια χώνευση πάνω από το 25% των δημοτικών στερεών αποβλήτων. Επίσης κατά την περίοδο 1995-2014 το μερίδιο της κομποστοποίησης και αναερόβιας χώνευσης αυξήθηκε από το 6,2% στο 16,4% [172]. Ακόμη, σύμφωνα με τα στατιστικά της Eurostat για τη διαχείριση αποβλήτων, το 2012 οι διεργασίες της αναερόβιας χώνευσης και της κομποστοποίησης χρησιμοποιήθηκαν για το 90% των οικιακών αποβλήτων τροφίμων που είχαν συλλεχθεί για διαχείριση [146].

Σε πιο συγκεκριμένες περιπτώσεις, περίπου 80 εστιατόρια του Παρισίου συμμετείχαν σε πιλοτικό πρόγραμμα συλλογής των αποβλήτων τους. Τα απόβλητα μεταφέρονταν με κόστος 200 ευρώ ανά τόνο στην εταιρεία Bioenergy, η οποία έχει εγκαταστήσει μια μονάδα με δυναμικότητα 40000 τόνων ανά έτος και μετατρέπει τα οικιακά απόβλητα τροφίμων σε βιοαέριο και εδαφοβελτιωτικό. Στην Κίνα, σύμφωνα με δεδομένα του 2015, με βάση πληροφορίες από 111 εγκαταστάσεις διαχείρισης οικιακών αποβλήτων τροφίμων υπό λειτουργία ή υπό κατασκευή (δυναμικότητα άνω των 50 τόνων ανά ημέρα), η αναερόβια χώνευση χρησιμοποιούνταν ως διεργασία στο 76,1% των περιπτώσεων, ενώ η αερόβια κομποστοποίηση στο 14,1% αυτών [173].

Πέρα από το συνδυασμό της αναερόβιας χώνευσης και της κομποστοποίησης, στα πλαίσια της πειραματικής διαδικασίας μελετήθηκε και η δυνατότητα αξιοποίησης του FORBI, χωρίς την παρεμβολή του σταδίου επεξεργασίας, για την παραγωγή βιοαερίου και εδαφοβελτιωτικού. Μελετήθηκε, δηλαδή, εναλλακτικά η χρήση του ως πρώτη ύλη για την παραγωγή εδαφοβελτιωτικού και ταυτόχρονα η δυνατότητα παραγωγής βιοαερίου από αιώρημα FORBI σε νερό δικτύου, με στόχο την αξιοποίηση του συνόλου του μεθανογόνου δυναμικού του.



Τα αποτελέσματα των πειραματικών κύκλων που αφορούν την αναερόβια χώνευση του FORBI παρουσιάζονται στις επόμενες ενότητες, ενώ τα αποτελέσματα της κομποστοποίησης παρουσιάζονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 8.

## **7.2 Το ευρωπαϊκό ερευνητικό έργο «WASTE4Think»**

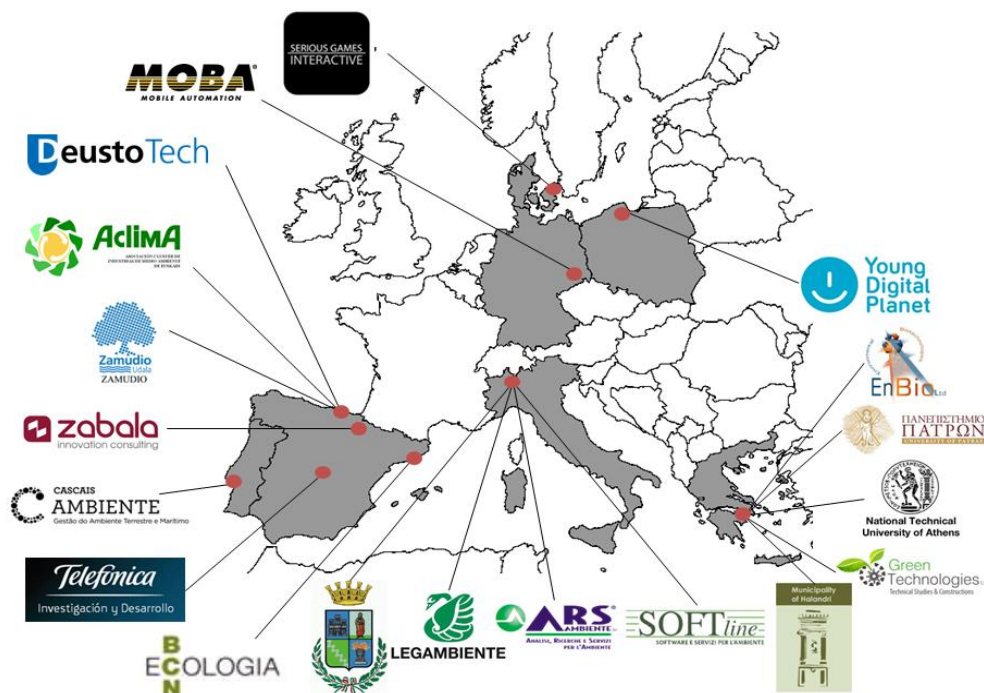
### **7.2.1 Περιγραφή και στόχοι**

Το WASTE4Think, Horizon 2020, είναι ένα ευρωπαϊκό ερευνητικό έργο με σκοπό την προώθηση εναλλακτικών πρακτικών διαχείρισης αποβλήτων στα πλαίσια της κυκλικής οικονομίας, εξετάζοντας 20 καινοτόμες προσεγγίσεις που περιλαμβάνουν:

- Τεχνολογίες επεξεργασίας και αξιοποίησης αποβλήτων
- Τεχνολογίες πληροφορικής
- Καμπάνιες ευαισθητοποίησης
- Οικονομικά εργαλεία
- Εκπαιδευτικά εργαλεία

Πραγματοποιείται υπό την καθοδήγηση του DeutsoTech Institute of Technology στο πανεπιστήμιο του Deutso και στοχεύει στο σχεδιασμό λύσεων βασισμένων στη χρήση τεχνολογιών πληροφορίας και επικοινωνίας που θα οδηγήσουν στη βελτίωση όλων των σταδίων διαχείρισης αποβλήτων, υιοθετώντας μια ολιστική προσέγγιση και εστιάζοντας στη συμμετοχή των πολιτών για το χτίσιμο πιο αειφόρων και φιλικών προς το περιβάλλον πόλεων.

Στο πρόγραμμα συμμετέχουν συνολικά 19 εταιρείες από 6 ευρωπαϊκές χώρες οι οποίες θα συνεργαστούν με χρονικό ορίζοντα 42 μηνών (1 Ιουνίου 2016 έως 30 Νοεμβρίου 2019). Ο προϋπολογισμός του προγράμματος είναι 10,5 εκατομμύρια ευρώ και η συνολική συνεισφορά της Ευρωπαϊκής Επιτροπής είναι ύψους 8,8 εκατομμύρια ευρώ.



Εικόνα 7.2.1 Οι εταιρείες του προγράμματος WASTE4Think και οι χώρες προέλευσης [174]

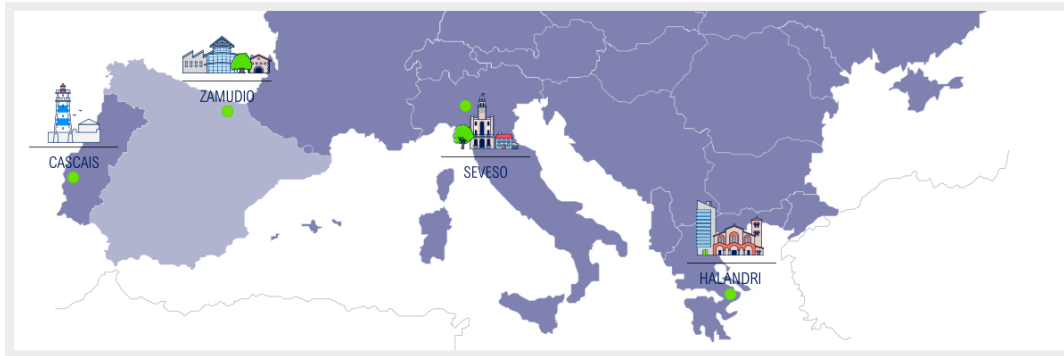
Στους εταίρους περιλαμβάνονται 4 δημόσιες διοικήσεις, 2 ερευνητικοί οργανισμοί, 3 πανεπιστήμια, 9 εταιρίες, 1 επιχείρηση Cluster και 1 μη κυβερνητικός οργανισμός και οι χώρες προέλευσης είναι η Ισπανία, η Ελλάδα, η Δανία, η Ιταλία, η Γερμανία και η Πορτογαλία.

Οι εξειδικευμένοι στόχοι του WASTE4Think περιλαμβάνουν συνοπτικά [174]:

- Τη μείωση της παραγόμενης ποσότητας των αποβλήτων μέσα από καμπάνιες πρόληψης και συνεργατικές δραστηριότητες με σκοπό την προώθηση της επαναχρησιμοποίησης και τις οικολογικά σχεδιασμένες λύσεις.
- Την προώθηση της αλλαγής συμπεριφοράς των παραγωγών των αποβλήτων μέσα από καμπάνιες ευαισθητοποίησης και καινοτόμα εκπαιδευτικά εργαλεία με σκοπό να ευνοηθούν βιώσιμα καταναλωτικά πρότυπα και να αυξηθεί το ποσοστό διαλογής των αποβλήτων.
- Τη βελτίωση των υπηρεσιών διαχείρισης αποβλήτων μέσω της μείωσης του κόστους διαχείρισής τους και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.
- Τον εκμηδενισμό της ποσότητας των πρωτογενών αποβλήτων που καταλήγουν σε ΧΥΤΑ και τη μεγιστοποίηση αντίστοιχα των ποσοτήτων των δευτερογενών αποβλήτων.
- Την αναγνώριση των προϊόντων των αποβλήτων με χαμηλή δυνατότητα ανακύκλωσης και την πρόταση καινοτόμων οικολογικών λύσεων αξιοποίησης και παραγωγής
- Την εκτίμηση της μεταβιβασιμότητας στην αγορά των νέων καινοτόμων οικολογικών λύσεων

Στα πλαίσια του προγράμματος θα πραγματοποιηθούν 4 πιλοτικές εφαρμογές που θα έχουν ως στόχο τη μελέτη διαφορετικών τεχνολογιών διαχείρισης αποβλήτων σε πραγματικές συνθήκες. Οι πιλότοι θα

εγκατασταθούν στο Zamudio (Ισπανία), στο Χαλάνδρι (Ελλάδα), στο Seveso (Ιταλία) και στο Cascais (Πορτογαλία).



**Εικόνα 7.2.2** Οι πιλοτικές εφαρμογές του WASTE4Think [174]

Η πόλη Zamudio της Ισπανίας είναι μια ιδιαίτερα βιομηχανοποιημένη περιοχή με διάσπαρτο πληθυσμό, που χρησιμοποιεί διαχωρισμένο κράσπεδο συλλογής απορριμμάτων. Το Χαλάνδρι είναι μια μεγάλη προαστιακή πόλη με ένα ευρύ φάσμα επιχειρήσεων και χρησιμοποιεί ένα πολύ βασικό σύστημα διαχείρισης αποβλήτων. Το Seveso στην Ιταλία είναι μια μικρή πόλη που χρησιμοποιεί σύστημα συλλογής απορριμμάτων από πόρτα σε πόρτα. Τέλος, το Cascais στην Πορτογαλία είναι μια μεγάλη και πολύ τουριστική παραθαλάσσια κωμόπολη που υλοποιεί ένα προηγμένο σύστημα συλλογής [174].

Τα αναμενόμενα συνολικά αποτελέσματα του προγράμματος περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων:

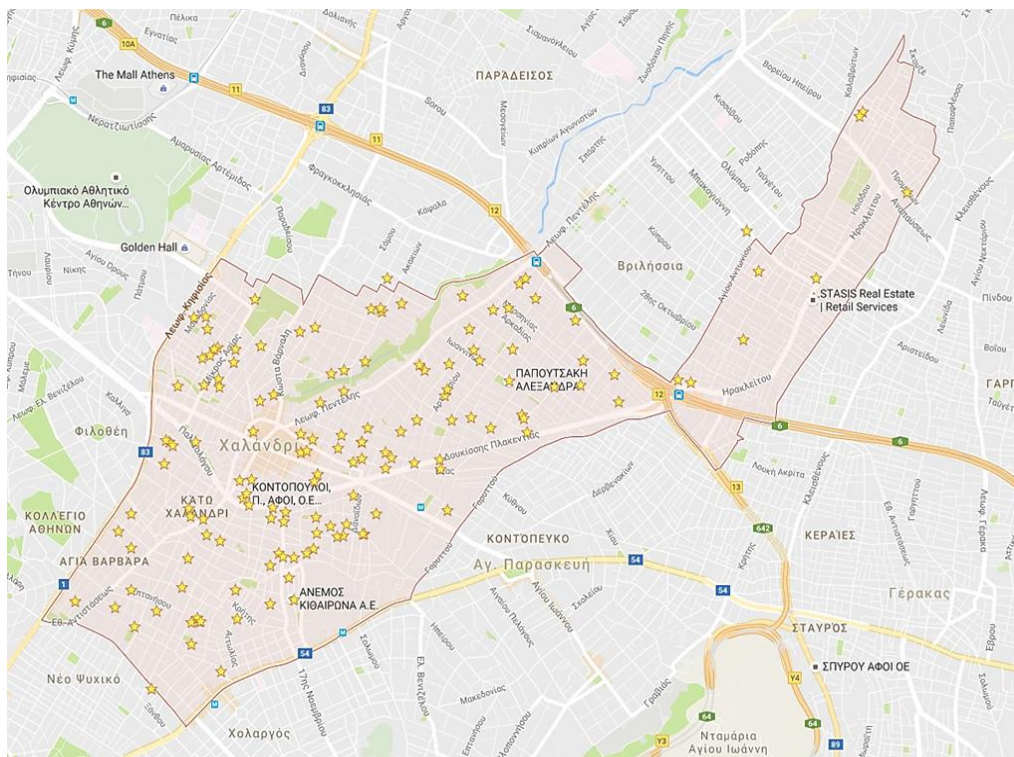
- Την αύξηση κατά 20% της προδιαλογής των απορριμμάτων στην πηγή
- Τη μείωση κατά 10% των εξόδων διαχείρισης
- Τη μείωση παραγωγής αποβλήτων κατά 8%
- Τη μείωση εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου κατά 10%
- Τη μείωση των απορριμμάτων που καταλήγουν σε χωματερές κατά 23%

### **7.2.2 Το WASTE4Think στο Χαλάνδρι**

Ο δήμος Χαλανδρίου είναι μία από τις 4 δημόσιες διοικήσεις που συμμετέχουν στο πρόγραμμα WASTE4Think. Βασικός στόχος είναι η ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης μεθόδου διαχείρισης των οικιακών ζυμώσιμων απορριμμάτων μέσα από την εφαρμογή ενός πιλοτικού προγράμματος που περιλαμβάνει την πλήρη παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο της πορείας των απορριμματοφόρων και την ανάπτυξη ενός συστήματος αποφάσεων. Επιπλέον, θα αναπτυχθούν δράσεις με συμμετοχή των πολιτών, που περιλαμβάνουν την αποτροπή δημιουργίας απορριμμάτων τροφών σε καταστήματα υγειονομικού ενδιαφέροντος, την ανάπτυξη εφαρμογών (apps) για τους καταναλωτές, τη συμμετοχή σπουδαστών και μαθητών. Τελικός στόχος του προγράμματος στο δήμο είναι η δημιουργία μιας πόλης με μηδενικά απορρίμματα.

Ο δήμος Χαλανδρίου έχει πληθυσμό 74.192 κατοίκους σύμφωνα με την απογραφή του 2011 [175] και έκταση 10,805 τετραγωνικά χιλιόμετρα. Η ετήσια παραγωγή αστικών στερεών απορριμμάτων του δήμου είναι 38,881t, εκ των οποίων το 43% αποτελεί το ζυμώσιμο κλάσμα.

Στα πλαίσια του προγράμματος WASTE4Think στόχος είναι η συλλογή και εν συνεχεία η αξιοποίηση των οικιακών υπολειμμάτων τροφής από νοικοκυριά του δήμου Χαλανδρίου με σκοπό την ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης μεθόδου διαχείρισης και αξιοποίησης. Στο πρόγραμμα συμμετέχουν εθελοντικά περίπου 700 πολίτες από 240 νοικοκυριά. Η χωρική κατανομή των νοικοκυριών που συμμετέχουν εθελοντικά στο πιλοτικό πρόγραμμα, παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.2.3.



**Εικόνα 7.2.3** Χωρική κατανομή των νοικοκυριών του δήμου Χαλανδρίου που συμμετέχουν στο WASTE4Think

Στους εθελοντές πολίτες μοιράζονται συνολικά 120.000 βιοαποδομήσιμες σακούλες και 230 οικιακοί κάδοι συλλογής υπολειμμάτων τροφών όγκου 30L, ενώ ανά 4 νοικοκυριά τοποθετήθηκε και εξωτερικός κάδος όγκου 120L συνοδευόμενος από ειδική κλειδαριά για την αποφυγή ανεπιθύμητων προσμίξεων. Οι εθελοντές κάτοικοι είναι ενήμεροι για το πρόγραμμα διαδρομών των απορριμματοφόρων, που συλλέγουν τα απορρίμματα από τους εξωτερικούς κάδους 2 έως 3 φορές την εβδομάδα και μεταφέρουν τα υπολείμματά τους σε αυτούς την ίδια ημέρα για την αποφυγή ανεπιθύμητων οχλήσεων (οσμές κλπ) ειδικά τους καλοκαιρινούς μήνες.

Τα απορριμματοφόρα μεταφέρουν τα συλλεχθέντα απορρίμματα σε ειδικά διαμορφωμένο χώρο του δήμου Χαλανδρίου (Εικόνα 7.2.4) όπου αναμιγνύονται και τροφοδοτούνται σε ειδικό ξηραντήρα και τεμαχιστή (Εικόνα 7.2.5) τύπου GAIA GC-300.



**Εικόνα 7.2.4** Ειδικά διαμορφωμένος χώρος 24m<sup>2</sup> για τη συλλογή και επεξεργασία των ζυμώσιμων απορριμμάτων του δήμου Χαλανδρίου



**Εικόνα 7.2.5** Ο ξηραντήρας στο οποίο πραγματοποιείται η επεξεργασία των συλλεχθέντων απορριμμάτων

Το υλικό υφίσταται επεξεργασία (ξήρανση και τεμαχισμό) για 9 ώρες σε θερμοκρασία 92-98°C και στη συνέχεια ακολουθούν 2 ώρες ψύξης. Το τελικό προϊόν της επεξεργασίας ονομάζεται **Food Residue Biomass**, δηλαδή **FORBI** (Εικόνα 7.2.6).



**Εικόνα 7.2.6** Η μορφή του FORBI μετά από την ξήρανση

Μέσω της διαδικασίας τη ξήρανσης, επιτυγχάνεται μείωση του όγκου των ζυμώσιμων απορριμμάτων έως και κατά 90%. Τα πλεονεκτήματα του καινοτόμου αυτού προϊόντος είναι:

- Η μείωση του τελικού όγκου και βάρους του υλικού έως και κατά 90% (τα ποσοστά υγρασία των οικιακών ζυμώσεων απορριμμάτων είναι τυπικά 60-80%)
- Η αφαίρεση των οσμών
- Η παράταση του δυνατού χρόνου αποθήκευσης χωρίς την αλλοίωση των φυσικοχημικών του χαρακτηριστικών
- Η επίτευξη ομοιογένειας

Στα πλαίσια του WASTE4Think στόχος είναι η μελέτη της καταλληλότητας του FORBI για την παραγωγή βιοαερίου, βιοαιθανόλης, κομπόστ, ηλεκτρισμού (από Μικροβιακά Κελιά Καυσίμου), ενεργού άνθρακα, ζωοτροφής και πέλλετ, αλλά και ως εναλλακτικό καύσιμο στην τσιμεντοβιομηχανία.

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή εξετάζεται η δυνατότητα παραγωγής βιοαερίου (βιομεθανίου) από το FORBI σε καινοτόμο πιλοτικό βιοαντιδραστήρα τύπου PABR. Στον Πίνακα 7.2.1 παρουσιάζονται τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του FORBI που αποτέλεσε την τροφοδοσία του αντιδραστήρα για περίπου ένα ημερολογιακό έτος.

**Πίνακας 7.2.1** Η σύσταση του FORBI [176]

<b>Συστατικό</b>	<b>(%, β/β, ξηρή βάση)</b>
<b>Πρωτεΐνη</b>	13.70 ± 0.44
<b>Λιπαρά</b>	12.26 ± 0.11
<b>Υδατοδιαλυτά (Extractives)</b>	27.29 ± 1.71
<b>Γλυκόζη</b>	0.00
<b>Σακχαρόζη</b>	0.51 ± 0.04
<b>Συνολικά αναγωγικά σάκχαρα</b>	4.96 ± 0.94
<b>Πρωτεΐνη</b>	0.33 ± 0.02
<b>Υδατοδιαλυτό άμυλο</b>	1.15 ± 0.09
<b>Άμυλο</b>	10.68 ± 0.07
<b>Πηκτίνη</b>	3.27 ± 0.82
<b>Κυτταρίνη</b>	10.31 ± 0.07
<b>Ημικυτταρίνη</b>	11.32 ± 0.17
<b>Ολική λιγνίνη</b>	6.75 ± 0.15
<b>Τέφρα</b>	7.16 ± 0.27

### **7.3 Περιγραφή πειραματικών κύκλων αναερόβιας συγχώνευσης με τροφοδοσία FORBI**

Τα πειράματα αναερόβιας χώνευσης για την παραγωγή βιοαερίου από FORBI πραγματοποιήθηκαν στον πιλοτικής κλίμακας PABR ενεργού όγκου 77L. Στόχος της πειραματικής διαδικασίας ήταν η μελέτη της απόδοσης του συστήματος σε όρους ποσοστιαίας απομάκρυνσης ολικού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου, καθώς σε όρους παραγωγικότητας βιοαερίου ανά μονάδα μάζας FORBI.

Κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας πραγματοποιήθηκαν μεταβολές των λειτουργικών παραμέτρων. Ειδικότερα εξετάστηκε η λειτουργία του πιλότου υπό διαρκώς αυξανόμενους ρυθμούς οργανικής φόρτισης με στόχο τη μέγιστη δυνατή μείωση του υδραυλικού χρόνου παραμονής. Επιπλέον εξετάστηκε η απόκριση του συστήματος στην αύξηση του οργανικού περιεχομένου της τροφοδοσίας και στη μεταβολή της περιόδου εναλλαγής του διαμερίσματος εισόδου της τροφοδοσίας.

Κατά την εκκίνηση των πειραμάτων αναερόβιας χώνευσης, επιχειρήθηκε η εφαρμογή της μεθόδου που αναπτύχθηκε για την ολοκληρωμένη επεξεργασία κτηνοτροφικών αποβλήτων και παρουσιάζεται αναλυτικά στα Κεφάλαια 6 και 8. Εξετάστηκε η δυνατότητα ταυτόχρονης αξιοποίησης του FORBI προς παραγωγή βιοαερίου και εδαφοβελτιωτικού, εφαρμόζοντας αρχικά ένα στάδιο προεπεξεργασίας του που περιελάμβανε την αιώρηση του FORBI σε νερό και στη συνέχεια διήθηση υπό πίεση, προς

παραγωγή μιας υγρής φάσης (εκχύλισμα) και μιας στερεάς. Το εκχύλισμα οδηγήθηκε στον πιλότο για την παραγωγή βιοαερίου και το στερεό κλάσμα οδηγήθηκε στον εργαστηριακό κομποστοποιητή για την παραγωγή εδαφοβελτιωτικού. Τα πειράματα με εκχύλισμα από FORBI αφορούν τους 2 πρώτους πειραματικούς κύκλους λειτουργίας.

Κατά τον πρώτο πειραματικό κύκλο λειτουργίας ο πιλότος τροφοδοτήθηκε με εκχύλισμα FORBI. Η εκκίνηση των πειραμάτων με τροφοδοσία το FORBI πραγματοποιήθηκε σε άμεση συνέχεια των πειραμάτων αναερόβιας χώνευσης με μίγμα κτηνοτροφικών αποβλήτων (βλ. Κεφάλαιο 6), άρα οι αρχικές συνθήκες στον αντιδραστήρα κατά τον πρώτο κύκλο λειτουργίας ταυτίζονται με τις τελικές συνθήκες του τελευταίου κύκλου των πειραμάτων με κτηνοτροφικά απόβλητα. Για το λόγο αυτό επελέγη χαμηλός ρυθμός οργανικής φόρτισης (ίσος με αυτόν του πρώτου κύκλου λειτουργίας των κτηνοτροφικών αποβλήτων) με σκοπό το σταδιακό εγκλιματισμό της μικτής καλλιέργειας στο νέο απόβλητο. Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής ήταν ίσος με 12,2d και η περίοδος εναλλαγής ίση με 2d. Για την παρασκευή του εκχυλίσματος, αιωρήθηκαν 20g FORBI ανά λίτρο νερού δικτύου (χωρίς θέρμανση για τον περιορισμό της ενεργειακής κατανάλωσης). Η ανάκτηση του οργανικού φορτίου στο εκχύλισμα σε όρους χημικά απαιτούμενου οξυγόνου ήταν κατά μέσο όρο της τάξης του 33,9%, δηλαδή το μέσο tCOD της τροφοδοσίας διαμορφώθηκε στα 7,32g/L. Η διάρκεια λειτουργίας του πρώτου πειραματικού κύκλου ήταν 86 ημέρες.

Κατά το δεύτερο πειραματικό κύκλο λειτουργίας, ο ρυθμός οργανικής φόρτισης διπλασιάστηκε ( $OLR=1.17g_{COD}/L_{reactor}/d$ ) μέσα από την ταυτόχρονη αύξηση του μέσου tCOD της τροφοδοσίας (11,7g/L) και την αύξηση της ογκομετρικής παροχής (HRT=10d). Για την παρασκευή του εκχυλίσματος αιωρήθηκαν 40g FORBI ανά λίτρο νερού δικτύου και στη συνέχεια διηθήθηκαν υπό πίεση, με μια ανάκτηση οργανικού φορτίου στην υγρή φάση της τάξης του 27%. Η διάρκεια λειτουργίας του δεύτερου πειραματικού κύκλου ήταν 41 ημέρες.

Λόγω των ιδιαίτερως χαμηλών ποσοστών ανάκτησης και της περαιτέρω μείωσής τους κατά το δεύτερο κύκλο λειτουργίας, επελέγη η τροφοδότηση του πιλότου με αιώρημα FORBI σε νερό δικτύου, χωρίς την παρεμβολή του σταδίου διαχωρισμού. Το FORBI αιωρήθηκε με συγκέντρωση 10g ανά λίτρο νερού, με μέση συγκέντρωση tCOD του μίγματος της τροφοδοσίας ίσο με 10,83g/L (τρίτος πειραματικός κύκλος). Επελέγη η διατήρηση του ρυθμού οργανικής φόρτισης σε επίπεδα όμοια με αυτά του δεύτερου πειραματικού κύκλου με σκοπό την πραγματοποίησης άμεσων συγκρίσεων. Ο HRT ορίστηκε ίσος με 8,7d με αποτέλεσμα ο ρυθμός οργανικής φόρτισης να διαμορφωθεί στα  $1,24g_{COD}/L_{reactor}/d$ .

Κατά τον τέταρτο πειραματικό κύκλο λειτουργίας, ο ρυθμός οργανικής φόρτισης αυξήθηκε μέσα από την περαιτέρω μείωση του υδραυλικού χρόνου παραμονής στις 5d. Η περίοδος εναλλαγής διατηρήθηκε στις 2d και η συγκέντρωση του tCOD της τροφοδοσίας διατηρήθηκε πρακτικά σταθερή (10,7g/L) με το ρυθμό οργανικής φόρτισης να διαμορφώνεται στα  $2,14g_{COD}/L_{reactor}/d$ .

Τέλος, ο πέμπτος πειραματικός κύκλος χωρίστηκε σε 2 στάδια όπου μελετήθηκε ξεχωριστά η συμπεριφορά του συστήματος σε μεταβολή διαφορετικών παραμέτρων λειτουργίας. Κατά το στάδιο 5.1 μελετήθηκε η απόκριση του συστήματος σε απότομο διπλασιασμό της συγκέντρωσης του tCOD της τροφοδοσίας (22,63g/L) μέσω του διπλασιασμού της ποσότητας του FORBI που αιωρήθηκε ανά λίτρο

νερού δικτύου ( $20g_{\text{FORBI}}/L$ ). Οι υπόλοιπες λειτουργικές παράμετροι διατηρήθηκαν σταθερές, με το ρυθμό οργανικής φόρτισης να διαμορφώνεται στα  $4,53g/L_{\text{reactor}}/d$ . Κατά το στάδιο 5.2 πραγματοποιήθηκε μείωση της περιόδου εναλλαγής (T) σε 1d με σκοπό τη μελέτη της επίδρασής της στην κινητική του συστήματος, διατηρώντας όλες τις υπόλοιπες λειτουργικές παραμέτρους σταθερές.

Στον Πίνακα 7.3.1 παρουσιάζονται αναλυτικά οι παράμετροι λειτουργίας και τα βασικά χαρακτηριστικά των συνθηκών τροφοδότησης του συστήματος σε όλη την πειραματική διαδικασία αναερόβιας χώνευσης του FORBI, που διήρκεσε συνολικά 291 ημέρες.

**Πίνακας 7.3.1** Σύνοψη παραμέτρων λειτουργίας για τους πειραματικούς κύκλους με τροφοδοσία FORBI

	Κύκλος 1	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4	Κύκλος 5	
					5.1	5.2
Στάδιο διαχωρισμού	✓	✓	×	×	×	×
Ποσοστό ανάκτησης tCOD στο εκχύλισμα	33,9%	27%	-	-	-	-
HRT (d)	12,2	10	8,7	5	5	5
T (d)	2	2	2	2	2	1
Ογκομετρική παροχή (L/d)	6,31	7,7	8,85	15,4	15,4	15,4
Μέσο tCOD <sub>τροφοδοσίας</sub> (g-COD/L)	7,32	11,7	10,83	10,7	22,63	22,63
Ρυθμός οργανικής φόρτισης (g <sub>cod</sub> /L/d)	0,6	1,17	1,24	2,14	4,53	4,53
Ημέρες λειτουργίας (d)	86	41	67	56	18	23

Στην επόμενη ενότητα παρουσιάζονται τα αναλυτικά αποτελέσματα του πειραμάτων αναερόβιας χώνευσης με τροφοδοσία FORBI ξεχωριστά για κάθε πειραματικό κύκλο λειτουργίας.

## 7.4 Αποτελέσματα πειραματικών κύκλων

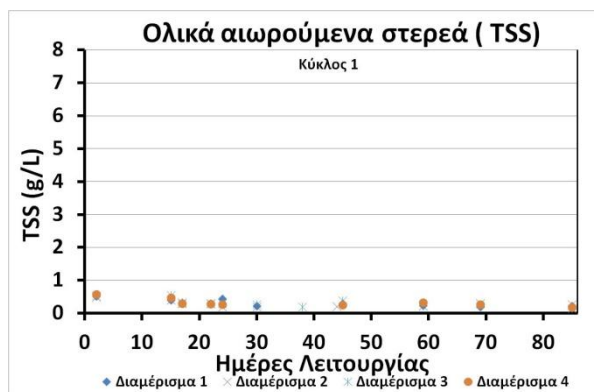
### 7.4.1 Κύκλος 1

Κατά τον πρώτο κύκλο (Κύκλος 1) με τροφοδοσία από εκχύλισμα FORBI ο υδραυλικός χρόνος παραμονής ορίστηκε στις 12,2d και η περίοδος εναλλαγής στις 2d, με μέσο tCOD της τροφοδοσίας ίσο

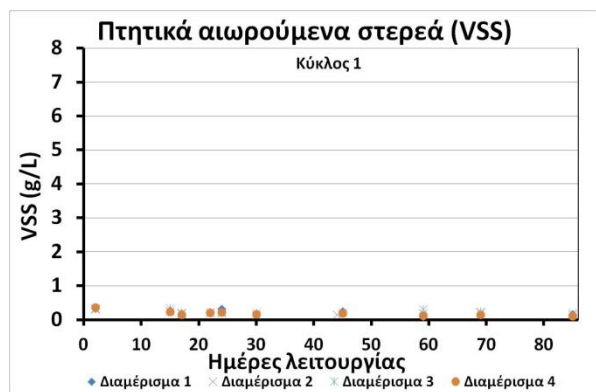


με 7,32g/L ( $OLR=0,6g_{COD}/L_{reactor}/d$ ). Η συνολική διάρκεια του πρώτου πειραματικού κύκλου ήταν ίση με 86 ημέρες.

Ο PABR ανταποκρίθηκε με σταθερότητα στην απότομη αλλαγή της τροφοδοσίας από εκχύλισμα κτηνοτροφικών αποβλήτων σε εκχύλισμα FORBI. Η συγκέντρωση των ολικών αιωρούμενων στερεών παρουσίασε μικρή πτώση (Σχήμα 7.4.1) και κυμάνθηκε στην περιοχή 0,2g/L έως 0,25g/L κατά τη μόνιμη περιοδική λειτουργία στους τελευταίους χρόνους παραμονής του πειραματικού κύκλου. Όμοια συμπεριφορά εμφάνισαν και τα πτητικά αιωρούμενα στερεά, με τη συγκέντρωσή τους στην τελευταία φάση του πειραματικού κύκλου να κυμαίνεται στην περιοχή 0,12g/L έως 0,18g/L (Σχήμα 7.4.2). Το χαμηλό περιεχόμενο σε στερεά του εκχυλίσματος FORBI με το οποίο τροφοδοτήθηκε το σύστημα (TSS έως 1g/L) συνετέλεσε σε αυτή την ελαφρά πτωτική τάση στο εσωτερικό του χωνευτήρα.

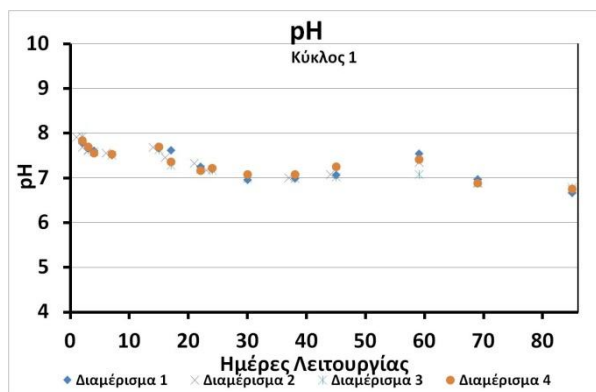


**Σχήμα 7.4.1** Συγκέντρωση ολικών αιωρούμενων στερεών στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του πρώτου πειραματικού κύκλου

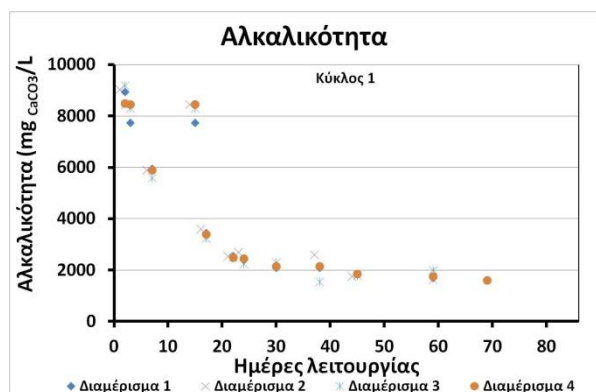


**Σχήμα 7.4.2** Συγκέντρωση πτητικών αιωρούμενων στερεών στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του πρώτου πειραματικού κύκλου

Σημαντική ήταν η πτώση των επιπέδων του pH στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR, που από το (κατά μέσο όρο) άνω όριο του 8 παρουσίασε συνεχή πτώση έως την περιοχή 6,6 έως 6,8 κατά τις τελευταίες ημέρες λειτουργίας του πειραματικού κύκλου (Σχήμα 7.4.3). Η πτώση του pH συνοδεύτηκε και από κατακόρυφη πτώση της αλκαλικότητας (Σχήμα 7.4.4) στο εσωτερικό του αντιδραστήρα, από τη μέση τιμή των  $9000mg_{CaCO_3}/L$  (με τροφοδοσία μίγμα κτηνοτροφικών αποβλήτων) προσέγγισε την περιοχή  $1000mg_{CaCO_3}/L$  έως  $1500mg_{CaCO_3}/L$  κατά τις τελευταίες ημέρες του πειραματικού κύκλου.

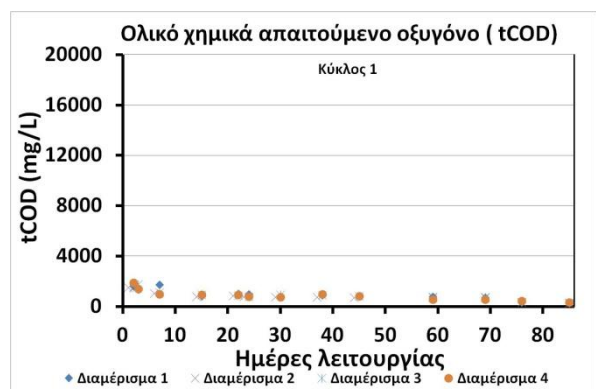


**Σχήμα 7.4.3** Διακύμανση του pH στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του πρώτου πειραματικού κύκλου

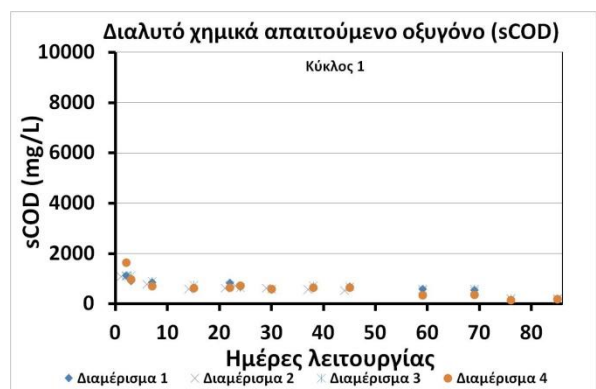


**Σχήμα 7.4.4** Διακύμανση της αλκαλικότητας στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του πρώτου πειραματικού κύκλου

Η μέση συγκέντρωση του ολικού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου παρουσίασε σταδιακή πτώση στο εσωτερικό του αντιδραστήρα (Σχήμα 7.4.5). Παρά το γεγονός ότι το νέο απόβλητο (FORBI) τροφοδοτήθηκε στο σύστημα με χαμηλό χρόνο παραμονής, η προσαρμογή της μικτής καλλιέργειας ήταν άμεση. Η μείωση του ρυθμού οργανικής φόρτισης σε σχέση με τον τελευταίο πειραματικό κύκλο με τροφοδοσία μίγμα κτηνοτροφικών αποβλήτων, συνετέλεσε σε ανάλογη μείωση της μέσης τιμής του tCOD στα διαμερίσματα του αντιδραστήρα, η οποία κατά την περιοδική μόνιμη λειτουργία κυμάνθηκε στην περιοχή 250mg<sub>O2</sub>/L έως 400mg<sub>O2</sub>/L. Η συμπεριφορά του διαλυτού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου ήταν ανάλογη, με τις τιμές κατά τις τελευταίες ημέρες λειτουργίας του πειραματικού κύκλου να κυμαίνονται στην περιοχή 180mg/L έως 300mg/L (Σχήμα 7.4.6).



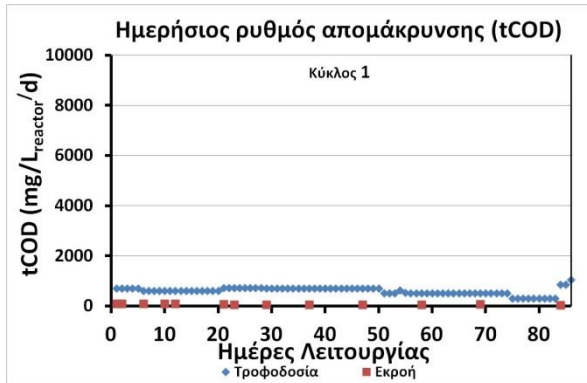
**Σχήμα 7.4.5** Ολικό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του πρώτου πειραματικού κύκλου



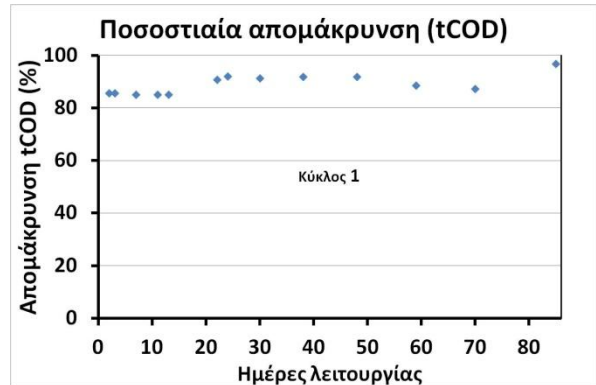
**Σχήμα 7.4.6** Διαλυτό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του πρώτου πειραματικού κύκλου

Στο Σχήμα 7.4.7 παρουσιάζεται ο ρυθμός οργανικής φόρτισης του συστήματος σε σχέση με το οργανικό περιεχόμενο της εκροής του αντιδραστήρα σε ημερήσια βάση. Η απόδοση του συστήματος ως προς την απομάκρυνση οργανικού φορτίου (Σχήμα 7.4.8) ήταν κατά μέσο όρο 89% σε όλη τη διάρκεια του πρώτου πειραματικού κύκλου με τροφοδοσία εκχυλίσματος FORBI. Οι χαμηλές τιμές του ολικού COD της εκροής από την αρχή του πειραματικού κύκλου παρά το σχετικά χαμηλό υδραυλικό χρόνο

παραμονής επιβεβαιώνουν τη δυνατότητα του PABR να προσαρμόζεται άμεσα σε αλλαγές της τροφοδοσίας, λόγω του περιοδικού τρόπου λειτουργίας του.

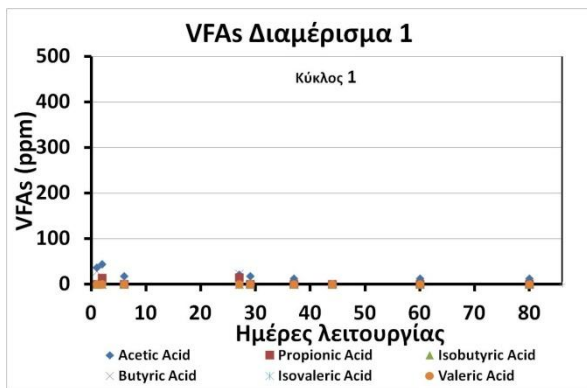


**Σχήμα 7.4.7** Σύγκριση ρυθμού οργανικής φόρτισης με το οργανικό περιεχόμενο της εκροής κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου

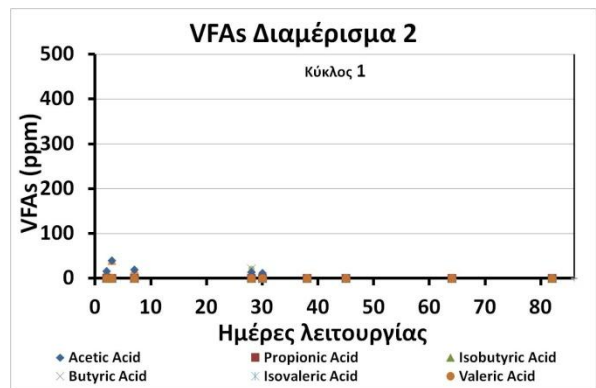


**Σχήμα 7.4.8** Απόδοση του PABR ως προς την απομάκρυνση οργανικού φορτίου κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου

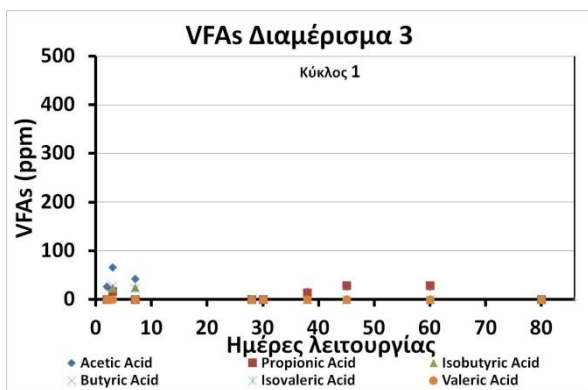
Η υψηλή απόδοση του συστήματος ως προς την απομάκρυνση οργανικού φορτίου δείχνει ότι το σύστημα δεν εμφάνισε κινητικούς περιορισμούς, γεγονός που καταδεικνύεται και από τις σχεδόν μηδενικές συγκεντρώσεις των πτητικών λιπαρών οξέων στα 4 διαμερίσματα του αντιδραστήρα (Σχήματα 7.4.9-7.4.13). Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η μέση συγκέντρωση οξικού οξέος σε όλη τη διάρκεια του πειραματικού κύκλου στα 4 διαμερίσματα ήταν  $17 \pm 5 \text{ mg/L}$ , ενώ τα υπόλοιπα VFAs κυμάνθηκαν ως επί το πλείστον σε τιμές χαμηλότερες από τα όρια ανίχνευσης.



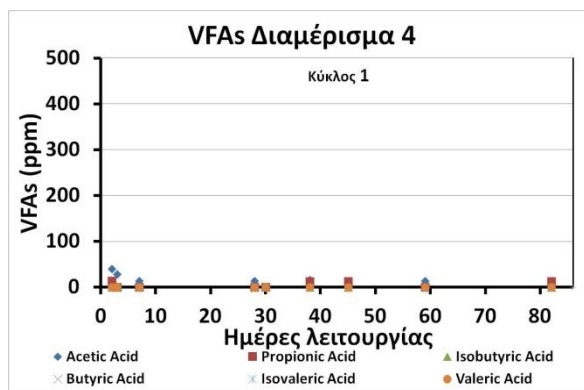
**Σχήμα 7.4.9** Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 1 κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου



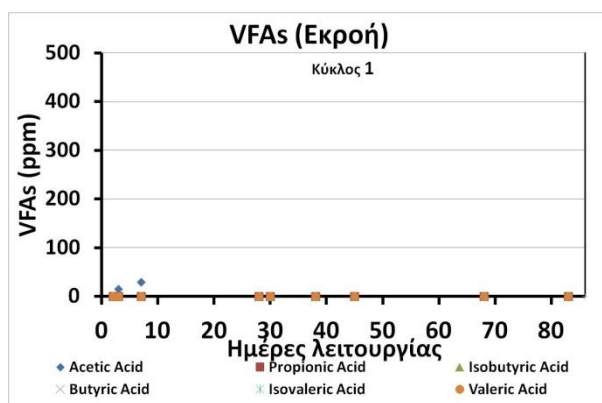
**Σχήμα 7.4.10** Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 2 κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου



Σχήμα 7.4.11 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 3 κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου

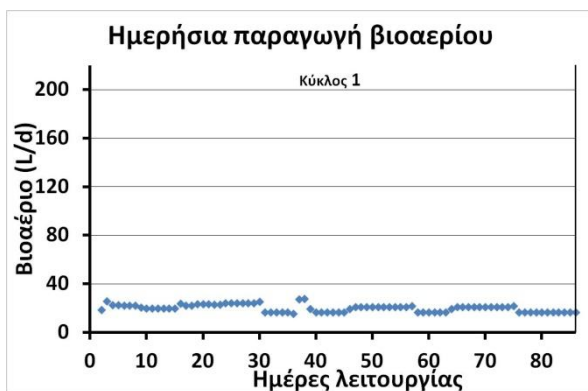


Σχήμα 7.4.12 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 4 κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου

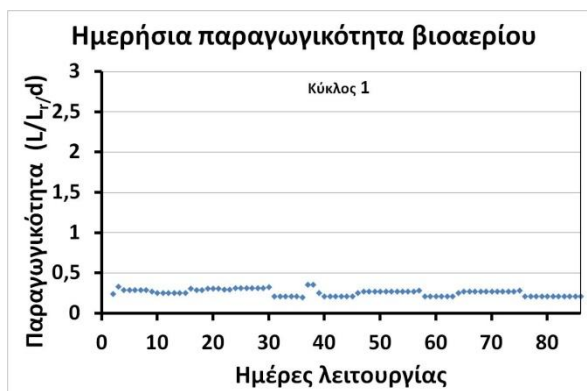


Σχήμα 7.4.13 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στην εκροή κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου

Η μέση ημερήσια παραγωγή βιοαερίου ήταν  $20 \pm 3 \text{ L/d}$  (Σχήμα 7.4.14) με μέση περιεκτικότητα σε μεθάνιο της τάξης του 65-70%, ενώ η μέση παραγωγικότητα (ανά μονάδα ενεργού όγκου αντιδραστήρα) ήταν  $0,26 \pm 0,4 \text{ L/L}_r/\text{d}$  (Σχήμα 7.4.15). Η μέση παραγωγικότητα ανά μονάδα μάζας FORBI ήταν  $158 \text{ L/kg}_{\text{FORBI}}$ .



