

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΒΙΟΑΠΟΔΟΜΗΣΙΜΟΥ
ΚΛΑΣΜΑΤΟΣ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ
ΠΡΟΤΥΠΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΟΙΚΙΑΚΟΥ ΤΥΠΟΥ**

ΜΑΡΚΟΣ ΜΑΡΓΑΡΙΤΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ
ΜΑΡΙΑ ΛΟΪΖΙΔΟΥ

ΑΘΗΝΑ 2012

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).

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εκπόνηση της παρούσας διδακτορικής διατριβής υλοποιήθηκε στο εργαστήριο Περιβαλλοντικής Επιστήμης και Τεχνολογίας της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η ολοκλήρωση μιας διδακτορικής διατριβής δε θα μπορούσε παρά να αποτελεί ένα μικρό λίθο στην ανέμη προσπάθεια ενός ερευνητή να κατανοεί και να επιλύει προβλήματα. Ωστόσο με την ολοκλήρωση της παρούσας διδακτορικής διατριβής κλείνει ένας μεγάλος κύκλος εργασιών, και θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέδραμαν, άλλος περισσότερο και άλλος λιγότερο, στην ολοκλήρωση αυτού.

Θέλω να ευχαριστήσω θερμά, τον αξιαγάπητο καθηγητή μου Χημείας στο Λύκειο, πρώην Διευθυντή του Γενικού Χημείου του Κράτους, κ. Διονύση Φραγκάτο, τόσο γιατί με έκανε να αγαπήσω τη Χημεία, όσο κυρίως, γιατί με δίδαξε τον τρόπο με τον οποίο πρέπει να σκέφτεται ένας άνθρωπος που θέλει να ασχοληθεί με τις θετικές επιστήμες.

Ευχαριστώ θερμά, δύο μεγάλους “δασκάλους της Θερμοδυναμικής”, τους καθηγητές της Σχολής Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ κ. Δημήτριο Τασσό και κ. Κυριάκο Μασαβέτα, διότι ήταν οι πρώτοι επιστήμονες που με έκαναν να καταλάβω πως μελετάς εις βάθος ένα επιστημονικό πρόβλημα. Αποτέλεσαν πρότυπά μου κατά τη φοίτησή μου στο Πολυτεχνείο και θεωρώ τιμή μου που τους είχα καθηγητές.

Απευθύνω ένα μεγάλο «ευχαριστώ» στην επιβλέπουσα Καθηγήτρια κα. Μαρία Λοϊζίδου, η οποία με την καθοδήγησή της, τις πολύτιμες νουθετήσεις που μου παρείχε και την αγάπη της, συνέβαλε τα μέγιστα στην ολοκλήρωση της διατριβής.

Θερμές ευχαριστίες απευθύνω στα μέλη της συμβουλευτικής επιτροπής, την Αναπληρώτρια Καθηγήτρια κα. Αικατερίνη – Ιωάννα Χαραλάμπους και την Επίκουρο Καθηγήτρια κα. Μαγδαληνή Κροκίδα για τις κατευθυντήριες υποδείξεις και την αगाστή συνεργασία που μου παρείχαν.

Επίσης, ευχαριστώ το Διδάκτορα Δημήτριο Μαλαμή και τον Πολιτικό Μηχανικό Παναγιώτη Γιαννίτσα για τη σημαντική τους συμβολή κατά τη συγγραφή της διατριβής, όπως και όλο το προσωπικό της Μονάδας Επιστήμης και Τεχνολογίας Περιβάλλοντος της Σχολής Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ.

Επιπλέον, θέλω να ευχαριστήσω τη Νατάσα Μπουρντούνη για την απόλυτη κατανόηση και συμπαράστασή της στην πραγμάτωση των φιλοδοξιών μου.

Θέλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον αδερφό μου, Νικόλαο Μαργαρίτη, για την τόσο σημαντική συνεισφορά του, κυρίως στα αρχικά στάδια ενασχόλησής μου με τις θετικές επιστήμες.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου, Ιωάννη Μαργαρίτη και Αθανασία Βιλαντώνη, που με στήριξαν από τα πρώτα μου βήματα και καθόλη τη διάρκεια της ερευνητικής αυτής προσπάθειας, διαδραματίζοντας τον καθοριστικότερο ρόλο ώστε να μπορέσω να φτάσω έως εδώ.

Η διδακτορική διατριβή αφιερώνεται στους γονείς μου και τον αδερφό μου.

Περίληψη

Τα βιοαποδομήσιμα οικιακά απορρίμματα αντιπροσωπεύουν ένα σημαντικό μέρος της συνολικής παραγόμενης ποσότητας των οικιακών απορριμμάτων, η ορθολογική επεξεργασία των οποίων καθίσταται επιτακτική για τη βιώσιμη διαχείριση αυτού του ρεύματος των αποβλήτων. Οι βιολογικές μέθοδοι επεξεργασίας, όπως η αερόβια βιολογική επεξεργασία-κομποστοποίηση, αποτελούν εναλλακτικούς τρόπους επεξεργασίας των βιοαποδομήσιμων οικιακών απορριμμάτων με τους οποίους δύναται να επιτευχθεί η επεξεργασία, η ανάκτηση και η ανακύκλωσή τους, συμβάλλοντας με αυτό τον τρόπο σε πληθώρα περιβαλλοντικών, οικονομικών και κοινωνικών οφελών.

Η οικιακή κομποστοποίηση δύναται να αποτελέσει μια δυναμική προσέγγιση για την αποδοτικότερη διαχείριση των βιοαποδομήσιμων οικιακών απορριμμάτων σε όλο το σύστημα της διαχειριστικής αλυσίδας (συλλογή, μεταφορά, επεξεργασία και επαναχρησιμοποίηση). Επομένως, ο στόχος της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η διερεύνηση της επεξεργασίας και επαναχρησιμοποίησης των βιοαποδομήσιμων οικιακών απορριμμάτων με τη χρήση πρότυπου συστήματος οικιακής κομποστοποίησης, το οποίο θα μπορεί να χρησιμοποιείται αυτόνομα από κάθε νοικοκυριό, για τη διαχείριση της ροής αυτής των αποβλήτων. Για την επίτευξη αυτού του στόχου σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε πρότυπος οικιακός κομποστοποιητής από τη Μονάδα Περιβαλλοντικής Επιστήμης και Τεχνολογίας του ΕΜΠ. Πραγματοποιήθηκαν πειραματικοί κύκλοι στους οποίους λειτούργησε και αξιολογήθηκε το πρότυπο σύστημα κομποστοποίησης, με το οποίο δύναται να επιτευχθεί η επεξεργασία διαφορετικών μιγμάτων των βιοαποδομήσιμων οικιακών αποβλήτων. Η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας και της λειτουργικότητας του συστήματος βασίστηκε (α) στον έλεγχο και στην παρακολούθηση μιας σειράς πειραματικών εφαρμογών εντός του βιοαντιδραστήρα, όπου εξελίσσεται η διεργασία της κομποστοποίησης, (β) στο χαρακτηρισμό της ποιότητας του τελικού προϊόντος (κόμποστ) και (γ) στην προσομοίωση της κινητικής αντιδράσεων της κομποστοποίησης αναφορικά με τη βιοαποδόμηση των πτητικών στερεών του υποστρώματος.

Ο σχεδιασμός και η κατασκευή του συστήματος κομποστοποίησης αφορά σε κλειστού τύπου βιοαντιδραστήρα ασυνεχούς τροφοδοσίας. Η είσοδος του υλικού τροφοδοσίας, καθώς και η μηχανική ανάδευση πραγματοποιούνται χειροκίνητα. Η δυναμικότητα επεξεργασίας του συστήματος είναι 60L οργανικού υλικού. Το τελικό προϊόν συλλέγεται από ειδικά σχεδιασμένα συρτάρια στο κάτω μέρος του αντιδραστήρα, ενώ ταυτόχρονα, υπάρχει η δυνατότητα συλλογής και απομάκρυνσης των παραγόμενων στραγγισμάτων.

Στο πρώτο στάδιο της αξιολόγησης του συστήματος μελετήθηκαν αρχικά τρόφιμα και μίγματα αυτών που αποτέλεσαν το υπόστρωμα τροφοδοσίας του αντιδραστήρα. Η σύνθεση των μιγμάτων τροφοδοσίας πραγματοποιήθηκε με βάση τη διαθεσιμότητα των οικιακών απορριμμάτων, καθώς και τις φυσικοχημικές ιδιότητές τους, ούτως ώστε να διαμορφωθούν κατάλληλες αρχικές συνθήκες για τη διεξαγωγή των διεργασιών της κομποστοποίησης. Η μελέτη της διεργασίας της κομποστοποίησης, έχει τρεις επιμέρους στόχους. Αρχικό στόχο αποτελεί ο υπολογισμός του χρόνου που απαιτείται για να ολοκληρωθεί η αντίδραση στο εσωτερικό του βιοαντιδραστήρα. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι μετά το πέρας 18-20 ημερών από την έναρξη της διεργασίας οι αντιδράσεις στο εσωτερικό του αντιδραστήρα έχουν ολοκληρωθεί, καθώς οι βασικές παράμετροι που επηρεάζουν τη διεργασία ομαλοποιούνται σταδιακά. Επόμενο στόχο αποτέλεσε η μελέτη του λόγου C/N στο υπόστρωμα, που αποτελεί τη βασική (σύμφωνα με τη βιβλιογραφία) παράμετρο επηροής της διεργασίας, αλλά και αξιολόγησης του τελικού προϊόντος. Για το σκοπό αυτό

σχεδιάστηκαν και μελετήθηκαν πειραματικοί κύκλοι με αρχικούς λόγους C/N στο υπόστρωμα (20,30 και 40). Τα αποτελέσματα έδειξαν πως η διεργασία της κομποστοποίησης εντός του πρότυπου αντιδραστήρα εξελίσσεται ικανοποιητικά σε όλα τα υποστρώματα με τους διαφορετικούς αρχικούς λόγους C/N. Ωστόσο, σε υποστρώματα με αρχικό λόγο C/N=30 η διεργασία της κομποστοποίησης εντός του πρότυπου βιοαντιδραστήρα εμφανίζει τη βέλτιστη εξέλιξη, ενώ εξίσου ικανοποιητική παρουσιάζεται η εξέλιξη της διεργασίας και σε υποστρώματα με αρχικούς λόγους C/N=40. Σε υποστρώματα με μικρότερο αρχικό λόγο C/N (20) η διεργασία εξελίσσεται ομαλώς, χωρίς, όμως, να είναι η βέλτιστη δυνατή. Ο τρίτος στόχος της μελέτης της διεργασίας αφορά στην επίδραση της χρήσης προσθέτων (πριονίδι, ορυκτά, ώριμο κόμποστ) στο υπόστρωμα τόσο στην εξέλιξη της διεργασίας όσο και στη βελτίωση των ιδιοτήτων του τελικού προϊόντος. Συμπερασματικά, κατά τον έλεγχο και την παρακολούθηση των πειραματικών εφαρμογών παρατηρήθηκε ότι οι κρίσιμες λειτουργικές παράμετροι της θερμοκρασίας, της υγρασίας και του οξυγόνου εξελίχθηκαν σε επιθυμητό εύρος τιμών, όπως αυτό απαιτείται για την αερόβια βιολογική επεξεργασία των αποβλήτων. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στις ελεγχόμενες συνθήκες ανάδευσης και αερισμού του οργανικού υλικού εντός του βιοαντιδραστήρα. Οι ευνοϊκές αυτές συνθήκες συντέλεσαν στην κατανάλωση μέρους του περιεχόμενου ολικού οργανικού άνθρακα του υποστρώματος και στις σημαντικές απώλειες οργανικής ουσίας κυρίως κατά τα πρώτα στάδια της κομποστοποίησης, όπου η μικροβιακή δραστηριότητα ήταν εντονότερη. Λόγω των αποτελεσματικών διεργασιών ανάδευσης και αερισμού του οργανικού υλικού σε συνδυασμό με την παρουσία διογκωτικών μέσων (π.χ. ορυκτά), τα αμμωνιακά ιόντα οξειδώνονται προς νιτρικά (νιτροποίηση), επιβεβαιώνοντας την παρουσία των απαιτούμενων αερόβιων συνθηκών στο υπόστρωμα. Με την προσθήκη ορυκτών υλικών όπως ο ζεόλιθος, ο βρμικουλίτης και ο περλίτης στις περισσότερες από τις πειραματικές εφαρμογές, διαπιστώθηκε ότι βελτιώνονται οι διεργασίες της κομποστοποίησης εντός του βιοαντιδραστήρα. Η παρουσία των ορυκτών τροποποιεί τις φυσικές ιδιότητες του οργανικού υποστρώματος με την απορρόφηση νερού και με την αύξηση του πορώδους του υποστρώματος. Ειδικότερα στην περίπτωση της προσθήκης ζεόλιθου παρατηρήθηκε και η προσρόφηση αμμωνίας και αμμωνιακών συντελώντας στη μείωση των απωλειών αζώτου.

Το δεύτερο στάδιο της αξιολόγησης του συστήματος κομποστοποίησης αποτέλεσε ο χαρακτηρισμός της ποιότητας του παραγόμενου κόμποστ με βάση το βαθμό ωρίμανσης και σταθεροποίησής του. Ο χαρακτηρισμός του τελικού προϊόντος περιλαμβάνει τον προσδιορισμό των φυσικών, χημικών και βιολογικών του ιδιοτήτων σε σχέση με αντίστοιχους δείκτες που προτείνονται από τη διεθνή επιστημονική βιβλιογραφία, καθώς και με βάση ποιοτικές προδιαγραφές που παρουσιάζονται σε εθνικό, ευρωπαϊκό και διεθνές επίπεδο. Ως προς τις φυσικοχημικές ιδιότητες του παραγόμενου κόμποστ, η περιεκτικότητά του σε υγρασία και το pH εμφανίστηκαν σε επιθυμητό εύρος τιμών ενώ η αναλογία C/N κυμάνθηκε, στις περισσότερες περιπτώσεις, σε ευνοϊκά επίπεδα. Επιπλέον, τα τελικά προϊόντα παρουσίασαν υψηλό ποσοστό σε οργανική ουσία ενώ η περιεκτικότητά τους σε μακροστοιχεία (N, K, Mg, Ca) θεωρήθηκε ικανοποιητική γεγονός το οποίο είναι ενδεικτικό της πιθανής συνεισφοράς των υλικών αυτών στον εμπλουτισμό και τη βελτίωση των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών των εδαφών κατά την εναπόθεσή τους. Ως προς τις ανόργανες μορφές του αζώτου, οι συγκεντρώσεις των αμμωνιακών παρουσιάστηκαν χαμηλότερες συγκριτικά με αυτές των νιτρικών διαμορφώνοντας αναλογίες $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ σε εύρος τιμών που χαρακτηρίζονται για ώριμο κόμποστ. Η προσθήκη ορυκτών, με κύριο το ζεόλιθο, είχε ως αποτέλεσμα τη ρύθμιση της συγκέντρωσης των αμμωνιακών και κατ' επέκταση των νιτρικών κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης. Επιπλέον, η υψηλή περιεκτικότητα του κόμποστ σε οργανικό άζωτο καθιστά

ελεγχόμενη την απορροή θρεπτικών συστατικών (π.χ. νιτρικά) στο έδαφος ρυθμίζοντας τη διαθεσιμότητά τους μέσω των διεργασιών που επιδρούν στην ανοργανοποίηση του αζώτου. Τέλος, οι ολικές συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων (Cd, Cu, Cr, Ni, Pb και Zn) παρουσιάστηκαν αμελητέες, έως μη ανιχνεύσιμες, καθώς τα οικιακά οργανικά απορρίμματα που αποτέλεσαν τα υλικά τροφοδοσίας, προέρχονται, σε όλους τους πειραματικούς κύκλους, από διαλογή στην πηγή. Αναφορικά με τα βιολογικά χαρακτηριστικά, το παραγόμενο κόμποστ θεωρήθηκε φυτοθρεπτικό το οποίο αποτελεί ένδειξη της απουσίας φυτοτοξικών ενώσεων. Επιπλέον, οι συνθήκες των παρατεταμένων υψηλών θερμοκρασιακών επιπέδων κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης συνετέλεσαν στην υγειονοποίηση των τελικών προϊόντων.

Το τελικό στάδιο της αξιολόγησης του συστήματος κομποστοποίησης αφορά στην προσομοίωση της κινητικής των αντιδράσεων βιοξείδωσης της οργανικής ουσίας του υποστρώματος προκειμένου να διερευνηθεί και να προσδιορισθεί ο ρυθμός με τον οποίο το υπόστρωμα βιοαποδομείται και ο βαθμός βιοαποδόμησης των πτητικών στερεών που επιτυγχάνεται. Η ανάλυση της κινητικής των αντιδράσεων βιοξείδωσης αφορά στην κινητική εξίσωση πρώτης τάξης βασιζόμενη στις απώλειες των πτητικών στερεών κατά την κομποστοποίηση του υποστρώματος. Η προσαρμογή του μοντέλου κινητικής πρώτης τάξης στα πειραματικά δεδομένα εμφανίστηκε ικανοποιητική τόσο ποιοτικά (οπτική προσαρμογή) όσο και ποσοτικά.

Συμπερασματικά, τα διαφορετικά μίγματα βιοαποδομήσιμων οικιακών απορριμμάτων δύναται να επεξεργαστούν αποτελεσματικά με το πρότυπο σύστημα κομποστοποίησης παράγοντας παράλληλα ένα τελικό προϊόν με προστιθέμενη αξία το οποίο διαθέτει τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά για την επαναχρησιμοποίησή του στο έδαφος. Επομένως, το παρόν σύστημα μπορεί να συμβάλλει στη βιώσιμη οικιακή διαχείριση του ρεύματος αυτού των οργανικών οικιακών αποβλήτων και στην προώθηση της εναλλακτικής προσέγγισης διαχείρισης των οικιακών αποβλήτων μέσω μικρών αυτόνομων διατάξεων.

Summary

Biodegradable waste represents a significant fraction of the solid waste produced, the efficient and effective treatment of which is imperative for its sustainable management. The biological treatment of biodegradable waste, such as composting, represents an alternative treatment method through which recycling and reuse of waste is achieved, contributing to a variety of environmental, financial and social benefits.

Home composting process has the potential to positively contribute towards a more efficient approach in the whole biodegradable waste management system (collection, transport, treatment and reuse) at local or even at national level. The aim of this research is to investigate the treatment and reuse of biodegradable waste using a prototype composting system. To meet this aim a prototype composting system was designed from the UNIT OF ENVIRONMENTAL SCIENCE AND TECHNOLOGY OF NTUA. The evaluation of the effectiveness and efficiency of the system was based on (a) the control and monitoring of a series of trials inside the bioreactor where composting process takes place, (b) the quality characterization of the end product (compost) and (c) the reaction kinetics simulation of the composting process in regard to the biodegradable organic matter losses of the substrate.

The design and construction of the prototype composting system involves an in-vessel batch feeding system. The system has a capacity of 60L of organic material whereas the produced leachate is collected and removed.

The first stage of the system evaluation involves study of several food wastes and their mixtures. The composition of these mixtures was determined by their availability and their physicochemical properties aiming to provide the necessary conditions for initiation of the composting process. The study of the composting process has three objectives. The initial objective is the calculation of the time that is required for the reaction to be completed in the reactor. The experimental results showed that after 18-20 days from the beginning of the process the reactions have been completed, while the basic parameters that influence the process are progressively regularized. The next objective was the study of the ratio C/N in the substrate, which is (according to bibliography) the basic parameter that influences the whole process and also the evaluation of the final product. For this aim different experimental studies with initial ratios C/N (20,30,40) in the substrate were designed and studied. The results proved that the process of composting in the reactor is developed well in all the substrates with different initial reasons C/N. However, in substrates with initial ratios C/N=30 and 40 the process of composting inside the reactor presents the most optimal development. In substrates with ratio C/N=20 the development of the process is normal, but not at the same level as in bigger ratios. The third objective of the study of activity has to do with the effect of the use of additives (mature compost) in the substrate in the development of the process and in the improvement of the attributes of the final product. During the control and monitoring of the experimental composting trials, it was found that the critical operating parameters of temperature, moisture and oxygen evolved in the desired range as required for the aerobic biological treatment of waste. This was attributed to the controlled conditions of agitation, ventilation and humidification of the substrate inside the bioreactor. These conditions favoured the partial consumption of the substrate total organic carbon resulting in significant organic matter losses especially during the early phase of composting where the microbial activity was more intense. Due to the efficient agitation and aeration processes of the substrate in combination with the presence of bulking agents

ammonium is oxidized to nitrates (nitrification) thus confirming the presence of aerobic conditions in the substrate. The addition of mineral materials such as zeolite and perlite, in several composting trials, was found that improves the composting process in the bioreactor. Particularly in the case of zeolite addition, ammonia and ammonium adsorption was also observed, contributing to the reduction of nitrogen losses.

The second stage of the composting system evaluation involves the quality characterization of the produced compost based on the determination of its maturity and stabilization level. Compost characterization considers its physical, chemical and biological properties with regard to the corresponding literature indices as well as in relation to the compost quality specifications at National, European and International level. With respect to the physicochemical properties, compost moisture content and pH were within the desired range while the C/N ratio varied, in most cases, at favourable levels. Moreover, the produced compost was rich in organic matter while the macro-elements content (N, P, K, Mg, Ca) was considered satisfactory which is indicative of the potential contribution of the materials in the enrichment and improvement of the physicochemical characteristics of soils after their application. As for the inorganic forms of nitrogen, ammonium concentrations were lower than those of nitrates resulting in low $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ratios which characterize mature compost. Nitrate concentrations in compost appeared high with the exception of the composting trial where zeolite was added, since zeolite ion exchange and adsorption capacity relative to ammonium ions regulates their concentration and hence that of nitrates. Moreover, the high organic nitrogen content of compost renders nutrients runoff (e.g. nitrates) in the soil since their availability is regulated by the factors affecting nitrogen mineralization. Finally, the total concentrations of heavy metals (Cd, Cu, Cr, Ni, Pb and Zn) are very low. With regard to the biological characteristics, the produced compost appeared phytoreplicative which was indicative of the absence of phytotoxic compounds.

The final stage of the composting system evaluation refers to the simulation of the biooxidation reaction kinetics of the VS of the substrate in order to investigate and estimate the biodegradation rate of reaction and the biodegradation level of the VS that is achieved. The analysis of the biooxidation reaction kinetics involves a first-order kinetic model based on the VS losses during composting. The goodness of fit of the first-order kinetic model to the experimental data appeared satisfactory both qualitatively (visual fitting) and quantitatively.

In conclusion, the different biodegradable waste mixtures can be treated effectively using the in-vessel composting system while producing a final added value product which has the required characteristics for land application. Therefore, the composting system can potentially contribute to the sustainable management of this waste stream and to the promotion of an alternative food waste management approach through small and autonomous systems.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ	1-27
1.1 Εισαγωγή	1
1.2 Στόχος και διάρθρωση της διδακτορικής διατριβής	2
1.3 Νομικό πλαίσιο διαχείρισης των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων	4
1.4 Οργανικό κλάσμα αστικών στερεών αποβλήτων	14
1.5 Προδιαγραφές Ποιότητας Κόμποστ στην ΕΕ και Διεθνώς	18
1.5.1 Πρότυπα για τα βαρέα μέταλλα	18
1.5.2 Πρότυπα για τους οργανικούς ρύπους στο κόμποστ	25
1.6 Πρότυπα για την περιεκτικότητα σε παθογόνους μικροοργανισμούς, ακαθαρσίες και ζιζάνια [10]	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΑΕΡΟΒΙΑ ΒΙΟΛΟΓΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ (ΚΟΜΠΟΣΤΟΠΟΙΗΣΗ)	28-71
2.1 Εισαγωγή	28
2.2 Σύσταση Οργανικού Υλικού	30
2.2.1 Τύποι Οργανικών Ενώσεων	31
2.2.2 Σύσταση Compost	32
2.3 Στάδια της ολοκληρωμένης διεργασίας της κομποστοποίησης	32
2.4 Παράμετροι ελέγχου και παρακολούθησης της κομποστοποίησης	34
2.4.1 Θερμοκρασία	34
2.4.2 Υγρασία	38
2.4.3 Αερισμός – Παροχή οξυγόνου	40
2.4.4 pH	41
2.4.5 Φυσικές ιδιότητες του υποστρώματος	42
2.4.6 Θρεπτικά συστατικά	43
2.5 Μικροβιολογία Αερόβιας Αποδόμησης	48
2.5.1 Βακτήρια	50
2.5.2 Μύκητες	52
2.5.3 Ακτινομύκητες	53
2.5.4 Άλλοι αποδομητές	54
2.5.5 Κινητική μικροβιακής ανάπτυξης	55
2.6 Παράμετροι ελέγχου της ποιότητας του τελικού προϊόντος	56
2.7 Φυσικοχημικές Επιδράσεις του Κόμποστ στο Έδαφος	58
2.7.1 Επίδραση της Εφαρμογής Κόμποστ στις Φυσικές Ιδιότητες του Εδάφους	59
2.7.2 Επίδραση της Εφαρμογής Κόμποστ στις Χημικές Ιδιότητες του Εδάφους	62
2.8 Συστήματα κομποστοποίησης	66

2.8.1	Κλειστά συστήματα	66
2.8.2	Ανοικτά συστήματα	70
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΠΡΟΣΘΕΤΑ ΚΟΜΠΟΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ		72-84
3.1	Εισαγωγή	72
3.2	Πριονίδι, ροκανίδι	72
3.3	Ζεόλιθος	73
3.3.1	Γενικά για τους Ζεόλιθους	73
3.3.2	Δομή των ζεολίθων	73
3.3.3	Ανταλλαγή ιόντων στους ζεόλιθους	74
3.3.4	Κλινοπτιλόλιθος	75
3.4	Βερμικουλίτης	76
3.4.1	Γενικά για το Βερμικουλίτη	76
3.4.2	Δομή Βερμικουλίτη	77
3.4.3	Δομική σύνθεση Ζεόλιθου και Βερμικουλίτη	78
3.5	Περλίτης	82
3.5.1	Γενικά για τον Περλίτη	82
3.5.2	Δομές	83
3.5.3	Χρήσεις	84
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ – ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ		85-142
4.1	Εισαγωγή	85
4.2	Σχεδιασμός, κατασκευή και έλεγχος των επιμέρους τμημάτων του πρότυπου συστήματος κομποστοποίησης	87
4.2.1	Γενικά	87
4.2.2	Θάλαμος	87
4.2.3	Περιστρεφόμενο πώμα	97
4.2.4	Αναδευτήρας	100
4.2.5	Εσχάρα διαχωρισμού	103
4.2.6	Υποδοχείς κόμποστ	106
4.2.7	Υλικό κατασκευής	110
4.2.8	Λειτουργία συστήματος	113
4.2.9	Αναλυτικές τεχνικές προδιαγραφές του πρότυπου συστήματος	121
4.3	Πειραματικά πρωτόκολλα	122

4.3.1	Πειραματικό πρωτόκολλο διεργασίας κομποστοποίησης	122
4.3.1.1	Δειγματοληψία και ανάλυση των επιμέρους βιοαποδομήσιμων οικιακών απορριμμάτων που συνθέτουν το υλικό τροφοδοσίας του βιοαντιδραστήρα	122
4.3.1.2	Προεπεξεργασία και σύνθεση του υλικού τροφοδοσίας του βιοαντιδραστήρα	122
4.3.1.3	Δειγματοληψία και ανάλυση του υποστρώματος	123
4.3.1.4	Παρουσίαση των πειραματικών Κύκλων	124
4.3.2	Πειραματικό πρωτόκολλο παραγόμενου κόμποστ	129
4.4	Μέθοδοι ανάλυσης	130
4.4.1	Προσδιορισμός θερμοκρασίας	131
4.4.2	Προσδιορισμός υγρασίας	131
4.4.3	Προσδιορισμός pH	132
4.4.4	Προσδιορισμός ηλεκτρικής αγωγιμότητας	132
4.4.5	Προσδιορισμός οξυγόνου	132
4.4.6	Προσδιορισμός πτητικών στερεών (VSS)	132
4.4.7	Προσδιορισμός ολικού οργανικού άνθρακα (TOC)	133
4.4.8	Προσδιορισμός ολικού αζώτου κατά Kjeldahl (TKN)	134
4.4.9	Προσδιορισμός νιτρικών	137
4.4.10	Προσδιορισμός αμμωνιακών	139
4.4.11	Προσδιορισμός αναλογίας C/N	140
4.4.12	Προσδιορισμός βαρέων μετάλλων και ιχνοστοιχείων	140
4.4.13	Προσδιορισμός φυτοτοξικότητας	141

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

143-449

5.1	Εισαγωγή	143
5.2	Πειραματικές εφαρμογές με το πρότυπο σύστημα κομποστοποίησης	143
5.2.1	Χαρακτηρισμός πρώτης ύλης και σύνθεση υλικού τροφοδοσίας	144
5.2.2	Έλεγχος της διεργασίας της κομποστοποίησης	146
5.2.2.1	Δράση Α	146
5.2.2.1.1	Κύκλος Πειραμάτων Δράσης Α	146
5.2.2.2	Δράση Β	157
5.2.2.2.1	Πρώτος Κύκλος πειραμάτων Δράσης Β	158
5.2.2.2.2	Δεύτερος Κύκλος πειραμάτων Δράσης Β	159
5.2.2.2.3	Τρίτος Κύκλος πειραμάτων Δράσης Β	186
5.2.2.2.4	Τέταρτος Κύκλος πειραμάτων Δράσης Β	210
5.2.2.2.5	Σύγκριση Κύκλων 2,3 και 4 ως προς το λόγο με σταθερή παράμετρο το πρόσθετο.	234
5.2.2.3	Δράση Γ	297
5.2.2.3.1	Πρώτος Κύκλος Πειραμάτων Δράσης Γ	297
5.2.2.3.2	Δεύτερος πειραματικός Κύκλος Δράσης Γ	323
5.2.2.3.3	Τρίτος πειραματικός Κύκλος Δράσης Γ	347
5.2.2.3.4	Τέταρτος Πειραματικός Κύκλος Δράσης Γ	374

5.2.3	Αποτίμηση πειραματικών Δράσεων και εκτίμηση της λειτουργίας του πρότυπου Κομποστοποιητή	398
5.2.3.1	Θερμοκρασία	398
5.2.3.2	Περιεχόμενη Υγρασία	400
5.2.3.3	pH	400
5.2.3.4	Ολικός οργανικός άνθρακας	402
5.2.3.5	Ολικό άζωτο και απώλειες ολικού αζώτου	403
5.2.3.6	Αμμωνιακά και νιτρικά	404
5.2.3.7	Αναλογία C/N	405
5.2.4	Ποιότητα παραγόμενου κόμποστ (Σειρά Γ)	406
5.2.4.1	Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά παραγόμενου κόμποστ	406
5.2.4.2	Βιολογικά χαρακτηριστικά παραγόμενου κόμποστ	427
5.3	Ανάλυση και εφαρμογή κινητικής αντιδράσεων της κομποστοποίησης	443
5.3.1	Αναφορά στην κινητική αντιδράσεων αποδόμησης των πτητικών στερεών	443
5.3.2	Μέθοδος ανάλυσης κινητικής αντιδράσεων αποδόμησης πτητικών στερεών	445
5.3.3	Προσομοίωση κινητικής αντιδράσεων αποδόμησης πτητικών στερεών	445
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ		450-454
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		455-475

Εικόνα 1.1	Ιεράρχηση της διαχείρισης των στερεών αποβλήτων όπως αυτή προτείνεται από την Ε.Ε. (ΕΕΔΣΑ, 2008)	5
Εικόνα 1.2	Ευρωπαϊκό νομοθετικό πλαίσιο για τη διαχείριση των στερεών αποβλήτων	6
Εικόνα 2.1	Απεικόνιση της διεργασίας της κομποστοποίησης (Shaw and Stentiford, 1996; Rynk et al., 1992)	28
Εικόνα 2.2	Κύριες βιοχημικές αντιδράσεις της κομποστοποίησης (Peigné and Girardin, 2004)	29
Εικόνα 2.3	Τυπικά στάδια της ολοκληρωμένης διαχείρισης των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων με τη μέθοδο της κομποστοποίησης	33
Εικόνα 2.4	Απώλειες αμμωνίας κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης (Peigné and Girardin, 2004)	48
Εικόνα 2.5	Γραφική παράσταση της σχέσης Monod	56
Εικόνα 2.6	Σχηματική παρουσίαση της σύνδεσης των συσσωματωμάτων του εδάφους με την οργανική ύλη	60
Σχήμα 2.7	Αλλαγές στην κατιοντοεναλλακτική ικανότητα κατά την διάρκεια της αποσύνθεσης των απορριμμάτων αυλής.	63
Εικόνα 2.8	Σχηματική αναπαράσταση τυπικών κάθετων κλειστών συστημάτων κομποστοποίησης (α) χωρίς ανάδευση και (β) με ανάδευση (Diaz et al., 2002)	67
Εικόνα 2.9	Τυπική διάταξη οριζόντιων κλειστών συστημάτων κομποστοποίησης, τύπου βιοκελιών (Geoplast, 2010)	68
Εικόνα 2.10	Τυπική διάταξη οριζόντιων κλειστών συστημάτων κομποστοποίησης, τύπου κιβωτίων, σε παράλληλα στοιχεία	68
Εικόνα 2.11	Τυπική διάταξη οριζόντιων κλειστών συστημάτων κομποστοποίησης, τύπου τούνελ (Diaz et al., 2002)	69
Εικόνα 2.12	Τυπική διάταξη οριζόντιων κλειστών συστημάτων κομποστοποίησης, τύπου καναλιών (Turovskiy and Mathai, 2006; Diaz et al., 2002)	69
Εικόνα 2.13	Τυπική διάταξη οριζόντιου κλειστού συστήματος κομποστοποίησης, τύπου περιστρεφόμενου τυμπάνου (Diaz et al., 2002)	70
Εικόνα 2.14	Τυπική διάταξη οριζόντιου ανοιχτού συστήματος κομποστοποίησης, τα τύπου αναστρεφόμενων σειραδιών (Diaz et al., 2002)	71
Εικόνα 2.15	Τυπική διάταξη οριζόντιου ανοιχτού συστήματος κομποστοποίησης, τύπου αεριζόμενων στατικών σωρών (Diaz et al., 2007, 2002)	71
Εικόνα 3.1	Πριονίδη	72
Εικόνα 3.2	Διαμόρφωση τετραέδρου στη δομή του ζεόλιθου [51]	74
Εικόνα 3.3	Σύστημα καναλιών κλινοπτιλόλιθου	76
Εικόνα 3.4	Σχεδιάγραμμα της δομής του βερμικουλίτη όπου φαίνονται τα ενδιάμεσα στρώματα νερού	77
Εικόνα 3.5	Ανεπεξέργαστος βερμικουλίτης σε σύγκριση με διογκωμένο (exfoliated)	78
Εικόνα 3.6	Φάσμα περίθλασης ακτίνων Χ(XRD γράφημα) α (Βερμικουλίτη) β (Ζεόλιθο)	78
Εικόνα 3.7	Φωτογραφίες SEM α (Ζεόλιθου) β (βερμικουλίτη)	81
Εικόνα 3.8	Κατανομή μεγέθους πόρων των ορυκτών	81
Εικόνα 3.9	Περλίτης	83
Εικόνα 4.1	Μεταλλικό επίπεδο έλασμα κυλινδρικού περιβλήματος	88
Εικόνα 4.2	Κυλινδρικό περίβλημα μετά τις εργασίες κάμψης και συγκόλλησης	89
Εικόνα 4.3	Δακτυλιοειδής διαμόρφωση στο στατικό στέλεχος του πώματος και μεταλλικό πλακίδιο συγκράτησης του περιστρεφόμενου στελέχους	90

Εικόνα 4.4	Μεταλλικό έλασμα στατικού στελέχους πώματος πριν την καμπύλωση	91
Εικόνα 4.5	Καμπυλωμένη διάταξη στατικού στελέχους πώματος και συμπληρωματικά εξαρτήματα	91
Εικόνα 4.6	Θέση στατικού στελέχους πώματος επί του κυλινδρικού περιβλήματος	91
Εικόνα 4.7	Μεταλλικό έλασμα δαπέδου διαμερίσματος τροφοδοσίας	92
Εικόνα 4.8	Θέση δαπέδου διαμερίσματος τροφοδοσίας επί του κυλινδρικού περιβλήματος	93
Εικόνα 4.9	Μεταλλικό έλασμα βάσης κυλινδρικού περιβλήματος και δακτύλιος οδήγησης του αναδευτήρα	93
Εικόνα 4.10	Θέση συναρμογής της βάσης επί της ακραίας διατομής του κυλινδρικού περιβλήματος	94
Εικόνα 4.11	Μεταλλικό έλασμα στήριξης και οδήγησης για το περιστρεφόμενο στέλεχος του πώματος	95
Εικόνα 4.12	Θέση των τριών υποστηριγμάτων επί του κυλινδρικού περιβλήματος	95
Εικόνα 4.13	Εξάρτημα στήριξης της εσχάρας διαχωρισμού	96
Εικόνα 4.14	Διάταξη εξαρτημάτων στήριξης εσχάρας επί του κυλινδρικού περιβλήματος	96
Εικόνα 4.15	Επίπεδες ράβδοι στήριξης υποδοχέων κόμποστ	97
Εικόνα 4.16	Θέσεις συγκόλλησης ράβδων στήριξης επί του κυλινδρικού περιβλήματος	97
Εικόνα 4.17	Μεταλλικό έλασμα περιστρεφόμενου στελέχους πώματος πριν την καμπύλωση	99
Εικόνα 4.18	Καμπυλωμένη διάταξη περιστρεφόμενου στελέχους πώματος και συμπληρωματικά εξαρτήματα	99
Εικόνα 4.19	Συναρμολογημένη διάταξη κατά την 'πλήρως κλειστή' θέση του περιστρεφόμενου στελέχους του πώματος	99
Εικόνα 4.20	Συναρμολογημένη διάταξη κατά την 'πλήρως ανοικτή' θέση του περιστρεφόμενου στελέχους του πώματος	100
Εικόνα 4.21	Δακτυλιοειδής διαμόρφωση κατά τη συναρμογή στατικού και περιστρεφόμενου στελέχους του πώματος	100
Εικόνα 4.22	Χειρολαβή περιστροφής αναδευτήρα	101
Εικόνα 4.23	Διαφράγματα αναδευτήρα	102
Εικόνα 4.24	Στελέχη ανάδευσης	102
Εικόνα 4.25	Συνολική διάταξη ανάδευσης	103
Εικόνα 4.26	Θέση του αναδευτήρα στο εσωτερικό του θαλάμου	103
Εικόνα 4.27	Ορθογωνικά ανοίγματα στήριξης της εσχάρας	104
Εικόνα 4.28	Συναρμογή εσχάρας επί υποστηρίγματος	104
Εικόνα 4.29	Πλαίσιο και διάταξη πλέγματος εσχάρας διαχωρισμού	105
Εικόνα 4.30	Θέση στήριξης εσχάρας διαχωρισμού επί των υποστηριγμάτων της εσωτερικής παράπλευρης επιφάνειας του κυλινδρικού περιβλήματος	105
Εικόνα 4.31	Διάταξη ελασμάτων πριν τη σύνθεση του υποδοχέα	106
Εικόνα 4.32	Οπές στον πυθμένα του υποδοχέα	107
Εικόνα 4.33	Χειρολαβή υποδοχέα	107
Εικόνα 4.34	Υποδοχείς κόμποστ	108
Εικόνα 4.35	Θέση υποδοχέων στο εσωτερικό του κυλινδρικού περιβλήματος	108
Εικόνα 4.36	Προοπτική όψη οικιακού κομποστοποιητή	109
Εικόνα 4.37	Εσωτερικό οικιακού κομποστοποιητή (ανοικτό πώμα, αναδευτήρας σε κίνηση)	109
Εικόνα 4.38	Εσωτερικό οικιακού κομποστοποιητή (υποδοχείς εκτός του συστήματος)	109
Εικόνα 4.39	Διαμέρισμα τροφοδοσίας κατά την υποδοχή ποσότητας δ.α.	115
Εικόνα 4.40	Διοχέτευση δ.α. στο διαμέρισμα κομποστοποίησης	116
Εικόνα 4.41	Διάταξη σωρού δ.α. στο διαμέρισμα κομποστοποίησης	118

Εικόνα 4.42	Υποδοχείς κόμποστ πλήρης περιεχομένου	119
Εικόνα 4.43	Διαμέρισμα στραγγισμάτων κατά τη φάση μερικής πλήρωσης	121
Εικόνα 4.44	Ψηφιακό θερμόμετρο	131
Εικόνα 4.45	Φούρνος ξήρανσης (Μέτρηση υγρασίας)	131
Εικόνα 4.46	Μετρητής pH	132
Εικόνα 4.47	Φούρνος ξήρανσης (Μέτρηση πτητικών)	133
Εικόνα 4.48	Το σύστημα υπολογισμού ολικού οργανικού άνθρακα	134
Εικόνα 4.49	Κεντρική μονάδα TOCV _{CSH}	134
Εικόνα 4.50	Solid Sample Module SSM 5000A	134
Εικόνα 4.51	Πορσελάνινες κάψες	134
Εικόνα 4.52	Σωλήνας χώνευσης	135
Εικόνα 4.53	Συσκευή KJELDATHERM	135
Εικόνα 4.54	Συσκευή απόσταξης VaroDest 30s	135
Εικόνα 4.55	αλλαγή χρώματος κατά την τιτλοδότηση	136
Εικόνα 4.56	Συσκευή Digesdahl Digestion	140
Εικόνα 4.57	Φασματοφωτόμετρο ατομικής απορρόφησης (Varian)	141

Πίνακας 1.1	Νομοθετικό πλαίσιο της Ε.Ε. και της Ελλάδας αναφορικά με την ιεράρχηση της διαχείρισης των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων	7
Πίνακας 1.2	Μέση κατά κεφαλήν παραγωγή ΑΣΑ (USEPA, 2007; IPCC, 2006)	15
Πίνακας 1.3	Μέση παραγωγή ΑΣΑ με βάση το πληθυσμιακό εύρος (Pichtel, 2005)	15
Πίνακας 1.4	Μέση παραγωγή ΑΣΑ με βάση την προερχόμενη πηγή (Pichtel, 2005)	15
Πίνακας 1.5	Ιδιότητες συγκεκριμένων βιοαποδομήσιμων ροών των ΑΣΑ (Pichtel, 2005)	17
Πίνακας 1.6	Στοιχειακή ανάλυση των συστατικών των ΑΣΑ (% dm) (Williams, 2005; Pichtel, 2005)	17
Πίνακας 1.7	Ο διαχωρισμός με βάση την ποιότητα του παραγόμενου κόμποστ στα κράτη μέλη της ΕΕ και Διεθνώς	18
Πίνακας 1.8	Όρια βαρέων μετάλλων για τα ευρωπαϊκά πρότυπα κόμποστ (mg/kg ξηρής ύλης εκτός από όπου δηλώνεται) [10]	22
Πίνακας 1.9	Μέγιστες και ελάχιστες οριακές τιμές μετάλλων (PTEs) στην ΕΕ ($\frac{mg}{kg}$)	25
Πίνακας 1.10	Οριακές τιμές για οργανικούς ρύπους και φυτοφάρμακα στο κόμποστ [10]	26
Πίνακας 1.11	Οριακές τιμές για οργανικούς ρύπους και φυτοφάρμακα στο κόμποστ [10]	26
Πίνακας 2.1	Εύρος περιεκτικότητας 'πράσινων' απορριμμάτων σε οργανικές ενώσεις (Martin, 1991)	32
Πίνακας 2.2	Εύρος βέλτιστων θερμοκρασιακών τιμών (°C) στο οποίο παρατηρείται μεγιστοποίηση του ρυθμού διάσπασης της οργανικής ουσίας	36
Πίνακας 2.1	Συνθήκες θερμοκρασίας-χρόνου κατά την κομποστοποίηση για την υγειονομοποίηση του Κόμποστ προερχόμενο από ιλύ, σύμφωνα με τις εθνικές προδιαγραφές διαφόρων χωρών	38
Πίνακας 2.2	Βέλτιστο εύρος υγρασίας κατά τη θερμοφιλή φάση της κομποστοποίησης	39
Πίνακας 2.3	Ενδεικτικές τιμές C/N ορισμένων βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων	45
Πίνακας 2.4	Οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις του αζώτου κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης (Henry et al., 1999)	46
Πίνακας 2.7	Αριθμοί στελεχών ανά gr νωπής μάζας και φάση διεργασιών (U.S. Environmental Protection Agency, 1994)	49
Πίνακας 2.8	Ενδεικτικοί παράμετροι ελέγχου της ποιότητας του κόμποστ	58
Πίνακας 3.1	Δομική σύνθεση των ορυκτών βάση της XRD ανάλυσης και των αποθηκευμένων φασμάτων της βάσης δεδομένων JCPDS	79
Πίνακας 3.2	Χημική ανάλυση ορυκτών	79
Πίνακας 3.3	Ιοντοεναλλακτική χωρητικότητα ορυκτών	80
Πίνακας 3.4	Αποτελέσματα ανάλυσης ποροσιμετρίας N ₂	81
Πίνακας 3.5	Χημική σύσταση του περλίτη	82
Πίνακας 4.1	Σύνθεση και μηχανικές ιδιότητες χαρακτηριστικών ανοξειδωτων χαλύβων	111
Πίνακας 4.2	Εφαρμογές χαρακτηριστικών ανοξειδωτων χαλύβων	111
Πίνακας 4.3	Σύνολο φυσικοχημικών και βιολογικών παραμέτρων οι οποίες εξετάστηκαν στα διαφορετικά δείγματα	130
Πίνακας 5.1	Αρχικές μετρήσεις τροφίμων του υποστρώματος	144
Πίνακας 5.2	Βασικές μετρήσεις για διαφορετικές αναλογίες υποστρώματος	146
Πίνακας 5.3	Υλικό τροφοδοσίας αντιδραστήρων 20, 30 και 40 ημερών (Kg)	147
Πίνακας 5.4	Τιμές θερμοκρασίας (oC) για τους τρεις αντιδραστήρες του Κύκλου της Δράσης Α	147
Πίνακας 5.5	Τιμές υγρασίας (%) για τους τρεις αντιδραστήρες του Κύκλου της Δράσης Α	149
Πίνακας 5.6	Τιμές pH για τους τρεις αντιδραστήρες του Κύκλου της Δράσης Α	151
Πίνακας 5.7	Τιμές TOC (%) για τους τρεις αντιδραστήρες του Κύκλου της Δράσης Α	152
Πίνακας 5.8	Τιμές TKN (%) για τους τρεις αντιδραστήρες του Κύκλου της Δράσης Α	154
Πίνακας 5.9	Τιμές C/N για τους τρεις αντιδραστήρες του Κύκλου της Δράσης Α	156
Πίνακας 5.10	Τροφοδοσία σε g των αντιδραστήρων του δεύτερου Κύκλου Δράσης Β	160
Πίνακας 5.11	Δειγματοληψία σε g από τους αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Β	161
Πίνακας 5.12	Ποσοστό % συνολικής μείωσης της μάζας σε κάθε αντιδραστήρα του δεύτερου κύκλου	162
Πίνακας 5.13	Τιμές θερμοκρασίας (°C) για τους τέσσερις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου	163

Πίνακας 5.14	Τιμές υγρασίας (%) για τους τέσσερις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου	166
Πίνακας 5.15	Τιμές pH για τους τέσσερις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου	168
Πίνακας 5.16	Τιμές αγωγιμότητας για τους τέσσερις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου (<i>mS/cm</i>)	171
Πίνακας 5.17	Τιμές % πτητικών στερεών για τους τέσσερις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου	173
Πίνακας 5.18	Τιμές ολικού οργανικού άνθρακα για τους τέσσερις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου	175
Πίνακας 5.19	Τιμές % TKN για τους τέσσερις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου	178
Πίνακας 5.20	Τιμές <i>C/N</i> για τους τέσσερις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου	180
Πίνακας 5.21	Τιμές $NO_3^- - N$ σε <i>mg/kg</i> για τους τέσσερις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου	182
Πίνακας 5.22	Τιμές $NH_4^+ - N$ σε <i>mg/kg</i> για τους τέσσερις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου	184
Πίνακας 5.23	Τροφοδοσία σε <i>g</i> των αντιδραστήρων του τρίτου κύκλου της Δράσης Β	187
Πίνακας 5.24	Δειγματοληψία σε <i>g</i> από τους αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου	188
Πίνακας 5.25	Ποσοστό % συνολικής μείωσης της μάζας σε κάθε αντιδραστήρα του πρώτου κύκλου	189
Πίνακας 5.26	Τιμές θερμοκρασίας ($^{\circ}C$) για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου	190
Πίνακας 5.27	Τιμές υγρασίας (%) για τους τέσσερις αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου	192
Πίνακας 5.28	Τιμές pH για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου	194
Πίνακας 5.29	Τιμές αγωγιμότητας για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου (<i>mS/cm</i>)	196
Πίνακας 5.30	Τιμές % πτητικών στερεών για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου	198
Πίνακας 5.31	Τιμές ολικού οργανικού άνθρακα για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου	200
Πίνακας 5.32	Τιμές % TKN για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου	202
Πίνακας 5.33	Τιμές <i>C/N</i> για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου	204
Πίνακας 5.34	Τιμές $NO_3^- - N$ σε <i>mg/kg</i> για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου	206
Πίνακας 5.35	Τιμές $NH_4^+ - N$ σε <i>mg/kg</i> για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου	208
Πίνακας 5.36	Τροφοδοσία των αντιδραστήρων του τέταρτου κύκλου της Δράσης Β	211
Πίνακας 5.37	Δειγματοληψία από τους αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου	212
Πίνακας 5.38	Ποσοστό % συνολικής μείωσης της μάζας σε κάθε αντιδραστήρα του τέταρτου κύκλου	213
Πίνακας 5.39	Τιμές θερμοκρασίας ($^{\circ}C$) για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου	214
Πίνακας 5.40	Τιμές υγρασίας (%) για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου	216
Πίνακας 5.41	Τιμές <i>pH</i> για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου	218
Πίνακας 5.42	Τιμές αγωγιμότητας για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου (<i>mS/cm</i>)	220
Πίνακας 5.43	Τιμές % πτητικών στερεών για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου	222
Πίνακας 5.44	Τιμές ολικού οργανικού άνθρακα για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου	224
Πίνακας 5.45	Τιμές % TKN για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου της Δράσης Β	226
Πίνακας 5.46	Τιμές <i>C/N</i> για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου	228
Πίνακας 5.47	Τιμές $NO_3^- - N$ σε <i>mg/kg</i> για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου	230

Πίνακας 5.48	Τιμές $NH_4^+ - N$ σε mg/kg για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου	232
Πίνακας 5.49	Τιμές θερμοκρασίας ($^{\circ}C$) για τον αντιδραστήρα του πριονιδιού στους τρεις κύκλους της Δράσης Β	235
Πίνακας 5.50	Τιμές θερμοκρασίας ($^{\circ}C$) για τον αντιδραστήρα του ζεόλιθου στους τρεις κύκλους της Δράσης Β	235
Πίνακας 5.51	Τιμές θερμοκρασίας ($^{\circ}C$) για τον αντιδραστήρα του βερμικουλίτη στους τρεις κύκλους της Δράσης Β	236
Πίνακας 5.52	Τιμές θερμοκρασίας ($^{\circ}C$) για τον αντιδραστήρα του περλίτη στους τρεις κύκλους της Δράσης Β	236
Πίνακας 5.53	Τιμές υγρασίας (%) για τον αντιδραστήρα του πριονιδιού στους τρεις κύκλους της Δράσης Β	242
Πίνακας 5.54	Τιμές υγρασίας (%) για τον αντιδραστήρα του ζεόλιθου στους τρεις κύκλους της Δράσης Β	242
Πίνακας 5.55	Τιμές υγρασίας (%) για τον αντιδραστήρα του βερμικουλίτη στους τρεις κύκλους της Δράσης Β	243
Πίνακας 5.56	Τιμές υγρασίας (%) για τον αντιδραστήρα του περλίτη στους τρεις κύκλους της Δράσης Β	243
Πίνακας 5.57	Τιμές pH για τον αντιδραστήρα του πριονιδιού στους τρεις κύκλους της Δράσης Β	249
Πίνακας 5.58	Τιμές pH για τον αντιδραστήρα του ζεόλιθου στους τρεις κύκλους της Δράσης Β	249
Πίνακας 5.59	Τιμές pH για τον αντιδραστήρα του βερμικουλίτη στους τρεις κύκλους της Δράσης Β	250
Πίνακας 5.60	Τιμές pH για τον αντιδραστήρα του περλίτη στους τρεις κύκλους της Δράσης Β	250
Πίνακας 5.61	Τιμές πτητικών στερεών (%) για τον αντιδραστήρα του πριονιδιού στους τρεις κύκλους της Δράσης Β	256
Πίνακας 5.62	Τιμές πτητικών στερεών (%) για τον αντιδραστήρα του ζεόλιθου στους τρεις κύκλους της Δράσης Β	256
Πίνακας 5.63	Τιμές πτητικών στερεών (%) για τον αντιδραστήρα του βερμικουλίτη στους τρεις κύκλους της Δράσης Β	257
Πίνακας 5.64	Τιμές πτητικών στερεών (%) για τον αντιδραστήρα του περλίτη στους τρεις κύκλους της Δράσης Β	257
Πίνακας 5.65	Τιμές TOC (%) για τον αντιδραστήρα του πριονιδιού στους τρεις κύκλους της Δράσης Β	263
Πίνακας 5.66	Τιμές TOC (%) για τον αντιδραστήρα του ζεόλιθου στους τρεις κύκλους της Δράσης Β	263
Πίνακας 5.67	Τιμές TOC (%) για τον αντιδραστήρα του βερμικουλίτη στους τρεις κύκλους της Δράσης Β	264
Πίνακας 5.68	Τιμές TOC (%) για τον αντιδραστήρα του περλίτη στους τρεις κύκλους της Δράσης Β	264
Πίνακας 5.69	Τιμές TKN (%) για τον αντιδραστήρα του πριονιδιού στους τρεις κύκλους της Δράσης Β	270
Πίνακας 5.70	Τιμές TKN (%) για τον αντιδραστήρα του ζεόλιθου στους τρεις κύκλους της Δράσης Β	270

Πίνακας 5.71	Τιμές TKN (%) για τον αντιδραστήρα του βερμικουλίτη στους τρεις κύκλους της Δράσης Β	271
Πίνακας 5.72	Τιμές TKN (%) για τον αντιδραστήρα του περλίτη στους τρεις κύκλους της Δράσης Β	271
Πίνακας 5.73	Τιμές C/N για τον αντιδραστήρα του πριονιδιού στους τρεις κύκλους της Δράσης Β	277
Πίνακας 5.74	Τιμές C/N για τον αντιδραστήρα του ζεόλιθου στους τρεις κύκλους της Δράσης Β	277
Πίνακας 5.75	Τιμές C/N για τον αντιδραστήρα του βερμικουλίτη στους τρεις κύκλους της Δράσης Β	278
Πίνακας 5.76	Τιμές C/N για τον αντιδραστήρα του περλίτη στους τρεις κύκλους της Δράσης Β	278
Πίνακας 5.77	Τιμές νιτρικών ($NO_3^- - N$) ($\frac{mg}{kg}$) για τον αντιδραστήρα του πριονιδιού στους τρεις κύκλους της Δράσης Β	284
Πίνακας 5.78	Τιμές νιτρικών ($NO_3^- - N$) ($\frac{mg}{kg}$) για τον αντιδραστήρα του ζεόλιθου στους τρεις κύκλους της Δράσης Β	284
Πίνακας 5.79	Τιμές νιτρικών ($NO_3^- - N$) ($\frac{mg}{kg}$) για τον αντιδραστήρα του βερμικουλίτη στους τρεις κύκλους της Δράσης Β	285
Πίνακας 5.80	Τιμές νιτρικών ($NO_3^- - N$) ($\frac{mg}{kg}$) για τον αντιδραστήρα του περλίτη στους τρεις κύκλους της Δράσης Β	285
Πίνακας 5.81	Τιμές αμμωνιακών ($NH_4^+ - N$) ($\frac{mg}{kg}$) για τον αντιδραστήρα του πριονιδιού στους τρεις κύκλους της Δράσης Β	291
Πίνακας 5.82	Τιμές αμμωνιακών ($NH_4^+ - N$) ($\frac{mg}{kg}$) για τον αντιδραστήρα του ζεόλιθου στους τρεις κύκλους της Δράσης Β	291
Πίνακας 5.83	Τιμές αμμωνιακών ($NH_4^+ - N$) ($\frac{mg}{kg}$) για τον αντιδραστήρα του βερμικουλίτη στους τρεις κύκλους της Δράσης Β	292
Πίνακας 5.84	Τιμές αμμωνιακών ($NH_4^+ - N$) ($\frac{mg}{kg}$) για τον αντιδραστήρα του περλίτη στους τρεις κύκλους της Δράσης Β	292
Πίνακας 5.85	Τροφοδοσία των αντιδραστήρων του πρώτου κύκλου Δράσης Γ	299
Πίνακας 5.86	Δειγματοληψία από τους αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου Δράσης Γ	300
Πίνακας 5.87	Ποσοστό % συνολικής μείωσης της μάζας σε κάθε αντιδραστήρα του πρώτου κύκλου Δράσης Γ	301
Πίνακας 5.88	Τιμές θερμοκρασίας ($^{\circ}C$) για τους τρεις αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου Δράσης Γ	303
Πίνακας 5.89	Τιμές υγρασίας (%κ.β. για τους τρεις αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου	305
Πίνακας 5.90	Τιμές pH για τους τρεις αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου Δράσης Γ	307
Πίνακας 5.91	Τιμές αγωγιμότητας για τους τρεις αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου Δράσης Γ	309
Πίνακας 5.92	Τιμές (%) πτητικών στερεών για τους τρεις αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου Δράσης Γ	311
Πίνακας 5.93	Τιμές ολικού οργανικού άνθρακα (%) για τους τρεις αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου Δράσης Γ	313
Πίνακας 5.94	Τιμές % TKN για τους τρεις αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου	315
Πίνακας 5.95	Τιμές C/N για τους τρεις αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου Δράσης Γ	317
Πίνακας 5.96	Τιμές $NO_3^- - N$ σε mg/kg για τους τρεις αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου της Δράσης Γ	319
Πίνακας 5.97	Τιμές $NH_4^+ - N$ σε mg/kg για τους τρεις αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου	

	της Δράσης Γ	321
Πίνακας 5.98	Τροφοδοσία σε (g) των αντιδραστήρων του δεύτερου κύκλου της Δράσης Γ	324
Πίνακας 5.99	Δειγματοληψία από τους αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου (g)	325
Πίνακας 5.100	Ποσοστό % συνολικής μείωσης της μάζας σε κάθε αντιδραστήρα του πρώτου κύκλου	326
Πίνακας 5.101	Τιμές θερμοκρασίας ($^{\circ}\text{C}$) για τους τρεις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Γ	327
Πίνακας 5.102	Τιμές υγρασίας (%) για τους τέσσερις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Γ	329
Πίνακας 5.103	Τιμές pH για τους τρεις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Γ	331
Πίνακας 5.104	Τιμές αγωγιμότητας για τους τρεις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Γ (mS/cm)	333
Πίνακας 5.105	Τιμές % πτητικών στερεών για τους τρεις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Γ	335
Πίνακας 5.106	Τιμές ολικού οργανικού άνθρακα για τους τρεις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Γ	337
Πίνακας 5.107	Τιμές % TKN για τους τρεις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης γ	339
Πίνακας 5.108	Τιμές C/N για τους τρεις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Γ	341
Πίνακας 5.109	Τιμές $\text{NO}_3^- - \text{N}$ σε mg/kg για τους τρεις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Γ	344
Πίνακας 5.110	Τιμές $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ σε mg/kg για τους τρεις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Γ	345
Πίνακας 5.111	Τροφοδοσία σε g των αντιδραστήρων του τρίτου κύκλου Δράσης Γ	349
Πίνακας 5.112	Δειγματοληψία σε g από τους αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου Δράσης Γ	350
Πίνακας 5.113	Ποσοστό % συνολικής μείωσης της μάζας σε κάθε αντιδραστήρα του τρίτου κύκλου Δράσης Γ	351
Πίνακας 5.114	Τιμές θερμοκρασίας ($^{\circ}\text{C}$) για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου Δράσης Γ	353
Πίνακας 5.115	Τιμές υγρασίας (%) για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου Δράσης Γ	355
Πίνακας 5.116	Τιμές pH για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου Δράσης Γ	357
Πίνακας 5.117	Τιμές αγωγιμότητας για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου Δράσης Γ (mS/cm)	359
Πίνακας 5.118	Τιμές % πτητικών στερεών για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου Δράσης Γ	361
Πίνακας 5.119	Τιμές TOC (%) για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου Δράσης Γ	363
Πίνακας 5.120	Τιμές (%dm) TKN για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου Δράσης Γ	366
Πίνακας 5.121	Τιμές C/N για τους αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου Δράσης Γ	368
Πίνακας 5.122	Τιμές $\text{NO}_3^- - \text{N}$ σε mg/kg για τους τρεις αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου Δράσης Γ	370
Πίνακας 5.123	Τιμές $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ σε mg/kg για τους τρεις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Γ	372
Πίνακας 5.124	Τροφοδοσία σε g των αντιδραστήρων του τέταρτου κύκλου της Δράσης Γ	375
Πίνακας 5.125	Δειγματοληψία από τους αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου Δράσης Γ	376
Πίνακας 5.126	Ποσοστό % συνολικής μείωσης της μάζας σε κάθε αντιδραστήρα του δεύτερου κύκλου	377
Πίνακας 5.127	Τιμές θερμοκρασίας ($^{\circ}\text{C}$) για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου Δράσης Γ	378
Πίνακας 5.128	Τιμές υγρασίας (%) για τους τέσσερις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου	380
Πίνακας 5.129	Τιμές pH για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου Δράσης Γ	382
Πίνακας 5.130	Τιμές αγωγιμότητας για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τέταρτου	

	κύκλου Δράσης Γ (mS/cm)	384
Πίνακας 5.131	Τιμές % πτητικών στερεών για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου δράσης Γ	386
Πίνακας 5.132	Τιμές TOC (%dm) για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου Δράσης Γ	388
Πίνακας 5.133	Τιμές (%dm) TKN για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου	390
Πίνακας 5.134	Τιμές C/N για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου Δράσης Γ	392
Πίνακας 5.135	Τιμές σε NO ₃ ⁻ - N mg/kg για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου Δράσης Γ	394
Πίνακας 5.136	Τιμές (NH ₄ ⁺ - N) σε mg/ kg για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου Δράσης Γ	396
Πίνακας 5.137	Πειραματικά αποτελέσματα στο ώριμο κόμποστ (50 ημέρες από την έναρξη της διεργασίας) (Δράση Β Σειρά Β)	407
Πίνακας 5.138	Πειραματικά αποτελέσματα στο ώριμο κόμποστ (50 ημέρες από την έναρξη της διεργασίας) (Δράση Γ Σειρά Β)	408
Πίνακας 5.139	Προτεινόμενη αναλογία C/N στο κόμποστ σύμφωνα με τη βιβλιογραφία	412
Πίνακας 5.140	Δυναμική του αζώτου σχετιζόμενη με το λόγο C/N του τελικού προϊόντος κατά την εναπόθεσή του σε βοσκότοπους και αρόσιμο έδαφος (Amlinger et al., 2003)	413
Πίνακας 5.141	Πειραματικά αποτελέσματα μακροστοιχείων (%dm) στο ώριμο κόμποστ (50 ημέρες από την έναρξη της διεργασίας) (Δράση Β Σειρά Β)	419
Πίνακας 5.142	Πειραματικά αποτελέσματα μακροστοιχείων (%dm) στο ώριμο κόμποστ (50 ημέρες από την έναρξη της διεργασίας) (Δράση Γ Σειρά Β)	420
Πίνακας 5.143:	Ποιοτικός έλεγχος προσαρμογής των μοντέλων στα πειραματικά δεδομένα (Mason, 2007)	449

Διάγραμμα 1.1	Παραγωγή απορριμμάτων στην ΕΕ (Eurostat, 2006)	
Διάγραμμα 1.2	Παραγωγή οικιακών απορριμμάτων στην ΕΕ (Eurostat, 2006)	12
Διάγραμμα 1.3	Ποσοστό διάθεσης βιοαποδομήσιμων αστικών αποβλήτων σε ΧΥΤΑ στις χώρες της Ε.Ε. με βάση τη συνολική ποσότητα που είχαν παραχθεί το 1995 (EC, 2006)	14
Διάγραμμα 1.4	Μέση κατά κεφαλήν παραγωγή ΑΣΑ στα Κράτη Μέλη της Ε.Ε. (Eurostat, 2010)	16
Διάγραμμα 2.1	Συνθήκες θερμοκρασίας-χρόνου για την αδρανοποίηση των παθογόνων μικροοργανισμών στην ιλύ (Strauch, 1998; 1991).	37
Διάγραμμα 2.2	Επίδραση του pH και της θερμοκρασίας στην ισορροπία $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ στο υπόστρωμα (Henry et al., 1999)	42
Διάγραμμα 5.1	Θερμοκρασία κατά τη διάρκεια λειτουργίας των αντιδραστήρων των 20, 30 και 40 ημερών	148
Διάγραμμα 5.2	Εξέλιξη της υγρασίας κατά τη διάρκεια λειτουργίας των αντιδραστήρων των 20, 30 και 40 ημερών	150
Διάγραμμα 5.3	Εξέλιξη του pH κατά τη διάρκεια λειτουργίας των αντιδραστήρων των 20, 30 και 40 ημερών	151
Διάγραμμα 5.4	Εξέλιξη του ολικού οργανικού άνθρακα των αντιδραστήρων των 20, 30 και 40 ημερών	153
Διάγραμμα 5.5	Εξέλιξη του ολικού αζώτου κατά Kjeldahl (%) στους αντιδραστήρες των 20, 30 και 40 ημερών	155
Διάγραμμα 5.6	Λόγος C/N για τους αντιδραστήρες των 20, 30 και 40 ημερών	156
Διάγραμμα 5.7	Συγκριτική απεικόνιση της % απώλειας μάζας στους 4 αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Β	162
Διάγραμμα 5.8	Συγκριτική απεικόνιση θερμοκρασίας στους 4 αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Β	164
Διάγραμμα 5.9	Συγκριτική απεικόνιση % υγρασίας στους 4 αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Β	167
Διάγραμμα 5.10	Συγκριτική απεικόνιση pH στους 4 αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Β	169
Διάγραμμα 5.11	Συγκριτική απεικόνιση ηλεκτρικής αγωγιμότητας στους 4 αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Β	172
Διάγραμμα 5.12	Συγκριτική απεικόνιση ηλεκτρικής αγωγιμότητας στους 4 αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Β	174
Διάγραμμα 5.13	Συγκριτική απεικόνιση % οργανικού άνθρακα (TOC) στους 4 αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Β	176
Διάγραμμα 5.14	Συγκριτική απεικόνιση του % ολικού αζώτου κατά kjeldahl στους 4 αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου της Δράσης Β κύκλου	179
Διάγραμμα 5.15	Συγκριτική απεικόνιση του λόγου C/N στους 4 αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου της Δράσης Β κύκλου	181
Διάγραμμα 5.16	Συγκριτική απεικόνιση των νιτρικών $\text{NO}_3^- - \text{N}$ στους 4 αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου της Δράσης Β	183
Διάγραμμα 5.17	Συγκριτική απεικόνιση των αμμωνιακών $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ στους 4 αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου της Δράσης Β	185
Διάγραμμα 5.18	Συγκριτική απεικόνιση της % απώλειας μάζας στους 4 αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου της Δράσης Β	189
Διάγραμμα 5.19	Συγκριτική απεικόνιση θερμοκρασίας στους 4 αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου της Δράσης Β	191
Διάγραμμα 5.20	Συγκριτική απεικόνιση % υγρασίας στους 4 αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου της Δράσης Β	193

Διάγραμμα 5.21	Συγκριτική απεικόνιση pH στους 4 αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου της Δράσης Β	195
Διάγραμμα 5.22	Συγκριτική απεικόνιση ηλεκτρικής αγωγιμότητας στους 4 αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου της Δράσης	197
Διάγραμμα 5.23	Συγκριτική απεικόνιση ηλεκτρικής αγωγιμότητας στους 4 αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου της Δράσης Β.	199
Διάγραμμα 5.24	Συγκριτική απεικόνιση % οργανικού άνθρακα TOC στους 4 αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου της Δράσης Β	201
Διάγραμμα 5.25	Συγκριτική απεικόνιση % TKN στους 4 αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου της Δράσης Β	203
Διάγραμμα 5.26	Συγκριτική απεικόνιση του λόγου C/N στους 4 αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου της Δράσης Β	205
Διάγραμμα 5.27	Συγκριτική απεικόνιση των νιτρικών $NO_3^- - N$ στους 4 αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου της Δράσης Β	207
Διάγραμμα 5.28	Συγκριτική απεικόνιση των αμμωνιακών $NH_4^+ - N$ στους 4 αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου της Δράσης Β	209
Διάγραμμα 5.29	Συγκριτική απεικόνιση της % απώλειας μάζας στους 4 αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου της Δράσης Β	213
Διάγραμμα 5.30	Συγκριτική απεικόνιση θερμοκρασίας στους 4 αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου της Δράσης Β	215
Διάγραμμα 5.31	Συγκριτική απεικόνιση % υγρασίας στους 4 αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου της Δράσης Β	217
Διάγραμμα 5.32	Συγκριτική απεικόνιση pH στους 4 αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου της Δράσης Β	219
Διάγραμμα 5.33	Συγκριτική απεικόνιση ηλεκτρικής αγωγιμότητας στους 4 αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου της Δράσης Β	221
Διάγραμμα 5.34	Συγκριτική απεικόνιση των πτητικών στερεών (%) στους 4 αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου της Δράσης Β	223
Διάγραμμα 5.35	Συγκριτική απεικόνιση % οργανικού άνθρακα TOC στους 4 αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου της Δράσης Β	225
Διάγραμμα 5.36	Συγκριτική απεικόνιση του % ολικού αζώτου κατά kjeldahl στους 4 αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου της Δράσης Β	227
Διάγραμμα 5.37	Συγκριτική απεικόνιση του λόγου C/N στους 4 αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου της Δράσης Β	229
Διάγραμμα 5.38	Συγκριτική απεικόνιση των νιτρικών $NO_3^- - N$ στους 4 αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου της Δράσης Β	231
Διάγραμμα 5.39	Συγκριτική απεικόνιση των αμμωνιακών $NH_4^+ - N$ στους 4 αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου της Δράσης Β	233
Διάγραμμα 5.40	Συγκριτική απεικόνιση θερμοκρασίας στους τρεις κύκλους για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό πριονίδι	237
Διάγραμμα 5.41	Συγκριτική απεικόνιση θερμοκρασίας στους τρεις κύκλους για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό ζεόλιθο	238
Διάγραμμα 5.42	Συγκριτική απεικόνιση θερμοκρασίας στους τρεις κύκλους για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό βερμικουλίτη	239
Διάγραμμα 5.43	Συγκριτική απεικόνιση θερμοκρασίας στους τρεις κύκλους για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό περλίτη	240
Διάγραμμα 5.44	Συγκριτική απεικόνιση υγρασίας (%) στους τρεις κύκλους για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό πριονίδι	244
Διάγραμμα 5.45	Συγκριτική απεικόνιση υγρασίας (%) στους τρεις κύκλους για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό ζεόλιθο	245
Διάγραμμα 5.46	Συγκριτική απεικόνιση υγρασίας στους τρεις κύκλους για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό βερμικουλίτη	246
Διάγραμμα 5.47	Συγκριτική απεικόνιση υγρασίας στους τρεις κύκλους για τους	

	αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό πριονίδι	293
Διάγραμμα 5.73	Συγκριτική απεικόνιση αμμωνιακών $(NH_4^+ - N)$ ($\frac{mg}{kg}$) στους τρεις κύκλους για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό ζεόλιθο	294
Διάγραμμα 5.74	Συγκριτική απεικόνιση αμμωνιακών $(NH_4^+ - N)$ ($\frac{mg}{kg}$) στους τρεις κύκλους για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό βερμικουλίτη	295
Διάγραμμα 5.75	Συγκριτική απεικόνιση αμμωνιακών $(NH_4^+ - N)$ ($\frac{mg}{kg}$) στους τρεις κύκλους για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό περλίτη	296
Διάγραμμα 5.76	Συγκριτική απεικόνιση της % απώλειας μάζας στους αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου Δράσης Γ	301
Διάγραμμα 5.77	Συγκριτική απεικόνιση θερμοκρασίας στους 3 αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου Δράσης Γ	304
Διάγραμμα 5.78	Συγκριτική απεικόνιση %κ.β. υγρασίας στους 3 αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου Δράσης Γ	306
Διάγραμμα 5.79	Συγκριτική απεικόνιση pH στους 3 αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου Δράσης Γ	308
Διάγραμμα 5.80	Συγκριτική απεικόνιση ηλεκτρικής αγωγιμότητας στους 3 αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου Δράσης Γ	310
Διάγραμμα 5.81	Συγκριτική απεικόνιση πτητικών στερεών (%) στους 3 αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου Δράσης Γ	312
Διάγραμμα 5.82	Συγκριτική απεικόνιση % οργανικού άνθρακα (TOC) στους 3 αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου Δράσης Γ	314
Διάγραμμα 5.83	Συγκριτική απεικόνιση του % ολικού αζώτου κατά kjeldahl στους 4 αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου Δράσης Γ	316
Διάγραμμα 5.84	Συγκριτική απεικόνιση του λόγου C/N στους 4 αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου Δράσης Γ	318
Διάγραμμα 5.85	Συγκριτική απεικόνιση των νιτρικών $NO_3^- - N$ στους 3 αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου Δράσης Γ	320
Διάγραμμα 5.86	Συγκριτική απεικόνιση των αμμωνιακών $NH_4^+ - N$ στους 3 αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου της Δράσης Γ	322
Διάγραμμα 5.87	Συγκριτική απεικόνιση της % απώλειας μάζας στους 3 αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Γ	326
Διάγραμμα 5.88	Συγκριτική απεικόνιση θερμοκρασίας στους 3 αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Γ	328
Διάγραμμα 5.89	Συγκριτική απεικόνιση % υγρασίας στους 3 αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Γ	330
Διάγραμμα 5.90	Συγκριτική απεικόνιση pH στους τρεις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου (Δράσης Γ)	332
Διάγραμμα 5.91	Συγκριτική απεικόνιση ηλεκτρικής αγωγιμότητας στους τρεις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Γ	334
Διάγραμμα 5.92	Συγκριτική απεικόνιση των πτητικών στερεών στους 3 αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Γ	336
Διάγραμμα 5.93	Συγκριτική απεικόνιση % οργανικού άνθρακα TOC στους 3 αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου της Δράσης	338
Διάγραμμα 5.94	Συγκριτική απεικόνιση του % ολικού αζώτου κατά kjeldahl στους 3 αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Γ	340
Διάγραμμα 5.95	Συγκριτική απεικόνιση του λόγου C/N στους 3 αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Γ	342
Διάγραμμα 5.96	Συγκριτική απεικόνιση των νιτρικών $NO_3^- - N$ στους 3 αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Γ	344
Διάγραμμα 5.97	Συγκριτική απεικόνιση των αμμωνιακών $NH_4^+ - N$ στους 3 αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Γ	346

Διάγραμμα 5.98	Συγκριτική απεικόνιση της % απώλειας μάζας στους 4 αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου Δράσης Γ	351
Διάγραμμα 5.99	Συγκριτική απεικόνιση θερμοκρασίας (οC) στους 4 αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου Δράσης Γ	354
Διάγραμμα 5.100	Συγκριτική απεικόνιση % υγρασίας στους 4 αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου Δράσης Γ	356
Διάγραμμα 5.101	Συγκριτική απεικόνιση pH στους 4 αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου Δράσης Γ	358
Διάγραμμα 5.102	Συγκριτική απεικόνιση ηλεκτρικής αγωγιμότητας στους 4 αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου δράσης Γ	360
Διάγραμμα 5.103	Συγκριτική απεικόνιση % πηκτικών στερεών (VS) στους 4 αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου Δράσης Γ	362
Διάγραμμα 5.104	Συγκριτική απεικόνιση (%dm) οργανικού άνθρακα TOC στους 4 αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου της Δράσης Γ	364
Διάγραμμα 5.105	Συγκριτική απεικόνιση του % ολικού αζώτου κατά kjeldahl στους 4 αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου της Δράσης Γ	367
Διάγραμμα 5.106	Συγκριτική απεικόνιση του λόγου C/N στους 4 αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου της Δράσης Γ	369
Διάγραμμα 5.107	Συγκριτική απεικόνιση των νιτρικών $NO_3^- - N$ στους 4 αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου Δράσης Γ	371
Διάγραμμα 5.108	Συγκριτική απεικόνιση των αμμωνιακών $NH_4^+ - N$ στους 4 αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου Δράσης Γ	373
Διάγραμμα 5.109	Συγκριτική απεικόνιση της % απώλειας μάζας στους 4 αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου Δράσης Γ.	377
Διάγραμμα 5.110	Συγκριτική απεικόνιση θερμοκρασίας στους 4 αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου της Δράσης Γ	379
Διάγραμμα 5.111	Συγκριτική απεικόνιση % υγρασίας στους 4 αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου Δράσης Γ	381
Διάγραμμα 5.112	Συγκριτική απεικόνιση pH στους 4 αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου Δράσης Γ	383
Διάγραμμα 5.113	Συγκριτική απεικόνιση ηλεκτρικής αγωγιμότητας στους 4 αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου Δράσης Γ	385
Διάγραμμα 5.114	Συγκριτική απεικόνιση % πηκτικών στερεών (VS) στους 4 αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου Δράσης Γ	387
Διάγραμμα 5.115	Συγκριτική απεικόνιση (%dm) οργανικού άνθρακα TOC στους 4 αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου της Δράσης Γ	389
Διάγραμμα 5.116	Συγκριτική απεικόνιση του % ολικού αζώτου κατά kjeldahl στους 4 αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου δράσης Γ	391
Διάγραμμα 5.117	Συγκριτική απεικόνιση του λόγου C/N στους 4 αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου Δράσης Γ	393
Διάγραμμα 5.118	Συγκριτική απεικόνιση των νιτρικών $NO_3^- - N$ στους 4 αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου Δράσης Γ	395
Διάγραμμα 5.119	Συγκριτική απεικόνιση των αμμωνιακών $NH_4^+ - N$ στους 4 αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου Δράσης Γ	397
Διάγραμμα 5.120	Συγκριτική απεικόνιση των μαρκοστοιχείων (%dm) στους 4 αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Β	421
Διάγραμμα 5.121	Συγκριτική απεικόνιση των μαρκοστοιχείων (%dm) στους 4 αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου Δράσης Β	422
Διάγραμμα 5.122	Συγκριτική απεικόνιση των μαρκοστοιχείων (%dm) στους 4 αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου Δράσης Β	423
Διάγραμμα 5.123	Συγκριτική απεικόνιση των μαρκοστοιχείων (%dm) στους 6 αντιδραστήρες των Κύκλων 1-2 Δράσης Γ	424
Διάγραμμα 5.124	Συγκριτική απεικόνιση των μαρκοστοιχείων (%dm) στους 4 αντιδραστήρες	

	του Κύκλου 3 Δράσης Γ	425
Διάγραμμα 5.125	Συγκριτική απεικόνιση των μαρκοστοιχείων (%dm) στους 4 αντιδραστήρες του Κύκλου 4 Δράσης Γ	426
Διάγραμμα 5.126	Συγκριτική απεικόνιση του δείκτη βλαστικότητας στις 20 ημέρες για τους 4 αντιδραστήρες του Κύκλου 2 Δράσης Β	430
Διάγραμμα 5.127	Συγκριτική απεικόνιση του δείκτη βλαστικότητας στις 50 ημέρες για τους 4 αντιδραστήρες του Κύκλου 2 Δράσης Β	431
Διάγραμμα 5.128	Συγκριτική απεικόνιση του δείκτη βλαστικότητας στις 20 ημέρες για τους 4 αντιδραστήρες του Κύκλου 3 Δράσης Β	432
Διάγραμμα 5.129	Συγκριτική απεικόνιση του δείκτη βλαστικότητας στις 50 ημέρες για τους 4 αντιδραστήρες του Κύκλου 3 Δράσης Β	433
Διάγραμμα 5.130	Συγκριτική απεικόνιση του δείκτη βλαστικότητας στις 20 ημέρες για τους 4 αντιδραστήρες του Κύκλου 4 Δράσης Β	434
Διάγραμμα 5.131	Συγκριτική απεικόνιση του δείκτη βλαστικότητας στις 50 ημέρες για τους 4 αντιδραστήρες του Κύκλου 4 Δράσης Β	435
Διάγραμμα 5.132	Συγκριτική απεικόνιση του δείκτη βλαστικότητας στις 20 ημέρες για τους όλους τους αντιδραστήρες των κύκλων 1 & 2 Δράσης Γ	436
Διάγραμμα 5.133	Συγκριτική απεικόνιση του δείκτη βλαστικότητας στις 50 ημέρες για τους όλους τους αντιδραστήρες των Κύκλων 1 & 2 Δράσης Γ	437
Διάγραμμα 5.134	Συγκριτική απεικόνιση του δείκτη βλαστικότητας στις 20 ημέρες για τους 4 αντιδραστήρες του Κύκλου 3 Δράσης Γ	438
Διάγραμμα 5.135	Συγκριτική απεικόνιση του δείκτη βλαστικότητας στις 50 ημέρες για τους 4 αντιδραστήρες του Κύκλου 3 Δράσης Γ	439
Διάγραμμα 5.136	Συγκριτική απεικόνιση του δείκτη βλαστικότητας στις 20 ημέρες για τους 4 αντιδραστήρες του Κύκλου 4 Δράσης Γ	440
Διάγραμμα 5.137	Συγκριτική απεικόνιση του δείκτη βλαστικότητας στις 50 ημέρες για τους 4 Αντιδραστήρες του Κύκλου 4 Δράσης	441
Διάγραμμα 5.138	Προσαρμογή της προσομοίωσης της κινητικής αντιδράσεων στα πειραματικά δεδομένα για τους τέσσερις αντιδραστήρες του Κύκλου 3 Δράσης Β	446
Διάγραμμα 5.139	Προσαρμογή της προσομοίωσης της κινητικής αντιδράσεων στα πειραματικά δεδομένα για τους τρεις αντιδραστήρες του Κύκλου 2 Δράσης Γ	447

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

1.1 Εισαγωγή

Το περιβάλλον ορίζεται ως “το σύνολο των φυσικών και ανθρωπογενών παραγόντων και στοιχείων που βρίσκονται σε αλληλεπίδραση και επηρεάζουν την οικολογική ισορροπία, την ποιότητα της ζωής, την υγεία των κατοίκων την ιστορική και πολιτιστική παράδοση και τις αισθητικές αξίες”. Επιτακτική μοιάζει να είναι η ανάγκη της σύγχρονης κοινωνίας, με τα τόσα περιβαλλοντικά προβλήματα, για διαχείριση του περιβάλλοντος κατά αειφόρο τρόπο. Δηλαδή κατά τρόπο, ο οποίος θα ικανοποιεί τις ανάγκες των σημερινών γενεών, χωρίς να διακυβεύει τη δυνατότητα των μελλοντικών γενεών να ικανοποιήσουν τις δικές τους ανάγκες. Τα τεράστια προβλήματα που έχουν δημιουργηθεί τις τελευταίες δεκαετίες με την αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη, λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου καθώς και πλήθος άλλων οικολογικών καταστροφών, έχουν «αναγκάσει» την παγκόσμια κοινότητα να θεωρεί τα θέματα σχετικά με το περιβάλλον υψίστης σημασίας. Πλέον έχουν αντιληφθεί όλοι ότι το περιβάλλον και η προστασία του ξεπερνάνε σύνορα, θρησκείες, διαφορές και μίση. Δεν είναι θέμα κρατικό αλλά παγκόσμιο. Και ως έτσι αντιμετωπίζεται. Άλλοτε επιτυχώς και άλλοτε όχι.