Σχήμα 7.4.14 Ημερήσια παραγωγή βιοαερίου κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου



Σχήμα 7.4.15 Ημερήσια παραγωγικότητα βιοαερίου κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου

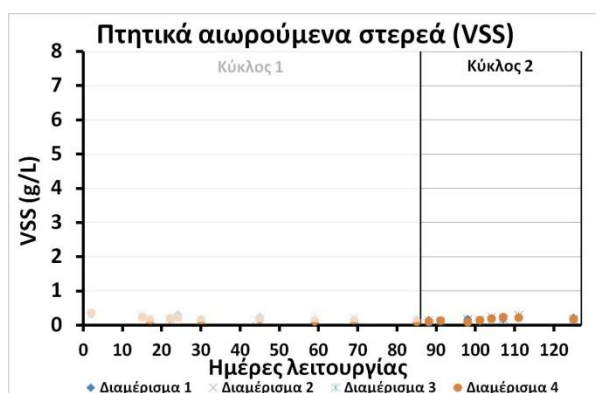
## 7.4.2 Κύκλος 2

Κατά το δεύτερο κύκλο (Κύκλος 2) με τροφοδοσία από εκχύλισμα FORBI ο υδραυλικός χρόνος παραμονής ορίστηκε στις 10d και η περίοδος εναλλαγής στις 2d, με μέσο tCOD της τροφοδοσίας ίσο με 11,7g/L ( $OLR=1,17g_{COD}/L_{reactor}/d$ ). Η συνολική διάρκεια του δεύτερου πειραματικού κύκλου ήταν ίση με 41 ημέρες.

Ο διπλασιασμός του ρυθμού οργανικής φόρτισης (μέσω της ταυτόχρονης αύξησης του οργανικού φορτίου της τροφοδοσίας και της μείωσης του υδραυλικού χρόνου παραμονής) δεν επηρέασε τη συγκέντρωση των στερεών στο εσωτερικό των διαμερισμάτων, γεγονός αναμενόμενο λόγω της χαμηλής συγκέντρωσης στερεών στην τροφοδοσία. Τα ολικά αιωρούμενα στερεά (Σχήμα 7.4.16) και τα πτητικά αιωρούμενα στερεά (Σχήμα 7.4.17) παρουσίασαν ανάλογη συμπεριφορά με αυτή του πρώτου πειραματικού κύκλου.

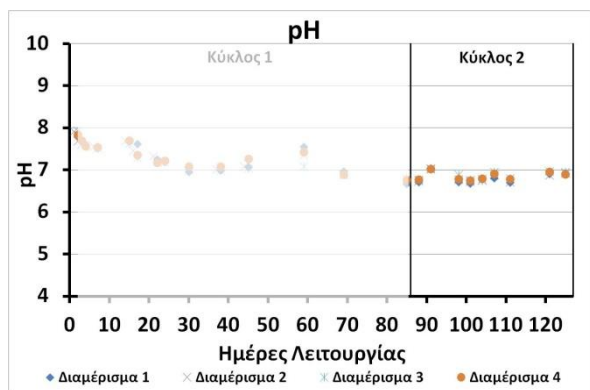


**Σχήμα 7.4.16** Συγκέντρωση ολικών αιωρούμενων στερεών στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του δεύτερου πειραματικού κύκλου

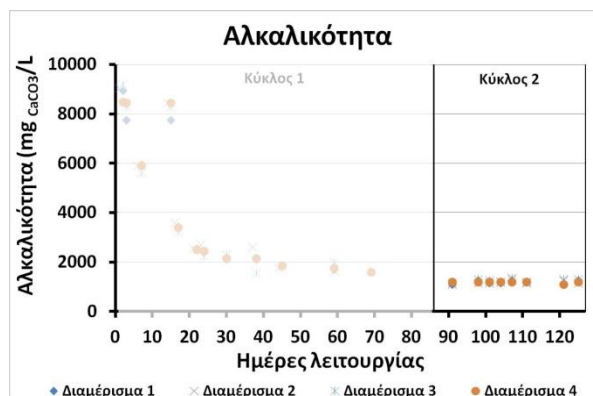


**Σχήμα 7.4.17** Συγκέντρωση πτητικών αιωρούμενων στερεών στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του δεύτερου πειραματικού κύκλου

Η πτωτική τάση του pH κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου λειτουργίας ανακόπηκε, χωρίς μάλιστα την προσθήκη ρυθμιστικού διαλύματος. Η μέση τιμή του pH κυμάνθηκε στο 6,8 και στα 4 διαμερίσματα του χωνευτήρα (Σχήμα 7.4.18) ενώ επίσης η αλκαλικότητα σταθεροποιήθηκε (Σχήμα 7.4.19), με μέση τιμή ίση με  $1166 \pm 74 mg_{CaCO_3}/L$  σε όλη τη διάρκεια του πειραματικού κύκλου.

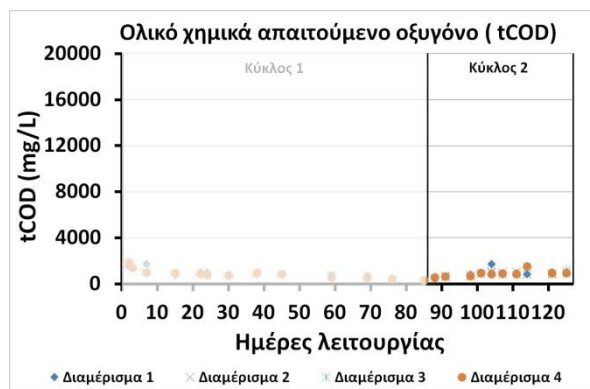


**Σχήμα 7.4.18** Διακύμανση του pH στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του δεύτερου πειραματικού κύκλου

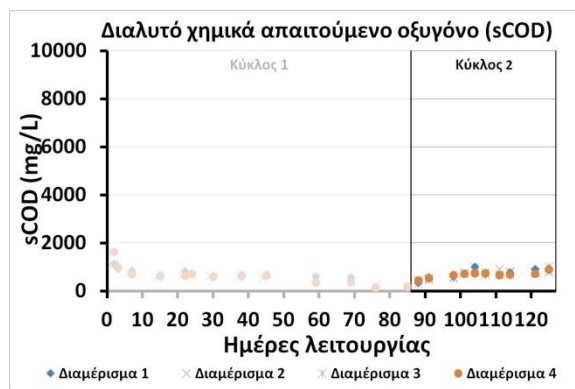


**Σχήμα 7.4.19** Διακύμανση της αλκαλικότητας στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του δεύτερου πειραματικού κύκλου

Ελαφρά ανοδική τάση παρουσίασε η συγκέντρωση του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου στο εσωτερικό του πιλότου. Το ολικό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο αυξήθηκε μεσοσταθμικά και κατά τη μόνιμη περιοδική λειτουργία σταθεροποιήθηκε γύρω από την τιμή  $1010 \pm 66 \text{ mg/L}$  (Σχήμα 7.4.20). Το διαλυτό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο, αντίστοιχα, κατά μέσο όρο αυξήθηκε και σταθεροποιήθηκε γύρω από την τιμή  $814 \pm 45 \text{ mg/L}$  (Σχήμα 7.4.21).

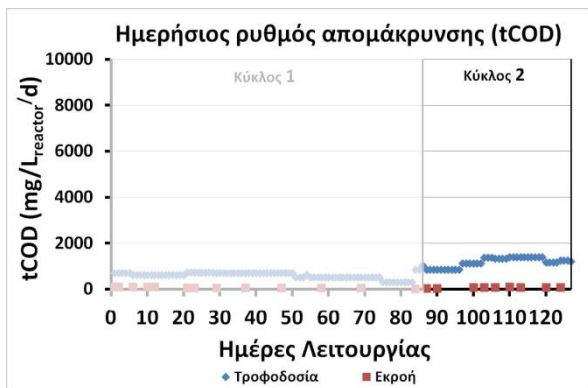


**Σχήμα 7.4.20** Ολικό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του δεύτερου πειραματικού κύκλου

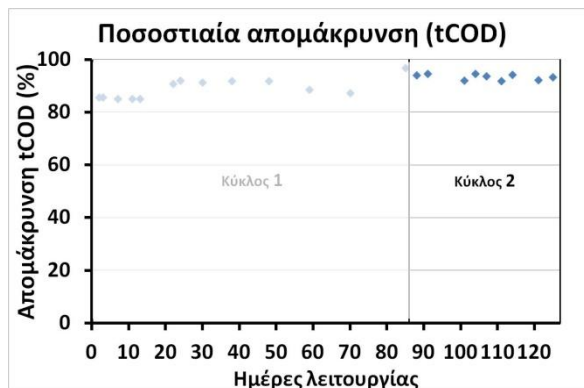


**Σχήμα 7.4.21** Διαλυτό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του δεύτερου πειραματικού κύκλου

Στο Σχήμα 7.4.22 παρουσιάζεται η σύγκριση του ρυθμού οργανικής φόρτισης με το οργανικό περιεχόμενο της εκροής. Το μέσο ολικό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο της εκροής ήταν  $0,79 \pm 0,2 \text{ g/L}$ . Η αύξηση του ρυθμού οργανικής φόρτισης συνοδεύτηκε από οριακή αύξηση της απόδοσης του συστήματος ως προς την απομάκρυνση οργανικού φορτίου με μέση απόδοση του συστήματος, της τάξης του 93,5% (Σχήμα 7.4.23).

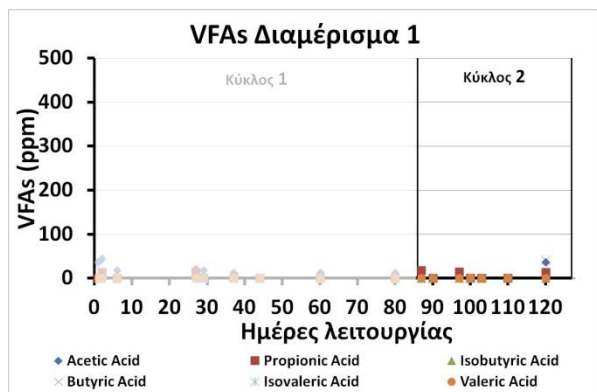


**Σχήμα 7.4.22** Σύγκριση ρυθμού οργανικής φόρτισης με το οργανικό περιεχόμενο της εκροής κατά τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου

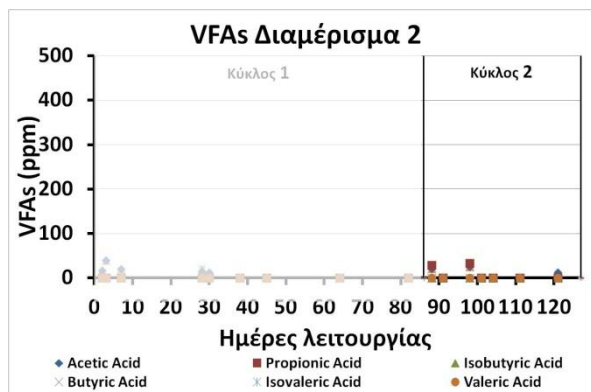


**Σχήμα 7.4.23** Απόδοση του PABR ως προς την απομάκρυνση οργανικού φορτίου κατά τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου

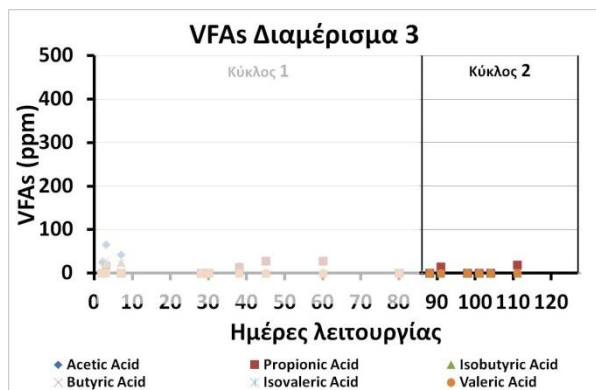
Παρά τη μείωση των διπλασιασμό της οργανικής φόρτισης, η συγκέντρωση των πτητικών λιπαρών οξέων παρέμεινε χαμηλή, με ουσιαστικά μηδενικές τιμές στην έξοδο του χωνευτήρα (Σχήματα 7.4.24-7.2.28). Το ενδιαμέσα προϊόντα της διεργασίας καταναλώνονται πλήρως, με αποτέλεσμα το σύστημα να δύναται να τροφοδοτηθεί μεγαλύτερους ρυθμούς οργανικής φόρτισης. Επίσης, η τροφοδοσία είναι ουσιαστικά απαλλαγμένη από στερεά, γεγονός που καθιστά τη χώνευση του αποβλήτου ευκολότερη από τη μικτή καλλιέργεια των μικροοργανισμών, λόγω της διευκόλυνσης του σταδίου της υδρόλυσης.



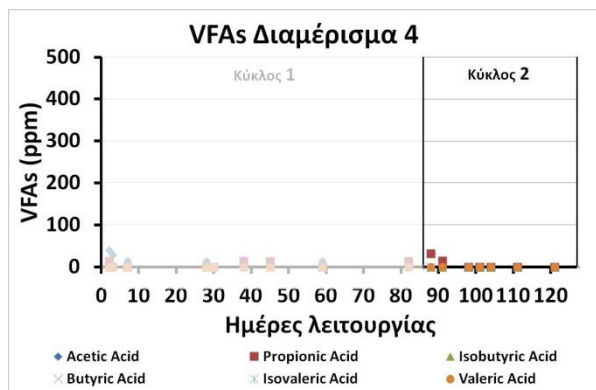
**Σχήμα 7.4.24** Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 1 κατά τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου



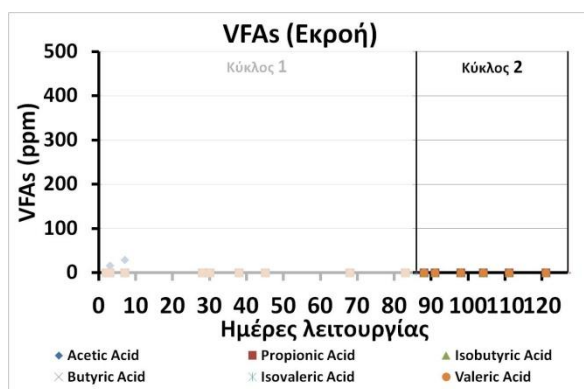
**Σχήμα 7.4.25** Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 2 κατά τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου



Σχήμα 7.4.26 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 3 κατά τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου



Σχήμα 7.4.27 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 4 κατά τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου



Σχήμα 7.4.28 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στην εκροή κατά τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου

Η αύξηση του ρυθμού οργανικής φόρτισης συνοδεύτηκε από αύξηση της ημερήσιας παραγωγής βιοαερίου (Σχήμα 7.4.29) σε 35,4L/d με το περιεχόμενο του μεθανίου να κυμαίνεται στην περιοχή 65-70%. Ο διπλασιασμός της ποσότητας του FORBI που υποβλήθηκε στο στάδιο διαχωρισμού στερεού-υγρού δεν οδήγησε σε ανάλογη αύξηση της συγκέντρωσης του ολικού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου του εκχυλίσματος (μειωμένη ανάκτηση οργανικού φορτίου). Η αιώρηση 20g FORBI ανά λίτρο νερού παρήγαγε εκχύλισμα με μέση συγκέντρωση 7,32g/L (Κύκλος 1) ενώ η αιώρηση 40g FORBI ανά λίτρο νερού παρήγαγε εκχύλισμα με μέση συγκέντρωση 11,7g/L (Κύκλος 2). Αποτέλεσμα της μειωμένης ανάκτησης οργανικού φορτίου στο εκχύλισμα ήταν η μειωμένη παραγωγικότητα του συστήματος σε βιοαέριο ανά μονάδα βάρους FORBI σε σχέση με τον πρώτο κύκλο λειτουργίας, με μέση τιμή τα 110L/kg<sub>FORBI</sub>.





Σχήμα 7.4.29 Ημερήσια παραγωγή βιοαερίου κατά τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου

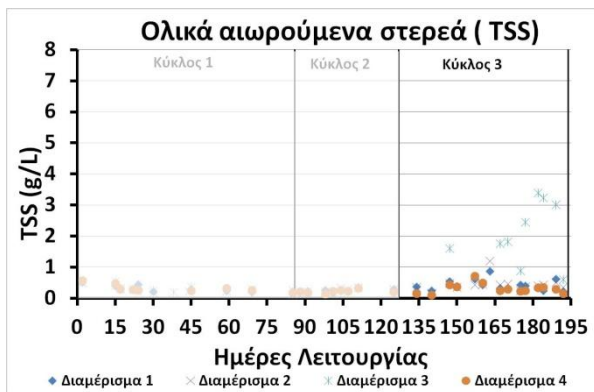


Σχήμα 7.4.30 Ημερήσια παραγωγικότητα βιοαερίου κατά τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου

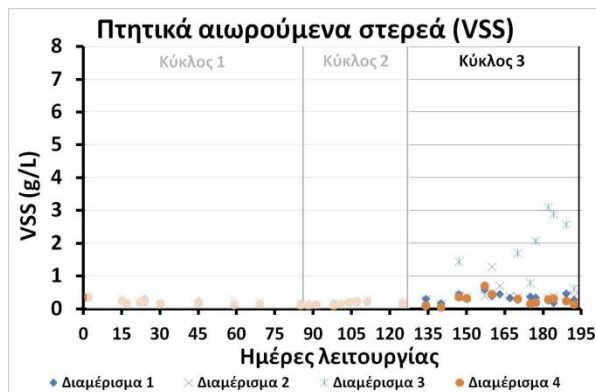
### 7.4.3 Κύκλος 3

Κατά τον τρίτο πειραματικό κύκλο (Κύκλος 3) επιχειρήθηκε η λειτουργία του συστήματος με τροφοδοσία από αιώρημα FORBI σε νερό ( $10g_{\text{FORBI}}/L$ ), χωρίς δηλαδή να πραγματοποιηθεί το στάδιο διαχωρισμού στερεού-υγρού. Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής ορίστηκε στις 8,7d και η περίοδος εναλλαγής παρέμεινε στις 2d, με μέσο tCOD της τροφοδοσίας ίσο με  $10,83g/L$  ( $OLR=1,24g_{\text{COD}}/L_{\text{reactor}}/d$ ). Η συνολική διάρκεια του τρίτου πειραματικού κύκλου ήταν ίση με 67 ημέρες.

Η τροφοδότηση του χωνευτήρα με αιώρημα FORBI συνετέλεσε όπως ήταν αναμενόμενο σε οριακή αύξηση της συγκέντρωσης των ολικών αιωρούμενων στερεών στα διαμερίσματα (Σχήμα 7.4.31). Η μέση συγκέντρωση των ολικών αιωρούμενων στερεών στα 3 από τα 4 διαμερίσματα του PABR ήταν  $0,4\pm 0,1g/L$ . Εξάιρεση αποτέλεσε το διαμέρισμα 3, όπου από τα μέσα του τρίτου πειραματικού κύκλου και ως σχεδόν το τέλος του, η συγκέντρωση των ολικών στερεών παρουσίασε ανοδική τάση ως περίπου τα  $3,3g/L$ . Όπως περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, οι βάνες δειγματοληψίας βρίσκονται περίπου στο μέσο του ύψους των διαμερισμάτων. Η φαινομενικά υψηλή συγκέντρωση ολικών στερεών στο διαμέρισμα 3 πιθανότατα οφείλεται σε οριακή αύξηση της στάθμης της αναερόβιας λάσπης με αποτέλεσμα αυτή να εισχωρεί στο δείγμα. Η εκτίμηση αυτή ενισχύεται και από το γεγονός ότι τα επίπεδα του διαλυτού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου δεν παρουσίασαν ανάλογη αύξηση στο διαμέρισμα (Σχήμα 7.4.36). Ανάλογη συμπεριφορά παρουσίασαν και τα πτητικά αιωρούμενα στερεά στο εσωτερικό του χωνευτήρα, με τη μέση τιμή τους να διαμορφώνεται στα  $0,35\pm 0,07g/L$  (Σχήμα 7.4.32).

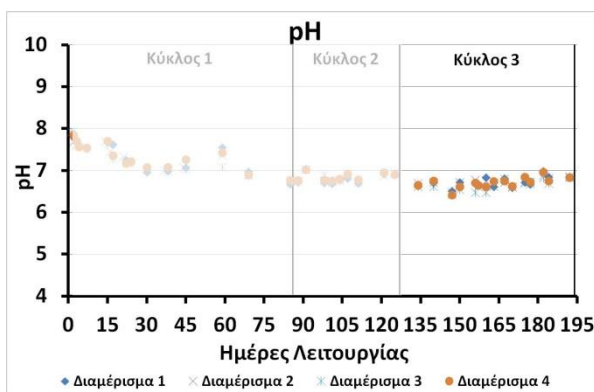


**Σχήμα 7.4.31** Συγκέντρωση ολικών αιωρούμενων στερεών στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τρίτου πειραματικού κύκλου

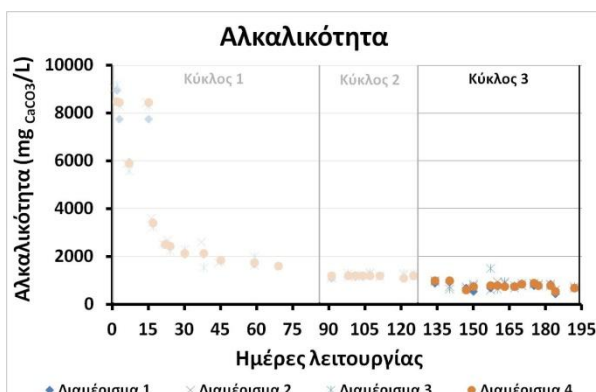


**Σχήμα 7.4.32** Συγκέντρωση πτητικών αιωρούμενων στερεών στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τρίτου πειραματικού κύκλου

Η καθοδική τάση του pH κατά τους πρώτους υδραυλικούς χρόνους παραμονής περιορίστηκε (Σχήμα 7.4.33) με στο τέλος του πειραματικού κύκλου 3 η μέση τιμή του στα 4 διαμερίσματα να μην παρουσιάζει ιδιαίτερη διαφοροποίηση σε σχέση με τις τιμές που έλαβε κατά τον πειραματικό κύκλο 2. Η αλκαλικότητα παρουσίασε επίσης οριακά πτωτική τάση με μέση τιμή  $795 \pm 45 \text{ mg}_{\text{CaCO}_3}/\text{L}$  (Σχήμα 7.4.34).



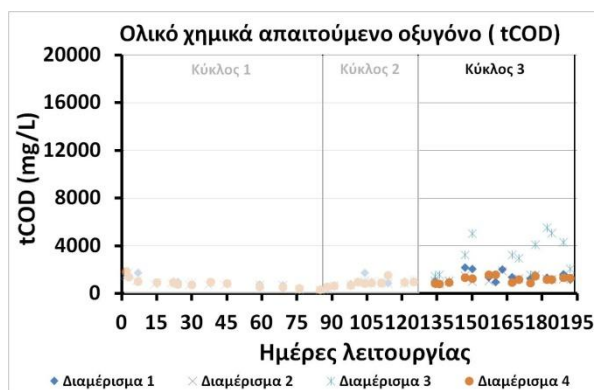
**Σχήμα 7.4.33** Διακύμανση του pH στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τρίτου πειραματικού κύκλου



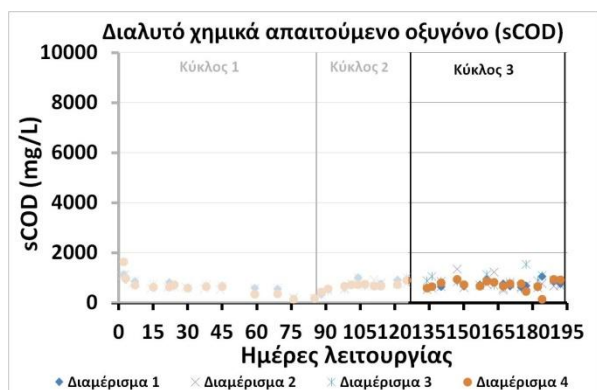
**Σχήμα 7.4.34** Διακύμανση της αλκαλικότητας στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τρίτου πειραματικού κύκλου

Η αύξηση της συγκέντρωσης της τροφοδοσίας σε στερεά, με διατήρηση όμως του ρυθμού οργανικής φόρτισης του συστήματος σε σχέση με τον Κύκλο 2, είχε ως αποτέλεσμα την οριακή αύξηση της μέσης συγκέντρωσης του ολικού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου στα 3 από τα 4 διαμερίσματα του αντιδραστήρα στην τιμή  $1,33 \pm 0,09 \text{ g/L}$ , η συγκέντρωση του tCOD στο διαμέρισμα 3 παρουσίασε ανοδική τάση (Σχήμα 7.4.35). Όπως προαναφέρθηκε, όμως, η συγκέντρωση του διαλυτού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (Σχήμα 7.4.36) κινήθηκε σταθεροποιητικά σε σχέση με τον Κύκλο 2 και με μικρές διακυμάνσεις ανάμεσα στα 4 διαμερίσματα του αντιδραστήρα (μέση τιμή  $0,79 \pm 0,09 \text{ g/L}$ ), γεγονός που ενισχύει την εκτίμηση ότι οι υψηλές τιμές του tCOD στο διαμέρισμα 3 οφείλονται στη

δειγματοληψία και όχι σε συσσώρευση ανεπεξέργαστου οργανικού φορτίου στο συγκεκριμένο διαμέρισμα.

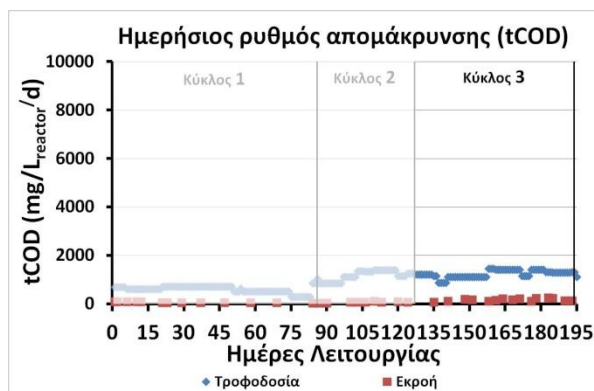


**Σχήμα 7.4.35** Ολικό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τρίτου πειραματικού κύκλου

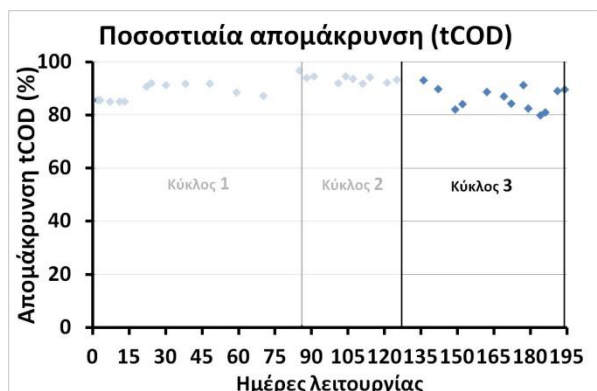


**Σχήμα 7.4.36** Διαλυτό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τρίτου πειραματικού κύκλου

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.4.37, η διατήρηση του ρυθμού οργανικής φόρτισης σε σχέση με τον Κύκλο 2 οδήγησε σε ελαφρά αυξημένες συγκεντρώσεις οργανικού φορτίου στην έξοδο του χωνευτήρα (μέση συγκέντρωση  $1,86 \pm 1,3 \text{g/L}$ ). Η αύξηση της συγκέντρωσης των στερεών της τροφοδοσίας είχε ως αποτέλεσμα μικρή μείωση της απόδοσης του συστήματος ως προς την απομάκρυνση οργανικού φορτίου, με τη μέση απόδοση να κυμαίνεται στην τιμή 86,4% (Σχήμα 7.4.38).

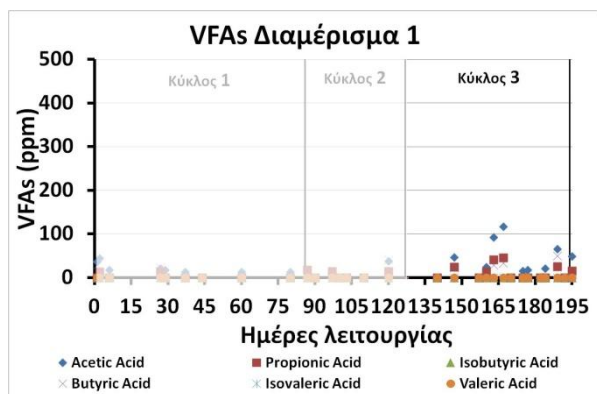


**Σχήμα 7.4.37** Σύγκριση ρυθμού οργανικής φόρτισης με το οργανικό περιεχόμενο της εκροής κατά τη διάρκεια του τρίτου κύκλου

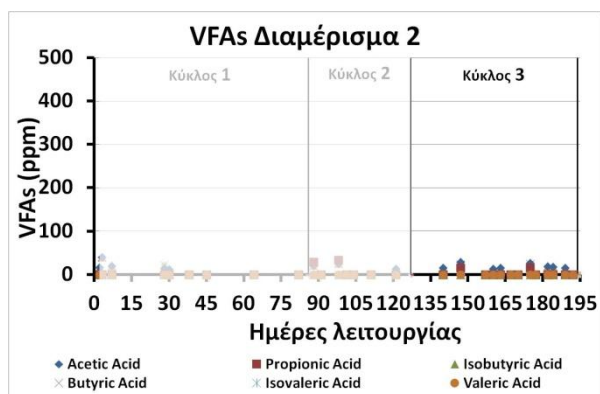


**Σχήμα 7.4.38** Απόδοση του PABR ως προς την απομάκρυνση οργανικού φορτίου κατά τη διάρκεια του τρίτου κύκλου

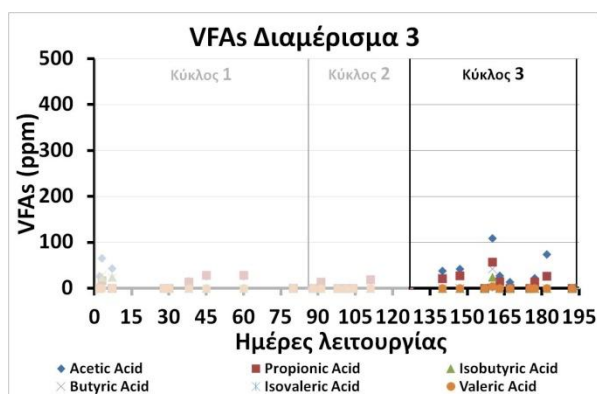
Αποτέλεσμα της αύξησης της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών κατά τον Κύκλο 3 ήταν η παροδική αύξηση της συγκέντρωσης των πηκτικών αιωρούμενων στερεών στο εσωτερικό των διαμερισμάτων (Σχήματα 7.4.39-7.4.43) και ειδικότερα του οξικού, του προπιονικού και του βουτυρικού οξέος, με τη συγκέντρωσή τους να διατηρείται χαμηλότερα από τα 50mg/L στη μεγαλύτερη διάρκεια του πειραματικού κύκλου.



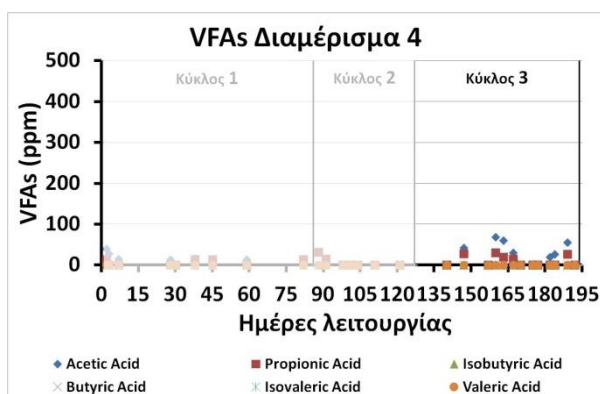
Σχήμα 7.4.39 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 1 κατά τη διάρκεια του τρίτου κύκλου



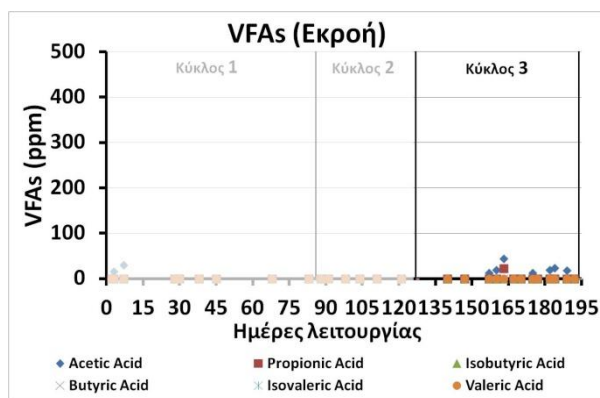
Σχήμα 7.4.40 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 2 κατά τη διάρκεια του τρίτου κύκλου



Σχήμα 7.4.41 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 3 κατά τη διάρκεια του τρίτου κύκλου



Σχήμα 7.4.42 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 4 κατά τη διάρκεια του τρίτου κύκλου



Σχήμα 7.4.43 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στην εκροή κατά τη διάρκεια του τρίτου κύκλου

Η μέση ημερήσια παραγωγή βιοαερίου παρουσίασε αύξηση σε σχέση με τον Κύκλο 2 και διαμορφώθηκε στα  $42,8 \pm 9 \text{ L/d}$  (Σχήμα 7.4.44) με μέση σύσταση σε μεθάνιο της τάξης του 65% σε όλο τον κύκλο λειτουργίας. Αντίστοιχα, η παραγωγικότητα του βιοαερίου ανά μονάδα ενεργού όγκου αντιδραστήρα κυμάνθηκε μεσοσταθμικά στην τιμή  $0,55 \pm 0,11 \text{ L/L}_v/\text{d}$  (Σχήμα 7.4.45). Η παράκαμψη του

σταδίου διαχωρισμού στερεών-υγρών στην τροφοδοσία, οδήγησε σε κατακόρυφη αύξηση της παραγωγικότητας του βιοαερίου ανά μονάδα μάζας FORBI. Η μέση παραγωγικότητα ανά μονάδα μάζας διαμορφώθηκε στα  $484\text{L}/\text{kg}_{\text{FORBI}}$ , τιμή 4,5 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη παραγωγικότητα του Κύκλου 2, με σχεδόν ίδιο ρυθμό οργανικής φόρτισης αλλά με τροφοδοσία εκχύλισμα του αποβλήτου.



Σχήμα 7.4.44 Ημερήσια παραγωγή βιοαερίου κατά τη διάρκεια του τρίτου κύκλου



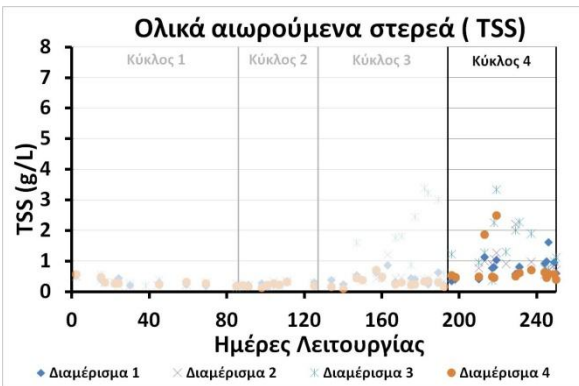
Σχήμα 7.4.45 Ημερήσια παραγωγικότητα βιοαερίου κατά τη διάρκεια του τρίτου κύκλου

#### 7.4.4 Κύκλος 4

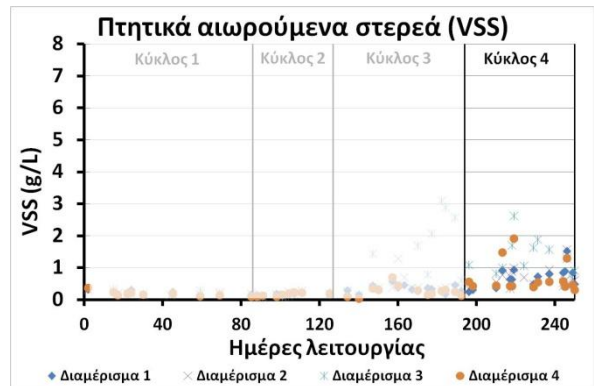
Η ραγδαία αύξηση της παραγωγικότητας κατά τον πειραματικό Κύκλο 3 υποδεικνύει τη δυνατότητα του αντιδραστήρα να αξιοποιήσει με μεγάλη αποτελεσματικότητα το υλικό ως υδατικό αιώρημα, αποφεύγοντας έτσι την απώλεια οργανικού φορτίου κατά το στάδιο διαχωρισμού. Οι χαμηλές συγκεντρώσεις VFAs σε συνδυασμό με την υψηλή απόδοση ως προς την απομάκρυνση οργανικού φορτίου αποτελούν ένδειξη για τη δυνατότητα του συστήματος να υποδεχθεί και να επεξεργαστεί το υλικό υπό ακόμα μεγαλύτερους ρυθμούς οργανικής φόρτισης.

Για το λόγο αυτό, κατά τον πειραματικό Κύκλο 4, ο ρυθμός οργανικής φόρτισης αυξήθηκε μέσω της περαιτέρω μείωσης του υδραυλικού χρόνου παραμονής στις 5d διατηρώντας σταθερό το οργανικό περιεχόμενο της τροφοδοσίας ( $10,7\text{g}/\text{L}$ ), λαμβάνοντας την τιμή  $2,14\text{g}/\text{L}_{\text{reactor}}/\text{d}$ . Η διάρκεια του τέταρτου πειραματικού κύκλου ήταν 56 ημέρες.

Η απότομη αύξηση της οργανικής φόρτισης του συστήματος (και συνεπώς η αύξηση του ρυθμού τροφοδότησης του αντιδραστήρα σε αιωρούμενα στερεά) συνετέλεσε αναμενόμενα σε αύξηση της συγκέντρωσης των ολικών αιωρούμενων στερεών στο εσωτερικό των διαμερισμάτων (Σχήμα 7.4.46). Η τάση συσσώρευσης των στερεών στα διαμερίσματα περιορίστηκε μετά από τα μέσα του πειραματικού κύκλου (όπου οι τιμές τους προσέγγισαν τα  $2,5\text{g}/\text{L}$  με  $3\text{g}/\text{L}$ ) με αποτέλεσμα κατά τη μόνιμη περιοδική λειτουργία να κυμαίνονται οριακά χαμηλότερα από το  $1\text{g}/\text{L}$ . Η μέση τιμή της συγκέντρωσης των ολικών αιωρούμενων στερεών στα 4 διαμερίσματα του αντιδραστήρα σε όλη τη διάρκεια του πειραματικού κύκλου ήταν  $0,97\pm 0,5\text{g}/\text{L}$ . Η κατακράτηση στερεών στο εσωτερικό του χωνευτήρα φαίνεται να αντισταθμίζεται από τους υψηλούς ρυθμούς αποδόμησης που επιτυγχάνονται, με αποτέλεσμα να αποφεύγονται οι σωρευτικές τάσεις, παρά τον εξαιρετικά χαμηλό υδραυλικό χρόνο παραμονής. Αντίστοιχη συμπεριφορά ακολούθησαν και τα πτητικά αιωρούμενα στερεά, με τη μέση τιμή τους να διαμορφώνεται στα  $0,83\pm 0,4\text{g}/\text{L}$  (Σχήμα 7.4.47).

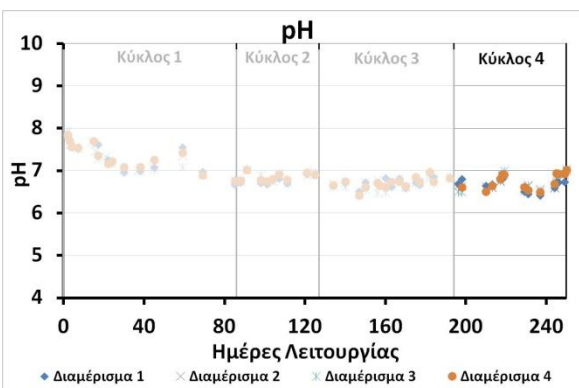


**Σχήμα 7.4.46** Συγκέντρωση ολικών αιωρούμενων στερεών στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τέταρτου πειραματικού κύκλου

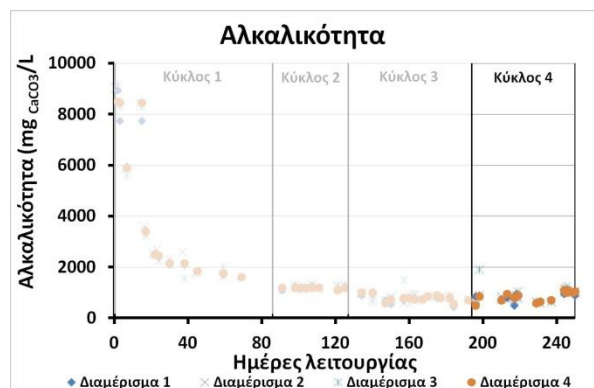


**Σχήμα 7.4.47** Συγκέντρωση πτητικών αιωρούμενων στερεών στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τέταρτου πειραματικού κύκλου

Η συμπεριφορά του pH (Σχήμα 7.4.48) και της αλκαλικότητας (Σχήμα 7.4.49) δεν παρουσίασε ιδιαίτερες διακυμάνσεις παρά το διπλασιασμό της οργανικής φόρτισης του συστήματος. Οι τιμές του pH εμφάνισαν μια ελαφρά περιοδική τάση, κυμαινόμενες στην περιοχή 6,8 έως 7 σε όλη τη διάρκεια του κύκλου 4 στα 4 διαμερίσματα του αντιδραστήρα. Παρά της χαμηλές τιμές της αλκαλικότητας (μέση τιμή  $856 \pm 190 \text{ mg}_{\text{CaCO}_3}/\text{L}$ ), το pH διατηρήθηκε στη βέλτιστη περιοχή για τη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης. Η αλκαλικότητα παρουσίασε μια ελαφρά αυξητική τάση, προσεγγίζοντας την περιοχή  $1000 \text{ mg}_{\text{CaCO}_3}/\text{L} - 1100 \text{ mg}_{\text{CaCO}_3}/\text{L}$  κατά τις τελευταίες ημέρες λειτουργίας του πειραματικού κύκλου.



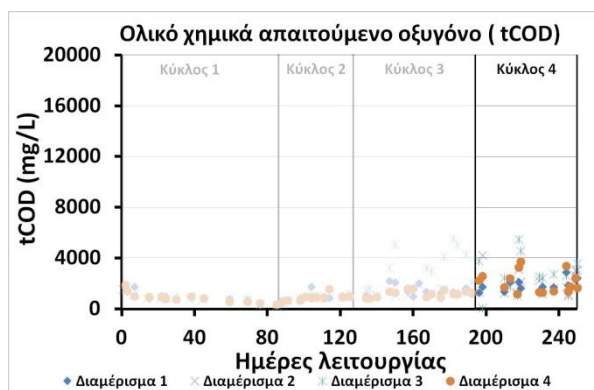
**Σχήμα 7.4.48** Διακύμανση του pH στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τέταρτου πειραματικού κύκλου



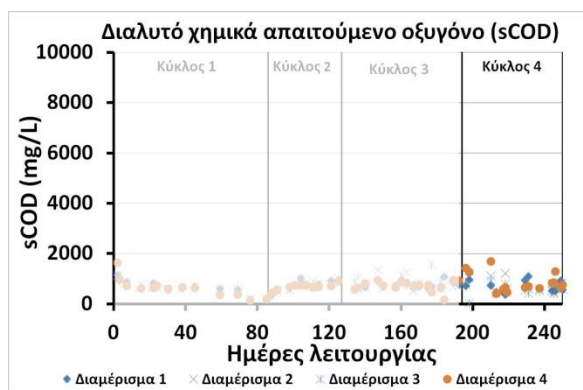
**Σχήμα 7.4.49** Διακύμανση της αλκαλικότητας στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τέταρτου πειραματικού κύκλου

Τα επίπεδα του ολικού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου είχαν ανοδική τάση μετά από την αύξηση του ρυθμού οργανικής φόρτισης (Σχήμα 7.4.50). Η μέση συγκέντρωση του tCOD στα 4 διαμερίσματα του αντιδραστήρα ήταν  $2,16 \pm 0,9 \text{ g/L}$  για όλη τη διάρκεια του τέταρτου πειραματικού κύκλου. Η διακύμανση των τιμών του tCOD κατά τους πρώτους χρόνους παραμονής ήταν σχετικά υψηλή, ωστόσο μειώθηκε κατά την μόνιμη περιοδική κατάσταση, όπου οι τιμές κυμάνθηκαν στην περιοχή  $1 \text{ g/L}$  έως  $3 \text{ g/L}$ . Οι τιμές του διαλυτού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (Σχήμα 7.4.51) παρουσίασαν σταθεροποιητική τάση κατά τον Κύκλο 4 σε σχέση με τα επίπεδα στα οποία κινήθηκαν κατά τον Κύκλο 3, παρά την απότομη

αύξηση του ρυθμού οργανικής φόρτισης. Στα διαμερίσματα του χωνευτήρα παρά τις περιορισμένες διακυμάνσεις, η μέση τιμή του sCOD διαμορφώθηκε κατά μέσο όρο στα  $0,70 \pm 0,3 \text{g/L}$ .

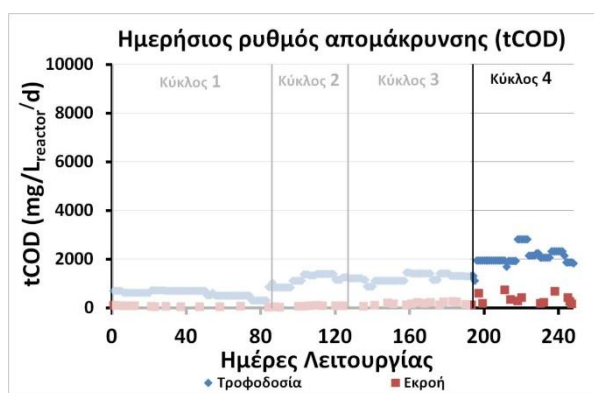


**Σχήμα 7.4.50** Ολικό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τέταρτου πειραματικού κύκλου

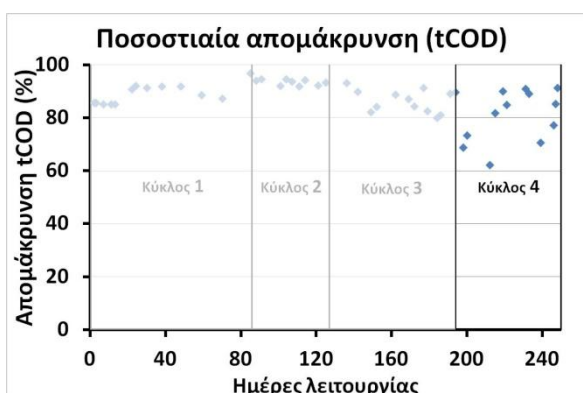


**Σχήμα 7.4.51** Διαλυτό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τέταρτου πειραματικού κύκλου

Αντίστοιχες διακυμάνσεις με αυτές που παρατηρήθηκαν στις συγκεντρώσεις του ολικού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου στα διαμερίσματα του αντιδραστήρα παρουσίασε και η εκροή του συστήματος. Η μείωση του χρόνου παραμονής είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση της μέσης ποσοστιαίας απόδοσης σε απομάκρυνση οργανικού φορτίου στο 80,5% (Σχήμα 7.4.53).



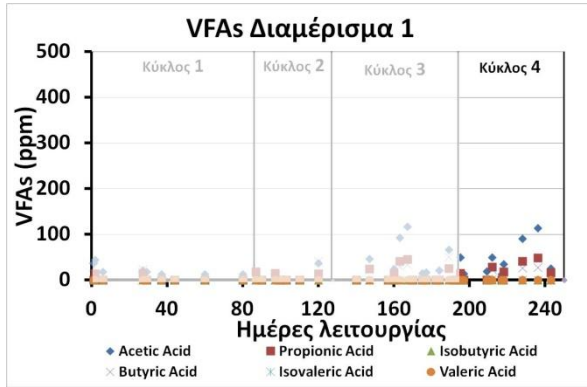
**Σχήμα 7.4.52** Σύγκριση ρυθμού οργανικής φόρτισης με το οργανικό περιεχόμενο της εκροής κατά τη διάρκεια του τέταρτου κύκλου



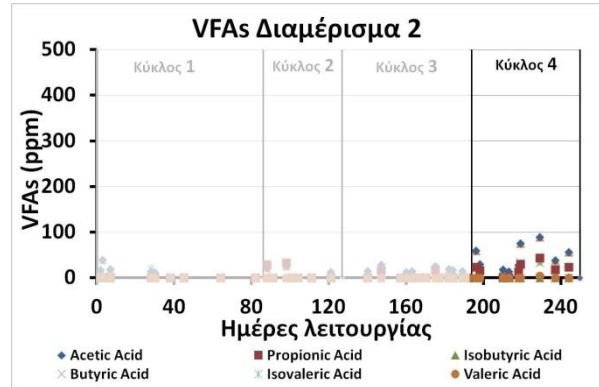
**Σχήμα 7.4.53** Απόδοση του PABR ως προς την απομάκρυνση οργανικού φορτίου κατά τη διάρκεια του τέταρτου κύκλου

Η σχετική μείωση της απόδοσης του συστήματος συνοδεύτηκε από μικρή αύξηση της μέσης συγκέντρωσης των πτητικών λιπαρών οξέων στα διαμερίσματα του αντιδραστήρα (Σχήματα 7.4.54-7.4.58). Πιο συγκεκριμένα, η μέση συγκέντρωση του οξικού, του προπιονικού και του βουτυρικού οξέος ήταν  $59,81 \pm 42,7 \text{mg/L}$ ,  $23,37 \pm 19,9 \text{mg/L}$  και  $13,55 \pm 20,3 \text{mg/L}$  αντίστοιχα, ενώ οι τιμές των μακράς αλυσίδας πτητικών λιπαρών οξέων κινήθηκαν ως επί το πλείστον χαμηλότερα από τα όρια ανίχνευσης. Παρά τον εξαιρετικά χαμηλό χρόνο παραμονής, το σύστημα ανταποκρίθηκε με σταθερότητα και ήταν ικανό να καταναλώνει τα ενδιάμεσα προϊόντα της οξεογένεσης και της οξικογένεσης. Αξίζει επίσης να σημειωθεί, ότι οι μέσες τιμές του οξικού και του προπιονικού οξέος στην εκροή του χωνευτήρα (Σχήμα

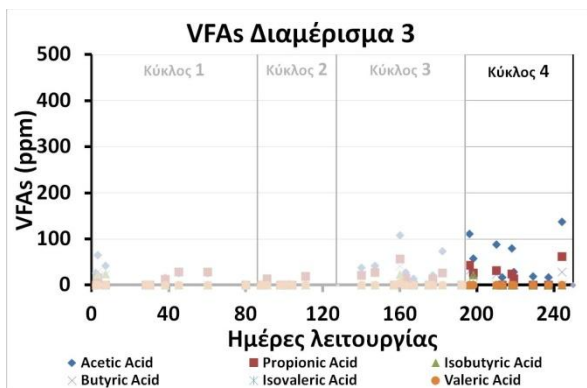
7.4.58) ήταν αισθητά χαμηλότερες από αυτές των διαμερισμάτων και διαμορφώθηκαν στα  $37,51 \pm 28,2 \text{ mg/L}$  και  $14,32 \pm 13,4 \text{ mg/L}$  αντίστοιχα, ενώ οι συγκεντρώσεις του βουτυρικού, ισοβουτυρικού, ισοβαλερικού και βαλερικού οξέος ήταν χαμηλότερες από τα όρια ανίχνευσης της μεθόδου σε όλη τη διάρκεια του πειραματικού κύκλου.



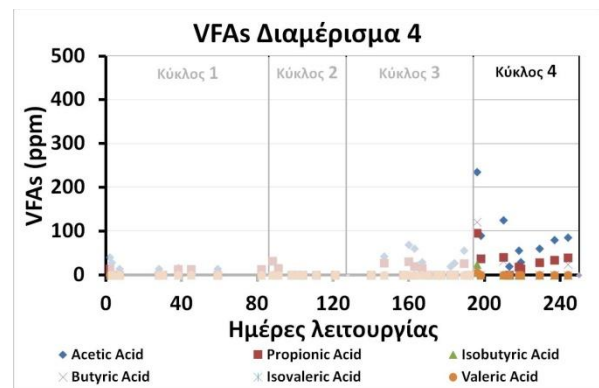
**Σχήμα 7.4.54** Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 1 κατά τη διάρκεια του τέταρτου κύκλου



**Σχήμα 7.4.55** Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 2 κατά τη διάρκεια του τέταρτου κύκλου

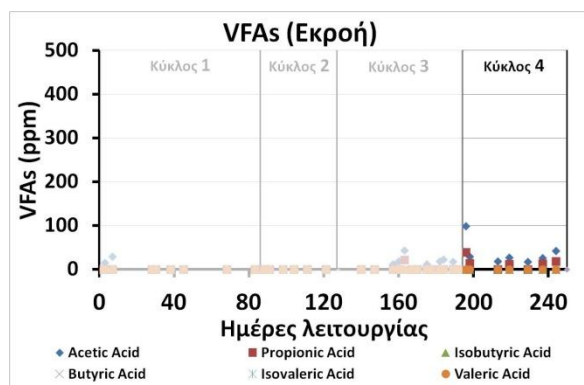


**Σχήμα 7.4.56** Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 3 κατά τη διάρκεια του τέταρτου κύκλου



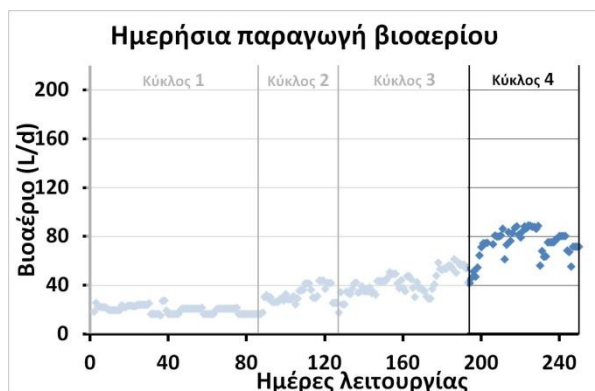
**Σχήμα 7.4.57** Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 3 κατά τη διάρκεια του τέταρτου κύκλου



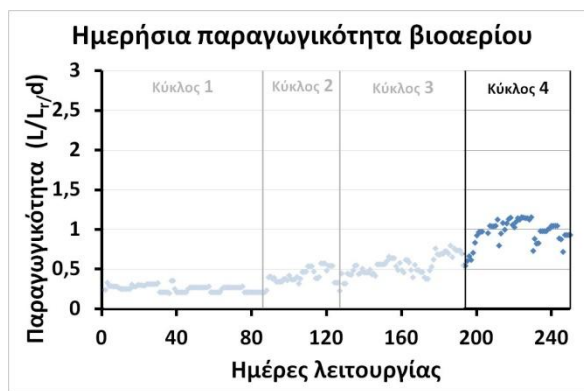


**Σχήμα 7.4.58** Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στην εκροή κατά τη διάρκεια του τέταρτου κύκλου

Η παραγωγή βιοαερίου αυξήθηκε αναλογικά με την αύξηση του ρυθμού οργανικής φόρτισης από τον Κύκλο 3 στον Κύκλο 4. Η μέση ημερήσια παραγωγή βιοαερίου (Σχήμα 7.4.59) διαμορφώθηκε στα  $75,5 \pm 10,4 \text{ L/d}$ , έτσι η παραγωγικότητα (Σχήμα 7.4.60) κυμάνθηκε στα  $0,98 \pm 0,13 \text{ L/L}_r/\text{d}$  σε όλη τη διάρκεια του πειραματικού Κύκλου 4. Η μέση ποσοστιαία σύσταση του βιοαερίου σε μεθάνιο κυμάνθηκε στην περιοχή 65-70%. Τέλος, η παραγωγικότητα βιοαερίου ανά μονάδα βάρους του υλικού διαμορφώθηκε στα  $500 \text{ L/kg}_{\text{FORBI}}$ , παρουσιάζοντας οριακή αύξηση σε σχέση με τον Κύκλο 3. Η σχεδόν αναλογική αύξηση της παραγωγικότητας του αερίου με την αύξηση της οργανικής φόρτισης, επιβεβαιώνει τη δυνατότητα του αντιδραστήρα να επεξεργαστεί το αιώρημα του FORBI σε ιδιαίτερα χαμηλό χρόνο παραμονής (5d) και -σε συνδυασμό με τις χαμηλές τιμές των πτητικών λιπαρών οξέων στα διαμερίσματα και την εκροή του και τη σταθερότητα στο ποσοστό του μεθανίου- αποτελεί ένδειξη ότι το σύστημα είναι ικανό να υποδεχτεί μεγαλύτερες οργανικές φορτίσεις.



**Σχήμα 7.4.59** Ημερήσια παραγωγή βιοαερίου κατά τη διάρκεια του τέταρτου κύκλου



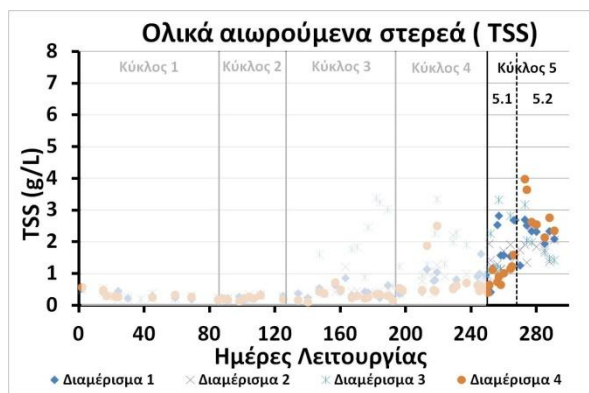
**Σχήμα 7.4.60** Ημερήσια παραγωγικότητα βιοαερίου κατά τη διάρκεια του τέταρτου κύκλου

### 7.4.5 Κύκλος 5

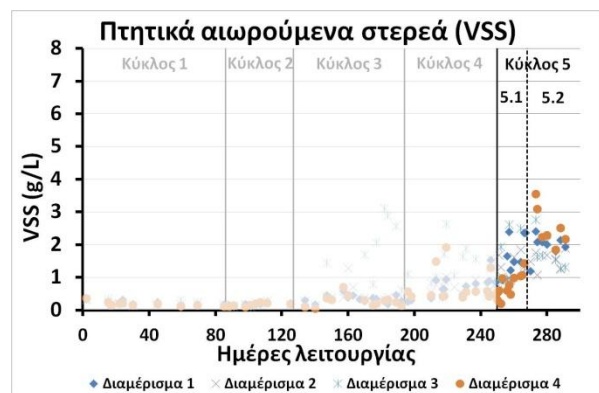
Κατά τον πέμπτο κύκλο λειτουργίας, επιβλήθηκε απότομη αύξηση του ρυθμού οργανικής φόρτισης στα  $4,53 \text{ g/L}_{\text{reactor}}/\text{d}$  μέσω του διπλασιασμού του οργανικού περιεχομένου της τροφοδοσίας (αιώρηση  $20 \text{ g}_{\text{FORBI}}/\text{L}$ ). Ο πέμπτος πειραματικός κύκλος είχε συνολική διάρκεια ίση με 41d και πραγματοποιήθηκε σε 2 επιμέρους στάδια, κατά τα οποία εξετάστηκε η επίδραση της μεταβολής της περιόδου εναλλαγής του διαμερίσματος τροφοδοσίας στη συνολική λειτουργία του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα:

- Κατά το στάδιο 5.1, η περίοδος εναλλαγής παρέμεινε στις T=2d (συνολική διάρκεια 18d)
- Κατά το στάδιο 5.2, η περίοδος εναλλαγής ορίστηκε σε T=1d (συνολική διάρκεια 23d)

Η συγκέντρωση των ολικών αιωρούμενων στερεών παρουσίασε τάση αύξησης κατά τον πέμπτο κύκλο λειτουργίας στο εσωτερικό των διαμερισμάτων του χωνευτήρα. Η αυξητική τάση ανακόπηκε κατά τις πρώτες ημέρες λειτουργίας του σταδίου 5.2 (Σχήμα 7.4.61) μετά από τη μεταβολή της περιόδου εναλλαγής σε 1d. Παρά το χαμηλό χρόνο παραμονής και το γεγονός ότι η τροφοδοσία περιείχε ολικά αιωρούμενα στερεά της τάξης των 20g/L, κατά τη μόνιμη περιοδική λειτουργία στο τέλος του σταδίου 5.2 η συγκέντρωση σταθεροποιήθηκε στην περιοχή 1,5-2,5g/L χωρίς περαιτέρω τάσεις συσσώρευσης. Ανάλογη συμπεριφορά επέδειξε και η συγκέντρωση των πτητικών αιωρούμενων στερεών, που σταθεροποιήθηκε στην περιοχή 1,2-2,4g/L (Σχήμα 7.4.62) κατά τους τελευταίους χρόνους παραμονής του πειραματικού κύκλου.

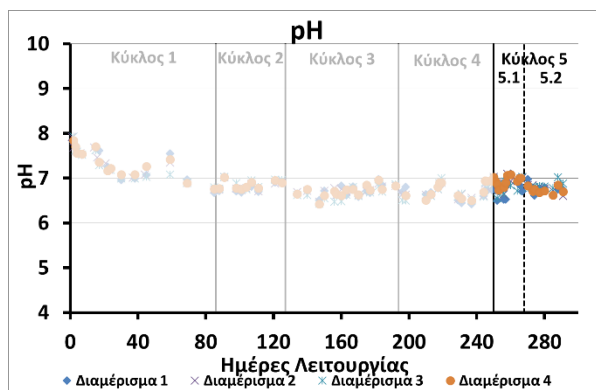


**Σχήμα 7.4.61** Συγκέντρωση ολικών αιωρούμενων στερεών στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του πέμπτου πειραματικού κύκλου

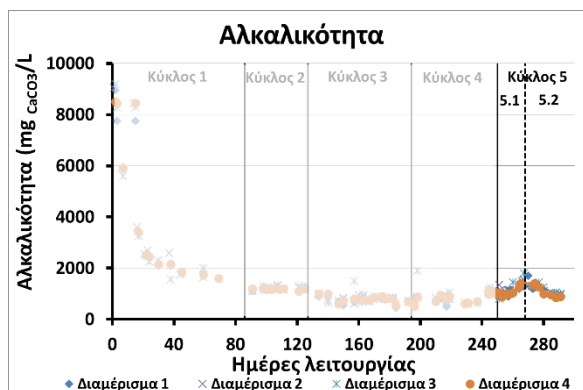


**Σχήμα 7.4.62** Συγκέντρωση πτητικών αιωρούμενων στερεών στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του πέμπτου πειραματικού κύκλου

Το pH παρουσίασε περιοδικές διακυμάνσεις εντός της περιοχής 6,6 έως 7 σε όλη τη διάρκεια του πειραματικού κύκλου (Σχήμα 7.4.63). Η αλκαλικότητα, παρά την προσωρινή αύξηση ως την περιοχή 1550-1800mg<sub>CaCO3</sub>/L κατά τις τελευταίες ημέρες του σταδίου 5.1, ύστερα από τη μεταβολή της T επανήλθε ουσιαστικά στα επίπεδα που κυμάνθηκε κατά τους προηγούμενους πειραματικούς κύκλους λειτουργίας, με μέση τιμή τα 988±80mg<sub>CaCO3</sub>/L. Σε όλους τους πειραματικούς κύκλους και ανεξαρτήτως υδραυλικής και οργανικής φόρτισης και περιόδου εναλλαγής, το σύστημα συμπεριφέρθηκε με σταθερότητα ως προς τις παραμέτρους του pH και της αλκαλικότητας χωρίς την προσθήκη ρυθμιστικών διαλυμάτων.

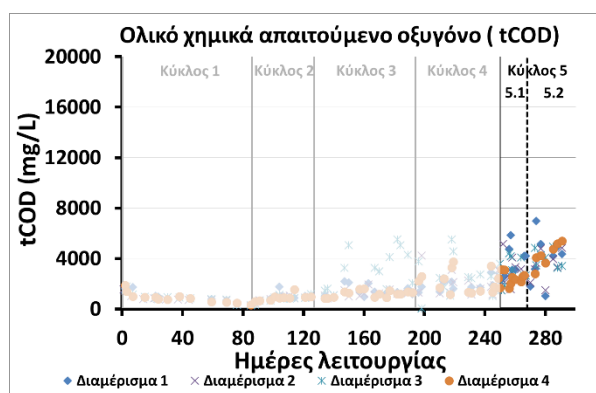


**Σχήμα 7.4.63** Διακύμανση του pH στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του πέμπτου πειραματικού κύκλου

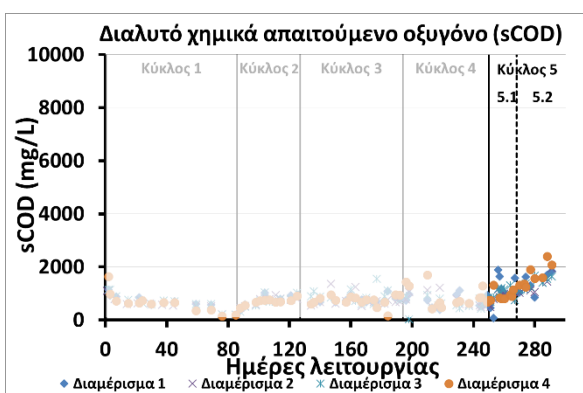


**Σχήμα 7.4.64** Διακύμανση της αλκαλικότητας στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του πέμπτου πειραματικού κύκλου

Η αύξηση της οργανικής φόρτισης στο σύστημα είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση των συγκεντρώσεων του ολικού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου στα διαμερίσματα του αντιδραστήρα (Σχήμα 7.4.65). Η μεταβολή της περιόδου εναλλαγής των διαμερισμάτων μετά από 18 ημέρες λειτουργίας δεν είχε σημαντική επίδραση στις συγκεντρώσεις του tCOD, που ωστόσο σταθεροποιήθηκαν στα επίπεδα των  $4,37 \pm 0,6 \text{ g/L}$  κατά μέσο όρο στους τελευταίους χρόνους παραμονής του πειραματικού κύκλου. Το διαλυτό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (Σχήμα 7.4.66) παρουσίασε όμοια συμπεριφορά με τη μέση τιμή του να διαμορφώνεται στα  $1,71 \pm 0,25 \text{ g/L}$ .



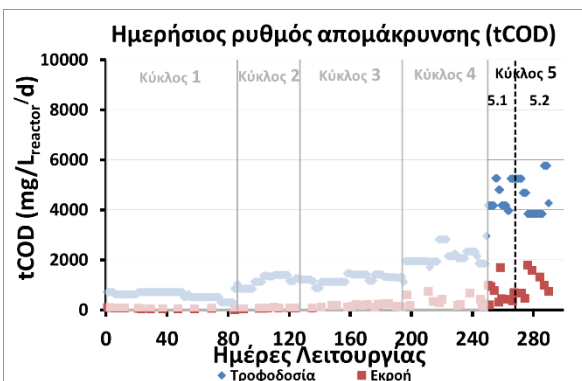
**Σχήμα 7.4.65** Ολικό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του πέμπτου πειραματικού κύκλου



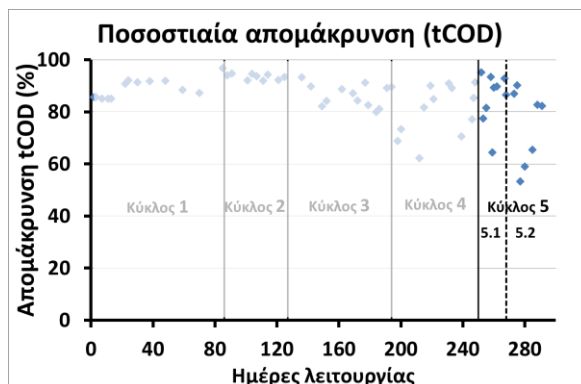
**Σχήμα 7.4.66** Διαλυτό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του πέμπτου πειραματικού κύκλου

Ο διπλασιασμός της οργανικής φόρτισης συνετέλεσε και σε αύξηση του οργανικού περιεχομένου της εκροής του χωνευτήρα (Σχήμα 7.4.67). Κατά τις τελευταίες ημέρες λειτουργίας του σταδίου 5.1 η μέση συγκέντρωση tCOD της εκροής διαμορφώθηκε στα  $2,44 \pm 0,73 \text{ g/L}$ . Την αλλαγή της περιόδου εναλλαγής του διαμερίσματος τροφοδοσίας ακολούθησε προσωρινή αύξηση στα επίπεδα του ολικού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου, το οποίο ωστόσο παρουσίασε τάση επαναφοράς στα πρότερα επίπεδα κατά τις τελευταίες ημέρες λειτουργίας του σταδίου 5.2. Η αύξηση του ρυθμού οργανικής φόρτισης είχε

επίσης ως αποτέλεσμα την περιορισμένη μείωση της απόδοσης του συστήματος ως προς την απομάκρυνση οργανικού φορτίου, που κυμάνθηκε στα 80,6% (Σχήμα 7.4.68).

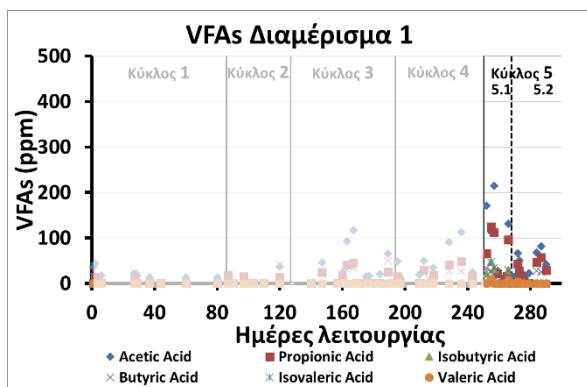


Σχήμα 7.4.67 Σύγκριση ρυθμού οργανικής φόρτισης με το οργανικό περιεχόμενο της εκροής κατά τη διάρκεια του πέμπτου κύκλου

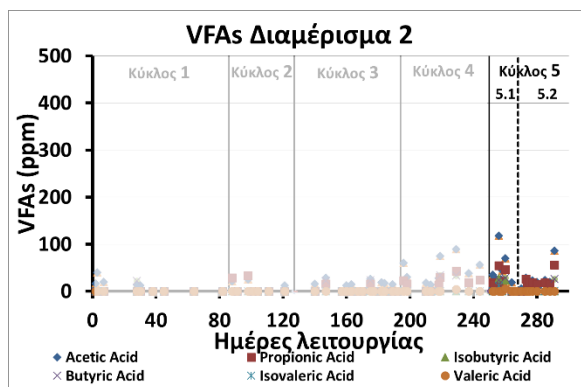


Σχήμα 7.4.68 Απόδοση του PABR ως προς την απομάκρυνση οργανικού φορτίου κατά τη διάρκεια του πέμπτου κύκλου

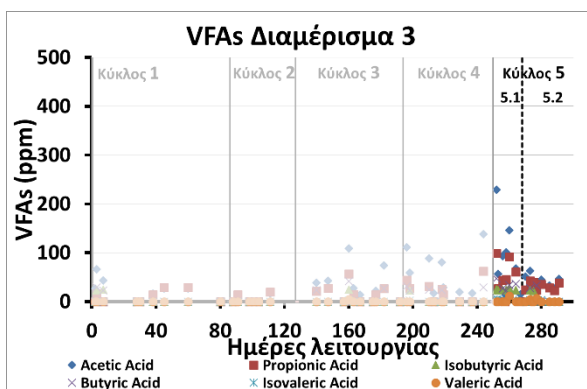
Το σύστημα παρουσίασε ενδείξεις κινητικού περιορισμού ύστερα από την αύξηση του ρυθμού οργανικής φόρτισης κατά το στάδιο 5.1. Τα επίπεδα των πτητικών λιπαρών οξέων αυξήθηκαν στο εσωτερικό των διαμερισμάτων του χωνευτήρα, με τη συγκέντρωση του οξικού, του προπιονικού, του ισοβουτυρικού και του βουτυρικού οξέος να είναι  $61,92 \pm 53,2 \text{ mg/L}$ ,  $36,94 \pm 35,54 \text{ mg/L}$ ,  $11,01 \pm 13,18 \text{ mg/L}$  και  $12,7 \pm 15,24 \text{ mg/L}$  αντίστοιχα (Σχήματα 7.4.69-7.4.73). Η μείωση της περιόδου εναλλαγής σε 1d είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση των συγκεντρώσεων των VFAs στα διαμερίσματα, επιβεβαιώνοντας τα ευρήματα των Skiadas, Gavala και Lyberatos [48], όπου είχε προβλεφθεί από το μαθηματικό μοντέλο ανάλογη συμπεριφορά. Πιο συγκεκριμένα, μετά από τη μείωση του T (στάδιο 5.2), η μέση συγκεντρώσεις του οξικού, του προπιονικού, του ισοβουτυρικού και του βουτυρικού οξέος διαμορφώθηκαν στα  $46,32 \pm 21,2 \text{ mg/L}$ ,  $32,3 \pm 13,37 \text{ mg/L}$ ,  $3,72 \pm 5,41 \text{ mg/L}$  και  $10,44 \pm 12,45 \text{ mg/L}$  αντίστοιχα. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι οι απόλυτες τιμές των συγκεντρώσεων σε όλη τη διάρκεια του πέμπτου πειραματικού κύκλου ήταν σχετικά χαμηλές, επιβεβαιώνοντας τη δυνατότητα του συστήματος να καταναλώνει αποτελεσματικά τα ενδιάμεσα προϊόντα της διεργασίας παρά τους εξαιρετικά χαμηλούς χρόνους παραμονής.



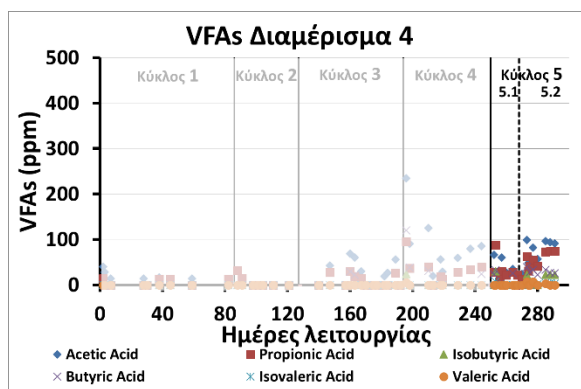
Σχήμα 7.4.69 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 1 κατά τη διάρκεια του πέμπτου κύκλου



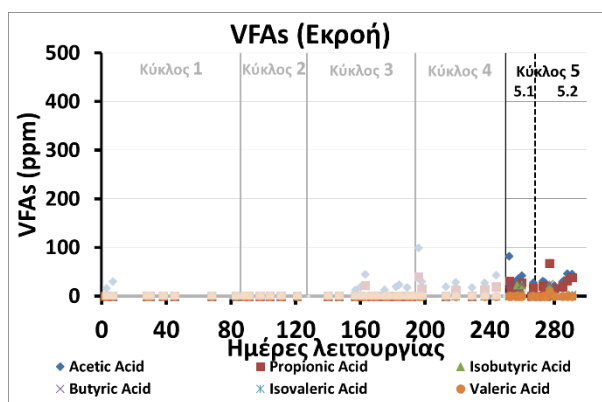
Σχήμα 7.4.70 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 2 κατά τη διάρκεια του πέμπτου κύκλου



Σχήμα 7.4.71 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 3 κατά τη διάρκεια του πέμπτου κύκλου



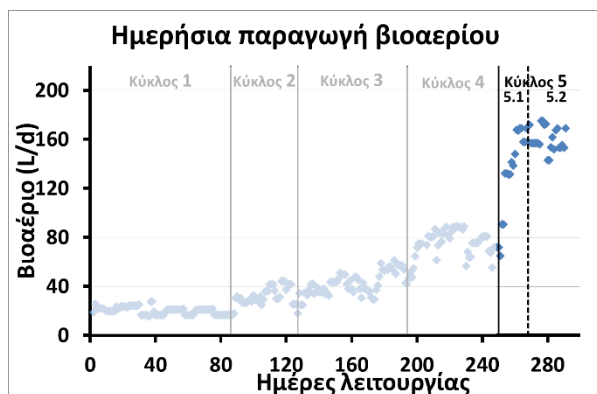
Σχήμα 7.4.72 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 4 κατά τη διάρκεια του πέμπτου κύκλου



Σχήμα 7.4.73 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στην εκροή κατά τη διάρκεια του πέμπτου κύκλου

Η ημερήσια παραγωγή βιοαερίου αυξήθηκε αναλογικά με την αύξηση του ρυθμού οργανικής φόρτισης (Σχήμα 7.4.74) και κατά τις τελευταίες ημέρες λειτουργίας του σταδίου 5.1 ήταν κατά μέσο όρο ίση με  $163,6 \pm 7,7 \text{ L/d}$  ενώ ύστερα από την αλλαγή του T (στάδιο 5.2) δεν παρατηρήθηκε σημαντική μεταβολή,

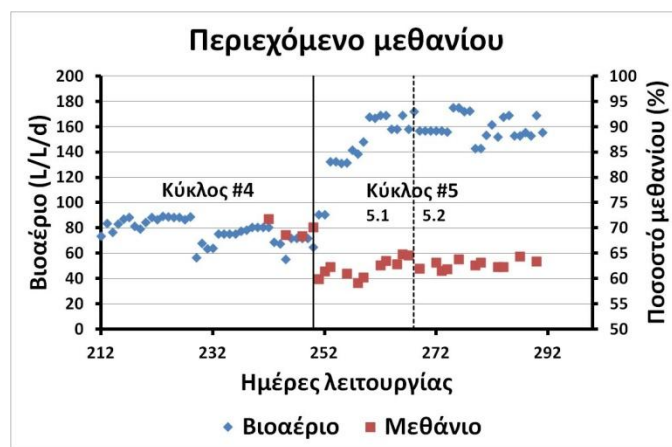
με την ημερήσια παραγωγή να διαμορφώνεται στα επίπεδα των  $159,3 \pm 9,3 \text{ L/d}$ . Οι αντίστοιχες τιμές της ημερήσιας παραγωγικότητας ανά μονάδα ενεργού όγκου ήταν  $2,09 \pm 0,1 \text{ L/L}_r/\text{d}$  και  $2,07 \pm 0,12 \text{ L/L}_r/\text{d}$  (Σχήμα 7.4.75). Ενδιαφέρον επίσης παρουσιάζει και η διακύμανση της σύστασης του μεθανίου κυρίως κατά τη μεταβολή του ρυθμού οργανικής φόρτισης. Η περιορισμένη συσσώρευση VFAs οδήγησε σε πτώση της του περιεχομένου του βιοαερίου σε μεθάνιο, το οποίο επανήλθε στη συνέχεια στα επίπεδα του 65% και διατηρήθηκε με μικρές διακυμάνσεις πρακτικά σταθερό ως το τέλος του πειραματικού κύκλου (Σχήμα 7.4.76). Τέλος, η παραγωγικότητα του βιοαερίου ανά μονάδα βάρους του FORBI ήταν  $531 \text{ L/kg}_{\text{FORBI}}$  και  $517 \text{ L/kg}_{\text{FORBI}}$  κατά τα στάδια 5.1 και 5.2 αντίστοιχα, λαμβάνοντας τις μεγαλύτερες τιμές τους σε σχέση με όλους τους προηγούμενους πειραματικούς κύκλους και προσεγγίζοντας τη μέγιστη θεωρητική παραγωγή μεθανίου.



Σχήμα 7.4.74 Ημερήσια παραγωγή βιοαερίου κατά τη διάρκεια του πέμπτου κύκλου



Σχήμα 7.4.75 Ημερήσια παραγωγικότητα βιοαερίου κατά τη διάρκεια του πέμπτου κύκλου



Σχήμα 7.4.76 Διακύμανση του περιεχομένου του βιοαερίου σε μεθάνιο κατά τη μετάβαση από τον τέταρτο στον πέμπτο κύκλο λειτουργίας καθώς και κατά τη μετάβαση από το στάδιο 5.1 στο στάδιο 5.2

#### 7.4.6 Σύνοψη αποτελεσμάτων για τους 5 πειραματικούς κύκλους λειτουργίας

Τα πειράματα αναερόβιας χώνευσης με τροφοδοσία FORBI είχαν ως βασικό στόχο αφενός τη μελέτη της καταλληλότητας του καινοτόμου υποστρώματος για παραγωγή βιοαερίου, αφετέρου τη δυνατότητα του PABR να επεξεργαστεί το νέο υπόστρωμα υπό διαρκώς αυξανόμενους ρυθμούς οργανικής

φόρτισης. Ο πιλότος επέδειξε εξαιρετική ικανότητα προσαρμογής στο νέο απόβλητο παρά τους εξαιρετικά χαμηλούς χρόνους παραμονής και τις απότομες μεταβολές των λειτουργικών παραμέτρων του.

Στον Πίνακα 7.4.1 παρουσιάζονται συνοπτικά τα βασικά αποτελέσματα των 4 πειραματικών κύκλων λειτουργίας που αφορούν στην αναερόβια συγχώνευση μίγματος κτηνοτροφικών αποβλήτων με απόβλητο τυροκομείου και οι βασικές παράμετροι λειτουργίας για κάθε πειραματικό κύκλο.

**Πίνακας 7.4.1** Σύνοψη αποτελεσμάτων πειραματικής διαδικασίας αναερόβιας χώνευσης FORBI

	Κύκλος 1	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4	Κύκλος 5	
					5.1	5.2
<b>Στάδιο διαχωρισμού</b>	✓	✓	×	×	×	×
<b>HRT (d)</b>	12,2	10	8,7	5	5	5
<b>T (d)</b>	2	2	2	2	2	1
<b>Ημέρες λειτουργίας (d)</b>	86	41	67	56	18	23
<b>Μέσο tCOD<sub>τροφοδοσίας</sub> (g/L)</b>	7,32	11,7	10,83	10,7	22,63	22,63
<b>Ρυθμός οργανικής φόρτισης (g<sub>COD</sub>/L<sub>αντιδραστήρα</sub>/d)</b>	0,6	1,17	1,24	2,14	4,53	4,53
<b>tCOD<sub>εκροής</sub> (g/L)</b>	0,87	0,79	1,86	2,03	3,44	5,43
<b>Απομάκρυνση tCOD (%)</b>	89	93,5	86,4	80,5	85,6	74,3
<b>Παραγωγικότητα βιοαερίου (L<sub>βιοαερίου</sub>/L<sub>αντιδραστήρα</sub>/d)</b>	0,26	0,42	0,56	0,98	2,09	2,07
<b>Παραγωγικότητα (L<sub>βιοαερίου</sub>/kg<sub>FORBI</sub>)</b>	158	110	484	500	531	517
<b>Περιεχόμενο μεθανίου (%)</b>	65-70	65-70	65-70	69,6	62,7	62,8

## 7.5 Μοντελοποίηση με το Anaerobic Digestion Model No 1 – ADM1

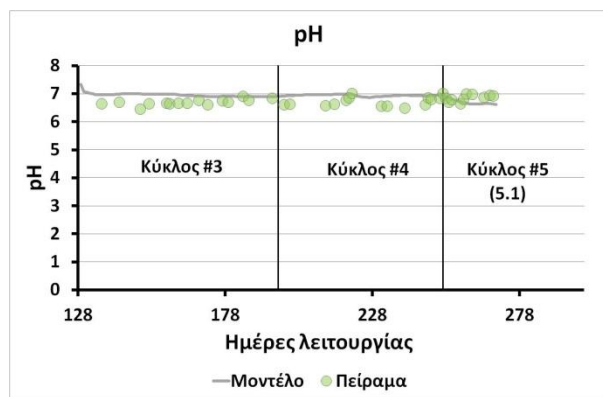
Το μαθηματικό μοντέλο ADM1 που αναπτύχθηκε με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα του τελευταίου κύκλου πειραμάτων με τροφοδοσία μίγματος κτηνοτροφικών αποβλήτων (Κεφάλαιο 6) εφαρμόστηκε και στα αποτελέσματα των εργαστηριακών αναλύσεων κατά την παρακολούθηση του συστήματος με τροφοδοσία FORBI. Μοναδική διαφοροποίηση αποτέλεσε το γεγονός ότι η διεργασία που αφορά τα πειράματα με FORBI μοντελοποιήθηκε με συνεχή τρόπο, δηλαδή οι πειραματικοί κύκλοι προσομοιώθηκαν ως ενιαίο συνεχές πείραμα και όχι ο καθένας ξεχωριστά, όπως στην περίπτωση των κτηνοτροφικών αποβλήτων.

Στόχος ήταν η προσομοίωση της συμπεριφοράς του συστήματος σε κάθε πειραματικό κύκλο και ταυτόχρονα η προσομοίωση της απόκρισης του συστήματος μετά από την αλλαγή του ρυθμού οργανικής φόρτισης. Για το λόγο αυτό, οι Κύκλοι 1 και 2 καθώς και το στάδιο 5.2 εξαιρέθηκαν από το μοντέλο. Οι Κύκλοι 1 και 2 εξαιρέθηκαν εξαιτίας της διαφορετικής φύσης της τροφοδοσίας (εκχύλισμα FORBI) γεγονός που διαφοροποιεί σημαντικά την κινητική των αντιδράσεων λόγω της απουσίας

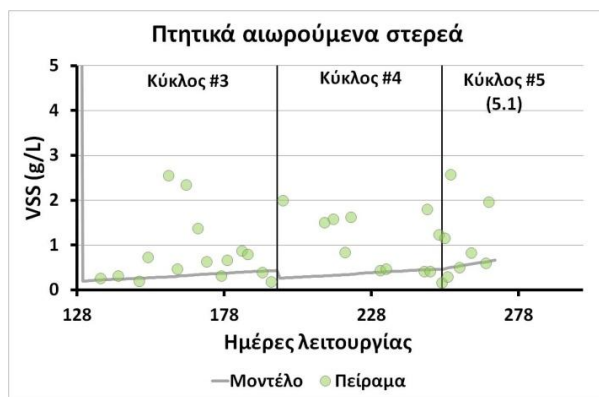
στερεών στην τροφοδοσία του συστήματος. Το στάδιο 5.2 εξαιρέθηκε λόγω της διαφοροποίησης της συχνότητας εναλλαγής του διαμερίσματος τροφοδοσίας. Όπως προαναφέρθηκε, η εναλλαγή των διαμερισμάτων δεν προσομοιώνεται στο συγκεκριμένο μοντέλο για να μην αυξηθεί ο ήδη σημαντικός βαθμός περιπλοκότητάς του (ο αντιδραστήρας προσομοιώνεται ως CSTR), άρα μία μεταβολή στη συχνότητα εναλλαγής δε θα μπορούσε να συμπεριληφθεί.

Με δεδομένο ότι ο αντιδραστήρας αντιμετωπίστηκε ως αντιδραστήρας συνεχούς λειτουργίας και πλήρους ανάμιξης, υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές των παραμέτρων στα 4 διαμερίσματα του χωνευτήρα για κάθε ημέρα λειτουργίας που πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις και επιχειρήθηκε η προσομοίωση του μοντέλου σε αυτές τις τιμές. Τα πειραματικά δεδομένα του pH, του sCOD και των VFAs αντιστοιχούν στις μέσες τιμές των 4 διαμερισμάτων του αντιδραστήρα σε διάφορες χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια του κύκλου λειτουργίας, ενώ οι πειραματικές τιμές των tCOD και VSS αφορούν τις τιμές της εκροής. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι με βάση τις παραδοχές του μοντέλου, τα διαλυτά στοιχεία της εκροής ταυτίζονται με αυτά στο εσωτερικό του αντιδραστήρα, ενώ τα μη διαλυτά διαφέρουν, λόγω της διαφοράς του υδραυλικού χρόνου παραμονής με το χρόνο παραμονής των στερεών. Η εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου πραγματοποιήθηκε με βάση τα αποτελέσματα του πειραματικού κύκλου, κατά τις προτάσεις των Batstone et al (2002) [46].

Τα πειραματικά δεδομένα από τις μέσες τιμές των μετρήσεων των pH, VSS, COD, VFAs και της παραγωγικότητας του βιοαερίου σε σύγκριση με την πρόβλεψη του μοντέλου για κάθε μία από τις συγκεκριμένες παραμέτρους, παρουσιάζονται στα Σχήματα 7.5.1-7.5.8

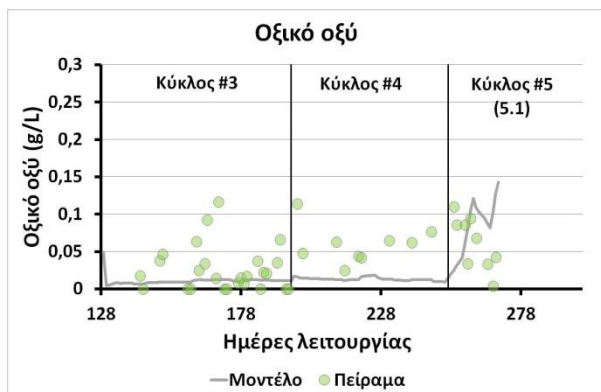


**Σχήμα 7.5.1** Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου ADM1 με το πειραματικό μέσο pH κατά τους κύκλους λειτουργίας 3, 4 και 5 (στάδιο 5.1)

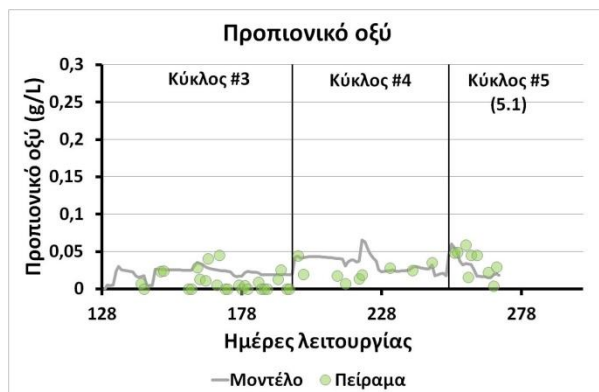


**Σχήμα 7.5.2** Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου ADM1 με τις πειραματικές τιμές των πτητικών αιωρούμενων στερεών της εκροής κατά τους κύκλους λειτουργίας 3, 4 και 5 (στάδιο 5.1)

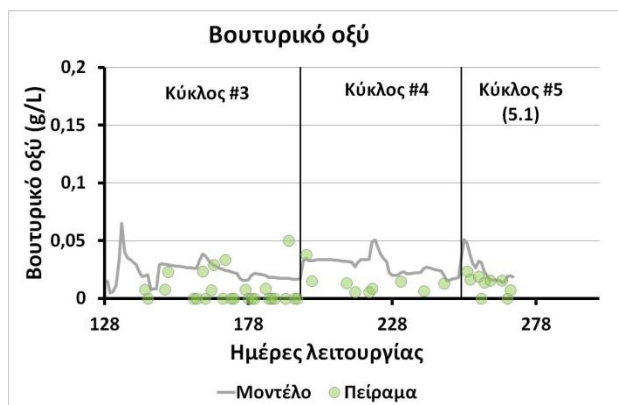




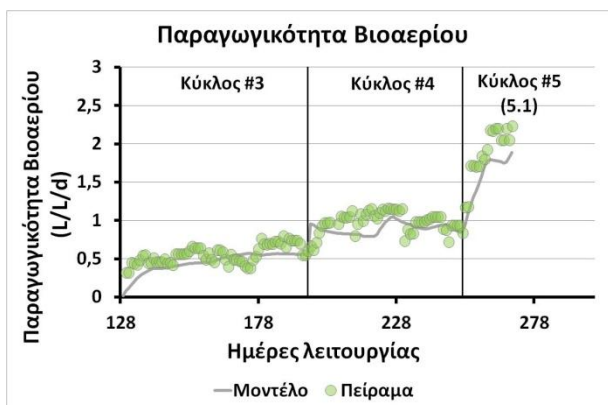
**Σχήμα 7.5.3** Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου ADM1 με τις πειραματικές μέσες τιμές του οξικού οξέος κατά τους κύκλους λειτουργίας 3, 4 και 5 (στάδιο 5.1)



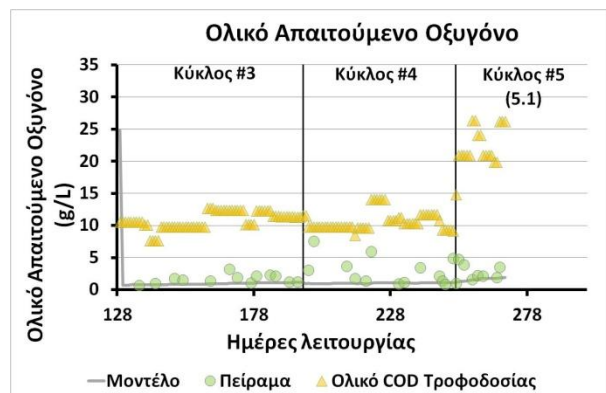
**Σχήμα 7.5.4** Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου ADM1 με τις πειραματικές μέσες τιμές του προπιονικού οξέος κατά τους κύκλους λειτουργίας 3, 4 και 5 (στάδιο 5.1)



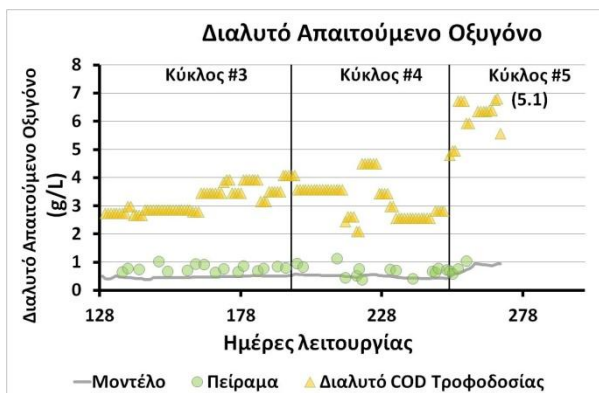
**Σχήμα 7.5.5** Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου ADM1 με τις πειραματικές μέσες τιμές του βουτυρικού οξέος κατά τους κύκλους λειτουργίας 3, 4 και 5 (στάδιο 5.1)



**Σχήμα 7.5.6** Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου ADM1 με τις πειραματικές τιμές της παραγωγικότητας του βιοαερίου κατά τους κύκλους λειτουργίας 3, 4 και 5 (στάδιο 5.1)



**Σχήμα 7.5.7** Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου ADM1 με τις πειραματικές τιμές του ολικού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου στην εκροή κατά τους κύκλους λειτουργίας 3, 4 και 5 (στάδιο 5.1)



**Σχήμα 7.5.8** Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου ADM1 με τις πειραματικές μέσες τιμές του διαλυτού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου κατά τους κύκλους λειτουργίας 3, 4 και 5 (στάδιο 5.1)

Το μοντέλο έχει την ικανότητα να προσομοιώνει αρκετά ικανοποιητικά τη συμπεριφορά του pH στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων (Σχήμα 7.5.1), των VSS στην εκροή του χωνευτήρα (Σχήμα 7.5.2) καθώς και τις διακυμάνσεις των μέσων συγκεντρώσεων του οξικού (Σχήμα 7.5.3), του προπιονικού (Σχήμα 7.5.4) και του βουτυρικού οξέος (Σχήμα 7.5.5). Το ίδιο συμβαίνει και με την αποτελεσματικότητα του PABR ως προς την απομάκρυνση του ολικού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (Σχήμα 7.5.7) και τα επίπεδα του διαλυτού χημικά οξυγόνου (Σχήμα 7.5.8) κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Η παράμετρος  $tres_x$  υπολογίστηκε από το μοντέλο ίση με 174,3d κατά μέσο όρο και για τους 3 πειραματικούς κύκλους της διεργασίας που περιλαμβάνονται στους υπολογισμούς. Παρά τις μεταβολές του ρυθμού οργανικής φόρτισης, το μοντέλο προσομοιώνει ικανοποιητικά τη συνολική λειτουργία του συστήματος και επιβεβαιώνει ότι η παραγωγικότητα του FORBI σε βιοαέριο (Σχήμα 7.5.6) αγγίζει τη μέγιστη θεωρητικά προβλεπόμενη από τη στοιχειομετρία.

## **Κεφάλαιο 8**

# **Κομποστοποίηση κτηνοτροφικών αποβλήτων και οικιακών ζυμώσιμων απορριμμάτων**

## 8.1 Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες η συνεχώς αυξανόμενη παγκόσμια δραστηριότητα, λόγω της έντονης αστικοποίησης και βιομηχανοποίησης, έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή σημαντικών ποσοτήτων αποβλήτων. Ειδικότερα για τα στερεά οργανικά απόβλητα, οι μέθοδοι διαχείρισης που χρησιμοποιούνταν παλιότερα (απόθεση, υγειονομική ταφή) τείνουν να περιοριστούν όπως προκύπτει και από την ευρωπαϊκή και ελληνική νομοθεσία. Αντίθετα, η ελεγχόμενη αερόβια κομποστοποίηση (βιοσταθεροποίηση) προκύπτει ως μια από τις πιο επικρατούσες μεθόδους διαχείρισης στερεών αποβλήτων, που συμπνέει με τους πυλώνες της κυκλικής οικονομίας (circular economy). Η διεργασία της κομποστοποίησης παρόλο που έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως και θεωρείται μια σχετικά απλή διεργασία, επηρεάζεται από πολλούς φυσικοχημικούς και βιολογικούς παράγοντες που μπορούν δυνητικά να την αναστείλουν. Το τελικό προϊόν της διεργασίας (κομπόστ) μπορεί να παραχθεί αερόβια σε συστήματα διαφόρων ειδών (ανοικτού/κλειστού τύπου).

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία της αερόβιας κομποστοποίησης σε εργαστηριακό αντιδραστήρα κλειστού τύπου διαλείποντος έργου. Ο αντιδραστήρας ήταν κυλινδρικός, λειτουργικού όγκου 28L. Η τροφοδοσία του κομποστοποιητή στην πλειοψηφία των πειραμάτων ήταν το στερεό υπόλειμμα που προερχόταν από ένα στάδιο προεπεξεργασίας αποβλήτων (κτηνοτροφικών ή οικιακών ζυμώσεων απορριμμάτων – FORBI) που περιελάμβανε το διαχωρισμό στερεού-υγρού, ενώ το υγρό ρεύμα οδηγούταν για αναερόβια χώνευση στον πιλοτικής κλίμακας PABR (Κεφάλαια 6 και 7), στα πλαίσια της ολοκληρωμένης διαχείρισης. Το προς κομποστοποίηση μίγμα αναμίχθηκε σε κάποιες περιπτώσεις με πριονίδι, που χρησιμοποιήθηκε ως διογκωτικός παράγοντας και επιπλέον με σκοπό τη βελτίωση της αναλογίας C/N του υλικού. Τέλος, στην περίπτωση του FORBI, εξετάστηκε και η δυνατότητα κομποστοποίησης του υλικού ως έχει, χωρίς την παρεμβολή του σταδίου προεπεξεργασίας.

Βασικός στόχος των πειραμάτων ήταν η επίτευξη όσο το δυνατόν μεγαλύτερης θερμοκρασίας του υλικού στη θερμόφιλη φάση μέσα από τη βελτιστοποίηση του συστήματος, δεδομένου ότι η κομποστοποίηση επηρεάζεται άμεσα από τον όγκο του προς χώνευση υλικού και την χωρητικότητα και τη μόνωση του κομποστοποιητή (στην περίπτωση των συστημάτων κλειστού τύπου).