Μία από τις σημαντικότερες εκ των παραμέτρων που διέπουν την προστασία του περιβάλλοντος, αφορά στη διαχείριση των στερεών αποβλήτων που παράγονται από κάθε μορφής παραγωγική ή καταναλωτική ανθρώπινη δραστηριότητα. Τα στερεά απόβλητα εμφανίζουν μια εξαιρετικά μεγάλη ποικιλία τύπων και ποσοτήτων που συνάδει, αφενός με την πληθυσμιακή αύξηση σε παγκόσμια κλίμακα, αφετέρου, με την αλματώδη εξέλιξη της τεχνολογίας, στο κατώφλι του 21^{ου} αιώνα. Η διαχείριση των στερεών αποβλήτων με τεχνικές και μεθόδους αντιρρύπανσης, αποτελεί βασική προτεραιότητα τόσο για τις αναπτυγμένες, όσο και για τις αναπτυσσόμενες χώρες. Οι κοινές διεθνείς δράσεις προς την κατεύθυνση αυτή έχουν διατυπωθεί ήδη σε παγκόσμιο επίπεδο με τη Συνθήκη – Πλαίσιο για τις κλιματικές αλλαγές (*Πρωτόκολλο Κιότο*). Παράλληλα με το βασικό στόχο της Συνθήκης, ο οποίος είναι η *‘σταθεροποίηση των συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα, σε επίπεδα τέτοια ώστε να προληφθούν επικίνδυνες επιπτώσεις στο κλίμα από τις ανθρώπινες δραστηριότητες’*, ενθαρρύνεται η δημιουργία μηχανισμών ‘καθαρής’ ανάπτυξης, συνιστώσα των οποίων αποτελούν οι εγκαταστάσεις περιβαλλοντικά αποδεκτής διαχείρισης κάθε μορφής και ποσότητας παραγόμενων αποβλήτων. (Μιχαλόπουλος 2010)

Οι σύγχρονες τάσεις ολοκληρωμένης διαχείρισης στερεών αποβλήτων, προσανατολίζονται στη δημιουργία εγκαταστάσεων αξιοποίησης των διαφόρων ρευμάτων, διασφαλίζοντας, ή έστω, στοχεύοντας στην αποφυγή διάθεσης τους στο περιβάλλον, δηλαδή, στον υπόγειο, επίγειο και υπέργειο ορίζοντα, μέσω της ανεξέλεγκτης εναπόθεσής τους στις χωματερές (ΧΑΔΑ) ή ακόμα και σε Χώρους Υγειονομικής Ταφής (ΧΥΤΑ). Κύριοι πυλώνες ως προς τη σκοπιμότητα ανάπτυξης των εν λόγω εγκαταστάσεων αποτελούν, αφενός ο μετασχηματισμός των αποβλήτων σε αξιοποιήσιμο και περιβαλλοντικά ‘φίλικό’ προϊόν, αφετέρου, η διασφάλιση ότι, ο μετασχηματισμός αυτός δεν δρα επιβαρυντικά στο περιβάλλον.

Το μεγαλύτερο κλάσμα των στερεών αποβλήτων που καταλήγουν στους ΧΥΤΑ αποτελούν τα βιοαποδομίσιμα στερεά απόβλητα, τα οποία ορίζονται ως τα απόβλητα που μπορούν να αποδομηθούν με αερόβιες ή αναερόβιες διεργασίες. Η σημαντικότητα της

ολοκληρωμένης διαχείρισης των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων έγκειται στην εκτροφή τους από τους Χώρους Υγειονομικής Ταφής Αποβλήτων (ΧΥΤΑ) και την παράλληλη αξιοποίησή τους. Κατά την εναπόθεση της ροής αυτής των αποβλήτων στους ΧΥΤΑ διαμορφώνονται συνθήκες αναερόβιας βιοαποδόμησης με τη συνεπακόλουθη εκπομπή σημαντικών ποσοτήτων βιοαερίου (μίγμα οργανικών και ανόργανων αερίων) και την παραγωγή στραγγισμάτων βεβαρημένων με υψηλό οργανικό και ανόργανο φορτίο. Η διαδικασία αυτή διαρκεί αρκετά χρόνια μετά τη διάθεση των αποβλήτων. Το μείζον διαχειριστικό πρόβλημα αναφορικά με την ταφή των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων αποτελεί η εκπομπή βιοαερίου με υψηλή περιεκτικότητα σε μεθάνιο το οποίο περιλαμβάνεται στα χημικώς δραστικά αέρια θερμοκηπίου συμβάλλοντας στις κλιματικές αλλαγές. Συνεπώς, η εκτροφή τους από τους ΧΥΤΑ δύναται να συμβάλει σημαντικά στη μείωση των επιπτώσεων στις κλιματικές αλλαγές (Smith et al., 2001). Εκτός της ατμοσφαιρικής ρύπανσης που προκύπτει από τη διάθεση της ροής αυτής των στερεών αποβλήτων στους ΧΥΤΑ, η περιεχόμενη σε αυτά οργανική ουσία και τα θρεπτικά συστατικά δεν είναι πλέον αξιοποιήσιμα προς ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση.

Τα βιοαποδομήσιμα στερεά απόβλητα διαθέτουν, στην πλειονότητά τους, επάρκεια κυρίως σε οργανική ουσία και λιγότερο σε θρεπτικά συστατικά. Εντούτοις, η μη σταθεροποιημένη οργανική ουσία σε συνδυασμό με ενδεχόμενη παρουσία ρυπογόνων στοιχείων (π.χ. συγκέντρωση βαρέων μετάλλων, παθογόνοι μικροοργανισμοί), χρήζουν απαραίτητη την κατάλληλη επεξεργασία τους. Η αερόβια βιολογική επεξεργασία (κομποστοποίηση) των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων αποτελεί την πλέον απλή, ασφαλή και κατανοητή τεχνολογία με την οποία μπορεί να επιτευχθεί τόσο η σταθεροποίηση του υποστρώματος όσο και η παραγωγή προϊόντος (κόμποστ) προστιθέμενης αξίας το οποίο δύναται να χρησιμοποιηθεί ως υλικό για τη βελτίωση, κυρίως, των φυσικών ιδιοτήτων του εδάφους (π.χ. της υδατοϊκανότητας, του πορώδους, της φυσικής σταθερότητας) (Lakhdar et al., 2009). Επομένως, η κομποστοποίηση ενδέχεται να διαμορφώσει τις απαιτούμενες συνθήκες για την επεξεργασία, την ανάκτηση και ανακύκλωση των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων συντελώντας στη συντήρηση ή/και στην αποκατάσταση της ποιότητας των εδαφών αλλά και στην εκτροφή της ροής αυτής των αποβλήτων από τους ΧΥΤΑ, όπως επιτάσσει η περιβαλλοντική πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ε.Ε.) αναφορικά με την ιεράρχηση της διαχείρισης των στερεών αποβλήτων συμβάλλοντας σε πληθώρα περιβαλλοντικών, οικονομικών και κοινωνικών οφελών. (Μαλαμής 2011).

1.2 Στόχος και διάρθρωση της διδακτορικής διατριβής

Στόχος της διδακτορικής διατριβής αποτελεί η ενδεδειγμένη μελέτη και, μέσω αυτής, ο έλεγχος και η ρύθμιση της διεργασίας της κομποστοποίησης, σε πρότυπο αντιδραστήρα οικιακού τύπου (σχεδιασμένο από τη Μονάδα Περιβαλλοντικής Επιστήμης και Τεχνολογίας της Σχολής Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ), είτε επεμβαίνοντας στις αναλογίες C/N του αρχικού υποστρώματος, είτε με τη χρήση προσθέτων (ορυκτά – πριονίδι – ώριμο κόμποστ), με αποτέλεσμα την βελτιστοποίηση της διεργασίας και εν τέλει την παραγωγή τελικού προϊόντος καλύτερων ιδιοτήτων. Έτσι, μέσω της δυνατότητας ελέγχου της διεργασίας, του χαρακτηρισμού της ποιότητας του τελικού προϊόντος, καθώς και της προσομοίωσης της κινητικής αντιδράσεων βιοξείδωσης του υποστρώματος, αξιολογείται ο πρότυπος αντιδραστήρας.

Η δομή της διδακτορικής διατριβής έχει ως εξής. Στο κεφάλαιο 1, παρουσιάζονται οι στόχοι της διδακτορικής διατριβής και το νομοθετικό πλαίσιο το οποίο διέπει τη διαχείριση των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων. Στο κεφάλαιο 2, περιγράφεται η αερόβια βιολογική επεξεργασία αποδόμησης των οργανικών αποβλήτων, γνωστή ως κομποστοποίηση. Στο κεφάλαιο 3, περιγράφονται τα πρόσθετα κομποστοποίησης, που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διδακτορική διατριβή. Το κεφάλαιο 4, αφιερώνεται στη μεθοδολογική προσέγγιση η οποία ακολουθήθηκε για την επίτευξη των επιμέρους στόχων της διδακτορικής διατριβής, καθώς και στην περιγραφή του πρότυπου αντιδραστήρα στον οποίο πραγματοποιήθηκαν όλοι οι πειραματικοί κύκλοι. Το κεφάλαιο 5, αποτελεί το πειραματικό μέρος της έρευνας κατά το οποίο μελετάται και αναλύεται η διεργασία της κομποστοποίησης, οι δυνατότητες βελτίωσης της διεργασίας με τη χρήση διαφορετικών υποστρωμάτων και προσθέτων, με συνακόλουθη βελτίωση των ιδιοτήτων του τελικού προϊόντος, και, μέσω όλων των ανωτέρω, η αποτελεσματικότητα του πρότυπου συστήματος κομποστοποίησης. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται και η προσομοίωση της κινητικής των αντιδράσεων βιοξείδωσης του υποστρώματος. Στο 6^ο και τελευταίο κεφάλαιο δίνονται τα συμπεράσματα τα οποία προκύπτουν από τα αποτελέσματα της πειραματικής ανάλυσης σε συνδυασμό με τις πληροφορίες οι οποίες παρέχονται στα υπόλοιπα κεφάλαια της διατριβής.

1.3 Νομικό πλαίσιο διαχείρισης των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων

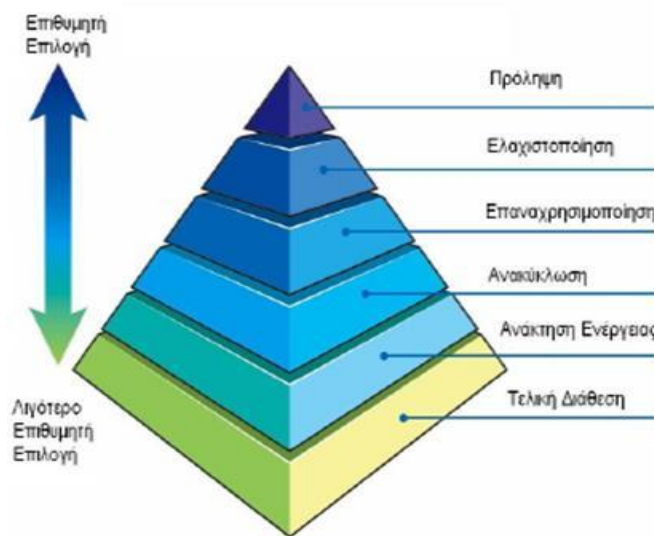
Η Ευρωπαϊκή στρατηγική αναφορικά με τις προτεραιότητες και τις δράσεις για το περιβάλλον υλοποιείται με την υιοθέτηση των «Προγραμμάτων Δράσης για το Περιβάλλον» (ΠΔΠ). Στο πλαίσιο των ΠΔΠ η Ευρωπαϊκή Ένωση (Ε.Ε.) αναπτύσσει την πολιτική της ως προς τη διαχείριση των αποβλήτων, η υλοποίηση της οποίας προϋποθέτει τη θέσπιση Οδηγιών (Directives), Κανονισμών (Regulations) και Αποφάσεων (Decisions).

Στο πρώτο ΠΔΠ (1973–1976) τα απόβλητα αναγνωρίστηκαν ως πρόβλημα το οποίο χρήζει ελέγχου σε επίπεδο κοινότητας. Στο δεύτερο (1977–1981) και τρίτο ΠΔΠ (1982–86) τονίστηκε η ανάγκη για την πρόληψη, την ανακύκλωση και την επαναχρησιμοποίηση αποβλήτων καθώς και η ανάγκη για την ασφαλή διάθεση των μη-ανακυκλώσιμων υπολειμμάτων, ενώ στο τέταρτο ΠΔΠ (1987-1992) απαιτούνται ανάλογες δράσεις για την ελαχιστοποίηση των αποβλήτων κατά την παραγωγική διαδικασία με τη χρήση «καθαρών» τεχνολογιών. Στο πέμπτο ΠΔΠ (1993-2001) λαμβάνονται νέα μέτρα και μια ευρύτερη δέσμευση ένταξης της περιβαλλοντικής διάστασης σε άλλες πολιτικές με στόχο την αειφορία. Το έκτο και τρέχον ΠΔΠ (2001-2011) φέρει τον τίτλο «Περιβάλλον 2010: Το μέλλον μας, η επιλογή μας» και προωθεί την πλήρη ένταξη των απαιτήσεων προστασίας του περιβάλλοντος σε όλες τις πολιτικές και δράσεις της κοινότητας ενσωματώνοντας την περιβαλλοντική διάσταση της κοινοτικής στρατηγικής για τη βιώσιμη ανάπτυξη. Στο έκτο ΠΔΠ θέτονται τέσσερις πυλώνες δράσεις: (α) η αντιμετώπιση της αλλαγής του κλίματος, (β) η προστασία της φύσης και της βιοποικιλότητας, (γ) το περιβάλλον και η υγεία και (δ) η αειφόρος εκμετάλλευση των φυσικών πόρων και η αειφόρος διαχείριση των αποβλήτων. Τις τέσσερις αυτές δράσεις προτεραιότητας του προγράμματος πλαισιώνουν επτά θεματικές στρατηγικές υιοθετώντας μια ευρύτερη στρατηγική προσέγγιση για τον εκσυγχρονισμό της κοινοτικής πολιτικής στο περιβάλλον. Οι επτά θεματικές στρατηγικές περιλαμβάνουν:

- την Ατμοσφαιρική Ρύπανση (COM/2005/0446 τελικό),
- την Πρόληψη και Ανακύκλωση Αποβλήτων (COM/2005/666 τελικό), (review COM/2011/0013 τελικό)
- την Προστασία και Διαφύλαξη του Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (Οδηγία-πλαίσιο 2008/56/ΕΚ για τη θαλάσσια στρατηγική, COM/2005/0504 τελικό),
- την Προστασία του Εδάφους (COM/2002/0179 τελικό),
- την Αειφόρο Χρήση Φυτοφαρμάκων (COM/2002/0349 τελικό),
- την Αειφόρο Χρήση Πόρων (COM/2005/0670 τελικό),
- το Αστικό Περιβάλλον (COM/2005/0718 τελικό).

Κάθε στρατηγική ακολουθεί μία σε βάθος αναθεώρηση της υπάρχουσας πολιτικής και των εκτεταμένων διαβουλεύσεων των συμμετεχόντων. Ο στόχος είναι να ορισθούν μακροπρόθεσμοι στόχοι, που βασίζονται στην αξιολόγηση των περιβαλλοντικών προβλημάτων αλλά και στην επιδίωξη συνέργειας ανάμεσα στις διάφορες στρατηγικές και τους στόχους της Ευρωπαϊκής κοινότητας για την ανάπτυξη, την ανταγωνιστικότητα και τη δημιουργία θέσεων απασχόλησης. Με την υιοθέτηση της θεματικής στρατηγικής για την πρόληψη και ανακύκλωση των αποβλήτων το 2005 η Ε.Ε. θέτει ως στρατηγικό στόχο τη μείωση των αρνητικών επιπτώσεων στο περιβάλλον από τα απόβλητα μετατρέποντας τη σε μια «κοινωνία της ανακύκλωσης» (UFOPLAN, 2009).

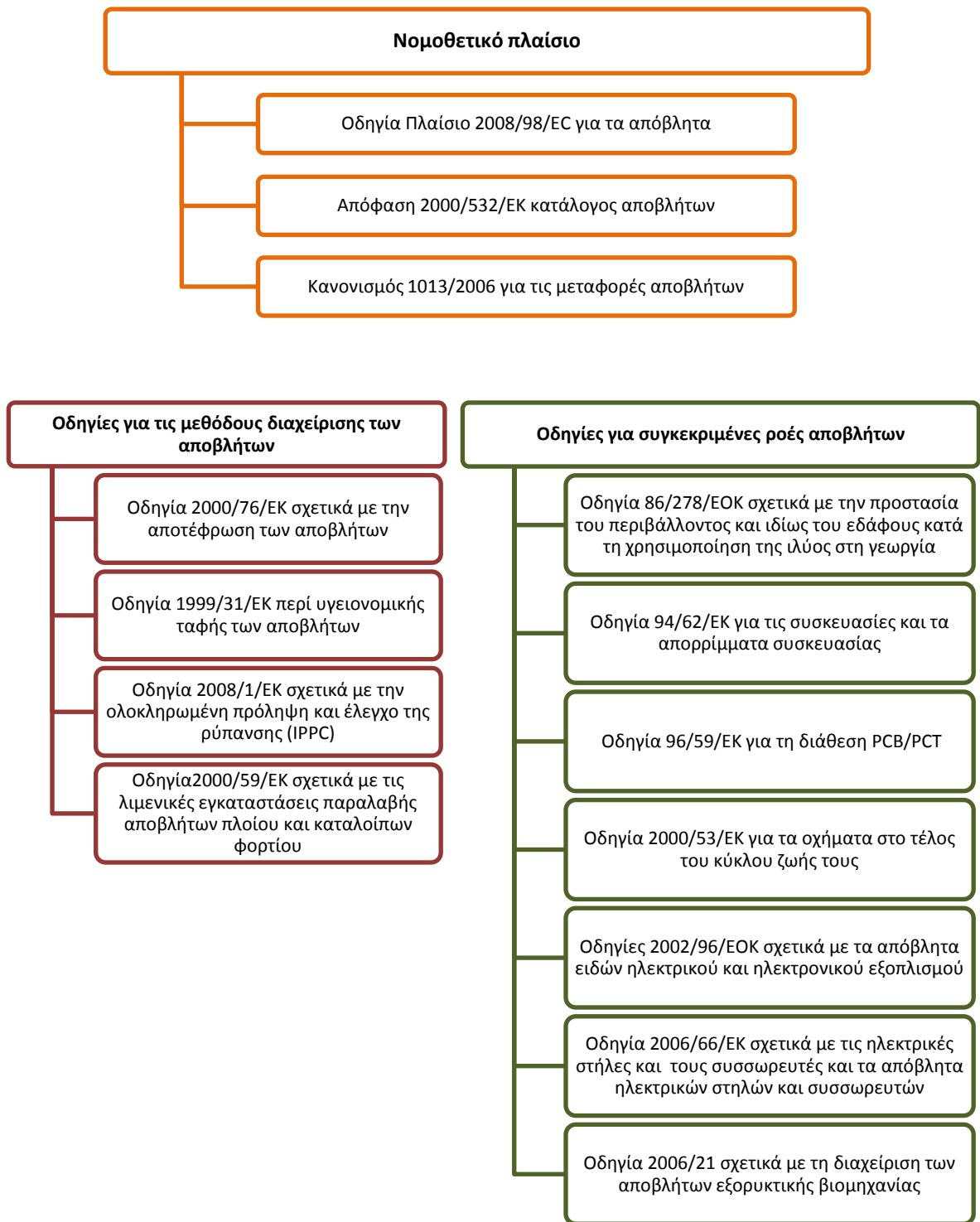
Αναφορικά με τη διαχείριση των στερεών αποβλήτων, συμπεριλαμβανομένης της ροής των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων, η πολιτική που ακολουθεί η Ε.Ε., και κατ'επέκταση τα Κράτη Μέλη, βασίζεται στην ιεράρχηση των επιλογών διαχείρισης κατά σειρά προτεραιότητας (α) την πρόληψη και μείωση της ποσότητας των παραγόμενων αποβλήτων (β) την ανάκτηση υλικών με σκοπό την επαναχρησιμοποίηση ή και την ανακύκλωσή τους (γ) την ανάκτηση ενέργειας και (δ) την ασφαλή διάθεση των υπολειμμάτων σε Χώρους Υγειονομικής Ταφής Υπολειμμάτων (ΧΥΤΥ) (Εικόνα 1.1). Ο τομέας παραγωγής και διαχείρισης των αποβλήτων εξελίσσεται με γνώμονα τη βιώσιμη ανάπτυξη και δεν θα πρέπει να είναι συνώνυμος της υποβάθμισης του περιβάλλοντος. Ο στόχος συνεπώς είναι να αποσυνδεθεί η χρησιμοποίηση των πόρων και η παραγωγή αποβλήτων από την οικονομική ανάπτυξη.



Εικόνα 1.1 Ιεράρχηση της διαχείρισης των στερεών αποβλήτων όπως αυτή προτείνεται από την Ε.Ε. (ΕΕΔΣΑ, 2008)

Για την επίτευξη των στρατηγικών σχεδίων αναφορικά με τα στερεά απόβλητα, η Ευρωπαϊκή Κοινότητα έχει θεσπίσει μια σειρά από νομοθετικές διατάξεις. Αυτές περιλαμβάνουν το βασικό νομοθετικό πλαίσιο, τη νομοθεσία για τις μεθόδους διαχείρισης των στερεών αποβλήτων καθώς και τη νομοθεσία για ειδικές κατηγορίες (ροές) αποβλήτων (Εικόνα 2.2).

Στις επόμενες παραγράφους του κεφαλαίου γίνεται περιγραφή των σημαντικότερων νομοθετικών διατάξεων σε ευρωπαϊκό και σε εθνικό επίπεδο αναφορικά με τη διαχείριση του βιοαποδομήσιμου οργανικού κλάσματος των στερεών αποβλήτων (Πίνακας 1.1). Η παρουσίαση βασίζεται στην κατεύθυνση που ορίζει η Ε.Ε. σύμφωνα με την ιεράρχηση των επιλογών για τη διαχείριση των στερεών αποβλήτων.



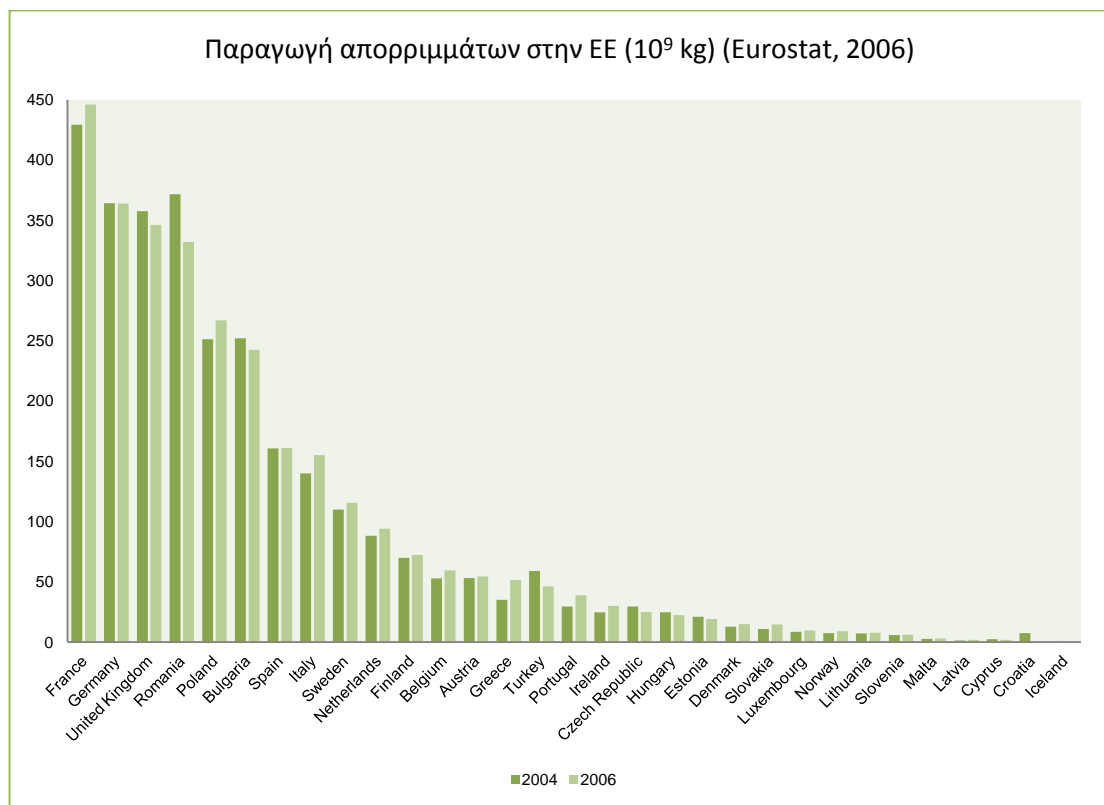
Εικόνα 1.2 Ευρωπαϊκό νομοθετικό πλαίσιο για τη διαχείριση των στερεών αποβλήτων

Πίνακας 1.1: Νομοθετικό πλαίσιο της Ε.Ε. και της Ελλάδας αναφορικά με την ιεράρχηση της διαχείρισης των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων

Ιεράρχηση διαχείρισης	Νομοθεσία Ε.Ε.	Ελληνική Νομοθεσία
Γενικό πλαίσιο διαχείρισης	Οδηγία 2008/98/ΕΚ σχετικά με τα απόβλητα και την κατάργηση ορισμένων οδηγιών	Αναμένεται η ενσωμάτωση της οδηγίας στο εθνικό δίκαιο
	Προγενέστερη - Οδηγία 2006/12/ΕΚ	ΚΥΑ 114218/1997 (ΦΕΚ Β 1016/17.11.97) «Κατάρτιση πλαισίου Προδιαγραφών και γενικών προγραμμάτων διαχείρισης στερεών αποβλήτων» ΚΥΑ 50910/2727/2003 (ΦΕΚ Β 1909/22.12.2003) «Μέτρα και Όροι για τη Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων. Εθνικός και Περιφερειακός Σχεδιασμός Διαχείρισης
Πρόληψη & Ελαχιστοποίηση	Οδηγία 2008/1/ΕΚ σχετικά με την ολοκληρωμένη πρόληψη και έλεγχο της ρύπανσης (IPPC)	Ν. 2965/2001 (ΦΕΚ 68/Α`/11.3.2005) «Βιώσιμη ανάπτυξη Αττικής και άλλες διατάξεις» Ν. 3325/2005 (ΦΕΚ 270/Α`/23.11.2001) «Ίδρυση και λειτουργία βιομηχανικών, βιοτεχνικών εγκαταστάσεων στο πλαίσιο της αειφόρου ανάπτυξης και άλλες διατάξεις» Σε μερική εναρμόνιση με την Οδηγία 96/61/ΕΟΚ προγενέστερη της Οδηγίας 2008/1/ΕΚ
Επαναχρησιμοποίηση & Ανακύκλωση	Οδηγία 86/278/ΕΟΚ σχετικά με την προστασία του περιβάλλοντος και ιδίως του εδάφους κατά τη χρησιμοποίηση της ιλύος καθαρισμού λυμάτων στη γεωργία	ΚΥΑ 80568/4225/1991 (ΦΕΚ Β 641/7.8.91) «Μέθοδοι, όροι και περιορισμοί για τη χρησιμοποίηση στη γεωργία της ιλύος που προέρχεται από την επεξεργασία οικιακών και αστικών λυμάτων»
	Κανονισμός 1774/2002/ΕΚ σχετικά με τον καθορισμό υγειονομικών κανόνων σχετικά με τα ζωικά υποπροϊόντα που δεν προορίζονται για κατανάλωση από τον άνθρωπο	ΠΔ 211/2006 (ΦΕΚ 211/Α'/5.10.2006) «Συμπληρωματικά μέτρα εκτέλεσης του Κανονισμού 1774/2002/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 3ης Οκτωβρίου 2002 για τον καθορισμό υγειονομικών κανόνων σχετικά με τα ζωικά υποπροϊόντα που δεν προορίζονται για κατανάλωση από τον άνθρωπο».
	Αποφάσεις 2006/799/ΕΚ και 2007/64/ΕΚ περί καθορισμού αναθεωρημένων οικολογικών κριτηρίων και των σχετικών απαιτήσεων αξιολόγησης και εξακρίβωσης για την απονομή κοινοτικού οικολογικού σήματος σε βελτιωτικά εδάφους και σε καλλιεργητικά μέσα αντίστοιχα	

Ανάκτηση Ενέργειας	Οδηγία 2000/76/ΕΚ σχετικά με την αποτέφρωση των αποβλήτων	ΚΥΑ 22912/1117/2005 (ΦΕΚ Β 759/06.06.2005) «Μέτρα και όροι για την πρόληψη και τον περιορισμό της ρύπανσης του περιβάλλοντος από την αποτέφρωση των αποβλήτων»
	Οδηγία 2009/28/ΕΚ σχετικά με την προώθηση της χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και την τροποποίηση και τη συνακόλουθη κατάργηση των οδηγιών 2001/77/ΕΚ και 2003/30/ΕΚ	Αναμένεται η ενσωμάτωση της οδηγίας στο εθνικό δίκαιο
Τελική Διάθεση	Οδηγία 1999/31/ΕΚ περί υγειονομικής ταφής των αποβλήτων	ΚΥΑ 29407/3508/2002 (ΦΕΚ Β 1572/16.12.02) «Μέτρα και όροι για την υγειονομική ταφή των αποβλήτων» ΚΥΑ 4641/232/2006 (ΦΕΚ Β 168/13-02-06) «Καθορισμός τεχνικών προδιαγραφών μικρών χώρων υγειονομικής ταφής αποβλήτων σε νησιά και απομονωμένους οικισμούς, κατ' εφαρμογή του άρθρου 3 (παρ.4) σε συνδυασμό με το άρθρο 20 (παράρτημα Ι) της υπ' αριθμ. 29407/3508/2002 ΚΥΑ «Μέτρα και όροι για υγειονομική ταφή των αποβλήτων» (Β' 1572)»

Η Οδηγία πλαίσιο 2008/98/ΕΚ για τη διαχείριση των αποβλήτων θεσπίστηκε πρόσφατα στοχεύοντας σε όλο τον κύκλο ζωής τους δίνοντας έμφαση στην ανάκτηση και ανακύκλωση των υλικών. Η Οδηγία πλαίσιο αποβλέπει στο συντονισμό διαχείρισης των αποβλήτων στα Κράτη Μέλη της κοινότητας ώστε να περιοριστεί η παραγωγή αυτών και να βελτιστοποιηθεί η οργάνωση στη διαχείριση και διάθεσή τους. Η Οδηγία αντικαθιστά μια σειρά σημαντικών νομοθετικών κειμένων μεταξύ άλλων την Οδηγία πλαίσιο για τα απόβλητα 2006/12/ΕΚ. Αναφορικά με το βιοαποδομήσιμο κλάσμα των στερεών αστικών αποβλήτων η Οδηγία ενθαρρύνει τη θεσμοθέτηση ενός μηχανισμού για τη θέσπιση ποιοτικών κριτηρίων για τα προϊόντα που προέρχονται από την αερόβια βιολογική επεξεργασία των αστικών οργανικών αποβλήτων⁽¹⁾. Η Οδηγία πλαίσιο 2008/98/ΕΚ αναμένεται να εναρμονιστεί άμεσα στο Ελληνικό δίκαιο, ενώ με τις διατάξεις της προγενέστερης Οδηγίας (Οδηγίας πλαισίου 2006/12/ΕΚ) η Ελληνική νομοθεσία συμμορφώνεται με την ΚΥΑ 114218/1997 «Κατάρτιση πλαισίου προδιαγραφών και γενικών προγραμμάτων διαχείρισης στερεών αποβλήτων» και την ΚΥΑ 50910/2727/2003 «Μέτρα και όροι για τη διαχείριση στερεών αποβλήτων. Εθνικός και Περιφερειακός Σχεδιασμός Διαχείρισης».



Διάγραμμα 1.1 Παραγωγή απορριμμάτων στην ΕΕ (Eurostat, 2006)

⁽¹⁾ Στην κατηγορία των στερεών αποβλήτων που συγκαταλέγονται στην Οδηγία 2008/98/ΕΚ ενδέχεται να συμπεριλαμβάνεται και η ιλύς από μονάδες επεξεργασίας λυμάτων καθότι το Ευρωπαϊκό Δικαστήριο ορίζει την ιλύ ως υπόλειμμα των αστικών λυμάτων διαφοροποιώντας τα προϊόντα που προκύπτουν από την επεξεργασία τους.

Η ΚΥΑ 114218/1997 προβλέπει την κατάρτιση πλαισίου προδιαγραφών και γενικών προγραμμάτων σχετικά με (α) τη συλλογή, προσωρινή αποθήκευση και μεταφορά των αποβλήτων, (β) τη μεταφόρτωση των στερεών αποβλήτων, (γ) το σύστημα διαλογής στην πηγή, (δ) τους ΧΥΤΑ και (ε) τις θέσεις εγκατάστασης μονάδων διαχείρισης αποβλήτων. Επιπλέον η ίδια ΚΥΑ θέτει τεχνικές προδιαγραφές κατασκευής και λειτουργίας εγκαταστάσεων μηχανικής διαλογής σε συνδυασμό με συστήματα κομποστοποίησης για την ανάκτηση του βιοαποδομήσιμου κλάσματος, ενώ ορίζει ελάχιστα ποιοτικά χαρακτηριστικά του κόμποστ από τις εγκαταστάσεις αυτές όσο και των εδαφών στα οποία ενδέχεται να γίνει χρήση του προϊόντος (π.χ. ανώτατα επιτρεπτά όρια συγκέντρωσης βαρέων μετάλλων, φυσικές και βιολογικές ιδιότητες). Τεχνικές προδιαγραφές προβλέπονται ακόμα και για τη διαχείριση της ιλύος από εγκαταστάσεις επεξεργασίας αστικών υγρών αποβλήτων στις οποίες περιλαμβάνονται η προσωρινή αποθήκευση, η συμπύκνωση, η βιολογική χώνευση, η αφυδάτωση, η σταθεροποίηση, η οξείδωση, η κομποστοποίηση⁽²⁾, η χρήση στη γεωργία, η υγειονομική ταφή και η θερμική επεξεργασία. (Μαλαμής 2011)

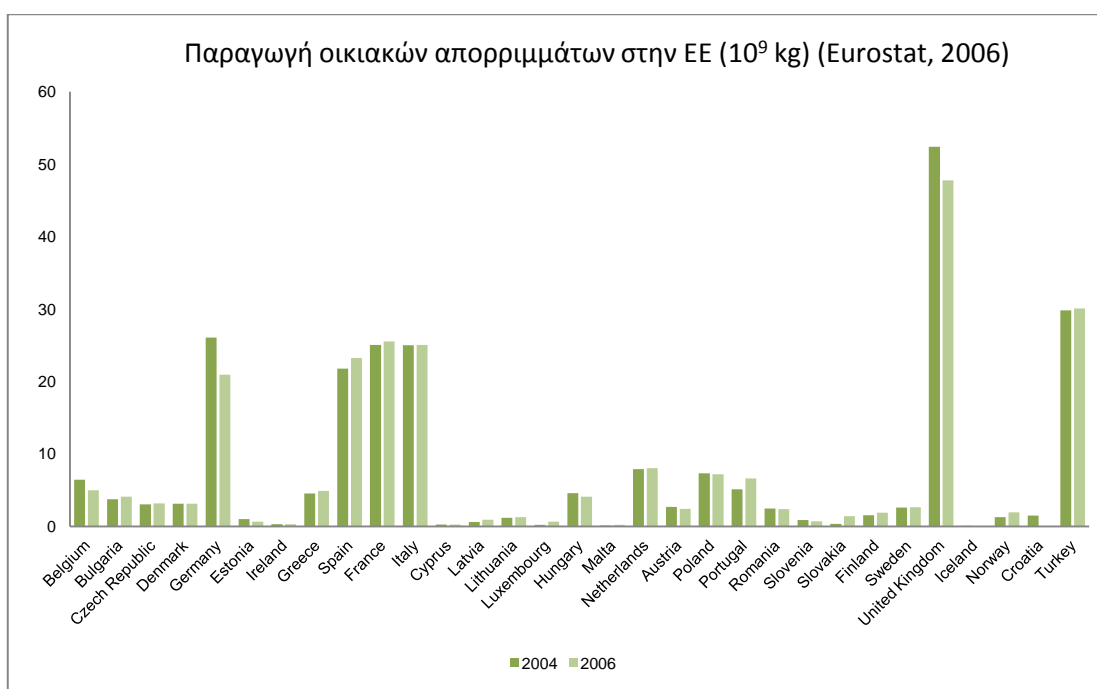
Αναφορικά με την ΚΥΑ 50910/2727/2003, προδιαγράφεται ο Εθνικός Σχεδιασμός Διαχείρισης των Στερεών Αποβλήτων (ΕΣΔΑ), ο οποίος, προβλέπει την πρόληψη – μείωση της ποσότητας, της βλαπτικότητας και της επικινδυνότητας των αποβλήτων, την αξιοποίηση των αποβλήτων με διάφορους τρόπους (ανακύκλωση, επαναχρησιμοποίηση κλπ), την περιβαλλοντικά ασφαλή διαχείριση και εν γένει την ενθάρρυνση της ολοκληρωμένης διαχείρισης και τη δημιουργία εθνικού δικτύου εγκαταστάσεων διάθεσης αποβλήτων. Ο ΕΣΔΑ εξειδικεύεται περαιτέρω με τα περιφερειακά σχέδια διαχείρισης στερεών αποβλήτων για κάθε μία από τις δεκατρείς περιφέρειες της Ελλάδας, αρμόδιο όργανο για την υλοποίηση των οποίων είναι ο εκάστοτε φορέας διαχείρισης στερεών αποβλήτων.

Για την πρόληψη και την ελαχιστοποίηση της ρύπανσης στην πηγή η Ε.Ε. εξέδωσε την Οδηγία 2008/1/ΕΚ σχετικά με την ολοκληρωμένη πρόληψη και έλεγχο της ρύπανσης (Οδηγία IPPC) η οποία ορίζει τις υποχρεώσεις που πρέπει να τηρούνται στο πλαίσιο βιομηχανικών και γεωργικών δραστηριοτήτων υψηλού δυναμικού ρύπανσης, θεσπίζει μια διαδικασία έκδοσης άδειας για τέτοιες δραστηριότητες και προσδιορίζει ελάχιστες απαιτήσεις τις οποίες πρέπει να καλύπτει κάθε άδεια, κυρίως σε ότι αφορά στην απόρριψη ουσιών που ρυπαίνουν. Στόχος είναι η αποτροπή της ρύπανσης ή η ελαχιστοποίηση των ρύπων στον αέρα, το νερό και το έδαφος, καθώς και των αποβλήτων που προέρχονται από βιομηχανικές και γεωργικές εγκαταστάσεις με σκοπό να επιτευχθεί μια υψηλής στάθμης προστασία του περιβάλλοντος. Αναφορικά με τα οργανικά απόβλητα, η Οδηγία θεσπίζει τις βασικές αρχές για την έκδοση άδειας και ελέγχου στις μονάδες βιολογικής επεξεργασίας της ροής αυτής των αποβλήτων οι οποίες έχουν δυναμικότητα επεξεργασίας μεγαλύτερη των 50 τόνων ημερησίως. Η Ελλάδα έχει προχωρήσει σε μερική εναρμόνιση με την Οδηγία 2008/1/ΕΚ με τη θέσπιση του Ν.2965/2001 και του Ν.3325/2005. (Μαλαμής 2011)

⁽²⁾ Στις διατάξεις της ΚΥΑ 114218/1997 η μόνη αναφορά στην κομποστοποίηση ιλύος γίνεται στο άρθρο 9 παράγραφο 1.6 όπου αναγράφονται τα εξής: «Συν-κομποστοποίηση ιλύος μαζί με το οργανικό μέρος των οικιακών απορριμμάτων. Αφορά την παραγωγή εδαφοβελτιωτικού με τη χρησιμοποίηση ιλύος που έχει υποστεί αφύγρανση, με ποσοστό στερεών περίπου 30% και οργανικό κλάσμα των οικιακών αποβλήτων. Το pH του μείγματος είναι συνήθως ουδέτερο ή ελαφρώς αλκαλικό. Ιδιαίτερη μέριμνα πρέπει να λαμβάνεται όσον αφορά την περιεκτικότητα των βαρέων μετάλλων στο μείγμα»

Η επαναχρησιμοποίηση και η ανακύκλωση των οργανικών αποβλήτων είναι στις υψηλότερες προτεραιότητες αναφορικά με τις επιλογές διαχείρισής τους στην Ε.Ε. Εντούτοις, δεν υπάρχουν σχετικές διατάξεις σε επίπεδο Ε.Ε. οι οποίες να συμπεριλαμβάνουν όλες τις ροές των οργανικών αποβλήτων για την επαναχρησιμοποίηση και/ή την ανακύκλωσή τους. Η Ε.Ε. έχει θεσπίσει νομοθετικές διατάξεις ή είναι σε στάδιο για τη θέσπισή τους, για συγκεκριμένες ροές οργανικών αποβλήτων όπως είναι η ιλύς από μονάδες επεξεργασίας λυμάτων, τα ζωικά υποπροϊόντα και το οργανικό κλάσμα των αστικών στερεών αποβλήτων. Η Οδηγία 86/278/ΕΟΚ ρυθμίζει τη χρήση της ιλύος από μονάδες επεξεργασίας λυμάτων στη γεωργία ώστε να προλαμβάνονται οι επιζήμιες επιπτώσεις στο έδαφος, τη βλάστηση, τα ζώα και τον άνθρωπο. Αποσκοπεί επομένως στην ενθάρρυνση της ορθής επαναχρησιμοποίησης της ιλύος στη γεωργία αντιμετωπίζοντας κυρίως τα θέματα των οριακών τιμών για τα βαρέα μέταλλα στο έδαφος και την ιλύ, την επεξεργασία της ιλύος, τις προϋποθέσεις χρήσης της στη γεωργία, τη δειγματοληπτική ανάλυση εδαφών και ιλύος και την τήρηση μητρώων για την παραγωγή και τη χρησιμοποίηση της ιλύος στη γεωργία. Επιπλέον σε στάδιο διαβούλευσης είναι η ανανέωση της Οδηγίας με την κατάθεση πρότασης για την αναθεώρησή της. Εναρμόνιση με τις κείμενες διατάξεις της Οδηγίας στο εθνικό δίκαιο έγινε με την ΚΥΑ 80568/4225/91 και συνιστά το βασικότερο κανόνα ρύθμισης των θεμάτων που αναφέρονται στη γεωργική χρησιμοποίηση ιλύος. Αναφορικά με την κατηγορία των ζωικών υπολειμμάτων τα οποία δεν προορίζονται για κατανάλωση από τον άνθρωπο (συμπεριλαμβανομένης της κοπριάς), ο Κανονισμός 1774/2002/ΕΚ μεταξύ άλλων καθορίζει τους σχετικούς κανόνες για την αναερόβια και αερόβια επεξεργασία των ζωικών υποπροϊόντων που δύναται να επεξεργαστούν βιολογικά. Προς συμμόρφωση με τον ανωτέρω κανονισμό το Προεδρικό Διάταγμα 211/2006 απαιτεί από τους παραγωγούς, τις επιχειρήσεις και όλες τις δραστηριότητες που σχετίζονται με τα ζωικά υποπροϊόντα να πληρούν τις απαιτήσεις του Κανονισμού 1774/2002/ΕΚ. Αξίζει να σημειωθεί ότι επί του παρόντος στην Ε.Ε. υφίστανται προδιαγραφές, σε εθελοντικό επίπεδο, για την επεξεργασία συγκεκριμένων ροών βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων όπως αυτές ορίζονται από τις Αποφάσεις 2006/799/ΕΚ και 2007/742/ΕΚ περί καθορισμού αναθεωρημένων οικολογικών κριτηρίων και των σχετικών απαιτήσεων αξιολόγησης και εξακρίβωσης για την απονομή κοινοτικού οικολογικού σήματος σε βελτιωτικά εδάφους και καλλιεργητικά μέσα αντίστοιχα γνωστά ως «eco-label». Τα κριτήρια αυτά έχουν ως σκοπό την προώθηση της επαναχρησιμοποίησης των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων, τα οποία έχουν υποστεί κατάλληλη επεξεργασία, συμβάλλοντας στην εκτροπή τους από τους ΧΥΤΑ. Επιπλέον ως προς τα βιοαπορρίμματα ή βιολογικά απόβλητα (biowaste)⁽³⁾ η Ε.Ε. έχει συντάξει κείμενα εργασίας για τη βιολογική διαχείριση τους (ΕΚ, 2001), ενώ σε στάδιο διαβούλευσης είναι η θέσπιση νομοθετικών μέτρων για την υποχρέωση της αύξησης των ποσοστών ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησής τους στα Κράτη Μέλη (Μαλαμής 2011)).

⁽³⁾ Σύμφωνα με τον ορισμό της αναθεωρημένης Οδηγίας Πλαίσιο 2008/98/ΕΚ σχετικά με τα απόβλητα, ως «βιολογικά απόβλητα» ή «βιοαπορρίμματα» ορίζονται τα απόβλητα από κήπους και πάρκα, τα απορρίμματα τροφών και μαγειρείων από σπίτια, εστιατόρια, εγκαταστάσεις ομαδικής εστίασης και χώρους πωλήσεων λιανικής και τα συναφή απόβλητα από εγκαταστάσεις μεταποίησης τροφίμων. Ο ορισμός αυτός δεν καλύπτει τα βασικά γεωργικά κατάλοιπα και δεν πρέπει να συγχέεται με τη γενικότερη έκφραση «βιοαποδομήσιμα απόβλητα» που περιλαμβάνει επίσης και άλλα βιοαποδομήσιμα υλικά όπως το ξύλο, το χαρτί, το χαρτόνι και η ιλύς από μονάδες επεξεργασίας λυμάτων.



Διάγραμμα 1.2 Παραγωγή οικιακών απορριμμάτων στην ΕΕ (Eurostat, 2006)

Εκτός από την ανάκτηση και επαναχρησιμοποίηση του οργανικού κλάσματος των αποβλήτων η Ε.Ε. με τις Οδηγίες 2000/76/ΕΚ και 2009/28/ΕΚ προβλέπει και τη δυνατότητα καύσης τους με ή χωρίς την ενεργειακή αξιοποίησή τους. Με την Οδηγία 2000/76/ΕΚ λαμβάνονται μέτρα για την πρόληψη ή τον περιορισμό, στο μέτρο του δυνατού, της ρύπανσης του αέρα, του νερού και του εδάφους, η οποία προέρχεται από την αποτέφρωση και τη συνδυασμένη αποτέφρωση αποβλήτων (συμπεριλαμβανομένων των βιοαποδομήσιμων⁽⁴⁾), καθώς και των συνεπαγόμενων κινδύνων για την υγεία του ανθρώπου. Με την Οδηγία 2009/28/ΕΚ προβλέπεται η προώθηση της χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές μεταξύ άλλων στοχεύοντας στη χρησιμοποίηση βιομάζας προερχόμενη από βιοαποδομήσιμα στερεά απόβλητα (π.χ. γεωργικά και δασικά υπολείμματα) για την παραγωγή ενέργειας. Η Ελλάδα έχει εναρμονιστεί με τις διατάξεις της Οδηγίας 2000/76/ΕΚ με την Υ.Α. 22912/1117/2005 «Μέτρα και όροι για την πρόληψη και τον περιορισμό της ρύπανσης του περιβάλλοντος από την αποτέφρωση των αποβλήτων» ενώ αναμένεται η ενσωμάτωση στο εθνικό δίκαιο της Οδηγίας 2009/28/ΕΚ.

Σύμφωνα με την ιεράρχηση της διαχείρισης των στερεών αποβλήτων ως τελευταία επιλογή διαχείρισης αποτελεί η ασφαλής διάθεσή τους. Το σημαντικότερο νομοθετικό βήμα αναφορικά με την υγειονομική ταφή των αποβλήτων αποτελεί η Οδηγία 1999/31/ΕΚ. Η Οδηγία ρυθμίζει την υγειονομική ταφή των αποβλήτων, ώστε να προλαμβάνονται ή να μειώνονται, κατά το δυνατόν, οι αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και στην ανθρώπινη υγεία. Προς αυτή την κατεύθυνση η Οδηγία περιλαμβάνει διατάξεις για τα επιτρεπόμενα ή τα απαγορευμένα απόβλητα και τις αντίστοιχες μεθόδους επεξεργασίας στους χώρους υγειονομικής ταφής και καθορίζει τις προϋποθέσεις χορήγησης αδειών λειτουργίας, κλεισίματος και εν συνεχεία μέριμνας για τους χώρους υγειονομικής ταφής. Επίσης, η Οδηγία επιβάλλει τη σταδιακή μείωση της

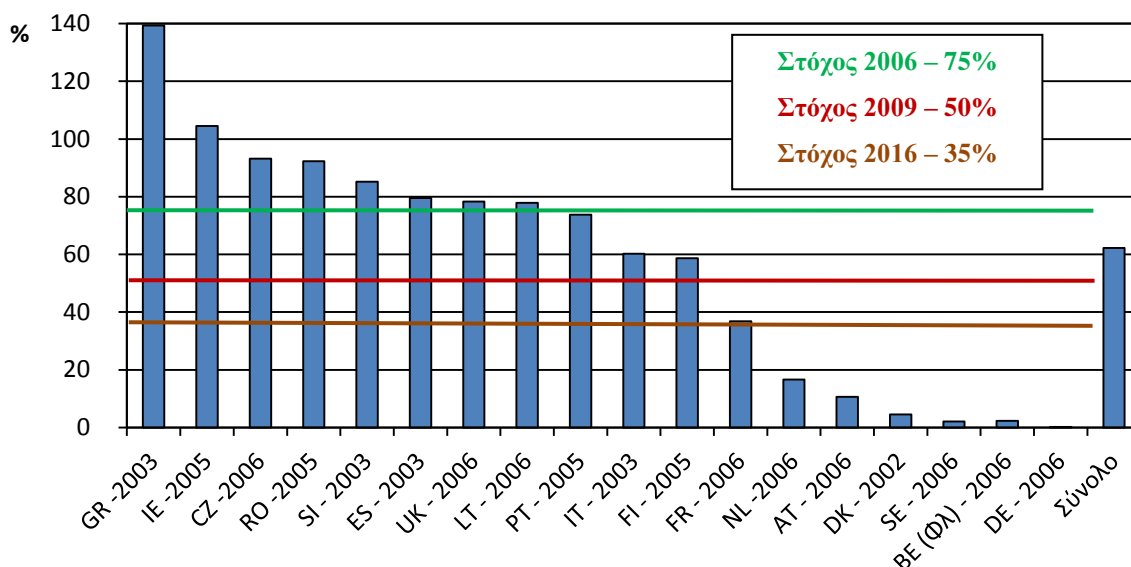
⁽⁴⁾ Εξαιρούνται τα φυτικά απόβλητα της γεωργίας και της δασοκομίας

ποσότητας των βιοαποδομήσιμων αστικών αποβλήτων⁽⁵⁾ που καταλήγουν στους χώρους υγειονομικής ταφής ώστε να μειωθούν οι εκπομπές μεθανίου, σε συνδυασμό με τεχνικές απαιτήσεις για τη δέσμευση και επεξεργασία των εκπεμπόμενων αερίων. Αξίζει να αναφερθεί ότι για τα Κράτη Μέλη που διοχέτευσαν σε χώρους υγειονομικής ταφής ποσότητες βιοαποδομήσιμων αποβλήτων που υπερβαίνουν το 80% των αστικών στερεών αποβλήτων το 1995, δύνανται να αναβάλλουν την επίτευξη καθενός των στόχων κατά τέσσερα έτη κατά μέγιστο όριο. Ανάμεσα σε αυτά τα κράτη περιλαμβάνεται και η Ελλάδα. Η ΚΥΑ 29407/3508/2002 αποτελεί το εθνικό νομοθετικό πλαίσιο για τη θέσπιση μέτρων και όρων για την υγειονομική ταφή των απορριμμάτων και η οποία αποσκοπεί στην εναρμόνιση με τα προβλεπόμενα διατάγματα της Οδηγίας 1999/31/ΕΚ. Μεταξύ των διατάξεων της ΚΥΑ προβλέπεται η σταδιακή εκτροπή του βιοαποδομήσιμου κλάσματος των αστικών αποβλήτων που προορίζονται για τους ΧΥΤΑ κατά 75, 50 και 35% wb μέχρι το 2010, 2013 και 2020 αντίστοιχα, με βάση τη συνολική ποσότητα βιοαποδομήσιμων αστικών αποβλήτων που είχαν παραχθεί το 1995. Η επίτευξη των παραπάνω στόχων προϋποθέτει τη δρομολόγηση ολοκληρωμένων συστημάτων διαχείρισης στερεών αποβλήτων, τα οποία θα εκτρέπουν σημαντικές ποσότητες του βιοαποδομήσιμου οργανικού κλάσματος από τους ΧΥΤΑ καθώς και την καθιέρωση εργαλείων που θα αποτρέπουν την ταφή τους. Επιπλέον με την ΚΥΑ 4641/232/2006 καθορίζονται οι τεχνικές προδιαγραφές μικρών ΧΥΤΑ σε νησιά καθώς και σε απομονωμένους οικισμούς. Αξίζει να σημειωθεί ότι σύμφωνα με τα όσα ορίζουν τα παραπάνω νομοθετικά κείμενα δεν επιτρέπεται η διάθεση αποβλήτων σε ΧΥΤΑ τα οποία προηγουμένως δεν έχουν υποστεί επεξεργασία. Σύμφωνα με την ΚΥΑ 29407/3508/2002, ως επεξεργασία ορίζονται οι φυσικές, θερμικές, χημικές ή βιολογικές διεργασίες, συμπεριλαμβανομένης της διαλογής, που μεταβάλλουν τα χαρακτηριστικά των αποβλήτων, προκειμένου να περιοριστούν ο όγκος ή οι επικίνδυνες ιδιότητές τους, να διευκολυνθεί η διακίνησή τους ή να βελτιωθεί η ανάκτηση χρήσιμων υλών. (Μαλαμής 2011)

Η πρακτική εφαρμογή της Οδηγίας για την υγειονομική ταφή των αποβλήτων εξακολουθεί να μην είναι ικανοποιητική στα Κράτη Μέλη της Ε.Ε. όπως παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 1.3 με το συνολικό ποσοστό βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων να ξεπερνά το 60% wb σε επίπεδο Ε.Ε. για το έτος 2009. Πλέον μιας δεκαετίας μετά την έκδοση της οδηγίας, ορισμένα Κράτη Μέλη δεν έχουν κοινοποιήσει τη μεταφορά της στην εθνική νομοθεσία και την εφαρμογή του συνόλου των διατάξεών της, ενώ η Επιτροπή εξακολουθεί να κινεί σε πολλές περιπτώσεις διαδικασίες επί παραβάσει κατά Κρατών Μελών για πλημμελή μεταφορά ή εφαρμογή της εν λόγω νομοθεσίας. Επί του παρόντος αρκετά Κράτη Μέλη εξακολουθούν να υφίστανται γενικευμένες και σημαντικές ανεπάρκειες όσον αφορά στην εφαρμογή της σχετικής νομοθεσίας.

Στην Ε.Ε. έχει διαπιστωθεί η ανάγκη και η σημαντικότητα για τη χάραξη κοινής πολιτικής στα Κράτη Μέλη για τη διαχείριση του βιοαποδομήσιμου οργανικού κλάσματος των αποβλήτων. Προς αυτή την κατεύθυνση βαδίζει η Ε.Ε. με τη σύνταξη της Πράσινης Βίβλου (COM(2008) 811 τελικό) με την προοπτική διαμόρφωσης νομοθετικού διατάγματος σχετικά με τη διαχείριση των βιοαπορριμμάτων.

⁽⁵⁾ Η εκτροπή του βιοαποδομήσιμου οργανικού φορτίου από τους ΧΥΤΑ αναφέρεται μόνο για το οργανικό κλάσμα των αστικών αποβλήτων και όχι για όλες τις ροές των οργανικών αποβλήτων.



Διάγραμμα 1.3: Ποσοστό διάθεσης βιοαποδομήσιμων αστικών αποβλήτων σε ΧΥΤΑ στις χώρες της Ε.Ε. με βάση τη συνολική ποσότητα που είχαν παραχθεί το 1995 (ΕΚ, 2006)

Σκοπός της Πράσινης Βίβλου είναι να διερευνηθούν λύσεις για την περαιτέρω ανάπτυξη της διαχείρισης των βιοαπορριμμάτων. Μεταξύ των λύσεων που προτείνονται για τη διαχείριση τους, πέραν της πρόληψης, είναι η διαλογή (στην πηγή ή στα σύμμικτα), η αναερόβια ζύμωση και η κομποστοποίηση, η αποτέφρωση και η υγειονομική ταφή. Παράλληλα τονίζεται ότι τα περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη των διαφόρων μεθόδων επεξεργασίας εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις κατά τόπους συνθήκες, όπως είναι η πυκνότητα πληθυσμού, οι υποδομές και το κλίμα, καθώς και από τις αγορές των αντίστοιχων προϊόντων (π.χ. ενέργεια, προϊόντα κομποστοποίησης). Η Ε.Ε. προκειμένου να υποστηρίξει τα Κράτη Μέλη στις μελλοντικές νομοθετικές υποχρεώσεις τους θα παρέχει τα κριτήρια, με βάση τα οποία θα γίνει η προώθηση για την αναγνώριση της βέλτιστης περιβαλλοντικά επιλογής αναφορικά με τη διαχείριση των αστικών οργανικών αποβλήτων. Είναι επομένως εμφανής η ιδιαίτερη βαρύτητα που δίνεται στη βιολογική επεξεργασία των οργανικών αποβλήτων με έμφαση στην κομποστοποίηση και τον καθορισμό ελάχιστων απαιτήσεων διαχείρισης καθώς και ποιοτικών κριτηρίων προκειμένου να εξασφαλιστεί υψηλό επίπεδο προστασίας της ανθρώπινης υγείας και του περιβάλλοντος. (Μαλαμής 2011)

1.4 Οργανικό κλάσμα αστικών στερεών αποβλήτων

Ως Αστικά Στερεά Απόβλητα (ΑΣΑ) ορίζονται όλα τα απόβλητα τα οποία συλλέγονται από τους δήμους και τις κοινότητες. Συνεπώς, στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται τα οικιακά απόβλητα, καθώς και άλλα απόβλητα τα οποία λόγω της φύσης ή της σύνθεσής τους είναι παρόμοια με τα οικιακά όπως απόβλητα από εμπορικές και συναφείς δραστηριότητες, κτίρια γραφείων και ιδρύματα (σχολεία, νοσοκομεία, κυβερνητικά κτίρια) (Οδηγία 1999/31/ΕΚ). Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται επίσης ογκώδη απόβλητα (στρώματα, έπιπλα κ.α.) και απόβλητα κήπων, φύλλα, κλαδιά, κηπευτικά, καθώς και απόβλητα από καθαρισμό δρόμων (ΕΕΑ, 2003). Η ροή αυτή των οργανικών αποβλήτων εμπίπτει στα κεφάλαια 200108 και 200201 του ΕΚΑ. Η παραγωγή ΑΣΑ

διαφοροποιείται μεταξύ των χωρών ενώ σημαντικές διακυμάνσεις παρουσιάζονται τόσο μεταξύ των διαφορετικών πηγών παραγωγής αποβλήτων όσο και με βάση το πληθυσμιακό εύρος. Ενδεικτικές μέσες τιμές παραγωγής ΑΣΑ διεθνώς παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.2 και στο Διάγραμμα 1.2 ενώ ο ρυθμός παραγωγής ΑΣΑ ανά κλάδο και πληθυσμιακό εύρος απεικονίζονται στους Πίνακες 1.3 και 1.4.

Πίνακας 1.2: Μέση κατά κεφαλήν παραγωγή ΑΣΑ (USEPA, 2007; IPCC, 2006)

Περιοχή	Παραγωγή ΑΣΑ (kg wb cap ⁻¹ yr ⁻¹)
Ασία	
Ανατολική Ασία	370
Νοτιο-Κεντρική Ασία	210
Νοτιο-Ανατολική Ασία	270
Αφρική ⁽¹⁾	290
Ευρώπη	
Ανατολική Ευρώπη	380
Βόρεια Ευρώπη	640
Νότια Ευρώπη	520
Δυτική Ευρώπη	560
Ελλάδα ⁽²⁾	453
Αμερική	
Καραϊβική	490
Κεντρική Αμερική	210
Νότια Αμερική	260
Βόρεια Αμερική	650
ΗΠΑ	764
Ωκεανία ⁽³⁾	690

⁽¹⁾ Μέση τιμή της Αφρική καθώς δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα για επιμέρους περιοχές της ηπείρου

⁽²⁾ ΚΥΑ 50910/2727/2003 (ΦΕΚ Β 1909/22.12.2003) «Μέτρα και Όροι για τη Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων. Εθνικός και Περιφερειακός Σχεδιασμός Διαχείρισης»

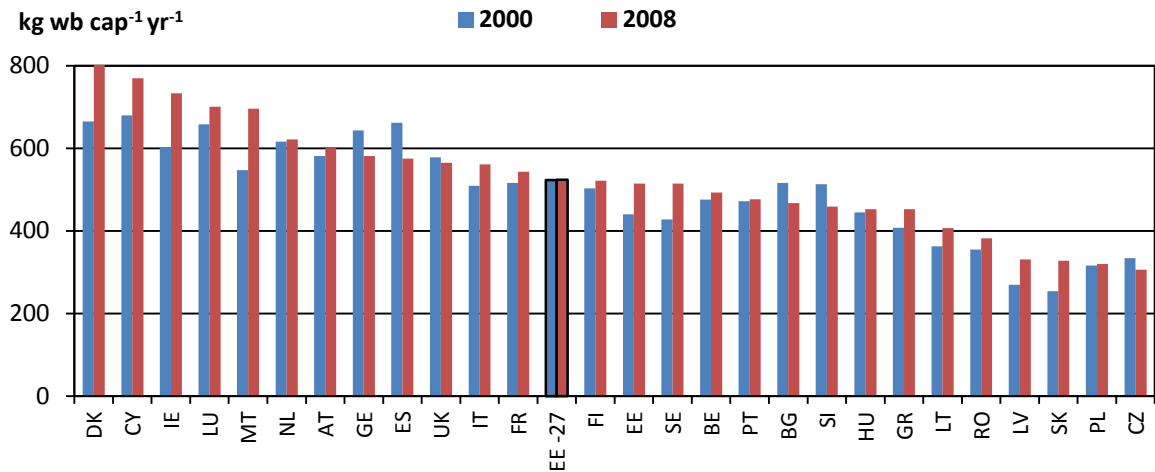
⁽³⁾ Σύμφωνα με τα δεδομένα από Αυστραλία και Νέα Ζηλανδία

Πίνακας 1.3: Μέση παραγωγή ΑΣΑ με βάση το πληθυσμιακό εύρος (Pichtel, 2005)

Πληθυσμός	Μέση Παραγωγή ΑΣΑ (kg dm cap ⁻¹ yr ⁻¹)
<2500	332
2500-10000	445
10000-30000	529
>30000	595

Πίνακας 1.4: Μέση παραγωγή ΑΣΑ με βάση την προερχόμενη πηγή (Pichtel, 2005)

Πηγή Παραγωγής ΑΣΑ	Μέση Παραγωγή ΑΣΑ	Μονάδες
Οικογενειακή κατοικία	445	kg wb capita ⁻¹ yr ⁻¹
Διαμέρισμα	413	kg wb capita ⁻¹ yr ⁻¹
Γραφεία	398	kg wb employee ⁻¹ yr ⁻¹
Επιχειρήσεις παροχής φαγητού και ποτού,	2471	kg wb employee ⁻¹ yr ⁻¹
Εμπόριο χονδρικής και λιανικής	0.009	kg wb (US dollar) ⁻¹
Εστιατόρια	0.015	kg wb (US dollar) ⁻¹
Εκπαιδευτικά ιδρύματα	84	kg wb student ⁻¹ yr ⁻¹



Διάγραμμα 1.2: Μέση κατά κεφαλήν παραγωγή ΑΣΑ στα Κράτη Μέλη της Ε.Ε. (Eurostat, 2010)

Τα ΑΣΑ περιέχουν διαφορετικές ροές υλικών όπως τα ζυμώσιμα, το χαρτί, το ξύλο, τα υφάσματα, τα πλαστικά, τα μέταλλα, το γυαλί κ.α. Η ποσοστιαία σύνθεση των παραπάνω ροών εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους όπως οι συνθήκες ζωής του πληθυσμού, το βιοτικό επίπεδο, οι καταναλωτικές συνήθειες καθώς και το επίπεδο της τεχνολογικής προόδου της εκάστοτε χώρας (Cheremisinoff, 2003).

Το μεγαλύτερο μέρος, σε ποσοστό, της σύστασης των ΑΣΑ αποτελείται από βιοαποδομήσιμα στερεά απόβλητα. Ανάλογα με τις μεθόδους διαχείρισης που εφαρμόζονται στην εκάστοτε χώρα και περιοχή το βιοαποδομήσιμο οργανικό κλάσμα των ΑΣΑ υπόκειται σε διαχωρισμό στην πηγή ή/και σε διαχωρισμό από τα σύμμικτα αστικά απόβλητα. Στην τελευταία περίπτωση τα χαρακτηριστικά του οργανικού κλάσματος διαφοροποιείται παρουσιάζοντας υψηλότερα επίπεδα σε προσμίξεις αδρανών (π.χ. πλαστικά, γυαλί, πέτρες) και υψηλότερες συγκεντρώσεις σε βαρέα μέταλλα και οργανικούς ρυπαντές (JCS, 2005). Επιπλέον, στον Πίνακα 1.5 παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές των φυσικοχημικών ιδιοτήτων των ΑΣΑ συμπεριλαμβανομένων των βιοαποδομήσιμων οργανικών ροών. Ταυτόχρονα, στον Πίνακα 1.6 παρατίθεται η στοιχειακή ανάλυση των οργανικών και ανόργανων αποβλήτων των ΑΣΑ που προέρχονται από οικιακά απόβλητα.

Πίνακας 1.5: Ιδιότητες συγκεκριμένων βιοαποδομήσιμων ροών των ΑΣΑ (Pichtel, 2005)

Παράμετρος	Εφημερίδες	Χαρτιά Γραφείου	Πράσινα απορρίμματα	Τροφικά Υπολείμματα
K (%)	0.35	0.29	2.27	4.18
Ca (%)	0.01	0.10	0.42	0.43
Mg (%)	0.02	0.04	0.21	0.16
NH ₄ -N (mg kg ⁻¹)	4	61	149	205
NO ₃ -N (mg kg ⁻¹)	4	218	490	4278
SO ₄ -S (mg kg ⁻¹)	159	324	882	855
P (mg kg ⁻¹)	44	295	3500	4900
B (mg kg ⁻¹)	14	28	88	17
Zn (mg kg ⁻¹)	22	177	20	21
Mn (mg kg ⁻¹)	49	15	56	20
Fe (mg kg ⁻¹)	57	396	451	48
Cu (mg kg ⁻¹)	12	14	7.7	6.9
Ni (mg kg ⁻¹)	-	-	9.0	4.5

Πίνακας 1.6: Στοιχειακή ανάλυση των συστατικών των ΑΣΑ (% dm) (Williams, 2005; Pichtel, 2005)

Είδος Αποβλήτου		C	H	O	N	S
Οργανικά	Τροφικά Υπολείμματα					
	Λαχανικά	49.06	6.62	37.55	1.68	0.20
	Μαγειρεμένο κρέας	59.59	9.47	2.65	1.02	0.19
	Τηγανητά λίπη	73.14	11.54	14.82	0.43	0.07
	Πράσινα Απορρίμματα					
	Γρασίδι	46.18	5.96	36.43	4.46	0.42
	Φύλλα	52.15	6.11	30.34	6.99	0.16
	Κορμοί	50.12	6.40	42.26	0.14	0.08
	Αειθαλής θάμνος	48.51	6.54	40.44	1.71	0.19
	Λουλούδια	46.65	6.61	40.18	1.21	0.26
	Ξύλο και φλοιός	50.46	5.97	42.37	0.15	0.05
	Χαρτί και προϊόντα					
	Ανάμικτο χαρτί	43.41	5.82	44.32	0.25	0.20
	Εφημερίδες	49.14	6.10	43.03	0.05	0.16
	Χαρτόνι συσκευασίας	43.73	5.70	44.93	0.09	0.21
	Άχρηστη αλληλογραφία	37.87	5.41	42.74	0.17	0.09
	Πλαστικά	60.00	7.20	22.80	-	-
	Υφασμα	55.00	6.60	31.20	4.60	0.15
	Ελαστικά-λάστιχα	78.00	10.00	-	2.00	-
Ανόργανα	Γυαλί	0.5	0.1	0.4	<0.1	-
	Μέταλλα	4.5	0.6	4.3	<0.1	-
Αστικά Στερεά Απόβλητα		15-30	2-5	12-24	0.2-1.0	0.02-0.1

1.5 Προδιαγραφές Ποιότητας Κόμποστ στην ΕΕ και Διεθνώς

Οι προδιαγραφές ποιότητας του κόμποστ διαφοροποιούνται από κράτος σε κράτος. Για αυτόν τον λόγο θεωρήθηκε σωστό να παρουσιάσουμε και να εξετάσουμε ποικίλα καθιερωμένα και δημοσιευμένα πρότυπα βασισμένα σε τρεις κύριες κατηγορίες που θεωρούνται θεμελιώδεις για το χαρακτηρισμό της ποιότητας. Αυτές οι κατηγορίες περιλαμβάνουν τη συγκέντρωση βαρέων μετάλλων, την συγκέντρωση επίμονων οργανικών ρύπων, το περιεχόμενο σε παθογόνους μικροοργανισμούς και το επίπεδο ωρίμανσης/σταθεροποίησης του κόμποστ.

1.5.1 Πρότυπα για τα βαρέα μέταλλα

Μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους στην απόθεση του κόμποστ είναι η παρουσία υψηλών συγκεντρώσεων σε βαρέα μέταλλα καθότι αυτά μπορεί να επηρεάσουν την ανάπτυξη των φυτών, τα χαρακτηριστικά του εδάφους και την ανθρώπινη υγεία. Σύμφωνα με το υπάρχον νομικό οι ακόλουθοι ρύποι θεωρούνται ως πιθανά τοξικά στοιχεία :

- Αρσενικό (As)
- Κάδμιο (Cd)
- Χρώμιο (Cr)
- Χαλκός (Cu)
- Υδράργυρος (Hg)
- Νικέλιο (Ni)
- Μόλυβδος (Pb)
- Ψευδάργυρος (Zn)

Πίνακας 1.7 Ο διαχωρισμός με βάση την ποιότητα του παραγόμενου κόμποστ στα κράτη μέλη της ΕΕ και διεθνώς

	Number of Classes	Description of Classes
Austria	Three	Class A+ (top quality, limit values taken from Council Regulation (EEC) No.2092/91 on organic farming) Class A (high quality, suitable for use in agriculture) Class B (minimum quality, suitable for non-agricultural use).
Belgium Flanders	One (Ministry of Agriculture) Three (VLACO, voluntary)	Biocompost (compost from source-separated biowaste) Humotex (compost from aerobically composted digestion residuals) Green waste (compost from source-separated garden waste).

		Source separated biowaste and green waste.
Brussels	One	Source-separated biowaste and green waste.
Denmark	One	Product standard.
Finland	One	Product standard.
France	One (N FU 44 051) Two (Compost Urbain)	Two (Compost Urbain – standards with same limit values for heavy metals and different standards for physical contaminants Class A and B) voluntary marketing standards.
Germany	Two	Two classes defined with respect to heavy metals.
Greece	One	Only mixed waste composting.
Italy	One set of limit values Two categories of soil improver	composted green soil improver (ammendante compostato verde, compost only from vegetable waste), and composted mixed soil improver (ammendante compostato misto compost from vegetable waste, plus sewage sludge and/or food leftovers, etc.) (differentiated by organic carbon content, C/N ration and humic /fulvic acid content).
Luxembourg	Two	As German RAL standard also differentiation between fresh and mature compost.
Netherlands	Two	Limit values distinguish between very good compost and good compost (through heavy metals).
Portugal	One standard 'assumed' (no law)	Through heavy metals.
Spain	One in Spain Two in Catalunya	Catalunya classes defined through reference to heavy metals.
Sweden	One	Product standard.
UK Composting Association	One	Product standard.
Australia	One class of PTE limits Four classes	Four different products defined through the various limit values in the standard. These four products are divided into the two classes, 'composted product' and 'pasteurised product',

		each of which contains two sub-classes, 'soil conditioners and fine mulch', and 'mulch'.
New Zealand	One	Product standard.
Canada	Canadian Food Inspection Agency (AAFC): 1 class	The AAFC recognises only one class of compost, reflective of product safety criteria. It is based on the limits of CCME's Category B and BNQ's Type B compost for trace elements. It reflects the requirements for product maturity, absence of pathogen content and the limits on the presence of sharp objects as part of the foreign matter criteria.
	Canadian Council of Ministers of the Environment: 2 classes (A, B)	Within the CCME Guideline, two compost categories have been established (Category A; and Category B). The difference between the two categories reflects limits set for trace element concentrations. Category A compost may be used for all types of applications: on agricultural lands, in residential gardens, in horticultural operations, in nurseries or other enterprises. Category A criteria for trace elements are achievable using source-separated municipal solid waste feedstock. Category B compost has restricted use. The controls established for its use are determined by each province or territory individually.

	Bureau de normalisation du Quebec: 3 classes (AA, A, B)	Under the BNQ Standard, compost may be classified in three ways (Type AA; Type A; and Type B). The requirements for Type B compost are considered to be the minimum necessary to obtain a good compost. Compost classified as Types AA and A is of higher quality. Total organic matter content and foreign matter content are the distinguishing factors between the three types. Trace element content is the classification feature that differentiates Type AA and Type A compost from that of Type B compost.
USA	One	Product standard (biosolids).

Μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους στην απόθεση του κόμποστ είναι η παρουσία υψηλών συγκεντρώσεων σε βαρέα μέταλλα καθότι αυτά μπορεί να επηρεάσουν την ανάπτυξη των φυτών, τα Οι προδιαγραφές ποιότητας του κόμποστ ποικίλουν ευρύτατα από χώρα σε χώρα, ακόμη και μέσα στην ΕΕ, τόσο όσον αφορά στη φιλοσοφία τους όσο και στις παραμέτρους που προσδιορίζονται, τα θεσμοθετημένα όριά τους και τα συστήματα πιστοποίησης.

Ο γενικός στόχος που είναι κοινός σε όλες τις προδιαγραφές είναι η προστασία του εδάφους, ειδικά των γεωργικών εδαφών, κυρίως από τα βαρέα μέταλλα (Potential toxic elements, PTEs) (Πίνακας 1.8-1.9). Πιο πρόσφατα έχει δημιουργηθεί ενδιαφέρον για τις οργανικές τοξικές ενώσεις (Organic Pollutants, OPs) που πιθανόν να υπάρχουν στο κόμποστ (PCBs, PAHs, NPE, phthalates κ.ά.) και παρά τις αναλυτικές δυσκολίες που παρουσιάζουν έχουν αρχίσει να εμφανίζονται όλο και συχνότερα στις νομοθεσίες (Πίνακας 1.9).

Πίνακας 1.8 Όρια βαρέων μετάλλων για τα ευρωπαϊκά πρότυπα κόμποστ (mg/kg ξηρής ύλης εκτός από όπου δηλώνεται) [10]

Country	Regulation	Cd	Cr tot	CrVI	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	As
Austria	Class A+	0.7	70	–	70	0.4	25	45	200	–
	Class A	1	70	–	150	0.7	60	120	500	–
	Class B	3	250	–	500	3	100	200	1800	–
Belgium	Royal Decree, 07.01.1998	1.5	70	–	90	1	20	120	300	–
Denmark	Statutory Order Nr.49	0.8	–	–	1000	0.8	30	120/60	4000	25
	Compost after 01.06.2000									
Finland	Decisions of the Ministry of Agriculture and Forestry (46/94)	3	–	–	600	2	100	150	1500	50
France	NF COMPOST URBAN	3				8	200	800		
Germany	RAL	1.5	100	–	100	1	50	150	400	–
	Class I	1	70	–	70	0.7	35	100	300	–
	Class II	1.5	100	–	100	1	50	150	400	–
Greece		10	510	10	500	5	200	500	2000	15
Ireland	Licensing of treatment plants as agreed with EPA	1.5	100	–	100	1	50	150	350	15
	Class I	1	100	–	100	1	50	100	200	
	Class II	1.5	150	–	150	1	75	150	400	
Italy	Technical regulation, DCI 27/07/84 (MSWC)	10	500	10	600	10	200	500	2500	10

	Draft Decree on the use of MBTC 1 st quality (land reclamation)	3	–	3	300	3	100	280	1000	–
	Law on fertilizers (L 748/84; and 03/84) BWC/GC/SSC	1.5	–	0.5	150	1.5	50	140	500	
Lux	Licensing for plants	1.5	100	–	100	1	50	150	400	–
Holland	BOOM compost	1	50	–	60	0.3	20	100	200	15
	BOOM very clean compost	0.7	50	–	25	0.2	10	65	75	5
Portugal	Degree on sludge (limit value utilized also for MSW)	20	1000		1000	16	300	750	2500	–
Spain	B.O.E.n' m. 131.2 June 1998	10	400	–	450	7	120	300	1100	–
	Spanish draft on composting Class AA	2	250	–	300	2	100	150	400	–
	(Stabilised Biowaste) Class A	5	400	–	450	5	120	300	1100	–
	Catalonia draft on composting Class A	2	100	0	100	1	60	150	400	–
	(Stabilised Biowaste) Class B	3	250	0	500	3	100	300	1000	–
Sweden	Guideline values of QAS	1	100	–	100	1	50	100	300	–

Swi/land	Verordnung über umweltgefährdende Stoffe Nr.814.013, 9 Juni 1986, rev.28.12.01	1	100	–	1	30	120	400	–	
UK	UKROFS fertil.org.farming“ Composted Household waste”	0.7	70	0	70	0.4	25	45	200	–
	Soilimprovers and growing media	1.5	100	–	200	1	50	150	400	–
EU ECO Label		1	100	–	100	1	50	100	300	10
EC Reg. 2092/91		0.7	70	–	70	0.4	25	45	200	–
Canada		20	–	–	–	5	180	500	1850	75
USA	EPA CFR40/503 Sludge Rule	39	–	–	1500	17	420	300	2800	41
New Zealand		15	1000	–	1000	10	200	600	2000	–
Australia		3	400	–	200	1	60	200	250	20

* Θέστε στα πρότυπα BNQ μόνο

** Ομαλοποιημένος σε ένα περιεχόμενο οργανικής ουσίας 30%

Πίνακας 1.9 Μέγιστες και ελάχιστες οριακές τιμές μετάλλων (PTEs) στην ΕΕ (mg/kg)

	<i>Cd</i>	<i>Cr</i>	<i>CrVI</i>	<i>Cu</i>	<i>Hg</i>	<i>Ni</i>	<i>Pb</i>	<i>Zn</i>	<i>As</i>
Limit values for Compost from source separation (BWC & GC)									
min	0.7	50	0	25	0.2	10	45	75	5
max	3	250	3	600 (1,000) *	3	100	280	1,500 (4.000) *	50
limit values for MSW and MBT Composts									
min	3	250	0	450	3	100	200	1,000	10
max	20	1,000	10	1,000	16	300	800	4,000	25
Ελλάδα									
	10	510	10	500	5	200	500	2000	15

(*) τα όρια *Cu* = 1000, *Zn* = 4000 mg kg⁻¹ d. m. δίνονται από τη Δανία «Statutory Order on Application of Waste Products for Agricultural Purposes»[9]

1.5.2 Πρότυπα για τους οργανικούς ρύπους στο κόμποστ

Χιλιάδες χημικές ενώσεις εμπεριέχονται σε προϊόντα και υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως στη καθημερινή μας ζωή. Πολλές από αυτές είναι μολυσματικές αν και λόγω της χαμηλής συγκέντρωσης ή της ευκολίας να διασπαστούν από τους μικροοργανισμούς δεν προκαλούν απειλή στο περιβάλλον. Εντούτοις, υπάρχουν μερικές οργανικές ενώσεις που δεν διασπώνται εύκολα κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας αποβλήτων και τείνουν να συσσωρεύονται αποτελώντας πηγή ανησυχίας λόγω της τοξικότητάς τους. Υπάρχουν τρεις κύριοι λόγοι γιατί μια οργανική ένωση πρέπει να αντιμετωπίζεται:

1. Η αποδόμηση από τους μικροοργανισμούς της σχετικής ένωσης είναι αργή (από μερικούς μήνες έως πολλά έτη) και επομένως υπάρχει κίνδυνος συγκέντρωσης στο χώμα
2. Η οργανική ένωση μπορεί να συσσωρευτεί στα ζώα και επομένως θέτει μια σοβαρή απειλή στον άνθρωπο
3. Τα προϊόντα αποδόμησης της οργανικής ένωσης είναι τοξικότερα από την αρχική ένωση.

Σχετικά με τους οργανικούς ρύπους στο κόμποστ, για την ώρα στην ΕΕ μόνο Αυστρία, Δανία και Λουξεμβούργο φαίνεται να ανησυχούν και έτσι έχουν θεσπίσει τα όρια που βλέπουμε στον πίνακα 1.5.

Ο Καναδάς δηλώνει ότι δεν υπάρχει κανένας ισχυρός λόγος να συνυπολογισθούν τα όρια οργανικών μολυσματικών παραγόντων στα πρότυπα του κόμποστ και ότι οι οργανικοί μολυσματικοί παράγοντες πρέπει να εξεταστούν για την τυποποίηση του λιπάσματος μόνο στην περίπτωση που πληροφορίες ή επιστημονικά συμπεράσματα το δικαιολογούν.

Πίνακας 1.10 Οριακές τιμές για οργανικούς ρύπους και φυτοφάρμακα στο κόμποστ [10]

	<u>Austria</u> Mixed MSW compost only	<u>Denmark</u> Biowaste compost	<u>Luxembourg</u> Guide values for fresh and matured compost
PCB ¹	1 mg/kg dm		0.1 mg/kg dm (4 analysis per year)
PCCD/F ²			20 mg/kg dm (4 analysis per year)
Dioxins	50 mgITEQ /kg dm		
PAH ³	6 mg/kg dm	3 mg/kg dm	10 mg/kg dm (2 analysis per year)
AOX ⁴	500 mg/kg dm		
Hydrocarbons	3000 mg/kg dm		
LAS ⁵		1,3 g/kg dm	
NPE ⁶		30 mg/kg dm	
DEHP ⁷		50 mg/kg dm	

¹ PCB: Polychlorinated biphenyls; ² PCCD/F: Polychlorinated dibenzofuran; ³ PAH: polycyclic aromatic hydrocarbons; ⁴ AOX: Absorbable organic halogens; ⁵ LAS: linear alkylbenzene sulphonates; ⁶ NPE: nonylphenol; ⁷ DEHP: Di (2-ethylhexyl) phthalate

1.6 Πρότυπα για την περιεκτικότητα σε παθογόνους μικροοργανισμούς, ακαθαρσίες και ζιζάνια

Η πιο καθοριστική παράμετρος που επηρεάζει τον ρυθμό μείωσης των παθογόνων οργανισμών στο τελικό κόμποστ είναι το επίπεδο καθώς και η διάρκεια της θερμοκρασίας κατά την κομποστοποίηση της οργανικής ύλης.