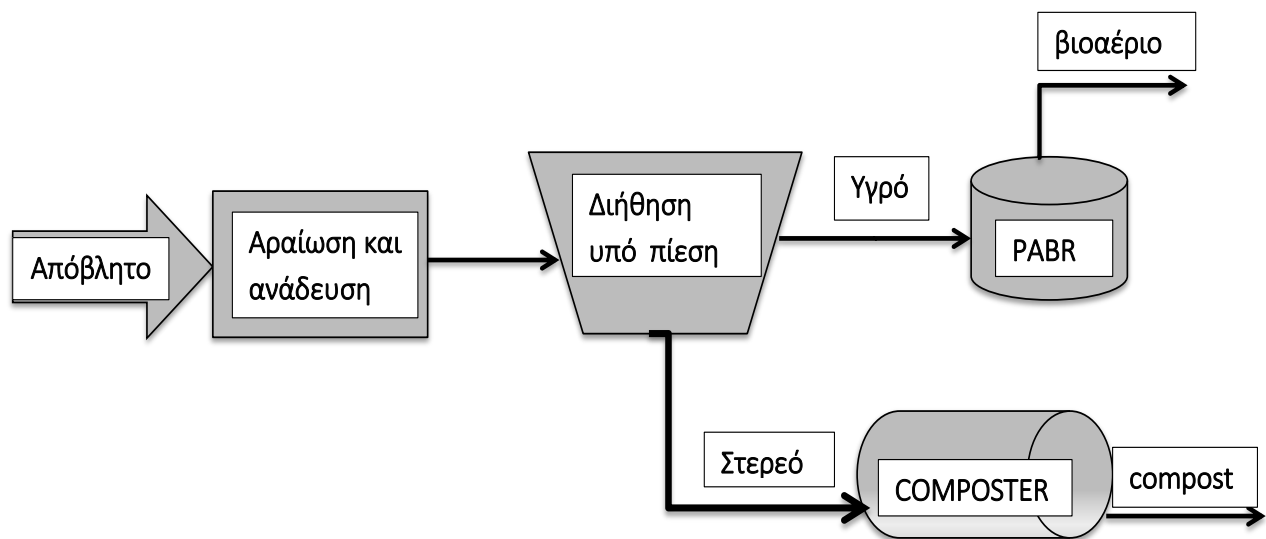
Τα 9 πειράματα (tests) που διεξήχθησαν χωρίζονται ουσιαστικά σε δύο μέρη: αυτά που είχαν ως πρώτη ύλη κτηνοτροφικά απόβλητα έξι διαφορετικών ειδών (κοπριά χοίρων, αγελάδων, βοοειδών, ορνίθων, προβάτων και τυρόγαλο) αναμειγμένων κατά τέτοια αναλογία ώστε να αντιπροσωπεύουν την ετήσια παραγωγή κτηνοτροφικών αποβλήτων του Μετσόβου (Κύκλοι 1 έως 5) και αυτά που είχαν ως πρώτη ύλη οικιακά ζυμώσιμα απορρίμματα του Δήμου Χαλανδρίου, ξηραμένα και κονιορτοποιημένα, δηλαδή το FORBI (Κύκλοι 6 έως 9).

Στις επόμενες ενότητες, παρουσιάζεται αναλυτικά ο κάθε κύκλος πειραμάτων καθώς και η διαδικασία της βελτιστοποίησης των βασικών παραμέτρων της διεργασίας με στόχο τη βελτίωση του θερμοκρασιακού προφίλ. Στη συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα των πειραμάτων και εξάγονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία.

## 8.2 Πειραματική διαδικασία

Στην παρούσα διατριβή, ο κομποστοποιητής εργαστηριακής κλίμακας που περιγράφηκε λειτουργούσε ως διαλείποντος έργου. Το ημιστερεό υλικό που τοποθετούνταν ως τροφοδοσία σε κάθε πείραμα (test) στον κομποστοποιητή προερχόταν από ένα στάδιο προεπεξεργασίας που επέτρεπε ουσιαστικά να αξιοποιηθούν και τα δύο ρεύματα (στερεό-υγρό) του αποβλήτου, στα πλαίσια της ολοκληρωμένης διαχείρισής του. Το υγρό ρεύμα χρησιμοποιούταν ως εισροή σε έναν πιλοτικό Περιοδικό Αναερόβιο Χωνευτήρα με Ανακλαστήρες (Periodic Anaerobic Baffled Reactor, PABR) από τον οποίο παραγόταν βιοαέριο (Κεφάλαια 6 και 7).

Πιο συγκεκριμένα, το αρχικό απόβλητο (και στην περίπτωση των κτηνοτροφικών και του FORBI) αρχικά αιρούνταν σε νερό και αναδεύονταν για 30 λεπτά. Έπειτα η ιλύς αυτή διηθούνταν υπό πίεση με υφασμάτινο φίλτρο και το μίγμα διαχωριζόταν σε υγρό και στερεό ρεύμα, τα όποια χρησιμοποιούνταν ως τροφοδοσία για τον αναερόβιο αντιδραστήρα και τον κομποστοποιητή αντίστοιχα [137]. Στο παρακάτω διάγραμμα ροής παρουσιάζεται αναλυτικά η επεξεργασία.



Σχήμα 8.2.1 Διάγραμμα ροής της μεθόδου ολοκληρωμένης αξιοποίησης στερεών οργανικών αποβλήτων

Η πειραματική διαδικασία της κομποστοποίησης μπορεί να χωριστεί νοητά σε δύο φάσεις:

- Την 1<sup>η</sup> φάση (πειράματα 1-5) όπου σαν τροφοδοσία χρησιμοποιήθηκαν κτηνοτροφικά απόβλητα της περιοχής του Μετσόβου
- Τη 2<sup>η</sup> φάση (πειράματα 6-9) όπου η τροφοδοσία αποτελούταν από οικιακά απορρίμματα του Δήμου Χαλανδρίου, ξηραμένα και κονιορτοποιημένα(FORBI).

Τα συστήματα βιοσταθεροποίησης μικρής κλίμακας όπως το παρόν, εμφανίζουν συχνά το πρόβλημα της μικρής ή/και καθόλου αύξησης της θερμοκρασίας, καθώς ο όγκος του προς κομποστοποίηση υλικού είναι μικρός σε σχέση με την εξωτερική ελεύθερη επιφάνεια από όπου πραγματοποιείται η

ανταλλαγή της θερμότητας με το περιβάλλον. Ο μικρός όγκος δεν μπορεί να συγκρατήσει την παραγόμενη από τις μικροβιακές μετατροπές θερμότητα, υπό τακτική ανάδευση και αερισμό, που όμως είναι αναγκαίοι.

Το φαινόμενο αυτό παρουσιάστηκε και κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας, με αποτέλεσμα να ακολουθηθεί μια διαδικασία βελτιστοποίησης της διεργασίας, μεταβάλλοντας τις παραμέτρους που την επηρεάζουν περισσότερο.

### 8.2.1 Περιγραφή πειραματικών κύκλων (tests)

Παρακάτω δίνονται συνοπτικά τα αρχικά χαρακτηριστικά του υλικού που χρησιμοποιήθηκε σε κάθε πείραμα ώστε να είναι πιο ευκρινείς οι αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν από πείραμα σε πείραμα. Σε κάθε νέο πειραματικό κύκλο πραγματοποιούνταν μεταβολή κάποιας εκ των αρχικών παραμέτρων με στόχο τη βελτιστοποίηση του θερμοκρασιακού προφίλ κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης. Σε όλους του κύκλους πειραμάτων, η ενεργοποίηση του συστήματος ανάδευσης γινόταν μία φορά ανά 24 ώρες και η διάρκεια της ανάδευσης ήταν 3 λεπτά. Επίσης, στο σύστημα διοχετευόταν αέρας από το κάτω μέρος του κομποστοποιητή και η παροχή του αέρα ήταν 415ml/min [8].

#### 8.2.1.1 Πειράματα με κτηνοτροφικά απόβλητα

Κατά τον πρώτο πειραματικό κύκλο επιχειρήθηκε η κομποστοποίηση του στερεού υπολείμματος του σταδίου της προεπεξεργασίας του μίγματος των κτηνοτροφικών αποβλήτων ως είχε, δηλαδή χωρίς περαιτέρω παρέμβαση στα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του (Πίνακας 8.2.1). Το υπόλειμμα είχε μορφή ιλύος, με μέση υγρασία της τάξης του 74%. Η υψηλή υγρασία είχε ως αποτέλεσμα τη χαμηλή τιμή του ελεύθερου αέριου χώρου. Το συνολικό βάρος του μίγματος που εισήχθη στον αντιδραστήρα ήταν 6kg, ώστε να μην παρεμποδίζεται το αυτόματο σύστημα μηχανικής ανάδευσης.

Πίνακας 8.2.1: Αρχικές συνθήκες του πειράματος 1

Πείραμα (test)	Υλικό	Αναλογία	Αρχικό βάρος μίγματος (kg)	Αρχική υγρασία μίγματος (% ξ.β.)	Ελεύθερος αέριος χώρος (F.A.S)
1	Στερεά από στάδιο προεπεξεργασίας	-	6	73,9%	12%

Εφόσον το 1ο πείραμα δε θεωρήθηκε επιτυχημένο από πλευράς θερμοκρασιακού προφίλ (βλ. ενότητα 8.3), δηλαδή δεν εμφάνισε αύξηση της θερμοκρασίας θεωρήθηκε αναγκαίο να μεταβληθεί κάποια από τις παραμέτρους που επηρεάζουν την κομποστοποίηση. Η πρώτη αλλαγή που πραγματοποιήθηκε ήταν στη σύσταση του υλικού, καθώς το στερεό υπόλειμμα από το στάδιο προεπεξεργασίας περιείχε περίπου το 50% του βιοαποδομήσιμου άνθρακα του αποβλήτου. Για το λόγο αυτό στο επόμενο πείραμα προστέθηκε ποσότητα φρέσκου αποβλήτου από πτηνοτροφεία, σε αναλογία 1:1 (Πίνακας 8.2.2). Η προσθήκη του φρέσκου αποβλήτου συνετέλεσε σε περαιτέρω μείωση του ελεύθερου αέριου χώρου.

**Πίνακας 8.2.2:** Αρχικές συνθήκες του πειράματος 2

Πείραμα (test)	Υλικό	Αναλογία	Αρχικό βάρος μίγματος (kg)	Αρχική υγρασία μίγματος (% ξ.β.)	Ελεύθερος αέριος χώρος (F.A.S)
2	Στερεά από στάδιο προεπεξεργασίας/ φρέσκα απόβλητα πτηνοτροφείου	1:1	6	58%	9,6%

Κατά τον τρίτο πειραματικό κύκλο θεωρήθηκε αναγκαίο να ρυθμιστεί η υγρασία του υλικού σε χαμηλότερα επίπεδα, με βασικό σκοπό την αύξηση τους ελεύθερου αέριου χώρου ώστε να βελτιωθούν οι συνθήκες αερισμού του μίγματος στο εσωτερικό του κομποστοποιητή. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα 3 ήταν το στερεό από το στάδιο προεπεξεργασίας και φρέσκα απόβλητα πτηνοτροφείου ξηραμένα, σε αναλογία 1:1 με σκοπό τη ρύθμιση της υγρασίας. Στον Πίνακα 8.2.3 παρουσιάζονται οι αρχικές συνθήκες του πειράματος 3.

**Πίνακας 8.2.3:** Αρχικές συνθήκες του πειράματος 3

Πείραμα (test)	Υλικό	Αναλογία	Αρχικό βάρος μίγματος (kg)	Αρχική υγρασία μίγματος (%ξ.β.)	Λόγος C/N	Ελεύθερος αέριος χώρος (F.A.S)
3	Στερεά από στάδιο προεπεξεργασίας/ ξηραμένα απόβλητα πτηνοτροφείου	1:1	6	48%	18/1	18%

Κατά τον τέταρτο πειραματικό κύκλο θεωρήθηκε αναγκαία η περαιτέρω ρύθμιση της τιμής του ελεύθερου αέριου χώρου μέσω τη προσθήκης διογκωτικού παράγοντα. Ο διογκωτικός παράγοντας που χρησιμοποιήθηκε ήταν ρινίσματα από επεξεργασία ξύλου (πριονίδι). Το πριονίδι προσέδωσε σημαντική αύξηση του ελεύθερου αέριου χώρου στο μίγμα, ενώ ταυτόχρονα ρύθμισε την υγρασία και αύξησε το λόγο C/N (Πίνακας 8.2.4). Η μεγάλη αύξηση του ελεύθερου αέριου χώρου συνετέλεσε στη μείωση της συνολικής μάζας του μίγματος που εισήχθη στον κομποστοποιητή στα 3kg.

**Πίνακας 8.2.4:** Αρχικές συνθήκες του πειράματος 4

Πείραμα (test)	Υλικό	Αναλογία	Αρχικό βάρος μίγματος (kg)	Αρχική υγρασία μίγματος (%ξ.β.)	Λόγος C/N	Ελεύθερος αέριος χώρος (F.A.S)
4	Στερεά από στάδιο προεπεξεργασίας με φρέσκα απόβλητα πτηνοτροφείου / πριονίδι	5:2	3	56%	25/1	58%

Ακολούθως πραγματοποιήθηκε ένα ενδιάμεσο πείραμα εκτός κομποστοποιητή, ώστε να προσδιοριστεί η επίδραση της μάζας του μίγματος στο θερμοκρασιακό προφίλ κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης και ταυτόχρονα να διερευνηθεί η ύπαρξη ενός κατώτατου ορίου (threshold) της μάζας του μίγματος για την επιτυχή αύξηση και διατήρηση της θερμοκρασίας. Σχεδιάστηκε λοιπόν ένα ενδιάμεσο πείραμα (πείραμα 4') κατά το οποίο 4 σωροί διαφορετικής μάζας (1kg, 3kg, 6kg και 10kg) από μίγμα όμοιο με αυτό του πειράματος 4 τοποθετήθηκαν σε δοχεία με όμοιες συνθήκες μόνωσης και αερισμού και μελετήθηκε το θερμοκρασιακό τους προφίλ.

Λαμβάνοντας υπόψη τα ευρήματα του ενδιάμεσου πειράματος, κατά τον πέμπτο πειραματικό κύκλο επελέγη η αύξηση του μάζας του μίγματος στα 6kg. Το μίγμα αποτελείτο από το στερεό υπόλειμμα του σταδίου της προεπεξεργασίας αναμεμιγμένο με πριονίδι σε αναλογία 5:2 κατά βάρος. Η αύξηση της αρχικής μάζας του μίγματος συνετέλεσε σε πλήρωση του ενεργού όγκου του κομποστοποιητή, συνεπώς το αυτόματο μηχανικό σύστημα ανάδευσης αντιμετώπισε πρόβλημα λόγω πάκτωσης του υλικού στο εσωτερικό του αντιδραστήρα. Για το λόγο αυτό, κατά το πείραμα 5 προτιμήθηκε η χειροκίνητη ανάδευση του μίγματος, μία φορά ανά 24ωρο.

**Πίνακας 8.2.5:** Αρχικές συνθήκες του πειράματος 5

Πείραμα (test)	Υλικό	Αναλογία	Αρχικό βάρος μίγματος (kg)	Αρχική υγρασία μίγματος (%ξ.β.)	Λόγος C/N	Ελεύθερος αέριος χώρος (F.A.S)
5	Στερεά από στάδιο προεπεξεργασίας / πριονίδι	5:2	6 (maximum όγκος)	55,96%	25/1	33%



### 8.2.1.2 Πειράματα με FORBI

Στο πρώτο πείραμα (πειραματικός κύκλος 6) που πραγματοποιήθηκε με υλικό τροφοδοσίας τα επεξεργασμένα οικιακά ζυμώσιμα απορρίμματα (FORBI), χρησιμοποιήθηκε υλικό από το στάδιο προεπεξεργασίας στερεού-υγρού ρυθμίζοντας τις αρχικές παραμέτρους έτσι ώστε να είναι οι προσομοιάζουν αυτές του πειράματος 5, του τελευταίου πειράματος με κτηνοτροφικά απόβλητα, που ήταν και το πιο επιτυχημένο.

Κατά τον πειραματικό κύκλο 6, χρησιμοποιήθηκε πριονίδι ως διογκωτικός παράγοντας για την ταυτόχρονη ρύθμιση της υγρασίας, της θερμοκρασίας και του ελεύθερου αέριου χώρου. Στόχος ήταν η διερεύνηση της κομποστοποίησης του στερεού υπολείμματος στα πλαίσια της ολοκληρωμένης αξιοποίησης του αποβλήτου. Οι αρχικές συνθήκες, όπως αυτές διαμορφώθηκαν κατά το πείραμα 6, παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.2.6.

**Πίνακας 8.2.6:** Αρχικές συνθήκες του πειράματος 6

Πείραμα (test)	Υλικό	Αναλογία	Αρχικό βάρος μίγματος (kg)	Αρχική υγρασία μίγματος (%ξ.β.)	Λόγος C/N	Ελεύθερος αέριος χώρος (F.A.S)
6	Στερεό από στάδιο προεπεξεργασίας/ πριονίδι	5:2	6 (maximum όγκος)	53,67%	18/1	45%

Κατά τον πειραματικό κύκλο 7 διερευνήθηκε η δυνατότητα παραγωγής εδαφοβελτιωτικού από το FORBI χωρίς την παρεμβολή του σταδίου της προεπεξεργασίας και χωρίς πρόσθετα υλικά. Η υγρασία ρυθμίστηκε με την προσθήκη νερού έως το 50%, δηλαδή στο μέσο των βέλτιστων για την κομποστοποίηση ορίων που αναφέρονται στη βιβλιογραφία όσον αφορά τα επίπεδα υγρασίας (40-60%) για την πλειοψηφία των υποστρωμάτων. Η ρύθμιση της υγρασίας στο 50% είχε ως αποτέλεσμα την κατακόρυφη μείωση του ελεύθερου αέριου χώρου με αποτέλεσμα να αυξηθεί και το βάρος του μίγματος που εισήχθη στον κομποστοποιητή. Στον Πίνακα 8.2.7 παρουσιάζονται οι αρχικές συνθήκες του πειράματος 7.

**Πίνακας 8.2.7:** Αρχικές συνθήκες του πειράματος 7

Πείραμα (test)	Υλικό	Αναλογία	Αρχικό βάρος μίγματος (kg)	Αρχική υγρασία μίγματος (%ξ.β.)	Ελεύθερος αέριος χώρος (F.A.S)
7	FORBI / Νερό	1:1	8 (maximum όγκος)	49,6%	14%

Κατά τον πειραματικό κύκλο 8 πραγματοποιήθηκε μείωση της αρχικής υγρασίας του FORBI στο 30% με στόχο την αύξηση του ελεύθερου αέριου χώρου και κατ'επέκταση τη βελτίωση των συνθηκών αερισμού στο εσωτερικό του υποστρώματος κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Στον Πίνακα 8.2.8 παρουσιάζονται οι αρχικές συνθήκες του όγδου πειραματικού κύκλου.

**Πίνακας 8.2.8:** Αρχικές συνθήκες του πειράματος 8

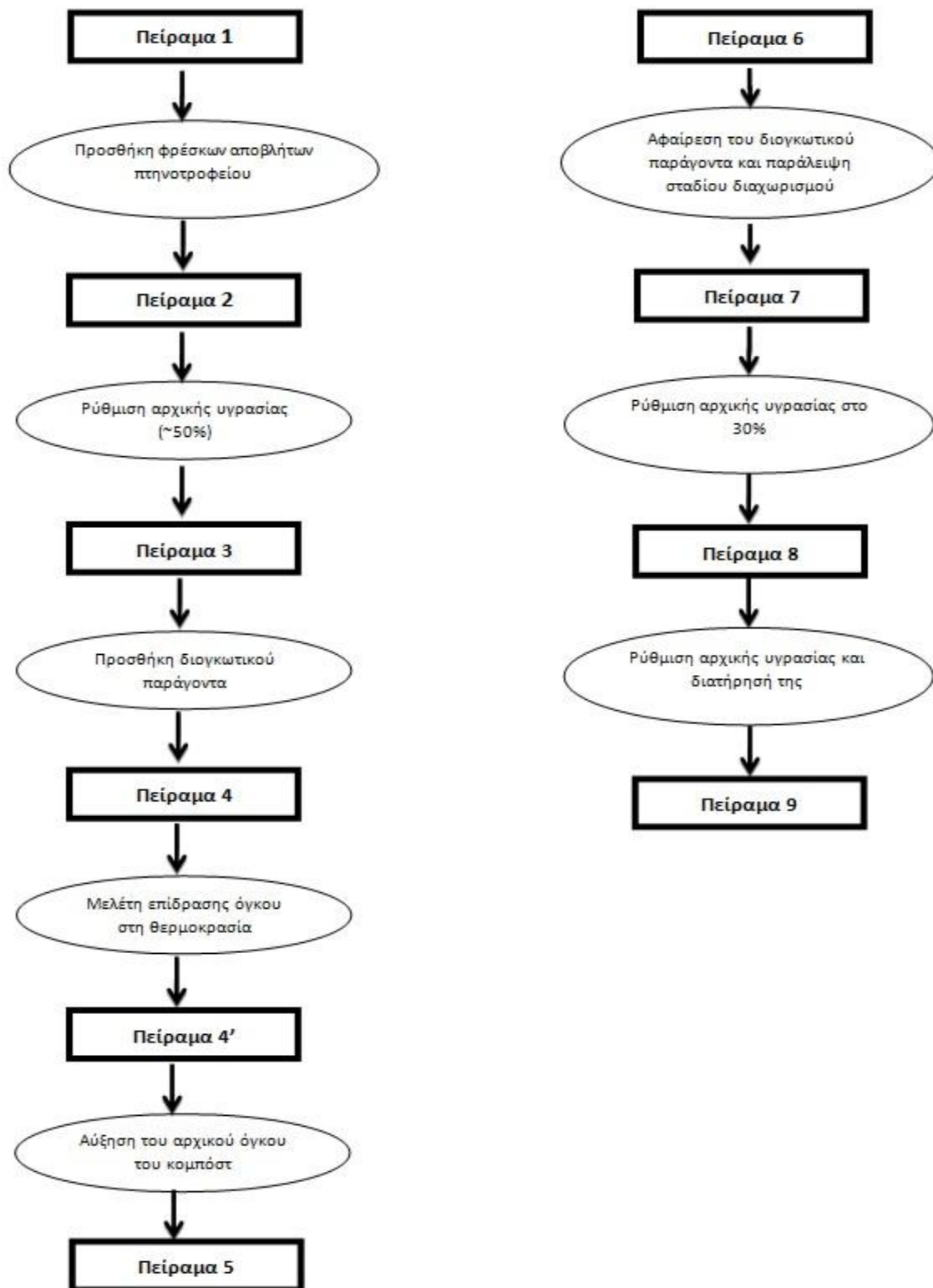
Πείραμα (test)	Υλικό	Αναλογία	Αρχικό βάρος μίγματος (kg)	Αρχική υγρασία μίγματος (%ξ.β.)	Λόγος C/N	Ελεύθερος αέριος χώρος (F.A.S)
8	FORBI / Νερό	2:1	6	30,2%	18/1	21%

Τα ευρήματα του πειραματικού κύκλου 8 οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι τα επίπεδα της υγρασίας, τόσο κατά τις αρχικές συνθήκες όσο και κατά τη διάρκεια της διεργασίας, επηρεάζουν σημαντικά το θερμοκρασιακό προφίλ. Για το λόγο αυτό, κατά τον ένατο πειραματικό κύκλο, επελέγη η ρύθμιση της υγρασίας κατά τη διάρκεια της διεργασίας στα επίπεδα του 35-40% ενώ η αρχική υγρασία ορίστηκε ίση με 35%. Τέλος, κατά το τελευταίο πείραμα προστέθηκε Οι αρχικές συνθήκες του τελευταίου πειραματικού κύκλου, παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.2.9.

**Πίνακας 8.2.9** Αρχικές συνθήκες του πειράματος 9

Πείραμα (test)	Υλικό	Αναλογία	Αρχικό βάρος μίγματος (kg)	Αρχική υγρασία μίγματος (%ξ.β.)	Λόγος C/N	Ελεύθερος αέριος χώρος (F.A.S)
9	FORBI / Νερό	2,5:1	11 (maximum όγκος)	35,02%	18/1	20%

Τέλος, παρουσιάζεται η συνολική πορεία της βελτιστοποίησης του θερμοκρασιακού προφίλ σε όλη την έκταση της πειραματικής διαδικασίας.



**Σχήμα 8.2.2** Διαδικασία βελτιστοποίησης της διεργασίας της κομποστοποίησης στον εργαστηριακό κομποστοποιητή κλειστού τύπου. **Αριστερά:** Η διαδικασία που αφορά το μίγμα των κτηνοτροφικών αποβλήτων. **Δεξιά:** Η διαδικασία που αφορά το FORBI

## **8.3 Αποτελέσματα πειραμάτων κομποστοποίησης**

### **8.3.1 Αποτελέσματα κύκλων πειραμάτων με πρώτη ύλη τα κτηνοτροφικά απόβλητα**

#### **8.3.1.1 Πείραμα 1**

Κατά τον πρώτο πειραματικό κύκλο χρησιμοποιήθηκε, όπως προαναφέρθηκε, ως υπόστρωμα το στερεό υπόλειμμα του μίγματος κτηνοτροφικών αποβλήτων και αποβλήτων τυροκομείου.

Η υψηλή αρχική υγρασία του μίγματος σε συνδυασμό με τη χαμηλή τιμή του ελεύθερου αέριου χώρου συνετέλεσαν σε μικρή άνοδο της θερμοκρασίας. Η αύξηση της θερμοκρασίας παρατηρήθηκε σχετικά γρήγορα, δηλαδή εντός μιας ημέρας, με τη μέγιστη τιμή της να είναι 32°C. Η άνοδος της θερμοκρασίας στη διεργασία της κομποστοποίησης παρατηρείται συνήθως πιο σταδιακά, τουλάχιστον μέσα σε 3-5 εικοσιτετράωρα [59].

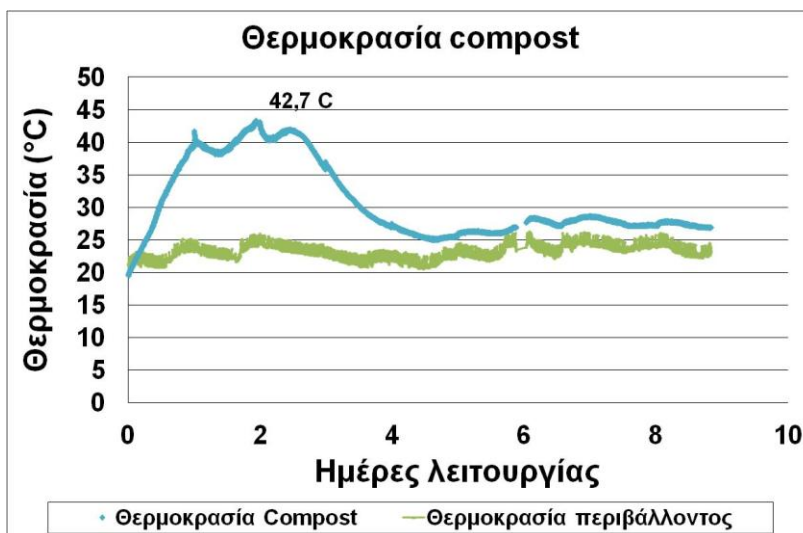
Ακόμη, η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας δεν υπερβαίνει τους 35°C, άρα δεν ενδείκνυται για ασφαλή κομποστοποίηση καθώς σε τέτοιες θερμοκρασίες ευνοείται η ανάπτυξη κυρίως των παθογόνων μικροοργανισμών και το τελικό προϊόν δε θεωρείται καλά ωριμασμένο [177]. Το μέγιστο της θερμοκρασίας του κομποστ κυμαίνεται, ανάλογα με το υλικό και τις συνθήκες κομποστοποίησης από 45°C έως και 70°C, για αερόβιες συνθήκες [178].

Τέλος, η θερμοκρασία έτεινε γρήγορα στην τιμή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, πράγμα που επίσης δείχνει προβλήματα στη διεργασία. Το γεγονός αυτό μπορεί να οφειλόταν σε ανεπαρκή ποσότητα βιοαποδομήσιμου άνθρακα (υπενθυμίζεται ότι κατά το στάδιο διαχωρισμού περίπου το 50% του οργανικού φορτίου απομακρυνόταν από το μίγμα και κατέληγε στο εκχύλισμα), σε κακές συνθήκες αερισμού ή μη επαρκή διάχυση οξυγόνου σε όλο τον όγκο του κόμποστ, σε υψηλή περιεχόμενη υγρασία (οπότε παρεμποδίζεται και πάλι η διάχυση επαρκούς ποσότητας οξυγόνου) και στην δυνατότητα κατακράτησης θερμότητας από το υλικό, που συνδέεται άμεσα με τον όγκο του κόμποστ.

Όλες οι προαναφερθείσες παράμετροι εξετάστηκαν χωριστά, και μεταβλήθηκαν μία προς μία στα επόμενα πειράματα, με τον τρόπο που παρουσιάζεται στο πειραματικό μέρος προκειμένου να βελτιωθεί το θερμοκρασιακό προφίλ.

#### **8.3.1.2 Πείραμα 2**

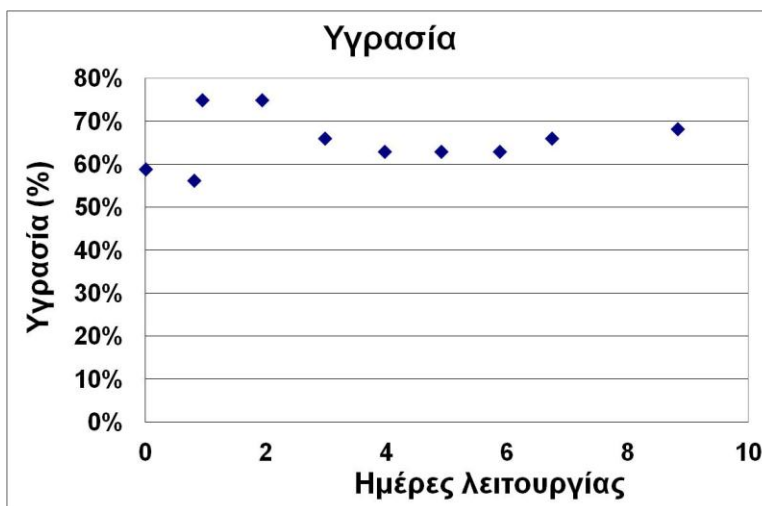
Κατά το δεύτερο πειραματικό κύκλο τοποθετήθηκε στον κομποστοποιητή υλικό σύστασης 3kg στερεών προερχόμενων από το στάδιο της προεπεξεργασίας και 3kg φρέσκων αποβλήτων πτηνοτροφείου ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη συγκέντρωση σε βιοαποδομήσιμο άνθρακα. Στο συγκεκριμένο πείραμα μετρήθηκαν οι παράμετροι της θερμοκρασίας και της υγρασίας κατά τη διάρκεια της διεργασίας και στόχος ήταν η βελτίωση του θερμοκρασιακού προφίλ. Στο Σχήμα 8.3.1 παρουσιάζεται η διακύμανση της θερμοκρασίας του μίγματος στο εσωτερικό του κομποστοποιητή κατά τη διάρκεια της διεργασίας σε σύγκριση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.



**Σχήμα 8.3.1** Μεταβολή της θερμοκρασίας του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 2

Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 8.3.1, το μέγιστο της θερμοκρασίας παρουσιάζεται προς το τέλος της 2ης ημέρας και είναι ίσο με 42,7°C, ενώ ήδη από την 3η μέρα αρχίζει η επαναφορά της θερμοκρασίας προς τη θερμοκρασία περιβάλλοντος (5η ημέρα λειτουργίας).

Η καμπύλη της θερμοκρασίας παρουσιάζει γενικά την μορφή που συνήθως έχει μια καμπύλη θερμοκρασίας κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης, παρόλα αυτά το μέγιστό της είναι αρκετά μικρότερο από αυτό που απαιτείται για καλής ποιότητας, σταθεροποιημένο και χωρίς παθογόνους μικροοργανισμούς κόμποστ και το χρονικό διάστημα που το κομποστ βρίσκεται στη μέγιστη θερμοκρασία κρίνεται μικρό, σε σχέση με τις 3-5 μέρες που αναφέρονται στη βιβλιογραφία [59].



**Σχήμα 8.3.2** Μεταβολή της υγρασίας του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 2

Η αρχική υγρασία του υλικού που τοποθετήθηκε ήταν 58%, δηλαδή εντός των προβλεπόμενων από τη βιβλιογραφία ορίων για τη βέλτιστη απόδοση της διεργασίας της κομποστοποίησης ώστε να μην

εμποδίζεται η βέλτιστη διάχυση του οξυγόνου σε όλο τον όγκο του υλικού, αλλά και να ευνοείται η ανάπτυξη των μικροοργανισμών [179].

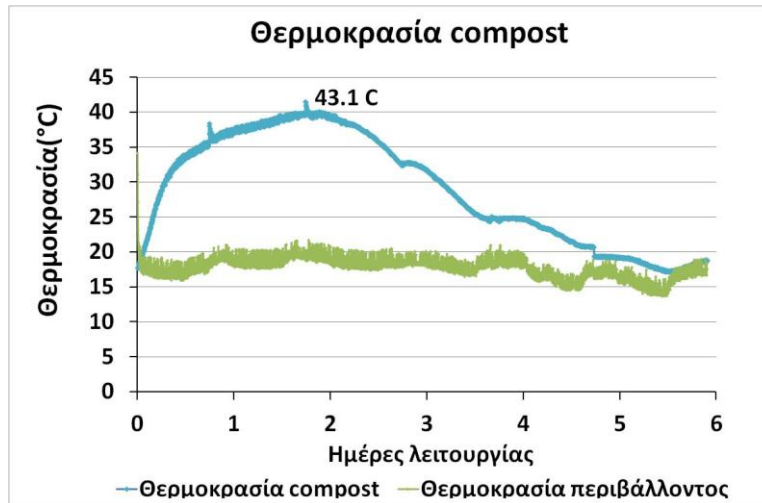
Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 8.3.2, η διακύμανση της υγρασίας παρουσιάζει συμπεριφορά παρόμοια με αυτή της θερμοκρασίας. Κατά τη θερμόφιλη φάση η υγρασία σημείωσε άνοδο στο 75% ενώ στη συνέχεια επανήλθε στα αρχικά επίπεδα. Τα επίπεδα υγρασίας της τάξης του 65% που παρατηρούνται κατά το μεγαλύτερο μέρος του πειράματος θεωρούνται οριακά ικανοποιητικά για την ομαλή διεξαγωγή της διεργασίας [73].

Ο πιθανότερος λόγος που το κομποστ μπορεί να παρουσίασε αύξηση υγρασίας, είναι η ανεπαρκής διάρκεια της θερμόφιλης φάσης, κατά την οποία γίνεται συνήθως η μεγαλύτερη εξάτμιση του περιεχόμενου νερού στο κόμποστ. Αυτό σε συνδυασμό με το γεγονός ότι το μέγιστο όριο της θερμοκρασίας ήταν αρκετά πιο χαμηλό από ό,τι παρατηρείται συνήθως στην κομποστοποίηση, μπορεί να συντέλεσαν στην μικρή αύξηση αντί για μείωση της υγρασίας. Σημαντικό ρόλο στη διακύμανση της υγρασίας του μίγματος έπαιξε και ο τύπος του κομποστοποιητή. Το γεγονός ότι ο κομποστοποιητής είναι κλειστού τύπου, οδηγεί σε συμπύκνωση των υδρατμών στο καπάκι και επιστροφή τους στο μίγμα.

Τα αυξημένα επίπεδα υγρασίας συνετέλεσαν σε χαμηλές τιμές του ελεύθερου αέριου χώρου του υλικού (9,6%) με αποτέλεσμα να δυσχεραίνονται οι συνθήκες αερισμού και διάχυσης του οξυγόνου στο εσωτερικό του μίγματος. Η επίδραση των παραμέτρων της υγρασίας και του ελεύθερου αέριου χώρου εξετάστηκε στο επόμενο πείραμα.

### **8.3.1.3 Πείραμα 3**

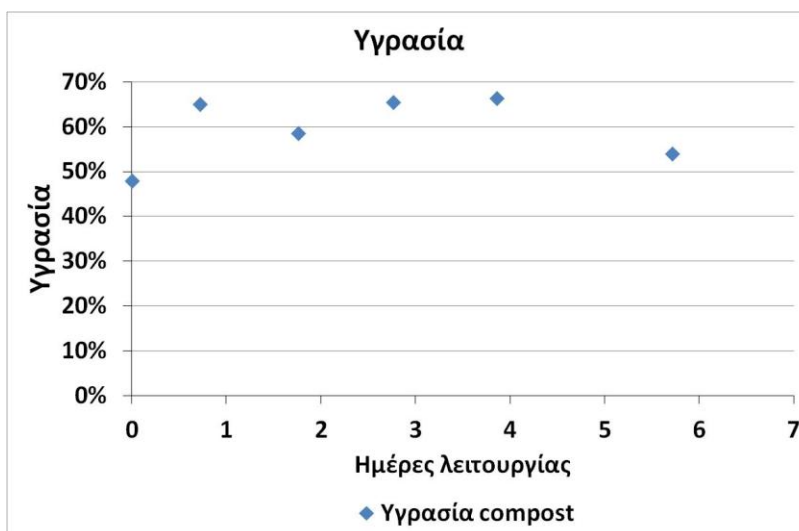
Κατά τον τρίτο πειραματικό κύκλο στόχος ήταν η μελέτη της επίδρασης της υγρασίας και κατ'επέκταση του ελεύθερου αέριου χώρου στο θερμοκρασιακό προφίλ της διεργασίας. Η τροφοδοσία αποτελούνταν από ξηραμένα πτηνοτροφικά απόβλητα υγρασίας 24% και στερεού ρεύματος προερχόμενου από το στάδιο προεπεξεργασίας με υγρασία 73,8%, σε αναλογία 1:1. Η υγρασία του μίγματος που εισήχθη στον κομποστοποιητή διαμορφώθηκε στο 48% και το αρχικό βάρος ήταν 6kg. Στο πείραμα αυτό μετρήθηκαν οι μεταβολές των παραμέτρων της θερμοκρασίας, της υγρασίας υλικού κ αέρα, του pH, των TS,VS και τα TN και TOC.



**Σχήμα 8.3.3** Μεταβολή της θερμοκρασίας του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 3

Στο Σχήμα 8.3.3 παρατηρείται ότι η θερμοκρασία φτάνει στη μέγιστη τιμή της, δηλαδή στους 43,1°C, με το πέρας ενός 24ωρου από την αρχή του πειράματος, ενώ από τη δεύτερη ημέρα και μετά αρχίζει η πτώση της προς τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, όπου παραμένει από την τέταρτη ημέρα και μετά.

Γενικά, η μορφή της καμπύλης της θερμοκρασίας είναι παρόμοια με αντίστοιχες καμπύλες θερμοκρασίας της κομποστοποίησης [180], αλλά η μικρή σχετικά τιμή της μέγιστης θερμοκρασίας και η αδυναμία του κομπόστ να συγκρατήσει την θερμότητα που παράγεται για αρκετό χρονικό διάστημα (τουλάχιστον 3-5 μέρες) ώστε να προλάβουν να αναπτυχθούν και να αναλάβουν δράση οι θερμοφιλοι μικροοργανισμοί, δείχνουν μη ομαλή διαδικασία κομποστοποίησης που οδηγεί σε χαμηλής ποιότητας, μη ωριμασμένο τελικό προϊόν [59].

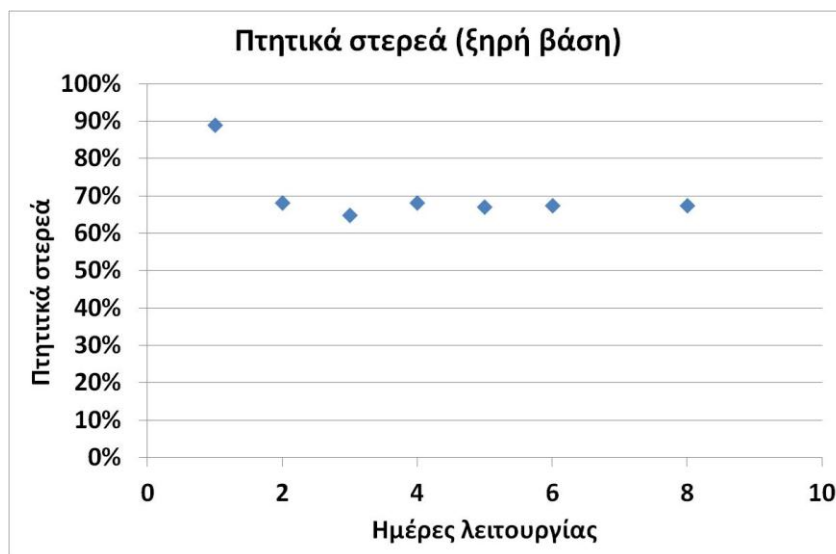


**Σχήμα 8.3.4** Μεταβολή της υγρασίας του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 3

Στο Σχήμα 8.3.4 παρουσιάζεται η διακύμανση της υγρασίας του υλικού στο εσωτερικό του κομποστοποιητή. Παρατηρείται άνοδος της υγρασίας του υλικού στο 66,4% με το πέρας ενός 24ώρου

από την αρχή της διεργασίας. Η αύξηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του αντιδραστήρα ακολουθείται πάλι από άνοδο της περιεχόμενης υγρασίας. Η υγρασία εν συνεχεία διατηρείται ουσιαστικά σταθερή με μικρές διακυμάνσεις γύρω από την τιμή 60%, δηλαδή σε φυσιολογικά για τη διεργασία επίπεδα [179].

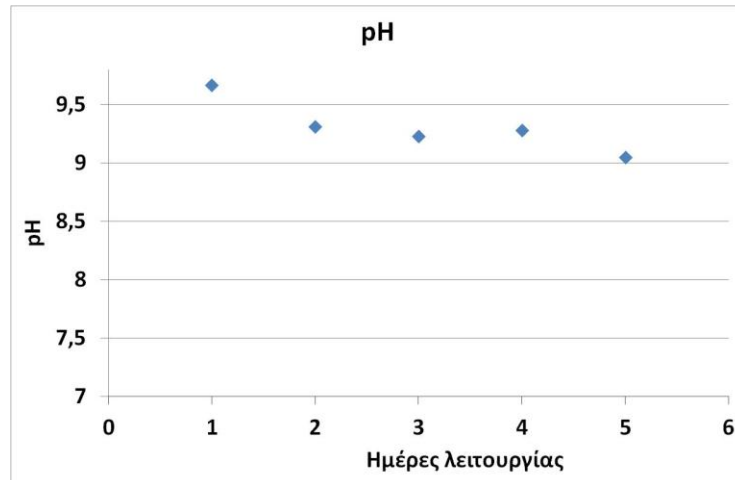
Παρά τις ευνοϊκές τιμές της υγρασίας και την εισαγωγή νέας πηγής βιοαποδομήσιμου άνθρακα, το θερμοκρασιακό προφίλ των πειραμάτων εξακολουθεί να κρίνεται ακατάλληλο για την παραγωγή ώριμου και φυτοθρεπτικού τελικού προϊόντος, κατάλληλου για χρήση ως εδαφοβελτιωτικό. Το γεγονός ότι η διεργασία δεν είναι πλήρης, είναι εμφανές και από τα αποτελέσματα των υπόλοιπων παραμέτρων που μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος. Στο Σχήμα 8.3.5 παρουσιάζεται η διακύμανση των πτητικών στερεών κατά τη διάρκεια των πρώτων ημερών του πειράματος.



**Σχήμα 8.3.5** Μεταβολή των πτητικών στερεών (VS) του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 3

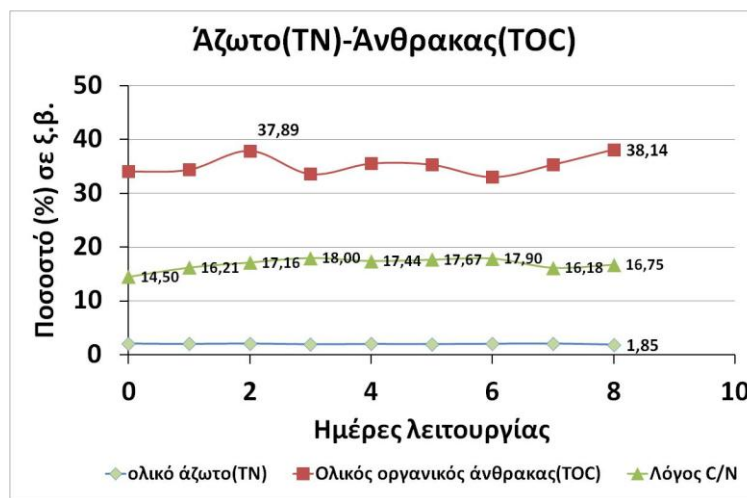
Οι υψηλές τιμές των πτητικών στερεών, που παρατηρούνται γενικά στο συγκεκριμένο είδος αποβλήτων [181] δείχνουν να μεταβάλλονται με μια μικρή πτωτική τάση προς το τέλος του πειράματος 3, αλλά γενικά διατηρούνται σε αρκετά υψηλά επίπεδα. Παρόλα αυτά, η μείωση των πτητικών στερεών θα έπρεπε να είναι αρκετά μεγαλύτερη ώστε να έχουμε μια ένδειξη σημαντικής αποδόμησης των οργανικών πτητικών ενώσεων.





**Σχήμα 8.3.6** Μεταβολή του pH του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 3

Το pH παρέμεινε πρακτικά σταθερό, περίπου στο 9, καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος, αν και θεωρείται πολύ αλκαλικό ώστε να υπάρξει ομαλή ανάπτυξη μικροοργανισμών. Είναι αρκετά μεγαλύτερο του μέγιστου ορίου για περιβάλλον κομποστοποίησης (8,5), γεγονός που μπορεί να σημαίνει μεγάλη συγκέντρωση οργανικού αζώτου στο αρχικό υλικό, που κατά τη διάρκεια του πειράματος μετατράπηκε σε αμμωνία [71]. Η χαρακτηριστική οσμή που αναδύεται από το υλικό καθώς και η υψηλή φυτοτοξικότητα που μετρήθηκε στο τέλος του πειράματος δείχνουν ότι υπήρξαν απώλειες αζώτου που μετατράπηκαν σε αέρια αμμωνία, κάτι που πρέπει γενικά να αποφεύγεται, καθώς η συγκέντρωση αζώτου σε μορφή ιόντων και ανόργανων αλάτων δίνει υψηλής ποιότητας, φυτοθρεπτικό κομπόστ, ενώ αντίθετα υψηλή συγκέντρωση αμμωνίας στο τελικό προϊόν είναι τοξική για τα φυτά [182].



**Σχήμα 8.3.7** Μεταβολή του αζώτου, του ολικού οργανικού άνθρακα και του λόγου C/N του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 3

Το ολικό άζωτο (TN) φαίνεται να παραμένει σταθερό σε όλη τη διάρκεια του πειράματος και γενικά δεν ξεπερνάει το 2,5% σε ξηρή βάση με τη μέγιστη τιμή του να είναι στο αρχικό δείγμα (2,27%) [183]. Ο

ολικός οργανικός άνθρακας (TOC) φαίνεται να είναι επίσης σε σταθερά επίπεδα. Η μέγιστη τιμή του είναι 38% σε ξηρή βάση την 8<sup>η</sup> μέρα και η ελάχιστη τιμή είναι 33,04% την 6<sup>η</sup> μέρα. Ο οργανικός άνθρακας συνήθως καταναλώνεται από τους μικροοργανισμούς στην αερόβια κομποστοποίηση και μετατρέπεται σε ανόργανο, αλλά στις μετρήσεις του συγκεκριμένου πειράματος δεν φαίνεται να καταναλώνεται. Αυτή είναι μία ακόμη ένδειξη, σε συνδυασμό με την μικρή αύξηση της θερμοκρασίας, ότι οι οργανικές ουσίες που περιέχονται στο υλικό δεν αποδομήθηκαν από τους μικροοργανισμούς ώστε να προκύψει ένα σταθερό τελικό προϊόν [70].

Ο λόγος C/N παρουσιάζει κι αυτός πολύ μικρή μεταβολή με μέγιστη τιμή 18/1 την 4<sup>η</sup> μέρα και ελάχιστη τιμή 16,2/1 την 7<sup>η</sup> μέρα. Ο λόγος αυτός είναι αρκετά μικρότερος σε σχέση με τα όρια που αναφέρονται στη βιβλιογραφία (25/1 < C/N < 35/1), ώστε να υπάρχει επάρκεια θρεπτικών για να συμβεί η ανάπτυξη των μικροοργανισμών στο σωρό του κόμποστ [184].

Το πρόβλημα αυτό έγινε προσπάθεια να επιλυθεί στα επόμενα πειράματα προσθέτοντας χοντρόκοκκο πριονίδι, ένα υλικό πλούσιο σε εύκολα βιοαποδομήσιμο άνθρακα αλλά φτωχό σε άζωτο, ώστε να εξισορροπηθεί η τιμή του λόγου C/N [59].