Πίνακας 1.11 Οριακές τιμές για οργανικούς ρύπους και φυτοφάρμακα στο κόμποστ

Χώρα	Ελάχιστη θερμοκρασία °C	Μέρες
Αυστρία		
Βέλγιο	60	4
Δανία	55	14
Γαλλία	60	4
Γερμανίας	55	14
	60 (in-vessel)	7
	65 (not in-vessel)	7
Ιταλία	55	3
Ολλανδία	55	4

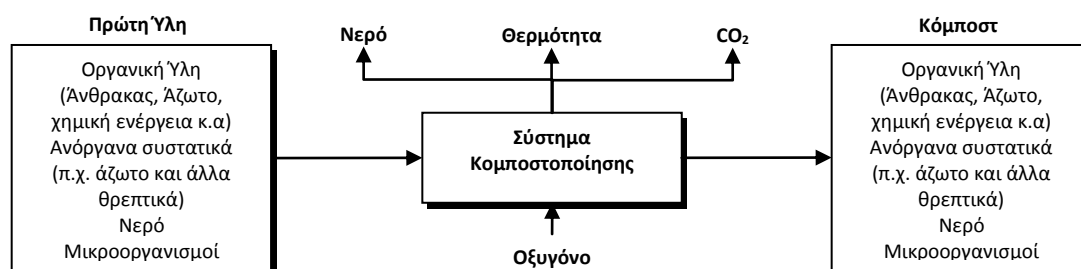
Σουηδία	55-77, εξαρτάται από το προς κομποστοποίηση υλικό	
Ηνωμένο Βασίλειο	60 (δεν απαιτείται αλλά στοχεύεται να προσεγγιστεί)	Υπάρχει χρονική περίοδος για την διεργασία αλλά ανεξάρτητη της θερμοκρασίας
Καναδάς (CCME)	55	3 in-vessel 15 for windrow 3 for aerated static pile
ΗΠΑ	55	5 in vessel 15 for windrow
Αυστραλία	55	απαιτήσεις για τρεις στροφές του σωρού με εσωτερική θερμοκρασία που φθάνει τους 55°C για 3 ημέρες πριν από κάθε στροφή
Νέα Ζηλανδία	55	3
Εν εξελίξη νομικό διάταγμα στη	55 windrow composting	14 (5στροφές)
ΕΚ για τα βιοαπορρίμματα	65 windrow composting 60 in-vessel composting	1 εβδομάδα (2 στροφές)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

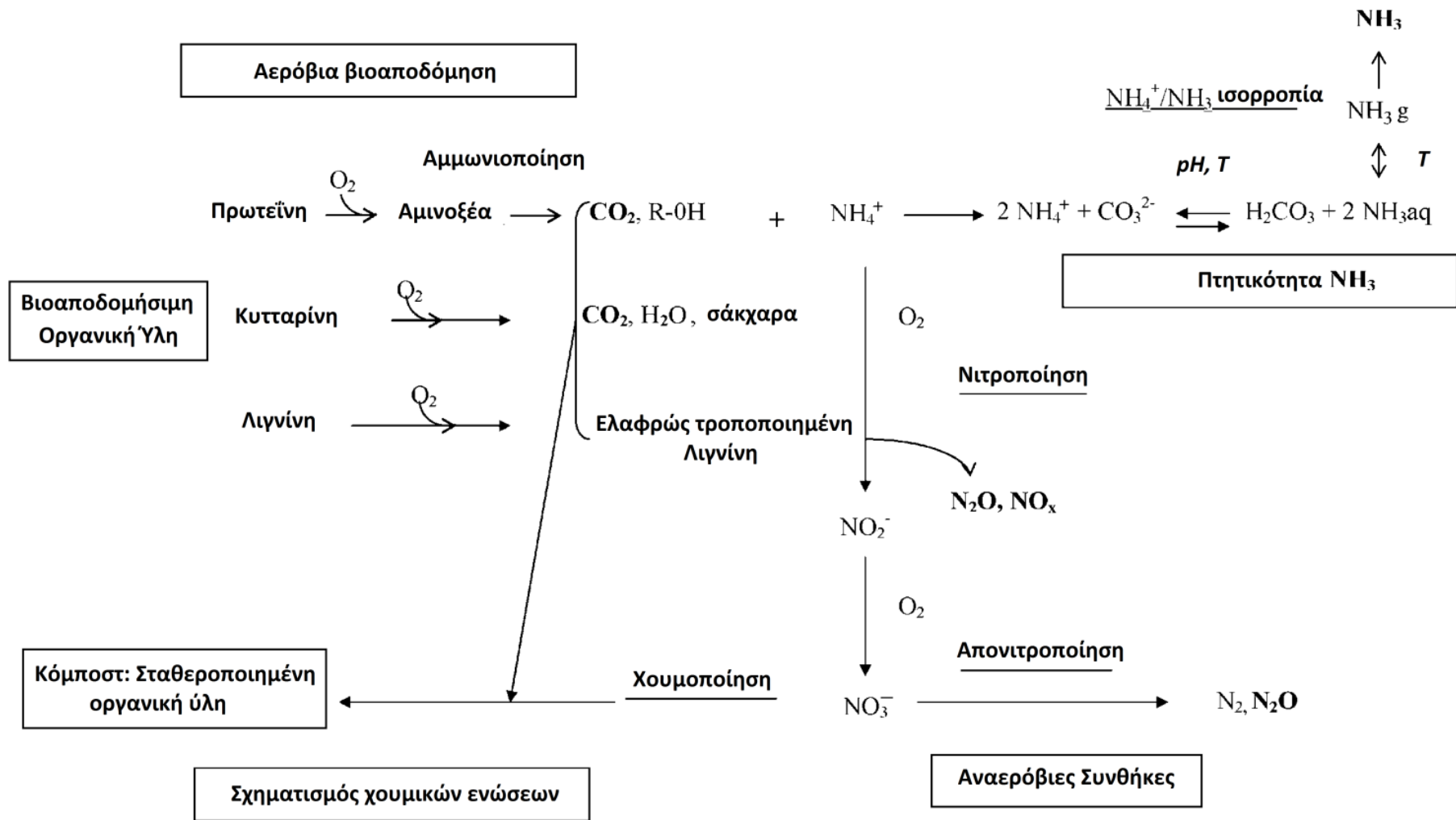
ΑΕΡΟΒΙΑ ΒΙΟΛΟΓΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ (ΚΟΜΠΟΣΤΟΠΟΙΗΣΗ)

2.1 Εισαγωγή

Ο όρος κομποστοποίηση αναφέρεται στην αερόβια βιολογική διεργασία αποδόμησης των οργανικών αποβλήτων υπό ελεγχόμενες συνθήκες και τη σταδιακή μετατροπή τους σε ένα βιολογικά σταθεροποιημένο προϊόν ευρύτερα γνωστό ως κόμποστ. Ο ορισμός της κομποστοποίησης ως μια «αερόβια βιολογική διεργασία αποδόμησης» διαφοροποιεί την εν λόγω μέθοδο από άλλες τεχνικές διαχείρισης του οργανικού κλάσματος όπως είναι η αναερόβια χώνευση, η θερμική επεξεργασία και η υγειονομική ταφή. Με τον όρο «οργανικά απόβλητα» ορίζονται τα υλικά τα οποία δύναται να αποδομηθούν βιολογικά ενώ με τη φράση «ελεγχόμενες συνθήκες» η κομποστοποίηση διαφοροποιείται από τη βιολογική αποδόμηση που λαμβάνει χώρα στη φύση, καθώς ελέγχονται οι συνθήκες της θερμοκρασίας, της υγρασίας και του αερισμού κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Το τελικό προϊόν ορίζεται ως βιολογικά σταθεροποιημένο όταν δεν υπόκειται πλέον έντονη μικροβιακή δραστηριότητα, ενώ η τελική του χρήση εξαρτάται από ποικίλες φυσικοχημικές και βιολογικές παραμέτρους που προσδιορίζουν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του. Ενδεχόμενες χρήσεις του κόμποστ περιλαμβάνουν τη ρύθμιση εδαφών, την αποκατάσταση εδαφών την αξιοποίησή του ως φυσικό εδαφοβελτιωτικό κ.α. (Hogg et al., 2009; Κουλουμπής και Τσαντήλας, 2007; Epstein, 1997; Engeli et al., 1993; Carry et al., 1990; Toffey, 1990). Στην Εικόνα 2.1 παρουσιάζεται σχηματικά η διεργασία της κομποστοποίησης. Η κομποστοποίηση αποτελεί μια βιολογική διεργασία βασιζόμενη στις δραστηριότητες συγκεκριμένων βακτηρίων και μυκήτων (Bharadwaj, 1995). Κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης οι αερόβιοι μικροοργανισμοί καταναλώνουν οξυγόνο για την οξείδωση της οργανικής ουσίας διασπώντας σύνθετες οργανικές ενώσεις του υποστρώματος σε ενδιάμεσα προϊόντα και έπειτα σε απλούστερες ενώσεις παράγοντας CO₂, ανόργανες μορφές αζώτου, νερό και θερμότητα ενώ επιτυγχάνεται μείωση του όγκου και της μάζας του υποστρώματος (Ipek et al., 2002; Epstein, 1997). Παράλληλα με τη βιοαποδόμηση της οργανικής ουσίας συντελούνται και διεργασίες χουμοποίησης οι οποίες περιλαμβάνουν τον πολυμερισμό ενώσεων από τους μικροοργανισμούς ή/και το σχηματισμό απλούστερων ενώσεων προερχόμενα από την αποσύνθεση της οργανικής ουσίας (Paredes et al., 2001). Επομένως, το βιοαποδομήσιμο οργανικό υλικό μετατρέπεται μέσω διαδοχικών μικροβιακών δραστηριοτήτων και βιοχημικών αντιδράσεων σε σταθερότερη οργανική ουσία η οποία έχει κοινά χημικά και βιολογικά χαρακτηριστικά με τις χουμικές ενώσεις (Eick et al., 1998).



Εικόνα 2.1: Απεικόνιση της διεργασίας της κομποστοποίησης (Shaw and Stentiford, 1996; Rynk et al., 1992)



Εικόνα 2.2: Κύριες βιοχημικές αντιδράσεις της κομποστοποίησης (Peigné and Girardin, 2004)

2.2 Σύσταση Οργανικού Υλικού

Η σύσταση του ΟΥ προσδιορίζει απόλυτα το υπό επεξεργασία απόβλητο και κατά τις ΔΑΑ διέπει τον τύπο του ΣΕΔΑΑ που θα εφαρμοστεί, τον χρόνο εκτέλεσης των διεργασιών και την ποιοτική στάθμη του παραγόμενου compost. Στα πλαίσια αυτά, για απόβλητα με χαμηλή περιεκτικότητα σε στερεά ύλη, εφαρμόζονται 'κλειστά' συστήματα ΔΑΑ με αυξημένες απαιτήσεις ελέγχου και ρύθμισης των κρίσιμων παραμέτρων προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος των διεργασιών. Ειδικότερα, για την περίπτωση όπου το απόβλητο χαρακτηρίζεται από υψηλή περιεκτικότητα σε άζωτο, η βιολογική επεξεργασία αφορά στην παραγωγή compost υψηλής ποιότητας. Στον αντίποδα, για απόβλητα με χαμηλά επίπεδα υγρασίας, επιλέγονται 'ανοικτά' συστήματα ΔΑΑ με μεγάλους χρόνους περάτωσης των διεργασιών.

Οι συνήθεις τύποι οργανικών αποβλήτων που αποτελούν υλικό τροφοδοσίας σε εγκαταστάσεις ΔΑΑ για παραγωγή compost, αφορούν κατά κύριο λόγο σε ποσότητες των ακόλουθων τύπων ΟΥ (Jereb, 2004):

- Ιλύ (sludge) προερχόμενη από αστικά λύματα.
Οι εν λόγω ποσότητες έχουν υποστεί πρωτοβάθμια ή δευτεροβάθμια επεξεργασία σε εγκαταστάσεις βιολογικού καθαρισμού.
- Οργανικό – βιοαποδομήσιμο κλάσμα των αστικών απορριμμάτων (organic fraction of municipal solid waste).
Οι αντίστοιχες ποσότητες λαμβάνονται, είτε από εγκαταστάσεις μηχανικού διαχωρισμού, είτε από εφαρμογή προγραμμάτων διαλογής στην πηγή.
- Απόβλητα βιομηχανίας – βιοτεχνίας.
Στην κατηγορία αυτή ανήκουν απόβλητα που προέρχονται από εγκαταστάσεις ελαιουργείων, μονάδες παραγωγής τροφίμων, ποτών, υφασμάτων και γενικότερα, κάθε εγκατάσταση που ως πρώτη ύλη λαμβάνει ποσότητες ΟΥ. Σε αυτά δεν ανήκουν τα βιομηχανικά οργανικά απόβλητα που έχουν χαρακτηριστεί ως επικίνδυνα ή/και τοξικά.
- Γεωργικά απόβλητα.
Αφορούν σε ποσότητες οργανικών αποβλήτων από αγροτικές δραστηριότητες (υπολείμματα φυτικών καλλιεργειών) συμπεριλαμβανομένων και κτηνοτροφικών – πτηνοτροφικών εγκαταστάσεων (π.χ. περιττώματα οικόσιτων ζώων). Η διάθεση των αποβλήτων αυτών σε εγκαταστάσεις εναλλακτικής διαχείρισης γίνεται υπό την προϋπόθεση ότι δεν περιέχουν χημικά λιπάσματα.
- 'Πράσινα' απορρίμματα.
Τα εν λόγω απόβλητα προέρχονται από κηπευτικές εργασίες και αφορούν σε απόβλητα κλάδευσης κήπων, δημοσίων χώρων 'πρασίνου', φυλλώματα δέντρων κ.ά..

Η πλειοψηφία των εγκαταστάσεων εναλλακτικής διαχείρισης αποβλήτων και ειδικότερα, αυτές όπου εφαρμόζουν ΔΑΑ, επεξεργάζεται μίγμα αποβλήτων δύο ή περισσότερων εκ των ανωτέρω τύπων. Η ανάμιξη διαφορετικών τύπων αποβλήτων αποσκοπεί στην επίτευξη της βέλτιστης σύστασης για το τροφοδοτούμενο ΟΥ που θα ευνοεί τα ακόλουθα (US Environmental Protection Agency, 1994):

- Παραγωγή compost υψηλής ποιότητας
- Διασφάλιση των επιθυμητών επιπέδων υγρασίας
- Δημιουργία πορώδους που περιέχει επαρκείς ποσότητες οξυγόνου

- Επιλογή του πλέον κατάλληλου και ταυτόχρονα οικονομικότερου συστήματος ΔΑΑ κ.ά.. (Μιχαλόπουλος 2010)

2.2.1 Τύποι Οργανικών Ενώσεων

Η χημική σύσταση των οργανικών αποβλήτων αναλύεται σε μια ευρύτατη ποιοτική και ποσοτική ποικιλία οργανικών μακρομορίων. Οι ενώσεις αυτές είναι 'αλυσίδες' άνθρακα όπου, ανάλογα με τη διάταξη των άλλων χημικών στοιχείων (υδρογόνο, οξυγόνο, άζωτο κ.ά.) στο σχηματισμό κάθε 'αλυσίδας' διαμορφώνουν τη σύσταση του ΟΥ.

Οι πλέον συνήθεις ομάδες οργανικών ενώσεων που απαντώνται στους περισσότερους τύπους ΟΥ, περιλαμβάνουν (O'Leary & Walsh, 1995):

- Γλυκίδια,
- Πρωτεΐνες,
- Λίπη – λιπίδια,
- Ημικυτταρίνες,
- Κυτταρίνες,
- Τανίνες,
- Λιγνίνες,
- Ρητίνες,
- Υδατοδιαλυτές ενώσεις,
- Έλαια,
- Σάκχαρα κ.ά.

Τα μακρομόρια των εν λόγω οργανικών ενώσεων έχουν διαφορετική ταχύτητα οξειδωσης και μπορούν να διασπαστούν από διαφορετικούς τύπους μικροοργανισμών. Παραδειγματικά αναφέρεται ότι, οι πρωτεΐνες, ως εύκολα διασπάσιμες ενώσεις, μπορούν να αποδομηθούν από ένα ευρύ φάσμα μικροοργανισμών σε αντίθεση με τα δυσδιάσπαστα μακρομόρια κυτταρίνης τα οποία αποδομούνται μόνο από συγκεκριμένες ομάδες μικροβιακών πληθυσμών. Κατά συνέπεια, οι ποσότητες κρέατος που είναι πλούσιες σε πρωτεΐνες διασπώνται ταχύτερα από τα απόβλητα ξυλώδους υφής που προέρχονται από εργασίες κλάδευσης (green waste) και έχουν ως βασικό συστατικό την κυτταρίνη (Palmisano & Barlaz, 1999).

Ακολούθως, παρατίθεται ενδεικτικός πίνακας που περιγράφει την ποσοστιαία περιεκτικότητα ανά τύπο οργανικής ένωσης για ορισμένες αντιπροσωπευτικές κατηγορίες των 'πράσινων' απορριμμάτων. Το ποσοστό είναι ανηγμένο επί της ξηρής μάζας. (Μιχαλόπουλος 2010)

Πίνακας 2.1: Εύρος περιεκτικότητας 'πράσινων' απορριμμάτων σε οργανικές ενώσεις (Martin, 1991)

Οργανικές Ενώσεις	Τύποι 'Πράσινων' Αποβλήτων						
	Ανάμικτα υπολείμματα φυτών	Ανάμικτες ζωικές κοπριές	Ώριμα στελέχη αραβόσιτου	Ξηρές βελόνες πέυκων	Ελαιοπυρήνας	Φύλλα ελαιόδεντρων	Χλωροί βλαστοί αμπέλου
Υδατοδιαλυτά στοιχεία	5 – 30	2 – 20	14.14	7.29	3.07 – 4.46	10.60	8.47
Λίπη – Έλαια	5 – 15	1 – 3	5.94	23.92	2.53 – 10.40	10.70	0.87
Πρωτεΐνες	5 – 40	5 – 30	2.44	2.19	6.60 – 6.65	10.80	5.74
Ημικυτταρίνες	10 – 30	15 – 25	21.91	18.98	13.07 – 20.90	9.34	18.70
Κυτταρίνη	15 – 60	15 – 30	28.67	16.43	25.60 – 37.58	13.60	26.99
Λιγνίνη	5 – 30	10 – 25	9.46	22.68	20.80 – 21.56	15.10	15.95
Τέφρα	1 – 13	5 – 20	7.54	2.51	2.95 – 3.94	11.58	4.83
Ρητίνες	-	-	-	-	0.50 – 5.58	11.13	6.79

2.2.2 Σύσταση Compost

Κατά το πέρας των διεργασιών, η μάζα του παραγόμενου προϊόντος είναι κατά σημαντικό ποσοστό μικρότερη συγκριτικά με την αρχική μάζα του τροφοδοτούμενου αποβλήτου. Το κύριο αίτιο αυτής της μείωσης είναι η παραγωγή αέριων προϊόντων κατά τη διάσπαση των οργανικών μακρομορίων.

Η χημική σύσταση του compost αποτελείται κυρίως από δυσδιάσπαστες οργανικές ενώσεις, υγρασία, τέφρα (ανόργανες ενώσεις) και μικρές ποσότητες βιοαποδομήσιμων ενώσεων που δεν καταναλώθηκαν από τους μικροβιακούς πληθυσμούς (Brinton, 2000). Συγκεκριμένα, τα βασικά συστατικά που συνθέτουν την ξηρή μάζα του compost, περιλαμβάνουν (Nova Scotia Final Report, 2001):

- Βιομάζα θανόντων μικροοργανισμών,
- Νεοσχηματισμένο ΟΥ που περιλαμβάνει:
 - ✓ Κολλοειδείς,
 - ✓ Προχουμικές και
 - ✓ Χουμικές ενώσεις,
- Υπολειμματική δυσδιάσπαστη οργανική ουσία και
- Τέφρα (ανόργανες ουσίες).

2.3 Στάδια της ολοκληρωμένης διεργασίας της κομποστοποίησης

Η κομποστοποίηση ως ολοκληρωμένη διεργασία διαχείρισης των οργανικών αποβλήτων χαρακτηρίζεται από μια σειρά αναπόσπαστων σταδίων τα βασικότερα από τα οποία παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.3. Το πρώτο στάδιο αποτελεί την ανάκτηση του οργανικού κλάσματος των αποβλήτων το οποίο περιλαμβάνει την εποπτεία του συλλεχθέντος οργανικού υλικού και την απομάκρυνση ανεπιθύμητων συστατικών. Στα ανεπιθύμητα υλικά συμπεριλαμβάνονται ουσίες οι οποίες δεν είναι ζυμώσιμες καθώς και κάθε άλλου είδους ουσία που δύναται να επηρεάσει τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος. Η διεργασία αυτή διαφοροποιείται σημαντικά ανά είδος βιοαποδομήσιμου στερεού αποβλήτου. Ροές όπως είναι η ιλύς από αστικά υγρά απόβλητα, η κοπριά ζώων, τα δασοκομικά και γεωργικά απόβλητα έχουν σαφέστατα πιο ομοιόμορφη και ομοιογενής σύσταση συγκριτικά με τα οργανικά αστικά στερεά απορρίμματα, ο βαθμός ανάκτησής των οποίων εξαρτάται σημαντικά από την εκάστοτε

πολιτική διαχείρισής τους (π.χ. διαλογή στην πηγή, σύστημα συλλογής κ.α.). Αξίζει να αναφερθεί ότι τα προγράμματα διαλογής του βιοαποδομήσιμου κλάσματος των αστικών στερεών αποβλήτων παρουσιάζουν σημαντικά περιβαλλοντικά, οικονομικά και κοινωνικά πλεονεκτήματα (USEPA, 1995). Επιπλέον, ο βαθμός της ομοιογένειας ως προς τη σύστασή τους εξαρτάται από το σχεδιασμό των προγραμμάτων διαλογής στην πηγή και στο βαθμό στον οποίο υφίσταται ξεχωριστή συλλογή των διαφορετικών οργανικών ροών των αστικών στερεών αποβλήτων (υπολείμματα τροφών, πράσινα υπολείμματα κλπ) (USEPA, 1995). (Μαλαμής 2011)

Στάδιο 1	• Συλλογή και ανάκτηση βιοαποδομήσιμων οργανικών απόβλητων
Στάδιο 2	• Προετοιμασία υλικού τροφοδοσίας
Στάδιο 3	• Αερόβια βιολογική επεξεργασία οργανικού υλικού
Στάδιο 4	• Ωρίμανση κόμποστ
Στάδιο 5	• Κοσκίνισμα και ραφινάρισμα κόμποστ
Στάδιο 6	• Αποθήκευση και συσκευασία κόμποστ

Εικόνα 2.3: Τυπικά στάδια της ολοκληρωμένης διαχείρισης των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων με τη μέθοδο της κομποστοποίησης

Το δεύτερο στάδιο της διεργασίας της κομποστοποίησης περιλαμβάνει την προετοιμασία του υλικού τροφοδοσίας για τη διαμόρφωση κατάλληλων φυσικοχημικών συνθηκών στο αρχικό υπόστρωμα για την ενίσχυση της απόδοσης της βιοαποδόμησης της οργανικής ουσίας. Η προετοιμασία αυτή δύναται να περιλαμβάνει μεταξύ άλλων (α) την επαρκή περιεκτικότητα του υποστρώματος σε θρεπτικά συστατικά (π.χ. άνθρακα, άζωτο, φώσφορο) με την προσθήκη ενός ή περισσότερων ζυμώσιμων οργανικών υλικών, (β) τη ρύθμιση του μεγέθους και του πορώδους του υποστρώματος για τη διευκόλυνση της διάχυσης του οξυγόνου στην οργανική μάζα (π.χ. τεμαχισμός, χρήση διογκωτικών υλικών), (γ) τη ρύθμιση της περιεχόμενης υγρασίας σε επιθυμητά επίπεδα και (δ) την ομογενοποίηση του οργανικού προς κομποστοποίηση υλικού. Το τρίτο στάδιο αποτελεί το βιολογικό μέρος της κομποστοποίησης στο οποίο συντελείται η βιοαποδόμηση του οργανικού υλικού με τη χρήση κατάλληλων συστημάτων, όπως αυτά περιγράφονται αναλυτικότερα στην ενότητα 3.2.6. Έπειτα πραγματοποιείται η ωρίμανση του οργανικού υλικού και η περαιτέρω σταθεροποίησή του. Σε επόμενο στάδιο διεξάγεται το κοσκίνισμα και ραφινάρισμα του παραγόμενου κόμποστ για την απομάκρυνση μη επιθυμητών υλικών (π.χ. ογκώδη και αδρανή υλικά) ενώ παράλληλα επιτυγχάνεται το απαιτούμενο μέγεθος και η κατάλληλη υφή του κόμποστ για τις διαφορετικές απαιτήσεις ως προς την τελική του χρήση. Τέλος το κόμποστ αποθηκεύεται και συσκευάζεται καθώς η εποχική ζήτηση κόμποστ δεν συμπίπτει πάντοτε με τη διαθεσιμότητα σε οργανικά απόβλητα για επεξεργασία.

2.4 Παράμετροι ελέγχου και παρακολούθησης της κομποστοποίησης

Οι παράμετροι ελέγχου της κομποστοποίησης περιλαμβάνουν το σύνολο των μεγεθών που υπόκεινται σε μεταβολές κατά τα εξελικτικά στάδια της διεργασίας και δύναται, τις περισσότερες περιπτώσεις, να ρυθμιστούν από εξωτερικές παρεμβάσεις στοχεύοντας στην αύξηση του ρυθμού βιοαποδόμησης της οργανικής ουσίας. Τα μεγέθη ελέγχου και ρύθμισης των διεργασιών της κομποστοποίησης περιλαμβάνουν φυσικές, χημικές και βιολογικές παραμέτρους. Στη συνέχεια ακολουθεί η περιγραφή των παραμέτρων αυτών η οποία μεταξύ άλλων περιλαμβάνει:

- Τη σημαντικότητα ελέγχου και προσδιορισμού της κάθε παραμέτρου
- Την καταγραφή του επιθυμητού εύρους τιμών και την αποτύπωση των κατώτερων και ανώτερων επιτρεπτών ορίων σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία
- Την εξέλιξη κάθε παραμέτρου κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης
- Τις τεχνικές και τις μεθόδους ρύθμισης των παραμέτρων για την επίτευξη του επιθυμητού εύρους τιμών

2.4.1. Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία αποτελεί μια από τις βασικότερες παραμέτρους ελέγχου της διεργασίας της κομποστοποίησης ως προϊόν της μικροβιακής αποδόμησης της οργανικής ουσίας. Η σημαντικότητα ελέγχου και παρακολούθησης της θερμοκρασίας έγκειται στο γεγονός ότι αποτυπώνει τη δραστηριότητα των μικροοργανισμών στο υπόστρωμα και αποτελεί σημαντικό δείκτη της ομαλής διεξαγωγής της διεργασίας της κομποστοποίησης (Diaz and Savage, 2007a). Σύμφωνα με τους Hassen et al. (2001) η θερμοκρασία του υποστρώματος προσδιορίζει το ρυθμό με τον οποίο οι βιολογικές διαδικασίες λαμβάνουν χώρα και κατέχει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη και τη διαδοχή του πληθυσμού των μικροοργανισμών. Η θερμοκρασιακή εξέλιξη του υποστρώματος υποδεικνύει τα διαφορετικά στάδια της διεργασίας της κομποστοποίησης η οποία σε γενικά πλαίσια μπορεί να διαχωριστεί σε πέντε φάσεις.

Η πρώτη φάση χαρακτηρίζεται από μια αρχική, σύντομης διάρκειας, ψυχρόφιλη φάση. Κατά την περίοδο αυτή οι μικροοργανισμοί του υποστρώματος αρχικά προσαρμόζονται στο νέο περιβάλλον προκειμένου οι πληθυσμοί των μικροοργανισμών να αναπτυχθούν και να εξαπλωθούν πλήρως σε όλο το υπόστρωμα. Αρχικά ο ρυθμός βιοαποδόμησης είναι χαμηλός διότι ο πληθυσμός των μικροοργανισμών δεν έχει ακόμη αναπτυχθεί σε ικανοποιητικό βαθμό. Γρήγορα όμως οι μικροοργανισμοί, κυρίως τα βακτήρια, προσβάλλουν απλές χημικές ενώσεις όπως μονοσακχαρίτες, δυσασακχαρίτες κ.α. με συνεπακόλουθη αύξηση της θερμοκρασίας ($40-45^{\circ}$) (Hellmann et al., 1997). Αυτές οι μεταβολές συνήθως επιφέρουν την άμεση ανάπτυξη άλλων ειδών μικροοργανισμών (μικροβιακή διαδοχή) και το πέρασμα από το ψυχρόφιλο στο μεσόφιλο στάδιο. Μεσόφιλα βακτήρια και μύκητες συνεχίζουν την αποδόμηση των οργανικών ενώσεων προτιμώντας την προσβολή οργανικών ενώσεων των οποίων ο λόγος C/N βρίσκεται πλησιέστερα μεταξύ 9-12. Η διάσπαση συνθετότερων οργανικών ενώσεων δίνει απλούστερες ενώσεις ενισχύοντας τη δραστηριότητα των μικροοργανισμών και αυξάνοντας περαιτέρω τη θερμοκρασία του υποστρώματος. Επισημαίνεται ότι η διάσπαση των οργανικών ενώσεων οφείλεται στα εξωκυτταρικά ένζυμα των μικροοργανισμών ενώ τα ενδοκυτταρικά ένζυμα ρυθμίζουν την ανάπτυξη, τον

πολλαπλασιασμό τους και λοιπές βιολογικές δραστηριότητες τους. Την πρώτη μεσόφιλη φάση διαδέχεται το θερμόφιλο στάδιο της κομποστοποίησης κατά το οποίο οι μεσόφιλοι μικροοργανισμοί γίνονται λιγότερο ανταγωνιστικοί σε θερμοκρασίες άνω των 40-45°C (Jeong and Kim, 2001; Eklind and Kirchmann, 2000b; Hellmann et al., 1997) και αντικαθίστανται διαδοχικά από θερμόφιλους. Οι θερμόφιλοι μικροοργανισμοί, κυρίως βακτήρια και ακτινομήκυτες, βιοαποδομούν πιο σύνθετα μακρομόρια (π.χ. λίπη) (Miller, 1991) ενώ στη φάση αυτή παρουσιάζεται μέγιστη διάσπαση της οργανικής ουσίας καθώς και μέγιστα θερμοκρασιακά επίπεδα. Οι συνθήκες αυτές επικρατούν στο υπόστρωμα για όσο διάστημα υπάρχει διαθεσιμότητα θρεπτικών συστατικών και οργανικές ουσίες άμεσα διαθέσιμες προς κατανάλωση ενώ σημαντικός παράγοντας ως προς τη χρονική διάρκεια του θερμόφιλου σταδίου διαδραματίζουν οι διατάξεις ρύθμισης και ελέγχου κρίσιμων παραμέτρων της κομποστοποίησης (π.χ. υγρασία, αερισμός, ανάδευση). Σε μετέπειτα στάδιο το υπόστρωμα υπόκειται σε μια δεύτερη μεσόφιλη φάση (<40-45°C) η οποία χαρακτηρίζεται από σταδιακή μείωση της θερμοκρασίας λόγω της ελάττωσης της δραστηριότητας των μικροοργανισμών που προκύπτει από την εξάντληση της διαθέσιμης βιοαποδομήσιμης οργανικής ουσίας. Κατά συνέπεια οι θερμόφιλοι μικροοργανισμοί βαθμιαία θανατώνονται ενώ νέοι πληθυσμοί που αποτελούνται κυρίως από μύκητες, επικρατούν στο υπόστρωμα αποδομώντας τις πλέον δυσδιάσπαστες οργανικές ενώσεις (π.χ. κυτταρίνη) καθώς επίσης και διάφορες σύνθετες οργανικές ουσίες που μετασχηματίζονται σε απλούστερα σάκχαρα και άλλα ενδιάμεσα προϊόντα μεταβολισμού. Οι αντιδράσεις βιοξείδωσης της οργανικής ουσίας τελούνται με αργούς ρυθμούς με αποτέλεσμα η εκλυόμενη θερμότητα να μην ισοσκελίζει τις θερμικές απώλειες. Επομένως, το υπόστρωμα μεταβαίνει σταδιακά προς το τελικό ψυχρόφιλο στάδιο (στάδιο ωρίμανσης) όπου η θερμοκρασία σταδιακά τείνει να εξισωθεί με αυτή του περιβάλλοντος υποδηλώνοντας την ολοκλήρωση των διεργασιών της κομποστοποίησης (Cooperband, 2000). Αξίζει να σημειωθεί ότι στα πρώτα στάδια των διεργασιών (πρώτη μεσόφιλη, θερμόφιλη) επικρατεί κυρίως η αποδόμηση των σύνθετων οργανικών ενώσεων και λιγότερο η σύνθεση νέων σταθερότερων ενώσεων, ενώ στο δεύτερο μεσόφιλο στάδιο επικρατούν αντιδράσεις σύνθεσης σταθερότερων και συνθετότερων οργανικών ενώσεων (χουμικές ενώσεις κ.α.). (Μαλαμής 2011)

Η επίτευξη βέλτιστων θερμοκρασιακών επιπέδων είναι σημαντική για την αποτελεσματικότητα της διεργασίας της κομποστοποίησης (Finstein et al., 1986; Finstein and Morris, 1975) και συμβάλει σημαντικά στην ανάπτυξη υψηλών ρυθμών βιοαποδόμησης κατά την επεξεργασία του οργανικού κλάσματος (Miller, 1992). Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία το εύρος των βέλτιστων θερμοκρασιακών τιμών κατά το οποίο μεγιστοποιείται ο ρυθμός βιοαποδόμησης του οργανικού φορτίου κυμαίνεται από 43 έως 65°C (Πίνακας 2.2).

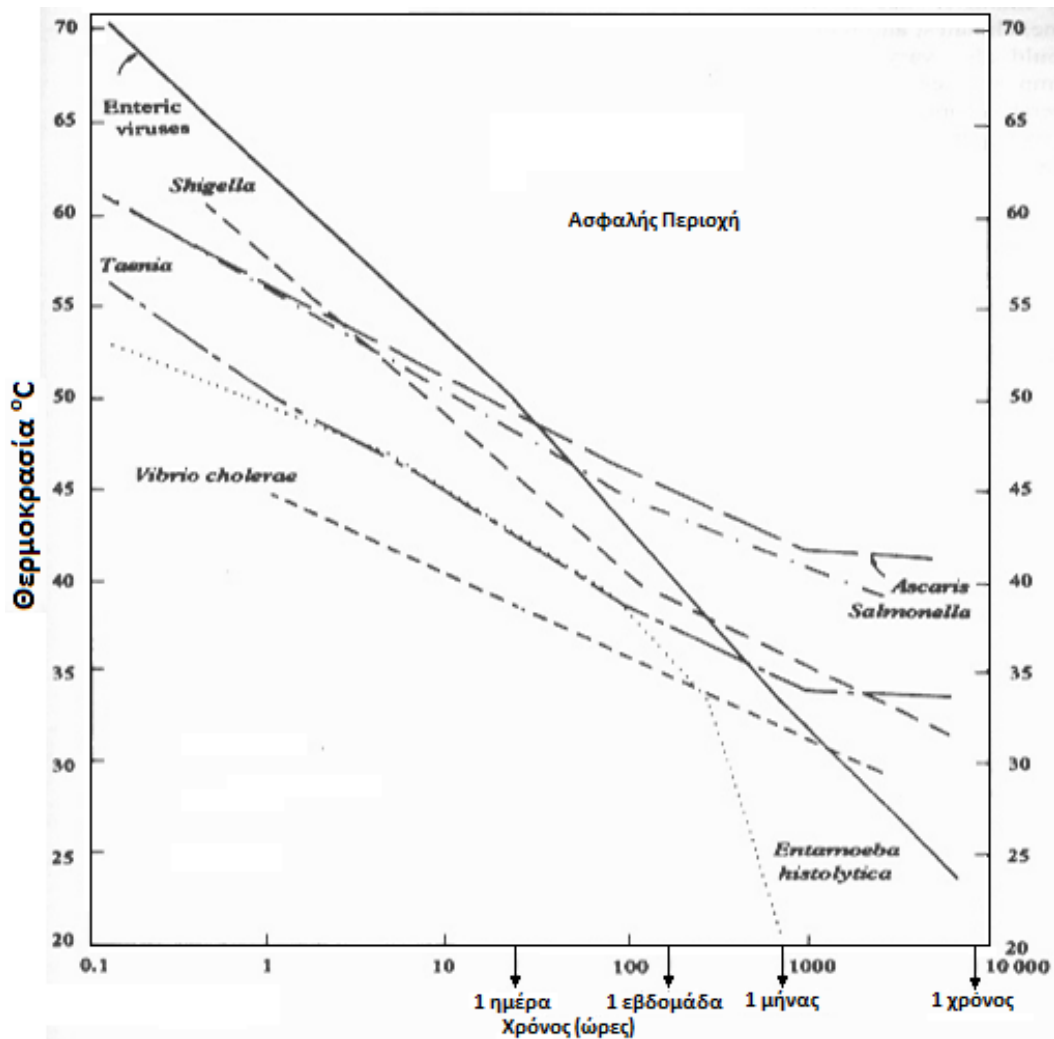
Πίνακας 2.2: Εύρος βέλτιστων θερμοκρασιακών τιμών (°C) στο οποίο παρατηρείται μεγιστοποίηση του ρυθμού διάσπασης της οργανικής ουσίας

Εύρος θερμοκρασίας	Σχόλιο	Βιβλιογραφία
52 - 60°C	Μεγιστοποίηση της αποσύνθεσης	Bach et al. (1984), McKinley and Vestal (1984), MacGregor et al. (1981)
≤55°C	-	McKinley and Vestal (1984).
50 - 55°C	Η μικροβιακή δραστηριότητα παρεμποδίζεται σε υψηλότερα θερμοκρασιακά επίπεδα	Diaz and Savage (2007a)
45 - 55°C	Μεγιστοποίηση του ρυθμού βιοαποδόμησης	Pagans et al. (2005), Stentiford (1996), De Bertoldi et al. (1983)
43 - 65°C	Αποδοτική κομποστοποίηση	EA (2001)
55 - 65°C	Αποδοτική λειτουργία της διεργασίας της κομποστοποίησης	Shammas and Wang (2007)

Επιπλέον, ανώτατα και κατώτερα θερμοκρασιακά όρια έχουν προσδιοριστεί εκτός των οποίων η ομαλή διεξαγωγή της βιοαποδόμησης της οργανικής ουσίας αναστέλλεται. Σύμφωνα με τους Erstein (1997) και Miller (1992), όταν η μέγιστη θερμοκρασία στο υπόστρωμα είναι στους 60 έως 70°C, πολλοί θερμοφιλοί μικροοργανισμοί, απαραίτητοι για την ομαλή διεξαγωγή της διεργασίας της κομποστοποίησης, γίνονται λιγότερο ενεργοί και μειώνεται η μικροβιακή δράση. Σε ακόμα υψηλότερα επίπεδα (>70°C) οι Diaz and Savage (2007a), Mena et al. (2003), Fermor et al. (1989) και Finstein et al. (1986) αναφέρουν ότι οι μικροοργανισμοί καταστρέφονται ή αδρανοποιούνται. Ως κατώτερο θερμοκρασιακό όριο στο υπόστρωμα οι Mosher and Anderson (1977) έχουν θέσει τους 20°C κάτω από το οποίο επιβραδύνεται σημαντικά ή παύει η διεργασία της κομποστοποίησης.

Ενώ η ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών μπορεί να αναστείλει ή να επιβραδύνει τη διεργασία της κομποστοποίησης, υψηλές θερμοκρασίες είναι επιθυμητές για την καταστροφή των ανεπιθύμητων παθογόνων μικροοργανισμών που ενδεχομένως εμπεριέχονται στο υπόστρωμα. Η βασική παράμετρος για την εξασφάλιση της υγειονομοποίησης του υποστρώματος αφορά στη διάρκεια της θερμοκρασίας σε συγκεκριμένο επίπεδο (Hogg et al., 2002). Από διάφορους ερευνητές έχουν οριστεί ως ενδεδειγμένες σχέσεις μεταξύ της θερμοκρασίας και του χρόνου διάρκειάς της στο υπόστρωμα, κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης, για τη διασφάλιση της υγειονομοποίησης του τελικού προϊόντος. Ενδεικτικά οι Bollen et al. (1989), Lopez-Real and Foster (1985) και Bollen (1969) υποδεικνύουν ότι θερμοκρασία 65°C για τουλάχιστον τριάντα λεπτά είναι κρίσιμο όριο για την αδρανοποίηση ή/και την εξουδετέρωση των παθογόνων μικροοργανισμών. Οι de Bertoldi et al. (1988) προτείνουν θερμοκρασία ίση με 65°C για 3 ημέρες ενώ σύμφωνα με τους Κουλουμπής και Τσαντήλας (2007), η επίτευξη θερμοκρασίας τουλάχιστον 55°C για 3 ημέρες κατά την επεξεργασία της ιλύος μπορεί να θεωρηθεί ότι καταστρέφει κατά 99,9% τους παθογόνους μικροοργανισμούς που εμπεριέχονται στο αρχικό υπόστρωμα. Επιπλέον, ο Strauch (1998, 1991) παρουσιάζει σχηματικά τις απαιτούμενες συνθήκες θερμοκρασίας-χρόνου για την εξουδετέρωση σημαντικών παθογόνων μικροοργανισμών που εμπεριέχονται στην ιλύ. Σύμφωνα με το Διάγραμμα 2.1 προκύπτει ότι για την αδρανοποίηση των παθογόνων μικροοργανισμών πρέπει να επιτευχθούν χρονικές διάρκειες μεγαλύτερες των 7 λεπτών, 30 λεπτών, 2 ωρών, 15 ωρών και 3 ημερών σε θερμοκρασιακά επίπεδα 70, 65, 60, 55 και 50°C αντίστοιχα. (Μαλαμής 2011)

Πέρα από τη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν και εθνικές προδιαγραφές οι οποίες ρυθμίζουν τα επίπεδα θερμοκρασίας και τον απαιτούμενο χρόνο για τη μείωση των παθογόνων μικροοργανισμών στο τελικό προϊόν όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.3. Αξίζει να αναφερθεί ότι σύμφωνα με το 3^ο κείμενο για την Αναθεώρηση της Οδηγίας 86/278/ΕΟΚ, κατά τη θερμόφιλη αερόβια σταθεροποίηση της ύλης απαιτείται η επίτευξη θερμοκρασίας 55°C με ελάχιστο χρόνο παραμονής 20 ημέρες ενώ σε σχετική έκθεση της Ε.Ε. αναφορικά με την αξιολόγηση των μεθόδων διαχείρισης της ύλης για τη μείωση των παθογόνων μικροοργανισμών συνίσταται η θερμοκρασία κατά την κομποστοποίηση να είναι τουλάχιστον 55°C για 4 συνεχείς ημέρες (Carrington, 2001).



Διάγραμμα 2.1: Συνθήκες θερμοκρασίας-χρόνου για την αδρανολοποίηση των παθογόνων μικροοργανισμών στην ύλη (Strauch, 1998; 1991).

Πίνακας 2.3: Συνθήκες θερμοκρασίας-χρόνου κατά την κομποστοποίηση για την υγειονοποίηση του κόμποστ προερχόμενο από ιλύ, σύμφωνα με τις εθνικές προδιαγραφές διαφόρων χωρών

Χώρα	Σύστημα Κομποστοποίησης	Συνθήκες θερμοκρασίας - χρόνου	
Καναδάς (CCME, 2005)	Αναστρεφόμενα σειράδια	≥55°C για 15 ημέρες	
	Αεριζόμενοι στατικοί σωροί	≥55°C για 3 ημέρες	
	Κλειστά συστήματα	≥55°C για 3 ημέρες	
ΗΠΑ (USEPA, 2003)		Κόμποστ Κλάσης Α	Κόμποστ Κλάσης Β
	Αναστρεφόμενα σειράδια	≥55°C για 15 ημέρες	≥40°C για 5 ημέρες και κατά τη διάρκεια των οποίων απαιτείται αύξηση στους 55°C για 4 ώρες
	Αεριζόμενοι στατικοί σωροί	≥55°C για 3 ημέρες	Ίδιο με Αναστρεφόμενα σειράδια
	Κλειστά συστήματα	≥55°C για 3 ημέρες	Ίδιο με Αναστρεφόμενα σειράδια
Ηνωμένο Βασίλειο (DoE, 1996)	Ανοικτά συστήματα	Διατήρηση στους 40°C για τουλάχιστον 5 ημέρες κατά τη διάρκεια των οποίων απαιτείται αύξηση στους 55°C για 4 ώρες	

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι για τον έλεγχο της διεργασίας της κομποστοποίησης είναι απαραίτητη η ρύθμιση της θερμοκρασίας του υποστρώματος σε επιθυμητά επίπεδα. Οι εξωγενείς παρεμβάσεις για την απομάκρυνση της περίσσειας θερμότητας περιλαμβάνουν (α) την ανάδευση της οργανικής μάζας για την ανακατανομή της θερμοκρασίας στο υπόστρωμα και την απομάκρυνση μέρους των παραγόμενων υδρατμών και (β) την ψύξη της οργανικής μάζας με κατάλληλα συστήματα αερισμού (Miller, 1992). Στις περιπτώσεις εμφάνισης θερμοκρασιακών επιπέδων μικρότερων του επιθυμητού οι τεχνικές που εφαρμόζονται προκειμένου να συγκρατηθεί η βιολογικά παραγόμενη θερμότητα περιλαμβάνουν τη χρήση μονωτικών τοιχωμάτων ή καλυμμάτων και την εκμετάλλευση της ηλιακής θερμότητας (Μιχαλόπουλος, 2010).

2.4.2 Υγρασία

Η υγρασία είναι μια από τις βασικές παραμέτρους της κομποστοποίησης που επηρεάζει τις δράσεις των μικροοργανισμών, καθώς είναι το μέσο για τη μεταφορά των διαλυμένων θρεπτικών ουσιών που απαιτούνται για τις μεταβολικές και φυσικές τους δράσεις (Gajalakshmi and Abbasi, 2008). Η υγρασία είναι απαραίτητη για τη διεργασία της βιοαποδόμησης της οργανικής ουσίας, καθώς το μεγαλύτερο μέρος της πραγματοποιείται στα λεπτά υγρά στρώματα πάνω στην επιφάνεια των σωματιδίων. Σύμφωνα με τους Margesin et al. (2006) και Liang et al. (2003) η υγρασία του υποστρώματος μπορεί να θεωρηθεί βασικότερος ρυθμιστικός παράγοντας της κομποστοποίησης από ότι η θερμοκρασία επειδή επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό τη δράση των μικροοργανισμών. Οι Gajalakshmi and Abbasi (2008), Stentiford (1996) και Καπετάνιος (1990), ορίζουν ως βέλτιστο εύρος της αρχικής περιεχόμενης υγρασίας στο υπόστρωμα τιμές μεταξύ 50% και 70%, πρέπει όμως να τονιστεί ότι το εύρος αυτό εξαρτάται από τη φύση του προς κομποστοποίηση υποστρώματος και πιο συγκεκριμένα από το πορώδες του υλικού (Nova Scotia, 2008; Diaz and Savage, 2007a; Manios, 2004; Μανιός, 1979). Παράγοντες όπως το μέγεθος και η διάταξη των οργανικών σωματιδίων καθώς και η δομική τους αντοχή διαμορφώνουν το πορώδες του οργανικού μίγματος και κατ' επέκταση το ιδανικό εύρος της περιεχόμενης υγρασίας στο αρχικό υπόστρωμα. Συνεπώς, οργανικό μίγμα με χαμηλό πορώδες απαιτεί ποσοστά περιεχόμενης υγρασίας μικρότερα από ότι ένα υπόστρωμα του οποίου το πορώδες είναι υψηλό (Diaz and Savage, 2007b).

Η περιεχόμενη υγρασία του υποστρώματος μειώνεται κατά τα εξελικτικά στάδια της κομποστοποίησης λόγω των υψηλών θερμοκρασιακών επιπέδων, του αερισμού και της ανάδευσης του υποστρώματος, συνθήκες οι οποίες ευνοούν την εξάτμιση και απομάκρυνση τμήματος της υγρασίας του οργανικού υλικού. Σημειώνεται ότι πολύ χαμηλή (<30%) και πολύ υψηλή περιεχόμενη υγρασία (>75%) κατά τη διάρκεια της θερμοφίλης φάσης της κομποστοποίησης αναστέλλει τις μικροβιακές δράσεις εξαιτίας της πρόωρης αφυδάτωσης και της διαμόρφωσης αναερόβιων συνθηκών αντίστοιχα (Gajalakshmi and Abbasi, 2008; de Bertoldi et al., 1983; Tiquia, et al., 2002, 1996a). Περίσσεια υγρασίας οδηγεί σε πλήρωση των πόρων του υποστρώματος με νερό, περιορίζοντας με αυτόν τον τρόπο τη μεταφορά και διάχυση του οξυγόνου στην οργανική μάζα. Αυτό διαδοχικά δημιουργεί αναερόβιες συνθήκες, έκλυση δυσάρεστων οσμών και ανεπιθύμητων προϊόντων (Qiao and Ho, 1997). Αντίθετα, εάν το υπόστρωμα δεν έχει την απαιτούμενη ποσότητα νερού, η ανάπτυξη και η αύξηση του πληθυσμού των μικροοργανισμών καθώς επίσης και ο ρυθμός αποσύνθεσης της οργανικής ουσίας μειώνονται ή σταματούν διαμορφώνοντας ένα τελικό προϊόν το οποίο είναι σταθεροποιημένο ως προς τις φυσικές του ιδιότητες αλλά όχι ως προς τις βιολογικές (Diaz and Savage, 2007a; de Bertoldi et al., 1983). Έχει αναφερθεί ότι τιμές περιεχόμενης υγρασίας μικρότερες από 10-15%, αναστέλλουν τη βιολογική δραστηριότητα (Diaz and Savage, 2007a; Diaz et al., 2002; EA, 2001). Αναφορικά με την περιεχόμενη υγρασία κατά τη θερμοφίλη φάση της διεργασίας το εύρος των βέλτιστων τιμών που απαντάται στη επιστημονική κοινότητα κυμαίνεται από 40% έως 70% (Πίνακας 2.4). Σε αυτό το εύρος τιμών ευνοείται η μικροβιακή δραστηριότητα και επιτυγχάνεται ο μέγιστος ρυθμός βιοαποδόμησης του οργανικού υποστρώματος. Στο τέλος της διεργασίας η περιεχόμενη υγρασία στο παραγόμενο κόμποστ συνίσταται να είναι σε χαμηλά επίπεδα προκειμένου να διασφαλιστεί η μείωση του όγκου και της μάζας του οργανικού υλικού, να αποφευχθεί η αποθήκευση, μεταφορά και πώληση περίσσειας νερού καθώς και για να επιτευχθεί μείωση της μικροβιακής δραστηριότητας (Diaz et al., 2002).

Πίνακας 2.4: Βέλτιστο εύρος υγρασίας κατά τη θερμοφίλη φάση της κομποστοποίησης

Υγρασία (% wb)	Βιβλιογραφία
50-60	Gajalakshmi and Abbasi (2008), Shammam and Wang (2007), Alexander et al. (2002), Gaur (2000)
40-70	Stentiford (2001)
50-70	Tiquia et al. (1998), Haug (1993), McKinley et al. (1986), Suler and Finstein (1977)
≥ 60	Liang et al. (2003)

Η ρύθμιση της περιεχόμενης υγρασίας στο υπόστρωμα αποτελεί βασική προϋπόθεση για την ομαλή διεξαγωγή της κομποστοποίησης με τη διαμόρφωση κατάλληλου αρχικού οργανικού μίγματος με περιεχόμενη υγρασία σε επιθυμητό εύρος τιμών. Κατά τη εξέλιξη της κομποστοποίησης η αντιμετώπιση φαινομένων ξήρανσης του υποστρώματος περιλαμβάνει τεχνικές όπως (α) η προσθήκη νερού μέσω κατάλληλων συστημάτων ύγρανσης του υποστρώματος και (β) η προσθήκη μερικώς επεξεργασμένου οργανικού υλικού το οποίο χαρακτηρίζεται από υψηλή υγρασία σε σύγκριση με το υπόστρωμα (Μιχαλόπουλος, 2010). Κατά την ενυδάτωση του υποστρώματος το παρεχόμενο νερό πρέπει να κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλη τη μάζα του υποστρώματος ούτως ώστε να εξασφαλίζονται οι βέλτιστες συνθήκες ως προς τα επίπεδα υγρασίας. Στην περίπτωση κατά την οποία η οργανική ουσία εμφανίζει υψηλή περιεχόμενη υγρασία κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης, οι τεχνικές μείωσης των επιπέδων υγρασίας

περιλαμβάνουν (α) τη συνεχή ανάδευση του υποστρώματος προκειμένου να επιτευχθεί διάχυση του οξυγόνου σε όλα τα τμήματα της οργανικής μάζας και (β) την ανάμιξη του υποστρώματος με οργανική ουσία η οποία χαρακτηρίζεται είτε από χαμηλά επίπεδα υγρασίας είτε από υψηλό πορώδες (Μιχαλόπουλος, 2010).

2.4.3 Αερισμός – Παροχή οξυγόνου

Ο αερισμός και κατ' επέκταση η παροχή οξυγόνου αποτελεί αναγκαίο και αναπόσπαστο μέρος για την εύρυθμη διεξαγωγή της διεργασίας της κομποστοποίησης καθώς διασφαλίζει την ανάπτυξη των αερόβιων μικροοργανισμών μέσω των αναπνευστικών και μεταβολικών διεργασιών τους (Barrington et al., 2003). Ο αερισμός κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης επιτυγχάνεται με ανάδευση ή με παροχή αέρα μέσω εμφύσησης ή αναρρόφησης ή με συνδυασμό των παραπάνω τρόπων. Η απουσία οξυγόνου στην οργανική μάζα έχει ως αποτέλεσμα τη διαμόρφωση αναγωγικών αντιδράσεων και ενδιάμεσων δύσοσμων προϊόντων (Diaz et al., 2002). Ο αερισμός επιτυγχάνει πολλαπλούς σκοπούς προκειμένου να διαμορφώσει αποδοτικότερες συνθήκες βιοαποδόμησης των οργανικών αποβλήτων όπως (α) η επαρκής παροχή οξυγόνου στο οργανικό προς κομποστοποίηση μίγμα, (β) ο έλεγχος της θερμοκρασίας του συστήματος και (γ) η απομάκρυνση και ο έλεγχος της υγρασίας καθώς και των αερίων εκπομπών (π.χ. CO₂). Επομένως, η θερμοκρασία, η υγρασία και ο αερισμός του υποστρώματος αποτελούν παραμέτρους που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους καθώς η μικροβιακή δραστηριότητα και κατ' επέκταση οι υψηλές θερμοκρασίες απαιτούν ορισμένο επίπεδο περιεχόμενης υγρασίας ώστε οι πόροι και τα διάκενα μεταξύ των σωματιδίων του υποστρώματος να επαρκούν για τη διάχυση του αέρα μέσα από αυτά.

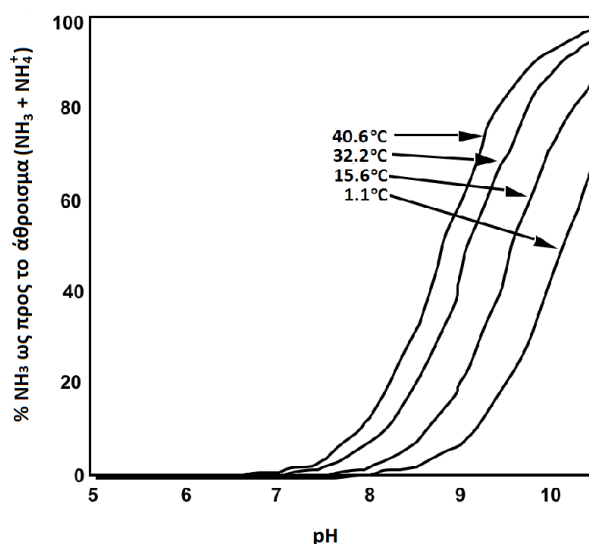
Στα πρώτα στάδια της κομποστοποίησης όπου πραγματοποιείται η αφομοίωση των άμεσα διαθέσιμων οργανικών ενώσεων, με συνεπακόλουθη αύξηση της θερμοκρασίας, ο ρυθμός κατανάλωσης του οξυγόνου είναι μέγιστος ενώ στη συνέχεια με την εξάντληση των οργανικών αυτών ενώσεων του υποστρώματος η απαίτηση οξυγόνου από τους αερόβιους μικροοργανισμούς μειώνεται σταδιακά (EA, 2001). Σημαντικοί παράγοντες ως προς την αποτελεσματικότητα του αερισμού και της διάχυσης του οξυγόνου στην οργανική μάζα αποτελούν η περιεκτικότητα του υποστρώματος σε υγρασία καθώς και οι φυσικές ιδιότητές του ούτως ώστε να διασφαλίζεται αφενός η ελεύθερη κίνηση του αέρα στο δίκτυο του διαμορφωμένου πορώδους και αφετέρου η διαφυγή των αερίων που εκλύονται κατά τις αντιδράσεις. (Μαλαμής 2011)

Σύμφωνα με τους Alexander et al. (2002) και Wesner (1978), οι βέλτιστες τιμές περιεκτικότητας σε οξυγόνο στο υπόστρωμα κυμαίνονται μεταξύ 5 και 15% v/v ενώ η επίτευξη μεγαλύτερων τιμών με παρατεταμένο αερισμό ή ανάδευση του υποστρώματος ενδέχεται να μειώσουν τη θερμοκρασία στο σύστημα όπως σημειώνουν οι Gajalakshmi and Abbasi (2008) και Shammam and Wang (2007). Επιπλέον, οι Mena et al. (2003) προτείνουν ως ιδανική περιεκτικότητα του υποστρώματος σε οξυγόνο τιμές από 10-16% v/v θεωρώντας ότι αυτό το εύρος τιμών επαρκεί για τη διατήρηση των αερόβιων συνθηκών. Παρότι έχει παρατηρηθεί ότι σε χαμηλά ποσοστά οξυγόνου, έως 0.5% v/v, επικρατούν αερόβιες συνθήκες (Gajalakshmi and Abbasi, 2008), ο Gaur (2000) συνιστά τη διατήρηση των επιπέδων του οξυγόνου σε τιμές ίσες ή υψηλότερες του 10% v/v καθόλη τη διεργασία της κομποστοποίησης ενώ ο Poincelot (1977) προτείνει ως ελάχιστη τιμή ίση με 5% v/v.

2.4.4 pH

Η οξύτητα και η αλκαλικότητα του υποστρώματος (pH) είναι μια ακόμα σημαντική παράμετρος ελέγχου της διεργασίας της κομποστοποίησης. Το pH σχετίζεται με τα είδη των μικροοργανισμών που αναπτύσσονται για την βιοαποδόμηση του οργανικού κλάσματος. Σύμφωνα με τους Shammas and Wang (2007), Zorpas et al. (2003), Καπετάνιος (1990), και Golueke (1972), τιμές μεταξύ 6.0 και 7.5 ευνοούν την ανάπτυξη βακτηρίων ενώ οι μύκητες προτιμούν περιβάλλον με τιμές pH μεταξύ 5.0 - 8.0. Κατά την έναρξη της βιοσταθεροποίησης έχει διαπιστωθεί ότι το pH μειώνεται λόγω της δράσης οξυγενούς βακτηριακής μικροχλωρίδας και της διάσπασης των άμεσα αποδομήσιμων οργανικών ενώσεων για το σχηματισμό οργανικών οξέων (π.χ. σάκχαρα, άμυλο και λιπαρά) ως ενδιάμεσο προϊόν του μικροβιακού μεταβολισμού (Kirchmann and Widen, 1994; Haug, 1993; Nakasaki et al., 1993; Poincelot, 1974). Σε ειδικές περιπτώσεις έχει αναφερθεί η προσθήκη ασβεστίου για τη ρύθμιση της οξύτητας στα αρχικά στάδια της διεργασίας (Γιδαράκος, 2007). Στη συνέχεια της κομποστοποίησης το pH αυξάνεται τόσο λόγω της κατανάλωσης των οργανικών οξέων από μύκητες ανθεκτικούς σε όξινο περιβάλλον, όσο και λόγω της παράλληλης παραγωγής αμμωνιακών λόγω της βιοαποδόμησης του οργανικού αζώτου (Finstein and Morris, 1975). Οι παραπάνω δραστηριότητες έχουν ως αποτέλεσμα τη διαμόρφωση αλκαλικών συνθηκών στο υπόστρωμα ευνοώντας τις απώλειες αζώτου υπό μορφή αμμωνίας. Τιμές του pH μεγαλύτερες του 8.5 επιτρέπουν την περαιτέρω μετατροπή των αζωτούχων ενώσεων σε αμμωνιακά γεγονός που συμβάλλει περισσότερο στην αλκαλικότητα του υποστρώματος και των εκπομπών αμμωνίας στην ατμόσφαιρα (EA, 2001). Για τη ρύθμιση του αλκαλικού περιβάλλοντος έχει αναφερθεί η χρήση όξινων πρόσθετων αλάτων (π.χ. FeSO_4) αλλά σύμφωνα με τους Pagans (2006) η ρύθμιση αυτή στην πράξη παρουσιάζει δυσκολίες. Με το πέρας των μέγιστων θερμοκρασιών στο υπόστρωμα παρουσιάζεται σταδιακή μείωση του pH η οποία εκδηλώνεται, σύμφωνα με τους Pagans et al. (2005) και Mena et al. (2003), λόγω της δράσης νιτροποιητικών μικροοργανισμών για τη μετατροπή αμμωνιακών σε νιτρικά (διεργασία της νιτροποίησης) αλλά και της πτητικότητας της αμμωνίας. Ανεξάρτητα από το αρχικό pH του οργανικού μίγματος κατά την EA (2001) το τελικό παραγόμενο υλικό πρέπει να παρουσιάζει σταθερό pH προς ουδέτερες τιμές.

Οι Nakasaki et al. (1993) ερεύνησαν την επίδραση διαφορετικών τιμών pH στους μικροοργανισμούς κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης και διαπίστωσαν ότι το βέλτιστο εύρος τιμών είναι μεταξύ 7.0 και 8.0. Άλλοι ερευνητές ορίζουν ως ιδανικές συνθήκες αναφορικά με το pH, μεταξύ 6.5 και 8.5 (Μανιός και Μανιαδάκης, 2001; Gaur, 2000; Hoitink and Kuter, 1986), ενώ ο Bharadwaj (1995) συνιστά εύρος τιμών μεταξύ 6.5 και 7.5. Οι Diaz and Savage (2007b) αναφέρουν ότι οι θεωρητικά βέλτιστες συνθήκες pH για τη μικροβιακή δραστηριότητα και αποδοτικότητα κυμαίνεται από 6.0 έως 7.5, αλλά η πρακτική εμπειρία επιβεβαιώνει ότι τιμές μεταξύ 5.5-8.0 στο αρχικό υπόστρωμα δεν υποθάλπουν την ομαλή εξέλιξη της βιοαποδόμησης της οργανικής ουσία. Επομένως, η διεργασία της κομποστοποίησης είναι αποτελεσματική σε ένα ευρύ φάσμα τιμών του pH στο οποίο κυμαίνεται η πλειονότητα των προς επεξεργασία οργανικών αποβλήτων. Σύμφωνα με τους Bernal et al. (2009) η σημαντικότητα του pH κατά τη διεργασία έγκειται κυρίως ως προς τον έλεγχο της ισορροπίας $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ στο υπόστρωμα και τη ρύθμιση των απωλειών αζώτου εξαιτίας της πτητικότητας της παραγόμενης αμμωνίας σε αλκαλικό περιβάλλον όπως φαίνεται παραστατικά στο Διάγραμμα 2.2.



Διάγραμμα 2.2: Επίδραση του pH και της θερμοκρασίας στην ισορροπία $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ στο υπόστρωμα (Henry et al., 1999)

2.4.5 Φυσικές ιδιότητες του υποστρώματος

Οι φυσικές ιδιότητες του προς επεξεργασία υποστρώματος είναι μια ακόμη παράμετρος η οποία επηρεάζει τη διεργασία της κομποστοποίησης επιδρώντας στις συνθήκες αερισμού και διάχυσης του οξυγόνου στην οργανική μάζα. Στις ιδιότητες αυτές περιλαμβάνονται το πορώδες, το μέγεθος, η δομή και η υφή των σωματιδίων του υποστρώματος. Η μικροβιακή δράση πραγματοποιείται κυρίως στην επιφάνεια κάθε σωματιδίου του υποστρώματος καθώς το οξυγόνο διαχέεται ελεύθερα ως αέριο διαμέσου των ελεύθερων πόρων (αεροθυλάκων) και δυσκολότερα μέσω των υγρών και στερεών τμημάτων των σωματιδίων (ΕΑ, 2001). Επομένως, το πορώδες συχνά ταυτίζεται με την αέρια φάση και ειδικότερα με τους αεροθύλακες που σχηματίζονται μεταξύ διαδοχικών και επάλληλων σωματιδίων του οργανικού υλικού. Ως εκ τούτου, το μέσο μέγεθος των σωματιδίων αποτελεί κρίσιμη φυσική παράμετρο που διέπει την ταχύτητα των αντιδράσεων βιοξείδωσης σε κάθε εξελικτικό στάδιο της κομποστοποίησης. Σωματίδια με μεγάλο εμβαδόν επιφάνειας ανά μονάδα όγκου διαμορφώνουν ένα υπόστρωμα πιο ομογενοποιημένο βελτιώνοντας τις μονωτικές ιδιότητές του και επιτρέποντας την αύξηση του ρυθμού αποδόμησης της οργανικής ουσίας καθώς και τη διατήρηση επιθυμητών θερμοκρασιακών επιπέδων (O'Leary and Walsh, 1995). Πρέπει όμως να επισημανθεί ότι το εμβαδόν επιφάνειας ανά μονάδα όγκου των σωματιδίων πρέπει να εξασφαλίζει επαρκή επιφάνεια για τη μικροβιακή δράση αλλά ταυτόχρονα να διαμορφώνει το απαραίτητο μέγεθος των διάκενων για την απαιτούμενη διάχυση του οξυγόνου λαμβάνοντας υπόψη ότι συντελείται βαθμιαία μείωση του μεγέθους των σωματιδίων της οργανικής ουσίας λόγω των διεργασιών αποδόμησης (Γιδαράκος, 2007). Επομένως, σωματίδια με πολύ μικρό μέγεθος δύναται να αποτρέψουν τη διέλευση του οξυγόνου από το υπόστρωμα διαμορφώνοντας μη επιθυμητές αναερόβιες συνθήκες. Σύμφωνα με τους Diaz et al. (2002), μεγέθη σωματιδίων μεταξύ 10mm και 50mm επιτυγχάνουν τα βέλτιστα αποτελέσματα. Εντούτοις, σε ορισμένες τεχνικές κομποστοποίησης οι οποίες δεν περιλαμβάνουν συστήματα ανάδευσης, όπως στην περίπτωση των αεριζόμενων στατικών σωρών, απαιτείται υψηλότερη δομική αντοχή των σωματιδίων προκειμένου να ανταπεξέλθουν στις συνθήκες τόσο της βαρυτικής πίεσης υπερκείμενων στρωμάτων οργανικού υλικού όσο και της βιοαποδόμησης της οργανικής

μάζας (Diaz and Savage, 2007a). Για τέτοιου είδους συστήματα τα μεγέθη των σωματιδίων πρέπει να είναι μεγαλύτερα από 50mm (Diaz et al., 2002; EA, 2001; Gaur, 2000). Στις περισσότερες περιπτώσεις η ρύθμιση των φυσικών ιδιοτήτων του υποστρώματος επιτυγχάνεται με διεργασίες όπως ο θρυμματισμός, η κοκκοποίηση και ο τεμαχισμός καθώς και με τη επιλογή και την ανάμιξη κατάλληλων πρώτων υλών. Οι πρώτες ύλες οι οποίες χρησιμοποιούνται ως οργανικά πρόσθετα στη διεργασία της κομποστοποίησης για τον έλεγχο των φυσικών αυτών ιδιοτήτων καλούνται διογκωτικά υλικά (bulking agents). Η χρήση των διογκωτικών υλικών συνίσταται στην υδατική απορροφητική τους ικανότητα, στη διασφάλιση της απαραίτητης δομής και του πορώδους στο μίγμα ενώ επιπρόσθετα αποτελούν πηγή άνθρακα για τη ρύθμιση της αναλογίας C/N στο αρχικό υπόστρωμα (Seo et al., 2004; Eklind and Kirchmann, 2000a; Schaub and Leonard, 1996; Haug, 1980). Στις περισσότερες περιπτώσεις τα διογκωτικά υλικά προέρχονται από υπολείμματα φυτικών καλλιεργειών, από υπολείμματα και απόβλητα δασοκομίας καθώς και από υπολείμματα της βιομηχανίας και βιοτεχνίας τροφίμων. Ενδεικτικά διογκωτικά υλικά όπως αυτά απαντώνται συχνά στην βιβλιογραφία αποτελούν το ροκανίδι, το πριονίδι, τα φύλλα, τα κλαδιά και οι φλοιοί δέντρων, τα υπολείμματα από καλλιέργειες δημητριακών, το άχυρο, ο φλοιός ρυζιού κ.α. (Adhikari et al., 2009a; Bernal et al., 2009; Chang et al., 2006; Pagans et al., 2006; Hong and Park, 2005; Manios, 2004; Eklind and Kirchmann, 2000a; Crobe, 1994; Verville and Seekins, 1993; Riggle, 1989). Η επιλογή των υλικών αυτών στη διεργασία της κομποστοποίησης γίνεται συνήθως με βάση τη διαθεσιμότητα και την γειννίαση με τη μονάδα επεξεργασίας των οργανικών αποβλήτων (Schaub and Leonard, 1996).

2.4.6 Θρεπτικά συστατικά

Οι μικροοργανισμοί υπεύθυνοι για την εξέλιξη της αερόβιας βιοαποδόμησης της οργανικής ουσίας απαιτούν συγκεκριμένα θρεπτικά στοιχεία για την ανάπτυξη της και για τις μεταβολικές τους διεργασίες. Στα στοιχεία αυτά περιλαμβάνονται ο άνθρακας, το άζωτο, ο φώσφορος και το κάλιο. Η πλειοψηφία των οργανικών αποβλήτων εμπεριέχουν επαρκείς ποσότητες σε θρεπτικά με τον άνθρακα και το άζωτο να αποτελούν τα στοιχεία τα οποία δύναται να επηρεάσουν σε μεγαλύτερο βαθμό τη διεξαγωγή της διεργασίας της κομποστοποίησης με την περίσσεια ή την ανεπάρκεια τους στο υπόστρωμα (EA, 2001).

Ο άνθρακας είναι το στοιχείο το οποίο καλύπτει τις ενεργειακές απαιτήσεις των μικροοργανισμών, υπεύθυνων για την εξέλιξη της διεργασίας, αλλά ταυτόχρονα ένα μέρος του καθίσταται ως βασικό δομικό συστατικό τους. Το άζωτο αποτελεί αναπόσπαστο στοιχείο των πρωτεϊνών, των νουκλεϊκών οξέων, των αμινοξέων, των ενζύμων και των συνενζύμων που είναι απαραίτητα για τη μικροβιακή ανάπτυξη των κυττάρων αποτελώντας το 50% της ξηρής τους μάζας (Gajalakshmi and Abbasi, 2008). Επομένως, η θρεπτική ισορροπία στο υλικό τροφοδοσίας μπορεί να προσδιοριστεί κυρίως με το λόγο του άνθρακα προς το άζωτο (C/N) όπως επισημαίνεται από τους Bernal et al. (2009), εκφράζοντας ουσιαστικά την αναλογία των ατόμων άνθρακα προς τα άτομα αζώτου στο πρότυπο μόριο του αποβλήτου. Η σχέση C/N για τους μικροοργανισμούς έχει αναφερθεί ότι κυμαίνεται μεταξύ 9 έως 12 (Zucconi and de Bertoldi, 1987) ενώ σύμφωνα με τον Alexander (1977) οι μικροοργανισμοί κατά την αποδόμηση των οργανικών ενώσεων αφομοιώνουν το 1/3 περίπου του μεταβολιζόμενου άνθρακα ενώ το υπόλοιπο απελευθερώνεται ως CO₂. Συνεπώς,

προκύπτει ότι η θεωρητικά βέλτιστη αναλογία C/N στο αρχικό υπόστρωμα είναι μεταξύ 27 έως 36. Πράγματι, οι τιμές που αναφέρονται ως βέλτιστες από διάφορους ερευνητές είναι μεταξύ 25 και 35 μέρη άνθρακα για κάθε μέρος αζώτου (Gaur, 2000; Golueke, 1992; Bishop and Godfrey, 1983). Επιπλέον, έχει παρατηρηθεί ότι σε υψηλές τιμές λόγου C/N στο υπόστρωμα (C/N>35), απαιτούνται διαδοχικοί βιοχημικοί κύκλοι για την οξείδωση της περίσσειας του άνθρακα, έως ότου επιτευχθεί ικανοποιητικός λόγος C/N για το μεταβολισμό των μικροοργανισμών (Bernal et al., 1998c; Verdonck, 1988). Αντίθετα, αν οι αρχικές τιμές του λόγου C/N είναι χαμηλές (C/N<10) διαμορφώνονται συνθήκες περίσσειας αζώτου με αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών του, κυρίως υπό μορφή αμμωνίας, ειδικά όταν συντρέχουν ευνοϊκά και άλλες παράμετροι όπως υψηλές τιμές pH και θερμοκρασίας (Διάγραμμα 2.2) (Pagans et al., 2005; Sanchez-Monedero et al., 2001; Reddy et al., 1979). Αξίζει να σημειωθεί ότι σε πρόσφατες μελέτες παρουσιάστηκε ότι η διεργασία της κομποστοποίησης τελείται αποτελεσματικά και σε αναλογίες C/N μικρότερες από 20 (Kumar et al., 2010; Zhu, 2007; Huang et al., 2004). Επομένως, η προσθήκη αζωτούχων και ανθρακούχων οργανικών αποβλήτων δύναται να μειώσει και να αυξήσει αντίστοιχα τον αρχικό λόγο του υποστρώματος. Ενδεικτικοί λόγοι C/N για διαφορετικές ροές οργανικών αποβλήτων που δύναται να επεξεργαστούν βιολογικά δίνονται στον Πίνακα 2.5 στον οποίο προσδιορίζονται τα υλικά τα οποία εμπεριέχουν υψηλή περιεκτικότητα είτε σε άνθρακα είτε σε άζωτο. Συνεπώς για τη ρύθμιση επιθυμητών λόγων C/N απαιτείται η κατάλληλη ανάμιξη οργανικών αποβλήτων ώστε οργανικά υλικά με υψηλή περιεκτικότητα σε άζωτο να αντισταθμίζονται με οργανική ουσία της οποίας η περιεκτικότητα να είναι υψηλότερη σε άνθρακα και αντίστροφα.

Η μεταβολή του λόγου C/N κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης εξαρτάται από την εξέλιξη του άνθρακα, του αζώτου και των ανόργανων μορφών του (π.χ. NO_3^- , NH_4^+) κατά τη διάσπαση τη οργανικής ουσίας του υποστρώματος. Επομένως, η αναλογία C/N διαμορφώνεται από:

- το ρυθμό κατανάλωσης του άνθρακα και του αζώτου κατά τη διάσπαση των οργανικών μακρομορίων του υποστρώματος,
- το βαθμό απωλειών άνθρακα κατά τις βιοξειδωτικές αντιδράσεις, υπό μορφή αερίων εκπομπών (π.χ. CO_2) και
- το βαθμό απωλειών αζώτου που προκύπτουν λόγω της πτητικότητας της αμμωνίας, των διεργασιών της απονιτροποίησης αλλά και της εκχύλισης μέσω των στραγγισμάτων.

Σε γενικά πλαίσια οι απώλειες άνθρακα και αζώτου κατά την αερόβια βιοαποδόμηση της οργανικής ουσίας είναι σημαντικές με πιο σύνηθες φαινόμενο οι απώλειες του άνθρακα να υπερτερούν έναντι αυτών του αζώτου με αποτέλεσμα τη μείωση της αναλογίας C/N στο τελικό προϊόν (Goyal et al., 2005).

Πίνακας 2.5 Ενδεικτικές τιμές C/N ορισμένων βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων

Οργανικά Απόβλητα	C/N			IWMI (2003)
	Diaz et al. (2002)	Diaz and Savage (2007b)	Trautmann and Krasny (1998)	
Κοτσάνι αραβοσίτου	60-73	-	-	
Υπολείμματα φρούτων	20-49	-	20-50	
Φλοιός ρυζιού	113-1120	-	-	
Υπολείμματα λαχανικών	11-13	-	10-20	13
Κοπριά πτηνών-πουλερικών	12-15	15	-	10-18
Κοπριά βοοειδών	11-30	18	-	
Κοπριά αλόγων	22-50	25	20-50	
Σκουπίδια (απορρίμματα τροφών)	14-16	-	15	10-16
Χαρτί (από οικιακά απορρίμματα)	127-178	-	100-200	
Εφημερίδες	-	-	400-900	
Σκουπίδια, απορρίμματα – Οργανικό κλάσμα αστικών απορριμμάτων	34-80	-	-	23-66
Ανεπεξέργαστη ιλύς λυμάτων	5-16	11	-	6-10
Ιλύς λυμάτων πρωτοβάθμιας επεξεργασίας	-	-	-	7-11
Ιλύς λυμάτων δευτεροβάθμιας επεξεργασίας	-	6	-	6-8
Υπολείμματα χλοοκοπής	9-25	-	10-25	
Φυλλώματα	40-80	-	40-80	
Κλαδέματα θάμνων	53	-		
Κλαδέματα δέντρων	16	-	-	
Φλοιοί δέντρων				
-μαλακό ξύλο	-	-	100-400	170-500 υπολείμματα ξυλουργικών διεργασιών
-σκληρό ξύλο	-	-	100-1200	
Υπολείμματα κομμένου ξύλου				
-μαλακό ξύλο	-	-	450-800	
-σκληρό ξύλο	-	-	200-1300	
Πριονίδι	200-750	200-500	200-750	
Άχυρο	-	128-150	50-150	

Άνθρακας

Κατά τη θερμόφιλη φάση της διεργασίας της κομποστοποίησης η περιεκτικότητα του οργανικού άνθρακα στο υπόστρωμα μειώνεται σημαντικά λόγω της βιοαποδόμησης της οργανικής ουσίας από τους μικροοργανισμούς. Στη διάρκεια αυτής της φάσης, ασταθείς οργανικές ενώσεις όπως απλοί υδατάνθρακες, λίπη και αμινοξέα διασπώνται άμεσα ενώ πιο ανθεκτικές ενώσεις όπως η κυτταρίνη, η ημικυτταρίνη και η λιγνίνη διασπώνται μερικώς με μικρότερους ρυθμούς. Καθώς η διεργασία εξελίσσεται ο ρυθμός βιοαποδόμησης του άνθρακα μειώνεται σταδιακά λόγω της ελάττωσης των διαθέσιμων προς άμεση κατανάλωση οργανικών ενώσεων αλλά και λόγω της έναρξης των διεργασιών χουμοποίησης, δηλαδή τη δημιουργία νέων σύνθετων πολυμερικών οργανικών ενώσεων οι οποίες επικρατούν κυρίως κατά το στάδιο ωρίμανσης του υποστρώματος. Η βιοαποδόμηση του υποστρώματος κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης ρυθμίζεται από τη σύσταση και το είδος της οργανικής ουσίας η οποία εκφράζεται με βάση το βαθμό βιοαποδόμησης της (Haug, 1993), ιδιότητα η οποία επηρεάζει το ρυθμό διάσπασης, την έκλυση αερίων εκπομπών, τη διάρκεια της διεργασίας και την απαίτηση σε οξυγόνο. Επομένως, η κομποστοποίηση περιλαμβάνει τη μερική μετατροπή της οργανικής ουσίας σε ανόργανα συστατικά (π.χ. CO₂) οδηγώντας σε απώλειες άνθρακα καθόλη τη διάρκεια της διεργασίας οι οποίες αντισταθμίζονται με τη συνεπακόλουθη αύξηση του βαθμού σταθεροποίησης των εναπομεινάντων οργανικών ενώσεων (Bernal et al., 2009).

Άζωτο

Το άζωτο υπόκειται σε πληθώρα οξειδοαναγωγικών αντιδράσεων κατά τη διεργασία την κομποστοποίησης με συνεπακόλουθη διαμόρφωση ενώσεων με εύρος αριθμών οξειδωσης που κυμαίνεται από +5 (για τα NO_3^-) έως -3 (για την NH_3) (Bothe et al., 2007). Αυτές οι οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις (**Πίνακας 2.6, Εικόνα 2.4**) πραγματοποιούνται με διαφορετικούς τρόπους και από διαφορετικούς μικροοργανισμούς, το σύνολό των οποίων αποτελούν το βιοχημικό κύκλο του αζώτου. Κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης μέρος του οργανικού αζώτου του υποστρώματος μετατρέπεται σε ανόργανες μορφές του (ανοργανοποίηση) με πρώτο στάδιο τη διεργασία της αμμωνιοποίησης (Αντίδραση 1) και την παραγωγή αμμωνιακών (Tiquia and Tam, 2000). Τα αμμωνιακά μετέπειτα είτε απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα ως αμμωνία λόγω της πτητικότητάς της⁽⁶⁾ (Αντίδραση 2) είτε οξειδώνονται, υπό την παρουσία περίσσειας οξυγόνου, σε νιτρικά μέσω της διεργασίας της νιτροποίησης (Αντιδράσεις 3α και 3β) (Bernal et al., 2009). Η ανοργανοποίηση του αζώτου συντελείται παράλληλα με την ακινητοποίησή του (τη μετατροπή του ανόργανου αζώτου σε οργανικό) κατά την οποία οι μικροοργανισμοί του υποστρώματος αφομοιώνουν τις ανόργανες μορφές του για τις βιολογικές τους λειτουργίες (Αντίδραση 4α και 4β) (Kokkora, 2008). Η ισορροπία μεταξύ ανοργανοποίησης και ακινητοποίησης του αζώτου εξαρτάται από την περιεκτικότητά του στο υπόστρωμα και κατ' επέκταση από το λόγο C/N. Συνθήκες κατά τις οποίες επικρατούν υψηλοί λόγοι C/N υπερισχύει η διεργασία της ακινητοποίησης λόγω ανεπάρκειας αζώτου (περίσσεια άνθρακα) ενώ σε χαμηλού λόγους C/N υπερισχύει η ανοργανοποίηση λόγω της περίσσειας αζώτου (ανεπάρκεια άνθρακα) (Kokkora, 2008).

Πίνακας 2.6: Οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις του αζώτου κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης (Henry et al., 1999)

Αντιδράσεις	Διεργασία	Αντίδραση
$R - \text{NH}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{H}^+ \rightarrow R - \text{OH} + \text{NH}_4^+$	Αμμωνιοποίηση	1
$\text{NH}_4^+ (\text{κόμποστ}) \leftrightarrow \text{NH}_3 (\text{κόμποστ}) + \text{H}^+ \leftrightarrow \text{NH}_3 (\text{αέριο})$ $\leftrightarrow \text{NH}_3$	Πτητικότητα NH_3	2
$\text{NH}_4^+ + 1.5\text{O}_2 (\text{διαλυτό}) \rightarrow \text{NO}_2^- + \text{H}_2\text{O} + 2\text{H}^+$	Νιτροποίηση (α)	3α
$\text{NO}_2^- + 0.5\text{O}_2 (\text{διαλυτό}) \rightarrow \text{NO}_3^-$	Νιτροποίηση (β)	3β
$\text{NO}_3^- + 2e \rightarrow \text{NO}_2^- + 6e \rightarrow \text{NH}_4^+$	Ακινητοποίηση (α)	4α
$\text{NH}_4^+ + R - \text{OH} \rightarrow R - \text{NH}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{H}^+$	Ακινητοποίηση (β)	4β
$\text{NO}_3^- + 1.25\text{HCHO} \rightarrow 0.5\text{N}_2 + 0.75\text{H}_2\text{O} + 1.25\text{CO}_2 + \text{OH}$	Απονιτροποίηση σε N_2	5α
$\text{NO}_3^- + \text{HCHO} \rightarrow 0.5\text{N}_2\text{O} + 0.5\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + \text{OH}$	Απονιτροποίηση σε N_2O	5β

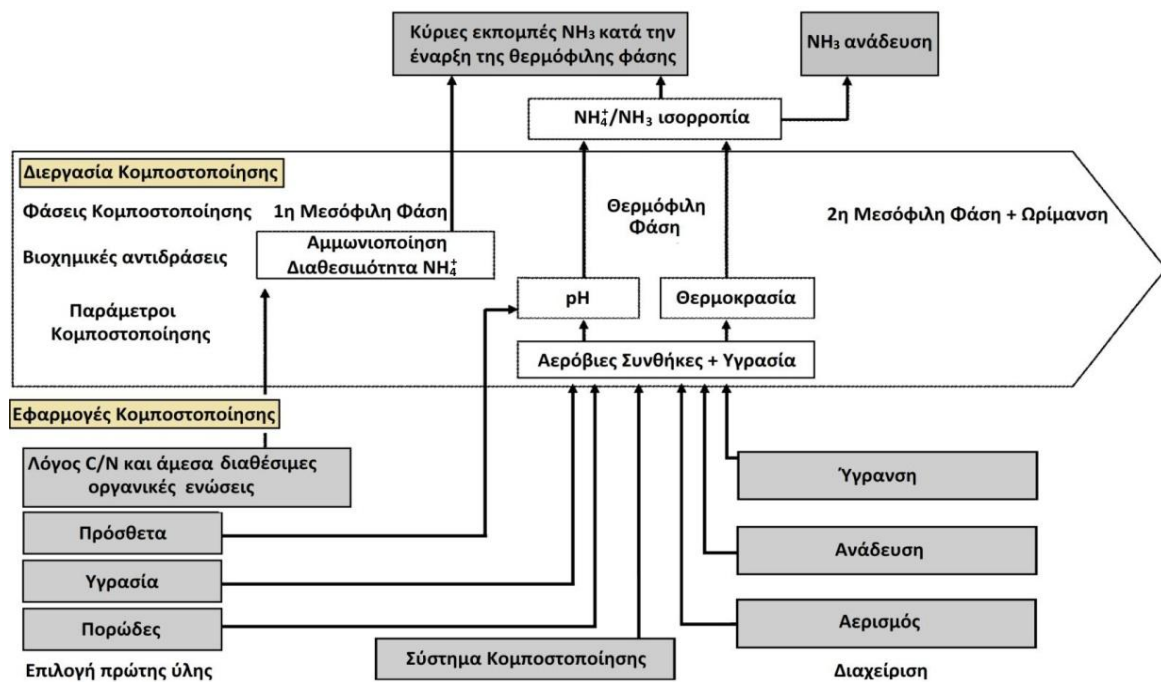
R=οργανική ένωση

Στα αρχικά στάδια της κομποστοποίησης οργανικές αζωτούχες ενώσεις του υποστρώματος (πρωτεΐνες, λιπίδια, ουρία, ουρικό οξύ κ.α.) μεταβολίζονται σε αμμωνιακά, με τη μέγιστη συγκέντρωσή τους να επιτυγχάνεται κατά την περίοδο όπου

⁽⁶⁾ Όταν συντρέχουν συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και αλκαλικού pH η πτητικότητα της αμμωνίας είναι εντονότερη (Verdonck 1988)

συντελούνται μέγιστα θερμοκρασιακά επίπεδα και διαμόρφωση αλκαλικού περιβάλλοντος ($\text{pH} > 7.5$). Παράλληλα στο ίδιο στάδιο η διεργασία της νιτροποίησης είναι σημαντικά περιορισμένη λόγω της αδράνειας των αυτότροφων νιτροποιητικών μικροοργανισμών (αυτότροφη νιτροποίηση) σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και pH ενώ ενδεχόμενη αύξηση στη συγκέντρωση των νιτρικών οφείλεται αποκλειστικά στην ετερότροφη νιτροποίηση (Insam and de Bertoldi, 2007; Tiquia, 2002; de Bertoldi et al., 1983). Επιπλέον, οι συνθήκες αυτές ευνοούν την πτητικότητα της αμμωνίας και τις απώλειες αζώτου στο υπόστρωμα (Bernal et al., 2009; Stylianou et al., 2008). Οι κύριοι ρυθμιστικοί παράγοντες της πτητικότητας της αμμωνίας είναι αυτοί οι οποίοι εμπλέκονται στις αντιδράσεις των διεργασιών (α) του σχηματισμού αμμωνιακών, (β) της αποπρωτονίωσης των αμμωνιακών σε αμμωνία, (γ) της μετατροπής της διαλυτής αμμωνίας του υποστρώματος σε αέρια αμμωνία και (δ) τη μεταφορά της αέριας αμμωνίας του υποστρώματος στην ατμόσφαιρα (Αντίδραση 2). Επομένως, οι παράμετροι ελέγχου των απωλειών αζώτου υπό μορφή αμμωνίας περιλαμβάνουν τη σύνθεση του αρχικού μίγματος (περιεκτικότητα σε ολικό άζωτο και άνθρακα, λόγος C/N, μέγεθος σωματιδίων - πορώδες) και τις συνθήκες κομποστοποίησης (θερμοκρασία, pH , ανάδευση). Στη μετέπειτα εξέλιξη της διεργασίας της κομποστοποίησης και όταν η θερμοκρασία παρουσιάσει τιμές χαμηλότερες των θερμοφίλων ($< 40\text{C}^\circ$) τότε λαμβάνει χώρα η νιτροποίηση, η ένταση και ο ρυθμός τη οποίας εξαρτάται από την παρουσία οξυγόνου και τη συγκέντρωση αμμωνιακών (de Guardia et al., 2008).

Επιπλέον, απώλειες αζώτου δύναται να εμφανιστούν μέσω των διεργασιών της απονιτροποίησης και της εκχύλισης. Η απονιτροποίηση απαιτεί την επικράτηση, έστω και τοπικά, ανοξικών συνθηκών (He et al., 2000), κατά τις οποίες τα νιτρικά ανάγονται κυρίως σε N_2 και N_2O σε όξινο περιβάλλον όπως παρουσιάζεται στις Αντιδράσεις (5α) και (5β) αντίστοιχα (Gajalakshmi and Abbasi, 2008; Germon and Couton, 1999; Mahimairaja et al., 1995). Αξίζει να σημειωθεί ότι οι απώλειες αζώτου οφειλόμενες στη διεργασία της απονιτροποίησης είναι σημαντικά μικρότερες συγκριτικά με αυτές της πτητικότητας της αμμωνίας (Parkinson et al., 2004; Martins and Dewes, 1992) ενώ οι απώλειες λόγω εκχύλισης μπορούν να περιοριστούν με τη ρύθμιση και τον έλεγχο της περιεχόμενης υγρασίας καθώς και με κατάλληλα συστήματα συλλογής και ανακύκλωσης των στραγγισμάτων στο υπόστρωμα (Bernal et al., 2009). Στα τελικά στάδια της κομποστοποίησης σχηματίζονται σταθερότερες μορφές αζώτου στο υπόστρωμα οι οποίες υπόκεινται σε μικρότερο βαθμό σε διεργασίες πτητικότητας, απονιτροποίησης και εκχύλισης μειώνοντας σημαντικά το ρυθμό απωλειών αζώτου (Bernal et al., 2009). Στην Εικόνα 2.4 παρουσιάζονται οι διεργασίες που περιγράφηκαν παραπάνω οι οποίες επιδρούν στις απώλειες αζώτου υπό τη μορφή αμμωνίας στα εξελικτικά στάδια της κομποστοποίησης. Η διαφυγή του αζώτου έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ελλείμματος ως προς την επιθυμητή περιεκτικότητα του υπό επεξεργασία μέσου σε θρεπτικά συστατικά, υποβαθμίζοντας παράλληλα την ποιότητα του παραγόμενου κόμποστ (Hargreaves et al., 2008; Zavala et al., 2005) και συμβάλλοντας στο φαινόμενο του θερμοκηπίου με τις ατμοσφαιρικές εκπομπές (π.χ. N_2O) (Bernstad et al., 2010; Mahimairaja et al., 1994; Sibbesen and Lind, 1993; Martins and Dewes, 1992).



Εικόνα 2.4: Απώλειες αμμωνίας κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης (Peigné and Girardin, 2004)

Επειδή το άζωτο αποτελεί βασική παράμετρος ως προς την αγρονομική αξία του τελικού προϊόντος η μείωση των απωλειών αυτού κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης αποτέλεσε αντικείμενο έρευνας πολλών επιστημόνων. Εναλλακτικοί τρόποι έχουν μελετηθεί για τον περιορισμό των απωλειών αζώτου ως αμμωνία. Ορισμένοι από αυτούς περιλαμβάνουν τη χρήση προσθέτων με σκοπό τη ρύθμιση του αρχικού λόγου C/N του υποστρώματος. Αναφορικά οι Wan et al. (1999), Paredes et al. (1996a), Morisaki et al. (1989) και Witter and Lopez-Real (1988) συμπεραίνουν ότι τα λιγνοκυτταρινούχα υλικά ως διογκωτικά μέσα μειώνουν τις απώλειες αζώτου κατά την κομποστοποίηση ιλύος. Αντίθετα αποτελέσματα παρουσιάζονται από τους Eklind and Kirchmann (2000b) κατά τους οποίους η χρήση πρόσθετων υλικών όπως άχυρο, χαρτί, φύλλα, ξύλο από κωνοφόρα και μη δέντρα κ.α., δεν συντέλεσαν ουσιαστικά στον περιορισμό της μείωσης των απωλειών αζώτου κατά την κομποστοποίηση ιλύος. Επί αυτού, οι Bernal et al. (2009) αναφέρουν ότι τα πρόσθετα υλικά πρέπει να είναι πλούσια σε άμεσα διαθέσιμο άνθρακα για τη μείωση του επιπέδου των απωλειών αζώτου κατά την κομποστοποίηση οργανικών αποβλήτων με υψηλή περιεκτικότητα σε άζωτο. Επιπλέον, αρκετοί ερευνητές αναφέρονται στη χρήση ανόργανων πρόσθετων για την προσρόφηση και αναγωγή της αμμωνίας με σκοπό τη μείωση των απωλειών, με επικρατέστερο υλικό αυτό του ορυκτού ζεόλιθου (Al-Jabi et al., 2008; Venglovsky et al., 2005; Liu and Lo, 2001; Bernal et al., 1993; Witter and Lopez-Real, 1988).

2.5 Μικροβιολογία Αερόβιας Αποδόμησης

Η αποδόμηση του ΟΥ πραγματοποιείται κυρίως από τη δράση μικροοργανισμών και δευτερευόντως από αποδομητές μεγαλύτερου μεγέθους. Οι τρεις βασικές ομάδες μικροοργανισμών αφορούν σε βακτήρια, μύκητες και ακτινομύκητες, ενώ αποδομητές

μεγαλύτερου μεγέθους, όπως έντομα ή γαιοσκώληκες, απαντώνται μόνο κατά τα τελικά στάδια των ΔΑΑ (ψυχρόφιλη φάση, σταθεροποίηση, ωρίμανση).

Η ακριβής γνώση του είδους, των χαρακτηριστικών και των λειτουργιών των οργανισμών που αναπτύσσονται και δρουν κατά τις επιμέρους διεργασίες βιοαποδόμησης, αποτελεί σημαντικό παράγοντα βελτιστοποίησης ως προς την απόδοση των αντίστοιχων συστημάτων σε οποιαδήποτε κλίμακα. Ειδικότερα, η βελτιστοποίηση κάθε παραμέτρου που διέπει τις ΔΑΑ θα πραγματοποιείται με γνώμονα τις επιμέρους απαιτήσεις ομαλής ανάπτυξης και μεταβολισμού για κάθε μια από τις τρεις κύριες ομάδες μικροοργανισμών, ανάλογα με το εξελικτικό στάδιο των ΔΑΑ που απαντώνται.

Ανεξάρτητα από τον τύπο των μικροβιακών πληθυσμών και τη φάση των ΔΑΑ, ο κύκλος ζωής των μικροοργανισμών εμφανίζει αναλογίες σχετικά με τον τρόπο ανάπτυξης, δράσης και εξολόθρευσής τους. Συγκεκριμένα, ο πολλαπλασιασμός των μικροβιακών πληθυσμών ακολουθεί εκθετικό ρυθμό και πραγματοποιείται με διχοτόμηση μιας 'ώριμης' κυψέλης σε δύο μικρότερες κ.ο.κ.. Κατά τις ΔΑΑ, όταν οι παράμετροι που διέπουν την εξέλιξη των διεργασιών βελτιστοποιηθούν, έχει υπολογιστεί ότι σε χρονικό διάστημα μικρότερο των επτά (7) ωρών, ο αριθμός των μικροοργανισμών προσεγγίζει τα 1,000,000 στελέχη ανά γραμμάριο ΟΥ⁷.

Παρακάτω, παρατίθεται ενδεικτικός Πίνακας στον οποίο περιγράφονται αριθμητικά οι πληθυσμοί των βακτηρίων, των μυκήτων και των ακτινομυκήτων ανά γραμμάριο νωπής μάζας ΟΥ, για κάθε μια από τις τρεις κύριες φάσεις των ΔΑΑ (μεσόφιλη, θερμόφιλη και ψυχρόφιλη).

Πίνακας 2.7: Αριθμοί στελεχών ανά gr νωπής μάζας και φάση διεργασιών (U.S. Environmental Protection Agency, 1994)

Μικροοργανισμοί		Αριθμοί ανά gr νωπής μάζας και φάση διεργασιών		
		Μεσόφιλη	Θερμόφιλη	Ψυχρόφιλη
Βακτήρια	Μεσόφιλα	10 ⁸	10 ⁶	10 ¹¹
	Θερμόφιλα	10 ⁴	10 ⁹	10 ⁷
Μύκητες	Μεσόφιλοι	10 ⁶	10 ³	10 ⁵
	Θερμόφιλοι	10 ³	10 ⁷	10 ⁶
Ακτινομύκητες	Θερμόφιλοι	10 ¹	10 ⁸	10 ¹

Κατά τις ΔΑΑ, ο πολλαπλασιασμός, η ανάπτυξη και η εξολόθρευση των μικροβιακών πληθυσμών, πραγματοποιείται σε τέσσερα (4) διακριτά στάδια. Τα στάδια αυτά αφορούν στις ακόλουθες χρονικές περιόδους (Aliss et al., 2005):

- Περίοδος καθυστέρησης.
Το στάδιο αυτό, αναφέρεται στο χρονικό διάστημα που απαιτείται προκειμένου οι κυψέλες μικροβιακών πληθυσμών να εξαπλωθούν σε όλο τον όγκο της σωρού. Η περίοδος αυτή, ξεκινά με την τροφοδοσία ενός συστήματος με ποσότητα ΟΥ και ελαχιστοποιείται όταν πραγματοποιείται μόλυνση του υπό επεξεργασία υλικού με μικροοργανισμούς.
- Περίοδος εκθετικής αύξησης.
Οι μικροοργανισμοί, έχοντας εξαπλωθεί σε όλο τον διαθέσιμο όγκο του ΟΥ, πολλαπλασιάζονται με ταχείς ρυθμούς. Η εκθετική αύξηση οφείλεται στην υψηλή

⁷ Αφορά σε ποσότητα διατροφικών αποβλήτων.

διαθεσιμότητα οργανικών μακρομορίων που αποτελούν 'πηγή' θρεπτικών συστατικών για τους μικροοργανισμούς. Έχει εξακριβωθεί πειραματικά ότι, κατά τη φάση αυτή, ο πληθυσμός των μικροοργανισμών διπλασιάζεται κάθε είκοσι (20) λεπτά.

- Περίοδος σταθεροποίησης.
Κατά την περίοδο αυτή, ο ρυθμός ανάπτυξης εξισώνεται με το ρυθμό εξολόθρευσης των μικροβιακών πληθυσμών. Η σταθεροποίηση του αριθμού των μικροβιακών στελεχών, ανάλογα με τη φάση ΔΑΑ, οφείλεται στη μείωση των συστατικών που αποτελούν 'πηγή' κατανάλωσης από δεδομένη ομάδα μικροοργανισμών. Ωστόσο, η σταθεροποίηση των μικροβιακών πληθυσμών μπορεί να αποτελεί και δείκτη για την μη ομαλή εξέλιξη των ΔΑΑ, λόγω αιτιών που σχετίζονται με μια ή περισσότερες εκ των παραμέτρων που διέπουν την εξέλιξη των διεργασιών (ανεπάρκεια όγκου ΟΥ, χαμηλές θερμοκρασίες, αναερόβιες συνθήκες κ.ά.).
- Περίοδος εξολόθρευσης.
Κατά την περίοδο αυτή, ο ρυθμός εξολόθρευσης των μικροβιακών πληθυσμών είναι μεγαλύτερος του ρυθμού ανάπτυξης. Στις περιπτώσεις όπου οι ΔΑΑ εξελίσσονται ομαλά, η περίοδος εξολόθρευσης σηματοδοτεί τη μετάβαση μεταξύ διαδοχικών φάσεων (π.χ. από τη θερμόφιλη στην ψυχρόφιλη). Κατά την περάτωση των ΔΑΑ, ένα στοιχείο που χαρακτηρίζει την περίοδο εξολόθρευσης είναι η εμφάνιση αποδομητών μεγαλύτερου μεγέθους (σκώληκες, κάνθαροι κ.ά.).

Η μελέτη της μικροβιολογίας των ΔΑΑ, επικεντρώνεται στην ταυτοποίηση της μικροβιακής πανίδας, δηλαδή, στον ακριβή προσδιορισμό του γένους και του αριθμού των μικροβιακών πληθυσμών, είτε αφορούν σε βακτήρια, είτε αφορούν σε μύκητες και ακτινομύκητες. Για το σκοπό αυτό, ανά τακτά χρονικά διαστήματα λαμβάνονται δείγματα από το σωρό του υπό επεξεργασία μέσου και ελέγχονται μέσω της αέριας χρωματογραφίας. (Μιχαλόπουλος 2010)

2.5.1 Βακτήρια

Τα βακτήρια είναι μικροοργανισμοί, μονοκύτταροι ή πολυκύτταροι, που εμφανίζουν υψηλούς δείκτες ανθεκτικότητας σε ένα μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος. Η κύρια κατηγοριοποίηση των βακτηρίων γίνεται με κριτήριο το σχήμα των κυψελών τους, και βάσει αυτού επιμερίζονται σε κόκκους (*cocci*) που έχουν σφαιροειδή μορφή και βακίλους (*bacilli*) που οι αντίστοιχες κυψέλες έχουν διαμήκη σχήματα (π.χ. ράβδοι) (Ishii & Takii, 2003). Ως προς το περιβάλλον ανάπτυξής τους, τα βακτήρια χωρίζονται σε αποδομητές και ξενιστές. Οι αποδομητές είναι υπεύθυνοι για τη διάσπαση των οργανικών μακρομορίων που συνθέτουν κάθε μορφής οργανική ύλη, ενώ οι ξενιστές, παρότι επίσης αποδομούν οργανική ύλη, αφορούν σε βακτηριακούς πληθυσμούς που ενδημούν σε έμβια ύλη (ανθρώπους, ζώα και φυτά) (Palmisano & Barlaz, 1999). Για τους τύπους βακτηρίων που δρουν κατά τις ΔΑΑ, το μέσο μέγεθος των κυψελών τους κυμαίνεται περί τα 2000 nm (Aliss et al., 2005).

Αναλυτικότερα, οι βασικές ομάδες βακτηρίων που οι κυψέλες τους έχουν μορφή κόκκων, περιλαμβάνουν (Swan et al., 2003):

- μικρόκοκκους,
- διπλόκοκκους,
- στρεπτόκοκκους,

- σταφυλόκοκκους,
- σαρκίνια κ.ά.

Ως προς τα βακτήρια που ανήκουν στην κατηγορία των βακίλων, περιλαμβάνουν (Worthington, 1996):

- ράβδους
- σπειρύλια
- δοκάνια κ.ά.

Κατά τις ΔΑΑ, τα βακτήρια κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τη φάση των διεργασιών στην οποία καταγράφονται οι μέγιστοι πληθυσμοί τους. Ως εκ τούτου, χωρίζονται σε:

- ψυχρόφιλα,
- μεσόφιλα και
- θερμόφιλα βακτήρια.

Ανάλογα με τη διαδοχή των φάσεων κατά τις ΔΑΑ, αρχικά επικρατούν πληθυσμοί μεσόφιλων βακτηρίων. Η δράση των βακτηρίων αυτών είναι βέλτιστη για θερμοκρασίες που κυμαίνονται μεταξύ 20 και 50 °C και αφορά κυρίως στην αποδόμηση των εύκολα διασπασίμων οργανικών ενώσεων (Palmisano & Barlaz, 1999). Κατά την περίοδο εκθετικής αύξησης, η έντονη δραστηριότητα των μεσόφιλων βακτηρίων οδηγεί σε βαθμιαία αύξηση της θερμοκρασίας γεγονός που, αφενός σηματοδοτεί την έναρξη της θερμόφιλης φάσης, αφετέρου, εξολοθρεύει τους πληθυσμούς των βακτηρίων αυτών τα οποία εν γένει δεν είναι ανθεκτικά σε υψηλές θερμοκρασίες.

Τα θερμόφιλα βακτήρια αναπτύσσονται και δρουν σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται μεταξύ 45 και 75 °C. Η αύξηση στη θερμοκρασία ενός σωρού ΟΥ κατά τις ΔΑΑ οφείλεται στην έντονη δραστηριότητα αποδόμησης σχετικά δυσδιάσπαστων οργανικών μακρομορίων. Τα θερμόφιλα βακτήρια, μαζί με ορισμένους αντίστοιχους πληθυσμούς μυκήτων, συμμετέχουν στη διάσπαση των πλέον πολύπλοκων οργανικών ενώσεων, όπως τα μακρομόρια κυτταρίνης και λιγνίνης. Μόλις τα θερμόφιλα βακτήρια αποδομήσουν την πλειοψηφία των πολύπλοκων οργανικών ενώσεων, η ένταση της μικροβιακής δραστηριότητας μειώνεται και κατ' επέκταση, μειώνεται και η θερμοκρασία της σωρού, γεγονός που τα οδηγεί, είτε σε εξολόθρευση, είτε σε αδρανοποίηση (US Environmental Protection Agency, 1994). Η δράση των βακτηριακών πληθυσμών κατά τη θερμόφιλη φάση, αποτυπώνεται και μακροσκοπικά στη μορφή του ΟΥ. Με το πέρας της εν λόγω φάσης, παρατηρείται μερική συρρίκνωση του όγκου της σωρού και παράλληλα, ταχεία αλλαγή του χρώματος της εξωτερικής του επιφάνειας (O'Leary & Walsh, 1995).

Με το πέρας της θερμόφιλης φάσης, η θερμοκρασία της σωρού μειώνεται ραγδαία και βαθμιαία επικρατούν τα ψυχρόφιλα βακτήρια. Οι εν λόγω μικροοργανισμοί, με θερμοκρασιακό εύρος ανάπτυξης και δράσης που κυμαίνεται μεταξύ -10 και 30 °C, αποδομούν περαιτέρω όσες εκ των οργανικών ενώσεων παρέμειναν αδιάσπαστες από τις προηγούμενες δύο ομάδες βακτηρίων (O'Leary & Walsh, 1995). Κατά την ψυχρόφιλη φάση, ενεργοποιούνται και κυψέλες μεσόφιλων βακτηρίων καθώς η ανάπτυξή τους ευνοείται από τη στάθμη της θερμοκρασίας στη σωρό.

Για κάθε ομάδα βακτηρίων που αναπτύσσεται και δρα σε συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασιών, η έντονη δραστηριότητα αποδόμησης εξαρτάται από τις κρίσιμες παραμέτρους που διέπουν τις ΔΑΑ. Η βελτιστοποίηση των τιμών που εκφράζουν τις εν λόγω παραμέτρους, διασφαλίζει τις επιθυμητές συνθήκες για τις δράσεις αποδόμησης ανεξάρτητα από τη φάση των ΔΑΑ.

2.5.2 Μύκητες

Η εξάπλωση των μυκήτων στον όγκο του ΟΥ πραγματοποιείται μέσω ινωδών απολήξεων γνωστών στο σύνολό τους ως μυκήλια. Ο ρόλος του μυκηλίου στους μύκητες είναι ανάλογος με αυτόν των ριζών στους φυτικούς οργανισμούς. Στην άλλη άκρη του κυρίως σώματος των μυκήτων βρίσκεται το αναπαραγωγικό όργανο, γνωστό ως καρπόσωμα, εντός του οποίου περιέχονται οι σπόροι. Οι μύκητες είναι αποδομητές σχετικά δυσδιάσπαστων οργανικών μακρομορίων και η διάχυση των σπόρων δια μέσω της σωρού πραγματοποιείται, είτε κατά την επέκταση του μυκηλίου, είτε κατά τις εργασίες ανάδευσης. Επίσης, σε 'ανοικτά' συστήματα ΔΑΑ όπου εφαρμόζονται δυναμικές συνθήκες αερισμού, η διάχυση των σπόρων ευνοείται από την κίνηση των αέριων ρευμάτων (Swan et al., 2003).

Παρά το σημαντικό ρόλο που διαδραματίζουν σε κάθε φάση των διεργασιών, εκτός από ορισμένες ομάδες θερμόφιλων μυκήτων, οι μικροοργανισμοί αυτοί, εν γένει, δεν είναι τόσο ανθεκτικοί όπως οι πληθυσμοί των βακτηρίων, καθώς δεν μπορούν να δράσουν σε ακραία ψυχρά ή θερμά περιβάλλοντα με επακόλουθο είτε να αδρανοποιούνται, είτε να εξολοθρεύονται. Επιπλέον, οι μύκητες είναι εξαιρετικά ευαίσθητοι σε θερμοκρασιακές μεταβολές (Sundberg, 2003).

Οι κυριότερες ομάδες μυκήτων που αναπτύσσονται και δρουν σε ποσότητες οργανικών αποβλήτων κατά τις ΔΑΑ, ενδεικτικά περιλαμβάνουν πληθυσμούς από τα ακόλουθα είδη (Swan et al., 2003):

- *Cladosporium spp.*,
- *Alternaria spp.*,
- *Verticillium spp.*,
- *Termomycetes spp.*,
- *Aspergillus spp.* και ειδικότερα *Aspergillus fumigatus*,
- *Eurotium spp.*,
- *Penicillium spp.* και ειδικότερα *Penicillium durontii*,
- *Trichoderma spp.*,
- *Absidia spp.*,
- *Mucor spp.* και
- *Rhizopus spp.*

Οι πληθυσμοί των μυκήτων, κατά τις λειτουργίες μεταβολισμού τους αυξάνουν βαθμιαία τη θερμοκρασία της σωρού ΟΥ. Οι πλέον ανθεκτικοί εξ αυτών μπορούν να επιβιώσουν σε θερμοκρασίες μέχρι και 65 °C σε μορφή σπόρων. Ωστόσο, η αποδοτική δράση των μυκήτων παρεμποδίζεται για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 55 °C (Sundberg, 2003).

Κατά τις ΔΑΑ, ο συνηθέστερα απαντώμενος μύκητας ανήκει στο γένος *Aspergillus fumigatus* και κατά κύριο λόγο διασπά τα σύνθετα μακρομόρια κυτταρίνης και ημι-κυτταρινών. Η βέλτιστη θερμοκρασία για μεγιστοποίηση των δράσεων αποδόμησης είναι 37 °C ενώ, το θερμοκρασιακό εύρος στο οποίο μπορεί να πολλαπλασιάζεται κυμαίνεται μεταξύ 30 και 52 °C. Ως εκ τούτου, ο μύκητας αυτός δρα κυρίως κατά τη μεσόφιλη και δευτερευόντως, κατά την ψυχρόφιλη φάση. Ένα βασικό χαρακτηριστικό που αφορά στον βιολογικό κύκλο του μύκητα *Aspergillus fumigatus*, είναι ο έντονος πολλαπλασιασμός με παραγωγή πλήθους σπόρων μέσης διαμέτρου 2-3 μm (US Environmental Protection Agency, 1994). Ανάλογη δράση έχουν και άλλες ομάδες μυκήτων του γένους *Aspergillus niger* και *Trichoderma reesei*, οι οποίοι δρουν ως

αποδομητές μακρομορίων κυτταρίνης, ημι-κυτταρίνης και λιγνίνης (Mukhtar et al., 2004). Ωστόσο, όταν εκτεθούν σε θερμοκρασίες μεταξύ 60 και 70 °C για χρονικό διάστημα 2-3 ώρες, εξολοθρεύονται (Jereb, 2004).

Γενικότερα, η δράση των μυκήτων εντοπίζεται κυρίως κατά τη μεσόφιλη και ψυχρόφιλη φάση. Προκειμένου για 'ανοικτά' συστήματα βιοαποδόμησης, η δράση των μεσόφιλων και ψυχρόφιλων μυκήτων, περιορίζεται χωρικά σε μια καθορισμένη και ευδιάκριτη ζώνη στα εξωτερικά στρώματα της σωρού, η οποία έχει πάχος που κυμαίνεται μεταξύ 5 και 15 cm και λόγω της μικροβιακής δραστηριότητας αποκτά μια εμφάνιση φαιού χρώματος. Οι δραστηριότητες αποδόμησης του ΟΥ από τους μύκητες, λαμβάνουν χώρα στην εν λόγω περιοχή, ενώ ταυτόχρονα, στον πυρήνα της σωρού επικρατούν οι θεرمόφιλες συνθήκες (Martin, 1991). Λόγω του γεγονότος ότι, οι μύκητες δεν είναι ιδιαίτερα ανθεκτικοί στις υψηλές θερμοκρασίες του πυρήνα των διεργασιών, ενδεχόμενη ανάδευση της σωρού παρεμποδίζει τη δράση και ανάπτυξη των μικροοργανισμών αυτών. (Μιχαλόπουλος 2010)

Εξάιρεση αποτελούν ορισμένες ομάδες μυκήτων που δρουν σε θεرمόφιλο θερμοκρασιακό περιβάλλον. Το μέσο μέγεθος των σπόρων για τους μύκητες αυτούς, δεν ξεπερνά τα 7 μm και κατά το πέρας της θεرمόφιλης φάσης, οι εν λόγω μύκητες κάνουν την εμφάνισή τους και διασπούν τα σύνθετα μακρομόρια της λιγνίνης και της κυτταρίνης (Aliss et al., 2005). Τα μακρομόρια αυτά μπορούν να διασπαστούν αποτελεσματικά μόνον εφόσον έχει προηγηθεί πλήρης διάσπαση των απλούστερων οργανικών μορίων από τους πληθυσμούς των βακτηρίων κατά συνέπεια, η δράση των θεرمόφιλων μυκήτων συμπίπτει χρονικά με την αναγκαιότητα διάσπασης ενώσεων με περισσότερο συμπαγείς οργανικές αλυσίδες μορίων. Η εύρυθμη ανάπτυξη και δράση των θερμοφιλικών μυκήτων εξασφαλίζεται σε θερμοκρασιακό εύρος μεταξύ 50 και 65 °C (Palmisano & Barlaz, 1999).

2.5.3 Ακτινομύκητες

Οι ακτινομύκητες κάνουν την εμφάνισή τους στα αρχικά στάδια της μεσόφιλης και κατά την ψυχρόφιλη φάση. Η δράση τους έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία φαιού χρώματος στην εξωτερική επιφάνεια της σωρού. Επίσης, προσδίδουν στο τελικώς παραγόμενο compost της ευχάριστη οσμή του νοτισμένου χώματος. Οι ακτινομύκητες αποδομούν κυρίως τις οργανικές χημικές ενώσεις που συγκροτούν τα ξυλώδη υλικά της σωρού και εμφανίζονται αρκετά ανθεκτικοί κυρίως στις χαμηλές θερμοκρασίες (Polomski, 2003).

Οι θεرمόφιλοι ακτινομύκητες αναπτύσσονται και δρουν αποτελεσματικά σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται μεταξύ 30 και 60 °C, για σωρούς ΟΥ όπου επικρατούν σχετικά υψηλά επίπεδα υγρασίας. Επιπλέον, αποτελούν δείκτες για τη διάχυση των θεرمόφιλων συνθηκών στα επιμέρους τμήματα της σωρού, καθώς η απουσία τους καταδεικνύει την ύπαρξη θεرمόφιλων συνθηκών.

Ο πολλαπλασιασμός των ακτινομυκήτων πραγματοποιείται μέσω σπόρων διαμέτρου 1-3 μm οι οποίοι μεταφέρονται δια μέσω του όγκου του ΟΥ, είτε μέσω του μυκηλίου, είτε κατά την ανάδευση, ή, προκειμένου για 'ανοικτά' συστήματα με δυναμικές συνθήκες αερισμού, μέσω του ρεύματος αέρα. Οι συνηθέστερα απαντώμενοι ακτινομύκητες ανήκουν στα είδη (Swan et al., 2003):

- *Saccharopolyspora (Faenia) rectivirgula*,
- *Saccharomonospora spp.* και ιδιαίτερα

- ✓ *Saccharomonospora viridis*,
- ✓ *Thermoactinomyces thalprophilus* και
- ✓ *Thermoactinomyces vulgaris*.
- *Thermomonospora spp.*

Κατά τη μεσόφιλη φάση και ιδιαίτερα στα πρώτα στάδιά της, εμφανίζονται ορισμένοι πληθυσμοί ακτινομυκήτων, οι οποίοι ωστόσο γρήγορα καταστρέφονται καθώς δεν μπορούν να επιβιώσουν στις αυξητικές τάσεις της θερμοκρασίας, λόγω της δραστηριότητας των μεσόφιλων βακτηρίων. Ο κυριότερος εκπρόσωπος των μεσόφιλων ακτινομυκήτων ανήκει στο είδος *Streptomyces* (Palmisano & Barlaz, 1999).

Οι ακτινομύκητες εμφανίζονται ως κυρίαρχοι αποδομητές του ΟΥ κατά την ψυχρόφιλη φάση. Μάλιστα, ο ρυθμός πολλαπλασιασμού τους είναι αντιστρόφως ανάλογος με τη μέση θερμοκρασία κατά τη φάση αυτή. Τα εναπομείναντα μόρια κυτταρίνης και λιγνίνης, αποδομούνται από τους πληθυσμούς ακτινομυκήτων και κατά τη φάση ωρίμανσης του compost, οι σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες που επικρατούν ευνοούν την ανάπτυξη, τον πολλαπλασιασμό και τη δράση των εν λόγω μικροοργανισμών.

2.5.4 Άλλοι Αποδομητές

Εκτός από τους μικροβιακούς πληθυσμούς που αφορούν στις ποικίλες ομάδες βακτηρίων, μυκήτων και ακτινομυκήτων, στις ΔΑΑ συμμετέχει και ένα πλήθος μη μικροβιακών οργανισμών που ορίζονται ως αποδομητές μεγάλου μεγέθους. Οι οργανισμοί αυτοί δραστηριοποιούνται κατά τα τελευταία στάδια των διεργασιών βιοαποδόμησης και ειδικότερα κατά την ψυχρόφιλη φάση, κατά τη φάση σταθεροποίησης και κατά την ωρίμανση του compost. Τρέφονται με τα υπολείμματα αδιάσπαστων οργανικών ενώσεων και τη βιομάζα των μικροβιακών πληθυσμών (βακτήρια και μύκητες) (Polomski, 2003).

Οι κυριότεροι τύποι μη μικροβιακών οργανισμών που απαντώνται κατά την βιοαποδόμηση, αφορούν σε (US Environmental Protection Agency, 1994):

- Νηματώδεις σκώληκες.
Οι νηματώδεις σκώληκες αποτελούν τον συνηθέστερα απαντώμενο τύπο ασπόνδυλων οργανισμών του εδάφους. Έχουν μήκος μικρότερο του ενός χιλιοστού και τρέφονται κυρίως με πληθυσμούς βακτηρίων, πρωτόζωα και σπόρους μυκήτων. Η παρουσία νηματωδών σκωλήκων στις περισσότερες περιπτώσεις αναβαθμίζει την ποιότητα του εδάφους.
- Ακάρεα (Sundberg, 2003).
Τα συγκεκριμένα ασπόνδυλα τρέφονται κυρίως από το πλέον ζυμώσιμο κλάσμα του ΟΥ. Λόγω του υψηλότερου ρυθμού αναπαραγωγής τους, είναι επιβλαβή για τις καλλιέργειες αλλά η δράση τους κατά τις ΔΑΑ είναι επιθυμητή.
- Σκώροι.
Μαζί με τους νηματώδεις σκώληκες και τα ακάρεα αποτελούν τη συντριπτική πλειοψηφία των ασπόνδυλων οργανισμών του εδάφους. Οι σκώροι τρέφονται κυρίως με νηματώδεις σκώληκες, μύκητες και τεμαχίδια ΟΥ.
- Αραχνοειδή.
Οι συγκεκριμένοι οργανισμοί αφορούν αράχνες με εξαιρετικά μικρό μέγεθος. Τα εν λόγω αραχνοειδή δεν υφαινούν ιστούς αλλά μπορούν και κινούνται ταχύτατα

δια μέσω του πορώδους του ΟΥ καταδιώκοντας τα θηράματά τους που τα αποτελούν αρθρόποδα (μικρά έντομα) και ασπόνδυλοι οργανισμοί.

- Μυριόποδα (Sundberg, 2003).
Οι οργανισμοί αυτοί τρέφονται με κάθε τύπο ασπόνδυλων ανάλογου ή ακόμα και μεγαλύτερου μεγέθους.
- Κάνθαροι (Sundberg, 2003).
Οι κάνθαροι (σκαθάρια) είναι οι πλέον ευμεγέθεις αποδομητές και τρέφονται κυρίως με αποσυντιθέμενα ξυλώδη υλικά και με φυτικούς ιστούς. Τα μεγαλύτερου μεγέθους σκαθάρια τρέφονται με σπόρους, τεμαχίδια ΟΥ ή άλλα, μικρότερου μεγέθους ζώφια.

2.5.5 Κινητική μικροβιακής ανάπτυξης

Εάν σε θρεπτικό υπόστρωμα, που αποτελείται από κατάλληλο μίγμα ουσιών και βρίσκεται σε κατάλληλες περιοχές θερμοκρασίας και pH, προστεθούν μικροβιακά κύτταρα, τότε παρατηρείται αύξηση του αριθμού των κυττάρων σε συνάρτηση με το χρόνο.

Τα στάδια από τα οποία περνά η κυτταρική ανάπτυξη είναι τα ακόλουθα (Εικόνα 2.5).

 Λανθάνουσα φάση

Στη φάση αυτή, που είναι η αρχική υπάρχει καθυστέρηση στην ανάπτυξη. Αυτό οφείλεται στην προσαρμογή των κυττάρων στο νέο περιβάλλον με σκοπό να χρησιμοποιήσουν τις περιεχόμενες θρεπτικές ουσίες για τον καταβολισμό και τη βιοσύνθεση των απαραίτητων συστατικών. Προς το τέλος της φάσης παρατηρείται μια μεταβατική φάση κατά τη διάρκεια της οποίας ορισμένος αριθμός κυττάρων αρχίζει να αναπτύσσει τους ενζυμικούς μεταβολικούς μηχανισμούς καταναλίσκοντας υπόστρωμα και παρουσιάζοντας μικρή ανάπτυξη.

 Εκθετική φάση

Η φάση αυτή μπορεί να χαρακτηριστεί και λογαριθμική. Τότε όλα τα κύτταρα αναπτύσσονται με σταθερούς ρυθμούς με αποτέλεσμα την εκθετική αύξηση του πληθυσμού. Στη φάση αυτή ισχύει η σχέση:

$$\frac{dN}{dt} = N \cdot \mu$$

N: αριθμός κυττάρων

μ: ειδικός ρυθμός ανάπτυξης (h^{-1})

Αλλιώς μπορεί να γραφεί αυτή η σχέση :

$$\ln \frac{N}{N_0} = \mu \cdot t$$

N_0 : αρχικός αριθμός κυττάρων

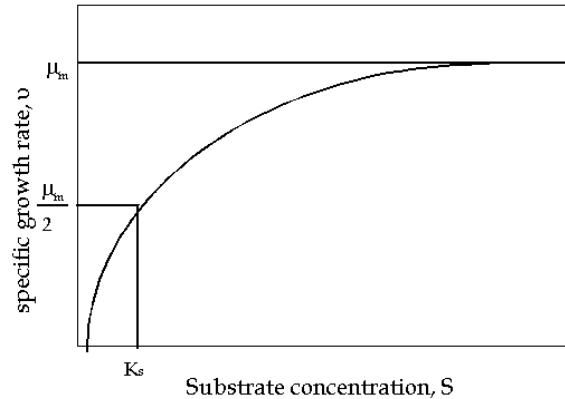
Η παράμετρος μ εξαρτάται από το είδος του μικροβιακού κυττάρου, το pH, τη θερμοκρασία καθώς και τη συγκέντρωση του υποστρώματος (S). Για την ποσοτική έκφραση της σχέσης :

$$\mu = \mu(S)$$

ο Monod πρότεινε τη σχέση:

$$\mu = \mu_{\max} \cdot \frac{S}{K_s + S}$$

η οποία παριστάνεται γραφικά στο Σχήμα 2.5 :



Εικόνα 2.5 : Γραφική παράσταση της σχέσης Monod

Η σταθερά K_s έχει διαστάσεις υποστρώματος και για $S = K_s$ το $\mu = \mu_{\max}/2$. Καθώς το υπόστρωμα καταναλώνεται η τιμή του S μειώνεται, η τιμή της σχέσης $S / (K_s + S)$ γίνεται μικρότερη από τη μονάδα και παύει να ισχύει η εκθετική σχέση. Παρατηρείται δηλαδή μια φάση κάμψης του ρυθμού ανάπτυξης η οποία εξηγείται αφ' ενός απ' την εξάντληση του υποστρώματος και αφ' ετέρου από τη συσσώρευση τοξικών ουσιών (παραπροϊόντα του μεταβολισμού) που επιβραδύνουν την κυτταρική ανάπτυξη.

📖 Φάση στασιμότητας

Χαρακτηριστικό της φάσης αυτής είναι η σταθεροποίηση το αριθμού των κυττάρων στη διάρκεια του χρόνου. Ο ρυθμός παραγωγής κυττάρων ισούται με το ρυθμό θανάτου των κυττάρων.

📖 Φάση θανάτου

Στη φάση αυτή κυριαρχεί το φαινόμενο του θανάτου των κυττάρων και περιγράφεται από τη σχέση: [Μακρής, Κέκου, 2001]

$$N = N_s \cdot e^{-Kt}$$

N : αριθμός ζώντων κυττάρων

N_s : αριθμός κυττάρων στη φάση στασιμότητας

K : ειδικός ρυθμός θανάτου (h^{-1})

2.6 Παράμετροι ελέγχου της ποιότητας του τελικού προϊόντος

Η ποιότητα του παραγόμενου κόμποστ και η δυνατότητα διάθεσής του είναι καθοριστικές τόσο για την επιτυχία μιας μονάδας ή ενός συστήματος κομποστοποίησης, όσο και για την αποδοχή και εξέλιξη της μεθόδου της αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας στο πλαίσιο της ορθολογικής και βιώσιμης διαχείρισης των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων. Ο χαρακτηρισμός της ποιότητας του παραγόμενου κόμποστ βασίζεται στον προσδιορισμό του βαθμού ωρίμανσης και σταθεροποίησής του. Ο όρος ωρίμανση συσχετίζεται με την ανάπτυξη των φυτών ή με την φυτοτοξικότητα (Iannotti et al., 1993), ενώ ο όρος σταθεροποίηση συνήθως αναφέρεται στη μικροβιακή δραστηριότητα που παρατηρείται στο κόμποστ. Ωστόσο, σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται και οι δύο όροι για τον προσδιορισμό της ποιότητας του τελικού προϊόντος παρότι εννοιολογικά

είναι διαφορετικές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι φυτοτοξικές ενώσεις παράγονται από μικροοργανισμούς που προέρχονται από μη σταθεροποιημένο κόμποστ (Zucconi et al., 1985). Μη ώριμο και μη σταθεροποιημένο κόμποστ δύναται να προκαλέσει προβλήματα κατά την αποθήκευση και την τελική του χρήση. Κατά τη διάρκεια της αποθήκευσής του ενδέχεται να διαμορφωθούν αναερόβιες συνθήκες και έκλυση οσμών καθώς και δημιουργία τοξικών ενώσεων. Επιπλέον, η εναπόθεση μη ώριμου κόμποστ μπορεί να παρεμποδίσει τη βλάστηση των σπόρων, να καταστρέψει τη ρίζα και να οδηγήσει στην παρεμπόδιση της ανάπτυξης του φυτού. Αναλυτικότερα, η εναπόθεση μη σταθεροποιημένου κόμποστ μεταξύ άλλων μπορεί να οδηγήσει σε περίσσεια αμμωνιακών ή οργανικών οξέων, να προκαλέσει ακινητοποίηση του αζώτου εξαιτίας της υψηλής αναλογίας C/N καθώς και μείωση της συγκέντρωσης οξυγόνου και του δυναμικού οξειδοαναγωγής λόγω της γρήγορης αποσύνθεσης της οργανικής ουσίας με μια πιθανή αύξηση της κινητικότητας μερικών βαρέων μετάλλων (Bernal et al., 2009; Smith and Hughes, 2004).

Σε επίπεδο Ε.Ε. δεν υπάρχουν μέχρι σήμερα θεσμοθετημένες ποιοτικές προδιαγραφές αναφορικά με το βαθμό ωρίμανσης και σταθεροποίησης του κόμποστ ενώ στα Κράτη Μέλη υπάρχει μεγάλη διακύμανση ως προς τις παραμέτρους και τα όρια ελέγχου η οποία συνήθως αντανακλά τις διαφορετικές προσεγγίσεις στη διαχείριση των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων και το επίπεδο αυστηρότητας στην προστασία του περιβάλλοντος και της ανθρώπινης υγείας. Οι διαφορές που παρουσιάζονται στις προδιαγραφές ποιότητας του κόμποστ τόσο σε επίπεδο Ε.Ε. όσο και διεθνώς βασίζονται στο γεγονός ότι κάθε κράτος έχει τα δικά του ιδιαίτερα χαρακτηριστικά υποδηλώνοντας ότι ο καθορισμός ποιοτικών παραμέτρων που χρησιμοποιούνται σε μία χώρα δεν είναι απαραίτητα κατάλληλες για την υιοθέτηση σε μία άλλη. Επιπρόσθετα, η διαφοροποίηση στην προσέγγιση θέσπισης προδιαγραφών για το κόμποστ σε κοινοτικό επίπεδο οφείλεται και στις διαφορετικές επιστημονικές απόψεις, αναφορικά με την κατάρτιση μεθοδολογιών, οριακών και αποδεκτών τιμών για την πλειονότητα των υπό εξέταση χαρακτηριστικών του κόμποστ (Brinton, 2000). Με τις υφιστάμενες ποιοτικές προδιαγραφές συνήθως γίνεται προσπάθεια να συμβιβαστούν δύο συχνά αντικρουόμενοι στόχοι. Ο πρώτος στόχος περιλαμβάνει την προστασία της δημόσιας υγείας, του εδάφους και γενικότερα του περιβάλλοντος ενώ ο δεύτερος στόχος προσβλέπει στη μεγιστοποίηση της ανακύκλωσης των αποβλήτων. Σε πολλά Κράτη Μέλη της Ε.Ε. μέσω θεσμοθετημένων διατάξεων είτε μέσω εθελοντικών συστημάτων προδιαγραφών ποιότητας κόμποστ προβλέπεται η κατάταξη του παραγόμενου κόμποστ σε διαφορετικές κατηγορίες με βάση (α) τη συγκέντρωση βαρέων μετάλλων, (β) το είδος του προς επεξεργασία οργανικού αποβλήτου, (γ) το βαθμό ωρίμανσης και (δ) το είδος της τελικής χρήσης/διάθεσης. Σε εθνικό επίπεδο συναφή νομοθετικά κείμενα αποτελούν (α) η ΚΥΑ 114218/1997 η οποία αναφέρεται σε τεχνικές προδιαγραφές και ελάχιστα ποιοτικά χαρακτηριστικά του κόμποστ που προκύπτει από σύμμικτα ΑΣΑ αποκλειστικά σε μονάδες ΜΒΕ και (β) η ΚΥΑ 80568/4225/91 η οποία αναφέρεται αποκλειστικά στους όρους και τους περιορισμούς χρήσης ιλύος λυμάτων στη γεωργία. Επομένως, στο εθνικό νομοθετικό πλαίσιο, όπως αυτό έχει διαμορφωθεί μέχρι πρότινος, δεν προβλέπονται σαφείς υποδείξεις και σαφείς οδηγίες για το αντικείμενο της ορθολογικής πορείας των διεργασιών της κομποστοποίησης και του ελέγχου της, ούτε μνημονεύει τις κατάλληλες προδιαγραφές ποιότητας που ενδείκνυται να χαρακτηρίζουν το κόμποστ για το σύνολο των οργανικών αποβλήτων τα οποία χρησιμοποιούνται ως υπόστρωμα. Παρότι δεν υφίσταται συστηματικός και ευρέως αποδεκτός τρόπος χαρακτηρισμού της ποιότητας

του κόμποστ, ο έλεγχος της ωρίμανσης και της σταθεροποίησής του μπορεί να βασιστεί σε μια σειρά φυσικοχημικών και βιολογικών παραμέτρων της οργανικής ουσίας. Σύμφωνα με τους Bernal et al. (2009), Eggerth et al. (2007) και Iglesias Jiménez and Perez Garcia (1989) ορισμένες από τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται διεθνώς για την αξιολόγηση του τελικού προϊόντος επισημαίνονται στον **Πίνακα 2.8**. (Μαλαμής 2010)

Πίνακας 2.8: Ενδεικτικές παράμετροι ελέγχου της ποιότητας του κόμποστ

Κατηγορία	Κριτήριο	Παράμετροι ελέγχου
Φυσικές	Χρώμα	Χρωματισμός
	Οσμή	Έκλυση και ένταση δυσάρεστων οσμών
	Θερμοκρασία	Σταθεροποίηση της θερμοκρασίας
	Υγρασία	Περιεκτικότητα υγρασίας
	Συγκράτηση νερού	Προσδιορισμός της υδατοϊκανότητας
	Αδρανή ύλη	Περιεκτικότητα σε αδρανή υλικά
	Μέγεθος σωματιδίων	Κοκκομετρία
Χημικές	Θρεπτικά συστατικά	Αναλογία C/N, Άζωτο (NH_4^+ , NO_3^- , Λόγος $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$)
	Ποιότητα οργανικής ουσίας	Σύνθεση οργανικών: λιγνίνη, κυτταρίνη, σύνθετοι υδατάνθρακες, λιπίδια, σάκχαρα κ.α.
	Χουμοποίηση	Χαρακτηρισμός χουμικών ενώσεων (π.χ. κατανομή MB), Δείκτες χουμοποίησης (C-HA/C-FA, E_4/E_6 κ.α.) ⁽¹⁾
	Ρυπαντές	Βαρέα μέταλλα και επίμονες οργανικές ενώσεις
	Υδατοδιαλυτότητα εκχυλίσματος	pH, ηλεκτρική αγωγιμότητα κ.α.
Βιολογικές	Παθογόνοι μικροοργανισμοί	Συνθήκες θερμοκρασίας -χρόνου Προσδιορισμός συγκέντρωσης παθογόνων
	Μικροβιολογική δραστηριότητα	Αναπνευστικές παράμετροι (π.χ. πρόσληψη O_2 , κατανάλωση O_2 , παραγωγή CO_2 , έλεγχος αυτοθέρμανσης), Ενζυμική δραστηριότητα, Περιεχόμενο ATP ⁽²⁾ , Μικροβιακή βιομάζα, Δυναμική αζώτου (διεργασίες ανοργανοποίησης-ακινητοποίησης)
	Φυτοτοξικότητα	Βλαστικότητα και έλεγχος ανάπτυξης φυτών

⁽¹⁾ Λόγος C-HA/C-FA: Αναλογία περιεχόμενου άνθρακα στα χουμικά (HA) και φουλβικά (FA) οξέα η οποία περιγράφει την ένταση της διεργασίας της χουμοποίησης. Λόγος E_4/E_6 : Χαρακτηρισμός χουμικών και φουλβικών οξέων βασισμένο στο λόγο της απορρόφησης σε μήκη κύματος 465 και 665 nm.


⁽²⁾ ATP: τριφωσφορική αδενοσίνη

Παρατηρείται λοιπόν ότι ο χαρακτηρισμός της ποιότητας του τελικού προϊόντος διέπεται από μια πολλαπλότητα αναφορικά με τον αριθμό των παραμέτρων αξιολόγησης. Επιπλέον, οι ενδεικτικές τιμές και τα όρια αυτών των παραμέτρων πολλές φορές διαφοροποιούνται σημαντικά μεταξύ τους, γεγονός το οποίο αντικατοπτρίζει την απουσία ενιαίου τρόπου προσδιορισμού της καταλληλότητας του κόμποστ η οποία ενδεχομένως έγκειται στην ποικιλομορφία της αρχικής προς κομποστοποίηση πρώτης ύλης ως προς τις φυσικές, χημικές και βιολογικές της ιδιότητες (Benito et al., 2003; Saviozsi et al., 1988; Roletto et al., 1985).

2.7 Φυσικοχημικές Επιδράσεις του Κόμποστ στο Έδαφος

Το κόμποστ ως γνωστό είναι μια πηγή οργανοχουμικών προϊόντων. Τα χαρακτηριστικά του τροφοδοτικού υλικού (feedstock), και το επίπεδο των φορέων μόλυνσης προσδιορίζουν την ποσότητα της οργανικής ύλης σε σχέση με τα άλλα συστατικά. Ως πηγή οργανικής ύλης, το κόμποστ έχει σημαντική επίδραση στις φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους. Παρόλα αυτά, διάφορες σημαντικές χημικές παράμετροι του εδάφους

επηρεάζονται από την προσθήκη οργανικής ύλης που περιέχεται στο κόμποστ. Οι παράμετροι που επηρεάζονται είναι:

 Φυσικοχημικές παράμετροι

- ◆ Δομή του εδάφους, πυκνότητα μάζας, πορώδες, αερισμός, και αντοχή του εδάφους (soil strength)
- ◆ Σχέσεις με το νερό: κατακράτηση νερού, διαθέσιμο νερό για τα φυτά, και περιεκτικότητα νερού στο έδαφος
- ◆ Διάχυση (infiltration) και διαπερατότητα
- ◆ Διάβρωση και απορροή (runoff)
- ◆ Θερμοκρασία εδάφους

 Χημικές παράμετροι

- ◆ Κατιονική εναλλακτική ικανότητα
- ◆ pH εδάφους
- ◆ ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC)
- ◆ Θρεπτικά (macronutrients)

Το κόμποστ συχνά αναφέρεται και ως «βελτιωτικό εδάφους», (soil conditioner), επειδή βελτιώνει τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους, οι οποίες παίζουν σημαντικό ρόλο στις καλλιέργειες, αυξάνοντας την συγκράτηση του νερού με αποτέλεσμα να υπάρχει περισσότερο διαθέσιμο νερό για τα φυτά.

Η οργανική ύλη του εδάφους μεταβάλλει επίσης διάφορα σημαντικά χημικά χαρακτηριστικά του εδάφους, όπως την κατιονική εναλλακτική ικανότητα και το pH. Επιπλέον, επειδή τα περισσότερα τροφοδοτικά υλικά περιέχουν και ποσότητες από μικρο- και μακρο-θρεπτικά συστατικά φυτών, η προσθήκη κόμποστ σε ποσότητες από αρκετά μεγαλύτερες από αυτές των λιπασμάτων, συνήθως εξασφαλίζει ικανοποιητικά επίπεδα θρεπτικών συστατικών απαραίτητων για την ανάπτυξη του φυτού. Ιδιαίτερα αυξάνονται τα επίπεδα αζώτου και φωσφόρου. Η αλατότητα του εδάφους μπορεί επίσης να επηρεαστεί, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του κόμποστ. Αύξηση της αλατότητας αποτρέπει την βλάστηση των σπορίων και μειώνει την ανάπτυξη του φυτού ή την απόδοση της καλλιέργειας.

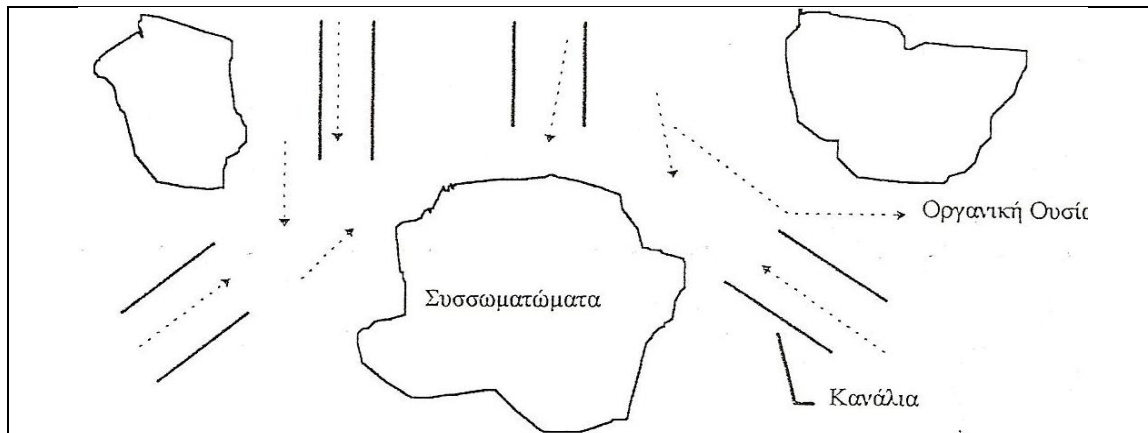
Όταν προστίθεται κόμποστ σε οποιοδήποτε έδαφος απαιτείται η παρέλευση αρκετών ετών πριν παρατηρηθούν αλλαγές στις φυσικές του ιδιότητες. Αντίθετα από τις χημικές ιδιότητες οι οποίες μπορούν να προσδιοριστούν σχετικά εύκολα, ο ποσοτικός προσδιορισμός των φυσικών ιδιοτήτων είναι περισσότερο δύσκολος.

2.7.1 Επίδραση της Εφαρμογής Κόμποστ στις Φυσικές Ιδιότητες του Εδάφους

➤ Δομή του Εδάφους

Η δομή του εδάφους αναφέρεται στην ταξινόμηση των σωματιδίων του, δηλαδή στη διάταξη και στη σταθερότητα των συσσωματωμάτων, και στην κατανομή των μεταξύ τους διαστημάτων και στην κατανομή του μεγέθους των πόρων. Η οργανική ύλη βελτιώνει τη δομή του εδάφους μέσω των συσσωματωμάτων. Στο παρακάτω διάγραμμα παριστάνεται η δομή των σωματιδίων του εδάφους όταν σε αυτό επιδρά οργανική ύλη. Τα αμμώδη και αργιλώδη (clay soils) εδάφη επωφελούνται περισσότερο από την εφαρμογή οργανικής ύλης απ' ό,τι τα αμμώδη, τα οποία έχουν γενικά καλή δομή. Η καλή

δομή του εδάφους βοηθάει στην καλύτερη ανάπτυξη των ριζών. Με βελτιωμένη ανάπτυξη των ριζών, τα φυτά είναι περισσότερο ικανά να αξιοποιήσουν το νερό και τα θρεπτικά συστατικά.



Εικόνα 2.6: Σχηματική παρουσίαση της σύνδεσης των συσσωματωμάτων του εδάφους με την οργανική ύλη.

Είναι δύσκολο να αξιολογήσει κανείς τη δομή του εδάφους. Έχουν γίνει προσπάθειες προσδιορισμού των μεταβολών της δομής του εδάφους, με την μέτρηση της συνολικής σταθερότητας (aggregate stability) και της % αδράνειας (percent aggregates). Αυτές οι παράμετροι δείχνουν την επίδραση της οργανικής ύλης στη σύνδεση των σωματιδίων του εδάφους. Η επίδραση του κόμποστ στην συσσωμάτωση του με το έδαφος είναι περισσότερο εμφανής και έντονη στα λεπτής υφής εδάφη (π.χ. clays, clays loams, silty clay loams). Πολλές ιδιότητες του εδάφους όπως η πυκνότητα της μάζας, το πορώδες, ο αερισμός, η διάβρωση και η απορροή, και η υδραυλική αγωγιμότητα είναι είτε άμεσα είτε έμμεσα επηρεασμένες από τη δομή του εδάφους. Το πορώδες του εδάφους είναι ένα μέτρο του μεγέθους και της ταξινόμησης των κενών χώρων του εδάφους. Το πορώδες επηρεάζει τον αερισμό και την κίνηση του ύδατος. Ένα αργιλώδες έδαφος μπορεί να έχει πολύ περισσότερους μικρούς πόρους, οπότε και ένα μεγαλύτερο συνολικό κενό πόρων, από ότι ένα αμμώδες έδαφος. Οι εξαιρετικά μικροί πόροι του όμως περιορίζουν την μετακίνηση του νερού. Έμμεσες μετρήσεις του πορώδους περιλαμβάνουν τον καθορισμό της πυκνότητας της μάζας και τη συσχέτιση αυτής της παραμέτρου με το ειδικό βάρος του εδάφους. Εάν το ειδικό βάρος του εδάφους είναι γνωστό, τότε το πορώδες του εδάφους μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$\% \text{ πορώδες} = 1 - \text{πυκνότητα μάζας/ειδικό βάρος} * 100$$

Συνήθως χρησιμοποιείται το ειδικό βάρος των 2,65g/cc διότι παρουσιάζει μια μέση πυκνότητα των ορυκτών του εδάφους. Η μέτρηση του ειδικού βάρους θεωρείται δύσκολη.

➤ Πυκνότητα Μάζας

Η πυκνότητα μάζας του εδάφους είναι το βάρος ανά μονάδα όγκου της μάζας του εδάφους συμπεριλαμβάνοντας και τα κενά μεταξύ των πόρων. Έτσι, αποτελεί μια ένδειξη του πόσο συμπαγές είναι το έδαφος. Όσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα μάζας, τόσο δυσκολότερο είναι για τις ρίζες των φυτών να εξαπλωθούν. Συνεπώς, η δυνατότητα των φυτών να λαμβάνουν νερό και θρεπτικά συστατικά είναι μειωμένη. Επίσης, η ενέργεια που απαιτείται για την καλλιέργεια του εδάφους αυξάνεται με την αύξηση του συμπαγούς. Η προσθήκη κόμποστ συνήθως οδηγεί σε μείωση της πυκνότητας μάζας του

εδάφους. Αυτό έχει μεγαλύτερη επίδραση στα αργιλώδη εδάφη. Βρέθηκε ότι η προσθήκη μεγάλων ποσοτήτων κόμποστ, μειώνει την πυκνότητα μάζας του εδάφους σημαντικά. Εφαρμογή κόμποστ το οποίο προέρχεται από οργανικό κλάσμα απορριμμάτων (MSW) με βιοστερεά (λάσπη), οδήγησε σε μείωση της πυκνότητας μάζας του εδάφους από 1.37 g/cc για το μάρτυρα σε 1.32, 1.27, 1.22, και 1.12 g/cc για 46, 82, 164, και 327 t/ha, αντιστοίχως.

➤ Αντοχή Εδάφους

Μια άλλη παράμετρος της δομής του εδάφους είναι η αντοχή του εδάφους (soil strength), η οποία συνήθως μετριέται σε πενετρόμετρο. Σε γεωργικές εφαρμογές, χαμηλές ενδείξεις του πενετρομέτρου σημαίνουν ένα περισσότερο ικανοποιητικό περιβάλλον για την διείσδυση των ριζών και μικρότερη αντίσταση και ενεργειακές απαιτήσεις για τα όργανα καλλιέργειας. Διάφορες μελέτες έχουν δείξει ότι η αντοχή του εδάφους, μετρημένη με πενετρόμετρο, μειώνεται με προσθήκη κόμποστ. Βρέθηκε μια σημαντική μείωση στις υψηλές αναλογίες εφαρμογής κόμποστ. Σε αναλογίες πέρα από 164t/ha, παρατηρήθηκε μια σημαντική μείωση στην αντίσταση του πενετρομέτρου συγκρινόμενη με το μάρτυρα.

➤ Συγκράτηση Νερού από το Έδαφος και Διαθεσιμότητα του στα Φυτά

Το νερό έχει την ικανότητα να συγκρατείται στο έδαφος μέσω επιφανειακής τριχοειδικής τάσης. Για να απορροφήσουν νερό τα φυτά απαιτείται ενέργεια, η οποία είναι μικρότερη σε εδάφη με υψηλή περιεκτικότητα υγρασίας. Επίσης, περισσότερη ενέργεια απαιτείται από το φυτό για να απορροφήσει νερό από αργιλώδη εδάφη παρά από αμμώδη, καθώς έχουν πολύ μικρά τριχοειδή από τα οποία δεν μεταβιβάζεται εύκολα το νερό. Η σχέση μεταξύ της απαιτούμενης ενέργειας για την απορρόφηση νερού και της περιεκτικότητας νερού στο έδαφος εκφράζεται από τις καμπύλες αποβολής απορροφηθέντος αερίου. Η ενέργεια με την οποία συγκρατείται το νερό ορίζεται ως μετρική δύναμη «matric potential» και εκφράζεται αριθμητικά σε bars ή kPa. Το διαθέσιμο νερό για το φυτό θεωρείται ότι είναι η διαφορά στις περιεκτικότητες υγρασίας στο πεδίο χωρητικότητας (field capacity) και στο σημείο του μόνιμου μαρασμού. Η περιεκτικότητα υγρασίας στο πεδίο χωρητικότητας είναι η υγρασία που συγκρατήθηκε μεταξύ 0,1 (10kPa) και 0,33 (33kPa) ενώ το σημείο του μόνιμου μαρασμού είναι η υγρασία που συγκρατήθηκε στα 15bars (1500kPa).

Ο Avnimelech et al. (1990) βρήκε ότι το MSW κόμποστ αύξησε τη χωρητικότητα του εδάφους σε νερό στην υπόγεια ζώνη κατά 825%, σε σύγκριση με την αύξηση στην επιφανειακή ζώνη κατά 341%. Η διαφορά απεδόθη στην εκχύλιση του οργανικού άνθρακα στην ζώνη επιφανείας, η οποία αποτελείται από τα υπολείμματα του κόμποστ που εφαρμόστηκε. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι τα κλάσματα του διαλυτού οργανικού άνθρακα είναι κυρίως υπεύθυνα για την κατακράτηση νερού. Ο Epstein et al. (1976) έδειξε ότι η προσθήκη ενός MSW κόμποστ σε sandy, clay, loam εδάφη είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της κατακράτησης του νερού, η οποία οδήγησε σε μια αύξηση του διαθέσιμου νερού για τα φυτά. Η προσθήκη κόμποστ στα εδάφη είχε και ως αποτέλεσμα να διευκολύνει τη διήθηση του νερού και συνεπώς βελτιώνεται η διαπερατότητα στα εδάφη. Βελτιωμένη διήθηση σημαίνει αυξημένη περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία και παράλληλα μείωση της απορροής. Πολλά αργιλώδη εδάφη έχουν πολύ μικρούς πόρους έτσι ώστε η μετακίνηση του νερού να είναι περιορισμένη. Η

διαπερατότητα ή η υδραυλική αγωγιμότητα αυτών των εδαφών είναι χαμηλή, με αποτέλεσμα, το νερό να μην διαπερνά το έδαφος αλλά να απορρέει. Ο Avnimelech et al. (1990) βρήκε ότι η περιεκτικότητα σε νερό αυξήθηκε με την αύξηση των ποσοτήτων του εφαρμοζόμενου κόμποστ. Ο Tester (1990) ανέφερε ότι αυξάνοντας την ποσότητα του κόμποστ στο έδαφος, περιεκτικότητα του νερού αυξάνεται (κυρίως σε loamy sand εδάφη).

➤ **Επιφανειακή Απορροή και Διάβρωση του Εδάφους**

Η επιφανειακή απορροή (runoff) λαμβάνει χώρα όταν η ποσότητα του νερού που διεισδύει στο έδαφος είναι μικρότερη από την ποσότητα του νερού από βροχοπτώσεις ή άρδευση. Η διάβρωση είναι το αποτέλεσμα της μετακίνησης του νερού πάνω στην επιφάνεια του εδάφους και της μετατόπισης σωματιδίων του εδάφους. Η ροή νερού εκτός από την μετατόπιση εδάφους παρασύρει χημικές ενώσεις και λιπάσματα, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ρύπανσης. Η επιφανειακή απορροή και η διάβρωση είναι οι κύριες αιτίες για τις μη σημειακές πηγές ρύπανσης. Η επικάλυψη των εδαφών με κόμποστ εμποδίζει τη δημιουργία κρούστας στο έδαφος και αυξάνει την διήθηση, και τη διαπερατότητα, μειώνοντας έτσι την επιφανειακή απορροή και τη διάβρωση. Η δημιουργία κρούστας στην επιφάνεια του εδάφους είναι η κύρια πηγή της επιφανειακής απορροής αφού το νερό δεν μπορεί να διεισδύσει στο έδαφος. Παρόλα αυτά, το κόμποστ, που εφαρμόζεται ως στρώμα παρεμπόδισης των σταγόνων της βροχής, μειώνει την ενέργειά τους και την δυναμική τους για απομάκρυνση σωματιδίων από το έδαφος.

➤ **Θερμοκρασία Εδάφους**

Η επίδραση της εφαρμογής του κόμποστ στη θερμοκρασία του εδάφους είναι μάλλον μέτρια. Τόσο για αμμώδη όσο και για λασπώδη εδάφη, οι θερμοκρασίες την ημέρα ήταν υψηλότερες σε εδάφη που εφαρμόστηκαν 500t/ha κόμποστ. Παρόλα αυτά, οι θερμοκρασίες του εδάφους τη νύχτα δεν επηρεάστηκαν από την προσθήκη κόμποστ. Γενικά, η εφαρμογή κόμποστ έχει αποτέλεσμα την μείωση της θερμοκρασίας κατά 1-2 °C για τις περιπτώσεις που εφαρμόστηκαν 200 και 500t/ha κόμποστ.

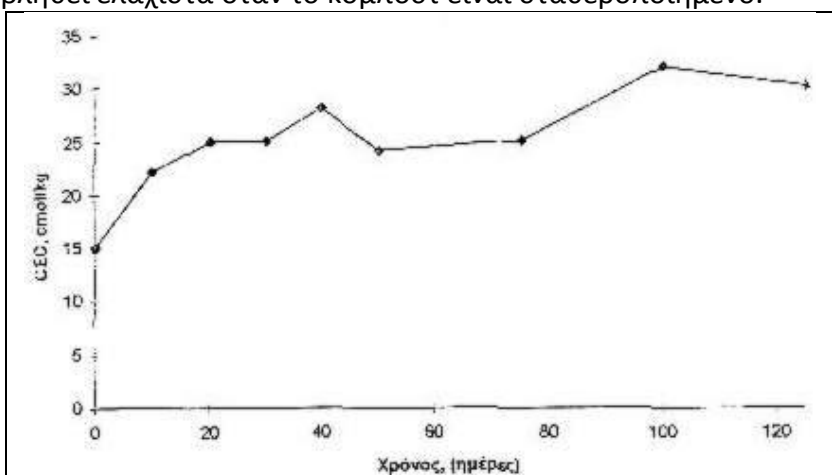
2.7.2 Επίδραση της Εφαρμογής Κόμποστ στις Χημικές Ιδιότητες του Εδάφους.

Η επίδραση του κόμποστ στις χημικές ιδιότητες του εδάφους είναι το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης της οργανικής ύλης με τα ορυκτά του εδάφους και τα χημικά χαρακτηριστικά του κόμποστ. Τα χημικά χαρακτηριστικά του κόμποστ είναι συνάρτηση των χαρακτηριστικών του τροφοδοτικού υλικού και της μεθόδου προπαρασκευής του. Η μοναδική και σημαντικότερη επίδραση της οργανικής ύλης στις χημικές ιδιότητες του εδάφους έχει σχέση με την κατιοντοεναλλακτική ικανότητα (CEC). Αυτή η ιδιότητα ελέγχει την εν δυνάμει γονιμότητα του εδάφους. Αύξηση του οργανικού άνθρακα οδηγεί σε αύξηση του CEC.

➤ **Κατιονική Εναλλακτική Ικανότητα**

Η κατιοντοεναλλακτική ικανότητα (Cation Exchange Capacity) είναι ένα μέτρο της ικανότητας του εδάφους να συγκρατεί κατιόντα στα κolloειδή του εδάφους ως

αποτέλεσμα ύπαρξης αρνητικών ηλεκτρικών φορτίων. Ο Αμερικανικός Επιστημονικός Σύλλογος (Soil Science Society of America) ορίζει την CEC ως «το σύνολο των εναλλάξιμων κατιόντων που ένα συστατικό στοιχείο του εδάφους μπορεί να απορροφήσει σε συγκεκριμένο pH». Οι μονάδες μέτρησης είναι centimoles φορτίου-φορές (of charge) ανά kilogram εναλλάκτη (cmole_c/kg). Τα αρνητικά ηλεκτρικά φορτία του εδαφικού πλέγματος προέρχονται από ισόμορφους αντικαταστάτες στη δομή των πυριτικών ορυκτών (silicate minerals), από τη διάσπαση δεσμών στις ακμές του ορυκτού και τις εξωτερικές επιφάνειες, από τη διάσπαση των όξινων χαρακτηριστικών ομάδων οργανικών ενώσεων, και από την προσρόφηση συγκεκριμένων ιόντων σε επιφάνειες σωματιδίων. Τα θετικά φορτισμένα ιόντα (π.χ. K^+ , Ca^{++}) έλκονται στις αρνητικές επιφάνειες των αργιλικών σωματιδίων. Έτσι η CEC εξασφαλίζει την συγκράτηση των θρεπτικών ουσιών του φυτού και τα καθιστά διαθέσιμα για τα φυτά. Η ιδιότητα αυτή εμποδίζει επίσης τη διήθηση των κατιόντων στα υπόγεια νερά ή στα χαμηλότερα στρώματα του εδάφους όπου δεν είναι πλέον διαθέσιμα στις ρίζες των φυτών. Τα δύο σημαντικότερα συστατικά του εδάφους που επηρεάζουν την CEC είναι τα αργιλικά ορυκτά και η οργανική ύλη. Η CEC της οργανικής ύλης είναι συχνά υψηλότερη από ότι αυτή των αργιλικών ορυκτών. Η CEC των αργιλικών ορυκτών του εδάφους γενικά κυμαίνεται από 3 έως 5 cmole_c/kg (10 $\text{me}/100\text{g}$) για τον καολινίτη, 30 ως 40 cmole_c/kg για τον ιλλίτη, και 80 ως 150 cmole_c/kg για τον μοντμοριλλονίτη. Η οργανική ύλη του εδάφους μπορεί να έχει τιμή CEC κυμαινόμενη από 100 έως 200 cmole_c/kg . Ο Stevenson (1994), διατύπωσε ότι οι ολικές οξύτητες των χουμικών οξέων κυμαίνονται από 485 έως 870 cmole_c/kg . Οι υψηλές τιμές οξύτητας όπως 1400 cmole_c/kg για το φουλβικό οξύ εξηγούν την σημαντική συνεισφορά των χουμικών στην CEC του εδάφους. Η σύσταση του κόμποστ εξαρτάται από την βιοαποδόμηση της οργανικής ύλης κατά την διάρκεια της κομποστοποίησης. Ο Grebus et al. (1994) μέτρησε την CEC ως συνάρτηση του χρόνου κομποστοποίησης (κατά τη διάρκεια της αποσύνθεσης των απορριμμάτων αυλής, yard waste). Στη διάρκεια των πρώτων 25 ημερών, η CEC αυξήθηκε από 15 cmole_c/kg σε 27 cmole_c/kg . Τις επόμενες 100 ημέρες, ο ρυθμός αύξησης ήταν χαμηλότερος (διάγραμμα). Επειδή, η CEC της οργανικής ύλης είναι συνάρτηση του ιονισμού των ομάδων του καρβοξυλίου COOH και του υδροξυλίου OH του φαινολικού δακτυλίου, αναμένεται ότι η CEC θα μεταβληθεί ελάχιστα όταν το κόμποστ είναι σταθεροποιημένο.



Εικόνα 2.7: Αλλαγές στην κατιοντοεναλλακτική ικανότητα κατά την διάρκεια της αποσύνθεσης των απορριμμάτων αυλής.

➤ pH Εδάφους

Το pH, επηρεάζει την διαλυτότητα των μετάλλων, την δέσμευση θρεπτικών και την δράση του φυτού, την ανάπτυξη του φυτού, τους μικροοργανισμούς του εδάφους, και πολλές άλλες ιδιότητες και αντιδράσεις του εδάφους. Τα περισσότερα φυτά αναπτύσσονται καλύτερα κοντά σε ουδέτερο pH. Το pH των περισσότερων στερεών προϊόντων κόμποστ κυμαίνεται από 6,5 έως 7,5. Εξαιρέσεις υπάρχουν όταν χρησιμοποιούνται πολύ όξινα υλικά τροφοδοσίας, όπως ο πολτός σταφυλιού ή όταν το κόμποστ παρασκευάζεται με άσβεστο. Δεν παρατηρήθηκε επίδραση της εφαρμογής MSW κόμποστ στο pH αμμώδους εδάφους.

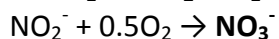
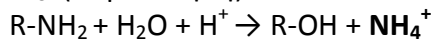
➤ Ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC)

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα (Electrical Conductivity, EC) είναι ένα μέτρο της περιεκτικότητας αλάτων σε διαλυτό έδαφος. Η αλατότητα επηρεάζει την εκκόλαψη και την ανάπτυξη του φυτού άμεσα και έμμεσα. Τα φυτά έχουν διαφορετική ανεκτικότητα στα άλατα. Φυτά χαμηλής ανεκτικότητας σε άλατα αντέχουν σε τιμές EC από 2 έως 4 mhos/cm, φυτά μέτριας ανεκτικότητας σε άλατα αντέχουν σε τιμές EC από 4 έως 10 mhos/cm και φυτά υψηλής ανεκτικότητας σε άλατα αντέχουν σε τιμές από 10 έως 18. Κόμποστ που έχει παρασκευασθεί από διαφορετικές πρώτες ύλες ή είναι εμπλουτισμένο με νερό που περιέχει άλατα, ίσως έχει διαφορετικές τιμές EC. Ο Grebus et al. (1994) βρήκε ότι η EC αυξάνεται με το χρόνο κομποστοποίησης. Η αύξηση της EC έχει αποδοθεί στην εκτεταμένη αποσύνθεση της οργανικής ύλης, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την υψηλή περιεκτικότητα αλάτων. Εάν η αποσύνθεση είναι μειωμένη λόγω της υψηλής περιεκτικότητας αλάτος, τότε η EC θα έπρεπε να φθάσει σε επίπεδο όπου κάθε αύξηση της EC (ως αποτέλεσμα της αποσύνθεσης) αρχίζει να παρεμποδίζει την μικροβιακή δραστηριότητα και το βαθμό αποσύνθεσης. Η χρήση MSW κόμποστ μπορεί να οδηγήσει σε μια αύξηση της EC του εδάφους. Ο McConnnell et al. (1993) ανέφερε ότι τα επίπεδα των διαλυτών αλάτων στο MSW κόμποστ έχουν οδηγήσει σε φυτο – τοξικότητα των φυτών που αναπτύσσονται σε θερμοκήπια. Βρέθηκε μια αύξηση στην αλατότητα από 0,50 mhos/cm που ήταν στον μάρτυρα σε 0,46 0,65 0,87 και 1,18 mhos/cm για τις περιπτώσεις που εφαρμόστηκαν 16, 32, 64, και 128t/ha κόμποστ, αντίστοιχα. Τα επίπεδα αλατότητας στις πρώτες ύλες χρειάζονται να προσδιοριστούν πριν αυτά χρησιμοποιηθούν στις διεργασίες κομποστοποίησης. Στις περιπτώσεις που τα άλατα δημιουργούν πρόβλημα στην ανάπτυξη του φυτού (όπως στις κηπευτικές και γεωργικές εφαρμογές), θα πρέπει να προηγείται η εκχύλιση τους από το κόμποστ πριν από την σπορά ή την μεταφύτευση. Τόσο το νερό της βροχής όσο και της άρδευσης εκχυλίζουν τα άλατα. [Zorπάς, 1999]

➤ Διαθεσιμότητα Αζώτου στο έδαφος

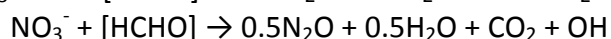
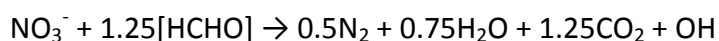
Το άζωτο (N) στο κόμποστ βρίσκεται σε οργανική μορφή. Το οργανικό N δεν είναι διαλυτό, δεν εκχειλίζεται στο έδαφος και δεν είναι διαθέσιμο στα φυτά. Το N γίνεται διαθέσιμο στα φυτά σε ανόργανη διαλυτή μορφή. Οι ανόργανες μορφές N είναι τα αμμωνιακά (NH_4^+) και νιτρικά άλατα (NO_3^-). Η γνώση της διαθεσιμότητας του N στο κόμποστ είναι σημαντική για να εκτιμηθεί η ποσότητα του N που είναι διαθέσιμη για την ανάπτυξη του φυτού. Εάν η ποσότητα του διαθέσιμου N από το κόμποστ είναι ανεπαρκής, τότε χρειάζεται προσθήκη N. Εάν υπάρχει περίσσεια N στο κόμποστ, από ότι χρειάζεται μια καλλιέργεια, τότε υπάρχει περίπτωση εκχύλισης του στον υδροφόρο ορίζοντα.

Το οργανικό N μετατρέπεται σε ανόργανο από μικροοργανισμούς. Η αμμωνιοποίηση μετατρέπει το οργανικό N σε αμμωνία (NH₃). Ένα μέρος από την NH₃ μετατρέπεται σε αμμωνιακά ιόντα (NH₄⁺), τα οποία προσροφούνται σε επιφάνειες τις αργίλου όπου ανταλλάσσονται με άλλα κατιόντα ή σταθεροποιούνται στη δομή τις αργίλου. Ένα σημαντικό τμήμα NH₃ διασπάται από βακτήρια σε νιτρώδη (NO₂⁻), τα οποία πολύ γρήγορα μετατρέπονται σε NO₃⁻ (νιτροποίηση).



Το νιτρικό άζωτο είναι διαλυτό και διαθέσιμο στα φυτά, εάν όμως είναι σε περίσσεια (ανάλογα με τις ανάγκες του φυτού), τότε εκχειλίζεται στον υδροφόρο ορίζοντα.

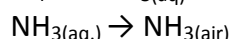
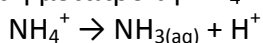
Η απονιτροποίηση σε αναερόβιες συνθήκες στο έδαφος μετατρέπει τα NO₂⁻ και NO₃⁻ σε αέριο N₂ το οποίο καταλήγει στην ατμόσφαιρα. [Ζορπάς, 1999], [29]



➤ Απώλειες Αζώτου

Οι απώλειες σε άζωτο κατά τη διαδικασία της κομποστοποίησης προκύπτουν κυρίως από αέριες εκπομπές. Κατά την κομποστοποίηση απελευθερώνονται κυρίως αμμωνία (NH₃) και μικρότερες ποσότητες οξειδίου του αζώτου (N₂O), το οποίο έχει δυσάρεστη οσμή. Οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τις εκπομπές αμμωνίας είναι το pH, η ισορροπία μεταξύ NH₄⁺/NH₃, ο λόγος άνθρακα/αζώτου, η θερμοκρασία, και ο αερισμός του κάδου κομποστοποίησης.

Για pH μεγαλύτερο του 8 ευνοείται η μετατροπή NH₄⁺ σε NH₃.



Επίσης οι υψηλές θερμοκρασίες και ο χαμηλός λόγος άνθρακα/αζώτου οδηγούν στην απελευθέρωση αμμωνίας. Ακόμα ο αερισμός του κάδου επηρεάζει το ποσοστό αμμωνίας που εκπέμπεται. Η συχνή ανάδευση του κάδου απελευθερώνει στην ατμόσφαιρα την αμμωνία που έχει παραχθεί στον κάδο και ταυτόχρονα βοηθά τη μικροβιακή δραστηριότητα και άρα την παραγωγή νέων ποσοτήτων αμμωνίας. Επιπλέον σε αναερόβιες συνθήκες συμβαίνει το φαινόμενο της απονιτροποίησης, όπου παράγεται N₂O και N₂. Μέσω των στραγγισμάτων της διαδικασίας της κομποστοποίησης χάνονται κυρίως ποσότητες NH₄⁺ και NO₃⁻. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τις απώλειες μέσω στραγγισμάτων είναι το είδος του κλάσματος προς κομποστοποίηση, η φάση που βρίσκεται η διαδικασία της κομποστοποίησης και η συχνότητα της ανάδευσης του κάδου. Οι απώλειες αυξάνονται για υλικά πλούσια σε άζωτο. Όσο προχωράει η διαδικασία της κομποστοποίησης περιορίζονται οι απώλειες σε NH₄⁺-N γιατί μετατρέπεται σε NO₃⁻-N. Η παραγωγή NO₃⁻-N είναι ένδειξη αερόβιων συνθηκών. Με την ανάδευση η ποσότητα των στραγγισμάτων αυξάνεται, ενδεχομένως λόγω της αύξησης του πορώδους και του αερισμού που ευνοούν τη μικροβιακή δραστηριότητα.

➤ Ο κύκλος του άνθρακα

Οι μικροοργανισμοί στο κόμποστ χρησιμοποιούν τον άνθρακα της νεκρής οργανικής ύλης σαν πηγή ενέργειας για την ανάπτυξη και παραγωγή προϊόντων από το μικροβιακό κύτταρο. Έτσι καθώς οι μικροοργανισμοί αποδομούν τη νεκρή οργανική ύλη ένα μέρος του άνθρακα μετατρέπεται σε νέα κύτταρα και ένα μέρος μετατρέπεται σε CO₂ και εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα.

2.8 Συστήματα κομποστοποίησης

Τα συστήματα κομποστοποίησης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ευρύτερα σε ανοικτά και κλειστά συστήματα. Στα ανοιχτά συστήματα η κομποστοποίηση διεξάγεται σε ανοιχτούς χώρους ενώ στα κλειστά συστήματα η διεργασία πραγματοποιείται σε ειδικά σχεδιασμένους βιοαντιδραστήρες ή σε στεγασμένα κτίρια, καθιστώντας εφικτή την απαγωγή και δέσμευση των αερίων εκπομπών οι οποίες αποτελούν σημαντικό πρόβλημα όχλησης, ειδικά στην περίπτωση όπου οι εγκαταστάσεις είναι κοντά σε κατοικημένες περιοχές (Pagans et al., 2006).