#### **8.3.1.4 Πείραμα 4**

Κατά τον τέταρτο πειραματικό κύκλο, εκτός από το στερεό ρεύμα των κτηνοτροφικών απόβλητων που προέρχονταν από το στάδιο προεπεξεργασίας και τα φρέσκα απόβλητα πτηνοτροφείου, προστέθηκε στο μίγμα ξύσμα ξύλου (πριονίδι) που λειτουργούσε ως πρόσθετο για την ενίσχυση του ελεύθερου αέριου όγκου (F.A.S.) μέσα στο κόμποστ (bulking agent). Το αρχικό βάρος του μίγματος που τοποθετήθηκε στον κομποστοποιητή ήταν 3kg, λόγω της αύξησης του όγκου ανά μονάδα μάζας. Στο συγκεκριμένο πείραμα δεν εμφανίστηκε καθόλου μεταβολή της θερμοκρασίας οπότε θεωρείται ότι ουσιαστικά δεν υπήρξε έναρξη της διαδικασίας της κομποστοποίησης ώστε να μετρηθούν και οι υπόλοιποι παράγοντες.

Οι αρχικές συνθήκες του πειράματος 4 ήταν εντός των βέλτιστων κατά τη βιβλιογραφία ορίων. Ο ελεύθερος αέριος χώρος αυξήθηκε σημαντικά με την προσθήκη του διογκωτικού παράγοντα, η υγρασία ήταν 56%, ενώ ρυθμίστηκε και ο λόγος C/N στην ικανοποιητική αναλογία 25/1. Παρά το γεγονός αυτό, η θερμοκρασία δε σημείωσε μεταβολή. Η παράμετρος που πιθανότατα έπαιξε καθοριστικό ρόλο στο θερμοκρασιακό προφίλ ήταν πιθανότατα η μικρή ποσότητα του υλικού, γεγονός που δυσχέρανε τη δυνατότητα συγκράτησης της θερμότητας στο εσωτερικό του. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκε όπως προαναφέρθηκε ένα ενδιάμεσο πείραμα για να διαπιστωθεί η επίδραση της μάζας και κατ' επέκταση του όγκου του μίγματος στη θερμοκρασία της διεργασίας.

#### **8.3.1.5 Ενδιάμεσο πείραμα 4'**

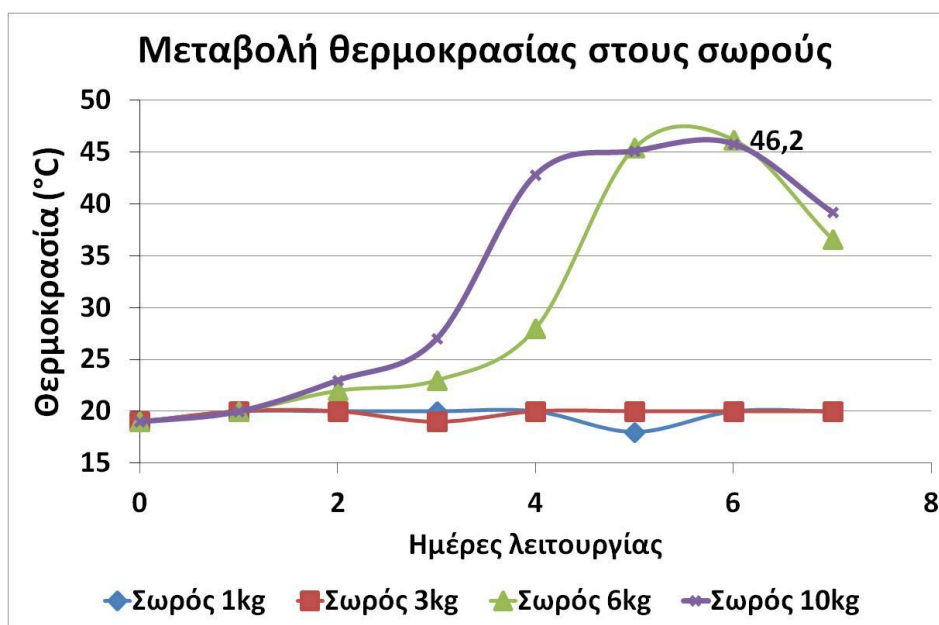
Το συγκεκριμένο πείραμα πραγματοποιήθηκε εκτός του κομποστοποιητή. Στόχος του ήταν η διερεύνηση της σχέσης του όγκου του μίγματος με τη δυνατότητα αύξησης της θερμοκρασίας. Για το σκοπό αυτό τοποθετήθηκαν σωροί των 1kg, 3kg, 6kg και 10kg σε δοχεία από PVC, η άνω επιφάνεια των οποίων ήταν ανοικτή στην ατμόσφαιρα. Η ανάδευση πραγματοποιείτο μία φορά την ημέρα για 7 μέρες. Οι σωροί ήταν της ίδιας σύστασης σε απόβλητα και πριονίδι σε σχέση με τον πειραματικό κύκλο 4 και είχαν περίπου την ίδια υγρασία, δηλαδή 61% . Η μόνη παράμετρος που μετρήθηκε

(χειρωνακτικά) κατά τη διάρκεια του πειράματος σε όλους τους σωρούς ήταν η θερμοκρασία, οι τιμές της οποίας παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 8.3.1** Διακύμανση της μέσης θερμοκρασίας ανά όγκο σωρού στη διάρκεια των 7 ημερών

Ημέρα	Θερμοκρασία (°C)			
	1kg	3kg	6kg	10kg
0	19	19	19	19
1	20	20	20	20
2	20	20	22	23
3	20	19	23	27
4	20	20	28	42,8
5	18	20	45,4	45,1
6	20	20	46,2	45,8
7	20	20	36,6	39,2

Τα δεδομένα της θερμοκρασίας ανά σωρό, παρουσιάζονται και στο συγκριτικό Σχήμα 8.3.8.



**Σχήμα 8.3.8** Μεταβολή της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια του πειράματος 4'

Τα αποτελέσματα του πειράματος καταδεικνύουν την άμεση εξάρτηση της θερμοκρασιακής μεταβολής του υλικού σε σχέση με την αρχική του μάζα. Στους σωρούς των 1kg και 3kg δεν παρατηρείται θερμοκρασιακή μεταβολή σε όλη τη διάρκεια του πειράματος, ενώ στους σωρούς των 6kg και 10kg η θερμοκρασία φτάνει στους 46,2 και 45,8 °C αντίστοιχα. Η αύξηση της μάζας του σωρού οδηγεί ταχύτερα σε ανοδική τάση της θερμοκρασίας, καθώς στο σωρό των 10kg η ανοδική τάση παρατηρείται στο τέλος της 2<sup>ης</sup> ημέρας από την εκκίνηση, ενώ στο σωρό των 6kg παρατηρείται από το τέλος της 3<sup>ης</sup> ημέρας.

Τέλος, ο σωρός των 10kg επέδειξε ικανότητα διατήρησης της θερμοκρασίας στη θερμόφιλη περιοχή για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από αυτό του σωρού των 6kg. Η απαίτηση σε μεγάλο όγκο κομπόστ ώστε να επιτευχθεί η θερμόφιλη φάση έχει αναδειχθεί σε παρόμοιες μελέτες [185].

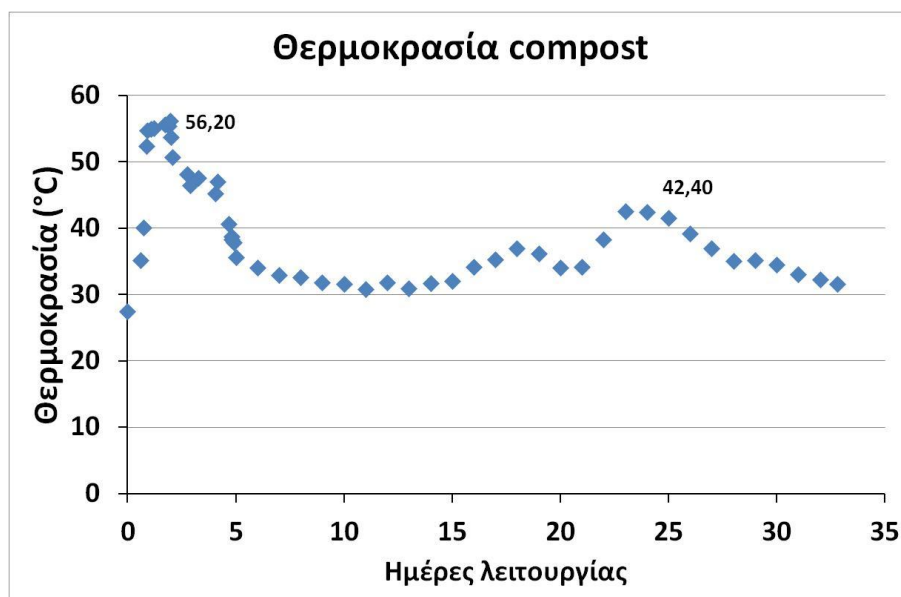
Τα αποτελέσματα του ενδιάμεσου πειράματος 4' αξιοποιήθηκαν κατά το σχεδιασμό του επόμενου πειραματικού κύκλου, με στόχο τη βελτίωση του θερμοκρασιακού προφίλ της διεργασίας στον κομποστοποιητή.

#### 8.3.1.6 Πείραμα 5

Κατά τον πέμπτο πειραματικό κύκλο τοποθετήθηκε στον κομποστοποιητή μίγμα αποτελούμενο από το στερεό υπόλειμμα του σταδίου της προεπεξεργασίας των κτηνοτροφικών αποβλήτων με πριονίδι, σε αναλογία 5/2 κατά βάρος. Η υγρασία του μίγματος ήταν 56% και η αναλογία C/N ήταν ίση με 25/1.

Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα του ενδιάμεσου πειράματος για τη διερεύνηση της σχέσης της μάζας του μίγματος με την τάση αύξησης και τη δυνατότητα συγκράτησης της θερμοκρασίας στη θερμόφιλη περιοχή, η συνολική μάζα του μίγματος που τοποθετήθηκε στον κομποστοποιητή ήταν 6kg. Ο διπλασιασμός της μάζας του μίγματος σε σχέση με το πείραμα 4 συνετέλεσε σε δυσκολία του αυτόματου συστήματος μηχανικής ανάδευσης στο εσωτερικό του αντιδραστήρα να αναδεύσει το υλικό, και γ'αυτό προτιμήθηκε η χειροκίνητη ανάδευσή του μία φορά ανά 24ωρο.

Κατά την διάρκεια παραμονής του υλικού στον αντιδραστήρα μετρήθηκαν οι εξής παράμετροι στο στερεό δείγμα: pH, υγρασία, TS, VS, και μετά το πέρας της διεργασίας η φυτοτοξικότητα/φυτοθεραπευτικότητα του σταθεροποιημένου υλικού. Τα παραπάνω μεγέθη και οι μεταβολές τους παρουσιάζονται στα σχήματα που ακολουθούν.

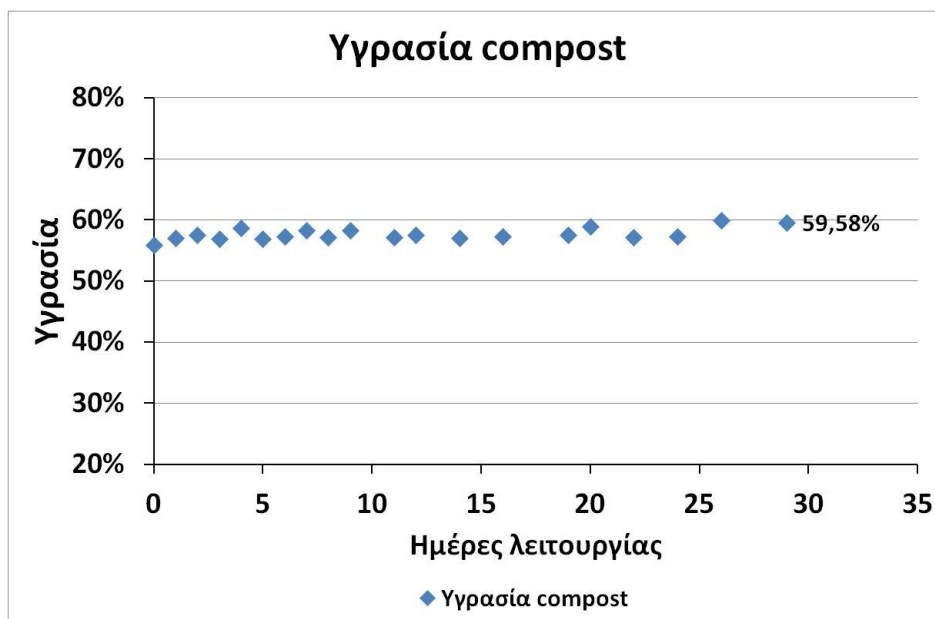


Σχήμα 8.3.9 Μεταβολή της θερμοκρασίας του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 5

Η θερμοκρασία του υλικού παρουσίασε άμεσα αυξητική τάση (στο τέλος της πρώτης ημέρας λειτουργίας) και μάλιστα ταχύτερα σε σχέση με το σωρό των 6kg του πειράματος 4'. Ο ρυθμός αύξησης

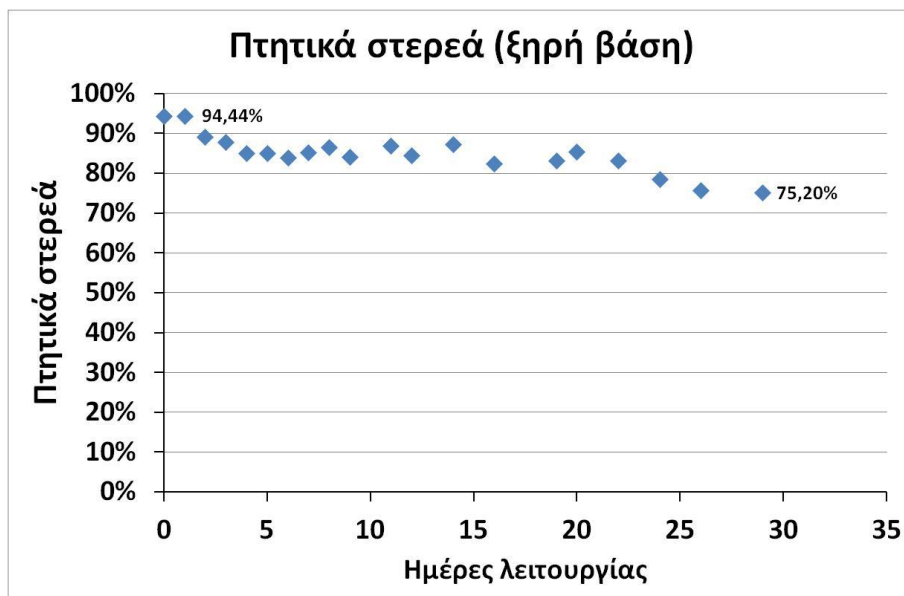
της θερμοκρασίας ήταν επίσης μεγαλύτερος σε σχέση με το ενδιάμεσο πείραμα για την ίδια μάζα υλικού, ενώ υψηλότερη ήταν και η μέγιστη θερμοκρασία που επετεύχθη (56,2°C). Η συμπεριφορά της θερμοκρασίας πιθανότατα οφείλεται στις καλύτερες συνθήκες μόνωσης που επικρατούν στον κομποστοποιητή σε σχέση με τις συνθήκες υπό τις οποίες πραγματοποιήθηκε η διεργασία στο ενδιάμεσο πείραμα, καθώς και στις καλύτερες συνθήκες αερισμού. Στο ενδιάμεσο πείραμα ο αερισμός επιτυγχάνεται μέσω της ανάδευσης, ενώ στον κομποστοποιητή υπάρχει συνεχής παροχή αέρα.

Τη θερμόφιλη φάση, η διάρκεια της οποίας ήταν συνολικά 4 ημέρες, ακολούθησε η ομαλή επαναφορά της θερμοκρασίας του μίγματος σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η θερμοκρασία του μίγματος παρουσίασε εκ νέου αυξητική τάση μέχρι μέγιστης τιμής ίσης με 42,4°C μετά από 20 ημέρες λειτουργίας. Αιτία της συμπεριφοράς αυτής είναι πιθανότατα η προσωρινή περιορισμένη πτώση των επιπέδων της υγρασίας του μίγματος, που ευνόησε τις συνθήκες αερισμού με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν ευνοϊκές συνθήκες για την εκ νέου επικράτηση θερμόφιλων βακτηρίων στο μικροβιακό πληθυσμό.



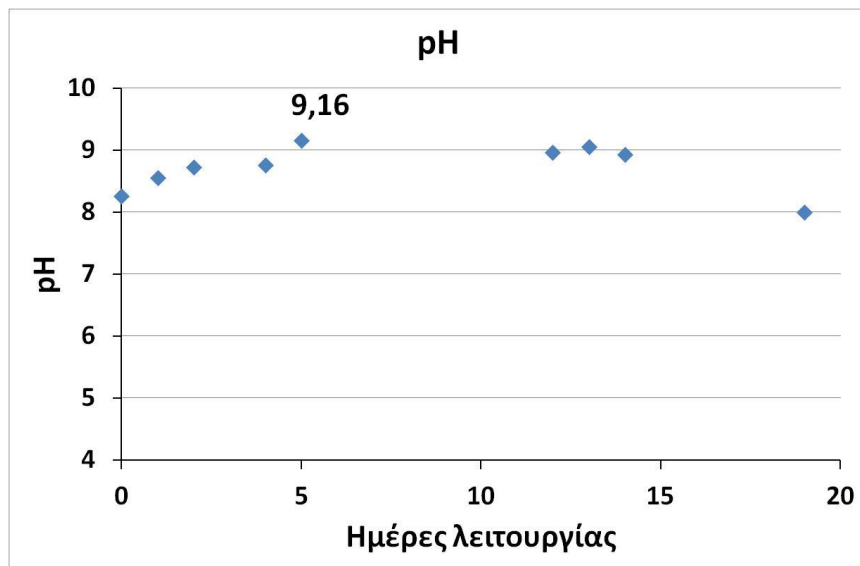
Σχήμα 8.3.10 Μεταβολή της υγρασίας του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 5

Η υγρασία του μίγματος παρέμεινε πρακτικά σταθερή, με μικρές διακυμάνσεις σε όλη τη διάρκεια της διεργασίας. Η παραγωγή H<sub>2</sub>O από τους μικροοργανισμούς, η διαφυγή της υγρασίας σε μορφή υδρατμών από το μίγμα ιδιαίτερα κατά τη θερμόφιλη φάση, η παροχή υγρασίας από τον ατμοσφαιρικό αέρα κατά τον αερισμό, καθώς και η συμπύκνωση του νερού στο καπάκι του κομποστοποιητή και η επαναφορά του στο μίγμα φαίνονται να βρίσκονται σε ισορροπία, διατηρώντας τα επίπεδα της υγρασίας στο μίγμα σε ευνοϊκά για την αερόβια κομποστοποίηση επίπεδα.



**Σχήμα 8.3.11** Μεταβολή των πτητικών στερεών (VS) του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 5

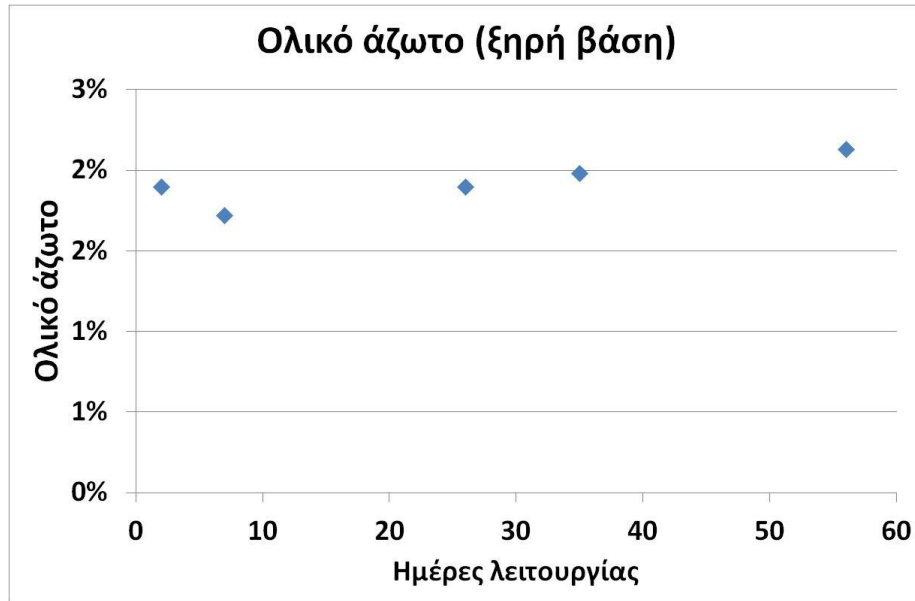
Τα ποσοστά των πτητικών στερεών σε ξηρή βάση σημείωσε μείωση κατά τη διάρκεια της διεργασίας, ξεκινώντας από αρχική τιμή 94,4% και καταλήγοντας στο 75,2%. Η πτώση των VS είναι αναμενόμενη καθώς οφείλεται κυρίως στη μείωση των βιοαποδομήσιμων ενώσεων, που συνηθέστερα είναι και πτητικές.



**Σχήμα 8.3.12** Μεταβολή του pH του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 5

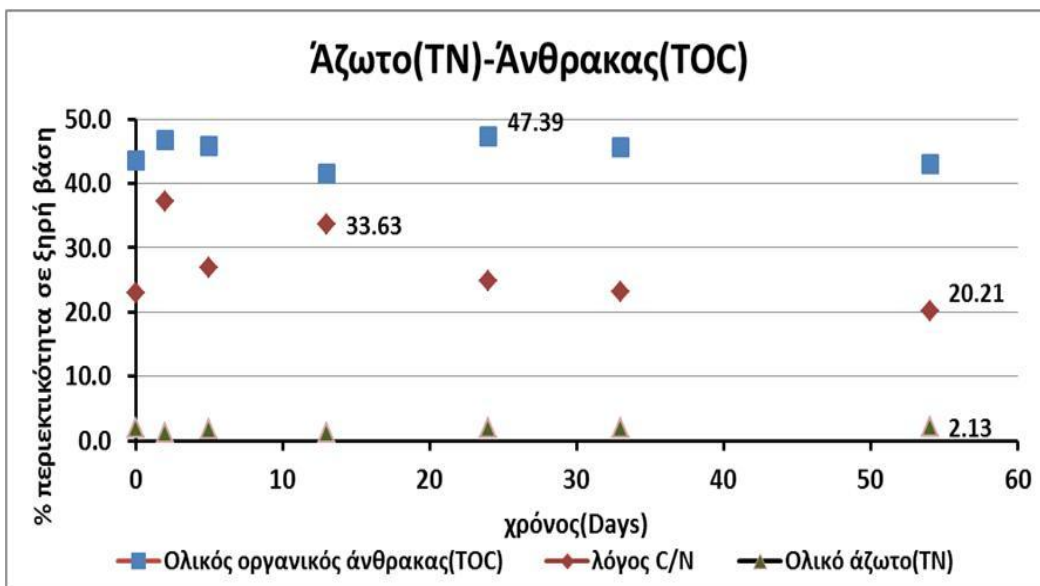
Στο Σχήμα 8.3.12 παρουσιάζονται οι μεταβολές του pH κατά τη διάρκεια του πειράματος 5. Το pH του μίγματος όταν εισήχθη στον αντιδραστήρα ήταν 8,26 και κατά τη διάρκεια της θερμοφιλής φάσης παρουσίασε αυξητική τάση, έως ότου σταθεροποιηθεί με μικρές διακυμάνσεις γύρω από την τιμή 9, με μέγιστη τιμή το 9,16 (5η ημέρα λειτουργίας). Κατά την πορεία της ψυχρόφιλης φάσης, το pH επανήλθε

στα αρχικά επίπεδα, προσεγγίζοντας το άνω όριο των τιμών που ορίζονται από τη βιβλιογραφία ως βέλτιστες για τη διεργασία (5 έως 8).



**Σχήμα 8.3.13** Μεταβολή του ολικού αζώτου (TN) του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 5

Στο Σχήμα 8.3.13 απεικονίζεται η μεταβολή του ολικού αζώτου που περιέχεται στο υπόστρωμα. Οι τιμές κυμαίνονται από 1,23% (13η ημέρα) μέχρι 2,13% (55η ημέρα) χωρίς ωστόσο αυτή να θεωρείται σημαντική μεταβολή. Επίσης οι τιμές αυτές είναι χαμηλές σε σχέση με την αναμενόμενη περιεκτικότητα σε άζωτο των ζωικών αποβλήτων, που φτάνει σε κάποιες περιπτώσεις και το 5% [182]. Η έλλειψη αυτή σε άζωτο μπορεί να οφείλεται σε μετατροπή του αμμωνιακού αζώτου σε αέρια αμμωνία, πράγμα που είναι πολύ πιθανό να συνέβη, δεδομένου του πολύ αλκαλικού περιβάλλοντος ( $pH \sim 9$ ) και της υψηλής θερμοκρασίας. Η χαρακτηριστική οσμή της αμμωνίας, που ήταν αρκετά έντονη κατά τις πρώτες μέρες του πειράματος, υποδεικνύει ότι αυτή η μετατροπή είναι ακόμα πιο πιθανή [182].



Σχήμα 8.3.14 Μεταβολή του ολικού οργανικού άνθρακα (TOC) του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 5

Ο οργανικός άνθρακας (TOC) που περιέχεται στο κόμποστ του πειράματος 5 μετρήθηκε ως η διαφορά ολικού άνθρακα από τον ανόργανο άνθρακα και οι τιμές του σε σχέση με τον χρόνο πειράματος απεικονίζονται στο Σχήμα. Με μέγιστη τιμή το 48,4% (ημέρα 2η) και ελάχιστη το 44,5% (ημέρα 54η) ο ολικός οργανικός άνθρακας (TOC) δείχνει επίσης να μην μεταβάλλεται σημαντικά κατά την διάρκεια του πειράματος. Οι τιμές του είναι αρκετά υψηλές και ειδικά συγκρινόμενες με τον ανόργανο άνθρακα που βρίσκεται στο ποσοστό του 2% περίπου, γεγονός αναμενόμενο για κτηνοτροφικά απόβλητα [181].

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 8.3.14 επαληθεύεται επίσης η αρχική απαίτηση που τέθηκε για λόγο άνθρακα/άζωτο=25/1, η οποία είχε αρχικά υπολογιστεί με τιμές από την σχετική βιβλιογραφία [186].

Εν συνεχεία, το τελικό προϊόν της διεργασίας υπεβλήθη σε έλεγχο για τον προσδιορισμό της φυτοτοξικότητας και της φυτοθρεπτικότητάς του. Ο σχετικός δείκτης βλάστησης μετρήθηκε ίσος με 94,6% ,δηλαδή το τελικό προϊόν είναι κατά περίπου 95% μη φυτοτοξικό. Γενικά, ένας σχετικός δείκτης βλάστησης πάνω από 85% θεωρείται ότι αντιστοιχεί σε ένα ώριμο, πολύ υψηλής ποιότητας κόμποστ, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [187], [188].

Ο σχετικός δείκτης ανάπτυξης μετρήθηκε ίσος με 82,3%, δηλαδή το τελικό προϊόν είναι κατά 82% περίπου φυτοθρεπτικό, επιβεβαιώνοντας το γεγονός ότι το τελικό προϊόν είναι υψηλής ποιότητας.

Με βάση τα αποτελέσματα του προσδιορισμού του σχετικού δείκτη βλάστησης και του σχετικού δείκτη ανάπτυξης, ο δείκτης ανάπτυξης υπολογίστηκε ίσος με 77,8%. Ο δείκτης ανάπτυξης είναι ουσιαστικά μία ένδειξη της ωριμότητας και καταλληλότητας του κόμποστ για εφαρμογή σε καλλιέργειες και γενικά ένας δείκτης ανάπτυξης άνω του 60% θεωρείται πολύ ικανοποιητικός, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [123], [124].



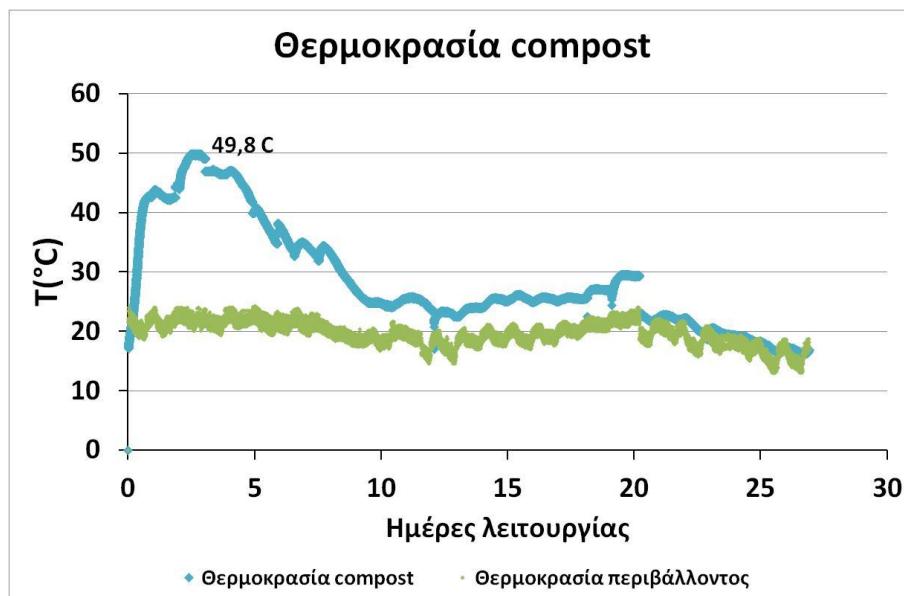
## 8.3.2 Αποτελέσματα κύκλων πειραμάτων με πρώτη ύλη τα ζυμώσιμα οικιακά απορρίμματα

### 8.3.2.1 Πείραμα 6

Από τον έκτο πειραματικό κύκλο της κομποστοποίησης, πραγματοποιήθηκε αλλαγή του υποστρώματος από μίγμα κτηνοτροφικών αποβλήτων σε FORBI. Πιο συγκεκριμένα, το υλικό που τοποθετήθηκε στον κομποστοποιητή ήταν η στερεό υπόλειμμα που προέκυψε από το στάδιο διαχωρισμό της τροφοδοσίας αναμειγμένο με πριονίδι (πρόσθετος παράγοντας) σε αναλογία 5:2 κατά βάρος. Η αναλογία ανάμειξης ήταν ίση με αυτή του πειράματος 5 της κομποστοποίησης των κτηνοτροφικών, στο οποίο παρατηρήθηκε το πιο επιτυχημένο θερμοκρασιακό προφίλ.

Για την επίτευξη επιπέδων υγρασίας αντίστοιχων με το επιτυχημένο πείραμα 5, το στερεό υπόλειμμα του σταδίου εκχύλισης του FORBI (υγρασία 72%) αναμείχθηκε με πριονίδι (υγρασία 4%) σε αναλογία 5/2 κατά βάρος, και προέκυψε μίγμα με μέση υγρασία ίση με 53,67%, δηλαδή στα επίπεδα της μέσης υγρασίας του πειράματος 5. Η ποσότητα του μίγματος που εισήχθη στον κομποστοποιητή ήταν ίση με 6kg.

Το θερμοκρασιακό προφίλ του υποστρώματος σε σχέση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.3.15.

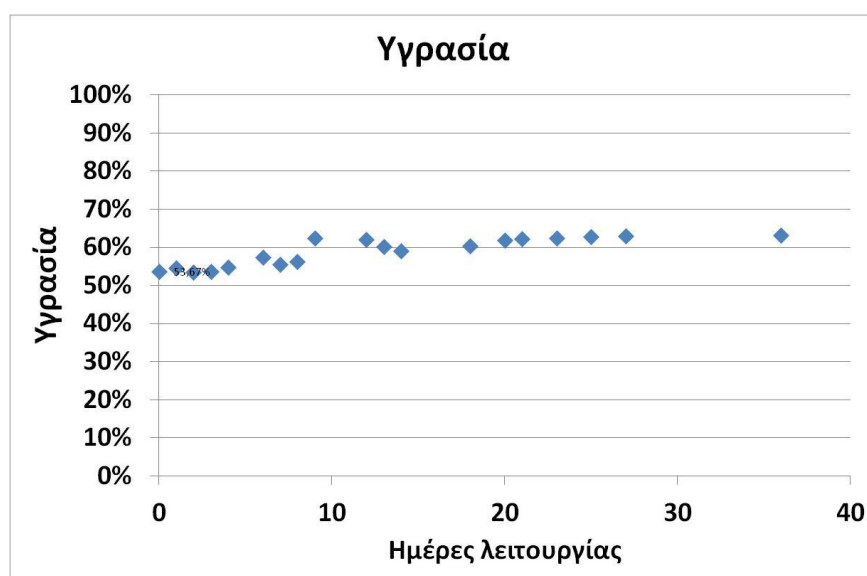


Σχήμα 8.3.15 Μεταβολή της θερμοκρασίας του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 6

Το θερμοκρασιακό προφίλ του πρώτου πειράματος με υπόστρωμα το στερεό υπόλειμμα από την εκχύλιση του FORBI παρουσίασε παρεμφερές θερμοκρασιακό προφίλ με το πείραμα 5, με υπόστρωμα το στερεό υπόλειμμα από την εκχύλιση των κτηνοτροφικών αποβλήτων. Παρά την αλλαγή του υποστρώματος, η επιλογή αντίστοιχων φυσικοχημικών συνθηκών στην αρχή και κατά τη λειτουργία του πειράματος οδήγησαν σε ανάλογη αύξηση της θερμοκρασίας και διατήρηση της θερμοκρασίας. Η

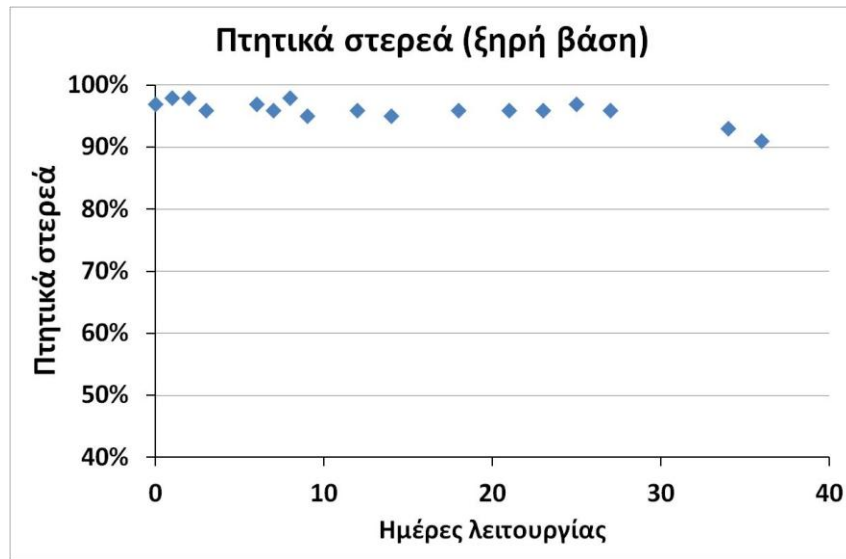
μέγιστη θερμοκρασία που παρατηρήθηκε ήταν ίση με 50°C και η διάρκεια της θερμοφιλής φάσης ήταν ίση με περίπου 4 ημέρες.

Η μόνη αξιοσημείωτη διαφορά σε σχέση με το πείραμα 5 είναι η διατήρηση της θερμοκρασίας σε υψηλότερα επίπεδα από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος (~25-35°C) μέχρι την 10η ημέρα, ουσιαστικά δηλαδή η ο ρυθμός μείωσης είναι μικρότερος, γεγονός επιθυμητό για την καλύτερη ωρίμανση του κομπόστ. Η διαφορά αυτή μπορεί να οφείλεται στην διαφορετική φύση του υλικού, το οποίο ήταν αρκετά πιο όξινο σε σχέση με τα κτηνοτροφικά απόβλητα (αρχικό pH=5,5 Σχήμα). Σε συνθήκες όξινου pH, παρατηρείται συχνά καθυστέρηση της έναρξης της διεργασίας ή χρονική μετατόπιση της καμπύλης [189], [190].



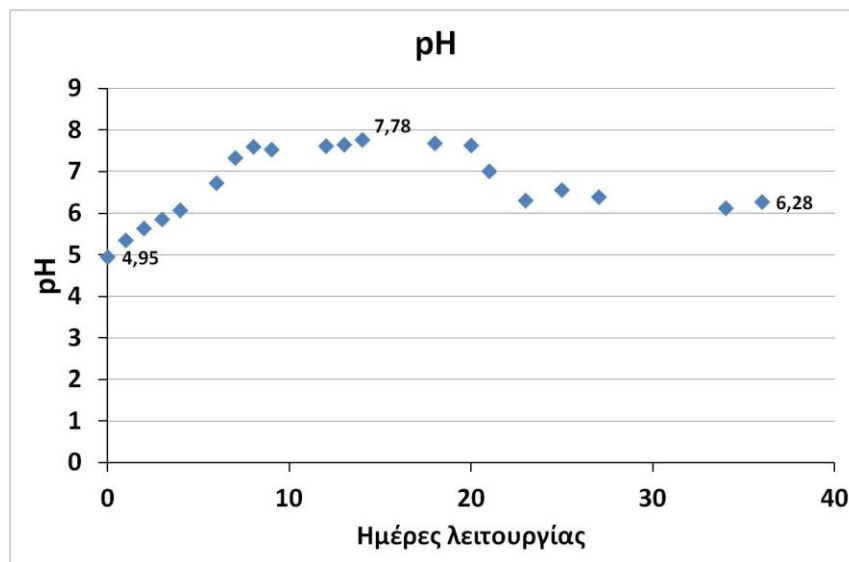
Σχήμα 8.3.16 Μεταβολή της υγρασίας του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 6

Η υγρασία του υποστρώματος είχε ελαφρά ανοδική τάση και κυμάνθηκε (Σχήμα 8.3.16) από τα επίπεδα του 53,7% (ημέρα 0) μέχρι το 63,2% (ημέρα 36η). Η σταδιακή αύξηση της υγρασίας, φαινόμενο που μάλλον οφείλεται στο νερό που παράγεται κατά τον μεταβολισμό των βιοαποδομήσιμων συστατικών του κόμποστ από τους μύκητες-ακτινομύκητες. Συνήθως η υγρασία που παράγεται κατά τον μεταβολισμό των βιοαποδομήσιμων συστατικών του κόμποστ από τους μύκητες-ακτινομύκητες εξισορροπείται με την εξάτμιση που συμβαίνει κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας, φαινόμενο που δεν παρατηρήθηκε στη συγκεκριμένη περίπτωση. Πιθανότατα η μικρή διάρκεια της θερμοφιλής φάσης καθώς και η μέγιστη θερμοκρασία που ήταν οριακά μικρότερη των 50°C δεν επέτρεψε στα επίπεδα της υγρασίας να μειωθούν με την πάροδο του χρόνου [182].



**Σχήμα 8.3.17** Μεταβολή των πτητικών στερεών (VS) του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 6

Το ποσοστό των VS κινήθηκε σε υψηλά επίπεδα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.3.17, δηλαδή πάνω από το 90% των συστατικών του κόμποστ είναι βιοαποδομήσιμα. Οι τιμές των VS κυμαίνονται στα ίδια περίπου υψηλά επίπεδα σε όλη την διάρκεια της κομποστοποίησης με μια μικρή πτωτική τάση που είναι αναμενόμενη, καθώς οι βιοαποδομήσιμες ενώσεις μετατρέπονται σε σταθερές, μη πτητικές ενώσεις άνθρακα (χουμικά οξέα, φουλβικά οξέα, χουμίνες).



**Σχήμα 8.3.18** Μεταβολή του pH και της αγωγιμότητας του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 6

Το pH του υλικού ξεκινά από 4,95, που θεωρείται γενικά οριακή τιμή για ικανοποιητικές συνθήκες κομποστοποίησης, αλλά από την 8η μέχρι και την 20η μέρα σταθεροποιείται κοντά στο 7. Μετά την 20η μέρα και μέχρι το τέλος της διαδικασίας το pH μειώνεται μέχρι την τιμή 6,28, η οποία είναι μέσα στα όρια του αποδεκτού [190].

Η χαμηλή τιμή του pH στην αρχή της διαδικασίας και η πτώση του μετά την 20η μέρα οφείλεται κατά βάση στο υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την κομποστοποίηση που προερχόταν πλέον από απορρίμματα κουζίνας (food waste) μαγειρεμένα και ωμά. Βιβλιογραφικά τα μικτά απορρίμματα κουζίνας, που μπορεί να αποτελούνται από μίγμα υπολειμμάτων φρούτων, λαχανικών και μαγειρεμένων τροφών, έχουν αρκετά όξινο pH [189].

Αυτή είναι και η βασικότερη διαφορά που παρατηρείται σε σχέση με τα προηγούμενα πειράματα στα οποία, παρόλο που χρησιμοποιήθηκε ως βάση τελείως διαφορετικό υλικό, παρουσίασαν παρόμοια συμπεριφορά ως αφορά στις παραμέτρους της θερμοκρασίας, της υγρασίας και των Πτητικών Στερεών (VS).

Εν συνεχεία, το τελικό προϊόν της διεργασίας υπεβλήθη σε έλεγχο για τον προσδιορισμό της φυτοτοξικότητας και της φυτοθεραπευτικότητάς του. Ο σχετικός δείκτης βλάστησης μετρήθηκε ίσος με 95,6%, δηλαδή το τελικό προϊόν είναι κατά 95,6% μη φυτοτοξικό, άρα σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, το προϊόν θεωρείται ώριμο και υψηλής ποιότητας [187], [188].

Ο σχετικός δείκτης ανάπτυξης μετρήθηκε ίσος με 80.1%, δηλαδή το τελικό προϊόν είναι κατά περίπου 80% φυτοθεραπευτικό, γεγονός που αποτελεί επίσης ένδειξη για την υψηλή ποιότητα του κόμπουστ.

Τέλος, ο δείκτης ανάπτυξης υπολογίστηκε ίσος με 76.73% γεγονός που αποδεικνύει ότι το στερεό υπόλειμμα από την εκχύλιση του FORBI μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή υψηλής ποιότητας εδαφοβελτιωτικού [123], [124], ταυτόχρονα με την παραγωγή βιοαερίου από το εκχύλισμά του.

### **8.3.2.2 Πείραμα 7**

Στο πείραμα 6 αποδείχθηκε ότι το στερεό υπόλειμμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή εδαφοβελτιωτικού υψηλής ποιότητας, στα πλαίσια της ολοκληρωμένης του διαχείρισης. Επιπλέον, όπως παρουσιάζεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 7, στην πειραματική διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης επιχειρήθηκε η παραγωγή βιοαερίου από το αιώρημα του FORBI και παραλήφθηκε το στάδιο της εκχύλισης. Με αυτό ως δεδομένο, κατά τον έβδομο πειραματικό κύκλο χρησιμοποιήθηκε ως υπόστρωμα το FORBI στην αρχική του μορφή, χωρίς το στάδιο του εκχυλίσματος, με σκοπό κυρίως τη μελέτη του θερμοκρασιακού προφίλ και τη μεταβολή του σε σχέση με τις βασικές φυσικοχημικές παραμέτρους της διεργασίας.

Το FORBI που χρησιμοποιήθηκε είχε αρχική υγρασία 1,26% και επιχειρήθηκε η κομποστοποίησή του με αρχικά επίπεδα υγρασίας της τάξης του 50% (με προσθήκη νερού και ανάμειξη για ομογενοποίηση), με δεδομένο ότι κατά τους προηγούμενους πειραματικούς κύκλους το θερμοκρασιακό προφίλ ήταν ικανοποιητικό όταν η υγρασία ρυθμιζόταν σε αυτά τα επίπεδα. Επίσης, επιχειρήθηκε η κομποστοποίηση του FORBI χωρίς την προσθήκη πρόσθετου διογκωτικού παράγοντα.

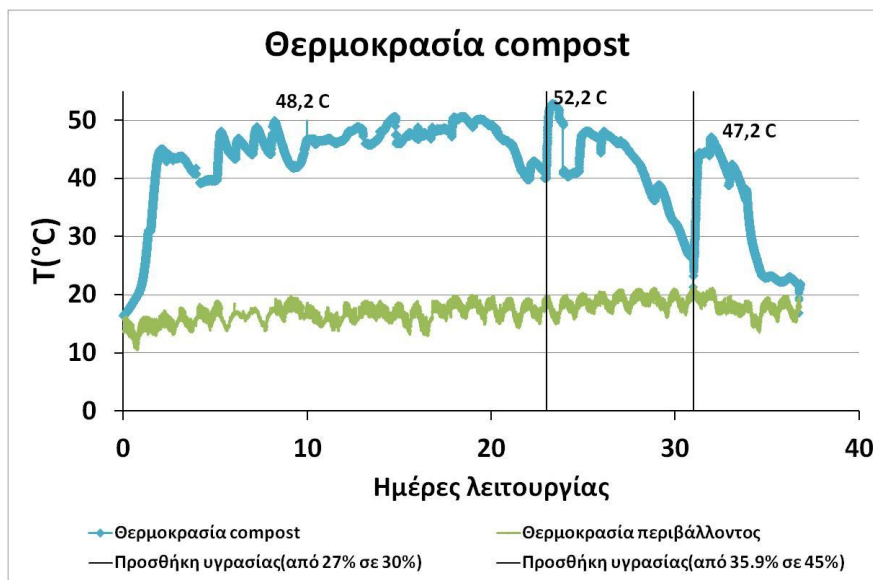
Το μίγμα νερού και FORBI (συνολικό βάρος 8kg) που εισήχθη στον κομποστοποιητή είχε μορφή λύου και ο ελεύθερος αέριος χώρος του ήταν αρκετά μικρός, της τάξης του 14%. Το αποτέλεσμα ήταν ότι το υλικό δεν εμφάνισε άνοδο της θερμοκρασίας καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας, γεγονός που πιθανότατα να οφείλεται στις ανεπαρκείς συνθήκες αερισμού σε όλο τον όγκο του, αναπτύσσοντας

έτσι πιθανότατα αναερόβιες συνθήκες (χαρακτηριστική οσμή ζύμωσης). Σε αρκετές περιπτώσεις στη βιβλιογραφία αναφέρεται η αναγκαιότητα πρόσθετων διογκωτικών υλικών που να προσφέρουν δομή στο απόβλητο και να εξασφαλίζουν ομοιόμορφες αερόβιες συνθήκες [59], [191], [192].

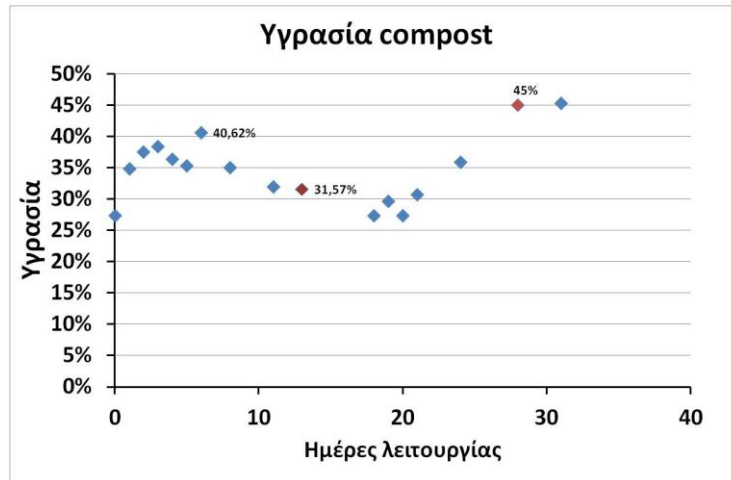
Εφόσον η θερμοκρασία δεν εμφάνισε καμία μεταβολή δε μετρήθηκε άλλος φυσικοχημικός παράγοντας κατά τη διάρκεια του πειράματος.

### 8.3.2.3 Πείραμα 8

Κατά τον όγδοο πειραματικό κύκλο επιχειρήθηκε η κομποστοποίηση του FORBI με χαμηλότερα αρχικά επίπεδα υγρασίας, με στόχο την αύξηση του ελεύθερου χώρου και τη βελτίωση των συνθηκών αερισμού. Ύστερα από δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν εκτός κομποστοποιητή, θεωρήθηκε ότι το βέλτιστο επίπεδο υγρασίας ήταν το 30%, καθώς αυτή ήταν η ανώτερη τιμή αρχική υγρασίας κατά την οποία το υλικό διατηρούσε την αρχική του υφή χωρίς να λαμβάνει τη μορφή υδαρούς ιλύος. Ο ελεύθερος αέριος χώρος του υλικού διαμορφώθηκε στο 21% και το συνολικό του βάρος κατά την είσοδό του στον κομποστοποιητή ήταν 6kg. Στόχος του πειράματος ήταν, εκτός από τη διερεύνηση της επίδρασης των αρχικών επιπέδων υγρασίας, η μελέτη του θερμοκρασιακού προφίλ της διεργασίας χωρίς την περαιτέρω ρύθμιση των επιπέδων της υγρασίας κατά τη διάρκεια της διεργασίας έως ότου η θερμοκρασία επιδείξει έντονη πτωτική τάση. Στο Σχήμα 8.3.19 παρουσιάζεται η διακύμανση της θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου του πειράματος και στο Σχήμα 8.3.20 τα επίπεδα υγρασίας του υποστρώματος.