2.8.1 Κλειστά συστήματα

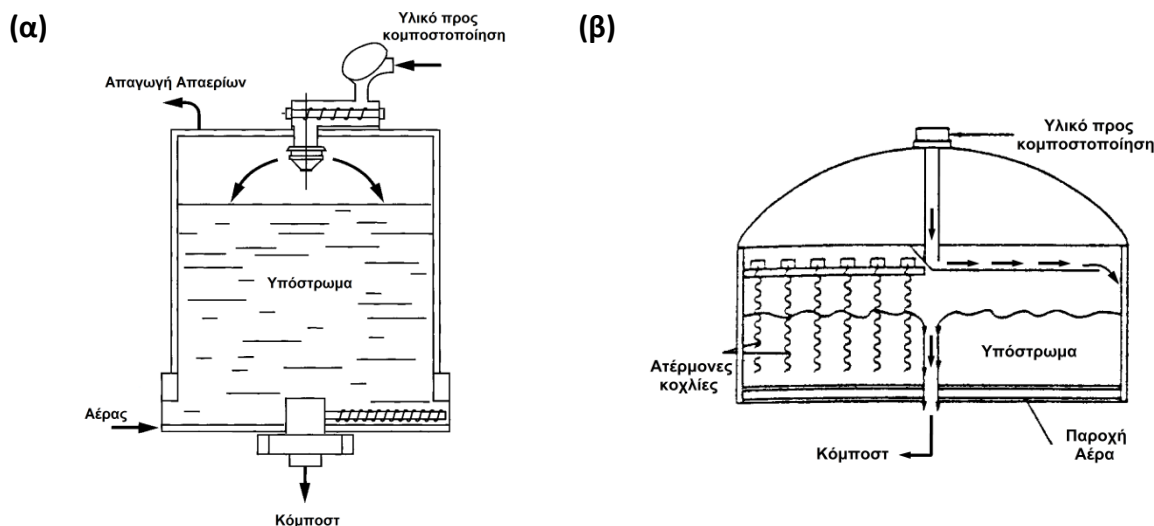
Η κατηγοριοποίηση των κλειστών συστημάτων κομποστοποίησης γίνεται, κατά βάση, σύμφωνα με τη ροή του οργανικού υλικού σε οριζόντιου και κάθετου τύπου. Επιπλέον, τα κλειστά συστήματα κομποστοποίησης διαφοροποιούνται ως προς τα χαρακτηριστικά του αερισμού του υποστρώματος, την ανάδευση, καθώς και τις διατάξεις φόρτωσης και εκφόρτωσης του οργανικού υλικού (Shammas and Wang, 2009). Κοινός συντελεστής είναι η επίτευξη της επιτάχυνσης των βιοξειδωτικών διεργασιών και της σταθεροποίησης του προς επεξεργασία οργανικού υλικού με τον έλεγχο και τη ρύθμιση των περιβαλλοντικών συνθηκών της διεργασίας, παράγοντας ένα τελικό προϊόν με υψηλά ποιοτικά χαρακτηριστικά. Παράλληλα γίνεται ο έλεγχος και η δέσμευση των αερίων εκπομπών με βιόφιλτρα (Misra et al., 2003) ή άλλο κατάλληλο σύστημα ελέγχου (π.χ. πλυντρίδες) (Shammas and Wang, 2009).

Κάθετα κλειστά συστήματα

Οι εμπορικά διαθέσιμοι κλειστού τύπου κάθετοι αντιδραστήρες είναι κυρίως συνεχούς λειτουργίας με ή χωρίς ανάδευση. Τα συνεχούς ροής κάθετα συστήματα χωρίς ανάδευση περιλαμβάνουν θερμικά μονωμένους αεροστεγείς κλειστούς κυλίνδρους. Το υλικό εισάγεται περιοδικά (τυπικά σε ημερήσια ή εβδομαδιαία βάση) από την κορυφή και κατεβαίνει βαρυτικά (Shammas and Wang, 2009). Ο αερισμός του υποστρώματος επιτυγχάνεται με την παροχή αέρα από τον πυθμένα και την αναρρόφηση των αερίων εκπομπών από την κορυφή. Δεν εφαρμόζεται μηχανική ανάδευση για να μη διαταραχθούν οι βιολογικές διεργασίες γεγονός που καθιστά δύσκολο τον έλεγχο της ομοιογενούς κατανομής του οξυγόνου στην οργανική μάζα. Το τελικό προϊόν εξέρχεται και συλλέγεται από τον πυθμένα του αντιδραστήρα με ειδική διάταξη. Τυπικό κάθετο κλειστό σύστημα κομποστοποίησης συνεχούς ροής χωρίς ανάδευση παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.8 (α).

Τα συνεχή κάθετα συστήματα με ανάδευση περιλαμβάνουν εσωτερικό αναδευτήρα που φέρει περιστρεφόμενη γέφυρα με ατέρμονες κοχλίες στο μισό της μήκος. Το προς κομποστοποίηση υλικό εισάγεται στο κέντρο περιστροφής της γέφυρας και με τη

βοήθεια του ατέρμονα κοχλία μετατοπίζεται προς την περίμετρο. Περιοδικά το υπόστρωμα έρχεται σε επαφή με τον αέρα ενώ σταδιακά κινείται προς τα κάτω μέχρι που τελικά απάγεται από τον πυθμένα και οδηγείται σε κατάλληλο χώρο για ωρίμανση. Τυπικό κάθετο κλειστό σύστημα κομποστοποίησης συνεχούς ροής με ανάδευση παρουσιάζεται στην (Εικόνα 2.8(β)).



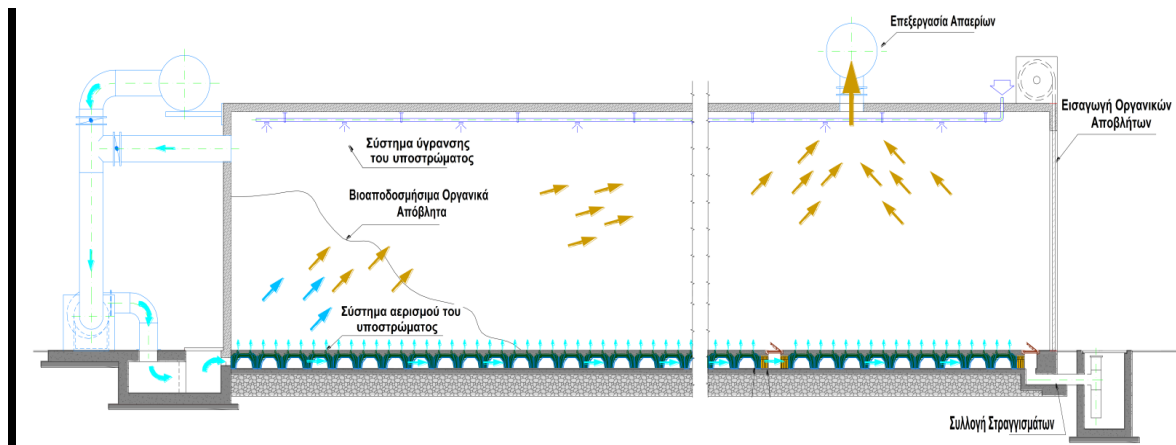
Εικόνα 2.8: Σχηματική αναπαράσταση τυπικών κάθετων κλειστών συστημάτων κομποστοποίησης (α) χωρίς ανάδευση και (β) με ανάδευση (Diaz et al., 2002)

Οριζόντια κλειστά συστήματα

Τα κλειστά συστήματα κομποστοποίησης οριζόντιου τύπου μπορούν διακριθούν σε (α) εγκιβωτισμένα συστήματα όπως τα βιοκελιά (cells ή biocells), τα τούνελ (tunnels ή biotunnels), και τα κιβώτια (containers), (β) κανάλια (channels ή trenches) και (γ) περιστρεφόμενους κυλίνδρους (rotating drum). Τα βιοκελιά, τα τούνελ και τα κιβώτια αποτελούν παραλλαγές εγκιβωτισμένων, αεροστεγών συστημάτων στα οποία η διεργασία της κομποστοποίησης πραγματοποιείται σε ένα σχεδόν πλήρως ελεγχόμενο περιβάλλον αναφορικά με τις συνθήκες θερμοκρασίας, υγρασίας και αερισμού. Ο έλεγχος των διεργασιών επιτυγχάνεται με τη ρύθμιση της εμφύσησης οξυγόνου (χρήση δυναμικού αερισμού), της αναρρόφησης των αερίων εκπομπών και την ενδεχόμενη ανακύκλωσή τους ενώ στις περισσότερες των περιπτώσεων είναι εξοπλισμένα με συστήματα ύφανσης για την προσθήκη και ανακύκλωση του νερού ώστε να ρυθμίζεται η περιεκτικότητα του υποστρώματος σε υγρασία. Όλα τα συστήματα αυτού του τύπου έχουν κατάλληλες διατάξεις για την απόσμηση και τον έλεγχο των αερίων εκπομπών που εκλύονται κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης ενώ ο χρόνος παραμονής της οργανικής ουσίας στους αντιδραστήρες δεν ξεπερνά τις δύο εβδομάδες.

Τα βιοκελιά (Εικόνα 2.9) είναι ασυνεχούς λειτουργίας και περιλαμβάνουν θερμική μόνωση στην εξωτερική επιφάνεια του συστήματος για τη μείωση των θερμικών απωλειών ενώ έχουν αναφερθεί και κατασκευές οι οποίες ενσωματώνουν εναλλάκτη θερμότητας για τη θέρμανση του αέρα πριν την είσοδό του στον βιοαντιδραστήρα σε περιοχές εφαρμογής με ψυχρό κλίμα (Diaz and Savage, 2007a). Η δυναμικότητα αυτών των συστημάτων κυμαίνεται από 100 έως 1000 m³. Τα κιβώτια είναι και αυτά ασυνεχούς

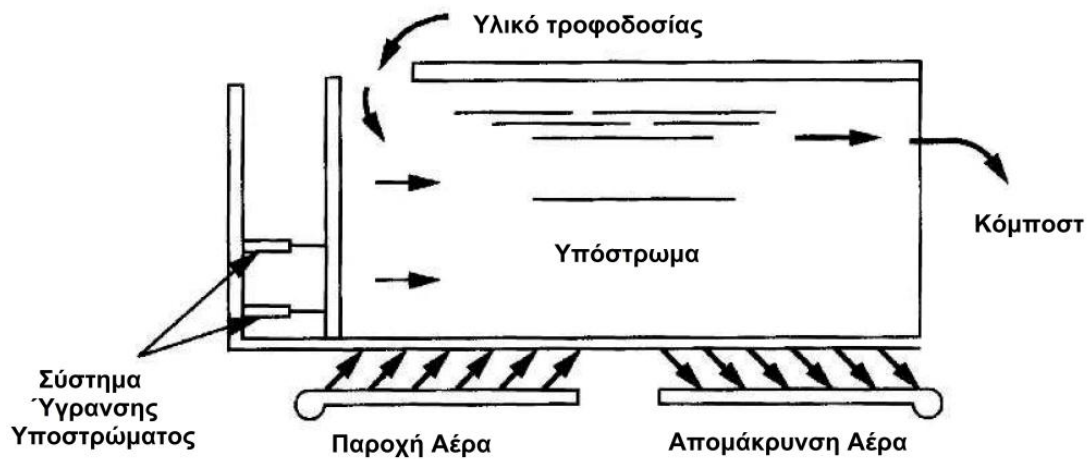
λειτουργίας μικρότερης χωρητικότητας (20 έως 40m³) και χρησιμοποιούνται συνήθως σε παράλληλα στοιχεία (**Εικόνα 2.10**), ώστε να εξυπηρετήσουν τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής με δυναμικότητα επεξεργασίας περίπου 3000-5000 τόνων οργανικού φορτίου ανά έτος για 6-8 παράλληλα στοιχεία (Diaz and Savage, 2007a). Τα τούνελ είναι συστήματα συνεχούς ροής, ενώ έχουν χωριστούς χώρους για τη φόρτωση και εκφόρτωση των υλικών στα άκρα του αντιδραστήρα. Η δυναμικότητα των συστημάτων αυτών είναι αντίστοιχη με αυτή των βιοκελιών (Εικόνα 2.11).



Εικόνα 2.9: Τυπική διάταξη οριζόντιων κλειστών συστημάτων κομποστοποίησης, τύπου βιοκελιών (Geoplast, 2010)

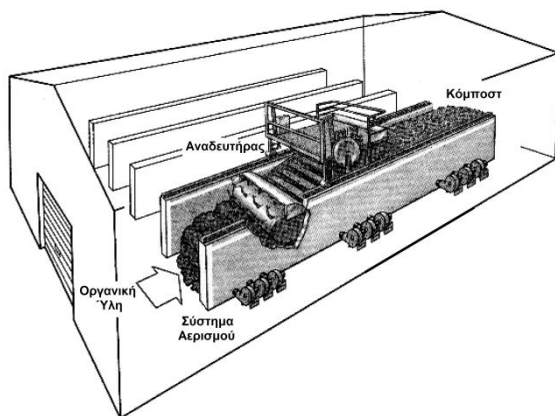


Εικόνα 2.10: Τυπική διάταξη οριζόντιων κλειστών συστημάτων κομποστοποίησης, τύπου κιβωτίων, σε παράλληλα στοιχεία



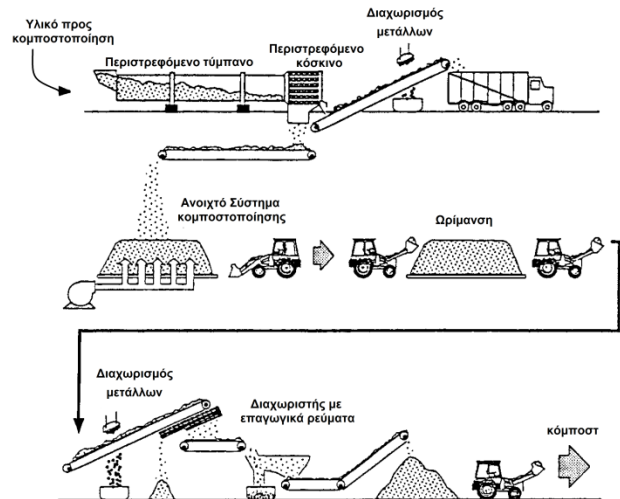
Εικόνα 2.11: Τυπική διάταξη οριζόντιων κλειστών συστημάτων κομποστοποίησης, τύπου τούνελ (Diaz et al., 2002)

Στα οριζόντια συστήματα κομποστοποίησης τύπου καναλιών, το οργανικό υλικό εισέρχεται σε στεγασμένο κτίριο το οποίο είναι διαμορφωμένο με παράλληλα κανάλια διαχωρισμένα με τείχος (Εικόνα 2.12). Στα κανάλια το οργανικό υλικό τοποθετείται σε ένα συνεχές στρώμα και αναστρέφεται τμηματικά από κατάλληλο μηχανολογικό εξοπλισμό. Τα συστήματα αυτού του τύπου είναι συνεχούς ή ασυνεχούς λειτουργίας, ενώ παράλληλα με την ανάδευση εξασφαλίζεται και ο αερισμός του υποστρώματος μέσω συστημάτων εμφύσησης ή απορρόφησης αέρα.



Εικόνα 2.12: Τυπική διάταξη οριζόντιων κλειστών συστημάτων κομποστοποίησης, τύπου καναλιών (Turovskiy and Mathai, 2006; Diaz et al., 2002)

Τα οριζόντια συστήματα κομποστοποίησης περιστρεφόμενων τυμπάνων, είναι κυλινδρικοί, συνήθως με κλίση, βιοαντιδραστήρες συνεχούς ροής (Εικόνα 2.13). Το υλικό εισέρχεται στο ένα άκρο του βιοαντιδραστήρα και με αργή περιστροφή του κυλίνδρου (συνήθως 2rpm) το οργανικό υλικό μεταφέρεται κατά μήκος του συστήματος έως ότου εξέλθει από το άλλο άκρο του κυλίνδρου (χρόνος παραμονής περίπου 1 εβδομάδα).



Εικόνα 2.13: Τυπική διάταξη οριζόντιου κλειστού συστήματος κομποστοποίησης, τύπου περιστρεφόμενου τυμπάνου (Diaz et al., 2002)

Συνήθως οι αντιδραστήρες αυτού του τύπου είναι εξοπλισμένοι με προεξοχές στο εσωτερικό του κυλίνδρου ώστε κατά την περιστροφική κίνηση του αντιδραστήρα το υπόστρωμα να τεμαχίζεται και να αναδύεται βοηθώντας στην ομογενοποίηση και στην κατάτμηση του υλικού. Λόγω του μικρού χρόνου παραμονής του υποστρώματος στον βιοαντιδραστήρα ακολουθείται, μετά τη συλλογή, στάδιο ωρίμανσης συνήθως με τη χρήση ανοικτών συστημάτων κομποστοποίησης (Diaz and Savage, 2007a; Misra et al., 2003).

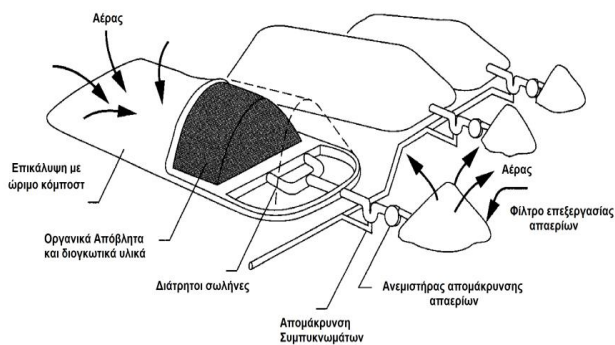
2.8.2 Ανοικτά συστήματα

Τα ανοικτά συστήματα διακρίνονται σε αναστρεφόμενα σειράδια (windrows) και σε αεριζόμενους στατικούς σωρούς (aerated static pile) ανάλογα με τη μέθοδο αερισμού του υποστρώματος. Στα συστήματα αναστρεφόμενων σειραδιών το οργανικό υλικό τοποθετείται σε παράλληλες σειρές μεγάλου μήκους (γραμμικές σωροί) όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.14. Ο αερισμός του υποστρώματος επιτυγχάνεται αποκλειστικά με την περιοδική αναμόχλευση της σωρού με τη χρήση κατάλληλου μηχανολογικού εξοπλισμού ενώ παράλληλα γίνεται ομογενοποίηση και μείωση του μεγέθους της οργανικής ουσίας (Shammas and Wang, 2009). Το ύψος, το πλάτος και το σχήμα των γραμμικών σωρών ρυθμίζονται σύμφωνα με το είδος του προς επεξεργασία υλικού και από τον τύπο του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται για την ανάδευση. Η βέλτιστη αναλογία πλάτους προς ύψος της σωρού είναι ίση με 2. Σε μεγαλύτερες αναλογίες παρουσιάζονται μεγαλύτερες απώλειες θερμότητας με συνεπακόλουθη μείωση της θερμοκρασίας στο υπόστρωμα (μη επίτευξη κρίσιμου όγκου) ενώ σε μικρότερους λόγους δύναται να διαμορφωθούν αναερόβιες συνθήκες εξαιτίας της ελλιπούς διάχυσης του αέρα (Γιδαράκος, 2007). Αναφορικά με τα συστήματα των αεριζόμενων στατικών σωρών (Εικόνα 2.15), το οργανικό υλικό τοποθετείται όπως και στην περίπτωση των αναστρεφόμενων σειραδιών, ενώ το υπόστρωμα δεν αναδύεται κατά τη διάρκεια του κύκλου κομποστοποίησης με αποτέλεσμα οι σωροί να πρέπει να διαμορφώνονται από την αρχή της διεργασίας. Το οργανικό υπόστρωμα συνήθως εμπλουτίζεται με διογκωτικό υλικό, ώστε να παρέχεται η

κατάλληλη δομική σταθερότητα για τη διάχυση του οξυγόνου στην οργανική μάζα ενώ ο αερισμός της πραγματοποιείται με θετική (εμφύσηση) ή αρνητική πίεση (αναρρόφηση) (Shammas and Wang, 2009).



Εικόνα 2.14: Τυπική διάταξη οριζόντιου ανοιχτού συστήματος κομποστοποίησης, τύπου αναστρεφόμενων σειραδιών (Diaz et al., 2002)



Εικόνα 2.15: Τυπική διάταξη οριζόντιου ανοιχτού συστήματος κομποστοποίησης, τύπου αεριζόμενων στατικών σωρών (Diaz et al., 2007, 2002)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΠΡΟΣΘΕΤΑ ΚΟΜΠΟΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

3.1 Εισαγωγή

Για να υπερνικηθούν οι δυσκολίες που αφορούν τον αερισμό του υποστρώματος και τη μεταφοράς οξυγόνου σε όλα τα στρώματα, καθώς επίσης και για να αυξηθούν τα ποσοστά άνθρακα και αζώτου στο υπόστρωμα, γίνεται προσθήκη κάποιων υλικών με χαρακτηριστική δομή και σύνθεση που συντελούν στην επιτάχυνση της διεργασίας.

Ο όρος πρόσθετο αναφέρεται στο υλικό εκείνο, το οποίο προστίθεται στο υπόστρωμα τροφοδοσίας, με στόχο τη μείωση του ειδικού βάρους και την αύξηση του πορώδους, ώστε να διευκολύνεται ο αερισμός ή η αύξηση της ποσότητας των βιοαποδομήσιμων οργανικών υλικών στο μείγμα. Στα πρόσθετα υλικά που έχουν χρησιμοποιηθεί περιλαμβάνονται ορυκτά όπως ο ζεόλιθος, ο βερμικουλίτης και ο περλίτης αλλά και ροκανίδι, πριονίδι, άχυρο, τύρφη, πυρηνόξυλο, κοπριά, και ώριμο κόμποστ. Το ιδανικό «πρόσθετο» πρέπει να είναι ξηρό, να έχει μικρό ειδικό βάρος και να βιοαποδομείται σχετικά εύκολα.

3.2 Πριονίδι, ροκανίδι

Πρόκειται για μικρά κομμάτια ξύλου (ξύσματα) που προέρχονται από τη βασική κατεργασία του. Αυτά όταν προστίθενται στο κόμποστ αυξάνουν το πορώδες και διευκολύνουν τον αερισμό του, προσλαμβάνοντας ποσοστό υγρασίας. Τέλος αυξάνουν την περιεκτικότητά του σε άνθρακα και για αυτό χρησιμοποιείται όταν το μίγμα είναι πλούσιο σε άζωτο π.χ. εκτεταμένη προσθήκη πράσινων υλικών.

Είναι σημαντικό η προέλευση του να είναι από φυσική ξυλεία, χωρίς χημικά πρόσθετα. Τα συνθετικά ξύλα όπως MDF, μελαμίνες κ.λ.π δεν δίνουν κατάλληλο για κομποστοποίηση πριονίδι.



Εικόνα 3.1 Πριονίδι

3.3 Ζεόλιθος

3.3.1. Γενικά για τους Ζεόλιθους

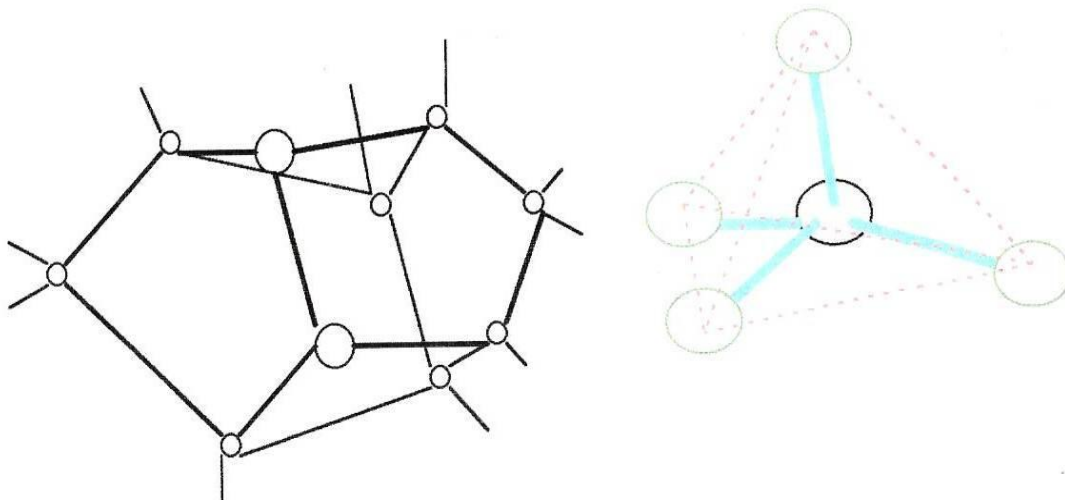
Η ιστορία των ζεόλιθων ξεκινάει το 1756, όταν ανακαλύπτονται από ένα Σουηδό ορυκτολόγο, που τους περιγράφει ως μια καινούρια κατηγορία ορυκτών, τα οποία αποτελούνται από ενυδατωμένα αργιλλοπυριτικά των αλκαλίων και των αλκαλικών γαιών. Η ονομασία προέρχεται από τις δύο ελληνικές λέξεις «ζέω» και «λίθος» και δόθηκε σε μια ομάδα ορυκτών που έχουν την ιδιότητα να παράγουν φυσαλίδες, που θυμίζουν φαινόμενα βρασμού, όταν θερμανθούν σε μετρίως υψηλές θερμοκρασίες. Οι φυσαλίδες αυτές οφείλονται στην απομάκρυνση ύδατος που συγκρατείται στο εσωτερικό της ανοικτής δομής των ζεόλιθων. Αργότερα η ανάπτυξη της τεχνολογίας, συντέλεσε στην κατανόηση της φύσης των ζεόλιθων, των ιδιοτήτων τους, στην ανακάλυψη των μοριακών κοσκίνων και στην ανάπτυξη μεθόδων χαρακτηρισμού τους. Στη δεκαετία του '60, ύστερα από μεγάλες γεωλογικές έρευνες, ανακαλύφθηκαν η ύπαρξη ενός μεγάλου αριθμού φυσικών ζεόλιθων σε ιζηματογενή αποθέματα, τα οποία κρίθηκαν κατάλληλα για εξόρυξη και εμπορευματοποίηση, ύστερα από εξέτασή τους με περίθλαση ακτίνων Χ. Το 1962 η Mobil Oil ανακοίνωσε τη χρήση του συνθετικού ζεόλιθου X ως καταλύτη πυρόλυσης. Αργότερα εισήχθη ο ζεόλιθος A στα απορρυπαντικά ως αντικαταστάτης των φωσφορικών που είναι βλαβερά για το περιβάλλον. Σήμερα χρησιμοποιούνται κυρίως οι ζεόλιθοι τύπου Y και ZSM – 5.

Οι ζεόλιθοι έχουν πολλές σημαντικές ιδιότητες με κύριες την εκλεκτικότητα σχήματος και την ανταλλαγή ιόντων, που τους καθιστούν πολύτιμα εργαλεία τόσο στην πετρελαϊκή βιομηχανία ως καταλύτες, όσο και σε άλλους βασικούς βιομηχανικούς τομείς, όπως στις διεργασίες προσρόφησης, ξήρανσης, διαχωρισμού (μοριακά κόσκινα) και στα απορρυπαντικά. Ακόμα, έχουν μεγάλη δεκτικότητα στις τροποποιήσεις και έντονη ικανότητα προσρόφησης, με συνέπεια τη δημιουργία νέων δομών κατάλληλων για διάφορες εφαρμογές.

3.3.2 Δομή των ζεολίθων

Οι ζεόλιθοι είναι κρυσταλλικά αργιλλοπυριτικά συγκροτήματα των αλκαλίων και των αλκαλικών γαιών, δηλαδή στοιχείων όπως νάτριο, κάλιο, μαγνήσιο και ασβέστιο. Εμπειρικά αντιπροσωπεύονται από τον τύπο $M_{2/n}Al_2O_3 \cdot \gamma SiO_2 \cdot \omega H_2O$, όπου: n το σθένος του κατιόντος M^{+n} , $\gamma > 2$ και ω το νερό που περιέχεται στον κενό χώρο των ζεόλιθων με $\omega > 4$.

Δομικά οι ζεόλιθοι είναι πολύπλοκα κρυσταλλικά ανόργανα πολυμερή βασιζόμενα σε απείρως εκτεινόμενα τριών διαστάσεων δίκτυα των AlO_4 και SiO_4 τετραέδρων, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με κοινά ιόντα οξυγόνου. Το δίκτυο της δομής αποτελείται από κανάλια και αλληλένδετα κενά, τα οποία καταλαμβάνονται από κατιόντα και μόρια νερού. Τα κατιόντα είναι αρκετά ευκίνητα και προκαλούν ιοντοεναλλαγή. Κάθε τετράεδρο AlO_4 φέρει αρνητικό φορτίο, το οποίο ισορροπεί με ένα κατιόν.



Εικόνα 3.2 Διαμόρφωση τετραέδρου στη δομή του ζεόλιθου

Υπάρχουν δύο τύποι δομών:

1. Ο πρώτος έχει εσωτερικό πορώδες σύστημα, το οποίο περιλαμβάνει αλληλένδετα κενά σε σχήμα κυψελίδας.
2. Ο δεύτερος δίνει ένα σύστημα από κανάλια που έχουν δύο ή τρεις διαστάσεις έτσι ώστε να παρέχουν γρήγορη ενδοκρυσταλλική διάχυση στην προσρόφηση και στην κατάλυση.

Στους περισσότερους ζεόλιθους τα τετράεδρα των AlO_4 ή SiO_4 , συναθροίζονται σε δευτερεύουσες δομικές μονάδες που συνήθως είναι απλά πολύεδρα και αποτελούν όλα μαζί την τελική δομή του ζεόλιθου. Το μέγεθος των πόρων είναι περίπου 0,3 – 0,8 nm και ο όγκος τους 0,10 – 0,35 cc/g. Συνήθως οι πόροι αποτελούνται από 8 – 12 δακτυλίους.

3.3.3 Ανταλλαγή ιόντων στους ζεόλιθους

Η ανταλλαγή ιόντων είναι μια σημαντική ιδιότητα των περισσότερων ζεόλιθων με αρκετές άμεσες εφαρμογές, αλλά και έμμεσες όπως στην κατάλυση και στη ρόφηση αερίων.

Οι ζεόλιθοι είναι ορυκτά που αποτελούνται από διάφορα στοιχεία όπως πυρίτιο, αργίλιο, αλκάλια, αλκαλικές γαίες και πιθανότατα μικρότερα ποσά από άλλα μέταλλα όπως σίδηρο και τιτάνιο. Το νερό είναι ένα ακόμα σημαντικό συστατικό. Οι ζεόλιθοι έχουν την ικανότητα να ανταλλάσσουν κατιόντα μέσω αντικατάστασης τετρασθενούς δομικού κατιόντος (π.χ. πυρίτιο) από κατιόν μικρότερου σθένους (συνήθως αργίλιο). Συνέπεια αυτής της αντικατάστασης είναι η δημιουργία ενός αρνητικά φορτισμένου πλέγματος στο σκελετό του ζεόλιθου, που πρέπει να εξουδετερωθεί από κατιόντα μέσα στους πόρους. Αυτά τα κατιόντα μπορεί να είναι οποιαδήποτε μέταλλα ή ομάδες αυτών, ή ακόμα κατιόν αλκυλαμμωνίου.

Η ικανότητα της ιοντικής ανταλλαγής των ζεόλιθων, που μπορεί να οφείλεται στα ακόρεστα σθένη που εμφανίζονται στις πλευρές του κρυστάλλου ή σε ελαττώματα της δομής, είναι σχετικά περιορισμένη. Παρόλα αυτά τα χαρακτηριστικά σε συνδυασμό με τη μη ομογενή κατανομή του αργιλίου στο σκελετό, στους ζεόλιθους υψηλής περιεκτικότητας σε διοξείδιο του πυριτίου το φαινόμενο είναι πιο έντονο.

Στην περίπτωση των ζεόλιθων, η αντίδραση ανταλλαγής ιόντων αφορά όγκους και δεν είναι απαραίτητα επιφανειακή αντίδραση. Επιπλέον, είναι στοιχειομετρική και κάθε φάση παραμένει ηλεκτρικά ουδέτερη κατά τη διαδικασία ανταλλαγής. Ο ζεόλιθος είναι ο ανταλλάκτης αλλά και το εξωτερικό διάλυμα αποτελεί φάση ανταλλαγής. Έτσι, στην απλούστερη περίπτωση υπάρχουν δύο φάσεις ανταλλαγής που μπορούν να είναι ένας ζεόλιθος και ένα εξωτερικό ηλεκτρολυτικό διάλυμα, ένα τηγμένο άλας σε ισορροπία με ένα ζεόλιθο ή τέλος δύο ζεόλιθοι μαζί. Μια τρίτη φάση μπορεί επίσης να ληφθεί υπόψη ακόμη και για το πιο απλό σύστημα, που είναι η ατμώδης φάση, καθώς το ατμώδες διάλυμα (συνήθως νερό) χρησιμεύει ως θερμοδυναμικό σημείο αναφοράς και για τις τρεις φάσεις. Το διάλυμα αυτό μπορεί να έχει σημαντική επίδραση σε πολλά χαρακτηριστικά της αντίδρασης όπως στη θέση ισορροπίας και στο ποσοστό ανταλλαγής. Σε μια αντίδραση ανταλλαγής με ένα ζεόλιθο και νερό να αποτελούν τις δύο φάσεις, τα κατιόντα αρχικά ανήκουν σε κάθε μια χωριστά και κατόπιν μετακινούνται ανάμεσα στις δύο φάσεις μέχρι να επιτευχθεί ισορροπία.

Στους ζεόλιθους, η μοριακή διάχυση είναι συνήθως ο βασικός μηχανισμός στην ιοντική ανταλλαγή. Στην περίπτωση της αυτοδιάχυσης υπάρχει απλή σχέση ανάμεσα στο ποσοστό ανταλλαγής και στη χαρακτηριστική διάσταση του κρυστάλλου. Στην ανταλλαγή μεταξύ διαφορετικών τύπων ιόντων, η σχέση αυτή δεν είναι τόσο άμεση, αλλά παρόλα αυτά, μειώνοντας το μέγεθος του κρυστάλλου αυξάνεται αισθητά το ποσοστό ανταλλαγής. Για να αυξηθεί λοιπόν η απόδοση, ο κύριος στόχος είναι η δημιουργία κρυστάλλων πολύ μικρού μεγέθους. Ένας τρόπος για να συμβεί αυτό είναι η χρήση ζεόλιθου Α προερχόμενο από άργιλο που έχει υποστεί όξινη κατεργασία.

3.3.4 Κλινοπτιλόλιθος

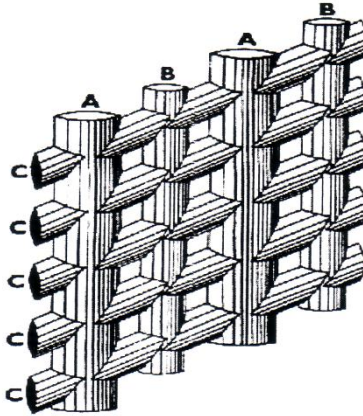
Ο κλινοπτιλόλιθος συναντάται στη φύση σε ιζηματογενή αποθέματα και μαζί με τον ευλανδίτη αποτελούν το πιο συχνά απαντώμενο ζεολιθικό είδος. Η πρώτη αναφορά στον κλινοπτιλόλιθο γίνεται το 1890 από τον Pirson, ο οποίος τον αναγνώρισε άστοχα ως μορδενίτη, καθώς ο κλινοπτιλόλιθος ανήκει στην ομάδα του ευλανδίτη.

Έχει γενικό τύπο:



Χαρακτηρίζεται ως ευλανδίτης υψηλής περιεκτικότητας σε πυρίτιο, καθώς ο λόγος Si/Al ποικίλει από 4.2 έως 5.25 για τον κλινοπτιλόλιθο, ενώ για τον ευλανδίτη ξεκινάει από ένα ελάχιστο, περίπου από 2.7. Ο κλινοπτιλόλιθος αφυδατώνεται με δυσκολία και η σταθερότητά του αυτή χαρακτηρίζεται από την ικανότητα άμεσης επαναπροσρόφησης νερού και διοξειδίου του άνθρακος. Η συνολική θεωρητική ιοντοεναλλακτική ικανότητα του κλινοπτιλόλιθου κυμαίνεται μεταξύ 1.6 και 2.8 meq/g.

Η δομή του κλινοπτιλόλιθου χαρακτηρίζεται από τη διαμόρφωση ενός τετραέδρου. Κάθε ένα τετραέδρο του κλινοπτιλόλιθου ανήκει από κοινού σε ένα τετραμελή και ένα πενταμελή δακτύλιο από Si και Al, ενώ οι μονάδες (Si, Al, O) είναι διατεταγμένες σε στοιβάδες. Η κάθε στοιβάδα διασταυρώνεται με άλλες μέσω δεσμών Si-O-Si και Si-O-Al. Ανάμεσα στις στοιβάδες υπάρχουν ανοιχτά κανάλια οκταμελών και δεκαμελών δακτυλίων, τα οποία είναι παράλληλα στον άξονα c, με διαστάσεις 4.4 x 7.2 Angstrom ενώ μια δέσμη καναλιών είναι παράλληλη στον άξονα a, με διαστάσεις 4 x 5.5 Angstrom. [44]



Εικόνα 3.3 Σύστημα καναλιών κλινοπτιλόλιθου

Επίσης ο κλινοπτιλόλιθος εμφανίζει υψηλή θερμική σταθερότητα πάνω από τους 800°C, σε αντίθεση με τον ευλανδίτη που σε θερμοκρασία 500-550°C καταστρέφεται η δομή του. Τούτο δικαιολογείται από την υψηλή τιμή του λόγου Si/Al που εμφανίζεται στον κλινοπτιλόλιθο όπως και από την υψηλή του περιεκτικότητα σε ιόντα K⁺, καθώς ο δεσμός Si-O-Si είναι πιο σταθερός από το δεσμό Al-O-Si.

3.4 Βερμικουλίτης

3.4.1 Γενικά για το Βερμικουλίτη

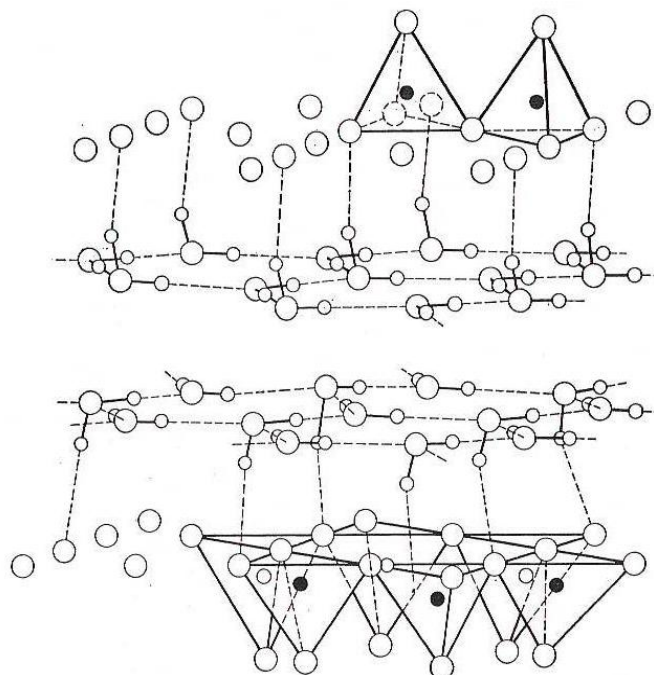
Το όνομα του βερμικουλίτη προέρχεται από το λατινικό “Vermiculair” και χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από το Webb για το χαρακτηρισμό κάποιων υλικών. Ο βερμικουλίτης έχει γενικό χημικό τύπο $(OH)_4(Mg \cdot Ca)_x(Si_{8-x} \cdot Al_x)(Mg \cdot Fe)_6O_{20} \cdot \gamma H_2O$, με το $X = 1 - 1,4$ και το $\gamma =$ περίπου 8. Από το χημικό τύπο φαίνεται να περιέχουν σημαντική ποσότητα μαγνησίου και σιδήρου. Όπως και οι μοντμοριλονίτες το ίδιο και οι βερμικουλίτες έχουν υψηλή ικανότητα ιοντοεναλλαγής. Στην ιοντοεναλλακτική ικανότητα του βερμικουλίτη σημαντικό ρόλο παίζει το ιόν Mg^{+2} , που φαίνεται να είναι το χαρακτηριστικό ιόν που συμμετέχει στην ιοντοεναλλαγή. Από όλα τα αργιλοπυριτικά ορυκτά ο βερμικουλίτης έχει τη μεγαλύτερη ιοντοεναλλακτική ικανότητα.

Υπάρχουν τρεις λόγοι στους οποίους οφείλεται η ικανότητα ιοντοεναλλαγής των αργίλων. Ο πρώτος είναι οι ύπαρξη σπασμένων δεσμών γύρω από τις άκρες των πυριτικών μονάδων, κάτι που δημιουργεί πλεόνασμα φορτίου το οποίο εξουδετερώνεται από προσροφημένα κατιόντα. Ο αριθμός των σπασμένων δεσμών και επομένως η ιοντοεναλλακτική χωρητικότητα αυξάνονται όσο μειώνεται το μέγεθος των σωματιδίων. Δεύτερος λόγος είναι οι αντικαταστάσεις στο κρυσταλλικό πλέγμα ιόντων τετρασθενούς πυριτίου με ιόντα τρισθενούς αργιλίου στο τετραεδρικό στρώμα και ιόντων αργιλίου με ιόντα μικρότερου σθένους, κυρίως μαγνησίου, στο οκταεδρικό στρώμα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία φορτίων στις δομικές μονάδες των αργίλων και επομένως την ανάπτυξη ικανότητας ιοντοεναλλαγής. Στον βερμικουλίτη οι αντικαταστάσεις αυτές του δίνουν το 80% της ικανότητας ιοντοεναλλαγής του. Τέλος, ο τρίτος λόγος είναι η αντικατάσταση υδρογόνων κάποιων εκτεθειμένων υδροξονίων από κατιόντα τα οποία είναι εναλλάξιμα.

3.4.2 Δομή Βερμικουλίτη

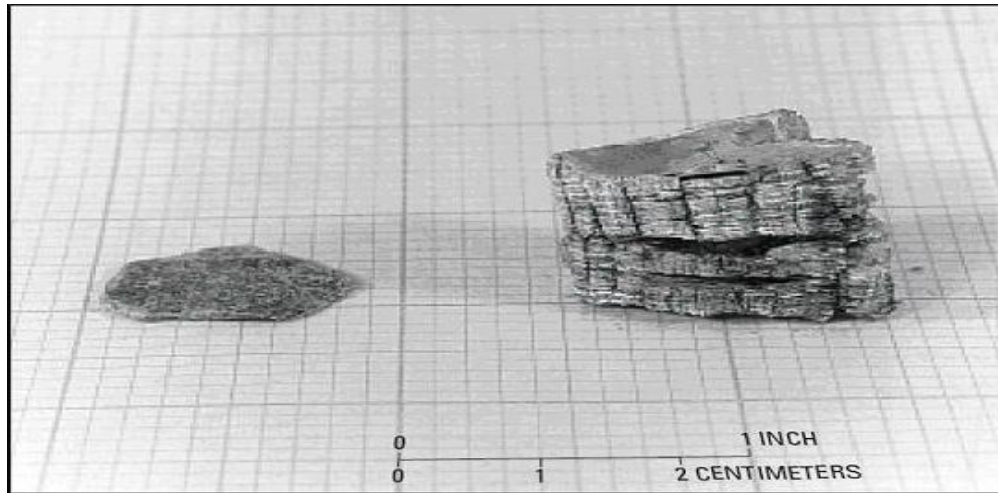
Ο βερμικουλίτης είναι ο τυπικός αντιπρόσωπος των χλωριτών, οι οποίοι προκύπτουν σαν προϊόντα καιρικής ωρίμανσης των πυροξένων, των αμφιβόλων και των βιοτιτών. Πιο συγκεκριμένα οι χλωρίτες, άρα και οι βερμικουλίτες, κατατάσσονται στη μεικτή τάξη που προέρχεται από τις ομάδες του τάλκη, του πυροφυλλίτη και της μίκας, οι οποίες εντάσσονται στους αργίλους. Συνεπώς οι βερμικουλίτες ανήκουν στη μεγάλη ομάδα των φυλλοπυριτικών ορυκτών. [20]

Η δομή αποτελείται από φύλλα τριοκταεδρικής μίκας ή τάλκη διαχωριζόμενα από στρώματα μορίων νερού τα οποία καταλαμβάνουν ένα συγκεκριμένο χώρο της τάξης των 4,98Å που είναι περίπου το πάχος δύο μορίων νερού. Επομένως στη φυσική του μορφή, το ορυκτό αποτελείται από μια αλλοιωμένη μορφή μίκας και διπλά στρώματα νερού. Η δομή του βερμικουλίτη είναι ανισόρροπη κυρίως λόγω των αντικαταστάσεων Si^{4+} από Al^{3+} . Αυτές οι αντικαταστάσεις εξισορροπούνται μερικώς από άλλες αντικαταστάσεις στο πλέγμα της μίκας αλλά πάντα υπάρχει μια ανεπάρκεια φορτίου. Αυτή η ανεπάρκεια φορτίου ικανοποιείται από κατιόντα τα οποία βρίσκονται κυρίως μεταξύ των στρωμάτων μίκας και είναι ιδιαίτερα εναλλάξιμα.



Εικόνα 3.4 Σχεδιάγραμμα της δομής του βερμικουλίτη όπου φαίνονται τα ενδιάμεσα στρώματα νερού

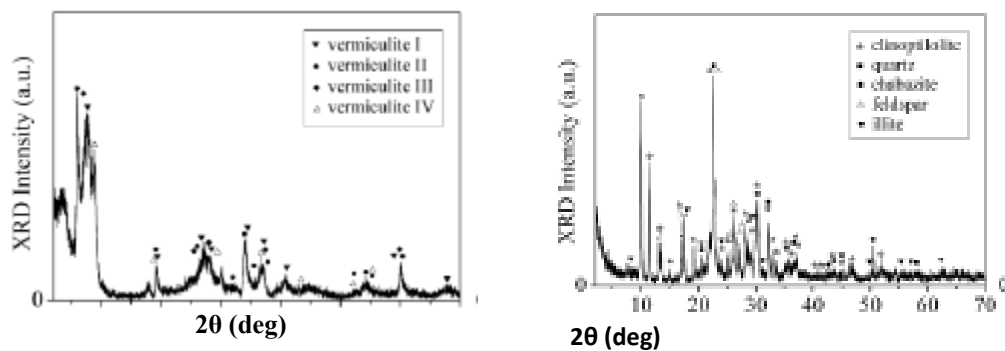
Τα μόρια του νερού σχηματίζουν ενδιάμεσα επίπεδα μεταξύ του επιπλέον επιπέδου του βρουκίτη και των επιπέδων των $(\text{Si}_2\text{O}_5)^{2-}$. Η παρουσία τους προκαλεί ταχεία διαστολή του όγκου και διόγκωση όταν θερμανθεί, καθώς οι υδρατμοί διαφεύγουν προς τα έξω, αλλά το ορυκτό ενυδατώνεται πολύ σύντομα με την έκθεση του σε υγρασία σε θερμοκρασία δωματίου. Η ιδιότητα αυτή προσδίδει στο υλικό καλή θερμομονωτική ικανότητα, και το κάνει χρήσιμο υλικό συσκευασίας. Το νερό υπάρχει σε δύο μορφές, «δεσμευμένο» και «αδέσμευτο». Το δεσμευμένο νερό υπάρχει γύρο από το μαγνήσιο ως ένας φάκελος ενυδάτωσης από έξι μόρια νερού ανά Mg^{++} , και το πιθανότερο παίρνει τη μορφή μιας οκταεδρικής ομάδας. Το αδέσμευτο νερό γεμίζει τα κενά μεταξύ των οκταεδρικών μονάδων νερού.



Εικόνα 3.5 Ανεπεξέργαστος βερμικουλίτης σε σύγκριση με διογκωμένο (exfoliated)

3.4.3 Δομική σύνθεση Ζεόλιθου και Βερμικουλίτη

Ο ζεόλιθος και ο βερμικουλίτης αποτελούν τα φυσικά αργιλοπυριτικά ορυκτά. Η κρυσταλλική δομή των ορυκτών προκύπτει μέσω της ανάλυσης XRD. Η ένταση και οι θέσεις των κορυφών κάθε κρυσταλλικής φάσης (ποιοτική ανάλυση) προσδιορίζονται μέσω σύγκρισης των πειραματικών κορυφών με τα φάσματα της βάσης δεδομένων JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards). Τα χαρακτηριστικά γραφήματα XRD του βερμικουλίτη, του μπεντονίτη και του ζεόλιθου δίνονται στην Εικόνα 3.6 (α-β).



Εικόνα 3.6: Φάσμα περίθλασης ακτίνων Χ (XRD γράφημα) (α) βερμικουλίτη, (β) ζεόλιθου

Ο βερμικουλίτης αποτελείται από τέσσερις κρυσταλλικές φάσεις με διαφορετικό δομικό τύπο $Mg_{11}Al_5FeSi_{11}O_{42} \cdot 40H_2O$ (I), $Mg_x(Mg,Fe)_3(Al,Si)_4O_{10}(OH)_2 \cdot 4H_2O$ (II), $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ (III), $22MgO \cdot 5Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot 40H_2O$ (IV) (Εικόνα 3.6 α). Ο φυσικός ζεόλιθος αποτελείται κυρίως από κλινοπτιλόλιθο [μορφή-Na: $(Na,K,Ca)_5Al_6Si_{30}O_{72} \cdot 18H_2O$ και μορφή-Ca: $KNa_2Ca_2(Si_{29}Al_{17})O_{72} \cdot 24H_2O$], ενώ χαρακτηρίζεται από μικρή περιεκτικότητα σε αστρίο (feldspar) $(Rb_{0.811}Al_{0.062})(Al_{0.997}Si_{3.003}O_8)$, χαλαζία (quartz) (SiO_2) , ιλλίτη $[K(AlFe)_2AlSi_3O_{10}(OH)_2 \cdot H_2O]$ και χαβαζίτη $[Ca_2Al_4Si_8O_{24} \cdot 12H_2O]$ (Σχήμα 5.1γ). Λόγω της επικάλυψης της μέγιστης κορυφής, που είναι χαρακτηριστική στα δείγματα ζεόλιθων, η παρουσία κάποιων συστατικών σε πολύ μικρές ποσότητες δεν μπορεί εντελώς να συμπεριληφθεί ή να εξαιρεθεί. Στον Πίνακα 5.1 δίνονται οι βασικοί δομικοί τύποι των κρυσταλλικών φάσεων των ορυκτών. (Κάτσου 2011)

Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζεται η χημική σύσταση των ορυκτών (σε μορφή οξειδίων), όπως προκύπτει από την XRF ανάλυση (ημι-ποσοτικός προσδιορισμός). Στον ίδιο Πίνακα δίνεται η μέση αναλογία Si/Al και SiO₂/Al₂O₃ (mol/mol). Τα βασικά συστατικά των ορυκτών είναι το διοξείδιο του πυριτίου (SiO₂) και το οξείδιο του αργιλίου (Al₂O₃). Ο ζεόλιθος έχει μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε κάλιο και ασβέστιο και μικρότερη περιεκτικότητα σε νάτριο. Ο βερμικουλίτης χαρακτηρίζεται από πολύ υψηλή περιεκτικότητα σε μαγνήσιο, ενώ σημαντική είναι και η περιεκτικότητά του σε κάλιο. Το K⁺, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ αποτελούν κινητικά ιόντα που μπορούν να εναλλαχθούν με τα βαρέα μέταλλα και άλλα ιόντα που περιέχονται στα απόβλητα.

Πίνακας 3.1: Δομική σύνθεση των ορυκτών βάσει της XRD ανάλυσης και των αποθηκευμένων φασμάτων της βάσης δεδομένων JCPDS

Ορυκτό	Δομικός τύπος	JCPDS κωδικός
Κλινοπτιλόλιθος, μορφή-Ca	Ca _{3.16} Si ₃₆ O ₇₂ ·21.8H ₂ O	70-1859
	KNa ₂ Ca ₂ (Si ₂₉ Al ₇)O ₇₂ ·24H ₂ O	39-1383
Κλινοπτιλόλιθος, μορφή-Na	(Na,K,Ca) ₅ Al ₆ Si ₃₀ O ₇₂ ·18H ₂ O	47-1870
Αστριός (feldspar)	(Rb _{0.811} Al _{0.062})(Al _{0.997} Si _{3.003} O ₈)	70-8056
Χαλαζίας (quartz)	SiO ₂	82-1234
Ιλλίτης	K(AlFe) ₂ AlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₂ ·H ₂ O	15-0603
Χαβαζίτης	Ca ₂ Al ₄ Si ₈ O ₂₄ ·12H ₂ O	34-0137
Βερμικουλίτης (I)	Mg ₁₁ Al ₅ FeSi ₁₁ O ₄₂ ·40H ₂ O	10-0418
(II)	Mg _x (Mg,Fe) ₃ (Al,Si) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·4H ₂ O	16-0613
(III)	Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	74-1732
(IV)	22MgO·5Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃ ·SiO ₂ ·40H ₂ O	02-0030
Μοντμοριλονίτης	Ca _{1.2} Al ₄ (Si ₈ O ₂₀ (OH) ₂)O _{2.2} ·3H ₂ O	73-6746
	(Na,Ca) _{0.3} (Mg,Al) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·xH ₂ O	03-0015
Νεφελίτης (nephelite)	Na(AlSiO ₄)	88-1231

Πίνακας 3.2 Χημική ανάλυση ορυκτών

Οξείδιο	Χημική σύσταση (% κ.β.)		Κανονικοποιημένη χημική σύσταση (% κ.β.)	
	Ζεόλιθος	Βερμικουλίτης	Ζεόλιθος	Βερμικουλίτης
SiO ₂	71.30 ± 0.86	45.30 ± 1.38	77.14	44.15
Al ₂ O ₃	12.10 ± 0.27	15.40 ± 2.18	13.09	15.01
Fe ₂ O ₃	0.89 ± 0.16	5.47 ± 0.47	0.96	5.33
CaO	3.38 ± 0.16	1.31 ± 1.39	3.66	1.28
Na ₂ O	0.28 ± 0.18	1.60 ± 1.09	0.30	1.56
MgO	0.68 ± 0.01	27.4 ± 1.24	0.74	26.71
K ₂ O	3.66 ± 0.14	4.90 ± 3.26	3.96	4.78
TiO ₂	0.14 ± 0.03	1.22 ± 0.65	0.15	1.19

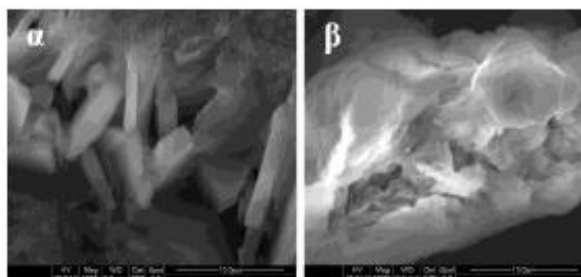
SiO ₂ /Al ₂ O ₃ (mol/mol)	10.00	4.99		
Si/Al (mol/mol)	5.00	2.50		

Η ολική ή θεωρητική (TCEC) και η διαθέσιμη (MCEC) ιοντοεναλλακτική χωρητικότητα των δύο ορυκτών δίνονται στον Πίνακα 3.3. Η TCEC υπολογίζεται βάσει των αποτελεσμάτων της χημικής ανάλυσης των δειγμάτων που δίνεται στον Πίνακα 3.2. Παρατηρείται ότι η TCEC που προσδιορίζεται από το άθροισμα των γραμμοϊσοδύναμων των αντισταθμιστικών κατιόντων Na⁺, K⁺, Ca²⁺ και Mg²⁺ ανά γραμμάριο υλικού είναι μεγαλύτερη από την TEC που υπολογίζεται βάσει της ισοδύναμης ποσότητας του Al. Το τελευταίο είναι ιδιαίτερα εμφανές για το βερμικουλίτη λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς του σε μαγνήσιο, μέρος του οποίου μπορεί να συγκρατείται ισχυρά στη δομή του ορυκτού και να μην μπορεί να εναλλαχθεί. Η θεωρητική ιοντοεναλλακτική χωρητικότητα που υπολογίζεται για κάθε ορυκτό είναι ενδεικτική, καθότι τα ιόντα που υπολογίζονται από τη χημική ανάλυση των ορυκτών συνήθως δεν είναι όλα εναλλάξιμα, διότι είτε αποτελούν συστατικά προσμίξεων, είτε βρίσκονται σε θέσεις τέτοιες που καθιστούν την εναλλαγή αδύνατη (Inglezakis, 2005; Artioli et al., 1985). Συνεπώς, μέρος της θεωρητικής χωρητικότητας μπορεί να είναι ανενεργό και επομένως η TEC υπερεκτιμά την ιοντοεναλλακτική ικανότητα του υλικού (Inglezakis, 2001). Η διαθέσιμη ιοντοεναλλακτική χωρητικότητα υπολογίζεται εφαρμόζοντας την μέθοδο NH₄Ac, ακολουθώντας τη διαδικασία των διαδοχικών ισορροπήσεων. Η TEC είναι μικρότερη από τη θεωρητική χωρητικότητα των ορυκτών. Η διαφορά οφείλεται στην παρουσία κάποιων κατιόντων που είτε δεν μπορούν να απομακρυνθούν από δομή των ορυκτών, καθώς συγκρατούνται με ισχυρούς δεσμούς σε αυτά, είτε αποτελούν μέρος των προσμίξεων των υλικών και συνεπώς δεν είναι ιοντοεναλλάξιμα (Inglezakis et al., 2005). Ωστόσο, ο προσδιορισμός της MCEC δίνει μια σταθερή τιμή για κάθε ορυκτό, που είναι ανεξάρτητη από τις εκάστοτε πειραματικές συνθήκες. Στην πραγματικότητα η ενεργή χωρητικότητα του ορυκτού είναι διαφορετική για κάθε μέταλλο και εξαρτάται από τις πειραματικές συνθήκες που επικρατούν στο σύστημα. Επομένως, στις πρακτικές εφαρμογές, είναι πιο σημαντικός ο προσδιορισμός της μέγιστης συγκέντρωσης των μεταλλικών κατιόντων που μπορεί να προσροφηθεί ανά μονάδα μάζας προσροφητικού υλικού και εκφράζεται ως μέγιστη προσροφητική χωρητικότητα (q_m) (Volesky, 2007). Το q_m των ορυκτών είναι διαφορετικό για το κάθε μέταλλο και εξαρτάται από τις πειραματικές συνθήκες και όλες τις παραμέτρους που μπορεί να επηρεάσουν την προσρόφηση. (Κάτσου 2011)

Πίνακας 3.3 Ιοντοεναλλακτική χωρητικότητα (meq g⁻¹) ορυκτών

Χωρητικότητα (meq g ⁻¹)	Ζεόλιθος	Βερμικουλίτης	Μέθοδος
Θεωρητική (TCEC)	2.37	3.02	Χημική ανάλυση – βάσει της ισοδύναμης ποσότητας του Al
Θεωρητική (TCEC)	2.44	15.62	Χημική ανάλυση – βάσει του αθροίσματος των ιόντων Na ⁺ , K ⁺ , Ca ²⁺ και Mg ²⁺
Ενεργή (MCEC)	1.88	1.21	NH ₄ Ac

Ο προσδιορισμός της δομής και της μορφολογίας των ορυκτών πραγματοποιείται με τη χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM). Η μορφολογία των ορυκτών αποτυπώνεται στις εικόνες που λαμβάνονται από το SEM (Σχήμα 5.2), όπου διακρίνεται η πορώδης δομή και η στρωματική διαμόρφωση των ορυκτών. Στο δείγμα του ζεόλιθου παρατηρείται ο σχηματισμός χαρακτηριστικών κρυστάλλων (platy) διαφορετικών μεγεθών με ευκρινή διαχωρισμό σε μονοκλινές κρυσταλλικό σύστημα παρουσία καναλιών. Η διαμόρφωση κρυσταλλικών συσσωματωμάτων στο δείγμα του μπεντονίτη και μεγάλων στρωμάτων κρυστάλλων στο δείγμα του βερμικουλίτη αποτυπώνεται στη φωτογραφία του SEM.

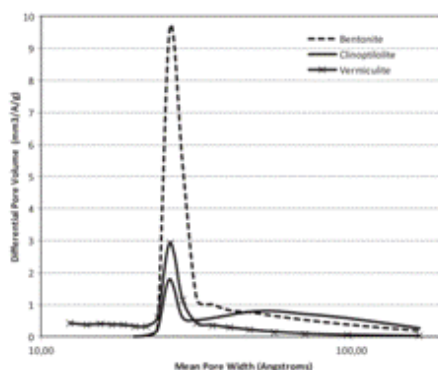


Εικόνα 3.7: Φωτογραφίες SEM (α) ζεόλιθου, (β) βερμικουλίτη (5000x)

Η ειδική επιφάνεια (S_{BET}) και το πορώδες των ορυκτών προσδιορίζονται μέσω ανάλυσης ποροσιμετρίας αζώτου (BET) (Inglezakis et al., 2010), τα αποτελέσματα της οποίας δίνονται στον Πίνακα 3.4. Από την Εικόνα 3.8 φαίνεται ότι το εύρος της κατανομής των πόρων των ορυκτών μειώνεται κατά τη σειρά ζεόλιθος>βερμικουλίτης. Το μειωμένο εύρος κατανομής συνδέεται με μεγαλύτερη ομοιογένεια των πόρων. Ο ζεόλιθος σε αντίθεση με τον βερμικουλίτη φαίνεται ότι χαρακτηρίζεται από πόρους που ανήκουν σε δύο περιοχές, τους μικροπόρους (~2 nm) και τους μεσοπόρους (~5 nm). Η κατανομή των πόρων του φυσικού ζεόλιθου σε δύο περιοχές διαπιστωθεί και από άλλους ερευνητές (Kowalczyk et al., 2006)

Πίνακας 3.4 Αποτελέσματα ανάλυσης ποροσιμετρίας N2

Ορυκτό	S_{BET} ($m^2 g^{-1}$)	Πορώδες (%)
Ζεόλιθος	28.64	16.3
Βερμικουλίτης	20.82	6.1



Εικόνα 3.8: Κατανομή μεγέθους πόρων των ορυκτών

3.5 Περλίτης

3.5.1 Γενικά για τον Περλίτη

Ο περλίτης είναι ένα ηφαιστειογενές υαλώδες αργιλλοπυριτικό πέτρωμα του οποίου η γενεσιουργός αιτία είναι η όξινη λαβα , που εγχύθηκε επιφανειακά ή υποθαλάσσια κατά την διάρκεια ηφαιστειακών δραστηριοτήτων. Η τελευταία στην συνέχεια ψύχθηκε και στερεοποιήθηκε ταχύτατα , υπό συνθήκες που δεν επέτρεψαν στα άτομα του ορυκτού να τοποθετηθούν σε σχηματισμούς κρυσταλλικού πλέγματος , γεγονός που έδωσε τελικά στον περλίτη την υαλώδη μορφή του.

Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που επέδρασε για τον σχηματισμό του περλίτη ήταν η παρουσία νερού και διαφόρων αερίων που παγιδεύτηκαν στην μάζα του , την στιγμή της ψύξης και στερεοποίησης του. Το όνομα προέρχεται από την υφή του που χαρακτηρίζεται από την παρουσία κόκκων, θυμίζοντας μικρά μαργαριτάρια (πέρλες).

Πετρογραφικά ο περλίτης είναι ένα ηφαιστειογενές υλικό. Έχει χαρακτηριστική περλιτική δομή που αποτελείται από ομόκεντρα σπασίματα τα οποία μοιάζουν με πέρλες που είναι τοποθετημένες σε όλο το γυαλί, άλλοτε κυκλικά και άλλοτε σε πολυγωνικούς σχηματισμούς. Αυτό είναι και το έντονο χαρακτηριστικό του περλίτη . Τα προαναφερθέντα σπασίματα είναι φαινόμενο που παρατηρείται σε όξινα γυαλιά.

Η χημική του σύνθεση είναι η ακόλουθη:

Πίνακας 3.5 Χημική σύσταση του περλίτη

<i>SiO₂</i>	71 – 75%
<i>Al₂O₃</i>	12,5 – 13,8%
<i>Na₂O</i>	3,8 – 4,2%
<i>K₂O</i>	3,3 – 4,7%
<i>CaO</i>	0,8 – 1,5%
<i>MgO</i>	0,4 – 0,7%
<i>Fe₂O₃</i>	0,7 – 1,5%
<i>S and SO₃</i>	0 %
<i>L. O. I.</i>	2,2 – 4,5%

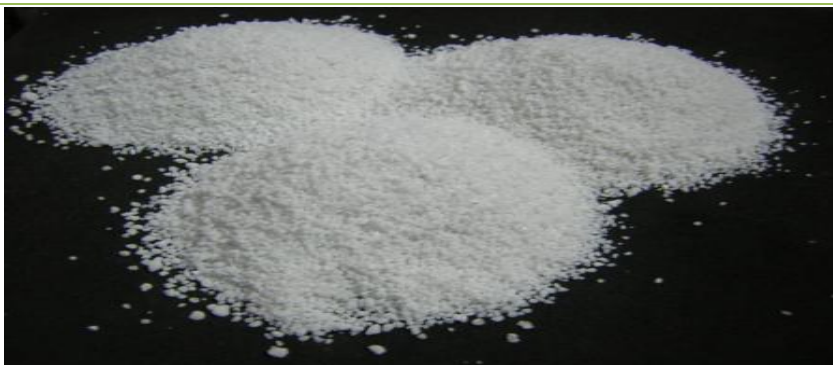
Το υλικό το οποίο εξορύσσεται αρχικά αλέθεται, διαχωρίζεται και στη συνέχεια υφίσταται θερμική επεξεργασία στους **900 – 1.000 °C**. Κατά τη διάρκεια αυτής της επεξεργασίας οι μικρές ποσότητες νερού που υπάρχουν στα μικροτεμάχια του ακατέργαστου περλίτη μετατρέπονται σε ατμό με αποτέλεσμα τη διόγκωση του αρχικού όγκου κατά **4 – 20** φορές και τη μετατροπή του σε σπογγώδεις κόκκους πολύ μικρού βάρους.

Η υψηλή θερμοκρασία της επεξεργασίας αυτής έχει ως αποτέλεσμα την απόδοση ενός αποστειρωμένου υλικού. Η επιφάνεια του κάθε τεμαχιδίου αυξάνεται σημαντικά και οι κοιλότητες που υπάρχουν στην επιφάνειά τους απορροφούν το νερό.

Ο περλίτης είναι σχετικά ουδέτερο υλικό με **pH** από **7,0 – 7,5** αλλά δεν παρουσιάζει ρυθμιστική ικανότητα και επίσης δεν προσφέρει θρεπτικά στοιχεία.

Η Ελλάδα είναι η χώρα από την οποία εξορύσσονται οι μεγαλύτερες ποσότητες σε παγκόσμιο επίπεδο. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα έτη 2003 και το 2004 από το σύνολο των εξαγωγών κατεργασμένου περλίτη της Ελλάδας, ο οικοδομικός τομέας (δομικά υλικά και επιχρίσματα) απορρόφησε το 58% – 59%, οι γεωργικές χρήσεις (υδροπονία και παραγωγή ανθοκομικών μειγμάτων) το 28% – 30% και οι άλλες χρήσεις (διηθητικά μέσα, κρουγενείς μονώσεις) το υπόλοιπο 11% – 14%.

Είναι φανερό πως ο περλίτης έχει μεγάλη ποικιλία εφαρμογών αλλά αυτό που τον κάνει να υπερέχει είναι η χαμηλή του τιμή. Έτσι ο μέσος όρος τιμής του διογκωμένου περλίτη ανά τόνο, είναι για εγκαταστάσεις χαμηλών θερμοκρασιών €420, για πληρωτικό €411 για βοηθητικό διηθήσεως €329, για ανθοκηπουρική χρήση €325, για οικοδομικό υλικό €150. Οι τιμές εξαρτώνται από την κοκκομετρία, την ποιότητα και την εφαρμογή. Η τιμή του ακατέργαστου περλίτη είναι περίπου **320€/tn**, ενώ ένας σάκος κατεργασμένου περλίτη κοστίζει περίπου **10 – 15 ευρώ**.



Εικόνα 3.9 Περλίτης

3.5.2 Δομές

Οι περλίτες που έχουν οικονομική σημασία εμφανίζονται με μια ποικιλία δομών που φαίνεται ότι σχετίζονται με το βάθος σχηματισμού τους. Στα κοιτάσματα εμφανίζονται οι εξής δομές:

- Κισσηρώδης
Εμφανίζεται κοντά στην επιφάνεια. Πρόκειται για περλίτη με μικρόειδικό βάρος, ο οποίος δεν επηρεάστηκε από τη λιθοστατική πίεση. Με το βάθος οι φυσαλίδες της κίσηρης γίνονται πιο επίπεδες, ενώ παρατηρείται επιμήκυνση κατά μήκος ροής. Αν και ο περλίτης αυτός μπορεί να διογκωθεί, η σημασία του γενικά είναι μικρή λόγω της ευθρυπτότητάς του.
- Κοκκώδης
Ο περλίτης με κοκκώδη δομή είναι πιο συμπαγής, έχει ζαχαρώδη εμφάνιση και είναι πιο σημαντικός από οικονομική άποψη, λόγω της μεγαλύτερης ευκολίας

κατά την κονιοποίηση, ταξινόμηση και διόγκωση. Συχνά εμφανίζονται ρευστικές δομές.

- Τυπική περλιτική
Το υλικό με την κλασσική περλιτική δομή εμφανίζεται κάτω απότο προηγούμενο. Ο περλίτης έχει προκύψει από ενυδάτωση οψιδιανού ο οποίος διατηρείται.

3.5.3 Χρήσεις

Το πεδίο εφαρμογών του περλίτη είναι τεράστιο και ολοένα διευρύνεται. Όλες όμως σχεδόν οι χρήσεις αφορούν τον διογκωμένο περλίτη που συνδυάζει ένα πλήθος ιδιοτήτων: μικρό μοριακό βάρος, τεράστια ειδική επιφάνεια και πορώδες, δυνατότητα κατεργασίας της επιφάνειας του περλίτη και μετατροπή της σε υδρόφοβη. Γενικά οι χρήσεις του περλίτη μπορούν να διαιρεθούν σε τρεις γενικές κατηγορίες:

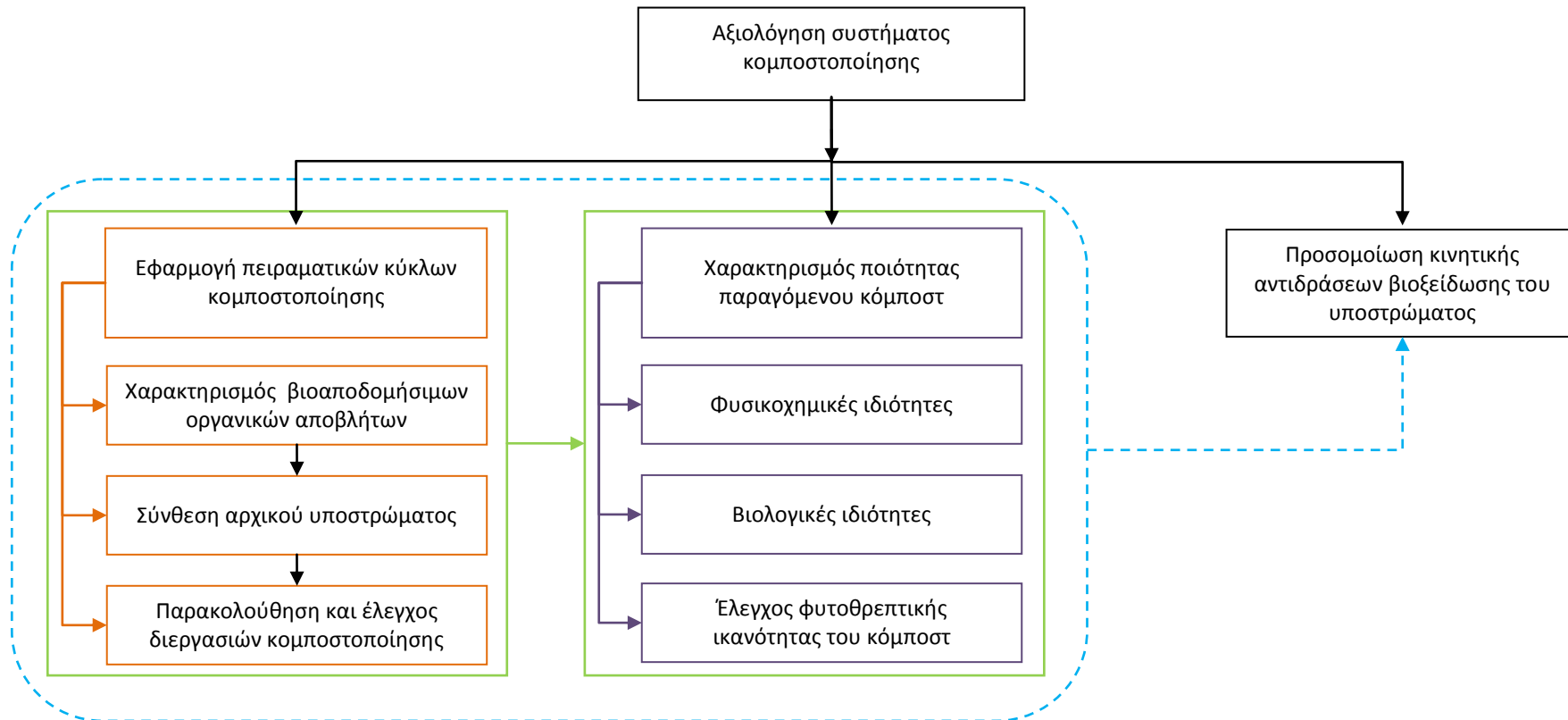
- Κατασκευαστικές εφαρμογές
- Αγροτικές εφαρμογές
- Βιομηχανικές εφαρμογές

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΤΟΚΟΛΟ

4.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή ερευνάται η δυνατότητα αποκεντρωμένης επεξεργασίας και επαναχρησιμοποίησης του οργανικού κλάσματος των οικιακών απορριμμάτων. Για το σκοπό αυτό σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε πρότυπο σύστημα κομποστοποίησης οικιακού τύπου, από τη Μονάδα Περιβαλλοντικής Επιστήμης και Τεχνολογίας του ΕΜΠ στα πλαίσια Προγράμματος Life. Η μεθοδολογία η οποία ακολουθήθηκε για την υλοποίηση αυτής της έρευνας φαίνεται στην Εικόνα 4.1. Για το σχεδιασμό και την κατασκευή του συστήματος λήφθηκαν υπόψη παράμετροι, όπως η δυνατότητα επεξεργασίας μιας ευρείας κλίμακας βιοαποδομήσιμων οικιακών οργανικών αποβλήτων, η αποτελεσματική και ελεγχόμενη εφαρμογή ανάδευσης, ύγρυνσης και αερισμού του υποστρώματος, η συλλογή των παραγόμενων στραγγισμάτων και η απομάκρυνση των αερίων εκπομπών, μέσω της αποτελεσματικότερης ανάδευσης του υποστρώματος. Προκειμένου να εξεταστεί η προκαταρκτική λειτουργία του συστήματος καθώς και των επιμέρους δομικών τμημάτων του, πραγματοποιήθηκε διεξοδικός έλεγχος με την ολοκλήρωση δοκιμών διαφορετικών φορτίων. Ο στόχος της διδακτορικής διατριβής αφορά στην αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας και της λειτουργικότητας του συστήματος κομποστοποίησης ως προς την επεξεργασία βιοαποδομήσιμων οικιακών απορριμμάτων. Η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε σε τρία στάδια τα οποία περιλαμβάνουν: (α) τις πειραματικές εφαρμογές του συστήματος κομποστοποίησης (β) το χαρακτηρισμό της ποιότητας του παραγόμενου κόμποστ και (γ) την προσομοίωση της κινητικής των αντιδράσεων βιοαποδόμησης της οργανικής ουσίας. Στο πρώτο στάδιο γίνεται ο φυσικοχημικός χαρακτηρισμός μιας μεγάλης ποικιλίας οργανικών οικιακών απορριμμάτων, αποτελούμενων από υπολείματα τροφών πλούσιων σε πρωτεΐνες, υδατάνθρακες και κυτταρινούχες ενώσεις, που χρήζουν κατάλληλης διαχείρισης. Έπειτα πραγματοποιείται η σύνθεση του αρχικού υλικού τροφοδοσίας στο σύστημα κομποστοποίησης λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιότητες των αποβλήτων, έτσι ώστε να διαμορφωθούν κατάλληλες συνθήκες για την ενίσχυση της διεργασίας της κομποστοποίησης. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η έναρξη και η παρακολούθηση των διεργασιών της κομποστοποίησης εξετάζοντας την εξέλιξη βασικών φυσικοχημικών παραμέτρων του υποστρώματος και των παραγόμενων στραγγισμάτων, με σκοπό τον έλεγχο της αερόβιας βιοαποδόμησης των προεπιλεγμένων μιγμάτων. Στο δεύτερο στάδιο της αξιολόγησης του συστήματος κομποστοποίησης γίνεται ο ποιοτικός έλεγχος του τελικού προϊόντος ως προς τις φυσικοχημικές και βιολογικές του ιδιότητες για τον καθορισμό του βαθμού σταθεροποίησης και ωριμότητάς του. Επιπλέον, αξιολογείται η δυνατότητα χρήσης του κόμποστ με την εφαρμογή προκαταρκτικών πειραμάτων ελέγχου της επίδρασης του δείκτη βλαστικότητάς του σε προκαθορισμένους καλλιεργήσιμους σπόρους. Σε τελικό στάδιο εφαρμόζεται η προσομοίωση της κινητικής των αντιδράσεων αποδόμησης των πτητικών στερεών του υποστρώματος προκειμένου να διερευνηθεί και να προσδιορισθεί ο ρυθμός αντίδρασης με τον οποίο το υπόστρωμα βιοαποδομείται.



Εικόνα 4.1 Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας

4.2 Σχεδιασμός, κατασκευή και έλεγχος των επιμέρους τμημάτων του πρότυπου συστήματος κομποστοποίησης

4.2.1 Γενικά

Στη Μονάδα Περιβαλλοντικής Επιστήμης και Τεχνολογίας του ΕΜΠ με βάση:

- ι.) την εμπειρία της ομάδας εργασίας σε θέματα ανάπτυξης της διεργασίας κομποστοποίησης και ελέγχου των λειτουργικών παραμέτρων
- ιι.) τα αποτελέσματα του εργαστηριακού ελέγχου των εναλλακτικών συστημάτων οικιακής κομποστοποίησης και τις επισημάνσεις που προέκυψαν κατά την αξιολόγηση της λειτουργίας τους
- ιιι.) τα πιο αποτελεσματικά επιμέρους τεχνικά χαρακτηριστικά των άλλων συστημάτων οικιακής κομποστοποίησης που αξιολογήθηκαν, μέσω πολυκριτηριακής ανάλυσης, σχεδιάστηκαν, κατασκευάσθηκαν και ελέχθησαν τα επιμέρους τμήματα του πρότυπου συστήματος (πρώτη μορφή). Στόχος της εξέτασης αυτής ήταν να ληφθούν όλες οι απαραίτητες πληροφορίες έτσι ώστε η τελική μορφή των τμημάτων του πρότυπου συστήματος να παρουσιάζουν βελτιωμένη συμπεριφορά και αυξημένη λειτουργικότητα π.χ σύστημα ανάδευσης, δυνατότητα συνεχούς λειτουργίας, αποτελεσματικός έλεγχος οσμών.

Παρακάτω δίδονται αναλυτικά στοιχεία των επιμέρους τμημάτων του συστήματος, όπου περιλαμβάνονται:

- παρουσίαση των επιμέρους εξαρτημάτων/τμημάτων που συναποτελούν το πρότυπο σύστημα. Κάθε εξάρτημα περιγράφεται τόσο μεμονωμένα, όσο και σε σχέση με τη σύνδεσή του με άλλα εξαρτήματα. Η ενότητα αυτή ολοκληρώνεται με την επιλογή των υλικών κατασκευής των συνθετικών τμημάτων του συστήματος
- Στοιχεία διαστασιολόγησης των επιμέρους τμημάτων
- περιγραφή των σταδίων λειτουργίας του πρότυπου οικιακού συστήματος κομποστοποίησης, από το στάδιο της τροφοδοσίας του υλικού στο σύστημα μέχρι τη συλλογή του τελικού προϊόντος
- αξιολόγηση του πρότυπου οικιακού κομποστοποιητή σε σχέση με τα αντίστοιχα υφιστάμενα συστήματα που διατίθενται στην αγορά

4.2.2 Θάλαμος

Ο θάλαμος αποτελεί το κυρίαρχο στοιχείο του οικιακού κομποστοποιητή, καθώς το σύνολο των υπόλοιπων εξαρτημάτων περιέχονται και προσαρμόζονται, άμεσα (κατόπιν συγκόλλησης) ή έμμεσα σε αυτόν. Στην ενότητα που ακολουθεί, η περιγραφή αφορά σε όλα εκείνα τα μέρη όπου, κατά το πέρας της κατασκευής, συγκροτούν τη διάταξη του θαλάμου.

Ο θάλαμος αποτελείται από τα ακόλουθα επιμέρους τμήματα:

- την παράπλευρη επιφάνεια, που εφεξής θα ορίζεται ως κυλινδρικό περίβλημα,
- το κάλυμμα τμήματος της ανώτερης επιφάνειας, που αποτελεί το στατικό στέλεχος του πώματος,
- το δάπεδο του διαμερίσματος τροφοδοσίας,
- τη βάση, επί της οποίας επικάθεται ο οικιακός κομποστοποιητής και
- τα συμπληρωματικά εξαρτήματα που αφορούν στη στήριξη του πώματος, της εσχάρας διαχωρισμού και των υποδοχέων κόμποστ.

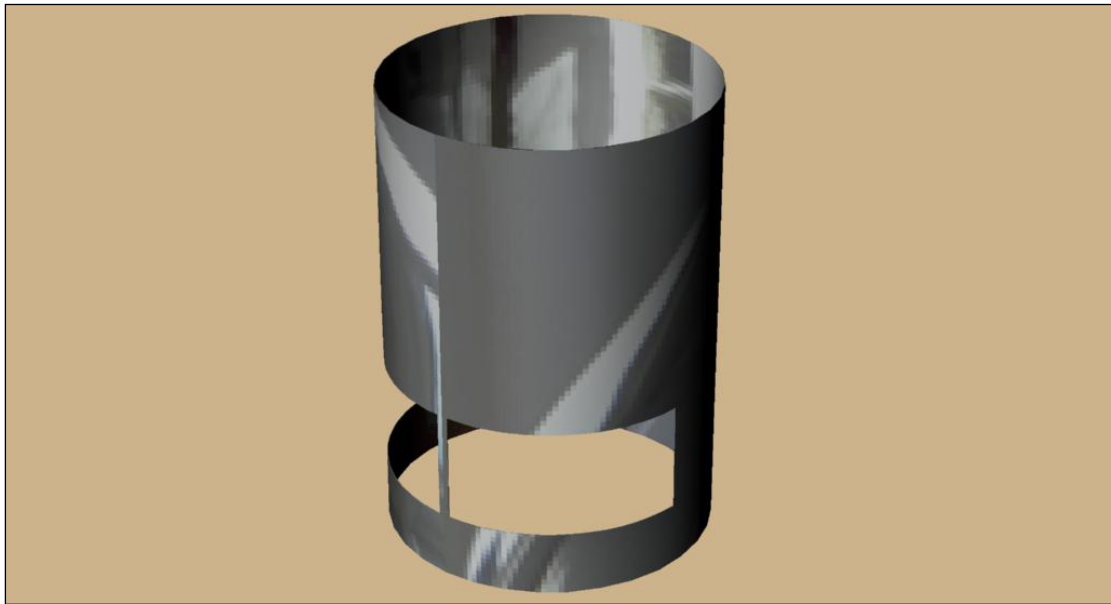
Περίβλημα

Η παράπλευρη επιφάνεια του θαλάμου συγκροτείται από ένα ορθογώνιο επίπεδο μεταλλικό έλασμα μήκους 157.08 cm, ύψους 70.90 cm και πάχους 0.10 cm. Στο κάτω τμήμα του ελάσματος διανοίγονται με κοπή και αφαίρεση υλικού, δύο όμοιες και διαμπερείς ορθογωνικές οπές διαστάσεων 36.14 cm μήκος και 16.70 cm ύψος. Κάθε ένα εκ των ανοιγμάτων αυτών, απέχει από την εγγύτερη σε αυτό γωνία του ελάσματος 41.51 cm κατά μήκος και 10.00 cm κατά ύψος. Κατόπιν, μέσω κάμψης, το μεταλλικό έλασμα καμπυλώνεται υπό γωνία 180 μοιρών έτσι ώστε, οι δύο κατακόρυφες επίπεδες επιφάνειες ύψους 70.90 cm και πλάτους 0.10 cm, να συμπέσουν σχηματίζοντας κυλινδρική επιφάνεια ύψους 70.90 cm και διαμέτρου 50.00 cm. Στη διεπιφάνεια των δύο ακμών, πραγματοποιούνται σημειακές συγκολλήσεις με ηλεκτροπόντα, συγκρατώντας τη διάταξη στη μορφή του κυλινδρικού περιβλήματος.

Στις εικόνες που ακολουθούν, φαίνεται το μεταλλικό έλασμα που συγκροτεί το κυλινδρικό περίβλημα, πριν και μετά την διαδικασία κάμψης και συγκόλλησης.



Εικόνα 4.1 Μεταλλικό επίπεδο έλασμα κυλινδρικού περιβλήματος



Εικόνα 4.2 Κυλινδρικό περιβλήμα μετά τις εργασίες κάμψης και συγκόλλησης

Στατικό στέλεχος πώματος

Η ελεύθερη επιφάνεια στο άνω τμήμα του κυλινδρικού περιβλήματος καλύπτεται κατά το ήμισυ, από το στατικό στέλεχος του πώματος. Αρχικά, το στέλεχος αυτό είναι ένα μεταλλικό έλασμα ημικυκλικού σχήματος, ακτίνας 25.42 cm και πάχους 0.10 cm. Επί του κέντρου που ορίζει η ημικυκλική περιφέρεια του ελάσματος, διανοίγεται με κοπή και αφαίρεση υλικού, ημικυκλική οπή ακτίνας 1.02 cm. Η διαμόρφωση αυτή αποσκοπεί στην διέλευση μέσω αυτής του αξονικού στελέχους του αναδευτήρα.

Κατόπιν, το ημικυκλικό έλασμα κάμπτεται υπό γωνία 11.69 μοιρών έτσι ώστε, να μπορεί να προσαρμοστεί περιμετρικά στο εσωτερικό του κυλινδρικού περιβλήματος. Το στατικό στέλεχος του πώματος, μετά την κάμψη έχει μορφή πεπλατυσμένης κωνικής επιφάνειας. Η εξωτερική περίμετρος του στελέχους, μετά την κάμψη, έχει ακτίνα ίση με αυτήν της εσωτερικής παράπλευρης επιφάνειας του κυλινδρικού περιβλήματος (24.90 cm).

Η συγκόλληση μεταξύ του κυλινδρικού περιβλήματος και του στατικού στελέχους του πώματος, πραγματοποιείται κατά μήκος της ημικυκλικής περιφέρειας του τελευταίου. Το στατικό στέλεχος του πώματος, συγκολλάται σε απόσταση 0.90 cm από την ανώτερη ακμή του κυλινδρικού περιβλήματος.

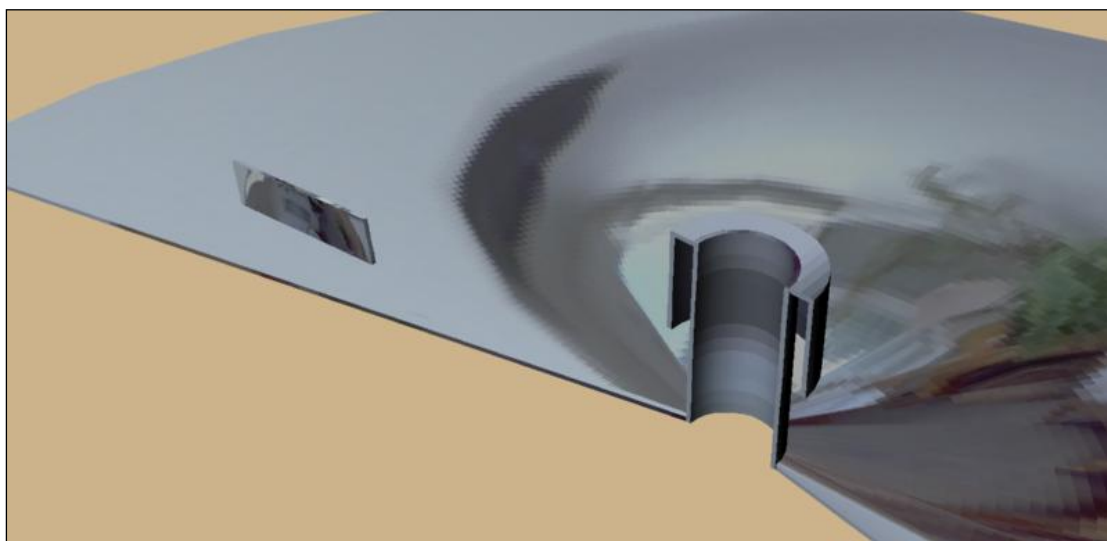
Επιπλέον, το στατικό στέλεχος του πώματος φέρει ορισμένα συμπληρωματικά εξαρτήματα και διατάξεις που αποσκοπούν, αφενός στην ευχέρεια κατά την περιστροφή του άξονα του αναδευτήρα, αφετέρου, στην διευκόλυνση κατά την κίνηση και σταθεροποίησης του περιστρεφόμενου στελέχους του πώματος.

Το στατικό στέλεχος, επί της εξωτερικής του επιφάνειας και πλησίον της ευθύγραμμης ακμής, φέρει συγκολλημένο μεταλλικό πλακίδιο μήκους 4.97 cm, ύψους 1.08 cm και πάχους 0.10 cm. Το πλακίδιο αυτό σηματοδοτεί το τέλος της ωφέλιμης διαδρομής του περιστρεφόμενου στελέχους του πώματος, όταν το

τελευταίο βρίσκεται σε 'πλήρως ανοικτή' θέση. Αντιδιαμετρικά από τη θέση του πλακιδίου, έχει διανοιχθεί διαμπερής κυκλική οπή ακτίνας 0.25 cm. Επί της οπής αυτής διέρχεται πείρος, ο οποίος κρατά σταθεροποιημένο το περιστρεφόμενο στέλεχος του πώματος όταν αυτό βρίσκεται σε 'πλήρως κλειστή' θέση.

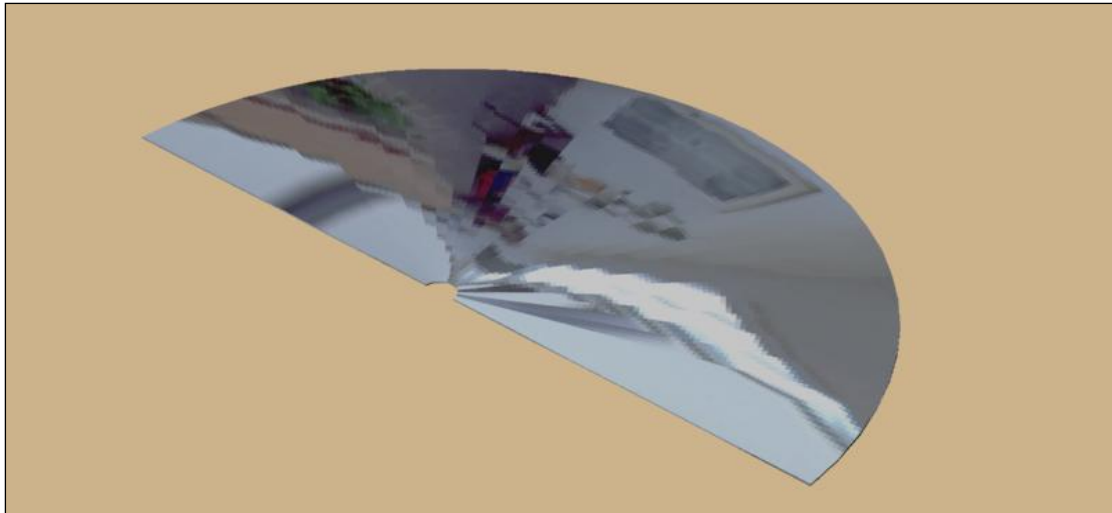
Παράλληλα, επί της ημικυκλικής οπής του στατικού στελέχους, προσαρμόζεται κατόπιν συγκολλησεως δακτυλιοειδής διαμόρφωση που διακρίνεται σε περιφερειακό και κεντρικό τμήμα. Το περιφερειακό τμήμα, με εξωτερική και εσωτερική διάμετρο 2.80 και 2.00 cm αντίστοιχα, αποσκοπεί στην σταθερή οδήγηση του κινούμενου στελέχους του πώματος, κατά την περιστροφή του τελευταίου, ενώ δια μέσω του κεντρικού τμήματος διαμέτρου 1.80 cm, είναι εφικτή η διέλευση του αξονικού στελέχους του αναδευτήρα. Η δακτυλιοειδής διαμόρφωση, συγκολλάται στο εσωτερικό και περιμετρικά της ημικυκλικής οπής και προεξέχει από το ανώτερο τμήμα του στατικού στελέχους κατά 4.00 cm. Το πάχος της εν λόγω διαμόρφωσης, σε κάθε σημείο αυτής, είναι 0.10 cm.

Στην εικόνα που ακολουθεί, φαίνεται σε λεπτομέρεια η εν λόγω δακτυλιοειδής διαμόρφωση και μαζί, η διάταξη του μεταλλικού πλακιδίου.

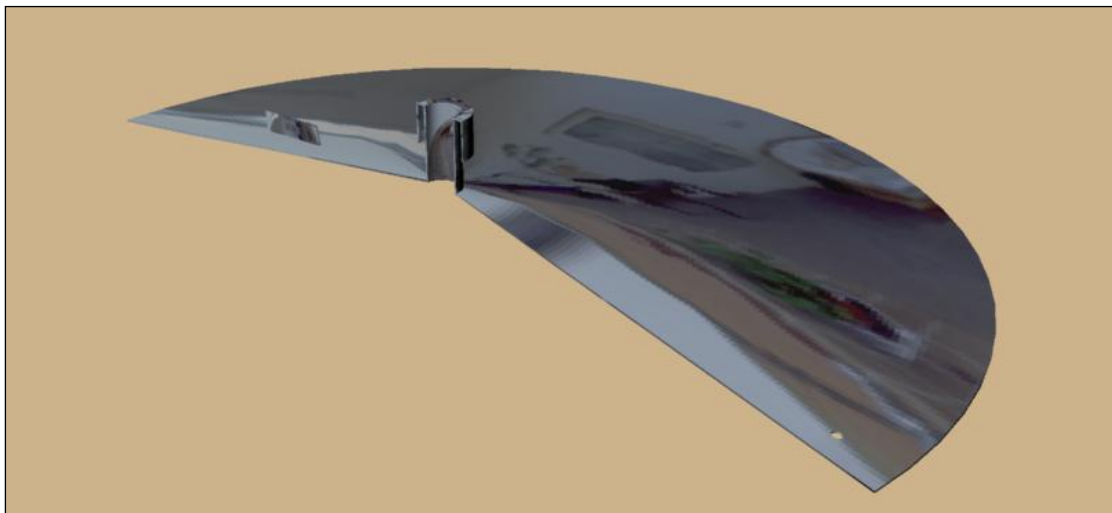


Εικόνα 4.3 Δακτυλιοειδής διαμόρφωση στο στατικό στέλεχος του πώματος και μεταλλικό πλακίδιο συγκράτησης του περιστρεφόμενου στελέχους

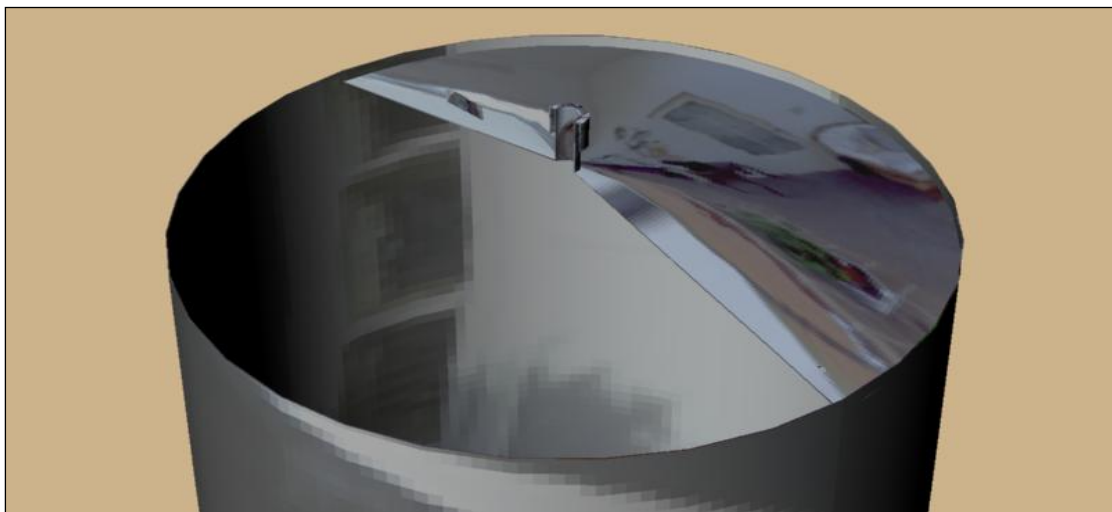
Παρακάτω, απεικονίζονται διαδοχικά, το ημικυκλικό μεταλλικό έλασμα του στατικού στελέχους του πώματος, πριν τη διαδικασία της κάμψης και χωρίς τα συμπληρωματικά εξαρτήματα, η πλήρης διάταξη του στατικού στελέχους του πώματος και η θέση του επί του εσωτερικού του κυλινδρικού περιβλήματος.



Εικόνα 4.4 Μεταλλικό έλασμα στατικού στελέχους πώματος πριν την καμπύλωση



Εικόνα 4.5 Καμπυλωμένη διάταξη στατικού στελέχους πώματος και υμπληρωματικά εξαρτήματα



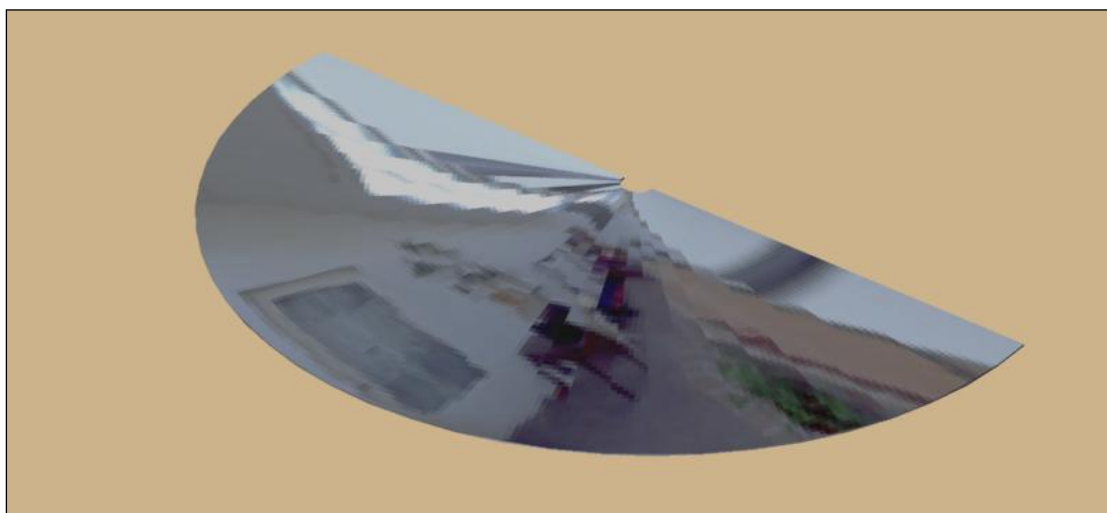
Εικόνα 4.6 Θέση στατικού στελέχους πώματος επί του κυλινδρικού περιβλήματος

Δάπεδο τροφοδοσίας

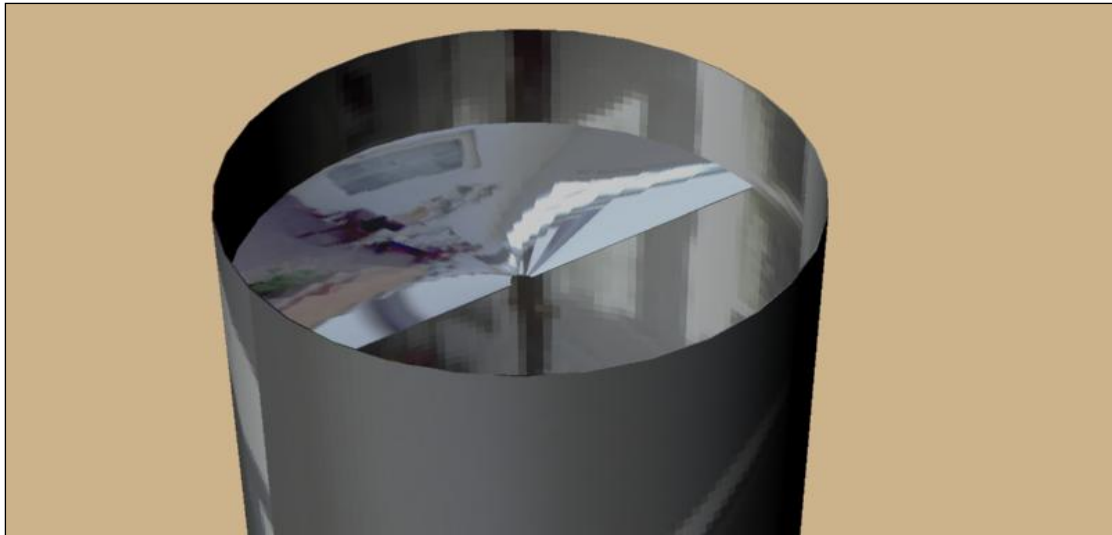
Σε απόσταση 8.90 cm χαμηλότερα από το επίπεδο συγκόλλησης του στατικού στελέχους του πώματος επί του κυλινδρικού περιβλήματος, βρίσκεται το δάπεδο του διαμερίσματος τροφοδοσίας. Η διάταξη του δαπέδου βρίσκεται ακριβώς κάτω από το περιστρεφόμενο στέλεχος του πώματος, όταν το τελευταίο βρίσκεται σε 'πλήρως κλειστή' θέση. Το δάπεδο του διαμερίσματος τροφοδοσίας αποτελείται από ένα ημικυκλικό επίπεδο μεταλλικό έλασμα ακτίνας 24.90 cm και πάχους 0.10 cm. Στο κέντρο που ορίζεται από την ημικυκλική περιφέρεια, διαμορφώνεται μέσω κοπής και αφαίρεσης υλικού, ημικυκλική οπή διαμέτρου 2.00 cm. Μέσω της εν λόγω διαμόρφωσης διέρχεται το αξονικό στέλεχος του αναδευτήρα.

Η συγκόλληση του δαπέδου του διαμερίσματος τροφοδοσίας επί του κυλινδρικού περιβλήματος, πραγματοποιείται μεταξύ της διεπιφάνειας μεταξύ της ημικυκλικής περιφέρειας του δαπέδου και της εσωτερικής παράπλευρης επιφάνειας του κυλινδρικού περιβλήματος. Το επίπεδο συγκόλλησης, έχει απόσταση 9.90 cm χαμηλότερα από την ανώτερη ακμή του κυλινδρικού περιβλήματος.

Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζεται το επίπεδο μεταλλικό έλασμα που συγκροτεί το δάπεδο του διαμερίσματος τροφοδοσίας, καθώς επίσης και η θέση συναρμογής του στο κυλινδρικό περίβλημα.



Εικόνα 4.7 Μεταλλικό έλασμα δαπέδου διαμερίσματος τροφοδοσίας



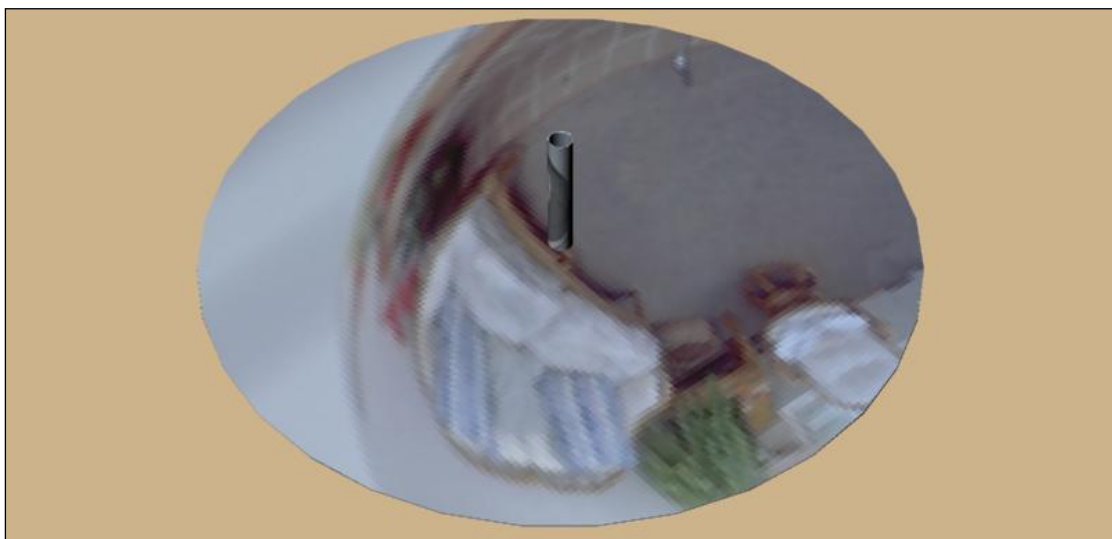
Εικόνα 4.8 Θέση δαπέδου διαμερίσματος τροφοδοσίας επί του κυλινδρικού περιβλήματος

Βάση θαλάμου

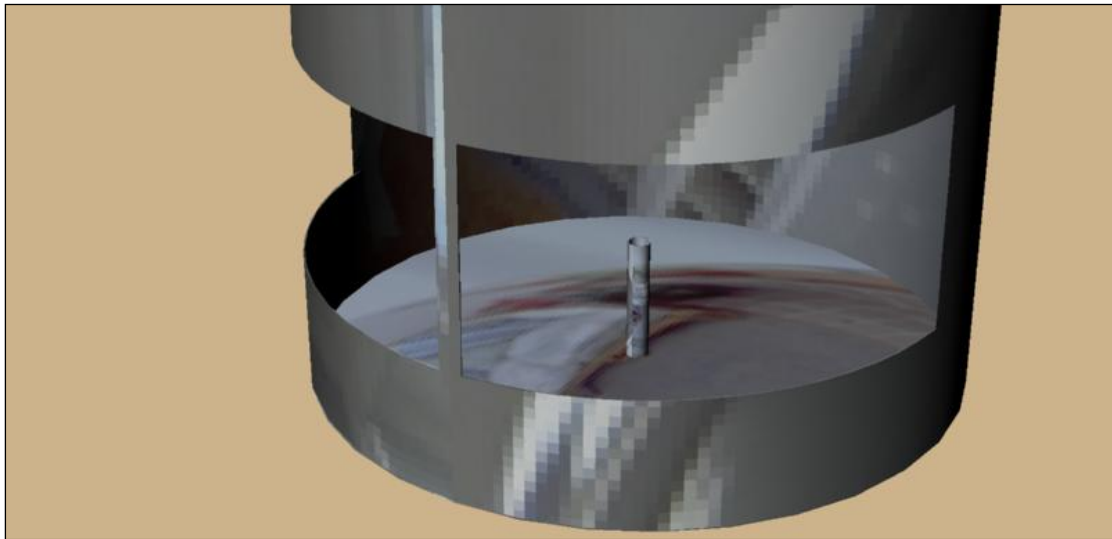
Το κυλινδρικό περίβλημα που συγκροτεί το θάλαμο του οικιακού κομποστοποιητή επικάθεται σε ειδικά διαμορφωμένη βάση. Η βάση καλύπτει πλήρως την κατώτατη κυκλική επιφάνεια του κυλινδρικού περιβλήματος. Συγκροτείται από επίπεδο κυκλικό μεταλλικό έλασμα, διαμέτρου 50.00 cm και πάχους 0.10 cm, το οποίο και συγκολλάται επί της κατώτατης κυκλικής ακμής του κυλινδρικού περιβλήματος.

Στο κέντρο που ορίζει η κυκλική περιφέρεια της βάσης, είναι συγκολλημένος σωληνοειδής δακτύλιος ύψους 9.50 cm, εξωτερικής διαμέτρου 1.70 cm και πάχους 0.10 cm. Ο εν λόγω δακτύλιος αποσκοπεί στην υποδοχή, στήριξη και συγκράτηση του αξονικού στελέχους κατά την περιστροφή του αναδευτήρα.

Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνεται η διάταξη της βάσης και του σωληνοειδούς δακτυλίου οδήγησης του αναδευτήρα, καθώς επίσης και η θέση συναρμογής της βάσης επί της κατώτατης επιφάνειας του κυλινδρικού περιβλήματος.



Εικόνα 4.9 Μεταλλικό έλασμα βάσης κυλινδρικού περιβλήματος και δακτύλιος οδήγησης του αναδευτήρα



Εικόνα 4.10 Θέση συναρμογής της βάσης επί της ακραίας διατομής του κυλινδρικού περιβλήματος

Υποστηρίγματα

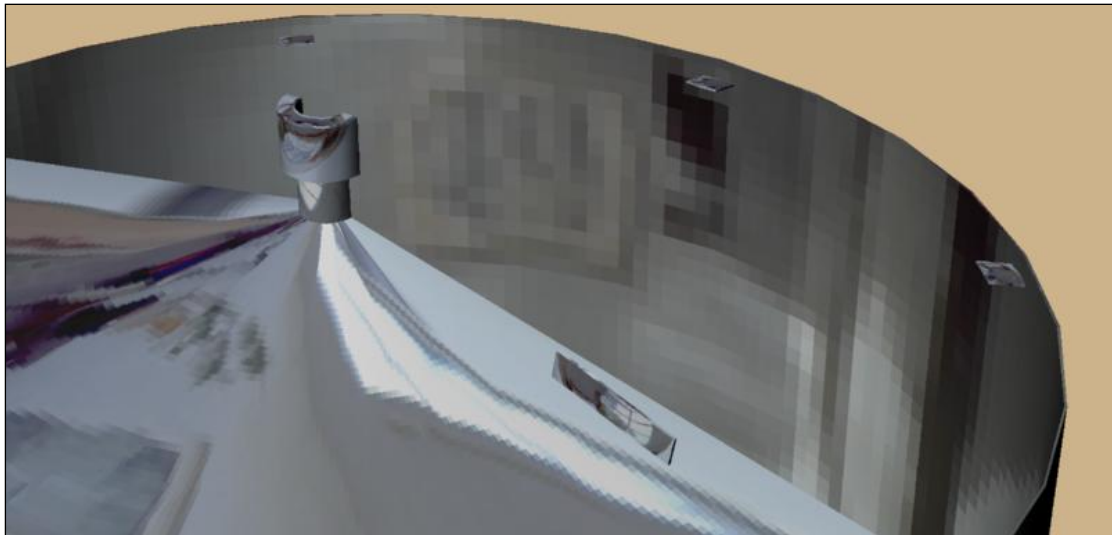
Ο θάλαμος υποστηρίζεται και από ορισμένα συμπληρωματικά μεταλλικά εξαρτήματα, μικρού μεγέθους, που αποσκοπούν κυρίως στη στήριξη των τμημάτων που αφορούν στο περιστρεφόμενο στέλεχος του πώματος, στην διάταξη της εσχάρας διαχωρισμού και στους υποδοχείς του κόμποστ. Τα εξαρτήματα αυτά είναι συγκολλητώς πακτωμένα περιμετρικά, επί της εσωτερικής παράπλευρης επιφάνειας του κυλινδρικού περιβλήματος, σε ύψος ανάλογο με αυτό των συνθετικών τμημάτων που έρχονται σε επαφή.

Αρχικά, στο ανώτερο τμήμα του κυλινδρικού περιβλήματος, το περιστρεφόμενο στέλεχος του πώματος όταν βρίσκεται σε 'πλήρως κλειστή' θέση, επικάθεται σε τρία ορθογωνικά υποστηρίγματα. Τα υποστηρίγματα αυτά είναι μικρά μεταλλικά ελάσματα διαστάσεων 1.50 X 1.45 cm και πάχους 0.10 cm, τα οποία συγκολλώνται ακτινικά επί της εσωτερικής παράπλευρης επιφάνειας του κυλινδρικού περιβλήματος, σε απόσταση 0.90 cm από την ανώτατη ακμή του τελευταίου και με κλίση 11.13 μοίρες από το οριζόντιο επίπεδο. Τα τρία ελάσματα, είναι διατεταγμένα ακτινικά υπό διαδοχικές γωνίες 45 μοιρών και χρησιμεύουν ως υποστηρίγματα του περιστρεφόμενου στελέχους του πώματος, αλλά και ως οδηγοί κατά την περιστροφική κίνηση του τελευταίου (άνοιγμα πώματος).

Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνεται η έγχρωμη προοπτική απεικόνιση ενός εκ των τριών υποστηριγμάτων του πώματος, καθώς επίσης και η θέση συναρμογής των συμπληρωματικών αυτών εξαρτημάτων επί της εσωτερικής παράπλευρης επιφάνειας του κυλινδρικού περιβλήματος, απέναντι από το στατικό στέλεχος του πώματος.

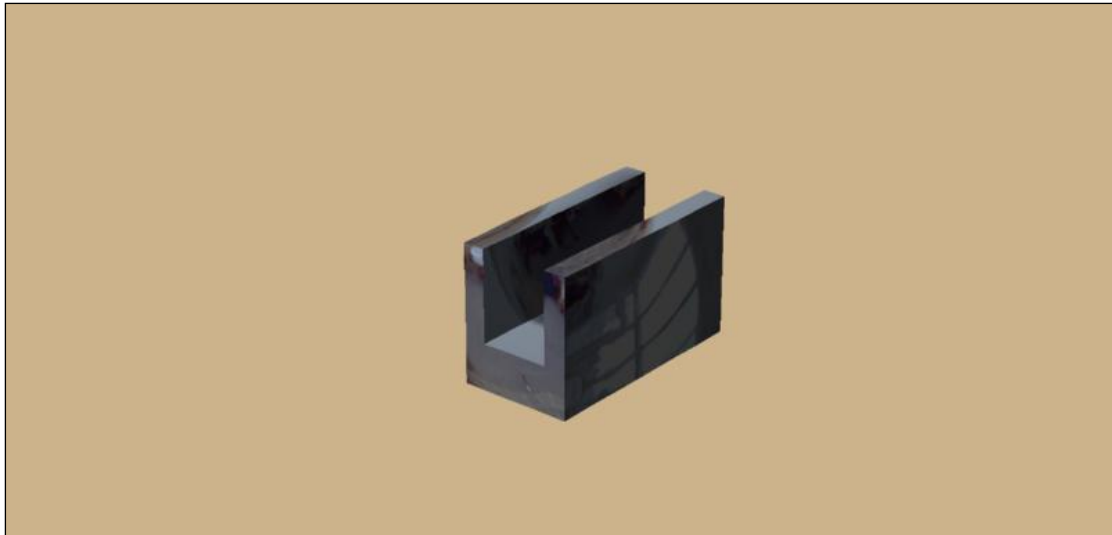


Εικόνα 4.11 Μεταλλικό έλασμα στήριξης και οδήγησης για το περιστρεφόμενο στέλεχος του πώματος



Εικόνα 4.12 Θέση των τριών υποστηρίγματα επί του κυλινδρικού περιβλήματος

Περί το κεντρικό τμήμα του κυλινδρικού περιβλήματος, στο επίπεδο συναρμογής της εσχάρας διαχωρισμού, βρίσκονται περιμετρικά διατεταγμένα (σε διαδοχικές γωνίες 30 μοιρών) επί της εσωτερικής παράπλευρης επιφάνειας του περιβλήματος, δώδεκα όμοια μεταλλικά υποστηρίγματα που αποσκοπούν στη συγκράτηση της εσχάρας στο συγκεκριμένο επίπεδο. Τα εξαρτήματα αυτά, προς τη διεπιφάνεια επαφής στο κυλινδρικό περίβλημα, είναι συγκολλητώς πακτωμένα επί αυτού. Έχουν μορφή 'U' και συγκρατούν ως γάντζοι την εσχάρα μέσω ειδικά διαμορφωμένων ανοιγμάτων στο πλαίσιο της εσχάρας. Οι διαστάσεις τους είναι 1.00 cm μήκος, 0.60 cm ύψος και 0.50 cm πλάτος, ενώ τα πάχη είναι 0.10 cm στην περιοχή συγκόλλησης στο κυλινδρικό περίβλημα και 0.20 cm στην περιοχή ανάρτησης της εσχάρας. Στις εικόνες που ακολουθούν, φαίνεται ένα εκ των εξαρτημάτων στήριξης της εσχάρας και η πλήρης διάταξη τους επί του εσωτερικού της παράπλευρης επιφάνειας του κυλινδρικού περιβλήματος.



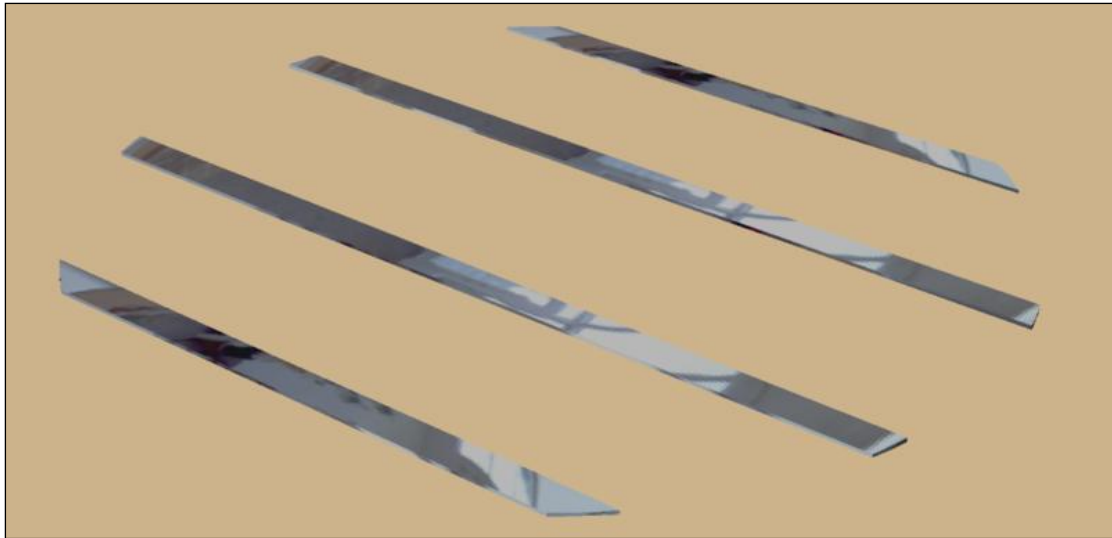
Εικόνα 4.13 Εξάρτημα στήριξης της εσχάρας διαχωρισμού



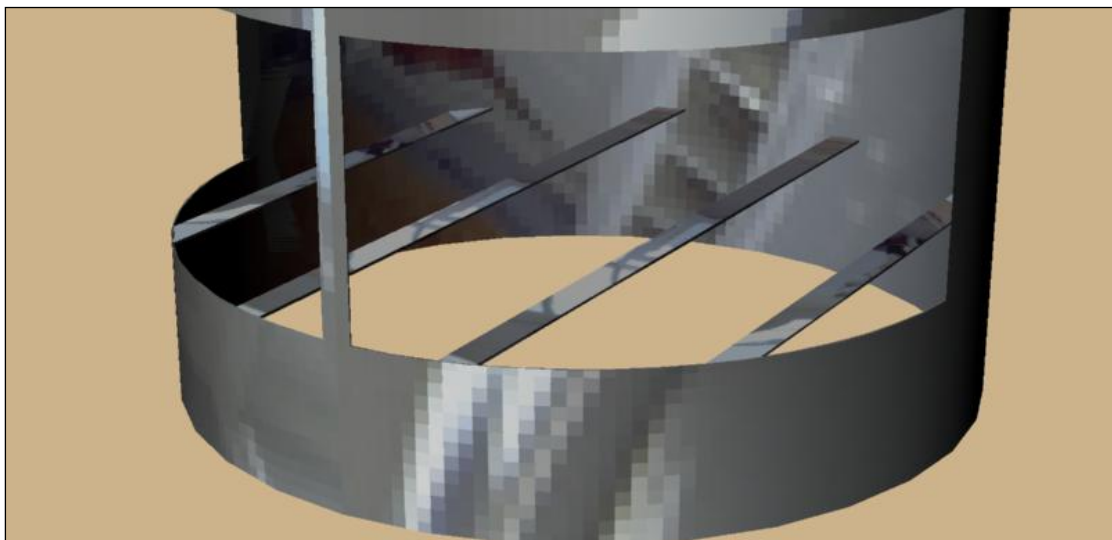
Εικόνα 4.14 Διάταξη εξαρτημάτων στήριξης εσχάρας επί του κυλινδρικού περιβλήματος

Η ασφαλής και εύκολη είσοδος και έξοδος των υποδοχέων κόμποστ από τον οικιακό κομποστοποιητή, επιβάλλει τη χρήση μεταλλικών ελασμάτων που δρουν αφενός ως στηρίγματα, αφετέρου, ως οδηγοί κατά την κίνηση των υποδοχέων, εντός και εκτός του συστήματος. Τα ελάσματα αυτά, που έχουν μορφή επίπεδων ράβδων, έχουν τα άκρα τους συγκολλητώς πακτωμένα επί της εσωτερικής παράπλευρης επιφάνειας του κυλινδρικού περιβλήματος, ελαφρώς χαμηλότερα από την περιοχή των κάτω ακμών των ορθογωνικών ανοιγμάτων. Κάθε υποδοχέας στηρίζεται πάνω σε δύο ράβδους πάχους 0.20 cm και πλάτους 2.00 cm. Το μέγιστο και ελάχιστο μήκος των δύο εξωτερικών ραβδών είναι 34.62 και 29.93 cm αντίστοιχα, ενώ για τις εσωτερικές ράβδους τα ανάλογα μεγέθη μήκους είναι 48.38 και 47.23 cm αντίστοιχα.

Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνεται η διάταξη των τεσσάρων ελασμάτων στήριξης και οι θέσεις συγκόλλησής τους επί του κυλινδρικού περιβλήματος.



Εικόνα 4.15 Επίπεδες ράβδοι στήριξης υποδοχέων κόμποστ



Εικόνα 4.16 Θέσεις συγκόλλησης ράβδων στήριξης επί του κυλινδρικού περιβλήματος

4.2.3 Περιστρεφόμενο πώμα

Η διάταξη του πώματος ολοκληρώνεται με το κινούμενο τμήμα του, το οποίο μπορεί και περιστρέφεται σε επίπεδο κάθετα στον άξονα του αναδευτήρα. Κατά την περιστροφή στηρίζεται στο στατικό στέλεχος του πώματος και στα τρία υποστηρίγματα που βρίσκονται διατεταγμένα επί της εσωτερικής επιφάνειας του κυλινδρικού περιβλήματος. Το περιστρεφόμενο στέλεχος του πώματος, αρχικά είναι ένα επίπεδο ημικυκλικό μεταλλικό έλασμα το οποίο κατόπιν, κάμπεται προκειμένου να μπορεί να ολισθαίνει επαφτόμενο επί του στατικού στελέχους. Οι διαστάσεις του μεταλλικού ελάσματος, πριν τις εργασίες κάμψης, είναι ίδιες με αυτές του αντίστοιχου ελάσματος που συνθέτει το στατικό στέλεχος (ακτίνα 25.42 cm και πάχος 0.10 cm). Η διαφορά του αρχικού σχήματος κόπης έγκειται στο ότι, ενώ το στατικό στέλεχος προήλθε από απολύτως ημικυκλικό έλασμα (ημιπεριφέρεια κύκλου γωνίας 180 μοιρών), η κυκλική περιφερειακή ακμή του ελάσματος που

συγκροτεί το περιστρεφόμενο στέλεχος ισοδυναμεί με τόξο γωνίας 195.11 μοιρών. Επί του νοητού κέντρου της ευθύγραμμης ακμής του ελάσματος, διανοίγεται με κοπή και αφαίρεση υλικού, ημικυκλική οπή ακτίνας 1.02 cm. Η διαμόρφωση αυτή αποσκοπεί στην υποδοχή και διέλευση του αξονικού στελέχους του αναδευτήρα.

Κατά την κάμψη, το έλασμα καμπυλώνεται κατά γωνία 11.69 μοιρών. Η γωνία κάμψης είναι ίδια με την αντίστοιχη του στατικού στελέχους, προκειμένου να εξασφαλίζεται η άνετη ολίσθηση κατά την περιστροφή του κινούμενου στελέχους.

Όταν το περιστρεφόμενο στέλεχος του πώματος βρίσκεται σε 'πλήρως κλειστή' θέση, δύο κυκλικοί τομείς με άνοιγμα γωνίας 7.555 μοίρες, κατά μήκος των δύο ευθύγραμμων ακμών, επικάθονται στο στατικό στέλεχος.

Επιπλέον, το περιστρεφόμενο στέλεχος του πώματος φέρει ορισμένα συμπληρωματικά εξαρτήματα και διατάξεις που αποσκοπούν, αφενός στην ασφαλή συναρμογή και περιστροφή της διάταξης του αναδευτήρα, αφετέρου, στην διευκόλυνση κίνησης κατά την ολίσθηση επί του στατικού στελέχους του πώματος.

Καθώς το περιστρεφόμενο στέλεχος βρίσκεται σε 'πλήρως κλειστή' θέση, επικάθεται στα τρία υποστηρίγματα που είναι συγκολλητώς πακτωμένα επί της εσωτερικής παράπλευρης επιφάνειας, στο ανώτερο τμήμα του κυλινδρικού περιβλήματος. Η σταθερή συναρμογή του στο στατικό στέλεχος επιτυγχάνεται μέσω πείρου, ο οποίος διερχόμενος μέσω των ομοειδών οπών στατικού και περιστρεφόμενου στελέχους, σταθεροποιεί το πώμα σε 'πλήρως κλειστή' θέση.

Η διάνοιξη του πώματος επιτυγχάνεται μέσω χειρονακτικής περιστροφικής κίνησης του μεταλλικού πλακιδίου που βρίσκεται συγκολλημένο περί το μέσο της ευθύγραμμης ακμής του περιστρεφόμενου στελέχους, προς την πλευρά του πείρου.

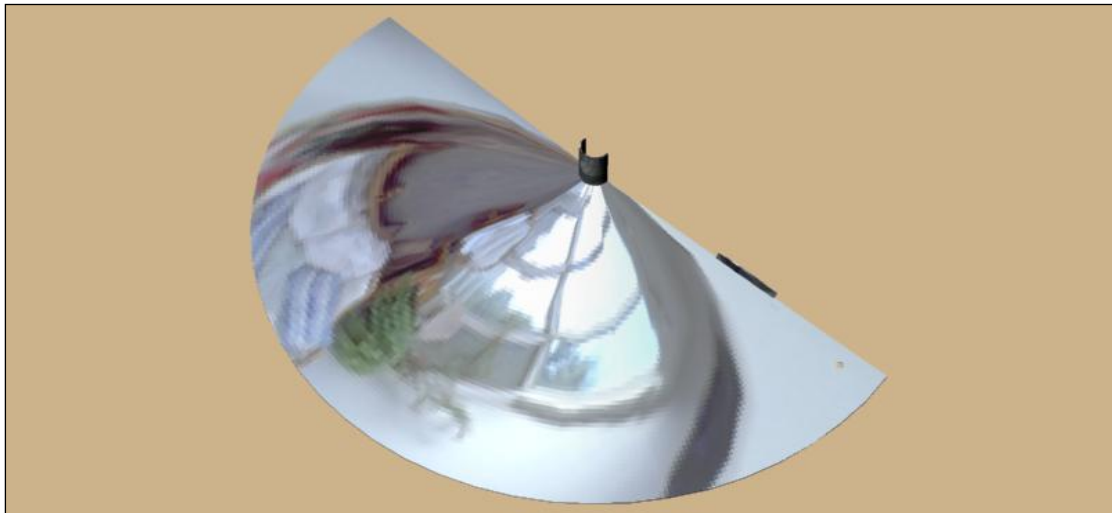
Το πλακίδιο αυτό, που χρησιμεύει ως χειρολαβή, είναι ένα ορθογωνικό μεταλλικό έλασμα διαστάσεων 4.90 cm μήκος, 0.88 cm ύψος και 0.10 cm πάχος. Όταν το περιστρεφόμενο στέλεχος βρίσκεται σε 'πλήρως ανοικτή' θέση, το μεταλλικό πλακίδιο έχει καλύψει το τόξο της ωφέλιμης διαδρομής του και εφάπτεται στο αντίστοιχο πλακίδιο του στατικού στελέχους.

Κατά την κίνηση του περιστρεφόμενου στελέχους, η σταθερότητα κατά την ολίσθηση επιτυγχάνεται μέσω ημικυλινδρικού σωληνοειδούς δακτυλίου που είναι συγκολλημένος επί της ημικυκλικής οπής του στελέχους και προεξέχει προς τα άνω. Ο εν λόγω δακτύλιος με πάχος 0.10 cm και ύψος 3.42 cm, εσωτερική και εξωτερική διάμετρο 2.00 και 2.20 cm αντίστοιχα, κατά την κίνηση του περιστρεφόμενου στελέχους εισέρχεται στο περιφερειακό τμήμα της δακτυλιοειδούς διαμόρφωσης του στατικού στελέχους.

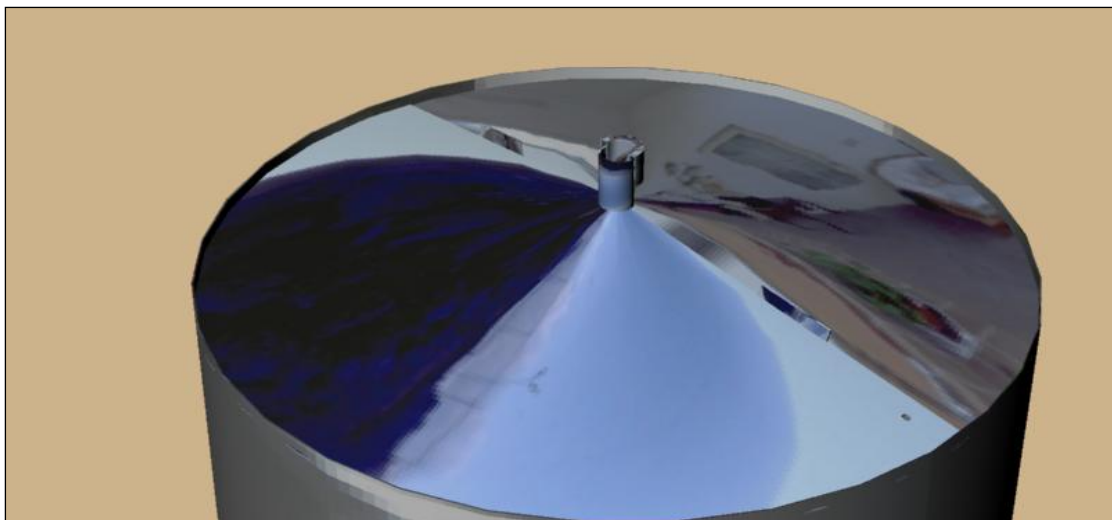
Στις εικόνες που ακολουθούν, φαίνεται το μεταλλικό έλασμα που συγκροτεί το περιστρεφόμενο στέλεχος του πώματος, πριν και μετά τις εργασίες κάμψης και συγκόλλησης των συμπληρωματικών εξαρτημάτων, καθώς επίσης και οι προοπτικές απεικονίσεις της συναρμολογημένης διάταξης μεταξύ του κυλινδρικού περιβλήματος και των δύο στελεχών του πώματος, στην 'πλήρως κλειστή' και 'πλήρως ανοικτή' θέση. Σε λεπτομέρεια, απεικονίζεται η διάταξη συναρμογής μεταξύ στατικού και περιστρεφόμενου στελέχους, στην περιοχή της δακτυλιοειδούς διαμόρφωσης.



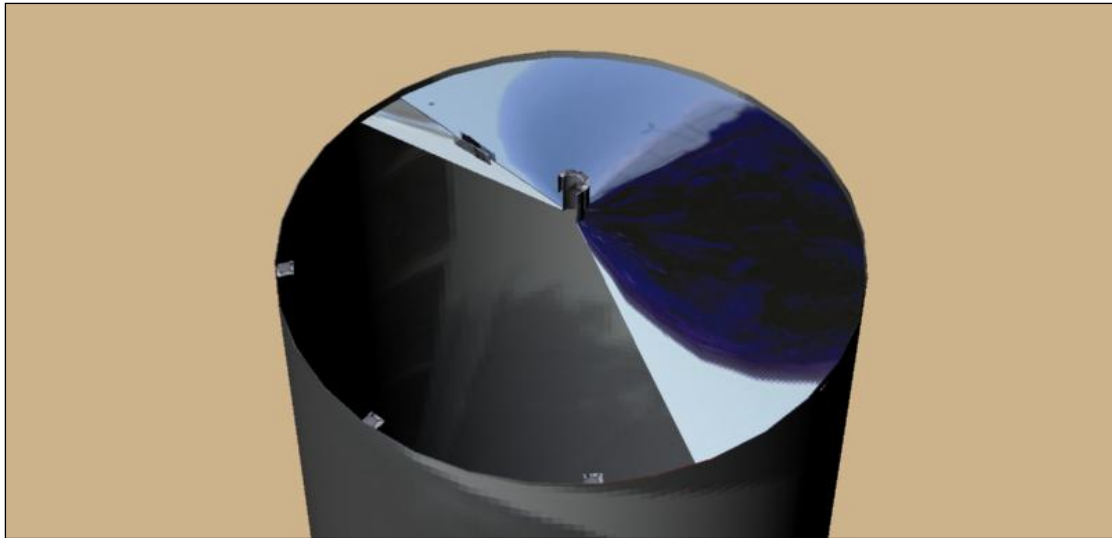
Εικόνα 4.17 Μεταλλικό έλασμα περιστρεφόμενου στελέχους πώματος πριν την καμπύλωση



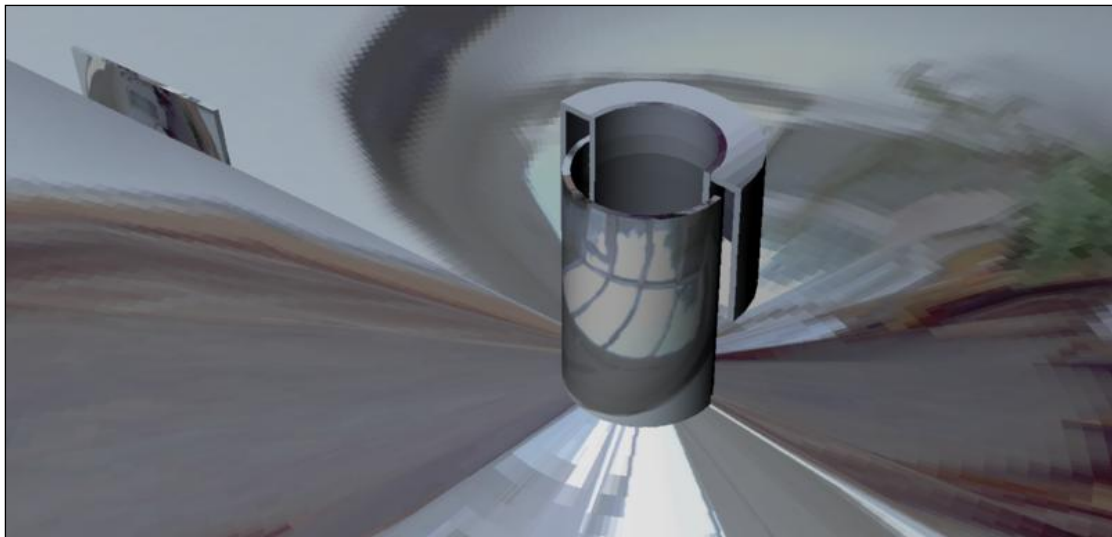
Εικόνα 4.18 Καμπυλωμένη διάταξη περιστρεφόμενου στελέχους πώματος και συμπληρωματικά εξαρτήματα



Εικόνα 4.19 Συναρμολογημένη διάταξη κατά την 'πλήρως κλειστή' θέση του περιστρεφόμενου στελέχους του πώματος



Εικόνα 4.20 Συναρμολογημένη διάταξη κατά την 'πλήρως ανοικτή' θέση του περιστρεφόμενου στελέχους του πώματος



Εικόνα 4.21 Δακτυλιοειδής διαμόρφωση κατά τη συναρμογή στατικού και περιστρεφόμενου στελέχους του πώματος

4.2.4 Αναδευτήρας

Το κυρίως στέλεχος του αναδευτήρα αποτελείται από μία ευθύγραμμη σωληνοειδή ράβδο, κυκλικής διατομής, ύψους 84.90 cm, πάχους 0.20 cm και εξωτερικής διαμέτρου 1.50 cm. Ο εν λόγω άξονας του αναδευτήρα, ξεκινώντας από το ανώτερο τμήμα του φέρει συγκολλημένα ορισμένα εξαρτήματα μέσω των οποίων επιτελούνται συγκεκριμένες λειτουργίες του οικιακού κομποστοποιητή.

Διάταξη χειρολαβής

Ο αναδευτήρας επί του άνω άκρου του φέρει συγκολλημένη τη διάταξη της χειρολαβής, μέσω της οποίας επιτυγχάνεται η περιστροφή του αναδευτήρα. Η χειρολαβή αποτελείται από μια ευθύγραμμη σωληνοειδή ράβδο, μήκους 12.00 cm και λοιπών διαστάσεων όμοιων με αυτές της κυρίως ράβδου του αναδευτήρα. Είναι συγκολλημένη επί του άνω άκρου του άξονα, σε σημείο περί το μέσο της και σε διεύθυνση κάθετα από αυτήν που ορίζεται από τον κυρίως άξονα. Παρακάτω, απεικονίζεται σε λεπτομέρεια η διάταξη της χειρολαβής του αναδευτήρα.



Εικόνα 4.22 Χειρολαβή περιστροφής αναδευτήρα

Διαφράγματα

Χαμηλότερα της χειρολαβής και σε απόσταση 10.55 cm από το άνω άκρο του αξονικού στελέχους, βρίσκονται συγκολλημένα δύο όμοια επίπεδα μεταλλικά ελάσματα τραπεζοειδούς σχήματος, τα οποία εφεξής θα ορίζονται ως διαφράγματα. Τα δύο διαφράγματα είναι συγκολλημένα ακτινικά σε δύο αντιδιαμετρικές ισοϋψείς θέσεις ('αυχένες' συγκόλλησης) στην καθ' ύψος διάσταση, κατά μήκος της εξωτερικής παράπλευρης επιφάνειας του αξονικού στελέχους. Όπως αναφέρθηκε ανωτέρω, κάθε διάφραγμα έχει σχήμα ορθογώνιου τραπεζίου με μήκος μεγάλης βάσης (ευθεία συγκόλλησης) 13.15 cm, μήκος μικρής βάσης 8.40 cm, ύψος 23.95 cm και πάχος 0.10 cm. Κατά την περιστροφή του αναδευτήρα, τα δύο διαφράγματα σαρώνουν στο εσωτερικό του θαλάμου, κυλινδρικό όγκο ακτίνας 24.70 cm.

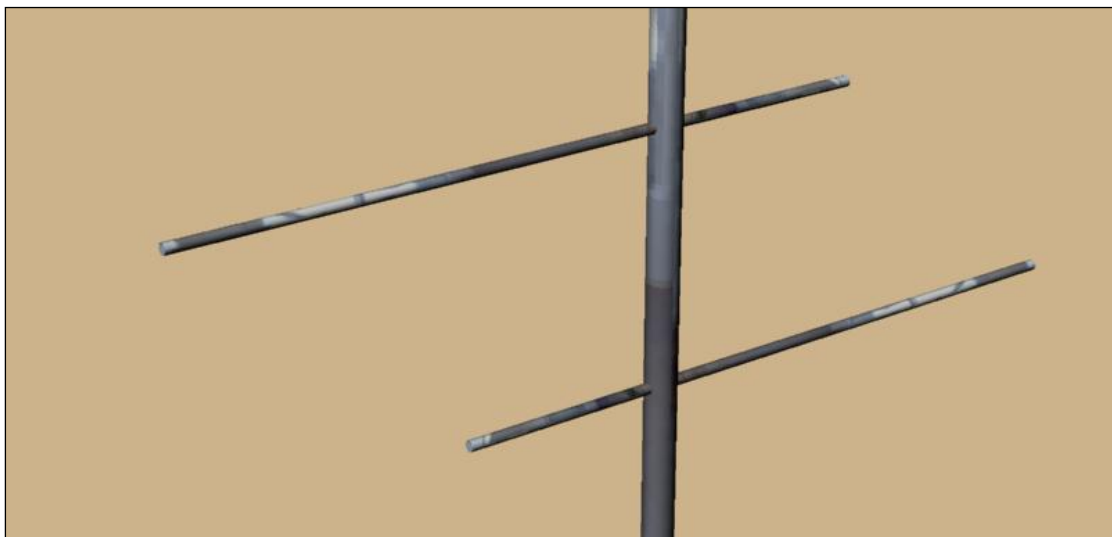
Στην εικόνα που ακολουθεί, φαίνεται σε λεπτομέρεια η διάταξη των δύο διαφραγμάτων.



Εικόνα 4.23 Διαφράγματα αναδευτήρα

Στελέχη ανάδευσης

Η λειτουργία της ανάδευσης πραγματοποιείται μέσω των αντίστοιχων στελεχών τα οποία συγκροτούνται από δύο συμπαγείς μεταλλικές ράβδους οι οποίες διαπερνούν κάθετα τον άξονα του αναδευτήρα σε αποστάσεις 30.90 και 42.90 cm, αντίστοιχα, από το κάτω άκρο του. Οι εν λόγω ράβδοι με συνολικό μήκος 33.00 cm και διάμετρο 0.50 cm, εκτείνονται ακτινικά του άξονα ανισομερώς κατά 22.25 cm από τη μια πλευρά και 9.25 cm από την άλλη. Κατά την περιστροφή του αναδευτήρα κάθε στέλεχος ανάδευσης σαρώνει δύο κυκλικές επιφάνειες, μια διαμέτρου 10.00 cm (‘μικρή’ προέκταση) και μια διαμέτρου 23.00 cm (‘μεγάλη’ προέκταση). Παρακάτω, απεικονίζονται σε λεπτομέρεια τα δύο στελέχη ανάδευσης.



Εικόνα 4.24 Στελέχη ανάδευσης

Για λόγους ευστάθειας κατά την περιστροφική κίνηση της διάταξης, το κατώτερο τμήμα του αξονικού στελέχους του αναδευτήρα εισέρχεται κατά 9.50 cm στον σωληνοειδή δακτύλιο που βρίσκεται συγκολλημένος επί του μεταλλικού ελάσματος της βάσης.

Στις εικόνες που ακολουθούν, φαίνεται η συνολική διάταξη του αναδευτήρα, καθώς επίσης και η θέση του αναδευτήρα στο εσωτερικό του θαλάμου.



Εικόνα 4.25 Συνολική διάταξη ανάδευσης



Εικόνα 4.26 Θέση του αναδευτήρα στο εσωτερικό του θαλάμου

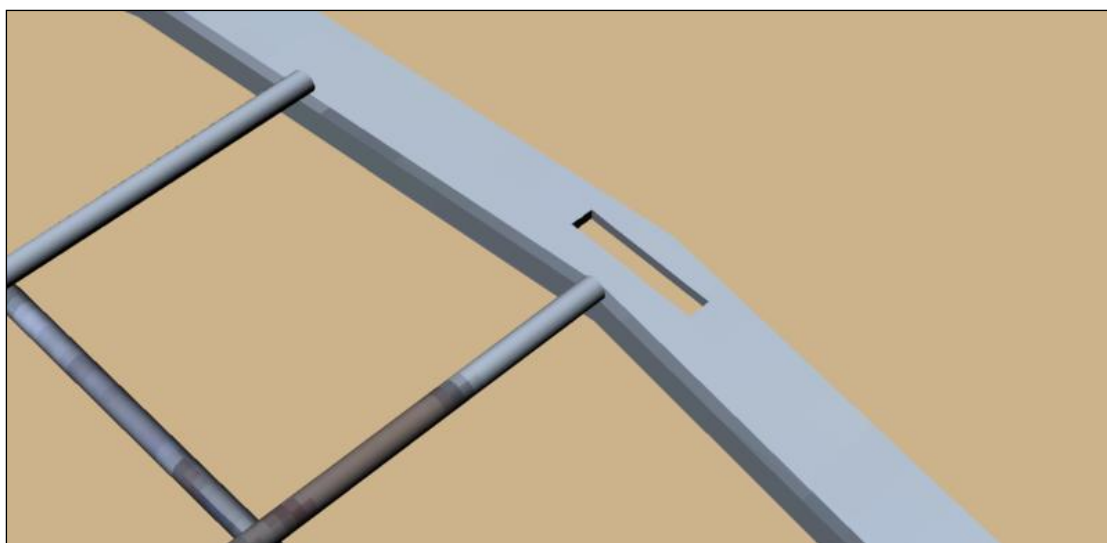
4.2.5 Εσχάρα διαχωρισμού

Η συγκεκριμένη διάταξη αποτελείται από το πλέγμα διαχωρισμού (κυρίως εσχάρα) και το πλαίσιο, μέσω του οποίου η εσχάρα αναρτάται και συγκρατείται στο εσωτερικό του κυλινδρικού περιβλήματος σε ύψος 27.00 cm από το επίπεδο που ορίζει ο πυθμένας του συστήματος.

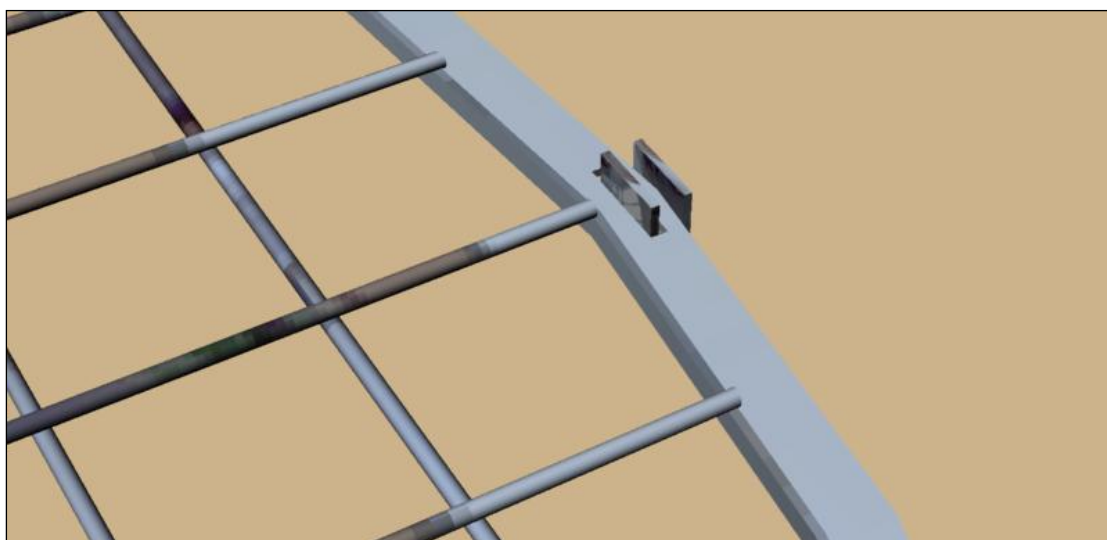
Πλαίσιο εσχάρας

Το πλαίσιο της εσχάρας συγκροτείται από μια κυκλική στεφάνη η οποία, περιμετρικά και ανά σταθερή γωνία 30 μοιρών, φέρει 12 ορθογωνικά διαμπερή ανοίγματα, διαστάσεων 1.20 X 0.20 cm. Επί των ανοιγμάτων αυτών εισέρχονται τα στελέχη των υποστηρίγματος της εσχάρας. Τα υποστηρίγματα αυτά, όπως αναφέρθηκε ανωτέρω, είναι πακτωμένα στην εσωτερική παράπλευρη επιφάνεια του κυλινδρικού περιβλήματος. Το πλαίσιο της εσχάρας έχει εξωτερική και εσωτερική διάμετρο 49.60 και 48.00 cm αντίστοιχα, ενώ το πάχος της στεφάνης είναι 0.10 cm.

Στη συνέχεια, απεικονίζεται σε λεπτομέρεια ένα εκ των 12 ανοιγμάτων, επί του πλαισίου της εσχάρας, καθώς επίσης και μια εκ των διατάξεων συναρμογής.



Εικόνα 4.27 Ορθογωνικά ανοίγματα στήριξης της εσχάρας

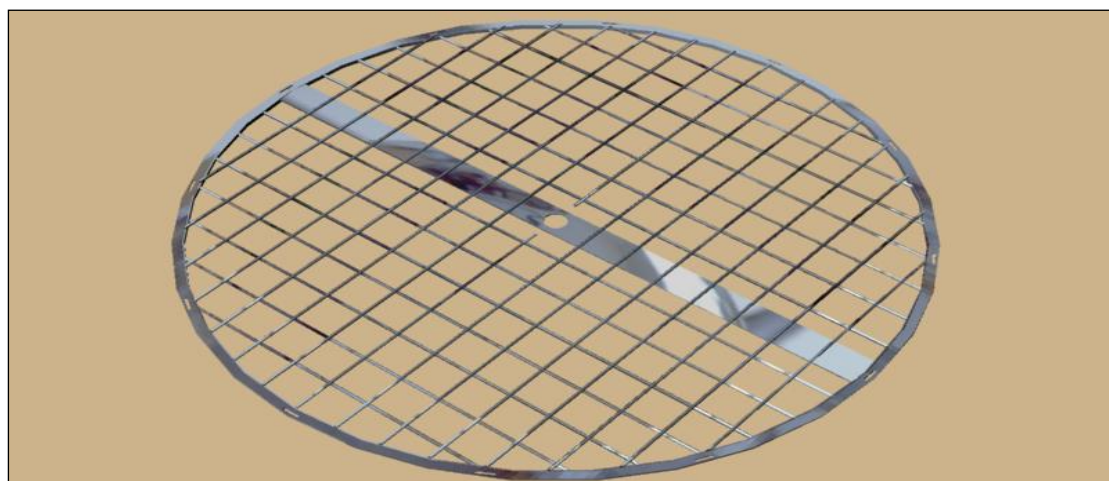


Εικόνα 4.28 Συναρμογή εσχάρας επί υποστηρίγματος

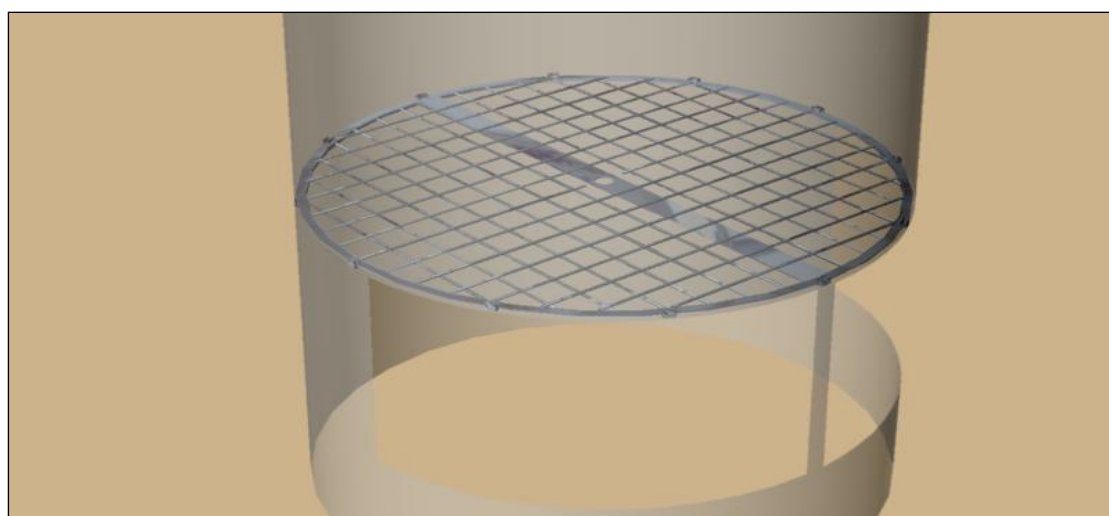
Πλέγμα εσχάρας

Επί της εσωτερικής παράπλευρης επιφάνειας του πλαισίου, είναι συγκολλητώσ πακτωμένες οι ευθύγραμμες μεταλλικές ράβδοι που ορίζουν το πλέγμα της εσχάρας. Κάθε ράβδος του πλέγματος είναι συμπαγής και κυκλικής διατομής με διάμετρο 0.20 cm. Το πλέγμα συντίθεται από δύο ομάδες των 15 ράβδων που συμπλέκονται κάθετα και σχηματίζουν τετραγωνικά ανοίγματα διάστασης 2.80 cm και επιφάνειας 7.84 cm² ανά άνοιγμα. Επιπλέον, επί της διαμέτρου του πλαισίου που τέμνεται από το αξονικό στέλεχος του αναδευτήρα, αντί μιας ράβδου πλέγματος, βρίσκεται συγκολλημένο μεταλλικό έλασμα πάχους 0.10 cm και πλάτους 2.50 cm. Το έλασμα αυτό, περί το μέσο του φέρει διαμπερής κυκλική οπή διαμέτρου 1.60 cm για τη διέλευση μέσω αυτής του άξονα του αναδευτήρα. Η ύπαρξη του συγκεκριμένου ελάσματος αποσκοπεί στην κάλυψη του διακένου που σχηματίζεται μεταξύ των υποκειμένων υποδοχέων.

Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνεται η διάταξη του πλαισίου και του πλέγματος της εσχάρας και η θέση στήριξης της εσχάρας στο εσωτερικό του κυλινδρικού περιβλήματος.



Εικόνα 4.29 Πλαίσιο και διάταξη πλέγματος εσχάρας διαχωρισμού



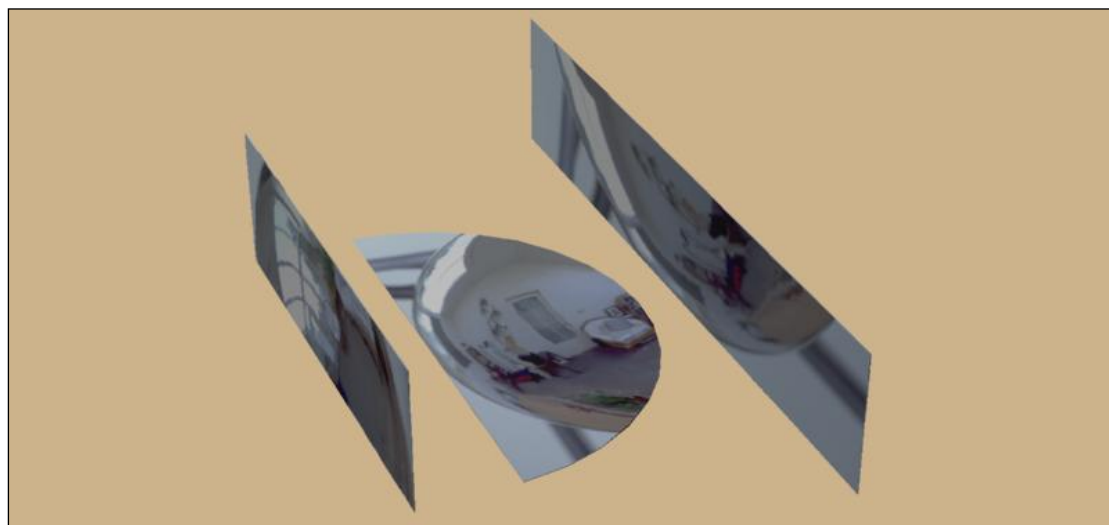
Εικόνα 4.30 Θέση στήριξης εσχάρας διαχωρισμού επί των υποστηριγμάτων της εσωτερικής παράπλευρης επιφάνειας του κυλινδρικού περιβλήματος

4.2.6 Υποδοχείς κόμποστ

Οι υποδοχείς του κόμποστ βρίσκονται ακριβώς κάτω από το επίπεδο της εσχάρας διαχωρισμού και συγκρατούνται στο εσωτερικό του κυλινδρικού περιβλήματος, επικαθόμενοι στις τέσσερις μεταλλικές ράβδους στήριξης και οδήγησης, κατά την είσοδο και έξοδό τους από το σύστημα (δύο ράβδοι ανά υποδοχέα).

Κάθε υποδοχέας συγκροτείται από τη συγκόλληση τριών μεταλλικών ελασμάτων, δύο παράπλευρων και εκείνο του πυθμένα. Αναφορικά με τα παράπλευρα ελάσματα, το ένα είναι επίπεδο, ορθογωνικού σχήματος διαστάσεων 49.56 cm μήκος, 16.40 cm ύψος και αποτελεί την πλευρά του υποδοχέα προς τον άξονα του αναδευτήρα. Το έτερο παράπλευρο έλασμα, αρχικά είναι ορθογωνικό διαστάσεων 77.872 cm μήκος, 16.40 cm ύψος και κατόπιν, κάμπτεται υπό γωνία 90 μοιρών. Η καμπύλωση αυτή πραγματοποιείται, προκειμένου η παράπλευρη επιφάνεια του υποδοχέα να συμφωνεί πλήρως με το εσωτερικό ανάγλυφο του κυλινδρικού περιβλήματος. Η συγκόλληση των δύο παράπλευρων ελασμάτων γίνεται στα σημεία επαφής των ευθύγραμμων κατακόρυφων ακμών τους.

Όλα τα ελάσματα που συνθέτουν τον υποδοχέα έχουν πάχος 0.10 cm. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνονται τα τρία ελάσματα πριν τις εργασίες καμπύλωσης, συγκόλλησης και διάνοιξης των οπών.



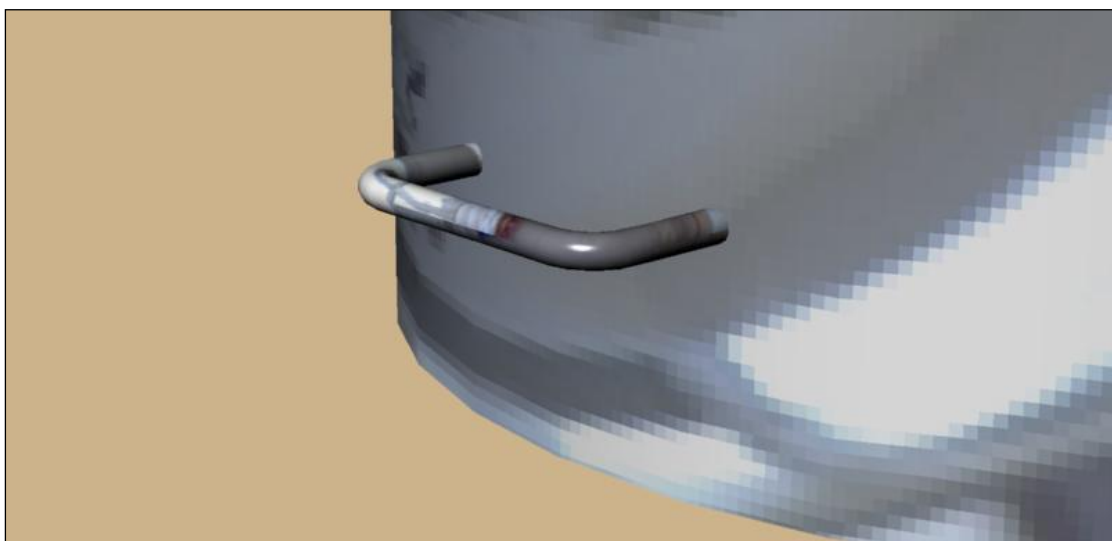
Εικόνα 4.31 Διάταξη ελασμάτων πριν τη σύνθεση του υποδοχέα

Αναφορικά με το έλασμα που συγκροτεί τον πυθμένα κάθε υποδοχέα, αποτελείται από κυκλικό τομέα (κατά προσέγγιση ημικυκλικό) ακτίνας 24.70 cm, μήκους ευθύγραμμης ακμής 49.35 cm και ύψους 23.60 cm. Επί του εν λόγω ελάσματος διανοίγονται 24 όμοιες, διαμπερείς και κυκλικές οπές διαμέτρου 0.70 cm. Οι οπές αυτές έχουν ευθύγραμμη διάταξη επί του πυθμένα σε τέσσερις ευθείες των 9, 7, 5 και 3 οπών αντίστοιχα. Για την ίδια ευθεία, τα κέντρα δύο διαδοχικών οπών απέχουν 5.00 cm. Επίσης, η απόσταση μεταξύ της 1^{ης} και της 2^{ης} και μεταξύ της 3^{ης} και της 4^{ης} ευθείας οπών είναι 6.00 cm, ενώ η απόσταση μεταξύ της 2^{ης} και της 3^{ης} είναι 5.00 cm. Το επίπεδο έλασμα του πυθμένα συγκολλάται περιμετρικά επί της κατώτατης ακμής που ορίζει η παράπλευρη επιφάνεια του υποδοχέα. Στην εικόνα που ακολουθεί, απεικονίζεται η διάταξη των οπών επί του πυθμένα του υποδοχέα.



Εικόνα 4.32 Οπές στον πυθμένα του υποδοχέα

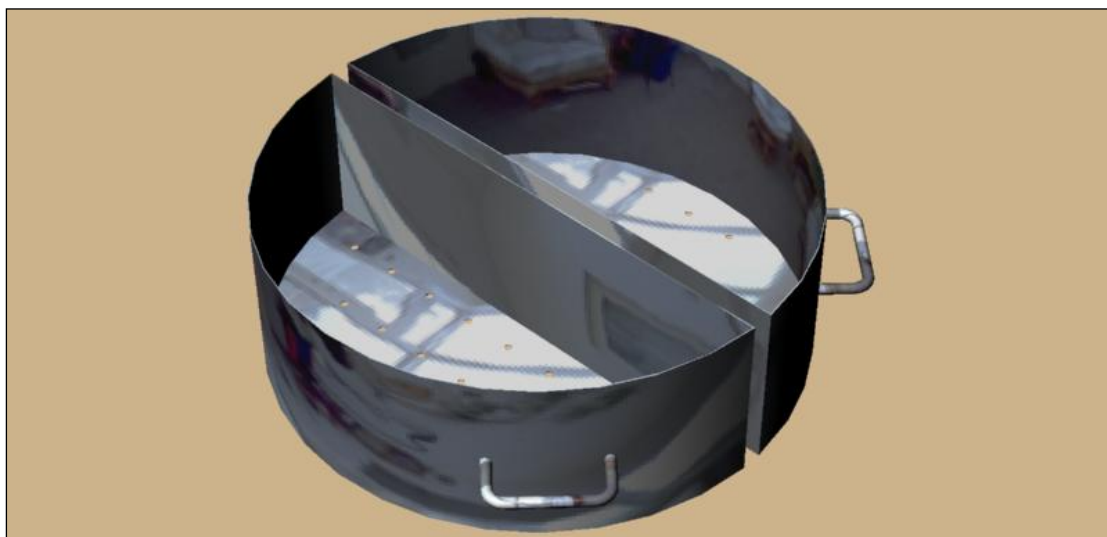
Συνολικά, μετά τις εργασίες κάμψης και διάνοιξης των οπών, κάθε υποδοχέας έχει σχήμα ημικυλινδρικού στερεού, ύψους 16.40 cm, μέγιστου μήκους 49.56 cm και μέγιστου πλάτους 23.80 cm. Οι εν λόγω διαστάσεις επιτρέπουν την άνετη είσοδο και έξοδο κάθε υποδοχέα, προς και από το εσωτερικό του κυλινδρικού περιβλήματος, δια μέσω των δύο όμοιων ορθογωνικών ανοιγμάτων που υπάρχουν στην επιφάνεια του τελευταίου. Η χειρονακτική μετακίνηση του υποδοχέα κατά την έξοδο αυτού και την εκκένωση του περιεχομένου του, επιτυγχάνεται μέσω διάταξης χειρολαβής. Η χειρολαβή, αποτελείται από μεταλλικό σωληνοειδές πάχους 0.10 cm και εξωτερικής διαμέτρου 1.00 cm, το οποίο καμπυλώνεται υπό γωνία 90 μοιρών στα δύο άκρα του. Τα εν λόγω άκρα συγκολλώνται επί της εξωτερικής παράπλευρης επιφάνειας του υποδοχέα προς την πλευρά που υπάρχει το άνοιγμα στο κυλινδρικό περίβλημα. Κάθε χειρολαβή είναι τοποθετημένη στο τμήμα εκείνο της εξωτερικής επιφάνειας του υποδοχέα που φαίνεται από το άνοιγμα του κυλινδρικού περιβλήματος, όταν ο υποδοχέας βρίσκεται εντός του θαλάμου. Παρακάτω, απεικονίζεται σε λεπτομέρεια η χειρολαβή του υποδοχέα.



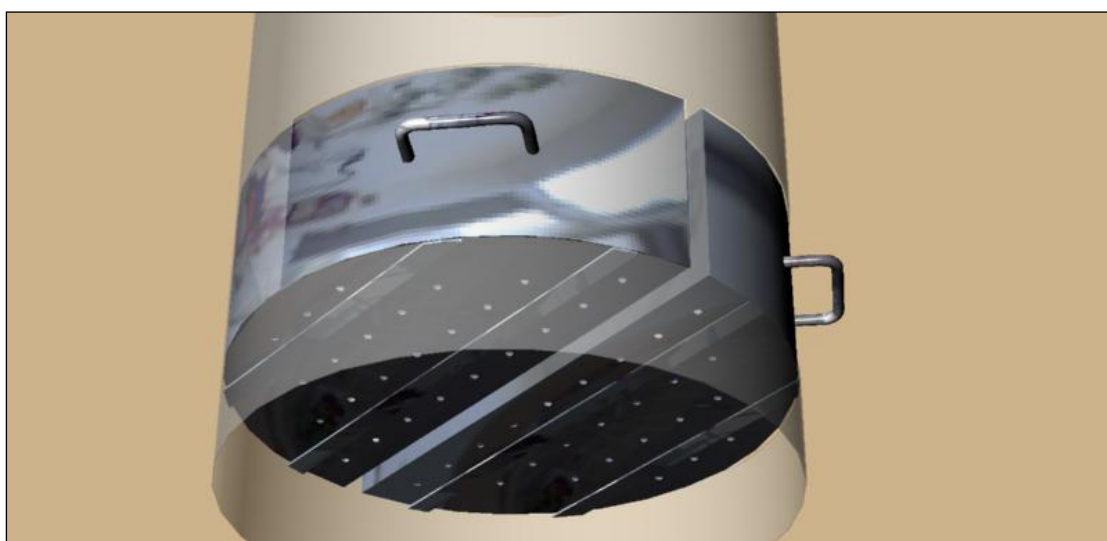
Εικόνα 4.33 Χειρολαβή υποδοχέα

Επιπλέον, μεταξύ των δύο υποδοχέων υπάρχει διάκενο πάχους 2.00 cm. Το διάκενο αυτό επιτρέπει τη διέλευση του αξονικού στελέχους του αναδευτήρα δια μέσω των υποδοχέων.

Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνεται η τελική μορφή του ζεύγους των υποδοχέων, καθώς επίσης και η θέση των υποδοχέων στο εσωτερικό του κυλινδρικού περιβλήματος επί των τεσσάρων μεταλλικών ράβδων στήριξης.



Εικόνα 4.34 Υποδοχείς κόμποστ



Εικόνα 4.35 Θέση υποδοχέων στο εσωτερικό του κυλινδρικού περιβλήματος

Η ολοκληρωμένη διάταξη του οικιακού κομποστοποιητή περιλαμβάνει τη συναρμολόγηση, είτε κατόπιν συγκόλλησης, είτε με απλή συναρμογή, όλων των επιμέρους τμημάτων που περιγράφηκαν ανωτέρω. Παρακάτω παρουσιάζεται η συναρμολογημένη διάταξη σε φυσική απεικόνιση και σε κατακόρυφες τομές του κυλινδρικού περιβλήματος έτσι ώστε, να φαίνεται πλήρως η θέση κάθε στοιχείου στο εσωτερικό του θαλάμου. Στην πρώτη απεικόνιση τομής, το περιστρεφόμενο πώμα βρίσκεται σε ανοικτή θέση και ο αναδευτήρας είναι σε κίνηση, ενώ στη δεύτερη απεικόνιση τομής, οι υποδοχείς βρίσκονται εκτός του συστήματος.



Εικόνα 4.36 Προοπτική όψη οικιακού κομποστοποιητή



Εικόνα 4.37 Εσωτερικό οικιακού κομποστοποιητή (ανοικτό πώμα, αναδευτήρας σε κίνηση)



Εικόνα 4.38 Εσωτερικό οικιακού κομποστοποιητή (υποδοχείς εκτός του συστήματος)

4.2.7 Υλικό κατασκευής

Τα μεταλλικά τμήματα του συστήματος κατασκευάστηκαν από ανοξείδωτο χάλυβα. Οι βασικοί λόγοι της επιλογής αυτής, αφορούν στις ακόλουθες ιδιότητες του εν λόγω υλικού:

- αντιοξειδωτικότητα,
- αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες,
- καλαίσθητη εμφάνιση,
- υψηλή αντοχή σε μηχανικές καταπονήσεις,
- ευκολία μορφοποίησης – κατασκευής,
- μεγάλη διάρκεια ζωής και
- πλήρη ανακυκλωσιμότητα (100% ικανότητα ανακύκλωσης).

Ο ανοξείδωτος χάλυβας χαρακτηρίζεται από χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα (C) και σχετικά υψηλή περιεκτικότητα σε χρώμιο (Cr). Σύμφωνα με τον κανόνα EN 10020:5.222.1 του 'Ευρωπαϊκού Οργανισμού Τυποποίησης', στους ανοξείδωτους χάλυβες κατατάσσονται οι χάλυβες που περιέχουν χρώμιο σε ποσοστό τουλάχιστον 12.5 % και άνθρακα σε ποσοστό όχι μεγαλύτερο από 0.95 %.