Σχήμα 8.3.19 Μεταβολή της θερμοκρασίας του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 8



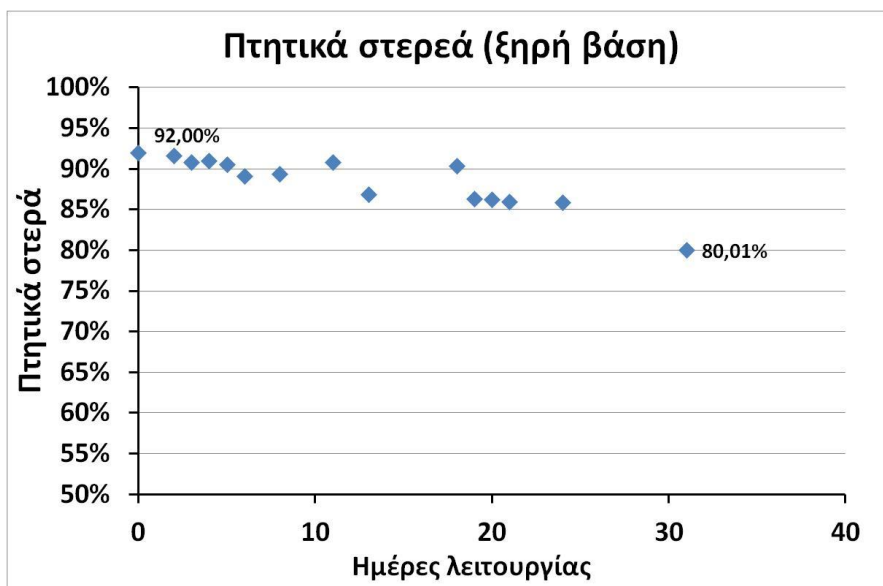
**Σχήμα 8.3.20** Μεταβολή της υγρασίας του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 8

Στο πείραμα η θερμοκρασία παρουσίασε αυξητική τάση από τη 2<sup>η</sup> μέρα τοποθέτησης του υλικού, όπως και στα προηγούμενα πειράματα, με τη διαφορά ότι η θερμοφιλή φάση διήρκεσε πολύ περισσότερο, κοντά στις 35 ημέρες. Η μέγιστη τιμή της ήταν ίση με 48,2°C.

Κατά το χρονικό διάστημα της θερμοφιλής φάσης, η υγρασία παρουσίασε τάση μείωσης καταλήγοντας στα επίπεδα του 27%. Στο σημείο αυτό διερευνήθηκε η πιθανότητα η υγρασία να αποτελεί περιοριστικό παράγοντα με αποτέλεσμα την πτώση της θερμοκρασίας. Για το λόγο αυτό, την 23 ημέρα η υγρασία του υποστρώματος ρυθμίστηκε ίση με 40%, καθώς η υφή του υλικού δεν αλλοιώθηκε από την επιπλέον προσθήκη νερού. Η αύξηση της υγρασίας είχε ως αποτέλεσμα την άνοδο της θερμοκρασίας ως τους 52,2°C, ακολουθούμενη από νέα τάση μείωσης. Ανάλογη συμπεριφορά εμφάνισε και η υγρασία.

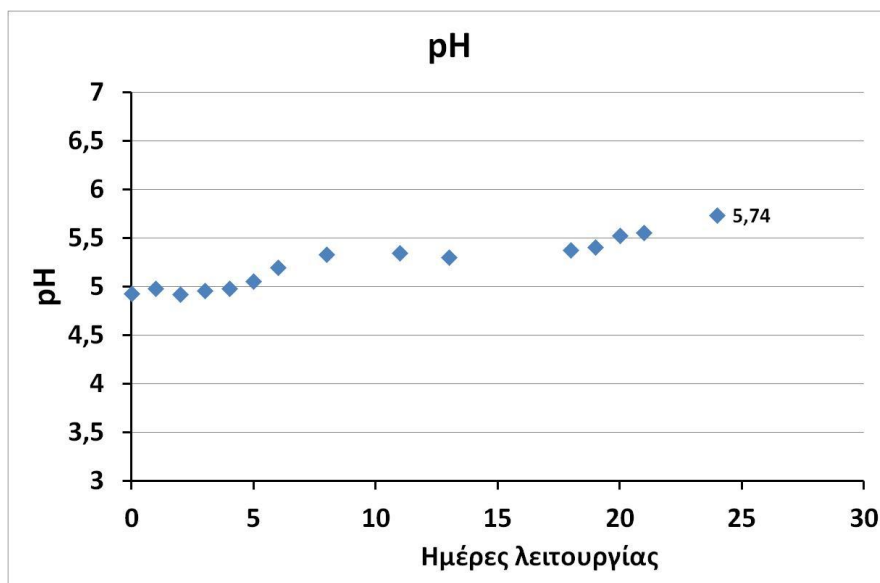
Μετά από 7 ημέρες (την 30<sup>η</sup> ημέρα λειτουργίας) η θερμοκρασία είχε προσεγγίσει αυτή του περιβάλλοντος. Στο σημείο η υγρασία ρυθμίστηκε ξανά ως το 45% με αποτέλεσμα την εκ νέου αύξηση της θερμοκρασίας έως τους 47,2°C. Παρά το γεγονός ότι τα επίπεδα της υγρασίας παρέμειναν αμετάβλητα, η θερμοκρασία εν συνεχεία παρουσίασε τάση επιστροφής στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, γεγονός που καταδεικνύει την ολοκλήρωση της θερμοφιλής φάσης.

Οι χαρακτηριστικές αυξομειώσεις της θερμοκρασίας που παρατηρήθηκαν σε συγχρονισμό με τις αυξομειώσεις στην υγρασία του υλικού, αναδεικνύουν το σημαντικό ρόλο της υγρασίας στη διεργασία, πολλές φορές ως το βασικό περιοριστικό παράγοντα. Και τις δυο φορές που προστέθηκε νερό στο κόμποστ, η θερμοκρασία αυξήθηκε άμεσα, οπότε μπορούμε να συμπεράνουμε με μια σχετική ασφάλεια, ότι επίπεδα υγρασίας κάτω του 30% περιορίζουν τη διάρκεια της θερμοφιλής φάσης ή και την μέγιστη τιμή της θερμοκρασία, γεγονός που αναφέρεται και στη σχετική βιβλιογραφία [52], [73], [179].



**Σχήμα 8.3.21** Μεταβολή των πτητικών στερεών (VS) του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 8

Τα πτητικά στερεά παρουσιάζουν, αναμενόμενα, πτωτική τάση, λόγω της μείωσης των βιοαποδομήσιμων οργανικών ενώσεων, με μέγιστη τιμή το 92% στην αρχή της διαδικασίας και με ελάχιστη τιμή το 80% την 15η ημέρα.



**Σχήμα 8.3.22** Μεταβολή του pH του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 8

Το pH ήταν και σε αυτό το πείραμα αρκετά χαμηλό, όπως είναι λογικό για απορρίμματα κουζίνας και καθ'όλη τη διάρκεια του πειράματος δείχνει μικρή ανοδική τάση με μέγιστη τιμή το 5,74 την 26η ημέρα, παρόλα αυτά δεν δείχνει να επηρεάζει αρνητικά τη διαδικασία κομποστοποίησης [71].

Εν συνεχεία, το τελικό προϊόν της διεργασίας υπεβλήθη σε έλεγχο για τον προσδιορισμό της φυτοτοξικότητας και της φυτοθρεπτικότητάς του. Ο σχετικός δείκτης βλάστησης μετρήθηκε ίσος με 36,7%, δηλαδή το τελικό προϊόν είναι κατά 36,7% μη φυτοτοξικό.

Η χαμηλή τιμή του δείκτη βλάστησης αναδεικνύει τη σημασία της προσθήκης των υπολειμμάτων της επεξεργασίας ξύλου (πριονίδι) όχι μόνο στις συνθήκες αερισμού, τη ρύθμιση της υγρασίας και της αναλογίας C/N, αλλά επιπλέον στην ποιότητα του τελικού προϊόντος. Παρόλα αυτά, η φυτοτοξικότητα είναι άμεση συνάρτηση και του βαθμού ωρίμανσης του υλικού, που μπορεί να διαρκέσει ακόμα και περισσότερο από 6 μήνες, ανάλογα με το υπόστρωμα.

#### **8.3.2.4 Πείραμα 9**

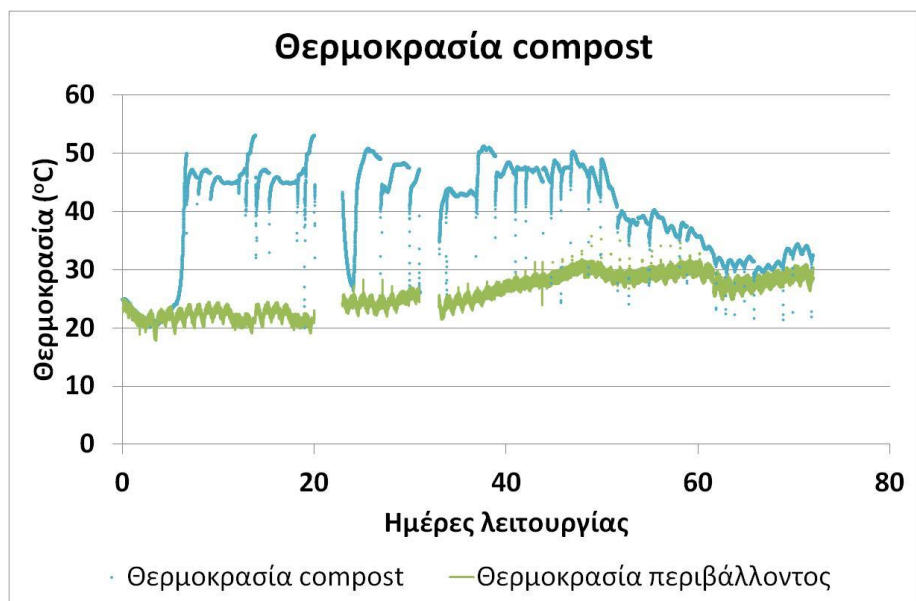
Τα αποτελέσματα του πειράματος 8 ανέδειξαν τη σημαντική επίδραση της ρύθμισης των επιπέδων της υγρασίας στο θερμοκρασιακό προφίλ κατά την κομποστοποίηση του FORBI. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκε ένας επιπλέον πειραματικός κύκλος κατά τον οποίο επιχειρήθηκε η κομποστοποίηση του FORBI με συνεχή εξωτερική ρύθμιση των επιπέδων της υγρασίας, λαμβάνοντας επίσης υπόψη τα ευρήματα των προηγούμενων πειραματικών κύκλων όσον αφορά την επίδραση των υπόλοιπων παραμέτρων.

Τα επίπεδα υγρασίας του FORBI ρυθμίστηκαν με την προσθήκη νερού στο επίπεδο του 35%, αφού το πείραμα 8 απέδειξε ότι η βέλτιστη συμπεριφορά της θερμοκρασίας παρατηρείται στην περιοχή 30-40%. Παρατηρήθηκε η υφή του υλικού παραμένει αναλλοίωτη (ως προς τον ελεύθερο αέριο χώρο του και τις συνθήκες αερισμού του) με ποσοστά υγρασίας της τάξης του 35% κατά την εκκίνηση της διεργασίας, ενώ κατά την πορεία της θερμοφιλικής φάσης η υγρασία μπορεί να ρυθμιστεί έως και στο 45% χωρίς να παρατηρείται δυσκολία κατά τον αερισμό.

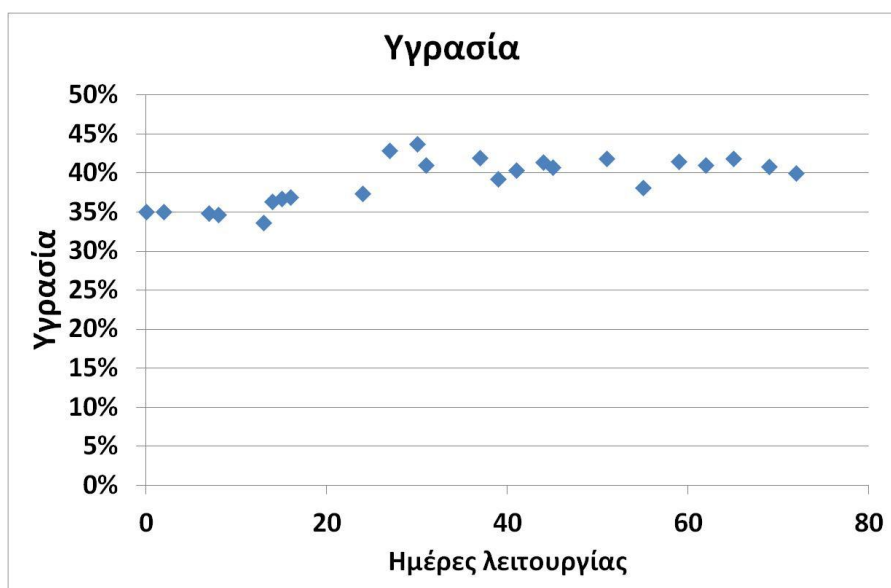
Για τη βελτιστοποίηση του θερμοκρασιακού προφίλ κυρίως κατά την εκκίνηση της διεργασίας, το υλικό που προστέθηκε στον κομποστοποιητή περιείχε 350g μαγιάς από το κομποστοποιημένο προϊόν του πειράματος 8. Τέλος, λαμβάνοντας υπόψη και την επίδραση του όγκου του υποστρώματος στο θερμοκρασιακό προφίλ (πείραμα 4') ο αντιδραστήρας πληρώθηκε σε όλο τον ενεργό του όγκο (28L) με το υλικό (συνολικό αρχικό βάρος 11kg).

Το θερμοκρασιακό προφίλ της διεργασίας κατά τον ένατο πειραματικό κύκλο, παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.3.23, ενώ τα επίπεδα της υγρασίας κατά τη διάρκεια ολόκληρου του κύκλου παρουσιάζονται στο Σχήμα 8.3.24.





Σχήμα 8.3.23 Μεταβολή της θερμοκρασίας του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 9



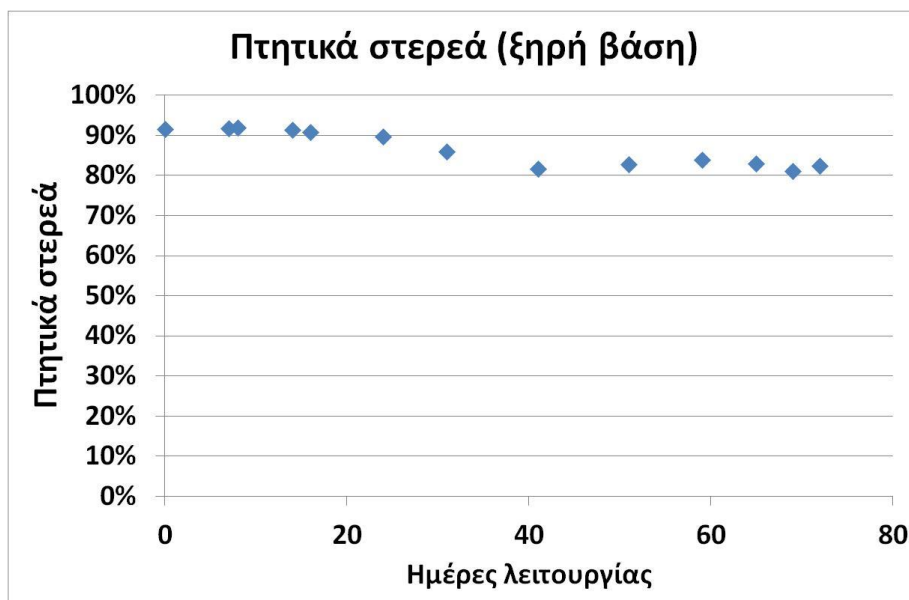
Σχήμα 8.3.24 Μεταβολή της υγρασίας του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 9

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.3.23, ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας ήταν ανάλογος του ρυθμού που παρατηρήθηκε στο πείραμα 8, όπου δεν είχε προστεθεί μαγιά. Η μέγιστη θερμοκρασία που παρατηρήθηκε σε όλη τη διάρκεια της διεργασίας ήταν ίση με 53,2°C. Η ρύθμιση της υγρασίας (Σχήμα 8.3.24) σε όλη τη διάρκεια του πειράματος είχε ως αποτέλεσμα την αποφυγή μεγάλων διακυμάνσεων της θερμοκρασίας κατά τη θερμοφιλή φάση, η οποία διήρκεσε περίπου 46 ημέρες, σημαντικά μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από αυτό του πειράματος 8. Η επέκταση της διάρκειας της θερμοφίλης

φάσης οφείλεται στο συνδυασμό της ρύθμισης της υγρασίας με τη σημαντική αύξηση της ποσότητας του υλικού που εισήχθη στον κομποστοποιητή.

Η πτωτική τάση της θερμοκρασίας που ακολούθησε τη θερμοφιλή φάση ήταν πιο ομαλή σε σχέση με το πείραμα 8, γεγονός που ευνοεί τις συνθήκες ωρίμανσης του τελικού προϊόντος. Το υλικό αφαιρέθηκε από τον κομποστοποιητή μετά από διάστημα ίσο με 72 ημέρες λειτουργίας.

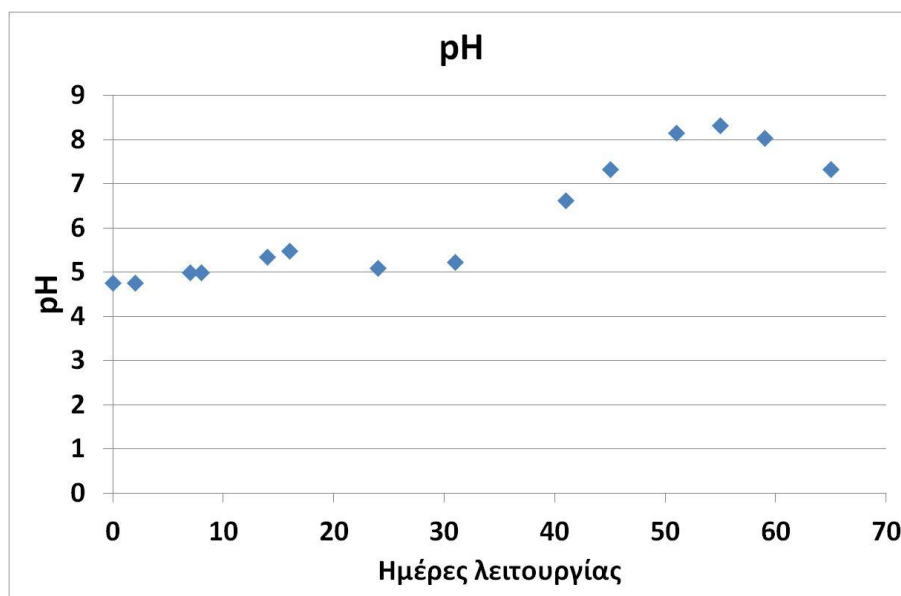
Στο Σχήμα 8.3.25 παρουσιάζεται η διακύμανση του ποσοστού των πτητικών στερεών σε ξηρή βάση σε όλη τη διάρκεια του πειράματος.



**Σχήμα 8.3.25** Μεταβολή των πτητικών στερεών (VS) του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 9

Το ποσοστό των πτητικών στερεών ακολούθησε συμπεριφορά ανάλογη με αυτή του πειράματος 8, με την αρχική του τιμή να ισούται με 91,6% και την τελική του τιμή μετά από 65 ημέρες λειτουργίας να καταλήγει στο 81%.

Η επέκταση της διάρκειας της θερμοφιλής φάσης σε συνδυασμό με τη διαρκή αναπλήρωση της υγρασίας σε όλη τη διάρκεια της διεργασίας είχε ως αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση των επιπέδων του pH. Η αρχική τιμή του pH ήταν 4,76, αναμενόμενη λόγω της προέλευσης του υποστρώματος, με τις τιμές του να ακολουθούν διαρκή αυξητική τάση σε όλη τη διάρκεια του πειράματος, καταλήγοντας κοντά στην περιοχή του ουδέτερου.



**Σχήμα 8.3.26** Μεταβολή του pH του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 9

Εν συνεχεία, το τελικό προϊόν της διεργασίας υπεβλήθη σε έλεγχο για τον προσδιορισμό της φυτοτοξικότητας και της φυτοθρεπτικότητάς του. Ο σχετικός δείκτης βλάστησης μετρήθηκε ίσος με 35,8%, δηλαδή το τελικό προϊόν είναι κατά 35,8% μη φυτοτοξικό.

Όπως και στην περίπτωση του πειράματος 8, η χαμηλή τιμή του δείκτη βλάστησης αναδεικνύει τη σημασία της προσθήκης των υπολειμμάτων της επεξεργασίας ξύλου (πριονίδι) όχι μόνο στις συνθήκες αερισμού, τη ρύθμιση της υγρασίας και της αναλογίας C/N, αλλά επιπλέον στην ποιότητα του τελικού προϊόντος. Παρόλα αυτά, η φυτοτοξικότητα είναι άμεση συνάρτηση και του βαθμού ωρίμανσης του υλικού, που μπορεί να διαρκέσει ακόμα και περισσότερο από 6 μήνες, ανάλογα με το υπόστρωμα.

#### 8.4 Σύνοψη και συζήτηση

Η κομποστοποίηση, παρόλο που αναφέρεται γενικά σαν μία συνήθης και εύκολη πρακτική διαχείρισης στερεών αποβλήτων, στην πράξη εξαρτάται άμεσα από πολλούς φυσικοχημικούς και βιολογικούς παράγοντες, προκειμένου να παραχθεί ένα σταθερό εδαφοβελτιωτικό σε όσο το δυνατόν πιο μικρό χρονικό διάστημα.

Τα κλειστού τύπου συστήματα κομποστοποίησης παρουσιάζουν σαφώς μεγαλύτερα πλεονεκτήματα σε σχέση με τα ανοικτού τύπου (σειράδια κλπ.), όπως διαχείριση οσμών, καλύτερη παρακολούθηση υγρασίας και θερμοκρασίας κ.α. Παρόλα αυτά θα πρέπει να δοθεί αρκετή προσοχή στον όγκο του κόμποστ που μπορεί να τοποθετηθεί σ' έναν τέτοιο κομποστοποιητή, με την έννοια ότι θα πρέπει ο περιεχόμενος σωρός να έχει μια ικανότητα συγκράτησης της θερμότητας, που σε πολύ μικρούς όγκους δεν είναι εφικτό. Αυτό διαφαίνεται αρκετά και από τα αποτελέσματα καθώς στα πειράματα 1 έως 4 χρησιμοποιήθηκε μικρός όγκος ενώ από το πείραμα 5 και μετά που αυξήθηκε ο όγκος του κόμποστ, αυξήθηκε και η Μέγιστη θερμοκρασία. Το ίδιο μπορούμε να συμπεράνουμε και από το δοκιμαστικό πείραμα 4, όπου σε σωρούς διαφορετικών όγκων, που τοποθετήθηκαν εκτός του κομποστοποιητή, η αύξηση της θερμοκρασίας ήταν ανάλογη του όγκου του σωρού.

Η συμπεριφορά των υποστρωμάτων ως προς τις φυσικοχημικές τους παραμέτρους κατά την πειραματική διαδικασία (θερμοκρασιακό προφίλ, υγρασία, VS) εκτός από το pH δεν φάνηκε να διαφέρει σημαντικά ανάμεσα στους 2 διαφορετικούς τύπους υποστρωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν. Επομένως η διαδικασία της κομποστοποίησης έχει κάποια κοινά χαρακτηριστικά ανεξαρτήτως της πρώτης ύλης που χρησιμοποιείται για κομποστ, όταν οι κύριες φυσικοχημικές παράμετροι είναι όμοιες.

Το στερεό ρεύμα από την εκχύλιση των κτηνοτροφικών αποβλήτων παρουσίασε αρχικά αρκετές δυσκολίες στην διαχείριση του, καθώς συγκρατούσε μεγάλη υγρασία (~75%) καθιστώντας τις συνθήκες αερισμού στο εσωτερικό του πρακτικά αδύνατες. Στα πειράματα 1 έως 3 που χρησιμοποιήθηκε χωρίς κάποιο πρόσθετο, εμφάνισε μικρή αύξηση θερμοκρασίας που σε συνδυασμό με τη φύση του αποβλήτου (μεγάλη περιεκτικότητα σε παθογόνους μ/ο) δε θα μπορούσε να θεωρηθεί επιτυχής η μετατροπή του σε κόμποστ.

Στον τέταρτο πειραματικό κύκλο που το υλικό αναμίχθηκε με πριονίδι, η θερμοκρασία επίσης δεν εμφάνισε μεγάλη μεταβολή, παρόλη την χαμηλότερη υγρασία, λόγω κυρίως του μειωμένου όγκου που μπορούσε να τοποθετηθεί πλέον στον κομποστοποιητή. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το ενδιάμεσο πείραμα 4' εκτός κομποστοποιητή αλλά και από το πείραμα 5 υπογράμμισαν ξεκάθαρα την επίδραση του όγκου στο θερμοκρασιακό προφίλ. Το 5ο πείραμα ήταν το πιο επιτυχημένο από αυτά με πρώτη ύλη τα κτηνοτροφικά απόβλητα, όσον αφορά στο θερμοκρασιακό προφίλ και στην ποιότητα του τελικού προϊόντος (GI index).

Το FORBI αποδείχθηκε αρκετά πιο εύκολα διαχειρίσιμο ως υλικό. Πιο συγκεκριμένα, στα πειράματα 6, 8 και 9 το θερμοκρασιακό προφίλ ήταν πιο κοντά στο αναμενόμενο και ιδιαίτερα στο πείραμα 9 η θερμοκρασία διατηρήθηκε σε υψηλά επίπεδα για αρκετές ημέρες.

Η σημαντικότερη διαφοροποίηση σε σχέση με τα κτηνοτροφικά απόβλητα παρατηρήθηκε στις τιμές του pH καθώς το υλικό αυτό εμφάνιζε πολύ χαμηλό (όξινο) pH το οποίο όμως παρουσίασε τάση προσέγγισης στην περιοχή του ουδέτερου κατά τη διάρκεια της διεργασίας στην πλειοψηφία των πειραματικών κύκλων με υπόστρωμα το FORBI.

Τέλος, το πριονίδι ως πρόσθετο υλικό (bulking agent) κατάφερε να δώσει στο υλικό ένα πολύ ικανοποιητικό επίπεδο ελεύθερου αερίου χώρους της τάξης του 30% περίπου στην πλειοψηφία των πειραμάτων και με τους δύο τύπους υποστρωμάτων.

Στην περίπτωση δε των κτηνοτροφικών αποβλήτων βοήθησε και στην ρύθμιση της υγρασίας του αρχικού μίγματος, ενώ στην περίπτωση του FORBI η προσθήκη του είχε σημαντική επίδραση στο επίπεδο ωριμότητας και καταλληλότητας του τελικού προϊόντος.

# **Κεφάλαιο 9**

## **Συμπεράσματα**

Στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής αναπτύχθηκε μια μέθοδος για την ολοκληρωμένη αξιοποίηση διαφορετικών τύπων στερεών οργανικών αποβλήτων προς παραγωγή βιοαερίου μέσω αναερόβιας χώνευσης/συγχώνευσης σε πιλοτικής κλίμακας Περιοδικό Αναερόβιο Χωνευτήρα με Ανακλαστήρες (Periodic Anaerobic Baffled Reactor - PABR) σε συνδυασμό με την παραγωγή εδαφοβελτιωτικού σε εργαστηριακό κομποστοποιητή κλειστού τύπου.

Το σχέδιο του πιλότου PABR που χρησιμοποιήθηκε για την πειραματική διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης αποτελεί προϊόν κλιμάκωσης μεγέθους του εργαστηριακής κλίμακας PABR ενεργού όγκου 15L, που σχεδιάστηκε από τους Ι. Σκιαδά και Γ. Λυμπεράτο (1998) [106]. Κατά την κλιμάκωση μεγέθους, η βασική διαφοροποίηση του σχεδίου αφορούσε τη χρήση του εσωτερικού κυλίνδρου του PABR ως εναλλάκτη θερμότητας, με σκοπό την προσαρμογή του σχεδίου του αντιδραστήρα στις ρεαλιστικές συνθήκες λειτουργίας στη βιομηχανία.

Πριν από τη λειτουργία του πιλότου για την παραγωγή βιοαερίου από τα 2 είδη στερεών οργανικών αποβλήτων, μελετήθηκε η υδραυλική συμπεριφορά του μέσω πειραμάτων κατανομής χρόνου παραμονής (RTD tests) με βηματική επιβολή στην τροφοδοσία (προσθήκη ιχνηθέτη χρωστικής ουσίας E124 γνωστής συγκέντρωσης). Οι δύο πειραματικοί κύκλοι σχεδιάστηκαν ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά του PABR σε 2 ακραίες συνθήκες, δηλαδή με ταχεία εναλλαγή του διαμερίσματος τροφοδοσίας (περίοδος εναλλαγής  $T=2d$ ) αλλά και προσομοιώνοντας τη συμπεριφορά ενός απλού ABR, χωρίς εναλλαγή του διαμερίσματος τροφοδοσίας. Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής που επιλέχθηκε κατά τους δύο πειραματικούς κύκλους ήταν ίσος με 4d. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων υποβλήθηκαν σε επεξεργασία με σκοπό τον προσδιορισμό των δοχείων σε σειρά ( $N_R$ ) που περιγράφουν βέλτιστα τις συνθήκες ανάμειξης στο εσωτερικό του.

Τα πειράματα επιβεβαίωσαν την ευελιξία του πιλότου PABR να λειτουργεί ανάμεσα στις δύο ακραίες καταστάσεις (πλήρης ανάμειξη ή εμβολική ροή). Αποδείχθηκε ότι όταν το σημείο τροφοδοσίας εναλλάσσεται, ο αντιδραστήρας προσομοιάζει συνθήκες πλήρους ανάμειξης (με  $N_R=1$ ). Το αποτέλεσμα αυτό αποδεικνύει επίσης ότι η κλιμάκωση μεγέθους και οι παρεμβάσεις στη γεωμετρία του πιλότου σε σχέση με τον εργαστηριακό PABR είχε ως συνέπεια τη διαφοροποίηση των συνθηκών ανάμειξης σε σχέση με τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται από τον Ι. Σκιαδά (1998) [121], όπου το  $N_R$  είχε υπολογιστεί ίσο με 5 δοχεία. Επιπλέον αποδείχθηκε ότι όταν το σημείο τροφοδοσίας είναι σταθερό, η ροή προσεγγίζει την εμβολική ( $N_R=16$ ).

Η μελέτη της υδραυλικής συμπεριφοράς του πιλότου απαιτούσε τη διερεύνηση των συνθηκών ανάμειξης στο εσωτερικό του σε διάφορους άλλους συνδυασμούς υδραυλικού χρόνου παραμονής και περιόδου εναλλαγής. Η πραγματοποίηση εργαστηριακών πειραμάτων για το σκοπό αυτό θα ήταν μια εξαιρετικά χρονοβόρος διαδικασία. Για το λόγο αυτό, αναπτύχθηκε ένα τρισδιάστατο μοντέλο του αντιδραστήρα σε περιβάλλον Comsol Multiphysics® με σκοπό την προσομοίωση των πειραμάτων αυτών.

Την κατασκευή της γεωμετρίας του πιλότου στο Comsol, ακολούθησε η διαδικασία επικύρωσης του μοντέλου (model validation) μέσω της πραγματοποίησης προσομοιώσεων των πειραμάτων κατανομής χρόνου παραμονής με ίδιες λειτουργικές συνθήκες με αυτές των εργαστηριακών πειραμάτων. Το

μοντέλο περιέγραψε ικανοποιητικά τη συμπεριφορά του αντιδραστήρα και τα αποτελέσματά του συνέκλιναν σημαντικά με τα πειραματικά αποτελέσματα. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις σε διάφορους συνδυασμούς HRT και T με σκοπό την περαιτέρω μελέτη της υδραυλικής συμπεριφοράς του PABR και αποδείχθηκε ότι ο λόγος του υδραυλικού χρόνου παραμονής (HRT) προς την περίοδο εναλλαγής του σημείου τροφοδοσίας (T) επηρεάζει αποφασιστικά τον τύπο ροής στο εσωτερικό του αντιδραστήρα. Με αύξηση του λόγου HRT/T ο αντιδραστήρας προσομοιάζει συνθήκες πλήρους ανάμειξης, ενώ με μείωση του λόγου HRT/T η ροή τείνει προς την εμβολική.

Τη διερεύνηση των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών του πιλότου ακολούθησαν τα εργαστηριακά πειράματα αναερόβιας χώνευσης και κομποστοποίησης στερεών οργανικών αποβλήτων. Η πειραματική διαδικασία που αφορά την αξιοποίηση των αποβλήτων χωρίστηκε σε 2 κύριους κύκλους. Κατά τον πρώτο κύκλο διερευνήθηκε η δυνατότητα ταυτόχρονης παραγωγής βιοαερίου και εδαφοβελτιωτικού από μίγμα κτηνοτροφικών αποβλήτων της περιοχής του δήμου Μετσόβου, στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος με τίτλο «Ανάπτυξη πολυπαραμετρικού μαθηματικού μοντέλου για τη βελτιστοποίηση του ενεργειακού σχεδιασμού σε ορεινές περιοχές». Το μίγμα των αποβλήτων (η σύσταση του οποίου ήταν αντιπροσωπευτική της ετήσιας παραγωγής κτηνοτροφικών αποβλήτων του δήμου Μετσόβου) υποβλήθηκε σε ένα στάδιο προεπεξεργασίας με σκοπό το διαχωρισμό της υγρής (εκχύλισμα) από τη στερεή φάση. Ο διαχωρισμός αυτός ήταν απαραίτητος για τη λειτουργία του PABR, καθώς είναι ένα ταχύρρυθμο σύστημα και ως τέτοιο χαρακτηρίζεται από περιορισμούς στις συγκεντρώσεις των ολικών στερεών που μπορεί να επεξεργαστεί. Το εκχύλισμα οδηγήθηκε στον πιλότο με σκοπό την παραγωγή βιοαερίου και το στερεό κλάσμα στον κομποστοποιητή με σκοπό την παραγωγή εδαφοβελτιωτικού. Τα πειράματα αναερόβιας συγχώνευσης απέδειξαν ότι είναι εφικτή η παραγωγή 21-30L βιοαερίου ανά kg μίγματος αποβλήτων, με μέση σύσταση σε μεθάνιο της τάξης του 65-70%, ενώ επιτεύχθηκε ικανοποιητική λειτουργία του PABR σε εξαιρετικά χαμηλό υδραυλικό χρόνο παραμονής, ίσο με 6 ημέρες.

Παράλληλα, από τη βελτιστοποίηση της διεργασίας της κομποστοποίησης απεδείχθη ότι είναι δυνατή η παραγωγή υψηλής ποιότητας εδαφοβελτιωτικού (δείκτης ανάπτυξης ίσος με 77,8%) από το στερεό κλάσμα του μίγματος, αναμειγμένου με υπόλειμμα επεξεργασίας ξύλου (πριονίδι) ως διογκωτικού παράγοντα. Η προσθήκη του διογκωτικού παράγοντα βελτίωσε σημαντικά το θερμοκρασιακό προφίλ της διεργασίας, καθώς εκτός από τη βελτίωση των συνθηκών αερισμού, βελτίωσε την αναλογία C/N και ταυτόχρονα ρύθμισε την υγρασία του υποστρώματος. Επιπλέον, σημαντικό ρόλο στο θερμοκρασιακό προφίλ κατά τα πειράματα της κομποστοποίησης διαδραμάτισε η συνολική μάζα του υποστρώματος. Η αύξηση της μάζας συνεπάγεται μείωση της ελεύθερης επιφάνειας εναλλαγής θερμότητας του υλικού σε σχέση με το συνολικό του όγκο και επομένως βελτίωνε τη δυνατότητα συγκράτησης της θερμότητας στο εσωτερικό του. Προφανώς, ενδεχόμενη κλιμάκωση της διεργασίας σε βιομηχανική κλίμακα θα είχε ως αποτέλεσμα την περαιτέρω βελτίωση του θερμοκρασιακού προφίλ.

Κατά το δεύτερο πειραματικό κύκλο μελετήθηκε η ταυτόχρονη παραγωγή βιοαερίου και εδαφοβελτιωτικού από ζυμώσιμα οικιακά απορρίμματα του δήμου Χαλανδρίου, στο πλαίσιο του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος με τίτλο «WASTE4Think», Horizon2020. Τα ζυμώσιμα οικιακά απορρίμματα που συλλέχθηκαν από εθελοντές κατοίκους του δήμου Χαλανδρίου, υποβλήθηκαν σε ξήρανση και τεμαχισμό με αποτέλεσμα την παραγωγή ενός καινοτόμου προϊόντος που ονομάζεται

FORBI (Food Residue Biomass). Σε πρώτη φάση, για την ολοκληρωμένη επεξεργασία του FORBI εφαρμόστηκε το σύστημα που αναπτύχθηκε κατά τον πρώτο κύκλο. Το FORBI δηλαδή υποβλήθηκε αρχικά σε διαχωρισμό υγρού-στερεού και τα αποτελέσματα των πειραμάτων αναερόβιας χώνευσης από το εκχύλισμα του FORBI απέδειξαν ότι είναι εφικτή η παραγωγή έως και 158L βιοαερίου ανά kg FORBI σε υδραυλικούς χρόνους παραμονής της τάξης των 10 ημερών με ταυτόχρονη παραγωγή εδαφοβελτιωτικού υψηλής ποιότητας (με δείκτη ανάπτυξης 76,7%).

Περαιτέρω, εξετάστηκε πειραματικά και η δυνατότητα παραγωγής βιοαερίου και εδαφοβελτιωτικού από το FORBI χωρίς την παρεμβολή του σταδίου προεπεξεργασίας. Αποδείχθηκε η δυνατότητα παραγωγής έως και 531L βιοαερίου ανά kg FORBI με μέση σύσταση σε μεθάνιο της τάξης του 62-70%, σε υδραυλικό χρόνο παραμονής ίσο με 5 ημέρες. Τα πειράματα κομποστοποίησης είχαν ως βασικό στόχο τη βελτίωση του θερμοκρασιακού προφίλ της διεργασίας και αποδείχθηκε ότι το υλικό (χωρίς την προσθήκη διογκωτικού παράγοντα) δύναται να επιτύχει υψηλές θερμοκρασίες της τάξης των 53°C και να τις διατηρήσει για μεγάλο χρονικό διάστημα, παρά το μικρό ενεργό όγκο του κομποστοποιητή. Ωστόσο, η απουσία του διογκωτικού παράγοντα (πριονίδι) είχε αρνητική επίδραση στο επίπεδο ωριμότητας και καταλληλότητας του τελικού προϊόντος.

Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης των 2 τύπων αποβλήτων, πραγματοποιήθηκε μαθηματική μοντελοποίηση με τη χρήση του λογισμικού Aquasim. Αναπτύχθηκαν 2 διαφορετικοί τύποι μοντέλων: Ένα απλοποιημένο κινητικό μοντέλο Monod με λεπτομερή προσομοίωση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της λειτουργίας του PABR (συχνότητα εναλλαγής, 4 διαμερίσματα, κατακράτηση βιομάζας) και ένα μοντέλο ADM1 με την παραδοχή ότι ο PABR συμπεριφέρεται ως αντιδραστήρας CSTR (με την πρόβλεψη της διαφοροποίησης του χρόνου παραμονής των στερεών από τον υδραυλικό χρόνο παραμονής), βασιζόμενο στα ευρήματα της μελέτης της υδραυλικής του συμπεριφοράς που προηγήθηκαν. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι δύο τύποι μοντέλων προσομοιώνουν ικανοποιητικά τις παραμέτρους της διεργασίας στους αντίστοιχους κύκλους πειραμάτων, προβλέποντας τη διαφορά του χρόνου κατακράτησης των στερεών στο εσωτερικό των διαμερισμάτων του αντιδραστήρα από τον υδραυλικό χρόνο παραμονής και στις δύο περιπτώσεις.

Εν κατακλείδι, η μέθοδος που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής απέδειξε ότι ο διαχωρισμός του υγρού και του στερεού κλάσματος των αποβλήτων ως στάδιο προεπεξεργασίας, προσφέρει τη δυνατότητα της επεξεργασίας τους από ένα καινοτόμο, ταχύρρυθμο και σταθερό σύστημα αναερόβιας χώνευσης όπως ο PABR, σε ιδιαίτερα χαμηλούς υδραυλικούς χρόνους παραμονής (έως και 5 ημερών), με ταυτόχρονη παραγωγή σημαντικών ποσοτήτων εδαφοβελτιωτικού υψηλής ποιότητας από το στερεό κλάσμα. .

Η εφαρμογή της μεθόδου απαιτεί την εγκατάσταση ενός χωνευτήρα μικρού όγκου που μπορεί να επεξεργαστεί οργανικά απόβλητα με υψηλές παραγωγικότητες βιοαερίου, ενώ ταυτόχρονα προσφέρει τη δυνατότητα χρήσης του παραγόμενου εδαφοβελτιωτικού. Πρόκειται για μια ολοκληρωμένη πρόταση διαχείρισης των οργανικών αποβλήτων που μπορεί να συμβάλει στην κατεύθυνση της προστασίας του περιβάλλοντος και της διατήρησης των φυσικών πόρων ενώ ταυτόχρονα αποτελεί μία οικονομικά βιώσιμη και εφαρμόσιμη λύση τόσο σε απομακρυσμένες ορεινές αγροτικές περιοχές, όσο και στο αστικό περιβάλλον.



## **Κεφάλαιο 10**

### **Προτάσεις για μελλοντική έρευνα**

Στο παρόν κεφάλαιο, διατυπώνονται προτάσεις μελλοντικής έρευνας για την αξιοποίηση των συμπερασμάτων της παρούσας διατριβής καθώς και για την εφαρμογή και περαιτέρω ανάπτυξη της τεχνολογίας που αποκτήθηκε. Ειδικότερα:

- Ο πιλοτικής κλίμακας PABR που αποτέλεσε ένα από τα βασικά αντικείμενα μελέτης της διατριβής, αποτελεί όπως αναφέρθηκε έναν αντιδραστήρα που -με ορισμένες μετατροπές στο σχέδιο- είναι προϊόν κλιμάκωσης μεγέθους του εργαστηριακού PABR που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από τους Ι. Σκιαδά και Γ. Λυμπεράτο το 1998. Ο πιλότος λειτουργήσε με ιδιαίτερη σταθερότητα και αποτελεσματικότητα με 2 διαφορετικούς τύπους οργανικών αποβλήτων και ανταποκρίθηκε πλήρως στις απαιτήσεις της πειραματικής διαδικασίας. Παράλληλα, επιβεβαιώθηκαν τα πλεονεκτήματά του σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα, που εντοπίζονται κυρίως στην ευελιξία του να προσομοιάζει την πλήρη ανάμειξη, είτε την εμβολική ροή ανάλογα με την επιλογή των λειτουργικών παραμέτρων και κυρίως στη δυνατότητά του να λειτουργεί αποτελεσματικά σε ιδιαίτερα χαμηλούς χρόνους παραμονής. Η μελέτη για την περαιτέρω κλιμάκωση μεγέθους (σε βιομηχανική κλίμακα) θα πρέπει αναμφίβολα να αποτελέσει το επόμενο βήμα αυτής της ενδιαφέρουσας διαδικασίας.
- Η μελέτη της κλιμάκωσης μεγέθους θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει και μια διαδικασία περαιτέρω βελτιστοποίησης του σχεδίου του αντιδραστήρα, με σκοπό την απλοποίηση της λειτουργίας του και τη μείωση του κόστους κατασκευής, εγκατάστασης και λειτουργίας του. Ειδικότερα, η τροποποίηση του σχεδίου με σκοπό την αφαίρεση των εξωτερικών σωληνώσεων και των 12 ηλεκτροβανών θα μπορούσε να συμβάλει αποφασιστικά στην κατεύθυνση αυτή.
- Για τη βελτιστοποίηση του σχεδίου του PABR θα μπορούσε να αξιοποιηθεί το τρισδιάστατο μοντέλο που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Comsol. Το μοντέλο αυτό θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως βάση για τη μελέτη της επίδρασης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών στη συμπεριφορά του συστήματος. Επιπλέον, μέσω της προσομοίωσης της αναερόβιας χώνευσης σε περιβάλλον Comsol (προσομοίωση των συσσωματωμάτων των μικροοργανισμών και των μεταβολικών βημάτων) θα μπορούσε να μελετηθεί η επίδραση των χαρακτηριστικών της γεωμετρίας και της περαιτέρω κλιμάκωσης μεγέθους στην απόδοση της διεργασίας.
- Σε επίπεδο μαθηματικής μοντελοποίησης της αναερόβιας χώνευσης στον PABR, επόμενο βήμα θα μπορούσε να αποτελέσει η προσομοίωση της διεργασίας με τη χρήση του μαθηματικού μοντέλου ADM1 (ή κάποιου άλλου αναλυτικού και λεπτομερούς μαθηματικού μοντέλου για την αναερόβια χώνευση), σε συνδυασμό με τη λεπτομερή περιγραφή των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της λειτουργίας του PABR (4 διαμερίσματα, προσομοίωση της εναλλαγής του διαμερίσματος τροφοδοσίας). Όπως προαναφέρθηκε, κάτι τέτοιο αυξάνει σημαντικά την πολυπλοκότητα και τις υπολογιστικές απαιτήσεις κατά τον προσδιορισμό των παραμέτρων της διεργασίας, αλλά είναι βέβαιο στο άμεσο μέλλον θα μπορούσε να είναι εφικτό.
- Τέλος, θα ήταν απαραίτητη τόσο η τεχνικο-οικονομική μελέτη του ολοκληρωμένου συστήματος αξιοποίησης αποβλήτων που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, όσο και η ανάλυση κύκλου ζωής για τον προσδιορισμό του συνολικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος.