Εξάλλου, ανάλογα με τα στοιχεία κράματος που τους απαρτίζουν, οι ανοξείδωτοι χάλυβες διακρίνονται σε τρεις βασικούς τύπους:

- τους ωστενιτικούς χάλυβες, των οποίων η βασική ποιότητα περιέχει χρώμιο σε ποσοστό μέχρι και 19 % και νικέλιο σε ποσοστό μέχρι 12 %,
- τους φερριτικούς χάλυβες, οι οποίοι είναι δυνατό να περιέχουν χρώμιο σε ποσοστό έως και 25 %,
- τους μαρτενσιτικούς χάλυβες, οι οποίοι περιέχουν χρώμιο σε ποσοστό από 12.5 έως και 17 %.

Η προσθήκη χρωμίου, δίνει στον ανοξείδωτο χάλυβα εξαιρετικά υψηλή αντοχή έναντι διάβρωσης, διαμορφώνοντας στην επιφάνεια του κράματος μια μεμβράνη αντιδιαβρωτικής προστασίας. Οι αντιδιαβρωτικές ιδιότητες, είναι αποτέλεσμα του εμπλουτισμού του χάλυβα με αυξημένη περιεκτικότητα σε χρώμιο, καθώς και η προσθήκη άλλων στοιχείων όπως το μολυβδαίνιο (Mo) και το νικέλιο (Ni), προκειμένου για ωστενιτικούς, ή το αργίλιο (Al) και το άζωτο (N), προκειμένου για φερριτικούς ανοξείδωτους χάλυβες.

Η κρυσταλλική δομή του ανοξείδωτου χάλυβα επιτρέπει την αυτοπροστασία του υλικού. Όταν η αντιδιαβρωτική μεμβράνη καταστραφεί λόγω μηχανικής ή χημικής καταπόνησης, ο χάλυβας εξακολουθεί να διατηρεί τις ιδιότητές αυτές στην περιοχή της καταπόνησης.

Υπάρχουν πάνω από 60 τύποι ανοξείδωτου χάλυβα, ωστόσο, μπορούμε να τους κατατάξουμε στους τρεις βασικούς τύπους που αναφέρθηκαν ανωτέρω. Ο κάθε τύπος ανοξείδωτου χάλυβα, αναγνωρίζεται από το κράμα των προσμίξεων που περιέχει. Οι προσμίξεις αυτές, αφενός επιδρούν στη μικροδομή του υλικού, αφετέρου, δίνουν στον ανοξείδωτο χάλυβα την τυποποιημένη ονομασία του.

Στη συνέχεια, παρατίθενται ενδεικτικοί πίνακες με τους χαρακτηριστικότερους τύπους ανοξείδωτου χάλυβα, τις επί τοις εκατό περιεκτικότητες τους ως προς τα στοιχεία προσμίξεως, ορισμένες μηχανικές ιδιότητες και τις χρήσεις τους σε πρακτικές εφαρμογές.

Πίνακας 4.1 Σύνθεση και μηχανικές ιδιότητες χαρακτηριστικών ανοξείδωτων χαλύβων

Χάλυβας κατά AISI - SAE	Σύσταση (% κατά βάρος περιεκτικότητα)							Μηχανικές ιδιότητες		
	C	Cr	Al	N	Ni	Mo	Ta	Όριο διαρροής ($\sigma_{0.2}$)	Μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό (σ_{TS})	Παραμόρφωση θραύσης (ϵ)
								MPa	MPa	%
Μαρτενσιτικοί										
410	<0.15	12.5	-	-	-	-	-	700	1000	20
420	>0.15	13	-	-	-	-	-	1375	1760	10
440 – B	0.75 – 0.95	17	-	-	-	-	-	1900	1950	3
Φερριτικοί										
405	<0.08	13	0.2	-	-	-	-	275	450	25
430	<0.12	17	-	-	-	-	-	345	650	25
446	<0.20	25	-	<0.25	-	-	-	350	560	20
Ωστενιτικοί										
301	<0.15	17	-	-	7	-	-	275	750	50
304	<0.08	19	-	-	9	-	-	250	580	55
316	<0.08	17	-	-	12	2.5	-	290	580	50
316 – L	<0.03	17	-	-	12	2.5	-	260	550	50
347	<0.08	18	-	-	11	-	>0.8	275	655	45

Πίνακας 4.2 Εφαρμογές χαρακτηριστικών ανοξείδωτων χαλύβων

Χάλυβας κατά AISI - SAE	Εφαρμογές
Μαρτενσιτικοί	
410	Γενικές χρήσεις, για κατασκευή αντλιών, σιδερικών, κοχλιών
420	Λόγω καλής εμβαπτότητας για κατασκευή ελατηρίων, όπλων, ψαλιδιών
440 – B	Λόγω αυξημένης σκληρότητας για κατασκευή μαχαιριών, βαλβίδων και χειρουργικών εργαλείων
Φερριτικοί	
405	Είναι πυρίμαχοι και χρησιμοποιούνται σε πετροχημικές βιομηχανίες
430	Έχουν καλή αντοχή σε επίδραση νιτρικού οξέος, χρησιμοποιούνται σε βιομηχανίες τροφίμων και στην αρχιτεκτονική
446	Λόγω της αντοχής τους σε διάβρωση και αποφλοιώση σε υψηλές θερμοκρασίες, χρησιμοποιούνται ως πυρίμαχα

Ωστενιτικοί	
301	Χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία αυτοκινήτων και λοιπών οχημάτων
304	Σε βιομηχανίες χημικών και τροφίμων
316	Έχουν καλή συμπεριφορά σε χλωριούχο περιβάλλον
316 – L	Έχουν καλή συγκολλησιμότητα
347	Λόγω της καλής αντοχής τους ως τους 850 °C , χρησιμοποιούνται σε χημικές βιομηχανίες και στην αεροναυπηγική

Σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν στους ανωτέρω πίνακες, για τα μεταλλικά ελάσματα του οικιακού κομποστοποιητή, επιλέγεται ως συνθετικό υλικό ανοξείδωτος χάλυβας AISI – SAE 304.

Ο συγκεκριμένος τύπος είναι ο πλέον εύχρηστος και διαδεδομένος εμπορικά ανοξείδωτος χάλυβας, με εφαρμογή σε ευρεία ποικιλία κατασκευών. Χαρακτηρίζεται από μεγάλες δυνατότητες διαμόρφωσης και συγκολλησιμότητας. Μάλιστα, μετά τη διαδικασία της συγκόλλησης δύο ή περισσότερων τεμαχίων, δεν απαιτείται θερμική σκλήρυνση της συναρμολογημένης διάταξης.

Η καλαίσθητη εμφάνισή του ανοξείδωτου χάλυβα 304 τον καθιστά κυρίαρχο συνθετικό υλικό για την κατασκευή δεξαμενών, σωληνώσεων και μαγειρικών σκευών. Μετά τη χύτευση, διαμορφώνεται σε ρολά ελασμάτων και με τη μορφή αυτή διατίθεται σε βιομηχανικές εφαρμογές.

Αντιδιαβρωτική ικανότητα

Ο χάλυβας αυτός είναι εξαιρετικά ανθεκτικός σε διάφορους τύπους περιβάλλοντος και σε μεγάλη ποικιλία διαβρωτικών μέσων. Σε θερμό χλωριωμένο περιβάλλον εμφανίζει επιφανειακά ρηγματώσεις και κοιλάνσεις, ενώ το όριο θραύσης σε διαβρωτικό μέσο για εφελκυστική καταπόνηση παρουσιάζεται σε θερμοκρασία 60 °C .

Θερμική αντίσταση

Έχει καλή αντίσταση έναντι οξείδωσης σε συνθήκες συνεχούς θέρμανσης στους 925 °C και σε συνθήκες διακοπτόμενης θέρμανσης στους 870 °C . Η συνεχής χρήση του χάλυβα σε περιβάλλον με θερμοκρασιακό εύρος 425 – 860 °C , πρέπει να αποφεύγεται, ιδιαίτερα όταν το εν λόγω περιβάλλον είναι διαβρωτικό.

Εμφανίζει υψηλή αντοχή σε απότομες θερμοκρασιακές μεταβολές, γεγονός που επιτρέπει τη χρήση του σε εφαρμογές υψηλών πιέσεων σε θερμοκρασίες από 500 °C μέχρι και 800 °C .

Θερμική κατεργασία

Ο χάλυβας, κατά τη διαμόρφωσή του θερμαίνεται σε θερμοκρασίες 1010 – 1120 °C και υποβάλλεται σε απότομη ψύξη. Η σκληρότητα των τύπων 304, 304L και 304H δεν βελτιώνεται περαιτέρω με θερμική κατεργασία.

Συγκολλησιμότητα

Παρουσιάζει εξαιρετική συγκολλησιμότητα σε κάθε μέθοδο συγκόλλησης (ηλεκτροπόντα, με φλόγα αερίου, με ρευστό μέταλλο κ.ά.). Για κατασκευές με ελάσματα τύπου 304, σχετικά μεγάλου πάχους, είναι επιθυμητή η μετέπειτα θερμική σκλήρυνση που επιπλέον παρέχει μεγαλύτερη αντιδιαβρωτική ικανότητα. Η κατεργασία αυτή δεν απαιτείται για τον τύπο 304L.

Πιστοποίηση

Οι ανοξείδωτοι χάλυβες των τύπων 304 και 304L πιστοποιούνται ποιοτικά σε μορφή σωλήνων ή ελασμάτων. Η αντίστοιχη πιστοποίηση δεν επαρκεί για τον 304H, ιδιαίτερα όταν αυτός αφορά σε εφαρμογές με περιβάλλον υψηλών θερμοκρασιών.

Εφαρμογές

Οι κυριότερες εφαρμογές τους αφορούν:

- στη βιομηχανία τροφίμων (π.χ. κατασκευές δοχείων που περιέχουν μύρα, γάλα, κρασί κ.ά.),
- κατασκευές δεξαμενών, μαγειρικών σκευών, σωληνώσεων,
- κατασκευές δομικών πλαισίων, κιγκλιδωμάτων,
- σε εναλλάκτες θερμότητας,
- μέσα προσωρινής αποθήκευσης και μεταφοράς χημικών (containers),
- κατασκευές συγκολλητών πλεγμάτων, κόσκινων, φίλτρων,
- νηματώδεις μεταλλικές κατασκευές (π.χ. συνδετήρες κ.ά.).

4.2.8 Λειτουργία συστήματος

Το πρότυπο σύστημα στηρίζεται στη μηχανική ανάδευση, τη συνεχή τροφοδοσία και την κατακόρυφη ροή υλικών. Ανάλογα με τη φύση της επιτελούμενης λειτουργίας, επιμερίζεται σε τέσσερα επάλληλα διαμερίσματα που αφορούν:

- στο χώρο υποδοχής και προσωρινής παραμονής των ημερησίως παραγόμενων διατροφικών αποβλήτων (δ.α.) (διαμέρισμα τροφοδοσίας),
- στο χώρο τέλεσης των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης (μεσόφιλη και θερμοφιλή φάση) (διαμέρισμα κομποστοποίησης),
- στο χώρο συλλογής και παραλαβής του κόμποστ (διαμέρισμα απόληψης) και
- στο χώρο συγκέντρωσης των διασταλαζόντων υγρών που εκρέουν από το σωρού των δ.α. (διαμέρισμα στραγγισμάτων).

Τα τέσσερα διαμερίσματα με τη σειρά που αναφέρονται ανωτέρω, βρίσκονται σε διαδοχικές θέσεις, από το ανώτερο προς το κατώτερο τμήμα του θαλάμου.

Διαμέρισμα τροφοδοσίας

Ανάλογα με τις ιδιαίτερες διατροφικές συνήθειες και τα χαρακτηριστικά που επικρατούν σε ένα νοικοκυριό, τα δ.α. παράγονται κυρίως κατά την προετοιμασία ενός γεύματος και κατά δεύτερο λόγο, κατά την περάτωση αυτού (αποφάγια). Τα απόβλητα αυτά, που αποτελούνται εξ' ολοκλήρου από οργανική ύλη, οδηγούνται στο διαμέρισμα τροφοδοσίας του οικιακού κομποστοποιητή.

Υποδοχή διατροφικών αποβλήτων

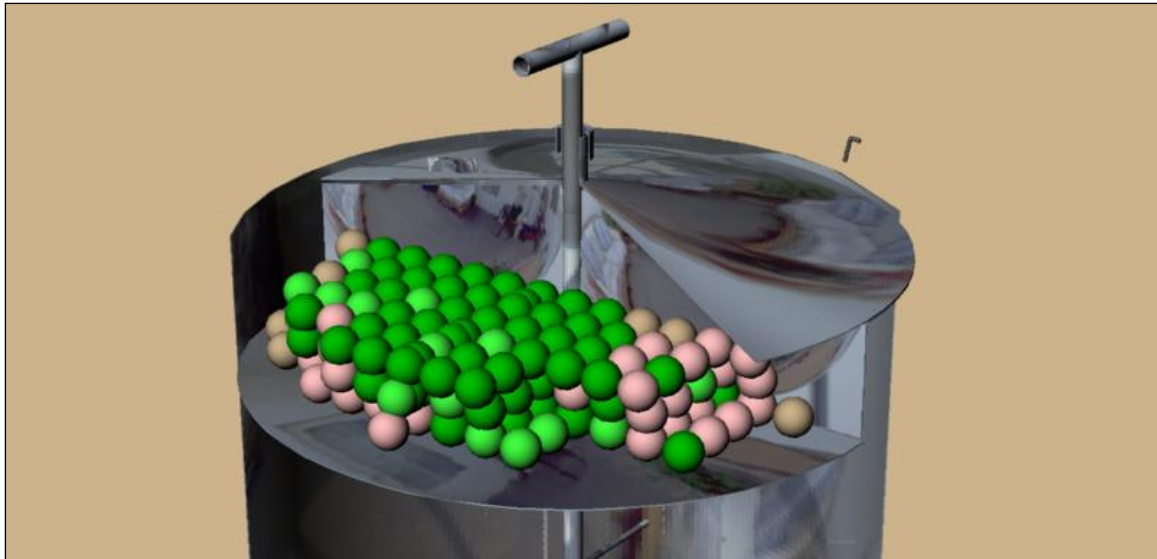
Η χωρητικότητα του διαμερίσματος τροφοδοσίας ανέρχεται σε 9615 cm^3 , ή ισοδύναμα σε 9.615 lt. Ο όγκος αυτός περικλείεται:

- άνωθεν, από την καμπυλωμένη επιφάνεια του μεταλλικού ελάσματος που συγκροτεί το περιστρεφόμενο στέλεχος του πώματος,
- παραπλεύρως, από τμήμα του κυλινδρικού περιβλήματος και από τις δύο επίπεδες τραπεζοειδείς επιφάνειες των διαφραγμάτων του αναδευτήρα,
- κάτωθεν, από την επίπεδη ημικυκλική επιφάνεια του μεταλλικού ελάσματος που συγκροτεί το δάπεδο του διαμερίσματος τροφοδοσίας.

Συνολικά, ο χώρος που ορίζεται ως διαμέρισμα τροφοδοσίας είναι ένα, κατά προσέγγιση, ημικυλινδρικό στερεό. Ο χώρος που βρίσκεται αντιδιαμετρικά του διαμερίσματος τροφοδοσίας, καθώς δεν διαθέτει δάπεδο στο ύψος των διαφραγμάτων, αποτελεί εκ των άνω χωρική προέκταση του διαμερίσματος κομποστοποίησης.

Η διοχέτευση των δ.α. από τον κ.ο. προς το διαμέρισμα τροφοδοσίας, επιτυγχάνεται με τη χειρωνακτική μετακίνηση του περιστρεφόμενου στελέχους του πώματος. Αρχικά, ανασηκώνεται ο πείρος που κρατά σε σταθερή συναρμογή το περιστρεφόμενο επί του στατικού στελέχους του πώματος. Κατόπιν, το μεταλλικό πλακίδιο που βρίσκεται πακτωμένο στην ευθύγραμμη ακμή του κινούμενου στελέχους, περιστρέφεται χειρωνακτικά μετακινώντας το πώμα. Το περιστρεφόμενο στέλεχος, κατά το πέρας της ωφέλιμης διαδρομής του ('πλήρως ανοικτή' θέση), επικάθεται εφαπτόμενο επί του στατικού στελέχους δημιουργώντας στην ανώτατη επιφάνεια του οικιακού κομποστοποιητή ημικυκλικό άνοιγμα που επιτρέπει την εύκολη είσοδο των δ.α. στο διαμέρισμα τροφοδοσίας.

Στην ακόλουθη προοπτική απεικόνιση το κυλινδρικό περίβλημα παριστάνεται σε κατακόρυφη τομή, έτσι ώστε να φαίνεται η διάταξη του σωρού μιας νεοεισερχόμενης ποσότητας δ.α. στο εσωτερικό του διαμερίσματος τροφοδοσίας. Διακρίνεται ο ανασηκωμένος πείρος και το περιστρεφόμενο στέλεχος του πώματος, το οποίο βρίσκεται σε 'πλήρως ανοικτή' θέση.



Εικόνα 4.39 Διαμέρισμα τροφοδοσίας κατά την υποδοχή ποσότητας δ.α.

Λαμβάνοντας ως μέγεθος αναφοράς, τον όγκο των ημερησίως παραγόμενων δ.α. από τις σχετικές δραστηριότητες μιας τετραμελούς οικογένειας, υπολογίζεται ότι η παραγόμενη ποσότητα προσεγγίζει κατά μέγιστο τα 2 kg. Επιπλέον, από σχετικούς υπολογισμούς είναι γνωστό ότι η πυκνότητα του οργανικού κλάσματος των αστικών απορριμμάτων ανέρχεται σε 1.255 Kg/l. Κατά συνέπεια, ο όγκος των παραγόμενων δ.α. που εισέρχονται σε ημερήσια βάση στο διαμέρισμα τροφοδοσίας, δεν ξεπερνά τα 1.6 l.

Εκ των όσων αναφέρθηκαν ανωτέρω, καθίσταται σαφές ότι, η χωρητικότητα του διαμερίσματος τροφοδοσίας επαρκεί για τη συγκέντρωση παραγόμενων δ.α. δύο, τριών ή ακόμη και τεσσάρων ημερών. Ωστόσο, για την ορθή λειτουργία του συστήματος, συνίσταται το διαμέρισμα τροφοδοσίας να εκκενώνεται το πολύ κάθε δύο ημέρες καθώς:

- ορισμένοι τύποι δ.α. περιέχουν σχετικά ευμεγέθη τεμάχια (π.χ. μεγάλες φλούδες καρπουζιών, πεπονιών, κομμάτια ξηρού ψωμιού κ.α.) αυξάνοντας τις εξωτερικές διαστάσεις του σωρού των δ.α. στο διαμέρισμα τροφοδοσίας. Έτσι, η διοχέτευση κάθε 'νέας' ποσότητας ενδέχεται να παρεμποδίζεται από τον όγκο του ήδη υπάρχοντος σωρού.
- κατά το άνοιγμα του πώματος, τα δ.α. που βρίσκονται συσσωρευμένα στο διαμέρισμα τροφοδοσίας έρχονται σε επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον και το χρήστη του συστήματος. Παραμονή της εν λόγω ποσότητας για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο των δύο ημερών, ενδέχεται να δημιουργήσει δυσάρεστες οσμές οι οποίες, κατά το άνοιγμα του πώματος και την είσοδο 'νέας' ποσότητας δ.α., αναμένεται να εκλυθούν στο περιβάλλον της κατοικίας, γεγονός ανεπιθύμητο κατά τη λειτουργία του συστήματος.

Μόλις τα δ.α. διοχετευτούν στο εσωτερικό του διαμερίσματος τροφοδοσίας, το περιστρεφόμενο στέλεχος του πώματος με κίνηση αντίστροφη από αυτή του ανοίγματος, επιστρέφει σε 'πλήρως κλειστή' θέση, απομονώνοντας το σωρό από το εξωτερικό περιβάλλον. Επιπλέον, με τη βοήθεια του πείρου, στατικό και περιστρεφόμενο στέλεχος ασφαρίζονται σε σταθερή συναρμογή.

Μεταφορά διατροφικών αποβλήτων στο διαμέρισμα κομποστοποίησης

Η μεταφορά των δ.α. από το διαμέρισμα τροφοδοσίας στο αντίστοιχο διαμέρισμα κομποστοποίησης, επιτυγχάνεται με χειρωνακτική περιστροφή του αξονικού στελέχους του αναδευτήρα. Συγκεκριμένα, στο ύψος του διαμερίσματος τροφοδοσίας, ο αναδευτήρας φέρει επί του άξονά του και αντιδιαμετρικά, δύο συγκολλητώς πακτωμένα επίπεδα μεταλλικά ελάσματα, τραπεζοειδούς σχήματος. Η περιστροφή της χειρολαβής του αναδευτήρα κατά γωνία 180 μοιρών, ανεξαρτήτως φοράς, έχει ως αποτέλεσμα, ένα εκ των διαφραγμάτων να σαρώνει τον ημικυλινδρικό όγκο που ορίζει το διαμέρισμα τροφοδοσίας. Το διάφραγμα, κατά την περιστροφική του κίνηση ωθεί το σωρό των δ.α. προς τον ελεύθερο χώρο που βρίσκεται παραπλεύρως του διαμερίσματος τροφοδοσίας, ακριβώς κάτω από το στατικό στέλεχος του πώματος. Κατόπιν, τα δ.α. κατερχόμενα λόγω βαρύτητας διοχετεύονται στο διαμέρισμα κομποστοποίησης.

Όταν ολόκληρη η ποσότητα των δ.α. σαρωθεί από το διαμέρισμα τροφοδοσίας και κατέλθει στο χώρο κομποστοποίησης, τα διαφράγματα του αναδευτήρα επανέρχονται στις αρχικές τους θέσεις φράσσοντας εκ νέου την παράπλευρη επιφάνεια του διαμερίσματος.

Οι 'νεές' ποσότητες δ.α. που συγκεντρώνονται στο κ.ο., διοχετεύονται μέσω του 'ανοικτού' πώματος στο κενό περιεχομένου διαμέρισμα τροφοδοσίας, το περιστρεφόμενο πώμα κλείνει και επαναλαμβάνεται η σχετική διαδικασία.

Στην εικόνα που ακολουθεί, οπτικοποιείται η μεθοδολογία οδήγησης των δ.α. από το χώρο υποδοχής και προσωρινής παραμονής, προς το διαμέρισμα κομποστοποίησης. Καθώς ο αναδευτήρας περιστρέφεται, η κυκλική κίνηση ενός εκ των διαφραγμάτων έχει ως αποτέλεσμα την ώθηση των δ.α. προς το χείλος του δαπέδου τροφοδοσίας και την κάθοδό τους στο διαμέρισμα κομποστοποίησης. Διακρίνεται το πώμα σε 'πλήρως κλειστή' θέση και η ασφάλισή του στο στατικό στέλεχος μέσω του πείρου.



Εικόνα 4.40 Διοχέτευση δ.α. στο διαμέρισμα κομποστοποίησης

Διαμέρισμα κομποστοποίησης

Η περιστροφική κίνηση των διαφραγμάτων του αναδευτήρα έχει ως αποτέλεσμα την κάθοδο των δ.α. από το διαμέρισμα τροφοδοσίας σε αυτό της κομποστοποίησης. Οι διαδοχικές πτώσεις και αποθέσεις των εν λόγω ποσοτήτων, δημιουργούν ένα βαθμιαία αυξανόμενο όγκο οργανικού υλικού. Ο σωρός αυτός βαίνει ανερχόμενος από τον πυθμένα του διαμερίσματος κομποστοποίησης προς τα άνω.

Η χωρητικότητα του διαμερίσματος κομποστοποίησης ανέρχεται σε 66018 cm^3 , ή ισοδύναμα σε περίπου 66 lt. Ο όγκος αυτός αφορά κυλινδρικό στερεό με:

- άνω βάση, την κυκλική επιφάνεια στο ύψος του δαπέδου του διαμερίσματος τροφοδοσίας,
- κάτω βάση, το επίπεδο που ορίζει η εσχάρα διαχωρισμού και
- παράπλευρη επιφάνεια, το τμήμα του κυλινδρικού περιβλήματος μεταξύ άνω και κάτω βάσης.

Σύμφωνα με τους υπολογισμούς που έγιναν ανωτέρω αναφορικά με την ημερησίως παραγόμενη ποσότητα δ.α. εκ μέρους μιας τετραμελούς οικογένειας (κατά μέσο όρο 1.6 lt), αν το διαμέρισμα κομποστοποίησης ήταν ένας απολύτως κλειστός θάλαμος, θα χρειαζόνταν περίπου 40 ημέρες μέχρι ότου πληρωθεί τελείως. Ωστόσο, ο συγκεκριμένος οικιακός κομποστοποιητής, ως σύστημα συνεχούς τροφοδοσίας, εκμεταλλεύεται με τρόπο αποδοτικό τη μείωση του όγκου των υπό κομποστοποίηση δ.α. καθώς, μέσω της μεθοδολογίας ανάδευσης και της εσχάρας διαχωρισμού, το βιοαποδομημένο οργανικό υλικό εξέρχεται από το διαμέρισμα κομποστοποίησης.

Επί της μάζας του συγκεντρωμένου σωρού δ.α. τελούνται τα αρχικά στάδια των διεργασιών κομποστοποίησης (μεσόφιλη και θερμοφιλη φάση). Τα στάδια αυτά χαρακτηρίζονται ως φάσεις ταχείας αποδόμησης των οργανικών ενώσεων λόγω της δράσης διαδοχικών ομάδων μικροοργανισμών. Οι εν λόγω ομάδες συγκροτούνται από ποικιλία τύπων βακτηρίων και μυκήτων που αναπτύσσονται ενδογενώς στον όγκο του οργανικού υλικού.

Κατά την εξέλιξη των διεργασιών, η αλληλοδιαδοχή των μικροβιακών πληθυσμών μεταβάλλει τη χημική σύσταση του σωρού καθώς, τα οργανικά μακρομόρια που συνθέτουν κάθε τύπο δ.α., αρχικά υδρολύονται, κατόπιν διασπώνται σε ομάδες οργανικών οξέων και εν συνεχεία, σε απλούστερες οργανικές ενώσεις χαμηλότερου μοριακού βάρους. Η περάτωση της κομποστοποίησης σηματοδοτεί το μετασχηματισμό των δ.α. σε ένα μερικώς σταθεροποιημένο και ιδιαίτερος πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά προϊόν.

Στην ακόλουθη εικόνα παριστάνεται η διάταξη των επάλληλων στρώσεων οργανικού υλικού στο εσωτερικό του διαμερίσματος κομποστοποίησης. Ο διαφορετικός χρωματισμός κάθε στρώσης υπονοεί το βαθμό βιοαποδόμησης. Οι κατώτερες στρώσεις αφορούν σε επεξεργασμένο, ή μερικώς επεξεργασμένο, υλικό (υψηλός βαθμός βιοαποδόμησης), ενώ τα ανώτερα στρώματα συγκροτούνται από νεοεισελθείσες ποσότητες δ.α..



Εικόνα 4.41 Διάταξη σωρού δ.α. στο διαμέρισμα κομποστοποίησης

Βασικός στόχος του σχεδιαζόμενου συστήματος είναι, η κατά το δυνατόν ταχύτερη μετατροπή του οργανικού κλάσματος των αστικών απορριμμάτων σε κόμποστ, που ισοδυναμεί με ελαχιστοποίηση του χρονικού διαστήματος περάτωσης των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης. Η επιδίωξη αυτή προϋποθέτει τη δημιουργία ενός βελτιστοποιημένου περιβάλλοντος δράσης των μικροβιακών πληθυσμών, στο εσωτερικό του διαμερίσματος κομποστοποίησης.

Η ταχύτητα περάτωσης των διεργασιών αερόβιας αποδόμησης, εξαρτάται από ένα πλήθος παραμέτρων οι οποίες επιδρούν, τόσο στο ρυθμό ανάπτυξης και δράσης των μικροοργανισμών, όσο και μεταξύ τους. Οι κυριότερες εκ των παραμέτρων αυτών αφορούν:

- στη θερμοκρασία που αναπτύσσεται κατά την εξέλιξη των διεργασιών,
- στο λόγο 'άνθρακα προς άζωτο' (C:N) του υπό κομποστοποίηση οργανικού υλικού,
- στα επίπεδα της περιεχόμενης υγρασίας, κυρίως κατά την έναρξη των διεργασιών,
- στην τιμή του pH,
- στον όγκο του υπό κομποστοποίηση οργανικού υλικού,
- στο μέσο μέγεθος των σωματιδίων που συνθέτουν το σωρό,
- στο πορώδες του σωρού και
- στην περιεκτικότητα του περιβάλλοντος των διεργασιών σε οξυγόνο.

Ο οικιακός κομποστοποιητής είναι σχεδιασμένος να δέχεται το οργανικό κλάσμα των αστικών απορριμμάτων και ειδικότερα, ποσότητες δ.α. που παράγονται καθημερινά σε κάθε κατοικία. Συνεπώς, η κομποστοποίηση δεν αφορά σε μίγμα διαφορετικών τύπων οργανικού υλικού, γεγονός που σημαίνει ότι, η τιμή του pH και του λόγου C:N λαμβάνονται 'de facto' κατά την έναρξη των διεργασιών και δεν τροποποιούνται με τεχνητά μέσα (ανάμιξη με άλλο τύπο οργανικού υλικού, εισαγωγή πρόσθετων υλικών για ρύθμιση του pH κ.ά.) προκειμένου να μεταβληθεί η ταχύτητα βιοαποδόμησης. Επιπλέον, καθώς δεν υφίσταται διάταξη τεμαχισμού των δ.α. κατά την είσοδό τους στο σύστημα, δεν μεταβάλλεται το μέσο μέγεθος των σωματιδίων που συγκροτούν το σωρό του οργανικού υλικού στο διαμέρισμα

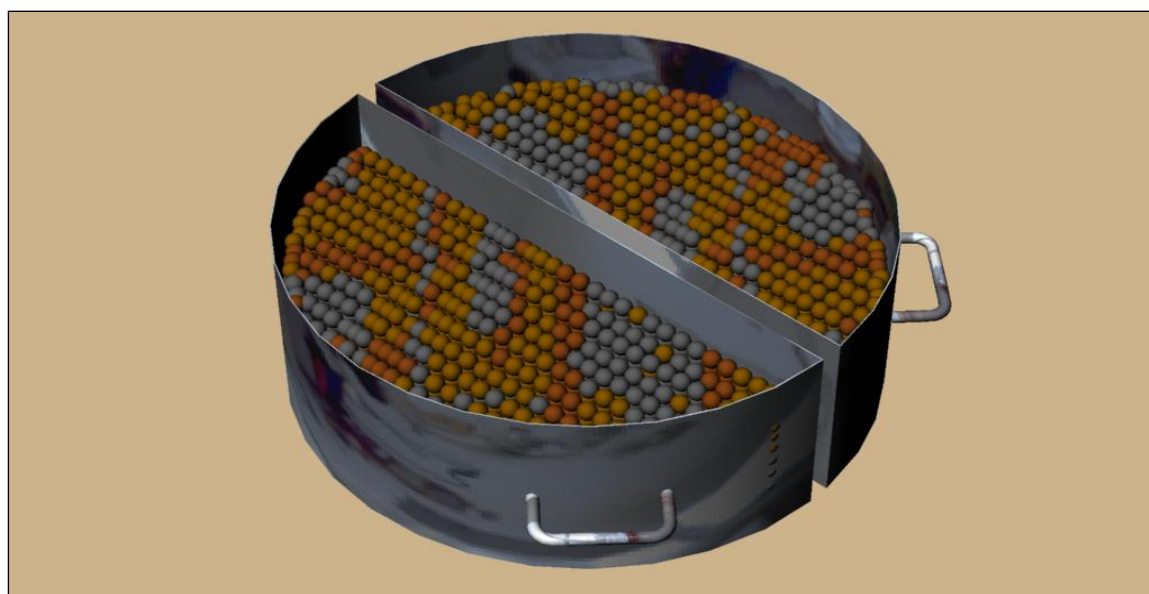
κομποστοποίησης. Με βάση τις επισημάνσεις αυτές, οι σχετικές διεργασίες θα εκτελούνται σε περιβάλλον που θα χαρακτηρίζεται από:

- τη δημιουργία πορώδους, επαρκών διαστάσεων, προκειμένου να εξασφαλίζεται η απρόσκοπτη διέλευση του αέρα, από και προς το εσωτερικό του σωρού, παρέχοντας τις απαιτούμενες ποσότητες οξυγόνου,
- τη συγκέντρωση όγκου δ.α. σε ποσότητες που ευνοούν την αποδοτική ανάπτυξη και δράση των μικροβιακών πληθυσμών και κατ' επέκταση, τη δημιουργία και συντήρηση υψηλών θερμοκρασιών στον πυρήνα των διεργασιών,
- την εξασφάλιση των επιθυμητών επιπέδων υγρασίας μέσω απαγωγής του πλεονάζοντος ύδατος από τον όγκο του υπό κομποστοποίηση οργανικού υλικού.

Παραλαβή κόμποστ

Οι δύο υποδοχείς, έχουν σχήμα ημικυλινδρικού στερεού και χωρητικότητα 14735 cm^3 , ή 14.735 l έκαστος. Συνεπώς, η μέγιστη ωφέλιμη χωρητικότητα του διαμερίσματος απόληψης είναι 29.47 l . Για το παράδειγμα χρήσης του συστήματος από τετραμελή οικογένεια, οι υποδοχείς αναμένεται να πληρωθούν στο σύνολο της χωρητικότητάς τους, εντός χρονικού διαστήματος που κυμαίνεται μεταξύ 55 και 65 ημερών. Ωστόσο, η εκκένωση των υποδοχέων συνίσταται να πραγματοποιείται κάθε 30 περίπου ημέρες. Κατά την παραλαβή του κόμποστ, οι δύο υποδοχείς εξέρχονται χειρονακτικά από τα ειδικά διαμορφωμένα ανοίγματα του κυλινδρικού περιβλήματος και εκκενώνεται το περιεχόμενό τους. Κατόπιν, επανατοποθετούνται στο εσωτερικό του θαλάμου προκειμένου να ξεκινήσει η διαδικασία 'νέας' πλήρωσης.

Στην εικόνα που ακολουθεί, φαίνονται οι δύο υποδοχείς πληρωμένοι με κόμποστ. Οι υποδοχείς βρίσκονται εκτός του συστήματος πριν τη φάση εκκένωσης του περιεχομένου τους.



Εικόνα 4.42 Υποδοχείς κόμποστ πλήρης περιεχομένου

Έπειτα από κάθε εκκένωση, το περιεχόμενο των υποδοχέων μπορεί να φυλάσσεται σε ειδικούς σάκους και να αφήνεται σε υπαίθριους χώρους (βεράντες, αυλές ή κήποι) για περαιτέρω ωρίμανση έτσι ώστε, το κόμποστ να αποκτήσει τις υψηλές ποιοτικές προδιαγραφές που το χαρακτηρίζουν.

Διαμέρισμα συλλογής στραγγισμάτων

Το διαμέρισμα συλλογής στραγγισμάτων αφορά στην κατώτατη περιοχή του οικιακού κομποστοποιητή. Ο όγκος του ορίζεται, παραπλεύρως από το κυλινδρικό περίβλημα, εκ των άνω, από τον πυθμένα των υποδοχέων και στο κάτω τμήμα, από την κυκλική βάση του θαλάμου. Η χωρητικότητα του διαμερίσματος είναι 19283 cm^3 ή 19.283 l .

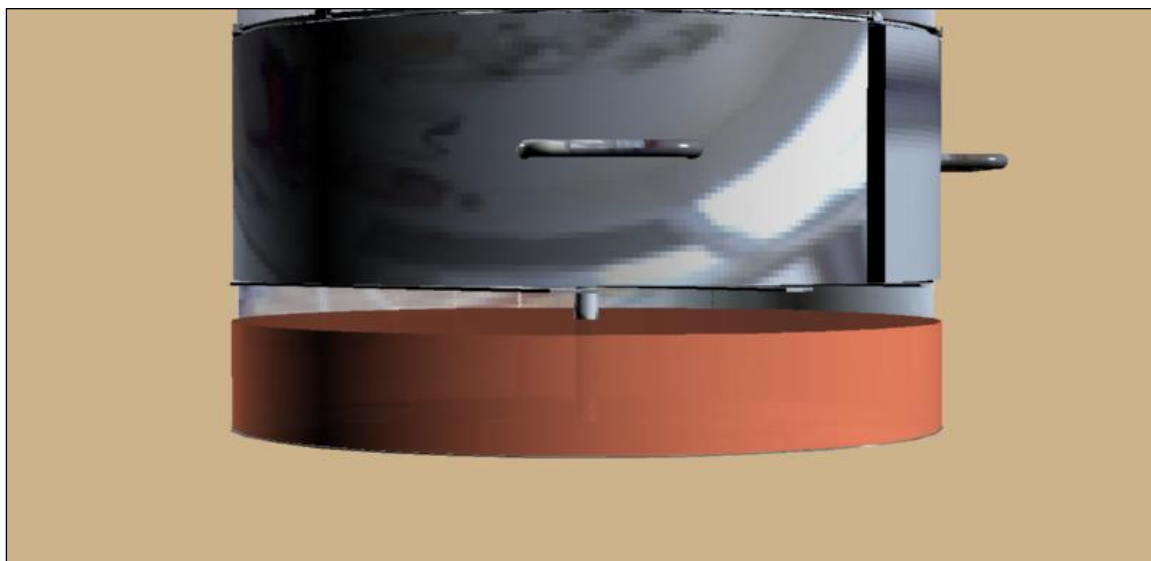
Η χρήση του τμήματος αυτού, αφορά στη συλλογή και προσωρινή αποθήκευση των διασταλλαζόντων υγρών του σωρού των δ.α., αλλά και στην ποσότητα των υδρατμών που με τη μορφή σταγονιδίων κατέρχονται από τα τοιχώματα του θαλάμου.

Τα δ.α., κατά την είσοδό τους στο σύστημα και τη συγκέντρωσή τους στο διαμέρισμα κομποστοποίησης, διαθέτουν κατά ένα μέρος ύλη που βρίσκεται σε υγρή φάση. Τα εν λόγω υγρά ορίζονται ως πρωτογενή στραγγίσματα καθώς, εγκαταλείπουν τη σωρό των δ.α. και κατέρχονται στο διαμέρισμα στραγγισμάτων, εντός χρονικού διαστήματος μικρότερο των τριών ωρών από τη στιγμή που ο δεδομένος όγκος δ.α. οδηγήθηκε από το διαμέρισμα τροφοδοσίας σε αυτό της κομποστοποίησης. Τα στραγγίσματα αυτά, διέρχονται μέσω της εσχάρας διαχωρισμού και εν συνεχεία, μέσω των οπών στους πυθμένες των υποδοχέων, καταλήγουν στο διαμέρισμα στραγγισμάτων. Η ποσότητα των πρωτογενών στραγγισμάτων αποτελεί μικρό ποσοστό μικρότερο συγκριτικά με το συνολικό όγκο των διασταλλαζόντων υγρών που συγκεντρώνονται στο διαμέρισμα αυτό.

Τα δευτερογενή στραγγίσματα, που αποτελούν την μεγάλη πλειοψηφία των συλλεγόμενων στραγγισμάτων, εκκρέουν από το σωρό των δ.α. κατά την εξέλιξη των διαδοχικών σταδίων της κομποστοποίησης. Κατά τις εργασίες αερόβιας αποδόμησης, οι μικροβιακοί πληθυσμοί διασπύουν τα οργανικά μακρομόρια σε απλούστερες οργανικές ενώσεις μικρότερου μοριακού βάρους. Από τις ενώσεις αυτές, ένα τμήμα τους διαφεύγει με τη μορφή αερίων (πτητικά στερεά), ενώ ένα άλλο τμήμα, εγκαταλείπει τον όγκο των δ.α. κατερχόμενο, με τη μορφή διασταλλαζόντων υγρών. Τα στραγγίσματα κατέρχονται λόγω βαρύτητας και δια μέσω της εσχάρας διαχωρισμού και των οπών στον πυθμένα των υποδοχέων, συγκεντρώνονται στο αντίστοιχο διαμέρισμα. Έχει παρατηρηθεί ότι, η ποσότητα των εκκρεόντων δευτερογενών στραγγισμάτων είναι ανάλογη των αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών κατά τις φάσεις ταχείας βιοαποδόμησης (μεσόφιλη και θερμόφιλη φάση). Δηλαδή, όσο πιο έντονη είναι η μικροβιακή δραστηριότητα, τόσο μεγαλύτερη ποσότητα στραγγισμάτων παράγεται.

Εκτός των στραγγισμάτων που εκκρέουν κατά τις φάσεις αερόβιας αποδόμησης, στο διαμέρισμα αυτό οδηγούνται κατερχόμενες και οι ποσότητες ύδατος, που προέρχονται από τη συμπύκνωση των παραγόμενων υδρατμών που εγκατέλειψαν το σωρό, λόγω της αναπτυσσόμενης θερμότητας στον πυρήνα των διεργασιών. Τα συμπυκνώματα αυτά επικάθονται στα 'ψυχρά' τοιχώματα του θαλάμου και κατέρχονται λόγω βαρύτητας στο διαμέρισμα στραγγισμάτων.

Στην ακόλουθη εικόνα, παριστάνεται η ποσότητα των συλλεγόμενων στραγγισμάτων στο αντίστοιχο διαμέρισμα του οικιακού κομποστοποιητή.



Εικόνα 4.43 Διαμέρισμα στραγγισμάτων κατά τη φάση μερικής πλήρωσης

4.2.9 Αναλυτικές τεχνικές προδιαγραφές του πρότυπου συστήματος

Μετά τον έλεγχο και την βελτίωση των επιμέρους τμημάτων που κατασκευάστηκαν, εξήχθη σαφής εικόνα σχετικά με τα χαρακτηριστικά που έπρεπε αυτά να έχουν έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η αυξημένη λειτουργικότητα και απόδοση του συνολικού πρότυπου συστήματος.

Μετά την οριστικοποίηση των επιμέρους τμημάτων, έγινε η κατασκευή του συστήματος, του οποίου η λειτουργία και συμπεριφορά επίσης ελέγχθησαν εργαστηριακά, έτσι ώστε να εξασφαλισθεί ότι αφενός μεν δεν υπήρχαν διαφοροποιήσεις ανάμεσα στα τεχνικά χαρακτηριστικά που προβλέπονταν από το σχεδιασμό και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του εξοπλισμού που κατασκευάστηκε και αφετέρου να ελεγχθεί στην πράξη η εφικτότητα των τεχνικών αυτών χαρακτηριστικών. Μετά τον τελικό εργαστηριακό επανέλεγχο του συστήματος, οριστικοποιήθηκαν τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος και ξεκίνησε η διαδικασία της μαζικής παραγωγής του.

Στη συνέχεια δίδονται οι τελικές τεχνικές προδιαγραφές και η διαστασιολόγηση του πρότυπου συστήματος, βάση των οποίων γίνεται η μαζική παραγωγή του.

4.3 Πειραματικά πρωτόκολλα

Στην ενότητα αυτή γίνεται περιγραφή των πειραματικών πρωτοκόλλων αναφορικά με (α) τη διεργασία της κομποστοποίησης σε σύστημα αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας βιοαποδομήσιμων οικιακών απορριμμάτων και (β) τον έλεγχο της ποιότητας του παραγόμενου κόμποστ.

4.3.1 Πειραματικό πρωτόκολλο διεργασίας κομποστοποίησης

Το πειραματικό πρωτόκολλο της κομποστοποίησης περιλαμβάνει τις διεργασίες και τις απαιτούμενες αναλύσεις οι οποίες πραγματοποιήθηκαν για τον έλεγχο της αποτελεσματικότητας της αερόβιας βιοαποδόμησης οργανικών οικιακών απορριμμάτων με τη χρήση του πρότυπου συστήματος κομποστοποίησης. Οι διεργασίες αυτές αφορούν στην ανάπτυξη δύο πειραματικών Σειρών, οι οποίες συνολικά αποτελούνται από εννέα πειραματικούς Κύκλους κατά τους οποίους έγινε ο έλεγχος και η παρακολούθηση της αερόβιας διεργασίας των αποβλήτων. Οι διεργασίες οι οποίες πραγματοποιήθηκαν είναι κοινές για κάθε πειραματικό κύκλο κομποστοποίησης και περιγράφονται παρακάτω.

4.3.1.1. Δειγματοληψία και ανάλυση των επιμέρους βιοαποδομήσιμων οικιακών απορριμμάτων που συνθέτουν το υλικό τροφοδοσίας του βιοαντιδραστήρα

Τα οργανικά απόβλητα που επιλέχθηκαν ως υλικά προς κομποστοποίηση αποτελούνται από οργανικά οικιακά απορρίμματα, τα οποία αντιπροσωπεύουν το μεγαλύτερο κλάσμα των παραγόμενων οικιακών απορριμμάτων και χρήζουν κατάλληλης επεξεργασίας. Στα οργανικά αυτά απόβλητα περιλαμβάνονται τρόφιμα πλούσια σε πρωτεΐνες (όσπρια), σε υδατάνθρακες (ψωμί, ρύζι) και σε κυτταρινούχες ενώσεις (λαχανικά και φρούτα).

Πράττοποιούνται αναλύσεις τόσο σε κάθε ένα από τα τρόφιμα αυτά μεμονομένα, όσο και μίγματα αυτών σε διαφορετικές αναλογίες. Για την ανάλυση των μιγμάτων πραγματοποιείται ανάμιξη διαφόρων δειγμάτων σε ένα. Το ενιαίο αναμεμιγμένο δείγμα χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των απαιτούμενων φυσικοχημικών παραμέτρων. Επομένως, από κάθε οργανικό υλικό συλλέγονται έξι αντιπροσωπευτικά δείγματα, με τη χρήση κατάλληλου εξοπλισμού, εκ των οποίων λαμβάνεται περίπου ισόβαρο μέρος για το σχηματισμό του τελικού δείγματος. Έπειτα από την ικανοποιητική ανάμιξη του τελικού δείγματος λαμβάνονταν τρία επί μέρους δείγματα στα οποία γίνεται ο προσδιορισμός των απαιτούμενων φυσικοχημικών παραμέτρων (Πίνακας 4.3) όπως περιγράφεται στην ενότητα 4.4.

4.3.1.2. Προεπεξεργασία και σύνθεση του υλικού τροφοδοσίας του βιοαντιδραστήρα

Το πρώτο στάδιο της προετοιμασίας του οργανικού υλικού τροφοδοσίας, μετά τη συλλογή του, περιλαμβάνει τον τεμαχισμό του, εάν αυτό χρειαστεί, σε κατάλληλο μέγεθος και την μετέπειτα ανάμειξή του σε διαφορετικές αναλογίες, ανάλογα με τη σύσταση του επιθυμητού, για κάθε πείραμα, αρχικού υποστρώματος. Εκτός του

οργανικού υλικού, ορυκτά όπως ο ζεόλιθος, ο βερμικουλίτης και ο περλίτης και άλλα πρόσθετα, όπως το πριονίδι και το ώριμο κόμποστ χρησιμοποιήθηκαν σε συγκεκριμένους πειραματικούς κύκλους κομποστοποίησης ως ανόργανα πρόσθετα για τη βελτίωση της βιολογικής διεργασίας αποδόμησης της οργανικής ουσίας, λόγω των φυσικών και χημικών τους ιδιοτήτων. Η επιλογή στη χρήση ζεόλιθου ως πρόσθετο υλικό έγκειται στις ιοντοεναλλακτικές του ιδιότητες για τη δέσμευση της αμμωνίας-αμμωνιακών κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης και την απομάκρυνση των βαρέων μετάλλων (εφόσον υπάρχουν στο υπόστρωμα). Επιπλέον, η χρήση του περλίτη και του βερμικουλίτη (σε συνδυασμό με το πριονίδι) δύναται να τροποποιήσει τις φυσικές ιδιότητες του υποστρώματος (π.χ. πορώδες) ενισχύοντας τη διεργασία της κομποστοποίησης με την αύξηση των αεροθυλάκων στο υπόστρωμα και την ευκολότερη διάχυση του αέρα, χωρίς παράλληλα να λαμβάνει μέρος στη βιοχημική διεργασία της κομποστοποίησης καθώς αποτελεί αδρανές υλικό.

Για τη σύνθεση του υλικού τροφοδοσίας του βιοαντιδραστήρα λαμβάνονται υπόψη τα αποτελέσματα των φυσικοχημικών αναλύσεων του υλικού τροφοδοσίας, στοχεύοντας στη διαμόρφωση κατάλληλων αρχικών συνθηκών στο υπόστρωμα. Η σύσταση του υποστρώματος επηρεάζει τις διεργασίες της κομποστοποίησης καθώς και το ρυθμό βιοαποδόμησης της οργανικής ουσίας για λόγους που οφείλονται τόσο στη χημική σύσταση του υποστρώματος όσο και στις φυσικές του ιδιότητες. Επειδή οι φυσικοχημικές ιδιότητες του υλικού τροφοδοσίας καθορίζουν εκ των προτέρων τις βιολογικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε ένα σύστημα κομποστοποίησης, κρίνεται σκόπιμο η ρύθμιση της σύνθεσης του αρχικού υποστρώματος καθώς και των ποσοτήτων πλήρωσης του βιοαντιδραστήρα σε κάθε πειραματικό κύκλο κομποστοποίησης, να γίνουν με βάση:

- την περιεκτικότητα του μίγματος σε θρεπτικά συστατικά ρυθμίζοντας την αναλογία άνθρακα αζώτου (C/N) του οργανικού μίγματος.
- την περιεκτικότητα του μίγματος σε υγρασία προκειμένου να εμπίπτει σε εύρος τιμών το οποίο ενισχύει την αερόβια βιοαποδόμηση των οργανικών αποβλήτων.
- τις φυσικές ιδιότητες του μίγματος για τη διαμόρφωση κατάλληλου πορώδους έτσι ώστε να διατηρούνται οι απαιτούμενες αερόβιες συνθήκες κατά την εξέλιξη των διεργασιών της κομποστοποίησης.
- τη διαθεσιμότητα των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων τη δεδομένη χρονική περίοδο.

4.3.1.3 Δειγματοληψία και ανάλυση του υποστρώματος

Καθόλη τη διάρκεια της κομποστοποίησης πραγματοποιήθηκε σύνθετη δειγματοληψία του υποστρώματος σε τακτά χρονικά διαστήματα, λαμβάνοντας δύο διαδοχικά δείγματα υποστρώματος από τρία διαφορετικά σημεία κατά μήκος του εσωτερικού του βιοαντιδραστήρα ύστερα από την ανάδευσή του. Η συλλογή δειγμάτων επιτυγχάνεται από τη θυρίδα τροφοδοσίας του βιοαντιδραστήρα με τη χρήση κατάλληλου εξοπλισμού, ώστε να λαμβάνονται αντιπροσωπευτικά δείγματα υποστρώματος τα οποία τοποθετούνται σε ξεχωριστούς πλαστικούς κάδους. Στη συνέχεια λαμβάνεται ισόβαρο μέρος από κάθε ένα από τα έξι δείγματα και

αναμιγνύονται διεξοδικά για τη διαμόρφωση ενός εννιαίου και ομογενοποιημένου τελικού δείγματος. Από το σύνθετο δείγμα λαμβάνονταν τρία επί μέρους δείγματα στα οποία γίνεται ο προσδιορισμός των εξεταζόμενων παραμέτρων (Πίνακας 4.2) όπως περιγράφεται στην ενότητα 4.4.

4.3.1.4 Παρουσίαση των πειραματικών Κύκλων

Στόχος των συγκεκριμένων πειραματικών Κύκλων αποτελεί η μελέτη και, μέσω αυτής, ο έλεγχος και η ρύθμιση της διεργασίας της κομποστοποίησης, σε πρότυπο αντιδραστήρα οικιακού τύπου, είτε επεμβαίνοντας στις αναλογίες C/N του αρχικού υποστρώματος, είτε με τη χρήση προσθέτων (ορυκτά – πριονίδι – ώριμο κόμποστ) , με αποτέλεσμα την βελτιστοποίηση της διεργασίας και εν τέλει την παραγωγή τελικού προϊόντος καλύτερων ιδιοτήτων.

Για την επίτευξη του στόχου της διατριβής πραγματοποιήθηκαν δύο Σειρές Πειραμάτων.

- **ΣΕΙΡΑ Α**

Η Σειρά Α αφορά σε πειράματα που πραγματοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των φυσικοχημικών ιδιοτήτων, του οργανικού άνθρακα, του ολικού αζώτου και του λόγου C/N σε μία μεγάλη γκάμα τροφίμων, αποτελούμενη από τρόφιμα πλούσια είτε σε πρωτεΐνες, είτε σε υδατάνθρακες, είτε σε κυτταρινούχες ενώσεις, καθώς και σε διαφορετικούς συνδυασμούς αυτών που αποτέλεσαν τα μετέπειτα αρχικά υποστρώματα των αντιδραστήρων.

Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν δύο Κύκλοι Πειραμάτων.

Στον Κύκλο 1 προσδιορίστηκαν πειραματικά σε τρόφιμα, που περιλαμβάνονται στις διατροφικές συνήθειες των ελληνικών νοικοκυριών, οι ακόλουθες παράμετροι:

Ποσοστό % υγρασίας
pH
Ποσοστό οργανικού άνθρακα
Ποσοστό ολικού αζώτου κατά Kjeldahl
Λόγος C/N

Οι ίδιες ακριβώς παράμετροι υπολογίστηκαν πειραματικά, σε αρκετά μίγματα των ανωτέρω τροφίμων, ώστε να επιλεγούν αυτά που αποτέλεσαν τα αρχικά υποστρώματα. Τα πειράματα αυτά αποτέλεσαν τον Κύκλο 2 της Σειράς Α.

- **ΣΕΙΡΑ Β**

Η Σειρά Β αφορά σε πειράματα που πραγματοποιήθηκαν για τον έλεγχο και τη ρύθμιση της διεργασίας της κομποστοποίησης και διακρίνεται σε τρεις επιμέρους Δράσεις.

- **ΔΡΑΣΗ Α**

Στη Δράση Α πραγματοποιήθηκε ένας Κύκλος πειραμάτων που στόχο είχε τον προσδιορισμό του χρόνου παραμονής του αντιδραστήρα κομποστοποίησης, και μιλώντας για χρόνο παραμονής του συγκεκριμένου αντιδραστήρα (batch), εννοούμε το χρόνο λειτουργίας, δηλαδή το χρόνο που απαιτείται για να ολοκληρωθεί η αντίδραση. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν τρεις αντιδραστήρες με αρχικό λόγο C/N στο υπόστρωμα 40 (C/N=40) και προσθήκη 10% κ.β. του αρχικού υποστρώματος πριονιδίου, ως πρόσθετο.

- **ΔΡΑΣΗ Β**

Σκοπός της Δράσης Β ήταν ο προσδιορισμός του βέλτιστου αρχικού λόγου C/N στο υπόστρωμα, καθώς και η μελέτη της χρήσης προσθέτων και ο προσδιορισμός του βέλτιστου ποσοστού %κ.β. των προσθέτων αυτών στο αρχικό υπόστρωμα. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν τέσσερις Κύκλοι πειραμάτων, σε καθένα από τους οποίους χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις αντιδραστήρες, εκτός από τον Κύκλο 1, όπου χρησιμοποιήθηκαν τρεις αντιδραστήρες. Τα πρόσθετα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν πριονίδι, ζεόλιθος, βερμικουλίτης, περλίτης και μίξεις αυτών σε συγκεκριμένες αναλογίες.

- ❖ **ΚΥΚΛΟΣ 1**

Στον Κύκλο1 χρησιμοποιήθηκαν τρεις αντιδραστήρες με αρχικό λόγο C/N στο υπόστρωμα 30 και χρήση προσθέτων σε ποσοστό 5% κ.β. επί της αρχικής μάζας υποστρώματος.

Αναλυτικά:

- Στον πρώτο αντιδραστήρα προστέθηκε πριονίδι ποσότητας ίσης με το 5% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας.
- Στον δεύτερο αντιδραστήρα προστέθηκε πριονίδι ποσότητας ίσης με το 5% κατά βάρος της αρχικής μάζας, αλλά και ζεόλιθος ποσότητας ίσης με το 5% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας.
- Στον τρίτο αντιδραστήρα προστέθηκε πριονίδι ποσότητας ίσης με το 5% κατά βάρος της αρχικής μάζας, αλλά και βερμικουλίτης ποσότητας ίσης με το 5% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας.

❖ ΚΥΚΛΟΣ 2

Στον Κύκλο2 χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις αντιδραστήρες με αρχικό λόγο C/N στο υπόστρωμα 20 και χρήση προσθέτων σε ποσοστό 10% κ.β. επί της αρχικής μάζας υποστρώματος.

Αναλυτικά:

- Στον πρώτο αντιδραστήρα προστέθηκε πριονίδι ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας.
- Στον δεύτερο αντιδραστήρα προστέθηκε πριονίδι ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας, αλλά και ζεόλιθος ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας.
- Στον τρίτο αντιδραστήρα προστέθηκε πριονίδι ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας, αλλά και βερμικουλίτης ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας.
- Στον τέταρτο αντιδραστήρα προστέθηκε περλίτης ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας.

❖ ΚΥΚΛΟΣ 3

Στον Κύκλο3 χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις αντιδραστήρες με αρχικό λόγο C/N στο υπόστρωμα 30 και χρήση προσθέτων σε ποσοστό 10% κ.β. επί της αρχικής μάζας υποστρώματος.

Αναλυτικά:

- Στον πρώτο αντιδραστήρα προστέθηκε πριονίδι ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας.
- Στον δεύτερο αντιδραστήρα προστέθηκε πριονίδι ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας, αλλά και ζεόλιθος ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας.
- Στον τρίτο αντιδραστήρα προστέθηκε πριονίδι ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας, αλλά και βερμικουλίτης ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας.
- Στον τέταρτο αντιδραστήρα προστέθηκε περλίτης ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας.

❖ ΚΥΚΛΟΣ 4

Στον Κύκλο4 χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις αντιδραστήρες με αρχικό λόγο C/N στο υπόστρωμα 40 και χρήση προσθέτων σε ποσοστό 10% κ.β. επί της αρχικής μάζας υποστρώματος.

Αναλυτικά:

- Στον πρώτο αντιδραστήρα προστέθηκε πριονίδι ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας.
- Στον δεύτερο αντιδραστήρα προστέθηκε πριονίδι ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας, αλλά και ζεόλιθος ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας.

- Στον τρίτο αντιδραστήρα προστέθηκε πριονίδι ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας, αλλά και βερμικουλίτης ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας.
- Στον τέταρτο αντιδραστήρα προστέθηκε περλίτης ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας.

➤ ΔΡΑΣΗ Γ

Με βάση τα συμπεράσματα των προηγούμενων Δράσεων σχεδιάστηκε η Δράση Γ με σκοπό την περαιτέρω βελτιστοποίηση της διεργασίας της κομποστοποίησης με τη χρήση προσθέτων σε διαφορετικές αναλογίες και ποσοστά επί του αρχικού υποστρώματος.

Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν τέσσερις πειραματικοί Κύκλοι. Στον πρώτο εξ' αυτών χρησιμοποιήθηκαν τρεις αντιδραστήρες, στον δεύτερο κύκλο δύο αντιδραστήρες (και πραγματοποιήθηκε σύγκριση με αντιδραστήρα από τον πρώτο κύκλο), ενώ σε καθένα από τους επόμενους δύο κύκλους χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις αντιδραστήρες. Τα πρόσθετα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν πριονίδι, ζεόλιθος, βερμικουλίτης, περλίτης και ώριμο κόμποστ σε διαφορετικές αναλογίες.

❖ ΚΥΚΛΟΣ 1

Ο Κύκλος αυτός είχε ως στόχο να μελετηθεί περαιτέρω το ρόλο του περλίτη ως πρόσθετο (είτε μεμονωμένα είτε σε μείξη με άλλα πρόσθετα) στη διεργασία της κομποστοποίησης. Ο αρχικός λόγος υποστρώματος C/N ήταν 30.

Αναλυτικά:

- Στον πρώτο αντιδραστήρα προστέθηκε περλίτης ποσότητας ίσης με το 10% της συνολικής μάζας τροφοδοσίας.
- Στον δεύτερο αντιδραστήρα προστέθηκε περλίτης ποσότητας ίσης με το 5% της συνολικής μάζας της τροφοδοσίας.
- Στον τρίτο αντιδραστήρα προστέθηκε περλίτης ποσότητας ίσης με το 5% της συνολικής μάζας της τροφοδοσίας, αλλά και πριονίδι ποσότητας ίσης με το 5% της συνολικής μάζας της τροφοδοσίας.

❖ ΚΥΚΛΟΣ 2

Στον Κύκλο 2 χρησιμοποιήθηκαν δύο αντιδραστήρες, με στόχο να μελετηθεί η περαιτέρω βελτίωση της διεργασίας με τη χρήση συνδυασμού ορυκτών ως πρόσθετα υποστρώματος και πραγματοποιήθηκε σύγκριση με αντιδραστήρα του Κύκλου 1. Ο αρχικός λόγος C/N ήταν 30.

Αναλυτικά:

- Στον πρώτο αντιδραστήρα προστέθηκε περλίτης ποσότητας ίσης με το 10% της συνολικής μάζας τροφοδοσίας.

- Στο δεύτερο αντιδραστήρα προστέθηκε περλίτης ποσότητας ίσης με το 10% της συνολικής μάζας της αρχικής τροφοδοσίας, καθώς και ζεόλιθος ποσότητας ίσης με το 10% της συνολικής μάζας της αρχικής τροφοδοσίας.
- Στον τρίτο αντιδραστήρα προστέθηκε περλίτης ποσότητας ίσης με το 10% της συνολικής μάζας της αρχικής τροφοδοσίας, καθώς και βερμικουλίτης ποσότητας ίσης με το 10% της συνολικής μάζας της αρχικής τροφοδοσίας.

❖ ΚΥΚΛΟΣ 3

Ο Κύκλος αυτός είχε ως στόχο να μελετήσει το ρόλο του ώριμου κόμποστ ως πρόσθετο (είτε μεμονωμένα είτε σε μείξη με άλλα πρόσθετα) στη διεργασία της κομποστοποίησης. Ο αρχικός λόγος υποστρώματος C/N ήταν 30.

- Στον πρώτο αντιδραστήρα προστέθηκε περλίτης ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας, καθώς και 5% ώριμο κόμποστ ίδιας αναλογίας C/N που περιείχε 10% επιπρόσθετα περλίτη. Άρα σύνολο 15%.
- Στο δεύτερο αντιδραστήρα προστέθηκε βερμικουλίτης ποσότητας ίσης με το 5% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας, πριονίδι 5% καθώς και 5% ώριμο κόμποστ ίδιας αναλογίας C/N που περιείχε επιπρόσθετα βερμικουλίτη σε ποσοστό 10% και πριονίδι 10% Άρα σύνολο 15%.
- Στον τρίτο αντιδραστήρα προστέθηκε πριονίδι ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας, καθώς και 5% ώριμο κόμποστ ίδιας αναλογίας C/N που περιείχε 10% επιπρόσθετα πριονίδι. Άρα σύνολο 15%.
- Στον τέταρτο αντιδραστήρα προστέθηκε ζεόλιθος ποσότητας ίσης με το 5% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας, πριονίδι 5% καθώς και 5% ώριμο κόμποστ ίδιας αναλογίας C/N που περιείχε 10% επιπρόσθετα ζεόλιθο και 10% πριονίδι. Άρα σύνολο 15%.

❖ ΚΥΚΛΟΣ 4

Ο Κύκλος αυτός είχε ως στόχο να μελετήσει το ρόλο του ώριμου κόμποστ ως πρόσθετο (είτε μεμονωμένα είτε σε μείξη με άλλα πρόσθετα) στη διεργασία της κομποστοποίησης. Ο αρχικός λόγος υποστρώματος C/N ήταν 40.

- Στον πρώτο αντιδραστήρα προστέθηκε περλίτης ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας, καθώς και 5% ώριμο κόμποστ ίδιας αναλογίας C/N που περιείχε 10% επιπρόσθετα περλίτη. Άρα σύνολο 15%.
- Στο δεύτερο αντιδραστήρα προστέθηκε βερμικουλίτης ποσότητας ίσης με το 5% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας, πριονίδι 5% καθώς και 5% ώριμο κόμποστ ίδιας αναλογίας C/N που περιείχε επιπρόσθετα βερμικουλίτη σε ποσοστό 5% και πριονίδι 5% Άρα σύνολο 15%.

- Στον τρίτο αντιδραστήρα προστέθηκε πριονίδι ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας, καθώς και 5% ώριμο κόμποστ ίδιας αναλογίας C/N που περιείχε 10% επιπρόσθετα πριονίδι. Άρα σύνολο 15%.
- Στον τέταρτο αντιδραστήρα προστέθηκε ζεόλιθος ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας, καθώς και 5% ώριμο κόμποστ ίδιας αναλογίας C/N που περιείχε 10% επιπρόσθετα ζεόλιθο. Άρα σύνολο 15%.

Σε όλους τους πειραματικούς κύκλους οι παράμετροι που μελετήθηκαν ήταν:

- Θερμοκρασία
- Υγρασία
- Οξυγόνο
- pH
- Ηλεκτρική αγωγιμότητα
- Πτητικά στερεά (VS)
- Ολικός οργανικός άνθρακας (TOC)
- Οργανική ύλη
- Ολικό άζωτο κατά Kheldahl (TKN)
- Νιτρικά ($NO_3^- - N$)
- Αμμωνιακά ($NH_4^+ - N$)
- Αναλογία C/N

Στο σημείο αυτό να τονιστεί πως δεν παρουσιάζονται διαγράμματα με το ποσοστό του οξυγόνου, καθώς αυτό παρέμενε σταθερό σε όλους τους πειραματικούς κύκλους και ίσο με 20-21%, καθόλη τη διάρκεια της διεργασίας. Στους πειραματικούς κύκλους που χρησιμοποιήθηκε σκέτο πριονίδι ως πρόσθετο στο υπόστρωμα, το οξυγόνο είχε επίσης σταθερό ποσοστό, αλλά πολύ μικρότερο (11%).

4.3.2 Πειραματικό πρωτόκολλο παραγόμενου κόμποστ

Η εκκένωση του βιοαντιδραστήρα πραγματοποιείται από τα ειδικά σχεδιασμένα συρτάρια συλλογής, στη βάση του βιοαντιδραστήρα. Το παραγόμενο κόμποστ απομακρύνεται χειρωνακτικά και τοποθετείται σε κατάλληλη διάταξη τύπου «σειραδιών» σε εξωτερικό στεγαζόμενο χώρο για την περαιτέρω ωρίμανση του προϊόντος με καθημερινή χειρωνακτική αναμόχλευσή του για ένα μήνα. Στο τέλος της διάρκειας ωρίμανσης πραγματοποιείται σύνθετη δειγματοληψία στο τελικό προϊόν και στη συνέχεια αποθηκεύεται προκειμένου να χρησιμοποιηθεί ως πρόσθετο υλικό πλήρωσης νέου βιοαντιδραστήρα. Πραγματοποιείται συλλογή έξι αντιπροσωπευτικών δειγμάτων κατά μήκος και κατά ύψος του σχηματιζόμενου σειραδιού. Στη συνέχεια λαμβάνεται ισόβαρο μέρος από κάθε ένα από τα έξι δείγματα και γίνεται ανάμιξη για τη διαμόρφωση ενός εννιαίου τελικού δείγματος. Από το σύνθετο δείγμα λαμβάνονται τρία επί μέρους δείγματα στα οποία γίνεται ο προσδιορισμός των εξεταζόμενων φυσικοχημικών και βιολογικών παραμέτρων (Πίνακας 4.3) όπως περιγράφεται στην ενότητα 4.4.

Οι αναλύσεις που πραγματοποιούνται στη φάση αυτή αποτελούν την Τρίτη Σειρά πειραμάτων.

Η Σειρά αυτή (Σειρά Γ) αφορά σε πειράματα προσδιορισμού της ποιότητας του τελικού προϊόντος. Πραγματοποιήθηκαν 2 Κύκλοι πειραμάτων. Ένας Κύκλος αμέσως μετά το πέρας της διεργασίας και την αφαίρεση του κόμποστ από τους αντιδραστήρες και ένας δεύτερος Κύκλος μετά το πέρας 30 ημερών και την ωρίμανση του τελικού προϊόντος.

Όλες οι παράμετροι που μελετήθηκαν σε όλους τους πειραματικούς κύκλους, στο υλικό τροφοδοσίας, στο υπόστρωμα και στο τελικό προϊόν παρατίθενται στον πίνακα 4.3 που ακολουθεί.

4.4 Μέθοδοι ανάλυσης

Οι μέθοδοι ανάλυσης περιλαμβάνουν μια σειρά φυσικών, χημικών και βιολογικών παραμέτρων οι οποίες εξετάστηκαν σε δείγματα που συλλέχθηκαν από (α) το μίγμα των οργανικών αποβλήτων το οποίο συνέθετε το υλικό τροφοδοσίας του βιοαντιδραστήρα (β) το υλικό εντός των αντιδραστήρων κατά την εξέλιξη της διεργασίας (γ) το τελικό προϊόν (κόμποστ). Το σύνολο των παραμέτρων που εξετάστηκαν για κάθε ένα από τα προαναφερόμενα δείγματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3. Όλες οι αναλύσεις επαναλήφθηκαν τουλάχιστον τρεις φορές για κάθε εξεταζόμενη παράμετρο και λαμβάνεται η μέση τιμή αυτών των μετρήσεων.

Πίνακας 4.3 Σύνολο φυσικοχημικών και βιολογικών παραμέτρων οι οποίες εξετάστηκαν στα διαφορετικά δείγματα

Παράμετρος	Υλικό τροφοδοσίας		Υπόστρωμα		Τελικό προϊόν	
	✓		✓		✓	
Θερμοκρασία			✓	°C	✓	°C
Υγρασία	✓	% wb	✓	% wb	✓	% wb
Αγωγιμότητα		% wb	✓	% wb	✓	% wb
Οξυγόνο			✓	% v/v	✓	% v/v
pH	✓		✓		✓	
Πτητικά Στερεά			✓	% dm	✓	% dm
TOC	✓	% dm	✓	% dm	✓	% dm
N-TKN	✓	% dm	✓	% dm	✓	% dm
NH ₄ ⁺			✓	mg kg ⁻¹	✓	mg kg ⁻¹
NO ₃ ⁻			✓	mg kg ⁻¹	✓	mg kg ⁻¹
C/N	✓		✓		✓	
K - K ₂ O		% dm			✓	% dm
Ca - CaO		% dm			✓	% dm
Mg - MgO		% dm			✓	% dm
Φυτοτοξικότητα					✓	% Δ.Β.

4.4.1 Προσδιορισμός θερμοκρασίας

Για την καταγραφή της θερμοκρασίας των κάδων χρησιμοποιήθηκε ψηφιακό θερμόμετρο, και πραγματοποιούνταν μετρήσεις σε διάφορα σημεία του αντιδραστήρα.



Εικόνα 4.44 Ψηφιακό θερμόμετρο

4.4.2 Προσδιορισμός υγρασίας

Σε κατάλληλες κάψες λαμβάνεται το δείγμα και ζυγίζεται. Τα δείγματα τοποθετούνται σε φούρνο σε θερμοκρασία 105°C για 12h. Η υγρασία υπολογίζεται από τη διαφορά μάζας πριν και μετά την ξήρανση στους 105°C.

Το επί τοις εκατό (%) ποσοστό υγρασίας του δείγματος δίνεται από το λόγο της παραπάνω διαφοράς προς το αρχικό βάρος του δείγματος.

$$\frac{(M_k + M_{c,1}) - (M_k + M_{c,2})}{M_{c,1}} * \%$$

Όπου:

M_k : η μάζα της κάψας (g).

$M_{c,1}$: αρχική μάζα του δείγματος πριν την ξήρανση (g).

$M_{c,2}$: η τελική μάζα δείγματος μετά από ξήρανση στους 105°C (g).



Εικόνα 4.45 Φούρνος ξήρανσης (Μέτρηση υγρασίας)

4.4.3 Προσδιορισμός pH

Για τη μέτρηση του pH, 10 g δείγματος αναδεύονται σε ποτήρι ζέσεως των 100 ml για 30 λεπτά με προσθήκη 50 ml απιονισμένου νερού. Ακολουθεί μέτρηση με χρήση pH – μέτρου (μοντέλο METTLER TOLEDO MPC227).



Εικόνα 4.46 Μετρητής pH

4.4.4 Προσδιορισμός ηλεκτρικής αγωγιμότητας

Για τη μέτρηση της αγωγιμότητας, 10 g δείγματος αναδεύονται σε ποτήρι ζέσεως των 100 ml για 30 λεπτά με προσθήκη 50 ml απιονισμένου νερού. Ακολουθεί φυγοκέντρηση του διαλύματος στις 3000 στροφές / λεπτό για 10 λεπτά και διήθηση υπό κενό. Η αγωγιμότητα του διαλύματος προσδιορίζεται με αγωγιμόμετρο (μοντέλο METTLER TOLEDO MPC227). Το εν λόγω όργανο φαίνεται στην εικόνα 4.46.

4.4.5 Προσδιορισμός οξυγόνου

Η μετρήση της ποσοστιαίας περιεκτικότητας σε οξυγόνο πραγματοποιείται με τη χρήση φορητού οξυγονόμετρου (Umwelt Elektronik CM 37) το στέλεχος του οποίου βυθίζεται στο υπόστρωμα σε τρία σημεία κατά μήκος του βιοαντιδραστήρα. Επιπλέον, η μέτρηση της περιεκτικότητας σε οξυγόνο μετράται και στο τέλος της διάρκειας ωρίμανσης του κόμποστ σε διαφορετικά σημεία κατά μήκος των σχηματιζόμενων σειραδιών.

4.4.6 Προσδιορισμός πτητικών στερεών (VS)

Δείγμα στο οποίο έχει προηγηθεί ξήρανση στους 105°C λιοτριβείται και ζυγίζεται περίπου 1 g σε πορσελάνινες κάψες. Το δείγμα ξηραίνεται στους 550°C για 20 λεπτά. Τα πτητικά στερεά υπολογίζονται από τη διαφορά μάζας πριν και μετά την ξήρανση στους 550°C. Το επί τοις εκατό (%) ποσοστό πτητικών στερεών του δείγματος δίνεται από το λόγο της παραπάνω διαφοράς προς το αρχικό βάρος του δείγματος και συγκεκριμένα:

$$\frac{(M_k + M_{c,1}) - (M_k + M_{c,2})}{M_{c,1}} * \%$$

Όπου:

M_k : η μάζα της κάψας (g).

$M_{c,1}$: αρχική μάζα του δείγματος πριν την ξήρανση (g).

$M_{c,2}$: η τελική μάζα δείγματος μετά από ξήρανση στους 550°C (g) (Adani et al., 2000).



Εικόνα 4.47 Φούρνος ξήρανσης (Μέτρηση πτητικών)

4.4.7 Προσδιορισμός ολικού οργανικού άνθρακα (TOC)

Δείγμα στο οποίο έχει προηγηθεί ξήρανση στους 105°C λιотριβείται με grinder και ζυγίζονται με ακρίβεια 100mg τα οποία χωρίζονται ισόποσα στις ειδικές κάψες από πορσελάνη. Στη συνέχεια οι κάψες τοποθετούνται στον ειδικό φούρνο (Solid Sample Module SSM 5000A) όπου το δείγμα θερμαίνεται στους 900°C . Στη θερμοκρασία αυτή γίνεται καύση του οργανικού άνθρακα και τα καυσαέρια αυτής οδηγούνται στην κεντρική μονάδα TOCV_{CSH} . Στη μονάδα αυτή υπολογίζεται η μάζα του οργανικού άνθρακα (mg) από το CO_2 που παράγεται κατά την καύση. Το % ποσοστό του οργανικού άνθρακα δίνεται από τον εξής τύπο:

$$\%TOC = \frac{\left(\frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2}\right)}{2} * 100$$

Όπου:

m_1 : η μετρούμενη μάζα του οργανικού άνθρακα του πρώτου δείγματος (mg)

m_2 : η μετρούμενη μάζα του οργανικού άνθρακα του δεύτερου δείγματος (mg)

M_1 : η αρχική μάζα του πρώτου δείγματος (mg).

M_2 : η αρχική μάζα του δεύτερου δείγματος (mg).



Εικόνα 4.48 Το σύστημα υπολογισμού ολικού οργανικού άνθρακα



Εικόνα 4.49
Κεντρική μονάδα TOCV_{CSH}



Εικόνα 4.50 Solid Sample
Module SSM 5000A



Εικόνα 4.51
Πορσελάνινες κάψες

4.4.8 Προσδιορισμός ολικού αζώτου κατά Kjeldahl (TKN)

Η αρχή της μεθόδου είναι η καύση του δείγματος με περίσσεια πυκνού θειικού οξέος παρουσία καταλυτών (θειικό άλας χαλκού $CuSO_4$ και σελήνιο Se). Από το όξινο θειικό αμμώνιο που σχηματίζεται ελευθερώνεται αμμωνία, σε αλκαλικό περιβάλλον, η οποία αποστάζει και δεσμεύεται σε περίσσεια διαλύματος βορικού οξέος, όπου και προσδιορίζεται.

Δείγμα στο οποίο έχει προηγηθεί ξήρανση στους $105^{\circ}C$ λιωτριβείται και ζυγίζονται $1,5\ g$. Το δείγμα τοποθετείται σε ειδικό σωλήνα χώνευσης και στη συνέχεια προστίθενται ταμπλέτες $5\ g$ που περιέχουν τους προαναφερθέντες καταλύτες και $20\ ml$ πυκνού θειικού οξέος (H_2SO_4 98%). Ο σωλήνας με το περιεχόμενό του τοποθετούνται στην ειδική συσκευή χώνευσης KJELDATHERM της εταιρίας Gerhardt που εικονίζεται παρακάτω.



Εικόνα 4.52 Σωλήνας χώνευσης



Εικόνα 4.53 Συσσκευή KJELDATHERM

Μέσω του ρυθμιστή θερμοκρασίας ο σωλήνας θερμαίνεται, ήπια αρχικά, μέχρι να αρχίσει ο αφρισμός και στη συνέχεια ακολουθεί έντονη θέρμανση για περίπου μία ώρα στους 100 °C. Η πλήρης χημική διάσπαση έχει επιτευχθεί όταν το διάλυμα γίνει διαυγές. Το διάλυμα αφήνεται να ψυχθεί, μέσα στο σωλήνα, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Ο σωλήνας, στη συνέχεια, προσαρμόζεται στην ειδική συσκευή απόσταξης Vapodest 30s της εταιρίας Gerhardt.



Εικόνα 4.54 Συσσκευή απόσταξης Vapodest 30s

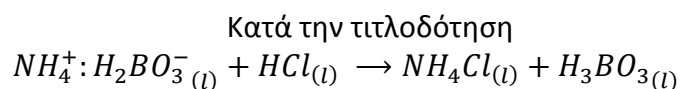
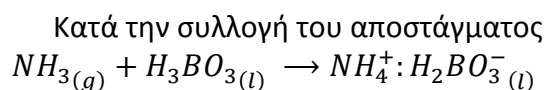
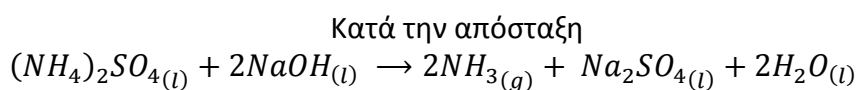
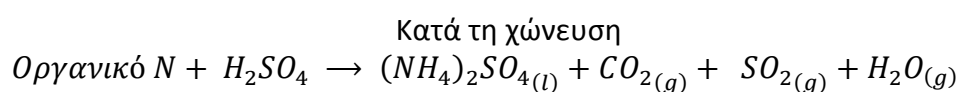
Για τη συλλογή του αποστάγματος χρησιμοποιείται κωνική φιάλη των 250 ml μέσα στην οποία έχουν προστεθεί 50 ml βορικού οξέος H_3BO_3 2% w/v. Η συσκευή απόσταξης, μέσω ρυθμιζόμενου προγράμματος διοχετεύει περίσσεια διαλύματος καυστικού νατρίου $NaOH$ 32% w/v και απιονισμένου νερού. Κατά τη διάρκεια της ανάμειξης του θεικού αμμωνίου $(NH_4)_2SO_4$ με το καυστικό νάτριο $NaOH$, απελευθερώνεται αέρια αμμωνία NH_3 η οποία με τη διαδικασία της απόσταξης παγιδεύεται από το βορικό οξύ H_3BO_3 . Στη συνέχεια γίνεται τιτροδότηση με πρότυπο διάλυμα HCl 0,1N. Χρησιμοποιούνται 3-5 σταγόνες από μεικτό

προπαρασκευασμένο δείκτη που περιέχει ερυθρό του μεθυλίου και μπλε του μεθυλενίου. Η τιτλοδότηση ολοκληρώνεται μόλις παρατηρηθεί αλλαγή του χρώματος, από magenta σε ανοιχτό πράσινο. Παράλληλα εκτελείται και λευκός προσδιορισμός.



Εικόνα 4.55 Η αλλαγή χρώματος κατά την τιτλοδότηση

Οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά την χώνευση, την απόσταξη και την τιτλοδότηση παρατίθενται αναλυτικά παρακάτω.



Η επί τις εκατό περιεκτικότητα του δείγματος σε ολικό άζωτο κατά Kjeldahl υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\%TKN = \frac{1,4007 * c * (V - V_b)}{m}$$

Όπου:

c : η συγκέντρωση του διαλύματος του υδροχλωρικού οξέος HCl που χρησιμοποιείται για την τιτλοδότηση. Αξίζει να τονίσουμε πως η συγκέντρωση του υδροχλωρικού οξέος HCl είναι ίση με την κανονικότητά του, και για την παραπάνω πειραματική διαδικασία ίση με $0,1 \text{ mol/lit}$.

V : ο όγκος του διαλύματος υδροχλωρικού οξέος HCl που χρησιμοποιείται στην τιτλοδότηση (ml).

V_b : ο όγκος του διαλύματος υδροχλωρικού οξέος HCl που χρησιμοποιείται στον λευκό προσδιορισμό (ml).

m : η αρχική μάζα του δείγματος (g).

4.4.8 Προσδιορισμός νιτρικών

Στον υπολογισμό του ολικού αζώτου κατά Kjeldahl (TKN) μετράται το σύνολο του οργανικά δεσμευμένου αζώτου, του αζώτου σε μορφή αμμωνίας NH_3 και του αζώτου σε μορφή αμμωνιακών NH_4^+ . Για να προσδιοριστεί η ποσότητα των νιτρικών NO_3^- στο δείγμα, ακολουθούμε τη μέθοδο Kjeldahl με τη διαφορά ότι στο αρχικά προσθέτουμε και μια μικρή ποσότητα, κράματος Devarda. Το κράμα Devarda αποτελείται από τρία μέταλλα στις παρακάτω αναλογίες:

Αλουμίνιο	Al (44% – 46%)
Χαλκός	Cu (49% – 51%)
Ψευδάργυρος	Zn (4% – 6%)

Δείγμα στο οποίο έχει προηγηθεί ξήρανση στους $105^\circ C$ λιотριβείται και ζυγίζονται $1,5 \text{ g}$. Το δείγμα τοποθετείται σε ειδικό σωλήνα χώνευσης και στη συνέχεια προστίθενται ταμπλέτες 5 g που περιέχουν τους καταλύτες, (θειικό άλας χαλκού $CuSO_4$ και σελήνιο Se), και 20 ml πυκνού θειικού οξέος (H_2SO_4 98%). Εν συνεχεία προσθέτουμε περίπου $0,2 - 0,3 \text{ g}$ κράματος Devarda. Το κράμα Devarda, κατά τη διάρκεια της χώνευσης, μετατρέπει τα νιτρικά ανιόντα NO_3^- σε αμμωνία NH_3 . Ο σωλήνας με το περιεχόμενό του τοποθετούνται στην ειδική συσκευή χώνευσης KJELDATHERM.