## **Βιβλιογραφία**

- [1] Ellen MacArthur Foundation, "Urban biocycles," 2017.
- [2] J. Martinez, P. Dabert, S. Barrington, and C. Burton, "Livestock waste treatment systems for environmental quality, food safety, and sustainability," *Bioresour. Technol.*, vol. 100, no. 22, pp. 5527–5536, 2009.
- [3] Food and Agriculture Organization (FAO), "Food wastage footprint: Impacts on natural resources," Paris, 2013.
- [4] farmtogethernow.org, "Food waste causes, effects and solutions," 2014.
- [5] J. G. H. Charles *et al.*, "Food Security: The challenge of Feeding 9 Billion People," *Science (80-. )*, vol. 327, no. February, pp. 812–819, 2010.
- [6] The Ellen MacArthur Foundation, "Circular Economy Overview," *Circular Economy*, 2016. .
- [7] A. Masullo, "Organic wastes management in a circular economy approach : Rebuilding the link between urban and rural areas," *Ecol. Eng.*, vol. 101, pp. 84–90, 2017.
- [8] Κ. Πάκου, "Απομάκρυνση ξενοβιοτικών ουσιών κατά τη βιοσταθεροποίηση της ιλύος και άλλες αερόβιες διεργασίες," Διδακτορική διατριβή. Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, 2010.
- [9] European Compost Network, "Treatment of bio-waste in Europe," 2017. [Online]. Available: <https://www.compostnetwork.info/policy/biowaste-in-europe/treatment-bio-waste-europe/>. [Accessed: 17-Oct-2017].
- [10] E. Stamatelatu, "Anaerobic Digestion Systems Optimization," 1999.
- [11] AgroEnergy, "Η ιδέα της Κεντρικής Μονάδας Συνδυασμένης Αναερόβιας Χώνευσης στην Ελλάδα," 2016. [Online]. Available: <https://www.agroenergy.gr/content/η-ιδέα-της-κεντρικής-μονάδας-συνδυασμένης-αναερόβιας-χώνευσης-στην-ελλάδα>. [Accessed: 17-Nov-2017].
- [12] Y. Kiang, "Incineration of Hazardous Organic Wastes," in *Waste Processing Conference*, 1980, no. 867 C.
- [13] A. J. Reynolds *et al.*, "Potential of pyrolysis processes in the waste management sector," vol. 3, pp. 171–197, 2017.
- [14] Ελληνική Εταιρεία Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων (ΕΕΔΣΑ), "Τεχνικές διαχείρισης αστικών αποβλήτων," 2008. [Online]. Available: <http://www.eedsa.gr/Contents.aspx?CatId=96>. [Accessed: 20-Aug-2017].
- [15] Χ. Κάλφας, "Παραγωγή Βιοαερίου από Αναερόβια Χώνευση Προεπεξεργασμένου και μή Ελαιοπολτού," Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, 2007.
- [16] M. Balat and H. Balat, "Biogas as a renewable energy source - A review," *Energy Sources*, vol. 31, no. 14, pp. 1280–1293, 2009.
- [17] B. Kampman *et al.*, "Optimal use of biogas from waste streams: An assessment of the potential of biogas from digestion in the EU beyond 2020," Brussels, 2016.
- [18] Υπουργείο Περιβάλλοντος και Κλιματικής Αλλαγής, "Εθνικό Σχέδιο Διαχείρισης Αποβλήτων

- (ΕΣΔΑ),” Αθήνα, 2015.
- [19] Γενική Διεύθυνση Βιώσιμης Ζωικής Παραγωγής και Κτηνιατρικής, “Διαχείριση παραγόμενης σε κτηνοτροφικές μονάδες και σφαγεία κόπρου, και καταλοίπου διάσπασης, παραγομένου σε μονάδες παραγωγής βιοαερίου,” Αθήνα, 2016.
- [20] Χ. Ζαφείρης, “Ενεργειακή Αξιοποίηση Βιοαερίου στην Ελλάδα,” in *Biomass Day*, 2017.
- [21] Χ. Ζαφείρης, “Ενεργειακή Αξιοποίηση του Βιοαερίου: Τάσεις & Προοπτικές,” Αθήνα, 2009.
- [22] Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, “περί υγειονομικών κανόνων για ζωικά υποπροϊόντα και παράγωγα προϊόντα που δεν προορίζονται για κατανάλωση από τον άνθρωπο και για την κατάργηση του κανονισμού (ΕΚ) αριθ. 1774/2002 (κανονισμός για τα ζωικά υποπροϊόντα),” Βρυξέλλες, 2009.
- [23] Θ. Κωτσόπουλος, “Νέες τάσεις και προοπτικές στην παραγωγή βιοαερίου από κτηνοτροφικά απόβλητα,” Θεσσαλονίκη, 2016.
- [24] Eurostat, “Waste management indicators,” *eurostat statistics explained*, 2017. .
- [25] WWF, “Διαχείριση Απορριμμάτων στην Ελλάδα,” Αθήνα, 2007.
- [26] C. Gooch and J. Pronto, “Anaerobic Digestion at AA Dairy : Case Study,” New York, 2008.
- [27] Κ. Σιούλας, *Εγχειρίδιο βιοαερίου*. Αθήνα: Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας, 2010.
- [28] G. Lettinga, “Anaerobic digestion and wastewater treatment systems,” *Antonie Van Leeuwenhoek*, vol. 67, no. 1, pp. 3–28, Mar. 1995.
- [29] Α. Κοψαχείλης, “Αναερόβια χώνευση υγρών αποβλήτων ελαιοτριβείου σε ένα περιοδικό αναερόβιο αντιδραστήρα με ανακλαστήρες (PABR) και κλασματοποίηση των εκροών,” Πανεπιστήμιο Πατρών, 2009.
- [30] G. Bitton, *Wastewater Microbiology*, Third Edit. 2005.
- [31] Παγκόσμια Τράπεζα, “Κατανάλωση λιπασμάτων (% της παραγωγής λιπάσματος),” 2017. [Online]. Available: [https://www.google.com/publicdata/explore?ds=d5bncppjof8f9\\_#!ctype=l&strail=false&bcs=d&nselm=h&met\\_y=ag\\_con\\_fert\\_pt\\_zs&scale\\_y=lin&ind\\_y=false&rdim=region&idim=country:GRC&ifdim=region&hl=el&dl=el&ind=false](https://www.google.com/publicdata/explore?ds=d5bncppjof8f9_#!ctype=l&strail=false&bcs=d&nselm=h&met_y=ag_con_fert_pt_zs&scale_y=lin&ind_y=false&rdim=region&idim=country:GRC&ifdim=region&hl=el&dl=el&ind=false). [Accessed: 10-Nov-2017].
- [32] M. H. Gerardi, “Anaerobic Digesters versus Aerobic Digesters,” in *The Microbiology of Anaerobic Digesters*, John Wiley & Sons, Inc., 2003, pp. 153–159.
- [33] American Biogas Council, “Biogas yields per substrate type,” 2015. [Online]. Available: [https://www.americanbiogascouncil.org/biogas\\_questions.asp](https://www.americanbiogascouncil.org/biogas_questions.asp). [Accessed: 07-Jul-2017].
- [34] Χ. Φεσσά, “Αναερόβια χώνευση αποβλήτων τυπογραφείου χαρτονομισμάτων,” Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2011.
- [35] M. Kleerebezem *et al.*, “Complete genome sequence of *Lactobacillus plantarum* WCFS1,” *Proc.*

- Natl. Acad. Sci.*, vol. 100, no. 4, pp. 1990–1995, Feb. 2003.
- [36] G. Lettinga, A. Van Velsen, S. Hobma, W. de Zeeuw, and A. Klapwijk, “Use of the upflow sludge blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment,” *Biotechnol. Bioeng.*, vol. 22, no. 4, pp. 699–734, 1980.
- [37] E. R. Hall, “Anaerobic treatment of wastewaters in suspended growth and fixed film processes,” *Water Qual. Manag. Libr.*, 1992.
- [38] I. V. Skiadas and G. Lyberatos, “Thw periodic anaerobic baffled reactor,” *Water Sci. Technology*, vol. 38, no. 8–9, pp. 401–408, 1998.
- [39] A. Grobicki and D. C. Stuckey, “Hydrodynamic characteristics of the anaerobic baffled reactor,” *Water Res.*, vol. 26, no. 3, pp. 371–378, 1992.
- [40] E. R. Hall, “Non-Intrusive estimation of active colyme in anaerobic reactors,” *Water Pollut. Reserv. J. Canada*, vol. 20, pp. 44–54, 1985.
- [41] A. Bachmann, V. L. Beard, and P. L. McCarty, “Performance characteristics of the anaerobic baffled reactor,” *Water Res.*, vol. 19, no. 1, pp. 99–106, 1985.
- [42] N. Kythreotou, G. Florides, and S. A. Tassou, “A review of simple to scientific models for anaerobic digestion,” *Renew. Energy*, vol. 71, pp. 701–714, 2014.
- [43] A. Donoso-Bravo, J. Mailier, C. Martin, J. Rodríguez, C. A. Aceves-Lara, and A. Vande Wouwer, “Model selection, identification and validation in anaerobic digestion: A review,” *Water Res.*, vol. 45, no. 17, pp. 5347–5364, 2011.
- [44] C. Manjusha and B. S. Beevi, “Mathematical Modeling and Simulation of Anaerobic Digestion of Solid Waste,” *Procedia Technol.*, vol. 24, pp. 654–660, 2016.
- [45] Γ. Σαβουλίδης, “Αλγόριθμοι αυτόματου ελέγχου και βελτιστοποίησης με εφαρμογή σε αναερόβιους αντιδραστήρες,” Πανεπιστήμιο Πατρών, 2010.
- [46] D. J. Batstone, J. Keller, and I. Angelidaki, “Anaerobic digestion model No. 1,” *Water Sci. Technol.*, vol. 45, no. 10, pp. 65–73, 2002.
- [47] Α. Τσιμπερδώνης, “Αναερόβια Χώνευση για την παραγωγή βιοαερίου από απόβλητα σε Περιοδικό Αναερόβιο Αντιδραστήρα με Ανακλαστήρες,” Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2014.
- [48] I. V. Skiadas, H. N. Gavala, and G. Lyberatos, “Modelling of the periodic anaerobic baffled reactor (PABR) based on the retaining factor concept,” *Water Res.*, vol. 34, no. 15, pp. 3725–3736, 2000.
- [49] J. Mata-Alvarez, S. Macé, and P. Lladrés, “Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives,” *Bioresour. Technol.*, vol. 74, no. 1, pp. 3–16, 2000.
- [50] Α. Δούναβης, “Βιοτεχνολογική παραγωγή υδρογόνου και μεθανίου από ακατέργαστη γλυκερόλη,” Πανεπιστήμιο Πατρών, 2015.
- [51] L. R. Petzold, “Description of DASSL: a differential/algebraic system solver,” 1982.

- [52] R. T. Haug, *The Practical Handbook of Compost Engineering*, First. CRC Press, 1993.
- [53] A. Vlyssides, S. Mai, and E. M. Barampouti, "An integrated mathematical model for co-composting of agricultural solid wastes with industrial wastewater," *Bioresour. Technol.*, vol. 100, no. 20, pp. 4797–4806, 2009.
- [54] Β. Σκιαδά, "Μελέτη της μικροβιακής ποικιλότητας κατά την συγκομποστοποίηση στερεών και υγρών αγροτοβιομηχανικών υποπροϊόντων με τη χρήση μοριακών τεχνικών," Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 2011.
- [55] Ó. J. Sánchez, D. A. Ospina, and S. Montoya, "Compost supplementation with nutrients and microorganisms in composting process," *Waste Manag.*, vol. 69, no. Supplement C, pp. 136–153, 2017.
- [56] G. Füleky and S. Benedek, "Composting to Recycle Biowaste BT - Sociology, Organic Farming, Climate Change and Soil Science," E. Lichtfouse, Ed. Dordrecht: Springer Netherlands, 2010, pp. 319–346.
- [57] United States Environmental Protection Agency (USEPA), "Composting At Home," 2015. .
- [58] H. Insam and M. de Bertoldi, "Chapter 3 Microbiology of the composting process," in *Compost Science and Technology*, vol. Volume 8, M. de B. L.F. Diaz W. Bidlingmaier and E. Stentiford BT - Waste Management Series, Ed. Elsevier, 2007, pp. 25–48.
- [59] F. C. Miller, "Composting of Municipal Solid Waste and its Components," in *Microbiology of Solid Waste*, A. C. Palmisano and M. A. Barlaz, Eds. CRC Press, 1996, pp. 116–145.
- [60] J. Ryckeboer *et al.*, "A survey of bacteria and fungi occurring during composting and self-heating processes," *Ann. Microbiol.*, vol. 53, no. 4, pp. 349–410, 2003.
- [61] M. P. Bernal, J. A. Albuquerque, and R. Moral, "Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review," *Bioresour. Technol.*, vol. 100, no. 22, pp. 5444–5453, 2009.
- [62] H. Insam and M. de Bertoldi, "Microbiology of the composting process," *Compost Sci. Technol. Waste Manag. Ser.*, vol. 8, pp. 25–48, 2007.
- [63] S. L. Crawford, G. E. Johnson, and F. E. Goetz, "The Potential for Bioremediation of Soils Containing PAHs by Composting," *Compost Sci. Util.*, vol. 1, no. 3, pp. 41–47, Jun. 1993.
- [64] L. L. Kinkel, D. C. Schlatter, M. G. Bakker, and B. E. Arenz, "Streptomyces competition and co-evolution in relation to plant disease suppression," *Res. Microbiol.*, vol. 163, pp. 490–499, 2012.
- [65] J. Ryckeboer, J. Mergaert, J. Coosemans, K. Deprins, and J. Swings, "Microbiological aspects of biowaste during composting in a monitored compost bin," *J. Appl. Microbiol.*, vol. 94, pp. 127–137, 2003.
- [66] I. Villar, D. Alves, J. Garrido, and S. Mato, "Evolution of microbial dynamics during the maturation phase of the composting of different types of waste," *Waste Manag.*, vol. 54, pp. 83–92, 2016.
- [67] The Composting Council of Canada, "The Composting Process: Compost Maturity," Montreal, 2016.

- [68] L. F. Diaz and G. M. Savage, "Chapter 4 Factors that affect the process," in *Compost Science and Technology*, vol. Volume 8, M. de B. L.F. Diaz W. Bidlingmaier and E. Stentiford BT - Waste Management Series, Ed. Elsevier, 2007, pp. 49–65.
- [69] G. Bonito, O. S. Isikhuemhen, and R. Vilgalys, "Identification of fungi associated with municipal compost using DNA-based techniques," *Bioresour. Technol.*, vol. 101, no. 3, pp. 1021–1027, 2010.
- [70] M. de Bertoldi, G. Vallini, and A. Pera, "The biology of composting: A review," *Waste Manag. Res.*, vol. 1, no. 2, pp. 157–176, 1983.
- [71] K. S. Khan and R. G. Joergensen, "Changes in microbial biomass and P fractions in biogenic household waste compost amended with inorganic P fertilizers," *Bioresour. Technol.*, vol. 100, no. 1, pp. 303–309, 2009.
- [72] U. Krogmann and I. Körner, "Technology and Strategies of Composting," in *Biotechnology*, Wiley-VCH Verlag GmbH, 2000, pp. 127–150.
- [73] Y. Y. Liang *et al.*, "dSmurf selectively degrades decapentaplegic-activated MAD, and its overexpression disrupts imaginal disc development.," *J. Biol. Chem.*, vol. 278, no. 29, pp. 26307–26310, 2003.
- [74] United States Environmental Protection Agency (USEPA), "Types of Composting and Understanding the Process," *Sustainable Management of Food*, 2014. .
- [75] Frontier Industrial, "Creating Value out of your waste," 2017. [Online]. Available: <http://www.frontierindustrial.net/>. [Accessed: 24-Sep-2017].
- [76] T. G. Leton and E. I. Stentiford, "Control of aeration in static pile composting," *Waste Manag. Res.*, vol. 8, no. 4, pp. 299–306, 1990.
- [77] W. P. Barber and D. C. Stuckey, "The use of the anaerobic baffled reactor (ABR) for wastewater treatment: A review," *Water Res.*, vol. 33, no. 7, pp. 1559–1578, 1999.
- [78] L. Habets, "Overview of industrial wastewater treatment," 1996.
- [79] P. L. McCarty, "One hundred years of anaerobic digestion," *Elsevier Biomed. Press B.V.*, pp. 3–21, 1981.
- [80] O. Levenspiel, *Chemical reaction engineering*, vol. 38, no. 11. 1999.
- [81] A. A. M. Langenhoff, N. Intrachandra, and D. C. Stuckey, "Treatment of dilute soluble and colloidal wastewater using an anaerobic baffled reactor: Influence of hydraulic retention time," *Water Res.*, vol. 34, no. 4, pp. 1307–1317, 2000.
- [82] A. a M. Langenhoff and D. C. Stuckey, "Treatment of dilute wastewater using an anaerobic baffled reactor: Effect of low temperature," *Water Res.*, vol. 34, no. 15, pp. 3867–3875, 2000.
- [83] J. Wang, Y. Huang, and X. Zhao, "Performance and characteristics of an anaerobic baffled reactor," *Bioresour. Technol.*, vol. 93, no. 2, pp. 205–208, 2004.
- [84] Y. Zeng, S. J. Mu, S. J. Lou, B. Tartakovsky, S. R. Guiot, and P. Wu, "Hydraulic modeling and axial dispersion analysis of UASB reactor," *Biochem. Eng. J.*, vol. 25, no. 2, pp. 113–123, 2005.



- [85] Y. Sarathai, T. Koottatep, and A. Morel, "Hydraulic characteristics of an anaerobic baffled reactor as onsite wastewater treatment system," *J. Environ. Sci.*, vol. 22, no. 9, pp. 1319–1326, 2010.
- [86] S. Li, J. Nan, H. Li, and M. Yao, "Comparative analyses of hydraulic characteristics between the different structures of two anaerobic baffled reactors (ABRs)," *Ecol. Eng.*, vol. 82, pp. 138–144, 2015.
- [87] S. Li, J. Nan, and F. Gao, "Hydraulic characteristics and performance modeling of a modified anaerobic baffled reactor (MABR)," *Chem. Eng. J.*, vol. 284, pp. 85–92, 2016.
- [88] M. R. Peña, D. D. Mara, and G. P. Avella, "Dispersion and treatment performance analysis of an UASB reactor under different hydraulic loading rates," *Water Res.*, vol. 40, no. 3, pp. 445–452, 2006.
- [89] K. S. Singh, T. Viraraghavan, A. F., and D. Bhattacharyya, "Tracer Studies in Laboratory Beach Simulating Tidal Influences," *J. Environ. Eng.*, vol. 9372, no. 2006, p. 9372, 2006.
- [90] I. Capela, M. J. Bilé, F. Silva, H. Nadais, A. Prates, and L. Arroja, "Hydrodynamic behaviour of a full-scale anaerobic contact reactor using residence time distribution technique," *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, vol. 84, no. 5, pp. 716–724, 2009.
- [91] D. Bhattacharyya and K. S. Singh, "Understanding the Mixing Pattern in an Anaerobic Expanded Granular Sludge Bed Reactor: Effect of Liquid Recirculation," *J. Environ. Eng.*, vol. 136, no. June, pp. 576–584, 2010.
- [92] J. Ji, K. Zheng, Y. Xing, and P. Zheng, "Hydraulic characteristics and their effects on working performance of compartmentalized anaerobic reactor," *Bioresour. Technol.*, vol. 116, pp. 47–52, 2012.
- [93] M. X. Zheng, K. J. Wang, J. E. Zuo, Z. Yan, H. Fang, and J. W. Yu, "Flow pattern analysis of a full-scale expanded granular sludge bed-type reactor under different organic loading rates," *Bioresour. Technol.*, vol. 107, pp. 33–40, 2012.
- [94] S. A. Martínez-Delgado, H. R. Mollinedo P., M. A. Gutiérrez, I. D. Barceló, and J. M. Méndez, "Performance of a tubular electrochemical reactor, operated with different inlets, to remove Cr(VI) from wastewater," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 34, no. 4, pp. 491–499, 2010.
- [95] D. Semyonov, W. Ratchananusorn, and I. Turunen, "Hydrodynamic model of a microstructured plate reactor," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 52, pp. 145–154, 2013.
- [96] R. Plascencia-Jatomea, F. J. Almazán-Ruiz, J. Gómez, E. P. Rivero, O. Monroy, and I. González, "Hydrodynamic study of a novel membrane aerated biofilm reactor (MABR): Tracer experiments and CFD simulation," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 138, pp. 324–332, 2015.
- [97] X. Shi, R. Sun, X. Lan, F. Liu, Y. Zhang, and J. Gao, "CPFD simulation of solids residence time and back-mixing in CFB risers," *Powder Technol.*, vol. 271, pp. 16–25, 2015.
- [98] T. Song, K. Jiang, J. Zhou, D. Wang, N. Xu, and Y. Feng, "CFD modelling of gas-liquid flow in an industrial scale gas-stirred leaching tank," *Int. J. Miner. Process.*, vol. 142, pp. 63–72, 2015.
- [99] P. Peng *et al.*, "Concentrated high intensity electric field (CHIEF) system for non-thermal

- pasteurization of liquid foods: Modeling and simulation of fluid mechanics, electric analysis, and heat transfer," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 97, pp. 183–193, 2017.
- [100] M. Nouri, G. Rahpaima, M. M. Nejad, and M. Imani, "Computational simulation of CO<sub>2</sub> capture process in a fluidized-bed reactor," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 108, pp. 1–10, 2018.
- [101] H. Patel, F. Ein-Mozaffari, and R. Dhib, "CFD analysis of mixing in thermal polymerization of styrene," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 34, no. 4, pp. 421–429, 2010.
- [102] W. K. Qi, Y. L. Guo, M. Xue, and Y. Y. Li, "Hydraulic analysis of an upflow sand filter: Tracer experiments, mathematical model and CFD computation," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 104, pp. 460–472, 2013.
- [103] W. K. Qi, T. Hojo, and Y. Y. Li, "Hydraulic characteristics simulation of an innovative self-agitation anaerobic baffled reactor (SA-ABR)," *Bioresour. Technol.*, vol. 136, pp. 94–101, 2013.
- [104] Y. Chen *et al.*, "Mathematical modeling of upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors: Simultaneous accounting for hydrodynamics and bio-dynamics," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 137, pp. 677–684, 2015.
- [105] J. Li, E. Shi, P. Antwi, and S.-Y. Leu, "Modeling the performance of an anaerobic baffled reactor with the variation of hydraulic retention time," *Bioresour. Technol.*, vol. 214, pp. 477–486, 2016.
- [106] I. V. Skiadas and G. Lyberatos, "The periodic anaerobic baffled reactor," *Water Sci. Technol.*, vol. 38, no. 8–9–9 pt 7, pp. 401–408, 1998.
- [107] X. lei Liu, N. qi Ren, and C. li Wan, "Hydrodynamic characteristics of a four-compartment periodic anaerobic baffled reactor," *J. Environ. Sci.*, vol. 19, no. 10, pp. 1159–1165, 2007.
- [108] S. W. H. Van Hulle, M. Vesvikar, H. Poutiainen, and I. Nopens, "Importance of scale and hydrodynamics for modeling anaerobic digester performance," *Chem. Eng. J.*, vol. 255, pp. 71–77, 2014.
- [109] Γρηγοροπούλου Ε. και Φιλιππόπουλος Κ., *Μηχανική Χημικών Διεργασιών*. Αθήνα: Εκδόσεις ΕΜΠ, 2013.
- [110] S. Nanda, "Reactors and Fundamentals of Reactors Design for Chemical Reaction," *Maharshi Dayanand Univ.*, pp. 1–22, 2008.
- [111] Α. Θ. Παπαϊωάννου, *Μηχανική των Ρευστών*, 2nd ed. Αθήνα: Εκδόσεις Κοράλι, 2002.
- [112] Δ. Κ. Ασημακόπουλος, Β. Ι. Λυγερού, και Γ. Α. Αραμπατζής, *Μεταφορά Θερμότητας και μάζας*. Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2012.
- [113] H. S. Fogler, *Elements of Chemical Reaction Engineering (Απόδοση στα ελληνικά: Μηχανική Χημικών Διεργασιών και Σχεδιασμός Αντιδράσεων -Φιλιππόπουλος Κ.Ι. και Μαρνέλλος Γ.)*, 4th ed. Pearson Education Inc., 2009.
- [114] C. De Loubens, R. G. Lentle, C. Hulls, P. W. M. Janssen, R. J. Love, and J. P. Chambers, "Characterisation of mixing in the proximal duodenum of the rat during longitudinal contractions and comparison with a fluid mechanical model based on spatiotemporal motility data," *PLoS One*, vol. 9, no. 4, 2014.

- [115] H. W. Young and J. C. Young, "Hydraulic Characteristics of Upflow," vol. 114, no. 3, pp. 621–638, 1988.
- [116] Cosmol Multiphysics, "Overview of Comsol Multiphysics," 2015. [Online]. Available: <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics>. [Accessed: 25-Jul-2016].
- [117] K. Bevziuk, A. Chebotarev, D. Snigur, Y. Bazel, M. Fizer, and V. Sidey, "Spectrophotometric and theoretical studies of the protonation of Allura Red AC and Ponceau 4R," *J. Mol. Struct.*, vol. 1144, pp. 216–224, 2017.
- [118] K. Stamatelatou, V. Vavilin, and G. Lyberatos, "Performance of a glucose fed periodic anaerobic baffled reactor under increasing organic loading conditions: 1. Experimental results," *Bioresour. Technol.*, vol. 88, no. 2, pp. 131–136, 2003.
- [119] K. Stamatelatou, I. V. Skiadas, and G. Lyberatos, "On the behavior of the periodic anaerobic baffled reactor (PABR) during the transition from carbohydrate to protein-based feedings," *Bioresour. Technol.*, vol. 92, no. 3, pp. 321–326, 2004.
- [120] X. Liu, N. Ren, and Y. Yuan, "Performance of a periodic anaerobic baffled reactor fed on chinese traditional medicine industrial wastewater," *Bioresour. Technol.*, vol. 100, no. 1, pp. 104–110, 2009.
- [121] Ι. Σκιαδάς, "Περιοδικός αναερόβιος χωνευτήρας εναλλασσόμενης καθοδικής και ανοδικής ροής," Πανεπιστήμιο Πατρών, 1998.
- [122] APHA/AWWA/WEF, "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater," *Stand. Methods*, p. 541, 2012.
- [123] S. M. Tiquia and N. F. Y. Tam, "Elimination of phytotoxicity during co-composting of spent pig-manure sawdust litter and pig sludge," *Bioresour. Technol.*, vol. 65, no. 1–2, pp. 43–49, 1998.
- [124] S. M. Selim, M. S. Zayed, and M. A. Houssam, "Evaluation of phytotoxicity of compost during composting process," *Nat. Sci.*, vol. 10, no. 2, pp. 69–77, 2012.
- [125] M. Soto, R. Méndez, and J. M. Lema, "Methanogenic and non-methanogenic activity tests. Theoretical basis and experimental set up," *Water Res.*, vol. 27, no. 8, pp. 1361–1376, 1993.
- [126] D. Valcke and W. Verstraete, "A Practical Method to Estimate the Acetoclastic Methanogenic Biomass in Anaerobic Sludges," *J. (Water Pollut. Control Fed.)*, vol. 55, no. 9, pp. 1191–1195, 1983.
- [127] P. S. Blika, K. Stamatelatou, 26504 Patras, G. M. Kornaros, and G. Lyberatos, "ANAEROBIC DIGESTION OF OLIVE MILL WASTEWATER," *Glob. NEST J.*, vol. 11, no. 3, pp. 364–372, 2009.
- [128] F. Tambone *et al.*, "Assessing amendment and fertilizing properties of digestates from anaerobic digestion through a comparative study with digested sludge and compost," *Chemosphere*, vol. 81, no. 5, pp. 577–583, 2010.
- [129] R. Braun and A. Wellinger, "Potential of co-digestion," 2009. [Online]. Available: [http://www.iea-biogas.net/files/daten-redaktion/download/publi-task37/Potential\\_of\\_Codigestion\\_short\\_Brosch221203.pdf](http://www.iea-biogas.net/files/daten-redaktion/download/publi-task37/Potential_of_Codigestion_short_Brosch221203.pdf).
- [130] G. Bortone, "Integrated anaerobic/aerobic biological treatment for intensive swine production,"

- Bioresour. Technol.*, vol. 100, no. 22, pp. 5424–5430, 2009.
- [131] C. H. Burton and C. Turner, *Manure Management: Treatment Strategies for Sustainable Agriculture*. 2003.
- [132] J. B. Holm-Nielsen, T. Al Seadi, and P. Oleskowicz-Popiel, “The future of anaerobic digestion and biogas utilization,” *Bioresour. Technol.*, vol. 100, no. 22, pp. 5478–5484, 2009.
- [133] A. Jones, M. Pimbert, and J. Jiggins, “Virtuous Circles: Values, Systems and Sustainability Virtuous Circles,” *Reproduction*, p. 196, 2011.
- [134] T. Kraemer and S. Gamble, “Integrating anaerobic digestion with composting,” *Biocycle*, vol. 55, no. 10, p. 32, 2014.
- [135] W. Schäfer and M. Lehto, “Solid compost from biogas plant digestion residues – a new product,” no. 3, pp. 12–13, 2006.
- [136] G. Vallini, A. Pera, S. Frassinetti, F. Cecchi, and F. Cecchi, “Co-composting for managing effluent from thermophilic anaerobic digestion of municipal solid waste,” *Environ. Technol. (United Kingdom)*, vol. 12, no. 12, pp. 1137–1145, 1991.
- [137] I. Michalopoulos *et al.*, “Valorization of the Liquid Fraction of a Mixture of Livestock Waste and Cheese Whey for Biogas Production Through High-rate Anaerobic Co-digestion and for Electricity Production in a Microbial Fuel Cell (MFC),” *Waste and Biomass Valorization*, vol. 8, no. 5, pp. 1759–1769, 2017.
- [138] Ελληνικός Κώδικας Ορθής Γεωργικής Πρακτικής, “Κώδικας ορθής γεωργικής πρακτικής για την προστασία των νερών από την Νιτρορύπανση Γεωργικής Προέλευσης,” 2015. [Online]. Available: [http://www.apdkritis.gov.gr/sites/default/files/eggrafa/ya\\_1420\\_82031\\_201\\_5kodikas\\_orthis\\_georgikis\\_praktikis\\_gia\\_tin\\_prostasia\\_ton\\_neron.pdf](http://www.apdkritis.gov.gr/sites/default/files/eggrafa/ya_1420_82031_201_5kodikas_orthis_georgikis_praktikis_gia_tin_prostasia_ton_neron.pdf). [Accessed: 25-May-2016].
- [139] R. Anjum, E. Grohmann, and N. Krakat, “Anaerobic digestion of nitrogen rich poultry manure: Impact of thermophilic biogas process on metal release and microbial resistances,” *Chemosphere*, vol. 168, pp. 1637–1647, 2017.
- [140] S. Borowski, J. Domański, and L. Weatherley, “Anaerobic co-digestion of swine and poultry manure with municipal sewage sludge,” *Waste Manag.*, vol. 34, no. 2, pp. 513–521, 2014.
- [141] G. Capson-Tojo, M. Rouez, M. Crest, J. P. Steyer, J. P. Delgenès, and R. Escudié, “Food waste valorization via anaerobic processes: a review,” *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, vol. 15, no. 3, pp. 499–547, 2016.
- [142] K. Kuruti *et al.*, “Exploitation of rapid acidification phenomena of food waste in reducing the hydraulic retention time (HRT) of high rate anaerobic digester without conceding on biogas yield,” *Bioresour. Technol.*, vol. 226, pp. 65–72, 2017.
- [143] M. Zamanzadeh, L. H. Hagen, K. Svensson, R. Linjordet, and S. J. Horn, “Anaerobic digestion of food waste - Effect of recirculation and temperature on performance and microbiology,” *Water Res.*, vol. 96, pp. 246–254, 2016.
- [144] C. Zhang, H. Su, J. Baeyens, and T. Tan, “Reviewing the anaerobic digestion of food waste for

- biogas production," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 38, pp. 383–392, 2014.
- [145] F. Shen *et al.*, "Performances of anaerobic co-digestion of fruit & vegetable waste (FVW) and food waste (FW): Single-phase vs. two-phase," *Bioresour. Technol.*, vol. 144, pp. 80–85, 2013.
- [146] C. M. Braguglia, A. Gallipoli, A. Gianico, and P. Pagliaccia, "Anaerobic bioconversion of food waste into energy: A critical review," *Bioresour. Technol.*, 2017.
- [147] L. De Baere and B. Mattheeuws, "State-of-the-art 2008 - Anaerobic digestion of solid waste," *Waste Manag. World*, vol. 9, no. 5, pp. 7–12, 2015.
- [148] L. Dong, Y. Zhenhong, and S. Yongming, "Semi-dry mesophilic anaerobic digestion of water sorted organic fraction of municipal solid waste (WS-OFMSW)," *Bioresour. Technol.*, vol. 101, no. 8, pp. 2722–2728, 2010.
- [149] J. Zhang, W. Li, J. Lee, K.-C. Loh, Y. Dai, and Y. W. Tong, "Enhancement of biogas production in anaerobic co-digestion of food waste and waste activated sludge by biological co-pretreatment," *Energy*, 2017.
- [150] J. Zhang, K.-C. Loh, W. Li, J. W. Lim, Y. Dai, and Y. W. Tong, "Three-stage anaerobic digester for food waste," *Appl. Energy*, vol. 194, pp. 287–295, 2017.
- [151] J. Zhang *et al.*, "Optimization and microbial community analysis of anaerobic co-digestion of food waste and sewage sludge based on microwave pretreatment," *Bioresour. Technol.*, vol. 200, pp. 253–261, 2016.
- [152] Y. Li, Y. Jin, J. Li, H. Li, Z. Yu, and Y. Nie, "Effects of thermal pretreatment on degradation kinetics of organics during kitchen waste anaerobic digestion," *Energy*, vol. 118, pp. 377–386, 2017.
- [153] Y. Li, H. Liu, F. Yan, D. Su, Y. Wang, and H. Zhou, "High-calorific biogas production from anaerobic digestion of food waste using a two-phase pressurized biofilm (TPPB) system," *Bioresour. Technol.*, vol. 224, pp. 56–62, 2017.
- [154] Y. Wu *et al.*, "A new method of two-phase anaerobic digestion for fruit and vegetable waste treatment," *Bioresour. Technol.*, vol. 211, pp. 16–23, 2016.
- [155] B. H. Yan, A. Selvam, and J. W. C. Wong, "Innovative method for increased methane recovery from two-phase anaerobic digestion of food waste through reutilization of acidogenic off-gas in methanogenic reactor," *Bioresour. Technol.*, vol. 217, pp. 3–9, 2016.
- [156] C. Wu *et al.*, "Enhanced Productions and Recoveries of Ethanol and Methane from Food Waste by a Three-Stage Process," *Energy and Fuels*, vol. 29, no. 10, pp. 6494–6500, 2015.
- [157] C. Wu *et al.*, "Effect of ethanol pre-fermentation and inoculum-to-substrate ratio on methane yield from food waste and distillers' grains," *Appl. Energy*, vol. 155, pp. 846–853, 2015.
- [158] H. Carrère *et al.*, "Pretreatment methods to improve sludge anaerobic degradability: A review," *J. Hazard. Mater.*, vol. 183, no. 1–3, pp. 1–15, 2010.
- [159] Y. Ren *et al.*, "A comprehensive review on food waste anaerobic digestion: Research updates and tendencies," *Bioresour. Technol.*, no. July, pp. 0–1, 2017.

- [160] K. Izumi, Y. Okishio, N. Nagao, C. Niwa, S. Yamamoto, and T. Toda, "Effects of particle size on anaerobic digestion of food waste," *Int. Biodeterior. Biodegradation*, vol. 64, no. 7, pp. 601–608, 2010.
- [161] R. Borja, B. Rincón, F. Raposo, J. Alba, and A. Martín, "Kinetics of mesophilic anaerobic digestion of the two-phase olive mill solid waste.," *Biochem. Eng. J.*, vol. 15, pp. 139–145, 2003.
- [162] R. T. Haug, D. C. Stuckey, J. M. Gossett, and P. L. Mccarty, "Effect on of of thermal digestibility organic and dewaterabilHy sludges," *J. Water Pollut. Control Fed.*, vol. 50, no. 1, pp. 73–85, 1978.
- [163] S. Tanaka and K. Kamiyama, "Thermochemical pretreatment in the anaerobic digestion of waste activated sludge," *Water Sci. Technol.*, vol. 46, no. 10, pp. 173–179, 2002.
- [164] D. Kondusamy and A. S. Kalamdhad, "Pre-treatment and anaerobic digestion of food waste for high rate methane production – A review," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 2, no. 3, pp. 1821–1830, 2014.
- [165] J. a Eastman and J. F. Ferguson, "Solubilization organic phase of of carbon anaerobic particulate during the digestion acid," *J. (Water Pollut. Control Fed.*, vol. 53, no. 3, pp. 352–366, 1981.
- [166] A. Hejnfelt and I. Angelidaki, "Anaerobic digestion of slaughterhouse by-products," *Biomass and Bioenergy*, vol. 33, no. 8, pp. 1046–1054, 2009.
- [167] J. K. Cho, S. C. Park, and H. N. Chang, "Biochemical methane potential and solid state anaerobic digestion of Korean food wastes," *Bioresour. Technol.*, vol. 52, no. 3, pp. 245–253, 1995.
- [168] J. K. Kim, B. R. Oh, Y. N. Chun, and S. W. Kim, "Effects of temperature and hydraulic retention time on anaerobic digestion of food waste," *J. Biosci. Bioeng.*, vol. 102, no. 4, pp. 328–332, 2006.
- [169] G. Liu, R. Zhang, H. M. El-Mashad, and R. Dong, "Effect of feed to inoculum ratios on biogas yields of food and green wastes," *Bioresour. Technol.*, vol. 100, no. 21, pp. 5103–5108, 2009.
- [170] N. Nagao *et al.*, "Maximum organic loading rate for the single-stage wet anaerobic digestion of food waste," *Bioresour. Technol.*, vol. 118, pp. 210–218, 2012.
- [171] H. M. El-Mashad and R. Zhang, "Biogas production from co-digestion of dairy manure and food waste," *Bioresour. Technol.*, vol. 101, no. 11, pp. 4021–4028, 2010.
- [172] L. Matsakas, Q. Gao, S. Jansson, U. Rova, and P. Christakopoulos, "Green conversion of municipal solid wastes into fuels and chemicals," *Electron. J. Biotechnol.*, vol. 26, pp. 69–83, 2017.
- [173] D. De Clercq, Z. Wen, O. Gottfried, F. Schmidt, and F. Fei, "A review of global strategies promoting the conversion of food waste to bioenergy via anaerobic digestion," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 79, no. March 2016, pp. 204–221, 2017.
- [174] WASTE4Think, "Moving towards life cycle thinking by integrating advanced waste management systems," 2016. [Online]. Available: <http://waste4think.eu/>. [Accessed: 20-Oct-2017].
- [175] ΕΛΣΤΑΤ, "Ελληνική Στατιστική Αρχή," 2011. [Online]. Available: <http://www.statistics.gr/>. [Accessed: 16-Sep-2017].
- [176] K. Papanikola *et al.*, "Food Residue Biomass Product as an Alternative Energy Source for the

- Cement Industry,” 2017.
- [177] F. Miyatake and K. Iwabuchi, “Effect of compost temperature on oxygen uptake rate, specific growth rate and enzymatic activity of microorganisms in dairy cattle manure,” *Bioresour. Technol.*, vol. 97, no. 7, pp. 961–965, 2006.
- [178] Β. Μάστακα, “Μικροβιακή διαδοχή κατά την κομποστοποίηση ιλύος από το βιολογικό καθαρισμό Ηρακλείου, με τη μέθοδο των αναστρεφόμενων σωρών,” Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, 2007.
- [179] A. Trémier, C. Teglia, and S. Barrington, “Effect of initial physical characteristics on sludge compost performance,” *Bioresour. Technol.*, vol. 100, no. 15, pp. 3751–3758, 2009.
- [180] P. Balmér, *Phosphorus recovery - An overview of potentials and possibilities*, vol. 49. 2004.
- [181] I. Agapitidis and C. Zafiris, “Energy exploitation of biogas: European and national perspective,” 2006.
- [182] H. J. Kutzner, “Microbiology of Composting,” in *Biotechnology, En*, 2nd ed., vol. III, Wiley-VCH, 2001, pp. 35–101.
- [183] M. Tuomela, M. Vikman, A. Hatakka, and M. Itävaara, “Biodegradation of lignin in a compost environment: A review,” *Bioresour. Technol.*, vol. 72, no. 2, pp. 169–183, 2000.
- [184] Α. Κατσίρη, *Λιπασματοποίηση απορριμμάτων. Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών “Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων”. Σημειώσεις Μαθήματος: Διαχείριση στερεών απορριμμάτων και ιλύος*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2003.
- [185] Y. Wang, W. Niu, and P. Ai, “Assessing thermal conductivity of composting reactor with attention on varying thermal resistance between compost and the inner surface,” *Waste Manag.*, vol. 58, pp. 144–151, 2016.
- [186] M. A. Bustamante, C. Paredes, F. C. Marhuenda-Egea, A. Pérez-Espinosa, M. P. Bernal, and R. Moral, “Co-composting of distillery wastes with animal manures: Carbon and nitrogen transformations in the evaluation of compost stability,” *Chemosphere*, vol. 72, no. 4, pp. 551–557, 2008.
- [187] F. Zucconi, M. Forte, A. D. E. Monaco, and M. De Bertoldi, *Biological Evaluation of Compost Maturity*, vol. 22. 1981.
- [188] E. Erhart and K. Burian, “Evaluating Quality and Suppressiveness Of Austrian Biowaste Composts,” *Compost Sci. Util.*, vol. 5, no. 3, pp. 15–24, 1997.
- [189] J. S. Jeris and R. W. Regan, *Controlling environmental parameters for optimum composting*, vol. 14. 1973.
- [190] C. Sundberg, S. Smårs, and H. Jönsson, “Low pH as an inhibiting factor in the transition from mesophilic to thermophilic phase in composting,” *Bioresour. Technol.*, vol. 95, no. 2, pp. 145–150, 2004.
- [191] R. Yañez, J. L. Alonso, and M. J. Díaz, “Influence of bulking agent on sewage sludge composting process,” *Bioresour. Technol.*, vol. 100, no. 23, pp. 5827–5833, 2009.

- [192] P. F. Strom, "Identification of thermophilic bacteria in solid-waste composting.," *Appl. Environ. Microbiol.*, vol. 50, no. 4, pp. 906–913, Oct. 1985.



# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι (Η δομή του ADM1) [46]

Συστατικά →	i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Ρυθμός (ρ <sub>i</sub> , KgCOD m <sup>-3</sup> d <sup>-1</sup> )
↓	↓	S <sub>su</sub>	S <sub>sa</sub>	S <sub>fa</sub>	S <sub>su4</sub>	S <sub>su5</sub>	S <sub>su6</sub>	S <sub>su7</sub>	S <sub>su8</sub>	S <sub>su9</sub>	S <sub>su10</sub>	S <sub>su11</sub>	S <sub>su12</sub>	S <sub>su13</sub>	S <sub>su14</sub>	S <sub>su15</sub>	
1	Υδρόλυση στερεών																$k_{d1} \cdot X_c$
2	Υδρόλυση υδατικών	1															$K_{hyd,cb} \cdot X_{cb}$
3	Υδρόλυση πρωτ.		1														$K_{hyd,pr} \cdot X_{pr}$
4	Υδρόλυση λιπιδίων	1 - f <sub>su,li</sub>		f <sub>su,li</sub>													$K_{hyd,li} \cdot X_{li}$
5	Κατανάλωση σακχάρων	-1					(1-Y <sub>su</sub> )*f <sub>su,11</sub>		(1-Y <sub>su</sub> )*f <sub>su,11</sub>		(1-Y <sub>su</sub> )*f <sub>su,11</sub>	(1-Y <sub>su</sub> )*f <sub>su,11</sub>	(1-Y <sub>su</sub> )*f <sub>su,11</sub>				$-\sum_{i=1-13,16-30} C_i V_{i,5}$ $k_{m,11} \cdot \frac{S_{su}}{K_s + S_{su}} \cdot X_{su} \cdot I_1$
6	Κατανάλωση αμινοξέων		-1			(1-Y <sub>su</sub> )*f <sub>su,12</sub>		(1-Y <sub>su</sub> )*f <sub>su,12</sub>		(1-Y <sub>su</sub> )*f <sub>su,12</sub>		(1-Y <sub>su</sub> )*f <sub>su,12</sub>	(1-Y <sub>su</sub> )*f <sub>su,12</sub>				$-\sum_{i=1-13,16-30} C_i V_{i,6}$ $k_{m,12} \cdot \frac{S_{su}}{K_s + S_{su}} \cdot X_{su} \cdot I_1$
7	Κατανάλωση LCFA			-1								(1-Y <sub>su</sub> )*0.7	(1-Y <sub>su</sub> )*0.3				$k_{m,13} \cdot \frac{S_{su}}{K_s + S_{su}} \cdot X_{su} \cdot I_2$
8	Κατανάλωση βαλερικού				-1					(1-Y <sub>su</sub> )*0.54		(1-Y <sub>su</sub> )*0.31	(1-Y <sub>su</sub> )*0.15				$k_{m,14} \cdot \frac{(S_{su} + S_{hu})}{K_s + (S_{su} + S_{hu})} \cdot X_{su} \cdot \frac{1}{1 + (S_{su} + S_{hu}) / (S_{su} + S_{hu})} \cdot I_2$
9	Κατανάλωση βουτυρικού							-1				(1-Y <sub>su</sub> )*0.8	(1-Y <sub>su</sub> )*0.2				$k_{m,15} \cdot \frac{(S_{su} + S_{hu})}{K_s + (S_{su} + S_{hu})} \cdot X_{su} \cdot \frac{1}{1 + (S_{su} + S_{hu}) / (S_{su} + S_{hu})} \cdot I_2$
10	Κατανάλωση Προπιονικού									-1		(1-Y <sub>su</sub> )*0.57	(1-Y <sub>su</sub> )*0.43				$-\sum_{i=1-13,16-30} C_i V_{i,10}$ $k_{m,16} \cdot \frac{(S_{su} + S_{su})}{K_s + (S_{su} + S_{su})} \cdot X_{su} \cdot I_2$
11	Κατανάλωση οξικού											-1		(1-Y <sub>su</sub> )			$-\sum_{i=1-13,16-30} C_i V_{i,11}$ $k_{m,17} \cdot \frac{(S_{su} + S_{hu})}{K_s + (S_{su} + S_{hu})} \cdot X_{su} \cdot I_3$
12	Κατανάλωση υδρογόνου												-1	(1-Y <sub>su</sub> )			$-\sum_{i=1-13,16-30} C_i V_{i,12}$ $k_{m,18} \cdot \frac{S_{h2}}{K_s + S_{h2}} \cdot X_{h2} \cdot I_4$
13	Θάνατος των X <sub>su</sub>																$-\sum_{i=17,21-29} C_i V_{i,13}$ $K_{dec,Xsu} \cdot X_{su}$
14	Θάνατος των X <sub>sa</sub>																$-\sum_{i=17,21-29} C_i V_{i,14}$ $K_{dec,Xsa} \cdot X_{sa}$
15	Θάνατος των X <sub>fa</sub>																$-\sum_{i=17,21-29} C_i V_{i,15}$ $K_{dec,Xfa} \cdot X_{fa}$
16	Θάνατος των X <sub>c4</sub>																$-\sum_{i=17,21-29} C_i V_{i,16}$ $K_{dec,Xc4} \cdot X_{c4}$
17	Θάνατος των X <sub>pro</sub>																$-\sum_{i=17,21-29} C_i V_{i,17}$ $K_{dec,Xpro} \cdot X_{pro}$
18	Θάνατος των X <sub>c</sub>																$-\sum_{i=17,21-29} C_i V_{i,18}$ $K_{dec,Xc} \cdot X_{c}$
19	Θάνατος των X <sub>h2</sub>																$-\sum_{i=17,21-29} C_i V_{i,19}$ $K_{dec,Xh2} \cdot X_{h2}$
A4	Βαλερικό οξύ-βάση				1	-1											$K_{A,va} (S_{su} \cdot S_H - K_{a,va} S_{hu})$
A5	Βουτυρικό οξύ-βάση						1	-1									$K_{A,bu} (S_{su} \cdot S_H - K_{a,bu} S_{hu})$
A6	Προπιον. οξύ-βάση								1	-1							$K_{A,pro} (S_{pro} \cdot S_H - K_{a,pro} S_{hu})$
A7	Οξικό οξύ-βάση										1	-1					$K_{A,ac} (S_{ac} \cdot S_H - K_{a,ac} S_{hu})$
A10	Ανόργαν. C οξύ-βάση														1	-1	$K_{A,BCO2} (S_{HCO3} \cdot S_H - K_{a,CO2} S_{CO2})$
	Μονοακρυλαμί ες (KgCOD m <sup>-3</sup> )																Συντελεστές Παρεμπόδισης I <sub>1</sub> = I <sub>pH, bac</sub> + I <sub>N</sub> , lim I <sub>2</sub> = I <sub>pH, bac</sub> + I <sub>N</sub> , lim + I <sub>h2, fa/c4/pro</sub> I <sub>3</sub> = I <sub>pH, bac</sub> + I <sub>N</sub> , lim + I <sub>NH3, Xac</sub> I <sub>4</sub> = I <sub>pH, h2</sub> + I <sub>N</sub> , lim

Συστατικά →	i	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Ρυθμός: (ρ <sub>i</sub> , Kg COD m <sup>-3</sup> d <sup>-1</sup> )
1	Υδρόλυση στερεών	S <sub>NH4</sub>	S <sub>NH3</sub>	f <sub>h,Xc</sub>	-1	X <sub>ch</sub>	X <sub>pe</sub>	X <sub>li</sub>	X <sub>m</sub>	X <sub>aa</sub>	X <sub>fa</sub>	X <sub>c4</sub>	X <sub>pro</sub>	X <sub>ac</sub>	X <sub>h2</sub>	X <sub>i</sub>	$K_{d,i} \cdot X_i$
2	Υδρόλυση υδατ/κων					-1											$K_{d,i} \cdot X_i$
3	Υδρόλυση πρωτεϊν.						-1										$K_{d,i} \cdot X_i$
4	Υδρόλυση λιπιδίων							-1									$K_{d,i} \cdot X_i$
5	Κατανάλωση σακχάρων	-(Y <sub>m</sub> )·N <sub>bac</sub>							Y <sub>su</sub>								$k_{m,m} \cdot \frac{S_m}{K_s + S_m} \cdot X_m \cdot I_1$
6	Κατανάλωση αμινοξέων	N <sub>aa</sub> ·(Y <sub>aa</sub> )·N <sub>bac</sub>								Y <sub>aa</sub>							$k_{m,aa} \cdot \frac{S_{aa}}{K_s + S_{aa}} \cdot X_{aa} \cdot I_1$
7	Κατανάλωση LCFA	-(Y <sub>fa</sub> )·N <sub>bac</sub>									Y <sub>fa</sub>						$k_{m,fa} \cdot \frac{S_{fa}}{K_s + S_{fa}} \cdot X_{fa} \cdot I_2$
8	Κατανάλωση βαλερικού	-(Y <sub>c4</sub> )·N <sub>bac</sub>										Y <sub>c4</sub>					$k_{m,c4} \cdot \frac{(S_{c4} + S_{h2c})}{K_s + (S_{c4} + S_{h2c})} \cdot X_{c4} \cdot \frac{1}{1 + (S_{c4} + S_{h2c}) / (S_{c4} + S_{h2c})} \cdot I_3$
9	Κατανάλωση βουτυρικού	-(Y <sub>c4</sub> )·N <sub>bac</sub>										Y <sub>c4</sub>					$k_{m,c4} \cdot \frac{(S_{c4} + S_{h2c})}{K_s + (S_{c4} + S_{h2c})} \cdot X_{c4} \cdot \frac{1}{1 + (S_{c4} + S_{h2c}) / (S_{c4} + S_{h2c})} \cdot I_3$
10	Κατανάλωση προπιονικού	-(Y <sub>pro</sub> )·N <sub>bac</sub>											Y <sub>pro</sub>				$k_{m,pro} \cdot \frac{(S_{pro} + S_{h2p})}{K_s + (S_{pro} + S_{h2p})} \cdot X_{pro} \cdot I_2$
11	Κατανάλωση οξικού	-(Y <sub>ac</sub> )·N <sub>bac</sub>												Y <sub>ac</sub>			$k_{m,ac} \cdot \frac{(S_{ac} + S_{h2a})}{K_s + (S_{ac} + S_{h2a})} \cdot X_{ac} \cdot I_3$
12	Κατανάλωση υδρογόνου	-(Y <sub>h2</sub> )·N <sub>bac</sub>													Y <sub>h2</sub>		$k_{m,h2} \cdot \frac{S_{h2}}{K_s + S_{h2}} \cdot X_{h2} \cdot I_4$
13	Θάνατος των X <sub>m</sub>	- Σ C <sub>i</sub> ·V <sub>i,13</sub> i=11,23-29			1				-1								$k_{dec,Xm} \cdot X_m$
14	Θάνατος των X <sub>aa</sub>	- Σ C <sub>i</sub> ·V <sub>i,14</sub> i=11,23-29			1					-1							$k_{dec,Xaa} \cdot X_{aa}$
15	Θάνατος των X <sub>fa</sub>	- Σ C <sub>i</sub> ·V <sub>i,15</sub> i=11,23-29			1						-1						$k_{dec,Xfa} \cdot X_{fa}$
16	Θάνατος των X <sub>c4</sub>	- Σ C <sub>i</sub> ·V <sub>i,16</sub> i=11,23-29			1							-1					$k_{dec,Xc4} \cdot X_{c4}$
17	Θάνατος των X <sub>pro</sub>	- Σ C <sub>i</sub> ·V <sub>i,17</sub> i=11,23-29			1								-1				$k_{dec,Xpro} \cdot X_{pro}$
18	Θάνατος των X <sub>ac</sub>	- Σ C <sub>i</sub> ·V <sub>i,18</sub> i=11,23-29			1									-1			$k_{dec,Xac} \cdot X_{ac}$
19	Θάνατος των X <sub>h2</sub>	- Σ C <sub>i</sub> ·V <sub>i,19</sub> i=11,23-29			1										-1		$k_{dec,Xh2} \cdot X_{h2}$
A6	Προπιον οξύ-βάση																$K_{A,BH2} (S_{NH4} \cdot S_H - K_{A,BH2} S_{H2O})$
A7	Οξικό οξύ-βάση																$K_{A,BHc} (S_{ac} \cdot S_H - K_{A,BHc} S_{H2O})$
A10	Ανόργ. C οξύ-βάση																$K_{A,BCO2} (S_{HCO3} \cdot S_H - K_{A,BCO2} S_{CO2})$
A11	Ανόργ. N οξύ-βάση	1	-1														$K_{A,BN} (S_{NH3} \cdot S_H - K_{A,BN} S_{NH4})$
	Αμιμόνιο (kg-mol N m <sup>-3</sup> )	Αμιμόνιο (kg-mol N m <sup>-3</sup> )	Διαλ. Αδρανή (kg COD m <sup>-3</sup> )	Συνέετα (kg COD m <sup>-3</sup> )	Υδατάνθρακός (kg COD m <sup>-3</sup> )	Πρωτεΐνες (kg COD m <sup>-3</sup> )	Λίπη (kg COD m <sup>-3</sup> )	Αεροδιαλυτές σακχάρων (kg COD m <sup>-3</sup> )	Αεροδιαλυτές αμινοξέων (kg COD m <sup>-3</sup> )	Αεροδιαλυτές LCFA (kg COD m <sup>-3</sup> )	Αεροδιαλυτές βιάλ. και flour. (kg COD m <sup>-3</sup> )	Αεροδιαλυτές Προπιονικού (kg COD m <sup>-3</sup> )	Αεροδιαλυτές Οξικού (kg COD m <sup>-3</sup> )	Αεροδιαλυτές Υδρογόνου (kg COD m <sup>-3</sup> )	Αδρανή στερεά (kg COD m <sup>-3</sup> )		Συντελεστές: Παρεμποδισής I <sub>1</sub> = I <sub>pH, bac</sub> + I <sub>N, lim</sub> I <sub>2</sub> = I <sub>pH, bac</sub> + I <sub>N, lim</sub> + I <sub>h2, fa</sub> + I <sub>4</sub> + I <sub>pro</sub> I <sub>3</sub> = I <sub>pH, bac</sub> + I <sub>N, lim</sub> + I <sub>NH3, Xac</sub> I <sub>4</sub> = I <sub>pH, h2</sub> + I <sub>N, lim</sub>

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ (Ευρετήριο εικόνων)

Εικόνα 1.2.1 Σπατάλη τροφίμων κατά μήκος της εφοδιαστικής αλυσίδας .....	4
Εικόνα 1.3.1 Πυραμίδα ιεράρχησης για τη διαχείριση αποβλήτων (Ευρωπαϊκή Οδηγία 2008/98/EC) .....	5
Εικόνα 1.3.2 Σχηματική απεικόνιση κυκλικής οικονομίας .....	6
Εικόνα 1.4.1 Σειράδια σε μονάδα κομποστοποίησης ανοιχτού τύπου .....	8
Εικόνα 1.4.2 Μονάδα βιολογικής επεξεργασίας αποβλήτων .....	9
Εικόνα 1.4.3 Διάγραμμα ροής διεργασίας καύσης οργανικών αποβλήτων .....	10
Εικόνα 1.4.4 Διάγραμμα ροής διεργασίας πυρόλυσης οργανικών αποβλήτων .....	11
Εικόνα 1.8.1 Όχημα συλλογής οργανικών υπολειμμάτων, πλατεία Duomo, Μιλάνο .....	19
Εικόνα 2.2.1 Η διεργασία της αερόβιας κομποστοποίησης.....	44
Εικόνα 2.2.2 Σύστημα μηχανικής ανάδευσης σειραδίων .....	50
Εικόνα 2.2.3 Σύστημα αεριζόμενων στατικών σωρών .....	51
Εικόνα 2.2.4 Κομποστοποιητής περιστρεφόμενου τυμπάνου.....	53
Εικόνα 4.1.1 Πειραματική διάταξη πιλοτικού PABR όπου φαίνονται: 1. ο αντιδραστήρας, 2. οι συστοιχίες των ηλεκτροβανών, 3. το δοχείο τροφοδοσίας, 4. η δοσομετρική αντλία, 5. το δοχείο συλλογής της εκροής, 6. ο σωλήνας τροφοδοσίας και 7. η εκροή του αντιδραστήρα.....	69
Εικόνα 4.2.1 Γεωμετρία εσωτερικού κυλίνδρου εργαστηριακού PABR (Comsol) .....	73
Εικόνα 4.2.2 Γεωμετρία τοιχωμάτων ανακλαστήρα (Baffle) εργαστηριακού PABR .....	74
Εικόνα 4.2.3 Κατασκευή τοιχωμάτων ανακλαστήρων (Baffle) με εντολή Rotate .....	74
Εικόνα 4.2.4 Κατασκευή τοιχωμάτων διαμερισμάτων (Wall) με εντολή Rotate .....	74
Εικόνα 4.2.5 Κατασκευή ανακλαστήρων με Χρήση Work Plane .....	75
Εικόνα 4.2.6 Το εξωτερικό τοίχωμα του αντιδραστήρα.....	75
Εικόνα 4.2.7 Τοποθέτηση σωληνώσεων εισόδου - εξόδου στο μοντέλο του αντιδραστήρα.....	76
Εικόνα 4.2.8 Εισαγωγή "Work Plane" χρησιμοποιώντας τη χρωματισμένη επιφάνεια .....	76
Εικόνα 4.2.9 Εισαγωγή σημείου σύζευξης στο "Work Plane", σωληνώσεων εισόδου - εξόδου .....	77
Εικόνα 4.2.10 Κατασκευή Ευθύγραμμου Τμήματος, πάνω στο οποίο θα δημιουργηθεί ο σωλήνας σύζευξης εισόδου-εξόδου.....	77
Εικόνα 4.2.11 Ολοκλήρωση του Ευθύγραμμου Τμήματος, πάνω στο οποίο θα δημιουργηθεί ο σωλήνας σύζευξης εισόδου - εξόδου.....	78
Εικόνα 4.2.12 Αποτέλεσμα Δημιουργίας Σωλήνωσης Σύζευξης .....	78
Εικόνα 4.2.13 Ένωση Σωληνώσεων Εισόδου - Εξόδου - Σύζευξης .....	79
Εικόνα 4.2.14 Τοποθέτηση του Σωλήνα Σύζευξης σε κάθε διαμέρισμα του Αντιδραστήρα .....	79
Εικόνα 4.2.15 Όγκος του Αντιδραστήρα που Εξαιρέθηκε από του Υπολογισμούς.....	80
Εικόνα 4.2.16 Επιφάνειες που εξαιρέθηκαν από τη Γεωμετρία, στην Ένωση Σωληνώσεων - Δοχείου.....	80
Εικόνα 4.2.17 Τελική Εικόνα της Γεωμετρίας του Μοντέλου.....	81
Εικόνα 4.2.18 Επιλογή Όγκου Ελέγχου για τον ορισμό της ροής του νερού .....	82
Εικόνα 4.2.19 Επιφάνεια Εισόδου, εισροής του υδατικού διαλύματος ιχνηθέτη .....	82
Εικόνα 4.2.20 Επιφάνεια Εξόδου, εκροής του υδατικού διαλύματος ιχνηθέτη .....	83
Εικόνα 4.2.21 Επιλογή Ενδιάμεσης Επιφάνειας για τη φραγή της ροής.....	83
Εικόνα 4.2.22 Μη διαπερατές Επιφάνειες από τον ιχνηθέτη .....	84
Εικόνα 4.2.23 Πλέγμα που κατασκευάστηκε στο Μοντέλο .....	84
Εικόνα 4.2.24 Πλέγμα που κατασκευάστηκε στο μοντέλο, με προβολή του εσωτερικού μέρους του διαμερίσματος .....	85
Εικόνα 4.2.25 Εναλλαγή των Εισόδων - Εξόδων - Ενδιάμεσων Τοιχωμάτων.....	86
Εικόνα 4.2.26 Εισαγωγή Παραμέτρου για την διευκόλυνση της μεταβολής της Περιόδου Εναλλαγής.....	86

Εικόνα 4.2.27 Ορισμός χρονικών ορίων, χρησιμοποιώντας τη Παράμετρο της Περιόδου Εναλλαγής .....	87
Εικόνα 4.2.28 Ορισμός των Χρησιμοποιούμενων Μεταβλητών .....	88
Εικόνα 4.2.29 Κατανομή της συγκέντρωσης του ιχνηθέτη στο εσωτερικό του αντιδραστήρα. Από αριστερά προς τα δεξιά, στιγμιότυπα για τις χρονικές στιγμές $t=12h$ , $t=24h$ , $t=36h$ .....	90
Εικόνα 4.2.30 Στιγμιότυπο κατά τη χρονική στιγμή $t=56h$ (μεσαίο στιγμιότυπο) σε σύγκριση με την εικόνα του αντιδραστήρα σε $t=12h$ (αριστερά) και $t=168h$ (δεξιά) .....	90
Εικόνα 4.2.31 Στιγμιότυπο προσομοίωσης τη χρονική στιγμή $t=168h$ .....	91
Εικόνα 4.2.32 Στιγμιότυπα προσομοίωσης για $t=12h$ (αριστερά), $t=25h$ (μέση), $t=288h$ (δεξιά) .....	92
Εικόνα 4.2.33 Απεικόνιση της κατανομής του ιχνηθέτη στο εσωτερικό του πιλότου τις χρονικές στιγμές (από αριστερά) $t=257h$ , $t=336h$ και $t=432h$ .....	95
Εικόνα 5.1.1 Η διάταξη μέτρησης του παραγόμενου βιοαερίου (κλικογράφος) .....	106
Εικόνα 5.2.1 Ο πιλοτικής κλίμακας Περιοδικός Αναερόβιος Χωνευτήρας με Ανακλαστήρες .....	109
Εικόνα 5.2.2 Το ηλεκτρονικό σύστημα παρακολούθησης και ελέγχου του συστήματος (PLC) .....	109
Εικόνα 5.2.3 Το ψυγείο διατήρησης και ανάδευσης της τροφοδοσίας .....	110
Εικόνα 5.2.4 Ο εργαστηριακός κομποστοποιητής κλειστού τύπου .....	111
Εικόνα 5.2.5 Το μοτέρ της μηχανικής ανάδευσης στο πίσω μέρος του αντιδραστήρα .....	112
Εικόνα 5.2.6 Το ειδικά σχεδιασμένο καπάκι του αντιδραστήρα .....	112
Εικόνα 5.2.7 Η διάτρητη μεταλλική επιφάνεια στο κάτω μέρος του αντιδραστήρα και το σύστημα ανάδευσης .....	113
Εικόνα 6.2.1 Κτηνοτροφικές εγκαταστάσεις και διαχείριση κτηνοτροφικών αποβλήτων στην περιοχή του Μετσόβου .....	121
Εικόνα 6.3.1 Τα δείγματα προς ανάλυση και χαρακτηρισμό ανά είδος αποβλήτου .....	122
Εικόνα 7.2.1 Οι εταίροι του προγράμματος WASTE4Think και οι χώρες προέλευσης .....	158
Εικόνα 7.2.2 Οι πιλοτικές εφαρμογές του WASTE4Think .....	159
Εικόνα 7.2.3 Χωρική κατανομή των νοικοκυριών του δήμου Χαλανδρίου που συμμετέχουν στο WASTE4Think .....	160
Εικόνα 7.2.4 Ειδικά διαμορφωμένος χώρος $24m^2$ για τη συλλογή και επεξεργασία των ζυμώσιμων απορριμμάτων του δήμου Χαλανδρίου .....	161
Εικόνα 7.2.5 Ο ξηραντήρας στο οποίο πραγματοποιείται η επεξεργασία των συλλεχθέντων απορριμμάτων .....	161
Εικόνα 7.2.6 Η μορφή του FORBI μετά από την ξήρανση .....	161

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ (Ευρετήριο πινάκων)

Πίνακας 1.6.1 Δυναμικό κτηνοτροφικών αποβλήτων και αποβλήτων μεταποίησης γάλακτος στην Ελλάδα .....	15
Πίνακας 1.7.1 Στόχοι ανακύκλωσης για το έτος αναφοράς 2020 .....	16
Πίνακας 2.1.1 Θερμικά στάδια και χαρακτηριστικοί χρόνοι παραμονής .....	26
Πίνακας 2.1.2 Κατηγοριοποίηση μοντέλων με βάση το βαθμό πολυπλοκότητας.....	37
Πίνακας 4.1.1 Σύνοψη αποτελεσμάτων των πειραμάτων RTD .....	72
Πίνακας 4.2.1 Παράμετροι λειτουργίας και αντίστοιχοι λόγοι HRT/T κατά τις προσομοιώσεις.....	93
Πίνακας 4.2.2 Συνοπτικά αποτελέσματα προσομοιώσεων για διάφορους συνδυασμούς HRT και T κατά αύξουσα σειρά του λόγου HRT/T .....	98
Πίνακας 6.2.1 Παραγόμενη ποσότητα κτηνοτροφικών αποβλήτων (ανά προέλευση) ευρύτερου δήμου Μετσόβου .....	118
Πίνακας 6.2.2 Ετήσια παραγόμενη ποσότητα υπολειμμάτων από τυροκομική δραστηριότητα του ιδρύματος Τοσίτσα.....	118
Πίνακας 6.2.3 Παραγόμενη οργανική ύλη από εντατική κτηνοτροφία .....	119
Πίνακας 6.2.4 Παραγωγή φρέσκιας πρώτης ύλης ανά 1000kg Ζώντος Βάρους την ημέρα .....	119
Πίνακας 6.2.5 Συνοπτικά αποτελέσματα ερωτηματολογίου .....	120
Πίνακας 6.3.1 Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά κτηνοτροφικών αποβλήτων περιοχής Δ. Μετσόβου.....	122
Πίνακας 6.4.1 Σύσταση τροφοδοσίας ανά τύπο αποβλήτου (w/w) για κάθε πειραματικό κύκλο λειτουργίας του PABR .....	123
Πίνακας 6.4.2 Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά εκχυλίσματος του μίγματος τροφοδοσίας .....	124
Πίνακας 6.4.3 Μάζα μίγματος τροφοδοσίας και ποσοστό ανάκτησης οργανικού φορτίου για κάθε πειραματικό κύκλο .....	125
Πίνακας 6.4.4 Σύνοψη παραμέτρων λειτουργίας για τους πειραματικούς κύκλους με τροφοδοσία εκχύλιση μίγματος κτηνοτροφικών αποβλήτων και αποβλήτων τυροκομείου .....	126
Πίνακας 6.6.1 Σύνοψη αποτελεσμάτων πειραματικής διαδικασίας αναερόβιας συγχώνευσης κτηνοτροφικών αποβλήτων και αποβλήτου τυροκομείου .....	144
Πίνακας 7.2.1 Η σύσταση του FORBI.....	162
Πίνακας 7.3.1 Σύνοψη παραμέτρων λειτουργίας για τους πειραματικούς κύκλους με τροφοδοσία FORBI .....	164
Πίνακας 7.4.1 Σύνοψη αποτελεσμάτων πειραματικής διαδικασίας αναερόβιας χώνευσης FORBI .....	187
Πίνακας 8.2.1: Αρχικές συνθήκες του πειράματος 1 .....	194
Πίνακας 8.2.2: Αρχικές συνθήκες του πειράματος 2 .....	195
Πίνακας 8.2.3: Αρχικές συνθήκες του πειράματος 3 .....	195
Πίνακας 8.2.4: Αρχικές συνθήκες του πειράματος 4 .....	196
Πίνακας 8.2.5: Αρχικές συνθήκες του πειράματος 5 .....	196
Πίνακας 8.2.6: Αρχικές συνθήκες του πειράματος 6 .....	197
Πίνακας 8.2.7: Αρχικές συνθήκες του πειράματος 7 .....	197
Πίνακας 8.2.8: Αρχικές συνθήκες του πειράματος 8 .....	198
Πίνακας 8.2.9 Αρχικές συνθήκες του πειράματος 9.....	198
Πίνακας 8.3.1 Διακύμανση της μέσης θερμοκρασίας ανά όγκο σωρού στη διάρκεια των 7 ημερών .....	207

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ IV (Ευρετήριο σχημάτων)

Σχήμα 2.1.1 Κατανάλωση λιπασμάτων, % της συνολικής παραγωγής .....	23
Σχήμα 2.1.2 Μεθανογόνο Δυναμικό διαφορετικών υποστρωμάτων αναερόβιας χώνευσης .....	24
Σχήμα 2.1.3 Διάσπαση της οργανικής ύλης κατά την Αναερόβια Χώνευση .....	25
Σχήμα 2.1.4 Αναερόβιος χωνευτήρας πλήρους ανάμιξης.....	31
Σχήμα 2.1.5 Ο αντιδραστήρας UASB και τα διάφορα μέρη του .....	32
Σχήμα 2.1.6 Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης και τρόπου λειτουργίας ενός αντιδραστήρα ABR. Στα αριστερά του σχήματος βρίσκεται το αρχικό σχέδιο του ABR αντιδραστήρα και στα δεξιά της εικόνας το πλέον σύνηθες σχέδιο .....	33
Σχήμα 2.1.7 Δομή Περιοδικού Αναερόβιου Χωνευτήρα με Ανακλαστήρες (Αριστερά: Η πρόσοψη, Δεξιά: Η κάτοψη του PABR) .....	35
Σχήμα 2.1.8 Περιοδική αλλαγή των διαμερισμάτων τροφοδοσίας και εναλλαγής.....	36
Σχήμα 2.1.9 Οι φάσεις και τα προϊόντα της Αναερόβιας Χώνευσης, όπως περιγράφονται από το ADM1 .....	41
Σχήμα 2.2.1 Οι φάσεις της κομποστοποίησης και οι κυριότερες ομάδες μικροοργανισμών σε κάθε φάση .....	45
Σχήμα 3.3.1 Είδη ροής και η αντίστοιχη απόκριση σε Βηματική Επιβολή .....	62
Σχήμα 3.3.2 Διάγραμμα "F - θι" σε Βηματικές Επιβολές ανάλογα με τον αριθμό Αντιδραστήρων Πλήρους Ανάμιξης στη σειρά .....	63
Σχήμα 4.1.1 τύπος ιχνηθέτη Ponseau 4R .....	68
Σχήμα 4.1.2 Απόκριση του PABR σε βηματική επιβολή της συγκέντρωσης εισόδου με HRT=4d και χωρίς εναλλαγή του διαμερίσματος εισόδου της τροφοδοσίας .....	70
Σχήμα 4.1.3 Απόκριση του PABR σε βηματική επιβολή της συγκέντρωσης εισόδου με HRT=4d και T=2d) .....	71
Σχήμα 4.2.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης και σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα για λειτουργία με HRT=4d, χωρίς εναλλαγή του σημείου τροφοδοσίας .....	89
Σχήμα 4.2.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης και σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα για λειτουργία με HRT=4d και T=2d .....	91
Σχήμα 4.2.3 Κατανομή συγκέντρωσης του ιχνηθέτη στην έξοδο του αντιδραστήρα συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης για HRT=6d και T=4d .....	94
Σχήμα 4.2.4 Κατανομή συγκέντρωσης του ιχνηθέτη στην έξοδο του αντιδραστήρα συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης για HRT=20d και T=2d .....	94
Σχήμα 4.2.5 Κατανομή συγκέντρωσης του ιχνηθέτη στην έξοδο του αντιδραστήρα συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης για HRT=10,65d και T=42,16d .....	95
Σχήμα 4.2.6 Κατανομή συγκέντρωσης του ιχνηθέτη στην έξοδο του αντιδραστήρα συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης για HRT=6d και T=4d .....	96
Σχήμα 4.2.7 Κατανομή συγκέντρωσης του ιχνηθέτη στην έξοδο του αντιδραστήρα συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης για HRT=6d και T=2d .....	96
Σχήμα 4.2.8 Κατανομή συγκέντρωσης του ιχνηθέτη στην έξοδο του αντιδραστήρα συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης για HRT=4d και T=4d .....	96
Σχήμα 4.2.9 Κατανομή συγκέντρωσης του ιχνηθέτη στην έξοδο του αντιδραστήρα συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης για HRT=4d και T=5,3d .....	96
Σχήμα 4.2.10 Κατανομή συγκέντρωσης του ιχνηθέτη στην έξοδο του αντιδραστήρα συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης για HRT=10,65d και T=4d .....	97
Σχήμα 4.2.11 Κατανομή συγκέντρωσης του ιχνηθέτη στην έξοδο του αντιδραστήρα συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης για HRT=8,7d και T=52d .....	97
Σχήμα 4.2.12 Κατανομή συγκέντρωσης του ιχνηθέτη στην έξοδο του αντιδραστήρα συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης για HRT=20d και T=4d .....	97

Σχήμα 5.1.1 Καμπύλη βαθμονόμησης φασματοφωτομέτρου Hach Lange DR2800- 26/11/2014.....	104
Σχήμα 6.6.1 Συγκέντρωση ολικών αιωρούμενων στερεών στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του πρώτου πειραματικού κύκλου .....	128
Σχήμα 6.6.2 Συγκέντρωση πτητικών αιωρούμενων στερεών στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του πρώτου πειραματικού κύκλου .....	128
Σχήμα 6.6.3 Διακύμανση του pH στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του πρώτου πειραματικού κύκλου .....	128
Σχήμα 6.6.4 Διακύμανση της αλκαλικότητας στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του πρώτου πειραματικού κύκλου .....	128
Σχήμα 6.6.5 Ολικό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του πρώτου πειραματικού κύκλου .....	129
Σχήμα 6.6.6 Διαλυτό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του πρώτου πειραματικού κύκλου .....	129
Σχήμα 6.6.7 Σύγκριση ρυθμού οργανικής φόρτισης με το οργανικό περιεχόμενο της εκροής κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου .....	129
Σχήμα 6.6.8 Απόδοση του PABR ως προς την απομάκρυνση οργανικού φορτίου κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου .....	129
Σχήμα 6.6.9 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 1 κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου .....	130
Σχήμα 6.6.10 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 2 κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου .....	130
Σχήμα 6.6.11 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 3 κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου .....	130
Σχήμα 6.6.12 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 4 κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου .....	130
Σχήμα 6.6.13 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στην εκροή κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου .....	130
Σχήμα 6.6.14 Ημερήσια παραγωγή βιοαερίου κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου .....	131
Σχήμα 6.6.15 Ημερήσια παραγωγικότητα βιοαερίου κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου .....	131
Σχήμα 6.6.16 Συγκέντρωση ολικών αιωρούμενων στερεών στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του δεύτερου πειραματικού κύκλου .....	132
Σχήμα 6.6.17 Συγκέντρωση πτητικών αιωρούμενων στερεών στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του δεύτερου πειραματικού κύκλου .....	132
Σχήμα 6.6.18 Διακύμανση του pH στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του δεύτερου πειραματικού κύκλου .....	132
Σχήμα 6.6.19 Διακύμανση της αλκαλικότητας στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του δεύτερου πειραματικού κύκλου .....	132
Σχήμα 6.6.20 Ολικό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του δεύτερου πειραματικού κύκλου.....	133
Σχήμα 6.6.21 Διαλυτό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του δεύτερου πειραματικού κύκλου .....	133
Σχήμα 6.6.22 Σύγκριση ρυθμού οργανικής φόρτισης με το οργανικό περιεχόμενο της εκροής κατά τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου.....	133
Σχήμα 6.6.23 Απόδοση του PABR ως προς την απομάκρυνση οργανικού φορτίου κατά τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου .....	133
Σχήμα 6.6.24 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 1 κατά τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου .....	134
Σχήμα 6.6.25 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 2 κατά τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου .....	134
Σχήμα 6.6.26 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 3 κατά τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου .....	134
Σχήμα 6.6.27 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 4 κατά τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου .....	134
Σχήμα 6.6.28 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στην εκροή κατά τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου .....	135
Σχήμα 6.6.29 Ημερήσια παραγωγή βιοαερίου κατά τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου .....	135

Σχήμα 6.6.30 Ημερήσια παραγωγικότητα βιοαερίου κατά τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου .....	135
Σχήμα 6.6.31 Συγκέντρωση ολικών αιωρούμενων στερεών στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τρίτου πειραματικού κύκλου .....	136
Σχήμα 6.6.32 Συγκέντρωση πτητικών αιωρούμενων στερεών στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τρίτου πειραματικού κύκλου .....	136
Σχήμα 6.6.33 Διακύμανση του pH στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τρίτου πειραματικού κύκλου .....	136
Σχήμα 6.6.34 Διακύμανση της αλκαλικότητας στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τρίτου πειραματικού κύκλου .....	136
Σχήμα 6.6.35 Ολικό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τρίτου πειραματικού κύκλου .....	137
Σχήμα 6.6.36 Διαλυτό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τρίτου πειραματικού κύκλου .....	137
Σχήμα 6.6.37 Σύγκριση ρυθμού οργανικής φόρτισης με το οργανικό περιεχόμενο της εκροής κατά τη διάρκεια του τρίτου κύκλου .....	138
Σχήμα 6.6.38 Απόδοση του PABR ως προς την απομάκρυνση οργανικού φορτίου κατά τη διάρκεια του τρίτου κύκλου .....	138
Σχήμα 6.6.39 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 1 κατά τη διάρκεια του τρίτου κύκλου .....	138
Σχήμα 6.6.40 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 2 κατά τη διάρκεια του τρίτου κύκλου .....	138
Σχήμα 6.6.41 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 3 κατά τη διάρκεια του τρίτου κύκλου .....	139
Σχήμα 6.6.42 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 4 κατά τη διάρκεια του τρίτου κύκλου .....	139
Σχήμα 6.6.43 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στην εκροή κατά τη διάρκεια του τρίτου κύκλου .....	139
Σχήμα 6.6.44 Ημερήσια παραγωγή βιοαερίου κατά τη διάρκεια του τρίτου κύκλου .....	140
Σχήμα 6.6.45 Ημερήσια παραγωγικότητα βιοαερίου κατά τη διάρκεια του τρίτου κύκλου .....	140
Σχήμα 6.6.46 Συγκέντρωση ολικών αιωρούμενων στερεών στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τέταρτου πειραματικού κύκλου .....	140
Σχήμα 6.6.47 Συγκέντρωση πτητικών αιωρούμενων στερεών στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τέταρτου πειραματικού κύκλου .....	140
Σχήμα 6.6.48 Διακύμανση του pH στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τέταρτου πειραματικού κύκλου .....	141
Σχήμα 6.6.49 Διακύμανση της αλκαλικότητας στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τέταρτου πειραματικού κύκλου .....	141
Σχήμα 6.6.50 Ολικό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τέταρτου πειραματικού κύκλου .....	141
Σχήμα 6.6.51 Διαλυτό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τέταρτου πειραματικού κύκλου .....	141
Σχήμα 6.6.52 Σύγκριση ρυθμού οργανικής φόρτισης με το οργανικό περιεχόμενο της εκροής κατά τη διάρκεια του τέταρτου κύκλου .....	142
Σχήμα 6.6.53 Απόδοση του PABR ως προς την απομάκρυνση οργανικού φορτίου κατά τη διάρκεια του τέταρτου κύκλου .....	142
Σχήμα 6.6.54 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 1 κατά τη διάρκεια του τέταρτου κύκλου .....	142
Σχήμα 6.6.55 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 2 κατά τη διάρκεια του τέταρτου κύκλου .....	142
Σχήμα 6.6.56 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 3 κατά τη διάρκεια του τέταρτου κύκλου .....	143
Σχήμα 6.6.57 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 4 κατά τη διάρκεια του τέταρτου κύκλου .....	143
Σχήμα 6.6.58 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στην εκροή κατά τη διάρκεια του τέταρτου κύκλου .....	143
Σχήμα 6.6.59 Ημερήσια παραγωγή βιοαερίου κατά τη διάρκεια του τέταρτου κύκλου .....	144



Σχήμα 6.6.60 Ημερήσια παραγωγικότητα βιοαερίου κατά τη διάρκεια του τέταρτου κύκλου .....	144
Σχήμα 6.7.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου με πειραματικές μετρήσεις διαλυτού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου στο Διαμέρισμα 1 κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου λειτουργίας .....	145
Σχήμα 6.7.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου με πειραματικές μετρήσεις διαλυτού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου στο Διαμέρισμα 2 κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου λειτουργίας .....	145
Σχήμα 6.7.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου με πειραματικές μετρήσεις διαλυτού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου στο Διαμέρισμα 3 κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου λειτουργίας .....	146
Σχήμα 6.7.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου με πειραματικές μετρήσεις διαλυτού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου στο Διαμέρισμα 4 κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου λειτουργίας .....	146
Σχήμα 6.7.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου ADM1 με το πειραματικό μέσο pH κατά τον τέταρτο κύκλο λειτουργίας.....	147
Σχήμα 6.7.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου ADM1 με τις πειραματικές τιμές των πτητικών αιωρούμενων στερεών της εκροής κατά τον τέταρτο κύκλο λειτουργίας .....	147
Σχήμα 6.7.7 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου ADM1 με τις πειραματικές μέσες τιμές του οξικού οξέος κατά τον τέταρτο κύκλο λειτουργίας .....	147
Σχήμα 6.7.8 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου ADM1 με τις πειραματικές μέσες τιμές του προπιονικού οξέος κατά τον τέταρτο κύκλο λειτουργίας .....	147
Σχήμα 6.7.9 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου ADM1 με τις πειραματικές μέσες τιμές του βουτυρικού οξέος κατά τον τέταρτο κύκλο λειτουργίας .....	148
Σχήμα 6.7.10 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου ADM1 με τις πειραματικές τιμές της παραγωγικότητας του βιοαερίου κατά τον τέταρτο κύκλο λειτουργίας.....	148
Σχήμα 6.7.11 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου ADM1 με τις πειραματικές τιμές του ολικού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου στην εκροή κατά τον τέταρτο κύκλο λειτουργίας .....	148
Σχήμα 6.7.12 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου ADM1 με τις πειραματικές μέσες τιμές του διαλυτού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου κατά τον τέταρτο κύκλο λειτουργίας .....	148
Σχήμα 6.7.13 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου ADM1 με το πειραματικό μέσο pH κατά τον τρίτο κύκλο λειτουργίας.....	150
Σχήμα 6.7.14 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου ADM1 με τις πειραματικές τιμές των πτητικών αιωρούμενων στερεών της εκροής κατά τον τρίτο κύκλο λειτουργίας.....	150
Σχήμα 6.7.15 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου ADM1 με τις πειραματικές μέσες τιμές του οξικού οξέος κατά τον τρίτο κύκλο λειτουργίας.....	150
Σχήμα 6.7.16 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου ADM1 με τις πειραματικές μέσες τιμές του προπιονικού οξέος κατά τον τρίτο κύκλο λειτουργίας.....	150
Σχήμα 6.7.17 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου ADM1 με τις πειραματικές μέσες τιμές του βουτυρικού οξέος κατά τον τρίτο κύκλο λειτουργίας.....	150
Σχήμα 6.7.18 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου ADM1 με τις πειραματικές τιμές της παραγωγικότητας του βιοαερίου κατά τον τρίτο κύκλο λειτουργίας .....	150
Σχήμα 6.7.19 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου ADM1 με τις πειραματικές τιμές του ολικού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου στην εκροή κατά τον τρίτο κύκλο λειτουργίας.....	151
Σχήμα 6.7.20 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου ADM1 με τις πειραματικές μέσες τιμές του διαλυτού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου κατά τον τρίτο κύκλο λειτουργίας.....	151
Σχήμα 7.4.1 Συγκέντρωση ολικών αιωρούμενων στερεών στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του πρώτου πειραματικού κύκλου .....	165
Σχήμα 7.4.2 Συγκέντρωση πτητικών αιωρούμενων στερεών στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του πρώτου πειραματικού κύκλου .....	165

Σχήμα 7.4.3 Διακύμανση του pH στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του πρώτου πειραματικού κύκλου .....	166
Σχήμα 7.4.4 Διακύμανση της αλκαλικότητας στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του πρώτου πειραματικού κύκλου .....	166
Σχήμα 7.4.5 Ολικό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του πρώτου πειραματικού κύκλου .....	166
Σχήμα 7.4.6 Διαλυτό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του πρώτου πειραματικού κύκλου .....	166
Σχήμα 7.4.7 Σύγκριση ρυθμού οργανικής φόρτισης με το οργανικό περιεχόμενο της εκροής κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου .....	167
Σχήμα 7.4.8 Απόδοση του PABR ως προς την απομάκρυνση οργανικού φορτίου κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου .....	167
Σχήμα 7.4.9 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 1 κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου.....	167
Σχήμα 7.4.10 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 2 κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου...	167
Σχήμα 7.4.11 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 3 κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου...	168
Σχήμα 7.4.12 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 4 κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου...	168
Σχήμα 7.4.13 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στην εκροή κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου .....	168
Σχήμα 7.4.14 Ημερήσια παραγωγή βιοαερίου κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου.....	168
Σχήμα 7.4.15 Ημερήσια παραγωγικότητα βιοαερίου κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου .....	168
Σχήμα 7.4.16 Συγκέντρωση ολικών αιωρούμενων στερεών στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του δεύτερου πειραματικού κύκλου .....	169
Σχήμα 7.4.17 Συγκέντρωση πτητικών αιωρούμενων στερεών στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του δεύτερου πειραματικού κύκλου.....	169
Σχήμα 7.4.18 Διακύμανση του pH στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του δεύτερου πειραματικού κύκλου .....	170
Σχήμα 7.4.19 Διακύμανση της αλκαλικότητας στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του δεύτερου πειραματικού κύκλου .....	170
Σχήμα 7.4.20 Ολικό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του δεύτερου πειραματικού κύκλου.....	170
Σχήμα 7.4.21 Ολικό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του δεύτερου πειραματικού κύκλου.....	170
Σχήμα 7.4.22 Σύγκριση ρυθμού οργανικής φόρτισης με το οργανικό περιεχόμενο της εκροής κατά τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου.....	171
Σχήμα 7.4.23 Απόδοση του PABR ως προς την απομάκρυνση οργανικού φορτίου κατά τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου .....	171
Σχήμα 7.4.24 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 1 κατά τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου	171
Σχήμα 7.4.25 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 2 κατά τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου	171
Σχήμα 7.4.26 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 3 κατά τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου	172
Σχήμα 7.4.27 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 4 κατά τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου	172
Σχήμα 7.4.28 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στην εκροή κατά τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου .....	172
Σχήμα 7.4.29 Ημερήσια παραγωγή βιοαερίου κατά τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου .....	173
Σχήμα 7.4.30 Ημερήσια παραγωγικότητα βιοαερίου κατά τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου .....	173
Σχήμα 7.4.31 Συγκέντρωση ολικών αιωρούμενων στερεών στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τρίτου πειραματικού κύκλου .....	174
Σχήμα 7.4.32 Συγκέντρωση πτητικών αιωρούμενων στερεών στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τρίτου πειραματικού κύκλου .....	174

Σχήμα 7.4.33 Διακύμανση του pH στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τρίτου πειραματικού κύκλου .....	174
Σχήμα 7.4.34 Διακύμανση της αλκαλικότητας στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τρίτου πειραματικού κύκλου .....	174
Σχήμα 7.4.35 Ολικό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τρίτου πειραματικού κύκλου .....	175
Σχήμα 7.4.36 Διαλυτό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τρίτου πειραματικού κύκλου .....	175
Σχήμα 7.4.37 Σύγκριση ρυθμού οργανικής φόρτισης με το οργανικό περιεχόμενο της εκροής κατά τη διάρκεια του τρίτου κύκλου .....	175
Σχήμα 7.4.38 Απόδοση του PABR ως προς την απομάκρυνση οργανικού φορτίου κατά τη διάρκεια του τρίτου κύκλου .....	175
Σχήμα 7.4.39 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 1 κατά τη διάρκεια του τρίτου κύκλου .....	176
Σχήμα 7.4.40 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 2 κατά τη διάρκεια του τρίτου κύκλου .....	176
Σχήμα 7.4.41 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 3 κατά τη διάρκεια του τρίτου κύκλου .....	176
Σχήμα 7.4.42 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 4 κατά τη διάρκεια του τρίτου κύκλου .....	176
Σχήμα 7.4.43 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στην εκροή κατά τη διάρκεια του τρίτου κύκλου .....	176
Σχήμα 7.4.44 Ημερήσια παραγωγή βιοαερίου κατά τη διάρκεια του τρίτου κύκλου .....	177
Σχήμα 7.4.45 Ημερήσια παραγωγικότητα βιοαερίου κατά τη διάρκεια του τρίτου κύκλου .....	177
Σχήμα 7.4.46 Συγκέντρωση ολικών αιωρούμενων στερεών στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τέταρτου πειραματικού κύκλου .....	178
Σχήμα 7.4.47 Συγκέντρωση πτητικών αιωρούμενων στερεών στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τέταρτου πειραματικού κύκλου .....	178
Σχήμα 7.4.48 Διακύμανση του pH στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τέταρτου πειραματικού κύκλου .....	178
Σχήμα 7.4.49 Διακύμανση της αλκαλικότητας στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τέταρτου πειραματικού κύκλου .....	178
Σχήμα 7.4.50 Ολικό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τέταρτου πειραματικού κύκλου .....	179
Σχήμα 7.4.51 Διαλυτό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του τέταρτου πειραματικού κύκλου .....	179
Σχήμα 7.4.52 Σύγκριση ρυθμού οργανικής φόρτισης με το οργανικό περιεχόμενο της εκροής κατά τη διάρκεια του τέταρτου κύκλου .....	179
Σχήμα 7.4.53 Απόδοση του PABR ως προς την απομάκρυνση οργανικού φορτίου κατά τη διάρκεια του τέταρτου κύκλου .....	179
Σχήμα 7.4.54 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 1 κατά τη διάρκεια του τέταρτου κύκλου .....	180
Σχήμα 7.4.55 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 2 κατά τη διάρκεια του τέταρτου κύκλου .....	180
Σχήμα 7.4.56 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 3 κατά τη διάρκεια του τέταρτου κύκλου .....	180
Σχήμα 7.4.57 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 3 κατά τη διάρκεια του τέταρτου κύκλου .....	180
Σχήμα 7.4.58 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στην εκροή κατά τη διάρκεια του τέταρτου κύκλου .....	181
Σχήμα 7.4.59 Ημερήσια παραγωγή βιοαερίου κατά τη διάρκεια του τέταρτου κύκλου .....	181
Σχήμα 7.4.60 Ημερήσια παραγωγικότητα βιοαερίου κατά τη διάρκεια του τέταρτου κύκλου .....	181
Σχήμα 7.4.61 Συγκέντρωση ολικών αιωρούμενων στερεών στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του πέμπτου πειραματικού κύκλου .....	182
Σχήμα 7.4.62 Συγκέντρωση πτητικών αιωρούμενων στερεών στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του πέμπτου πειραματικού κύκλου .....	182

Σχήμα 7.4.63 Διακύμανση του pH στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του πέμπτου πειραματικού κύκλου .....	183
Σχήμα 7.4.64 Διακύμανση της αλκαλικότητας στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του πέμπτου πειραματικού κύκλου .....	183
Σχήμα 7.4.65 Ολικό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του πέμπτου πειραματικού κύκλου .....	183
Σχήμα 7.4.66 Διαλυτό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο στο εσωτερικό των 4 διαμερισμάτων του PABR κατά τη διάρκεια του πέμπτου πειραματικού κύκλου .....	183
Σχήμα 7.4.67 Σύγκριση ρυθμού οργανικής φόρτισης με το οργανικό περιεχόμενο της εκροής κατά τη διάρκεια του πέμπτου κύκλου .....	184
Σχήμα 7.4.68 Απόδοση του PABR ως προς την απομάκρυνση οργανικού φορτίου κατά τη διάρκεια του πέμπτου κύκλου .....	184
Σχήμα 7.4.69 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 1 κατά τη διάρκεια του πέμπτου κύκλου .....	185
Σχήμα 7.4.70 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 2 κατά τη διάρκεια του πέμπτου κύκλου .....	185
Σχήμα 7.4.71 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 3 κατά τη διάρκεια του πέμπτου κύκλου .....	185
Σχήμα 7.4.72 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο Διαμέρισμα 4 κατά τη διάρκεια του πέμπτου κύκλου .....	185
Σχήμα 7.4.73 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στην εκροή κατά τη διάρκεια του πέμπτου κύκλου .....	185
Σχήμα 7.4.74 Ημερήσια παραγωγή βιοαερίου κατά τη διάρκεια του πέμπτου κύκλου .....	186
Σχήμα 7.4.75 Ημερήσια παραγωγικότητα βιοαερίου κατά τη διάρκεια του πέμπτου κύκλου .....	186
Σχήμα 7.4.76 Διακύμανση του περιεχομένου του βιοαερίου σε μεθάνιο κατά τη μετάβαση από τον τέταρτο στον πέμπτο κύκλο λειτουργίας καθώς και κατά τη μετάβαση από το στάδιο 5.1 στο στάδιο 5.2.....	186
Σχήμα 7.5.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου ADM1 με το πειραματικό μέσο pH κατά τους κύκλους λειτουργίας 3, 4 και 5 (στάδιο 5.1).....	188
Σχήμα 7.5.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου ADM1 με τις πειραματικές τιμές των πτητικών αιωρούμενων στερεών της εκροής κατά τους κύκλους λειτουργίας 3, 4 και 5 (στάδιο 5.1).....	188
Σχήμα 7.5.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου ADM1 με τις πειραματικές μέσες τιμές του οξικού οξέος κατά τους κύκλους λειτουργίας 3, 4 και 5 (στάδιο 5.1).....	189
Σχήμα 7.5.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου ADM1 με τις πειραματικές μέσες τιμές του προπιονικού οξέος κατά τους κύκλους λειτουργίας 3, 4 και 5 (στάδιο 5.1).....	189
Σχήμα 7.5.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου ADM1 με τις πειραματικές μέσες τιμές του βουτυρικού οξέος κατά τους κύκλους λειτουργίας 3, 4 και 5 (στάδιο 5.1).....	189
Σχήμα 7.5.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου ADM1 με τις πειραματικές τιμές της παραγωγικότητας του βιοαερίου κατά τους κύκλους λειτουργίας 3, 4 και 5 (στάδιο 5.1).....	189
Σχήμα 7.5.7 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου ADM1 με τις πειραματικές τιμές του ολικού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου στην εκροή κατά τους κύκλους λειτουργίας 3, 4 και 5 (στάδιο 5.1).....	189
Σχήμα 7.5.8 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου ADM1 με τις πειραματικές μέσες τιμές του διαλυτού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου κατά τους κύκλους λειτουργίας 3, 4 και 5 (στάδιο 5.1).....	189
Σχήμα 8.2.1 Διάγραμμα ροής της μεθόδου ολοκληρωμένης αξιοποίησης στερεών οργανικών αποβλήτων.....	193
Σχήμα 8.2.2 Διαδικασία βελτιστοποίησης της διεργασίας της κομποστοποίησης στον εργαστηριακό κομποστοποιητή κλειστού τύπου. Αριστερά: Η διαδικασία που αφορά το μίγμα των κτηνοτροφικών αποβλήτων. Δεξιά: Η διαδικασία που αφορά το FORBI .....	199
Σχήμα 8.3.1 Μεταβολή της θερμοκρασίας του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 2.....	201
Σχήμα 8.3.2 Μεταβολή της υγρασίας του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 2.....	201
Σχήμα 8.3.3 Μεταβολή της θερμοκρασίας του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 3.....	203
Σχήμα 8.3.4 Μεταβολή της υγρασίας του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 3.....	203
Σχήμα 8.3.5 Μεταβολή των πτητικών στερεών (VS) του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 3 .....	204

Σχήμα 8.3.6 Μεταβολή του pH του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 3 .....	205
Σχήμα 8.3.7 Μεταβολή του αζώτου, του ολικού οργανικού άνθρακα και του λόγου C/N του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 3 .....	205
Σχήμα 8.3.8 Μεταβολή της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια του πειράματος 4' .....	207
Σχήμα 8.3.9 Μεταβολή της θερμοκρασίας του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 5 .....	208
Σχήμα 8.3.10 Μεταβολή της υγρασίας του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 5 .....	209
Σχήμα 8.3.11 Μεταβολή των πτητικών στερεών (VS) του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 5 .....	210
Σχήμα 8.3.12 Μεταβολή του pH του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 5 .....	210
Σχήμα 8.3.13 Μεταβολή του ολικού αζώτου (TN) του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 5 .....	211
Σχήμα 8.3.14 Μεταβολή του ολικού οργανικού άνθρακα (TOC) του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 5 .....	212
Σχήμα 8.3.15 Μεταβολή της θερμοκρασίας του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 6 .....	213
Σχήμα 8.3.16 Μεταβολή της υγρασίας του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 6 .....	214
Σχήμα 8.3.17 Μεταβολή των πτητικών στερεών (VS) του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 6 .....	215
Σχήμα 8.3.18 Μεταβολή του pH και της αγωγιμότητας του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 6 .....	215
Σχήμα 8.3.19 Μεταβολή της θερμοκρασίας του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 8 .....	217
Σχήμα 8.3.20 Μεταβολή της υγρασίας του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 8 .....	218
Σχήμα 8.3.21 Μεταβολή των πτητικών στερεών (VS) του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 8 .....	219
Σχήμα 8.3.22 Μεταβολή του pH του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 8 .....	219
Σχήμα 8.3.23 Μεταβολή της θερμοκρασίας του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 9 .....	221
Σχήμα 8.3.24 Μεταβολή της υγρασίας του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 9 .....	221
Σχήμα 8.3.25 Μεταβολή των πτητικών στερεών (VS) του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 9 .....	222
Σχήμα 8.3.26 Μεταβολή του pH του compost κατά τη διάρκεια του πειράματος 9 .....	223

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ V (Κατάλογος συντομογραφιών)

<b>ABR</b>	Anaerobic Baffled Reactor
<b>ADM1</b>	Anaerobic Digestion Model no. 1
<b>CFD</b>	Computational Fluid Dynamics
<b>COD</b>	Chemical Oxygen Demand
<b>CSTR</b>	Continuous Stirred Tank Reactor
<b>FAS</b>	Free Air Space
<b>FORBI</b>	Food Residue Biomass
<b>GI</b>	Germination Index
<b>HRT</b>	Hydraulic Retention Time
<b>IWA</b>	International Water Association
<b>LCFAs</b>	Long-Chain Fatty Acids
<b>OLR</b>	Organic Loading Rate
<b>PABR</b>	Periodic Anaerobic Baffled Reactor
<b>PFR</b>	Plug Flow Reactor
<b>PLC</b>	Programmable Logic Controller
<b>R<sub>p</sub></b>	Συντελεστής κατακράτησης βιομάζας
<b>RTD</b>	Residence Time Distribution
<b>sCOD</b>	Soluble Chemical Oxygen Demand
<b>SRT</b>	Solids Retention Time
<b>TA</b>	Total Alkalinity
<b>tCOD</b>	Total Chemical Oxygen Demand
<b>TKN</b>	Total Kjeldahl Nitrogen
<b>TN</b>	Total Nitrogen
<b>TOC</b>	Total Organic Carbon
<b>TS</b>	Total Solids
<b>TSS</b>	Total Suspended Solids
<b>T-T<sub>p</sub>-T<sub>switch</sub></b>	Περίοδος εναλλαγής διαμερίσματος τροφοδοσίας
<b>UASB(R)</b>	Upflow Anaerobic Sludge Blanket (Reactor)
<b>US EPA</b>	United States Environmental Protection Agency
<b>VFAs</b>	Volatile Fatty Acids
<b>VS</b>	Volatile Solids
<b>VSS</b>	Volatile Suspended Solids
<b>WWF</b>	World Wide Fund for Nature
<b>ΑΕΝΑΟΣ</b>	Αναπτυξη πολυπαραμετρικού μαθηματικού μοντέλου για τη βελτιστοποίηση του ενεργειακού σχεδιασμού σε ορεινές περιοχές
<b>ΑΣΑ</b>	Αστικά Στερεά Απόβλητα
<b>ΑΧ</b>	Αναερόβια Χώνευση
<b>ΔΕΔΔΗΕ</b>	Διαχειριστής Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας
<b>ΚΑΠΕ</b>	Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας
<b>ΚΕΛΜ</b>	Κέντρο Επεξεργασίας Λυμάτων Μεταμόρφωσης
<b>ΥΠΕΚΑ</b>	Υπουργείου Περιβάλλοντος Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής
<b>ΥΧΠ</b>	Υδραυλικός Χρόνος Παραμονής
<b>ΧΑΔΑ</b>	Χώρος Ανεξέλεγκτης Διάθεσης Απορριμμάτων
<b>ΧΥΤΑ</b>	Χώρος Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων
<b>ΧΥΤΥ</b>	Χώρος Υγειονομικής Ταφής Υπολειμμάτων