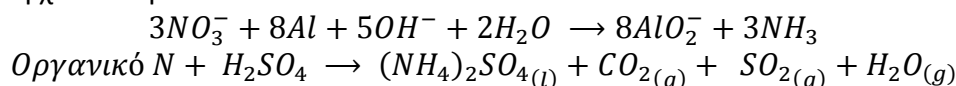
Μέσω του ρυθμιστή θερμοκρασίας ο σωλήνας θερμαίνεται, ήπια αρχικά, μέχρι να αρχίσει ο αφρισμός και στη συνέχεια ακολουθεί έντονη θέρμανση για περίπου μία ώρα στους $100^\circ C$. Η πλήρης χημική διάσπαση έχει επιτευχθεί όταν το διάλυμα γίνει διαυγές. Το διάλυμα αφήνεται να ψυχθεί, μέσα στο σωλήνα, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Ο σωλήνας, στη συνέχεια, προσαρμόζεται στην ειδική συσκευή απόσταξης Varodest 30s. Για τη συλλογή του αποστάγματος χρησιμοποιείται κωνική φιάλη των 250 ml μέσα στην οποία έχουν προστεθεί 50 ml βορικού οξέος H_3BO_3 2% w/v . Η συσκευή απόσταξης, μέσω ρυθμιζόμενου προγράμματος διοχετεύει περίσσεια διαλύματος καυστικού νατρίου $NaOH$ 32% w/v και απιονισμένου νερού. Κατά τη διάρκεια της ανάμειξης του θειικού αμμωνίου $(NH_4)_2SO_4$ με το καυστικό νάτριο $NaOH$, απελευθερώνεται αέρια αμμωνία NH_3 η οποία με τη διαδικασία της απόσταξης παγιδεύεται από το βορικό οξύ H_3BO_3 . Στη συνέχεια γίνεται

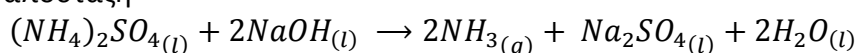
τιτλοδότηση με πρότυπο διάλυμα HCl 0,1N. Χρησιμοποιούνται 3-5 σταγόνες από μεικτό προπαρασκευασμένο δείκτη που περιέχει ερυθρό του μεθυλίου και μπλε του μεθυλενίου. Η τιτλοδότηση ολοκληρώνεται μόλις παρατηρηθεί αλλαγή του χρώματος, από magenta σε ανοιχτό πράσινο. Παράλληλα εκτελείται και λευκός προσδιορισμός.

Οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά την χώνευση, την απόσταξη και την τιτλοδότηση παρατίθενται αναλυτικά παρακάτω.

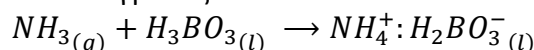
Κατά τη χώνευση



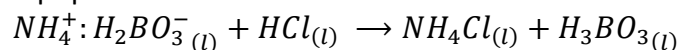
Κατά την απόσταξη



Κατά την συλλογή του αποστάγματος



Κατά την τιτλοδότηση



Η επί τις εκατό περιεκτικότητα του δείγματος σε ολικό άζωτο υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\%N = \frac{1,4007 * c * (V - V_b)}{m}$$

Όπου:

c : η συγκέντρωση του διαλύματος του υδροχλωρικού οξέος HCl που χρησιμοποιείται για την τιτλοδότηση. Αξίζει να τονίσουμε πως η συγκέντρωση του υδροχλωρικού οξέος HCl είναι ίση με την κανονικότητά του, και για την παραπάνω πειραματική διαδικασία ίση με 0,1 mol/lit.

V : ο όγκος του διαλύματος υδροχλωρικού οξέος HCl που χρησιμοποιείται στην τιτλοδότηση (ml).

V_b : ο όγκος του διαλύματος υδροχλωρικού οξέος HCl που χρησιμοποιείται στον λευκό προσδιορισμό (ml).

m : η αρχική μάζα του δείγματος (g).

Τέλος η επί τις εκατό περιεκτικότητα του δείγματος σε νιτρικά NO_3^- υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\%NO_3^- = \%N - \%TKN.$$

4.4.10 Προσδιορισμός αμμωνιακών

Για τη συγκεκριμένη μέθοδο υπολογισμού αμμωνιακών χρησιμοποιούνται τα παρακάτω αντιδραστήρια:

- Διάλυμα βορικού οξέος H_3BO_3 2% w/v
- 2-4 σταγόνες από μεικτό προπαρασκευασμένο δείκτη που περιέχει ερυθρό του μεθυλίου και μπλε του μεθυλενίου
- Ετερογενές διάλυμα υδροξειδίου του μαγνησίου $MgOH$. Θερμαίνονται 17 g MgO στους 800 °C για 2 ώρες. Εν συνεχεία η ποσότητα αφήνεται να ψυχθεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος μέσα σε αφυγραντήρα. Τέλος διαλύονται τα 17 g σε 100 ml νερού.
- Οκτανδιόλη. Χρησιμοποιείται για τη μείωση του αφρισμού.
- Διάλυμα χλωριούχου καλίου KCl 2M. Διαλύονται 745,51 g στερεού χλωριούχου καλίου KCl σε 5 lt απιονισμένου νερού.
- Διάλυμα θειικού οξέος H_2SO_4 0,005M

Δείγμα στο οποίο έχει προηγηθεί ξήρανση στους 105°C λιотριβείται και ζυγίζονται 5 g. Το δείγμα τοποθετείται σε ποτήρι ζέσεως των 100 ml και προστίθενται 50 ml διαλύματος χλωριούχου καλίου KCl . Το ποτήρι αφήνεται σε αναδευτήρα για περίπου μία ώρα. Εν συνεχεία γίνεται ένας υποτυπώδης διαχωρισμός του υγρού το οποίο υφίσταται φυγοκέντρωση στις 3000 στροφές / λεπτό για 10 λεπτά και διήθηση υπό κενό. Από το διήθημα λαμβάνονται 5 ml με την πιπέτα δειγματοληψίας και εκχύνονται στον ειδικό σωλήνα χώνευσης. Στο σωλήνα χώνευσης πάλι με τη χρήση πιπέτας εκχύνονται 6 ml διαλύματος υδροξειδίου του μαγνησίου $MgOH$ και μερικές σταγόνες οκτανδιόλης.

Ο σωλήνας, στη συνέχεια, προσαρμόζεται στην ειδική συσκευή απόσταξης Varodest 30s. Για τη συλλογή του αποστάγματος χρησιμοποιείται κωνική φιάλη των 250 ml μέσα στην οποία έχουν προστεθεί 5 ml βορικού οξέος H_3BO_3 2% w/v. Η συσκευή απόσταξης, μέσω ρυθμιζόμενου προγράμματος διοχετεύει περίσσεια διαλύματος καυστικού νατρίου $NaOH$ 32% w/v και απιονισμένου νερού. Στη συνέχεια γίνεται τιτλοδότηση με διάλυμα θειικού οξέος H_2SO_4 0,005M. Χρησιμοποιούνται 2-4 σταγόνες από μεικτό προπαρασκευασμένο δείκτη που περιέχει ερυθρό του μεθυλίου και μπλε του μεθυλενίου. Η τιτλοδότηση ολοκληρώνεται μόλις παρατηρηθεί αλλαγή του χρώματος, από magenta σε ανοιχτό πράσινο. Παράλληλα εκτελείται και λευκός προσδιορισμός.

Η επί τις εκατό περιεκτικότητα του δείγματος σε ολικό άζωτο υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\%NH_4 = \frac{0,07(V - V_b)}{V_a}$$

Όπου:

V : ο όγκος του διαλύματος θειικού οξέος H_2SO_4 που χρησιμοποιείται στην τιτλοδότηση (ml).

V_b : ο όγκος του διαλύματος θειικού οξέος H_2SO_4 που χρησιμοποιείται στον λευκό προσδιορισμό (ml).

V_a : ο αρχικός όγκος του δείγματος (ml).

4.4.11 Προσδιορισμός αναλογίας C/N

Η αναλογία C/N υπολογίζεται από την σχέση:

$$C/N = \frac{\%TOC}{\%TKN}$$

4.4.12 Προσδιορισμός βαρέων μετάλλων και ιχνοστοιχείων

Για τον προσδιορισμό των μετάλλων αρχικά έλαβε χώρα χώνευση σε ποσότητα ξηρού (στους 105°C για 12h) compost σε συσκευή Digesdahl Digestion για μέταλλα και στη συνέχεια τα μέταλλα προσδιορίζονται σε φασματοφωτόμετρο ατομικής απορρόφησης τύπου Perkin Elmer 2380.



Η διαδικασία της χώνευσης περιγράφεται ως εξής:

- Λαμβάνεται δείγμα ξηρού compost (105°C) βάρους 0,5g, λειοτριβημένου. Προστίθενται 4 ml πυκνού H_2SO_4 .
- Ταυτόχρονα ανοίγεται η συσκευή και θερμαίνεται στους 440°C. Αφού επιτευχθεί η θερμοκρασία, το δείγμα τοποθετείται και ανοίγεται η βάννα του νερού για δημιουργία κενού.
- Το δείγμα βράζει για περίπου έξι λεπτά. Δεν πρέπει να φύγει όλο το οξύ. Εάν διαφύγει τότε η διαδικασία πρέπει να σταματήσει.
- Προστίθενται 15 ml H_2O_2 30% v/v και συνεχίζεται η θέρμανση για περίπου επτά λεπτά. Αν το δείγμα δε γίνει άχρωμο, χρειάζεται να προστεθούν επιπλέον 5 ml H_2O_2 30% v/v. Η αντίδραση που λαμβάνει χώρα είναι η εξής: $H_2SO_4 + H_2O_2 \rightarrow H_2SO_5 + H_2O$
- Η θέρμανση συνεχίζεται για περίπου έξι λεπτά, όμως όχι έως ξηρού.
- Το δείγμα ψύχεται στο cooling rad.
- Προστίθενται αργά μερικά ml απιονισμένου νερού και το δείγμα διηθείται.

Το διάλυμα φέρεται με απιονισμένο νερό σε όγκο συνήθως 15 ml και σε αυτό προσδιορίζονται τα μέταλλα στο φασματοφωτόμετρο της ατομικής απορρόφησης (Varian).



Εικόνα 4.57 Φασματοφωτόμετρο ατομικής απορρόφησης (Varian)

4.4.13 Προσδιορισμός φυτοτοξικότητας

Για τη συγκεκριμένη μέθοδο υπολογισμού αμμωνιακών χρησιμοποιούνται τα παρακάτω αντιδραστήρια:

- Τρυβλία.
- Σπόροι.
- Διηθητικό χαρτί (Whatman #1).
- Απιονισμένο νερό.
- Ψυγείο 25°C (σκοτεινός θάλαμος).
- Χάρακας.

Η διαδικασία του υπολογισμού του δείκτη βλαστικότητας περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια:

- 10g φρέσκου compost ζυγίζονται.
- Προστίθενται 100ml H₂O.
- Ανάδευση για 30 λεπτά.
- Φυγοκέντρηση στις 3000 στροφές / λεπτό για 10 λεπτά.
- Διήθηση υπό κενό με Whatman 41 (20 – 25 μm).
- Σε δύο τρυβλία (Petri dish) τοποθετείται διηθητικό χαρτί (Whatman 1).
- 20 σπόροι μαρουλιού (σε κάθε τρυβλίο) τοποθετούνται σε διάταξη ώστε να ισαπέχουν μεταξύ τους.
- Προστίθενται 10ml H₂O και 10ml extract αντίστοιχα.
- Τοποθετούνται σε ψυγείο (20 ± 5 °C) όπου επικρατούν συνθήκες σκότους για 5 ημέρες.
- Καταμέτρηση αριθμού σπόρων όπου έχουν βλαστήσει.
- Καταμέτρηση μήκους βλαστών .

Ο δείκτης βλαστικότητα (Δ.Β.) υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τη φυτρωτική ικανότητα και το μήκος του βλαστού σύμφωνα με την πιο κάτω σχέση:

$$\Delta.B. = (G * L) / 100$$

Όπου:

G: [αριθμός των βλαστών του δείγματος / αριθμός των βλαστών του μάρτυρα]

* 100 → όπου δηλώνει τη φυτρωτική ικανότητα του δείγματος

L: [μήκος βλαστού στο δείγμα / μήκος βλαστού στον μάρτυρα] * 100

Για το δείκτη βλαστικότητα ισχύει:

0 < Δ.Β. < 25 → πολύ φυτοτοξικό

26 < Δ.Β. < 65 → φυτοτοξικό

66 < Δ.Β. < 100 → μή φυτοτοξικό

Δ.Β. > 101 → φυτοδιέγερση – φυτοθρεπτικό

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

5.1 Εισαγωγή

Οι πειραματικοί κύκλοι που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα διδακτορική διατριβή έχουν ως στόχο τη μελέτη και βελτιστοποίηση της διεργασίας της κομποστοποίησης, ώστε αφενός μεν να αξιολογηθεί ο πρότυπος βιοαντιδραστήρας, αφετέρου να επιτευχθούν οι βέλτιστες συνθήκες για την παρασκευή τελικού προϊόντος με όσο το δυνατόν καλύτερες ιδιότητες. Το σύνολο των πειραματικών Κύκλων πραγματοποιήθηκε σε τρία επίπεδα. Το πρώτο επίπεδο αφορά στη μελέτη των ιδιοτήτων των τροφίμων που αποτελούν το υλικό τροφοδοσίας του αντιδραστήρα καθώς και διαφορετικών μιγμάτων αυτών, ώστε να επιτευχθεί είσοδος στον αντιδραστήρα υλικού με συγκεκριμένες αρχικές ιδιότητες. Η αξιολόγηση του συστήματος βασίζεται σε πειραματικά αποτελέσματα αναφορικά με τις λειτουργικές και ποιοτικές παραμέτρους που επηρεάζουν την ανάπτυξη της διεργασίας της κομποστοποίησης. Το δεύτερο επίπεδο αφορά στη μελέτη της διεργασίας της κομποστοποίησης, και κατά πόσο αυτή βελτιώνεται με τη χρήση κατάλληλων προσθέτων και με αλλαγές στις ιδιότητες του αρχικού υποστρώματος (C/N). Το τρίτο επίπεδο ελέγχου της αποτελεσματικότητας της διεργασίας και του συστήματος κομποστοποίησης, αφορά στην εξέταση της ποιότητας του τελικού προϊόντος βασιζόμενη, στον προσδιορισμό των φυσικών και χημικών του ιδιοτήτων ύστερα από την ωρίμανσή του. Σε τελικό στάδιο μελετάται η κινητική της διεργασίας και εξάγονται συμπεράσματα αναφορικά με την αποδοτικότητα της διεργασίας και κατ' επέκταση τη λειτουργικότητα του συστήματος.

5.2 Πειραματικές εφαρμογές

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα κατά την εφαρμογή τριών Σειρών πειραμάτων κομποστοποίησης με τη χρήση του συστήματος κομποστοποίησης. Κάθε πειραματική εφαρμογή περιλαμβάνει το χαρακτηρισμό των επιλεγμένων προς επεξεργασία βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων, τη σύνθεση του μίγματος τροφοδοσίας και τον έλεγχο της διεργασίας της κομποστοποίησης. Στην Πρώτη Σειρά πειραμάτων πραγματοποιήθηκαν δύο Κύκλοι, στη Δεύτερη Σειρά οχτώ πειραματικοί Κύκλοι και στην Τρίτη Σειρά πειραμάτων δύο Κύκλοι. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν Δώδεκα Πειραματικοί Κύκλοι. Σε όλους τους Κύκλους χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια ακριβώς υλικά τροφοδοσίας, σε διαφορετικές αναλογίες αυτών, οι οποίες δημιουργήθηκαν με βάση τη διαθεσιμότητα των αποβλήτων καθώς και τις φυσικοχημικές ιδιότητές τους (π.χ. C/N, υγρασία), ούτως ώστε να διαμορφωθούν κατάλληλες αρχικές συνθήκες για τη διεξαγωγή των διεργασιών της κομποστοποίησης. Τέλος χρησιμοποιήθηκαν πρόσθετα (πριονίδι, ορυκτά και ώριμο κόμποστ) σε διαφορετικά ποσοστά για τη βελτίωση των συνθηκών βιοαποδόμησης της οργανικής ουσίας, και γενικότερα τη βελτίωση της όλης διεργασίας. Στα υποκεφάλαια που ακολουθούν παρουσιάζεται η σύσταση του υποστρώματος για τον εκάστοτε πειραματικό κύκλο

κομποστοποίησης, ξεχωριστά. Ο έλεγχος της διεργασίας της κομποστοποίησης πραγματοποιείται με την καταγραφή και την παρακολούθηση των βασικότερων φυσικοχημικών παραμέτρων που επηρεάζουν τα εξελικτικά στάδια της αερόβιας βιοαποδόμησης του υποστρώματος. Ειδικότερα μετράται η θερμοκρασία, η υγρασία, το οξυγόνο, το pH, τα πτητικά στερεά, ο ολικός οργανικός άνθρακας, το ολικό άζωτο και οι ανόργανες μορφές του (NH_4^+ και NO_3^-) καθώς και η αναλογία C/N (Diaz and Savage, 2007a, 2007b). Στο τελικό προϊόν, για την πλήρη αξιολόγησή του, μετρήθηκαν, πέραν των φυσικοχημικών παραμέτρων, τα μακροστοιχεία K, Na, Ca, Mg, καθώς και ο Δείκτης Βλαστικότητας του (Φυτοτοξικότητα).

5.2.1 Χαρακτηρισμός πρώτης ύλης και σύνθεση υλικού τροφοδοσίας (Σειρά Α)

Ο προσδιορισμός των φυσικοχημικών ιδιοτήτων των βιοαποδομήσιμων οικιακών αποβλήτων αποτελεί σημαντικό στάδιο της προετοιμασίας του υλικού τροφοδοσίας και κατ' επέκταση των εξελικτικών σταδίων της διεργασίας της κομποστοποίησης. Η σημαντικότητα της επιλογής της πρώτης ύλης έγκειται στο γεγονός ότι καθορίζει εκ των προτέρων τις φυσικές, χημικές και βιολογικές συνθήκες που αναπτύσσονται κατά τη διεργασία. Επομένως, ο ρυθμός βιοαποδόμησης του υποστρώματος και η ποιότητα του τελικού προϊόντος συνδέονται άρρηκτα με την επιλογή των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων και τη σύνθεση του μίγματος το οποίο προκύπτει από αυτά. Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των υλικών από τα οποία αποτελείται το αρχικό υπόστρωμα, ενώ στον Πίνακα 5.2 παρουσιάζονται οι φυσικοχημικές ιδιότητες διαφόρων μιγμάτων, που αποτελούν και το υλικό τροφοδοσίας του αντιδραστήρα. Να σημειωθεί ότι τα απόβλητα που αποτέλεσαν την πρώτη ύλη για τη διεξαγωγή των πειραμάτων συλλέχθηκαν από τις οικίες των μελών της Μονάδας Περιβαλλοντικής Επιστήμης και Τεχνολογίας του ΕΜΠ, από το εστιατόριο του ΕΜΠ, καθώς και από λαϊκές αγορές.

Πίνακας 5.1 Αρχικές μετρήσεις τροφίμων του υποστρώματος

Τρόφιμο	pH	Αγωγιμότητα (mS/cm)	Υγρασία %	% TOC	% TKN	C/N
Μαρούλι	6,22	1,63	89,62	34,20	4,48	7,63
Σπανάκι	6,27	1,14	88,43	34,70	4,16	8,34
Ρύζι	6,70	0,13	61,35	44,12	4,55	9,70
Ρεβύθια	6,86	0,82	64,20	42,80	8,21	5,21
Φασόλια	6,87	1,04	67,30	45,20	8,73	5,18
Ψωμί	5,64	5,69	22,29	46,40	5,34	8,69
Πατάτα	6,61	1,47	79,09	42,07	4,87	8,64
Πορτοκάλι	4,06	0,86	75,89	45,78	3,27	14,00
Λεμόνι	2,87	1,69	81,90	44,80	2,15	20,84
Μπανάνα	5,99	3,34	90,58	46,26	1,66	27,87
Καφές	6,2	1,53	61,18	43,43	1,87	23,22

Σύμφωνα με τον Πίνακα 5.1 παρατηρείται πως τα όσπρια (φασόλια, ρεβύθια) έχουν υψηλές τιμές pH, κοντά στο 7, ενώ σε αντίθεση με αυτά οικιακά απορρίμματα, όπως οι φλούδες από φρούτα (πορτοκάλι, λεμόνι) έχουν πολύ χαμηλό pH, που στο λεμόνι φτάνει και κάτω από 3 (2,87). Παράλληλα διαπιστώνεται ότι τα μεγαλύτερα ποσοστά υγρασίας παρατηρούνται σε τρόφιμα πλούσια σε κυτταρινούχες ενώσεις, όπως οι φλούδες από φρούτα και τα λαχανικά, και κυμαίνονται από 75,89-90,58%. Σε αντίθεση, τρόφιμα πλούσια σε υδατάνθρακες, με κύριο το ψωμί, έχουν αρκετά χαμηλά ποσοστά υγρασίας (22,29%). Όσον αφορά στα ποσοστά του οργανικού άνθρακα αυτά είναι αρκετά υψηλά σε όλα τα τρόφιμα. Εκεί, όμως, που παρατηρούνται σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των τροφίμων είναι στα ποσοστά του αζώτου, τα τρόφιμα πλούσια σε κυτταρινούχες ενώσεις έχουν χαμηλά ποσοστά αζώτου (1,66 - 4,48%) σε αντιδιαστολή με τα τρόφιμα πλούσια σε πρωτεΐνες, όπου το ποσοστό του αζώτου πλησιάζει μέχρι και το 9% (8,73% στα φασόλια).

Με βάση τις παραπάνω μετρήσεις εξάγονται βασικά συμπεράσματα για τις τιμές C/N των τροφίμων, που αποτελεί τη βασική παράμετρο της διεργασίας. Πρέπει να επισημανθεί ότι η διαθεσιμότητα σε θρεπτικά συστατικά στους μικροοργανισμούς, υπεύθυνους για τη διεργασία της κομποστοποίησης, καθορίζεται αποκλειστικά από την αναλογία C/N, διότι η πλειονότητα των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων εμπεριέχει σε επαρκείς ποσότητες και αναλογίες όλα τα υπόλοιπα απαιτούμενα θρεπτικά στοιχεία και στις περισσότερες περιπτώσεις δεν αποτελούν περιοριστικό παράγοντα για τη διεξαγωγή της κομποστοποίησης (Diaz and Savage, 2007a). Όσον αφορά στην περιεκτικότητα των τροφίμων σε βαρέα μέταλλα, διαπιστώνεται πως οι συγκεντρώσεις αυτών είναι μη ανιχνεύσιμες, γεγονός αναμενόμενο, αφού η διαλογή των οικιακών απορριμμάτων έγινε στην πηγή, με αποτέλεσμα να μην έχουν επιβαρυνθεί με βαρέα μέταλλα. Ως εκ τούτου δεν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις των βαρέων μετάλλων στο τελικό προϊόν.

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων στα τρόφιμα, δημιουργήθηκαν μίγματα αυτών σε διάφορες αναλογίες, ώστε να δημιουργηθούν διαφορετικά αρχικά υποστρώματα, τα οποία μελετήθηκαν ως προς τις φυσικοχημικές τους ιδιότητες. Τα προς κομποστοποίηση υποστρώματα συνίσταται από κυτταρινούχα (σπανάκι, μαρούλι, φλούδες πορτοκαλιού και λεμονιού), πρωτεϊνούχα υλικά (όσπρια νερόβραστα) καθώς και υλικά πλούσια σε υδατάνθρακες (ψωμί) τα οποία τροφοδότησαν τον αντιδραστήρα σε προκαθορισμένη αναλογία. Τεμαχίστηκαν σε κομμάτια των 2 έως 4 εκατοστών και έγινε επαρκής ομογενοποίηση.

Εν συνεχεία δημιουργήθηκαν υποστρώματα για πέντε διαφορετικές αναλογίες υλικών. Συγκεκριμένα οι αναλογίες που μετρήθηκαν ήταν κυτταρινούχα : πρωτεΐνες : υδατάνθρακες = (4 - 0,5 - 0,5) , (3 - 1 - 1) , (2 - 1 - 2) , (2 - 2 - 1) και (2,5 - 1,5 - 1). Σε όλα τα υποστρώματα προστέθηκε πριονίδι 10 % κ.β.

Πίνακας 5.2 Βασικές μετρήσεις για διαφορετικές αναλογίες υποστρώματος

Αναλογία Υποστρώματος	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ				
	Υγρασία %	pH	% Corg	% TKN	C/N
4 – 0,5 – 0,5	78,8	6,2	51,6	1,38	37,4
3 – 1 – 1	69,8	6	47,8	1,53	31,2
2 – 1 – 2	59,8	5,8	45,2	1,28	35,3
2 – 2 – 1	64,2	6,8	44,2	1,63	27,1
2,5 – 1,5 – 1	73,8	5,2	44,7	1,92	23,3

Με βάση τα αποτελέσματα των αναλύσεων και με στόχο η μελέτη της διεργασίας να καλύψει κάθε πιθανή περίπτωση, χρησιμοποιήθηκαν ως υπόστρωμα για τους αντιδραστήρες τα μίγματα με αναλογίες: 2,5 – 1,5 – 1 (λόγος C/N κοντά στο 20), 3 – 1 – 1 (λόγος C/N κοντά στο 30) και 4 – 0,5 – 0,5 (λόγος C/N κοντά στο 40).

5.2.2 Έλεγχος της διεργασίας της κομποστοποίησης (Σειρά Β)

Ο έλεγχος της διεργασίας της κομποστοποίησης αφορά στη δεύτερη Σειρά πειραμάτων. Στη Σειρά Β πραγματοποιήθηκαν πειράματα για τον έλεγχο και τη ρύθμιση της διεργασίας της κομποστοποίησης και επιμερίζονται σε τρεις Δράσεις, καθεμιά από τις οποίες είχε συγκεκριμένο στόχο.

5.2.2.1 Δράση Α

Στη Δράση Α πραγματοποιήθηκε ένας Κύκλος πειραμάτων που στόχο είχε τον προσδιορισμό του χρόνου που απαιτείται για να ολοκληρωθεί η διεργασία εντός του αντιδραστήρα. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν τρεις αντιδραστήρες με αρχικό λόγο C/N στο υπόστρωμα ίσο με 40 και προσθήκη 10% κ.β. του αρχικού υποστρώματος πριονιδίου, ως πρόσθετο.

5.2.2.1.1 Κύκλος Πειραμάτων Δράσης Α

Τροφοδοσία των αντιδραστήρων

Στον Πίνακα 5.3 παρουσιάζονται τα υλικά που τροφοδότησαν κάθε ένα από τους τρεις αντιδραστήρες. Οι τιμές του πίνακα είναι σε κιλά. Η τροφοδοσία έγινε με γνώμονα να δημιουργηθούν υποστρώματα με αρχική αναλογία C/N ίση με 40. Κατά τον πρώτο κύκλο η αρχική πλήρωση του αντιδραστήρα έγινε στο 80 % του όγκου του. Χρησιμοποιήθηκε ως πρόσθετο, πριονίδι 10 % κατά βάρος και στους τρεις αντιδραστήρες. Από την πρώτη ημέρα παρατηρήθηκε μεγάλη μείωση του όγκου του υποστρώματος. Για την ορθή διεξαγωγή της διεργασίας διατηρήθηκε ο όγκος του υποστρώματος σε υψηλά επίπεδα, με επιπλέον τροφοδοσία ίδιας ακριβώς σύστασης με την αρχική. Το υλικό αφαιρέθηκε στις 20 και στις 30 ημέρες από την αρχή της διεργασίας. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται η πλήρωση και των τριών αντιδραστήρων.

Πίνακας 5.3 Υλικό τροφοδοσίας αντιδραστήρων 20, 30 και 40 ημερών (Kg)

ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ 2 20 Ημερών	Αρχική πλήρωση	Συμπλήρωμα	Σύνολο
Πρωτεΐνη	8	3,2	11,2
Κυτταρινούχα	1	0,4	1,4
Υδατάνθρακες	1	0,4	1,4
Ορυκτό	-	-	-
Πριονίδι	1	0,4	1,4
Σύνολο	11	4,4	15,4

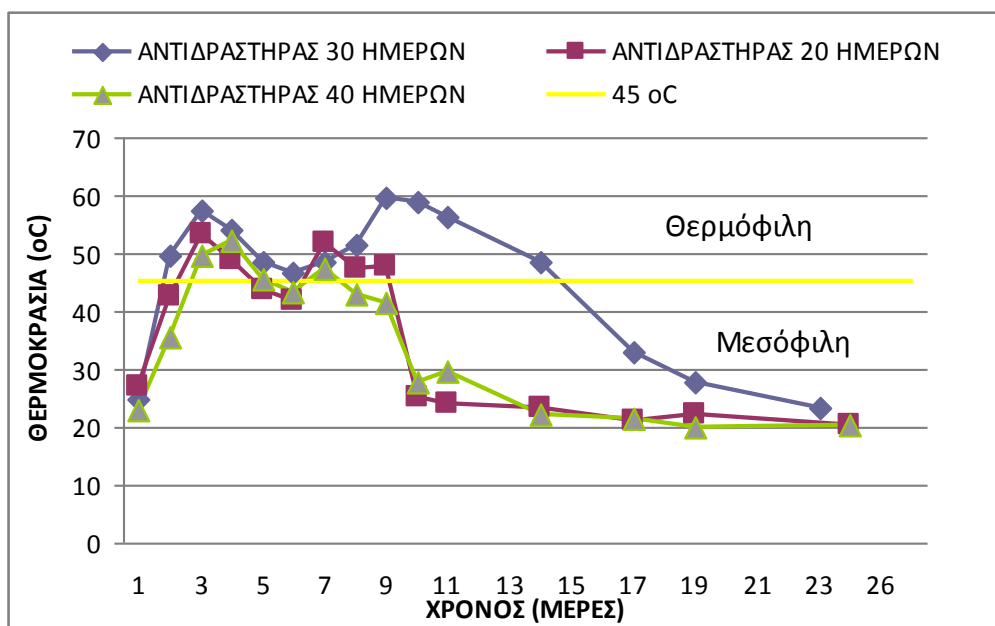
Προσδιορισμός της θερμοκρασίας του υποστρώματος (Δράση Α)

Κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης, οι μικροοργανισμοί διασπούν την οργανική ύλη παράγοντας CO₂, νερό, θερμότητα και χούμους, που αποτελεί και το τελικό οργανικό προϊόν. Υπό βέλτιστες συνθήκες, η κομποστοποίηση περνά από τρεις φάσεις. Η πρώτη φάση είναι η μεσόφιλη. Η αποδόμηση της οργανικής ύλης αρχικά, συντελείται από τους μεσόφιλους μικροοργανισμούς, οι οποίοι αποδομούν τις εύκολα βιοδιασπώμενες οργανικές ενώσεις. Η δραστηριότητα αυτή απελευθερώνει μεγάλα ποσά ενέργειας υπό τη μορφή θερμότητας.

Στον Πίνακα 5.4 παρουσιάζονται οι τιμές της θερμοκρασίας για όλους τους αντιδραστήρες του πειραματικού Κύκλου της Δράσης Α και ακολουθεί το αντίστοιχο Διάγραμμα με το προφίλ των θερμοκρασιών.

Πίνακας 5.4 Τιμές θερμοκρασίας (°C) για τους τρεις αντιδραστήρες του Κύκλου της Δράσης Α

ΗΜΕΡΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ 30 ΗΜΕΡΩΝ	ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ 20 ΗΜΕΡΩΝ	ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ 40 ΗΜΕΡΩΝ
1	25	27,2	22,8
2	49,5	42,7	35,6
3	57,3	53,5	49,5
4	54,1	48,9	52,4
5	48,5	43,6	45,5
6	46,8	41,7	43,5
7	48,7	52	47,3
8	51,5	47,4	42,8
9	59,5	47,8	41,5
10	58,9	25,1	27,8
11	56,4	23,9	29,5
14	48,7	23,2	22,3
17	32,8	21,1	21,4
19	27,9	22,4	19,9
24	23,2	20,5	20,3



Διάγραμμα 5.1 Θερμοκρασία κατά τη διάρκεια λειτουργίας των αντιδραστήρων των 20, 30 και 40 ημερών

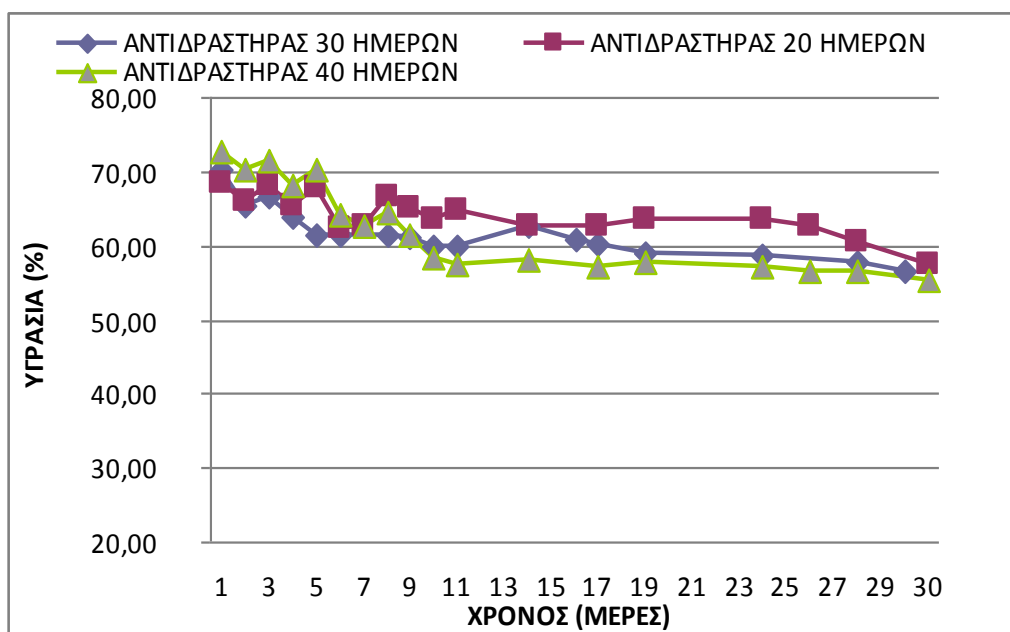
Στο παραπάνω διάγραμμα μπορούμε να διακρίνουμε τα τρία μεταβατικά στάδια της διεργασίας. Σχετικά με τον αντιδραστήρα των 30 ημερών, παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας από τις πρώτες κιόλας μέρες της διεργασίας. Λόγω της μείωσης του όγκου του υλικού η θερμοκρασία μειώνεται μέχρι την 6^η μέρα, όπου γίνεται εκ νέου προσθήκη υλικού με αποτέλεσμα να φτάσει σταδιακά την μέγιστη τιμή της (59,5 °C) και να παραμείνει σε υψηλά επίπεδα για 10 ημέρες. Η διάρκεια της φάσης αυτής (θερμόφιλη) είναι δικαιολογημένη αφού εφαρμόστηκε συνεχής τροφοδοσία υλικού. Στην συνέχεια η διεργασία πέρασε στην μεσόφιλη φάση στην οποία η θερμοκρασία ομαλοποιείται σταδιακά και σταθεροποιείται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στον αντιδραστήρα των 20 ημερών, επετεύχθη η θερμόφιλη φάση η οποία ξεκίνησε με το πέρας της 2^{ης} μέρας και κράτησε μέχρι και την 10^η μέρα. Η μέγιστη θερμοκρασία που σημειώθηκε ήταν 53,5 °C . Στην συνέχεια η διεργασία πέρασε στην μεσόφιλη φάση στην οποία η θερμοκρασία σταθεροποιήθηκε σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στον αντιδραστήρα των 40 ημερών, η θερμόφιλη φάση ξεκίνησε με το πέρας της 2^{ης} μέρας και κράτησε μέχρι και την 8^η μέρα. Η μέγιστη θερμοκρασία που σημειώθηκε ήταν 52,4 °C . Στην συνέχεια η διεργασία πέρασε στην μεσόφιλη φάση στην οποία η θερμοκρασία σταθεροποιήθηκε σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Και στους τρεις αντιδραστήρες οι καμπύλες της θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου είναι αναμενόμενες και ενδεικτικές της ορθής διεξαγωγής της διεργασίας.

Προσδιορισμός της υγρασίας του υποστρώματος (Δράση Α)

Η περιεχόμενη υγρασία στο κόμποστ εξαρτάται από το πορώδες του υποστρώματος, τον αερισμό, την θερμοκρασία και άλλους φυσικούς παράγοντες. Το % ποσοστό υγρασίας ορίζεται ως η απώλεια βάρους αφού το δείγμα ξηραθεί για 12 ώρες στους 105 °C. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές της υγρασίας (%) για όλους τους αντιδραστήρες του πειραματικού Κύκλου της Δράσης Α και ακολουθεί το αντίστοιχο Διάγραμμα.

Πίνακας 5.5 Τιμές υγρασίας (%) για τους τρεις αντιδραστήρες του Κύκλου της Δράσης Α

ΗΜΕΡΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ 30 ΗΜΕΡΩΝ	ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ 20 ΗΜΕΡΩΝ	ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ 40 ΗΜΕΡΩΝ
1	70,2	68,4	72,7
2	65,5	66,1	70,1
3	66,6	68,2	71,4
4	63,9	65,3	68,2
5	61,3	67,8	70,4
6	61,4	62,5	64,2
7	Μ/Δ	62,8	62,8
8	61,3	66,6	64,3
9	61,1	64,9	61,6
10	59,9	63,7	58,2
11	59,8	64,7	57,4
14	62,6	62,5	58,1
17	60,3	62,8	57,3
19	59,1	63,7	57,7
24	58,6	63,5	57,3
26	Μ/Δ	62,5	56,4
28	57,8	60,5	56,4
30	56,6	57,4	55,3



Διάγραμμα 5. 2 Εξέλιξη της υγρασίας κατά τη διάρκεια λειτουργίας των αντιδραστήρων των 20, 30 και 40 ημερών

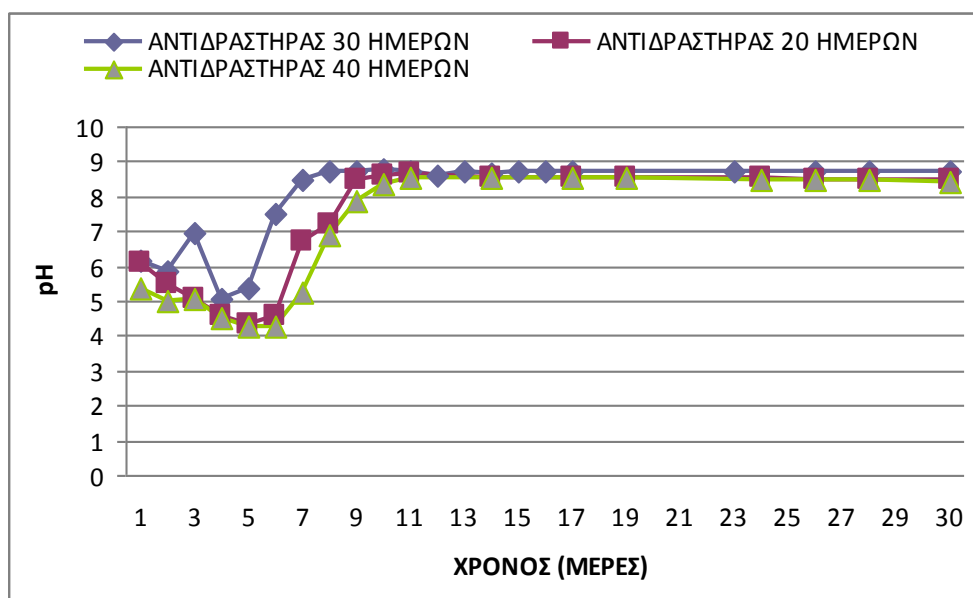
Οι καμπύλες της υγρασίας και στους τρεις αντιδραστήρες ξεκινούν από υψηλά αρχικά επίπεδα κοντά στο 70 %, γεγονός αναμενόμενο λόγω της υψηλής υγρασίας του υλικού που χρησιμοποιήθηκε ως αρχικό υπόστρωμα. Συγκεκριμένα η αρχική υγρασία στους αντιδραστήρες ήταν αντιστοίχως 70,2 %, 68,4 % και 72,7 %. Λόγω της έναρξης των βιολογικών διεργασιών εκλύεται θερμότητα με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες που οδηγούν στη σταδιακή μείωση της περιεχόμενης υγρασίας. Το ποσοστό της υγρασίας στο υπόστρωμα ακολουθεί φθίνουσα πορεία κατά την διάρκεια της κομποστοποίησης και στο τέλος του χρόνου παραμονής στον αντιδραστήρα τα προϊόντα λαμβάνουν ποσοστά μεταξύ 55 – 60 % και συγκεκριμένα 56,6 %, 57,4 % και 55,3 %, στους αντιδραστήρες των 30, 20 και 40 ημερών αντιστοίχως.

Προσδιορισμός pH του υποστρώματος (Δράση Α)

Το pH αναφέρεται στην οξύτητα ή αλκαλικότητα του υλικού, και αποτελεί εξαιρετικά σημαντική παράμετρο για την διεργασία της κομποστοποίησης. Το pH είναι αυτό που ρυθμίζει ποια είδη μικροοργανισμών θα αναπτυχθούν κατά την βιοαποδόμηση της οργανικής ύλης. Ακολουθεί πίνακας στον οποίο παρουσιάζονται οι τιμές του pH για όλους τους αντιδραστήρες του πειραματικού Κύκλου της Δράσης Α και έπεται το αντίστοιχο Διάγραμμα.

Πίνακας 5.6 Τιμές pH για τους τρεις αντιδραστήρες του Κύκλου της Δράσης Α

ΗΜΕΡΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ 30 ΗΜΕΡΩΝ	ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ 20 ΗΜΕΡΩΝ	ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ 40 ΗΜΕΡΩΝ
1	6,2	6,1	5,4
2	5,9	5,5	5,0
3	6,9	5,1	5,1
4	5,1	4,6	4,5
5	5,4	4,3	4,3
6	7,5	4,6	4,3
7	8,5	6,7	5,2
8	8,8	7,2	6,9
9	8,7	8,5	7,9
10	8,8	8,6	8,4
11	8,8	8,6	8,6
14	8,7	8,6	8,6
15	8,7	M/Δ	M/Δ
17	8,8	8,6	8,6
19	M/Δ	8,6	8,5
24	M/Δ	8,5	8,5
26	8,7	8,5	8,5
28	8,7	8,5	8,5
30	8,7	8,5	8,4



Διάγραμμα 5.3 Εξέλιξη του pH κατά τη διάρκεια λειτουργίας των αντιδραστήρων των 20, 30 και 40 ημερών

Σχετικά με τον πρώτο αντιδραστήρα, κατά την έναρξη της λειτουργίας του, το υλικό τροφοδοσίας έχει pH που ισούται με 6,2. Αρχικά η τιμή του αυξάνεται λόγω συνεχούς προσθήκης ποσότητας υλικού. Έπειτα ακολουθεί σταδιακή πτώση μέχρι την 5^η ημέρα (χαμηλότερη τιμή 5,08), διότι σχηματίζονται οργανικά οξέα και το υπόστρωμα γίνεται όξινο. Σ' αυτό το σημείο οι μύκητες που αντέχουν το όξινο περιβάλλον κατέχουν ένα σημαντικό ρόλο στην αποσύνθεση. Οι μικροοργανισμοί στη συνέχεια διασπούν την οργανική ύλη και τα οργανικά οξέα προς CO₂ ενώ ταυτόχρονα εκλύεται αμμωνία. Οι τιμή του pH, λοιπόν, αυξάνεται σταδιακά κοντά στο 8,7 όπου και σταθεροποιείται. Η τιμή του pH στον δεύτερο αντιδραστήρα ξεκινά από την τιμή 6,09. Παρατηρούμε μια μεγάλη μείωση μέχρι και την 5^η μέρα με ελάχιστη τιμή την 4,3. Στη συνέχεια καθώς οι μικροοργανισμοί που προκαλούν τη διάσπαση των οξέων κυριαρχούν, το pH αυξάνει γρήγορα μέχρι την 9^η μέρα φτάνοντας σε υψηλές τιμές κοντά στο 9. Εν συνεχεία σταδιακά αυτή η υψηλή τιμή αποκλιμακώνεται για να φτάσει την τιμή 8,45 την 30^η μέρα. Το pH του τρίτου αντιδραστήρα μετρήθηκε αρχικά 5,4. Όμοια παρατηρούμε μια μεγάλη αρχική πτώση με ελάχιστη τιμή την 5^η μέρα να είναι ίση με 4,45. Εν συνεχεία το pH αυξάνεται για να λάβει μέγιστη τιμή την 11^η μέρα (8,54). Στη συνέχεια φθίνει αργά για να πάρει την τιμή 8,42 την 30^η ημέρα.

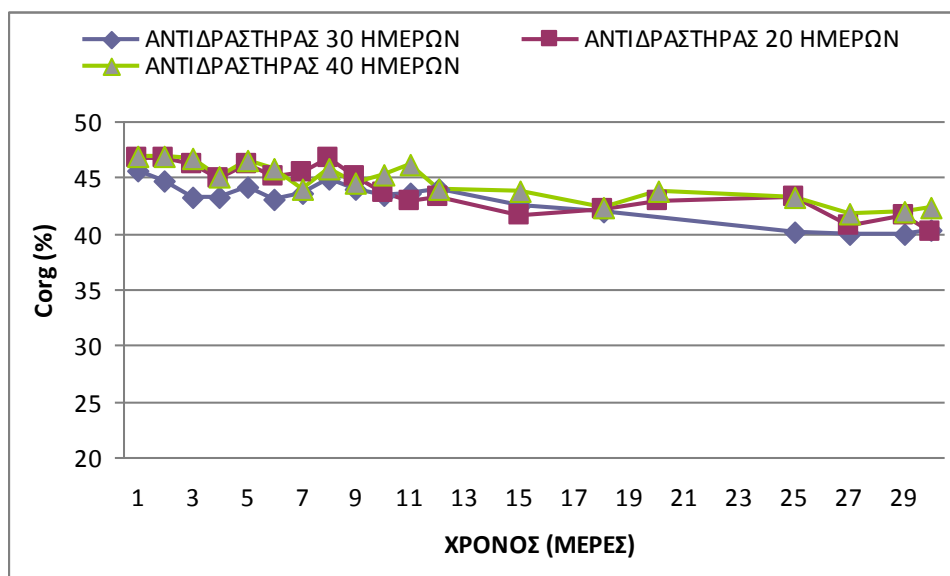
Προσδιορισμός του Ολικού Οργανικού Άνθρακα στο υπόστρωμα (Δράση Α)

Κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης ένα μέρος της οργανικής ύλης μετατρέπεται σε CO₂, NH₃ και νερό. Η απώλεια άνθρακα συντελείται κατά την βιοοξείδωση του οργανικού άνθρακα προς CO₂. Στη συνέχεια παρουσιάζεται πίνακας στον οποίο εμφανίζονται οι τιμές του ολικού οργανικού άνθρακα για όλους τους αντιδραστήρες του πειραματικού Κύκλου της Δράσης Α και έπεται το αντίστοιχο Διάγραμμα.

Πίνακας 5.7 Τιμές TOC (%) για τους τρεις αντιδραστήρες του Κύκλου της Δράσης Α

ΗΜΕΡΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ 30 ΗΜΕΡΩΝ	ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ 20 ΗΜΕΡΩΝ	ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ 40 ΗΜΕΡΩΝ
1	45,6	46,63	46,95
2	44,75	46,74	46,88
3	43,21	46,085	46,77
4	43,21	44,92	45,03
5	44,1	46,23	46,46
6	42,98	45,09	45,77
7	43,58	45,429	43,98
8	44,8	46,64	45,83
9	43,9	45,09	44,52
10	43,4	43,61	45,20
11	43,65	42,92	46,23
12	43,9	43,15	43,95
15	42,58	41,62	43,75
18	41,95	42,13	42,35
20	M/Δ	42,89	43,86

25	40,1	43,23	43,15
27	40	40,68	41,72
29	39,9	41,55	41,90
30	40,36	40,14	42,4



Διάγραμμα 5.4 Εξέλιξη του ολικού οργανικού άνθρακα των αντιδραστήρων των 20, 30 και 40 ημερών

Το ποσοστό του ολικού οργανικού άνθρακα για τον πρώτο αντιδραστήρα (30 ημέρες), ξεκινάει από υψηλή τιμή (45,6 %). Στα αρχικά στάδια της διεργασίας (όταν οι θερμοκρασίες είναι σχετικά χαμηλές) οι μικροοργανισμοί χρησιμοποιούν το διαθέσιμο οξυγόνο για να μετατρέψουν τον οργανικό άνθρακα του υποστρώματος, σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό (οξειδωση). Ταυτόχρονα παράγεται ενέργεια καθώς μεταβολίζεται το ζυμώσιμο υλικό που αποδίδεται στην αύξηση της θερμοκρασίας στο υπόστρωμα. Έτσι παρατηρείται μείωση του %Corg μέχρι το τέλος της 3^{ης} ημέρας. Έπειτα σημειώνονται μικρές αυξομειώσεις, λόγω προσθήκης ποσότητας οργανικού υλικού, μέχρι τη 10^η ημέρα. Μετά την 10^η ημέρα το ποσοστό ακολουθεί φθίνουσα πορεία μέχρι να σταθεροποιηθεί σταδιακά κοντά στο 40 % (40,4 %) επιτυγχάνοντας μια συνολική μείωση στον ποσοστιαίο οργανικό άνθρακα κατά 5,2%. Ο ολικός οργανικός άνθρακας στον 2^ο αντιδραστήρα (20 ημέρες), ξεκινάει από 46,6 % και φθίνει αργά λόγω της βιοαποδόμησης. Η προσθήκη υλικού είναι υπεύθυνη για τις μικρές αυξομειώσεις του μεταξύ της 3^{ης} και 8^{ης} ημέρας. Έπειτα η αποδόμηση του οργανικού κλάσματος συνεχίζεται με πιο γρήγορο ρυθμό οπότε και παρατηρούμε πτώση στον περιεχόμενο άνθρακα ο οποίος την 30^η ημέρα κυμαίνεται στο 40,1 % με συνολική μείωση που ανέρχεται στα 6,49%. Στον 3^ο αντιδραστήρα (40 ημέρες), ο ολικός οργανικός άνθρακας ξεκινάει από 46,95 % και φθίνει αργά λόγω της βιοαποδόμησης του ζυμώσιμου υλικού έχοντας την ίδια τάση μείωσης με τον 2^ο αντιδραστήρα. Η προσθήκη υλικού είναι υπεύθυνη για τις αυξομειώσεις του περιεχόμενου άνθρακα την 3^η έως την 10^η ημέρα. Μετά το πέρας της 12^{ης} μέρας ο ρυθμός μείωσης του ποσοστιαίου οργανικού άνθρακα είναι πιο ομαλός ενώ την 30^η μέρα παραμονής του υποστρώματος στον αντιδραστήρα ο

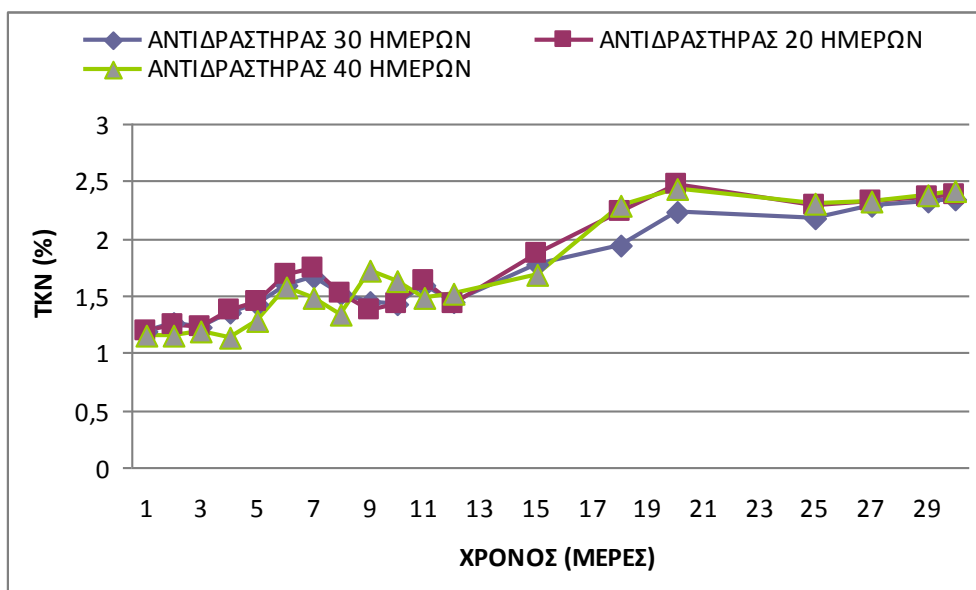
άνθρακας μειώθηκε στο 42,4 % επιτυγχάνοντας μια συνολική μείωση του άνθρακα 4,55% από την έναρξη τη διεργασίας.

Προσδιορισμός του ολικού αζώτου κατά Kjeldhal στο υπόστρωμα (Δράση Α)

Το άζωτο αποτελεί συστατικό των πρωτεϊνών, των νουκλεϊκών οξέων, των αμινοξέων και των ενζύμων και είναι ύψιστης σημασίας για την μικροβιακή ανάπτυξη. Κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης το N μεταβολίζεται κυρίως σε NH₃, ενώ οι μη διαλυτές ενώσεις αζώτου κατά την κομποστοποίηση μετατρέπονται σε διαλυτές μορφές που είναι πιο εύκολα διαθέσιμες για τις μεταβολικές δραστηριότητες. Ακολουθεί πίνακας στον οποίο παρουσιάζονται οι τιμές του pH για όλους τους αντιδραστήρες του πειραματικού Κύκλου της Δράσης Α και έπεται το αντίστοιχο Διάγραμμα.

Πίνακας 5.8 Τιμές TKN (%) για τους τρεις αντιδραστήρες του Κύκλου της Δράσης Α

ΗΜΕΡΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ 30 ΗΜΕΡΩΝ	ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ 20 ΗΜΕΡΩΝ	ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ 40 ΗΜΕΡΩΝ
1	1,18	1,19	1,15
2	1,26	1,25	1,16
3	1,23	1,23	1,18
4	1,35	1,38	1,14
5	1,42	1,45	1,28
6	1,59	1,68	1,58
7	1,67	1,73	1,48
8	1,52	1,52	1,34
9	1,44	1,38	1,72
10	1,42	1,42	1,63
11	1,6	1,63	1,48
12	1,45	1,43	1,52
15	1,78	1,87	1,68
18	1,94	2,24	2,29
20	2,24	2,47	2,44
25	2,18	2,28	2,30
27	2,28	2,32	2,32
29	2,32	2,36	2,38
30	2,34	2,38	2,41



Διάγραμμα 5. 5 Εξέλιξη του ολικού αζώτου κατά Kjeldahl (%) στους αντιδραστήρες των 20, 30 και 40 ημερών

Στο διάγραμμα παρατηρούμε ότι το % ποσοστό του TKN για τον αντιδραστήρα των 30 ημερών ξεκινάει από μία αρχική τιμή 1,18% και έχει μία ανοδική πορεία φτάνοντας στην τελική τιμή 2,34%. Η τελική τιμή του % ποσοστού του αζώτου δείχνει ότι το τελικό προϊόν είναι πλούσιο σε άζωτο, γεγονός πολύ σημαντικό για το κόμποστ, που προορίζεται για λίπασμα. Η αύξουσα πορεία του ποσοστού του αζώτου είναι αναμενόμενη, καθώς αποτελεί % ποσοστό επί ξηρής μάζας του υλικού, στην οποία το ποσοστό του άνθρακα μειώνεται μέσω της μεταβολικής διεργασίας (εκπομπή CO₂), αλλά και απωλειών νερού. Αυτό έχει σαν συνέπεια το ποσοστό του αζώτου στο υλικό να αυξάνεται, παρόλο που η συγκέντρωση του μειώνεται, κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Στο αντιδραστήρα των 20 ημερών παρατηρείται παρόμοια πορεία. Το αρχικό ποσοστό αζώτου είναι 1,19% και φτάνει την 30^η ημέρα στο 2,38%. Όμοια στον αντιδραστήρα των 40 ημερών το αρχικό ποσοστό είναι 1,15 % και τελικά φτάνει στο 2,41 % πραγματοποιώντας την ίδια πορεία.

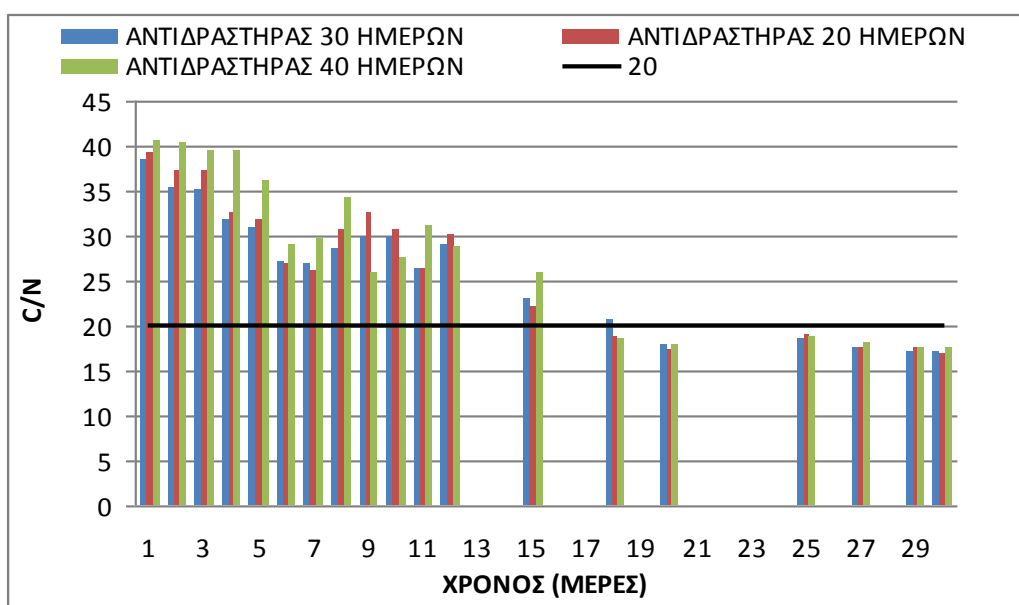
Προσδιορισμός του λόγου C/N στο υπόστρωμα (Δράση Α)

Κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης είναι βασικό να καθοριστεί η περιεκτικότητα σε θρεπτικά συστατικά του μίγματος. Από ένα σύνολο στοιχείων που χρειάζονται οι μικροοργανισμοί για την αποδόμηση, ο άνθρακας και το άζωτο είναι από τα πλέον βασικά. Ο άνθρακας προσφέρει την πηγή ενέργειας ενώ το άζωτο είναι βασικό συστατικό των πρωτεϊνών τα οποία είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών υπεύθυνων για την διεξαγωγή της κομποστοποίησης. Μελέτες αναφέρουν ότι μια «σωστή» αρχική αναλογία άνθρακα προς άζωτο (C:N) στο υπόστρωμα κυμαίνεται μεταξύ 20/1 και 40/1. Η αναλογία C/N παρακολουθείται πειραματικά ανά ημέρα, για τις πρώτες δέκα ημέρες λειτουργίας και τρεις φορές την εβδομάδα μέχρι το πέρας λειτουργίας του αντιδραστήρα, για τον πλήρη έλεγχο της διεργασίας. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τιμές του λόγου C/N για όλους τους αντιδραστήρες του

πειραματικού Κύκλου της Δράσης Α και ακολούθως παρουσιάζεται το αντίστοιχο Διάγραμμα.

Πίνακας 5.9 Τιμές C/N για τους τρεις αντιδραστήρες του Κύκλου της Δράσης Α

ΗΜΕΡΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ 30 ΗΜΕΡΩΝ	ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ 20 ΗΜΕΡΩΝ	ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ 40 ΗΜΕΡΩΝ
1	38,6	39,2	40,8
2	35,5	37,4	40,4
3	35,1	37,5	39,6
4	32,0	32,6	39,5
5	31,1	31,9	36,3
6	27,0	26,8	29,0
7	26,8	26,3	29,7
8	28,6	30,7	36,9
9	30,0	32,7	25,9
10	29,9	30,7	27,7
11	26,5	26,3	31,2
12	28,9	30,2	28,9
15	23,1	22,3	26,0
18	20,7	18,8	18,5
20	18,4	16,7	17,3
25	18,5	19,3	18,1
27	16,9	16,5	17,4
29	17,1	17,5	17,4
30	17,2	16,9	17,7



Διάγραμμα 5.6 Λόγος C/N για τους αντιδραστήρες των 20, 30 και 40 ημερών

Συγκεκριμένα ο αρχικός λόγος στον αντιδραστήρα των 30 ημερών, υπολογίστηκε στο 38,65 οποίος σταδιακά μειώνεται. Η μείωση του λόγου οφείλεται στην οξείδωση της οργανικής ύλης και στο γεγονός ότι η μείωση του οργανικού άνθρακα είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη μείωση του αζώτου (λόγω απωλειών αμμωνίας) στο υπόστρωμα. Ο λόγος C/N πέφτει κάτω από την τιμή 20 την 19^η ημέρα, ενώ η τελική προσδιορισθείσα τιμή στο μίγμα την 30^η ημέρα είναι ίση με 17,1. Στον αντιδραστήρα των 20 ημερών, ο λόγος έχει αρχική τιμή 39,18, παρατηρείται η ίδια πτωτική πορεία για να πέσει κάτω από 20 την 16^η ημέρα ενώ την 30^η ημέρα ο λόγος είναι 16,93. Στον αντιδραστήρα των 40 ημερών, η αρχική τιμή του λόγου είναι 40,8. Την 16^η ημέρα πέφτει κάτω από 20 για να καταλήξει την 33^η ημέρα στην τιμή 17,66.

Τέλος να σημειωθεί ότι καθόλη τη διάρκεια της διεργασίας το οξυγόνο είχε σταθερή τιμή μεταξύ 11 και 12 % σε όλους τους αντιδραστήρες, ένδειξη ότι υπάρχει επαρκής αερισμός για την ομαλή διεξαγωγή της διεργασίας.

Στη Δράση Α μελετήθηκαν οι βασικές φυσικοχημικές παράμετροι, που επηρεάζουν τη διεργασία, για να εξαχθεί το συμπέρασμα της χρονικής ολοκλήρωσης αυτής. Ωστόσο η βασικότερη παράμετρος της διεργασίας είναι ο λόγος C/N και δύναται να εξαχθεί το συμπέρασμα για την ολοκλήρωση της διεργασίας από τη μελέτη μόνο αυτής της παραμέτρου. Για την ολοκληρωμένη εξαγωγή συμπεράσματος σχετικά με την ολοκλήρωση της διεργασίας, κρίθηκε σκόπιμο να παρακολουθηθεί η πορεία και άλλων βασικών παραμέτρων αυτής. Συμπερασματικά, σε όλα τα διαγράμματα είναι εμφανές ότι από την 18-19^η ημέρα οι τιμές των βασικών παραμέτρων σταθεροποιούνται, βασική ένδειξη ότι η διεργασία αρχίζει να ολοκληρώνεται και ο αντιδραστήρας δεν έχει να προσφέρει κάτι περεταίρω στην ολοκλήρωση αυτής, καθώς το υλικό είναι έτοιμο να περάσει στο στάδιο της ωρίμανσης. Φυσικά το ίδιο ακριβώς παρατηρείται και στο διάγραμμα της βασικής παραμέτρου (C/N) της διεργασίας, όπου από τη 19^η ημέρα και έπειτα οι τιμές βρίσκονται σταθερά μεταξύ 15 και 20.

5.2.2.2 Δράση Β

Η δεύτερη δράση αποτελεί έναν από τους πιο βασικούς πυλώνες της διδακτορικής διατριβής, καθώς μέσω αυτής επιδιώκεται η διεξωδική μελέτη και η βελτιστοποίηση της διεργασίας της κομποστοποίησης μέσω του προσδιορισμού του βέλτιστου αρχικού λόγου C/N στο υπόστρωμα, καθώς και του βέλτιστου ποσοστού %κ.β. των προσθέτων που χρησιμοποιούνται στο αρχικό υπόστρωμα για τη βελτίωση της διεργασίας. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν τέσσερις Κύκλοι πειραμάτων, σε καθένα από τους οποίους χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις αντιδραστήρες, εκτός από τον Κύκλο 1, όπου χρησιμοποιήθηκαν τρεις αντιδραστήρες. Τα πρόσθετα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν πριονίδι, ζεόλιθος, βερμικουλίτης, περλίτης και μίξεις αυτών σε συγκεκριμένες αναλογίες.

5.2.2.2.1 Πρώτος Κύκλος πειραμάτων Δράσης Β

Στον Κύκλο1 χρησιμοποιήθηκαν τρεις αντιδραστήρες με αρχικό λόγο C/N στο υπόστρωμα 30 και χρήση προσθέτων σε ποσοστό 5% κ.β. επί της αρχικής μάζας υποστρώματος.

Αναλυτικά:

- Στον πρώτο αντιδραστήρα προστέθηκε πριονίδι ποσότητας ίσης με το 5% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας.
- Στον δεύτερο αντιδραστήρα προστέθηκε πριονίδι ποσότητας ίσης με το 5% κατά βάρος της αρχικής μάζας, αλλά και ζεόλιθος ποσότητας ίσης με το 5% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας.
- Στον τρίτο αντιδραστήρα προστέθηκε πριονίδι ποσότητας ίσης με το 5% κατά βάρος της αρχικής μάζας, αλλά και βερμικουλίτης ποσότητας ίσης με το 5% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας.

Στον Κύκλο αυτό η διεργασία της κομποστοποίησης δεν εξελίχθηκε ομαλά. Αυτό οφείλεται στην προσθήκη μικρής ποσότητας προσθέτων (5%κ.β.). Το γεγονός αυτό δημιούργησε πολλά προβλήματα στη διεργασία. Αρχικά για να επιτευχθεί πλήρωση του αντιδραστήρα τουλάχιστον στο 80% του όγκου του (όγκου κατάλληλου για την έναρξη των διεργασιών της κομποστοποίησης), χρειάστηκε να προστεθεί αρκετά μεγαλύτερη μάζα οργανικών απορριμμάτων, σε σχέση με τους υπόλοιπους κύκλους. Αυτό ακολούθως είχε ως αποτέλεσμα το υλικό τροφοδοσίας να μην είναι ανάλαφρο και να ασκούνται μεγάλες τάσεις στους άξονες ανάδευσης, ώστε να εμποδίζεται ο κατάλληλος αερισμός του υποστρώματος, μέσω της μηχανικής ανάδευσης.. Ταυτόχρονα το αρχικό υπόστρωμα είχε μεγάλη περιεκτικότητα σε υγρασία, ενώ, λόγω της μικρής προσθήκης προσθέτου, το πορώδες του δεν ήταν κατάλληλο για το σωστό αερισμό. Από όλα τα παραπάνω εύκολα εξάγεται το συμπέρασμα πως λόγω του πολύ μικρού πορώδους και του υψηλού ποσοστού υγρασίας του αρχικού υποστρώματος, σε συνδυασμό με τη δυσκολία ανάδευσης λόγω των μεγάλων τάσεων που αναπτύχθηκαν στους άξονες ανάδευσης, δεν επετεύχθει σωστός αερισμός της διεργασίας, ενώ σε πολλά σημεία εντός του αντιδραστήρα αναπτύχθηκαν μέχρι και αναερόβιες συνθήκες.

Ο Κύκλος αυτός είναι ιδιαίτερα σημαντικός, καθώς εξάγεται το συμπέρασμα πως για να δημιουργηθούν κατάλληλες αερόβιες συνθήκες στο εσωτερικό του πρότυπου αντιδραστήρα, τα πρόσθετα πρέπει να εισάγονται σε ποσοστά άνω του 10%. Εξαιρεση αποτελεί ο περλίτης, που αναλύεται διεξοδικά στη συνέχεια.

5.2.2.2.2 Δεύτερος Κύκλος πειραμάτων Δράσης Β

Στον Κύκλο 2 χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις αντιδραστήρες με αρχικό λόγο C/N στο υπόστρωμα 20 και χρήση προσθέτων σε ποσοστό 10% κ.β. επί της αρχικής μάζας υποστρώματος.

Τροφοδοσία των αντιδραστήρων (Κύκλος 2 Δράση Β)

Στον πίνακα 5.9 παρουσιάζονται τα υλικά που τροφοδότησαν κάθε ένα από τους τέσσερις αντιδραστήρες. Οι τιμές του πίνακα είναι σε γραμμάρια. Η τροφοδοσία έγινε με γνώμονα να διατηρηθεί η αρχική αναλογία C/N κοντά στο 20. Για να επιτευχθεί ο συγκεκριμένος λόγος υπολογίστηκε θεωρητικά η εξής αναλογία:

- 50% κυτταρινούχων συστατικών (μαρούλι, σπανάκι, πορτοκάλια και λεμόνια)
- 30% πρωτεϊνούχων συστατικών (ρεβύθια και φασόλια βρασμένα)
- 20% υδατανθρακούχων συστατικών (ψωμί)

Σε κάθε αντιδραστήρα έγινε προσθήκη κάποιου πρόσθετου.

Αναλυτικά:

- Στον αντιδραστήρα1 προστέθηκε πριονίδι ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας.
- Στον αντιδραστήρα2 προστέθηκε πριονίδι ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας, αλλά και ζεόλιθος ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας.
- Στον αντιδραστήρα3 προστέθηκε πριονίδι ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας, αλλά και βερμικουλίτης ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας.
- Στον αντιδραστήρα 4 προστέθηκε περλίτης ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας.

Πίνακας 5.10 Τροφοδοσία σε g των αντιδραστήρων του δεύτερου Κύκλου Δράσης Β

Αντιδραστήρας	Ημέρα	Κυτταρινούχα				Πρωτεΐνες		Υδατάνθρακες		Ορυκτό			Σύνολο	Τελικό Σύνολο
		Μαρούλι	Σπανάκι	Πορτοκάλι	Λεμόνι	Ρεβύθι	Φασόλι	Ψωμί	Πριονίδι	Ζεόλιθος	Βερμικουλίτης	Περλίτης		
1	1	2000	2000	500	500	1500	1500	2000	1000				11000	15400
	1	400	400	100	100	300	300	400	200				2200	
	2	400	400	100	100	300	300	400	200				2200	
2	1	2000	2000	500	500	1500	1500	2000	1000	1000			12000	16800
	1	400	400	100	100	300	300	400	200	200			2400	
	2	400	400	100	100	300	300	400	200	200			2400	
3	1	2000	2000	500	500	1500	1500	2000	1000		1000		12000	16800
	1	400	400	100	100	300	300	400	200		200		2400	
	2	400	400	100	100	300	300	400	200		200		2400	
4	1	2000	2000	500	500	1500	1500	2000				1000	11000	15400
	1	400	400	100	100	300	300	400				200	2200	
	2	400	400	100	100	300	300	400				200	2200	

Δειγματοληψία – Απώλεια μάζας (Κύκλος 2 Δράση Β)

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων του δεύτερου κύκλου και συγκεκριμένα των εννέα πρώτων ημερών πραγματοποιήθηκε καθημερινή δειγματοληψία από τους τέσσερις αντιδραστήρες. Ακολούθησαν άλλες τέσσερις δειγματοληψίες ανά τρείς ημέρες. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η μάζα του υλικού που αφαιρέθηκε σε κάθε αντιδραστήρα τις μέρες της δειγματοληψίας. Οι τιμές του πίνακα είναι σε γραμμάρια.

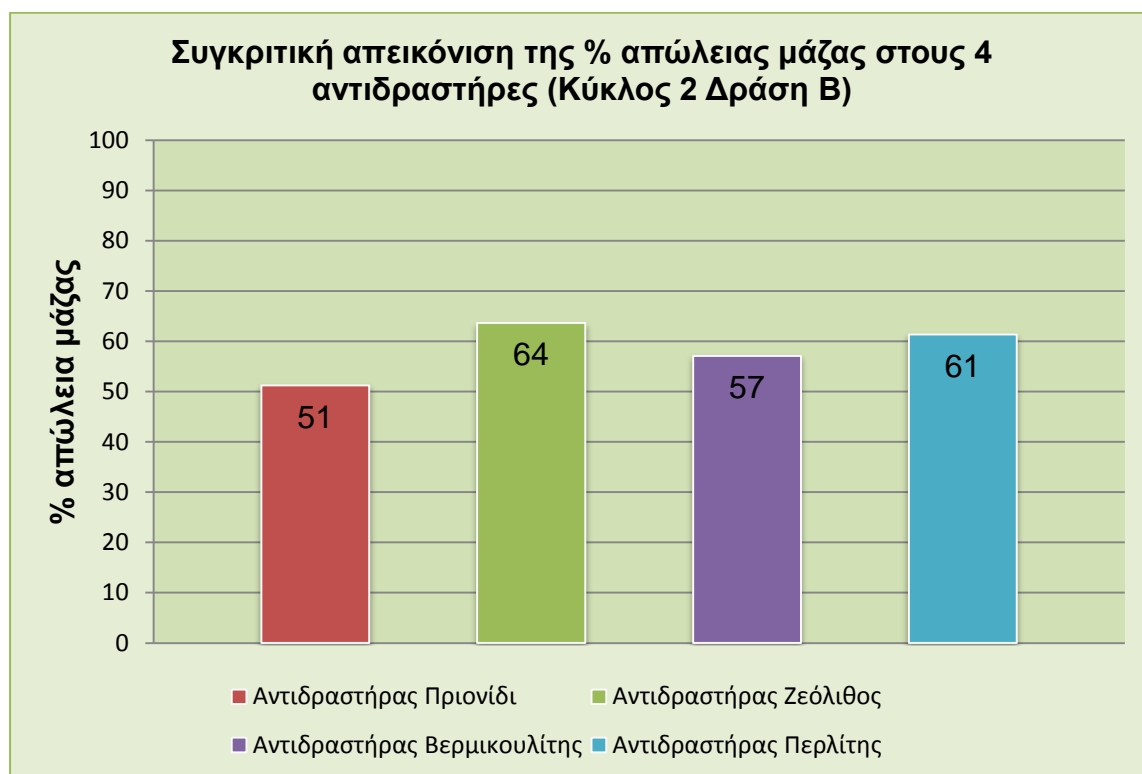
Πίνακας 5.11 Δειγματοληψία σε *g* από τους αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Β

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
1	102	133	108	117
2	137	145	138	129
3	141	112	115	114
5	118	109	133	106
6	125	102	113	117
7	129	118	110	152
8	137	120	128	115
9	103	103	122	126
11	114	134	108	137
15	138	112	132	105
18	113	105	103	110
21	105	114	113	112
ΣΥΝΟΛΟ	1461	1407	1422	1441

Οι ποσότητες που αφαιρέθηκαν από κάθε αντιδραστήρα σε συνδυασμό, με τις λοιπές απώλειες (π.χ. υγρασία), την αρχική τροφοδοσία, και την ζύγιση του τελικού προϊόντος μας δίνουν το επί τις εκατό ποσοστό απώλειας μάζας στον κάθε αντιδραστήρα. Αναλυτικότερα τα δεδομένα παρουσιάζονται στον πίνακα 5.12 και στο διάγραμμα 5.7.

Πίνακας 5.12 Ποσοστό % συνολικής μείωσης της μάζας σε κάθε αντιδραστήρα του δεύτερου κύκλου

	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
Αρχική Τροφοδοσία	15400g	16800g	16800g	15400g
Σύνολο Δειγματοληψίας	1461g	1407g	1422g	1441g
Θεωρητικά στον αντιδραστήρα	13939g	15393g	15378g	13959g
Πραγματικά στον αντιδραστήρα	6800g	5600g	6600g	5400g
Ποσοστό μείωσης της μάζας	51%	64%	57%	61%



Διάγραμμα 5.7 Συγκριτική απεικόνιση της % απώλειας μάζας στους 4 αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Β

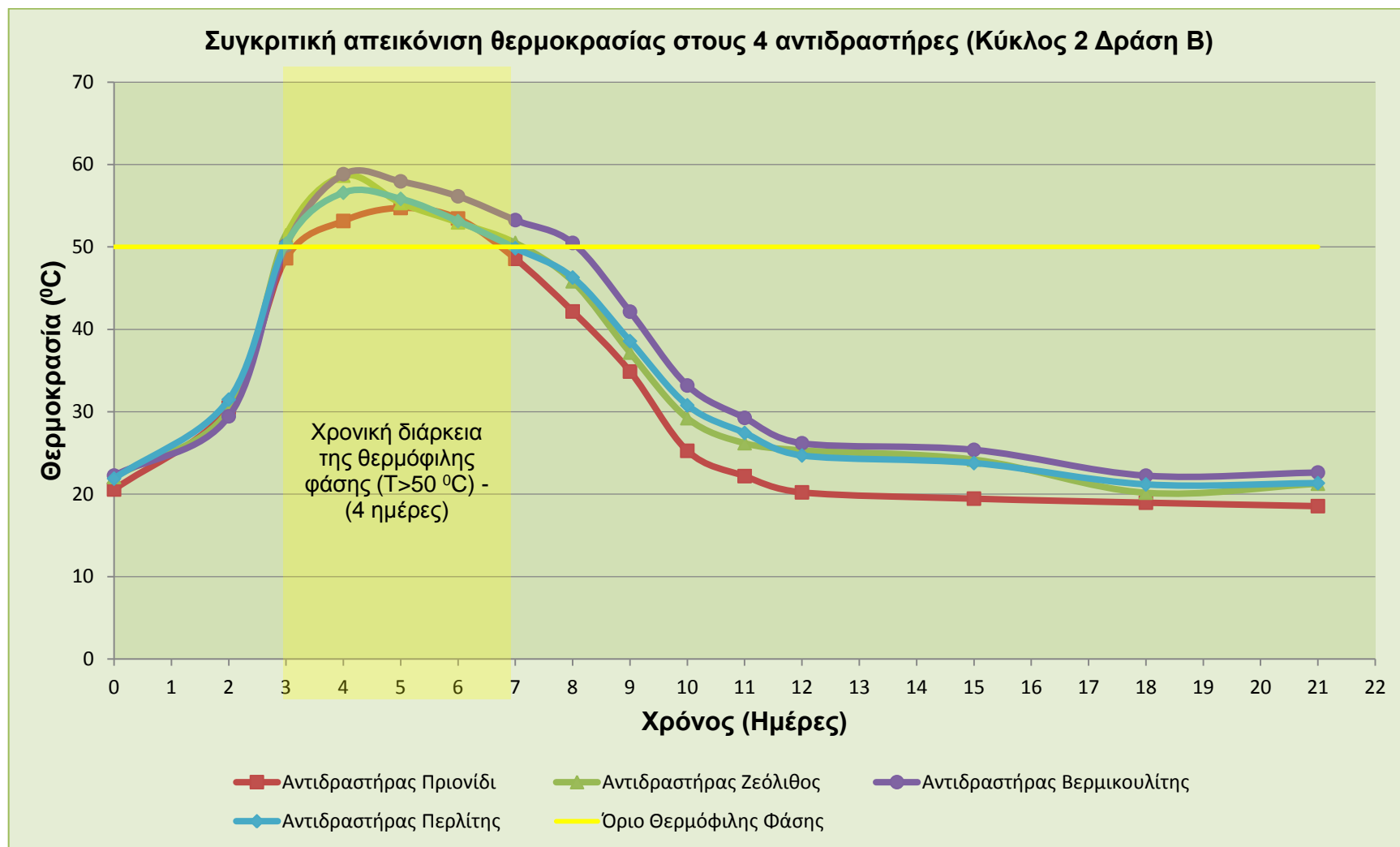
Προσδιορισμός της θερμοκρασίας του υποστρώματος (Κύκλος 2 Δράση Β)

Κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης, οι μικροοργανισμοί διασπούν την οργανική ύλη παράγοντας CO_2 , νερό, θερμότητα και χούμους, που αποτελεί και το τελικό οργανικό προϊόν. Υπό βέλτιστες συνθήκες, η κομποστοποίηση περνά από 3 φάσεις. Η πρώτη φάση είναι η μεσόφιλη. Η αποδόμηση της οργανικής ύλης αρχικά, συντελείται από τους μεσόφιλους μικροοργανισμούς, οι οποίοι αποδομούν τις εύκολα βιοδιασπώμενες οργανικές ενώσεις. Η δραστηριότητα αυτή απελευθερώνει μεγάλα ποσά ενέργειας υπό τη μορφή θερμότητας. Συνυπολογίζοντας και την ιδιότητα του κόμποστ να είναι καλός μονωτής όλη αυτή η παραγόμενη θερμότητα εγκλωβίζεται και έτσι παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας. Με την αύξηση της θερμοκρασίας και καθώς αυτή περνά τους 40 °C οι μεσόφιλοι οργανισμοί γίνονται λιγότερο ανταγωνιστικοί και τελικά κυριαρχούν οι θερμόφιλοι. Η δεύτερη φάση, λοιπόν, είναι η θερμόφιλη, η οποία χαρακτηρίζεται από υψηλές θερμοκρασίες και μπορεί να διαρκέσει από μερικές μέρες έως μερικές εβδομάδες. Τέλος η τρίτη φάση είναι μια δεύτερη μεσόφιλη ή φάση ωρίμανσης η οποία και συμβάλει στην σταθεροποίηση του κόμποστ. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές της θερμοκρασίας για όλους τους αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου.

Πίνακας 5.13 Τιμές θερμοκρασίας (°C) για τους τέσσερις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
0	20,56	22,07	22,25	21,88
2	30,48	30,18	29,44	31,47
3	48,62	51,41	50,17	50,38
4	53,14	58,64	58,82	56,57
5	54,72	55,32	57,95	55,82
6	53,44	52,97	56,14	53,12
7	48,55	50,48	53,25	49,84
8	42,16	45,82	50,48	46,28
9	34,87	37,17	42,14	38,56
10	25,25	29,21	33,18	30,77
11	22,18	26,18	29,25	27,42
12	20,21	25,31	26,17	24,68
15	19,45	24,19	25,37	23,76
18	18,96	20,17	22,24	21,17
21	18,54	21,26	22,62	21,33

Στο διάγραμμα 5.8 παρατίθεται το προφίλ της θερμοκρασίας για όλους τους αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου.



Διάγραμμα 5.8 Συγκριτική απεικόνιση θερμοκρασίας στους 4 αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Β

Στο διάγραμμα 5.8 διακρίνονται τα τρία μεταβατικά στάδια της διεργασίας. Σχετικά με τον αντιδραστήρα με πρόσθετο πριονίδι επετεύχθη η θερμόφιλη φάση η οποία ξεκίνησε με το πέρας της 3^{ης} μέρας και κράτησε μέχρι και την 7^η μέρα. Η μέγιστη θερμοκρασία που σημειώθηκε ήταν 54,72 °C. Στην συνέχεια η διεργασία πέρασε στην δεύτερη μεσόφιλη φάση στην οποία η θερμοκρασία σταθεροποιήθηκε σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Για τον αντιδραστήρα με πρόσθετο ζεόλιθο, η θερμόφιλη φάση ξεκίνησε από την 3^η κιόλας μέρα και κράτησε μέχρι και την 7^η. Η μέγιστη θερμοκρασία που σημειώθηκε ήταν 58,64 °C. Εν συνεχεία, η διεργασία πέρασε στην δεύτερη μεσόφιλη φάση στην οποία η θερμοκρασία σταθεροποιήθηκε σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Για τον αντιδραστήρα με πρόσθετο βερμικουλίτη, η θερμόφιλη φάση ξεκίνησε από την 3^η κιόλας μέρα και κράτησε μέχρι και την 8^η. Η μέγιστη θερμοκρασία που σημειώθηκε ήταν 58,82 °C. Εν συνεχεία, η διεργασία πέρασε στην δεύτερη μεσόφιλη φάση στην οποία η θερμοκρασία σταθεροποιήθηκε σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Όσον αφορά στον αντιδραστήρα με πρόσθετο περλίτη η θερμόφιλη φάση ξεκίνησε με το πέρας της 3^{ης} μέρας και κράτησε μέχρι την 7^η μέρα. Η μέγιστη θερμοκρασία που σημειώθηκε ήταν 56,57 °C. Στην συνέχεια η διεργασία πέρασε στην δεύτερη μεσόφιλη φάση στην οποία η θερμοκρασία σταθεροποιήθηκε σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα 5.8 η θερμοκρασία αυξάνεται γρήγορα και διατηρείται σε υψηλά επίπεδα για αρκετή χρονική περίοδο. Η χρονική αυτή περίοδος σε υψηλές θερμοκρασίες, ικανοποιεί τα χρονικά-θερμοκρασιακά όρια καταστροφής παθογόνων μικροοργανισμών που πιθανόν να αναπτύσσονται κατά τη διεργασία.

Προσδιορισμός της υγρασίας του υποστρώματος (Κύκλος 2 Δράση Β)

Η περιεχόμενη υγρασία στο κόμποστ εξαρτάται από το πορώδες του υποστρώματος, τον αερισμό, την θερμοκρασία και άλλους φυσικούς παράγοντες. Η υγρασία είναι ύψιστης σημασίας για όλους τους μικροοργανισμούς, αφού υποστηρίζει όλες τις μεταβολικές τους διεργασίες, επιτρέποντας την μεταφορά θρεπτικών συστατικών. Εάν η υγρασία στο υπόστρωμα κυμανθεί ανάμεσα στο 35 % με 40 % του ολικού βάρους τότε ο ρυθμός αποδόμησης επιβραδύνεται, ενώ για τιμές μικρότερες του 30% η βιολογική διεργασία σταματάει. Αντιθέτως, αν η υγρασία έχει υψηλότερη τιμή από 65 – 70 % είναι πιθανό να επικρατήσουν αναερόβιες συνθήκες, αφού το νερό καλύπτει τους πόρους και δεν αφήνει να αερισθεί επαρκώς το υλικό. Στα περισσότερα υποστρώματα συστήνεται ως κατάλληλη τιμή υγρασίας μεταξύ 45 και 65 % επί του συνολικού βάρους.

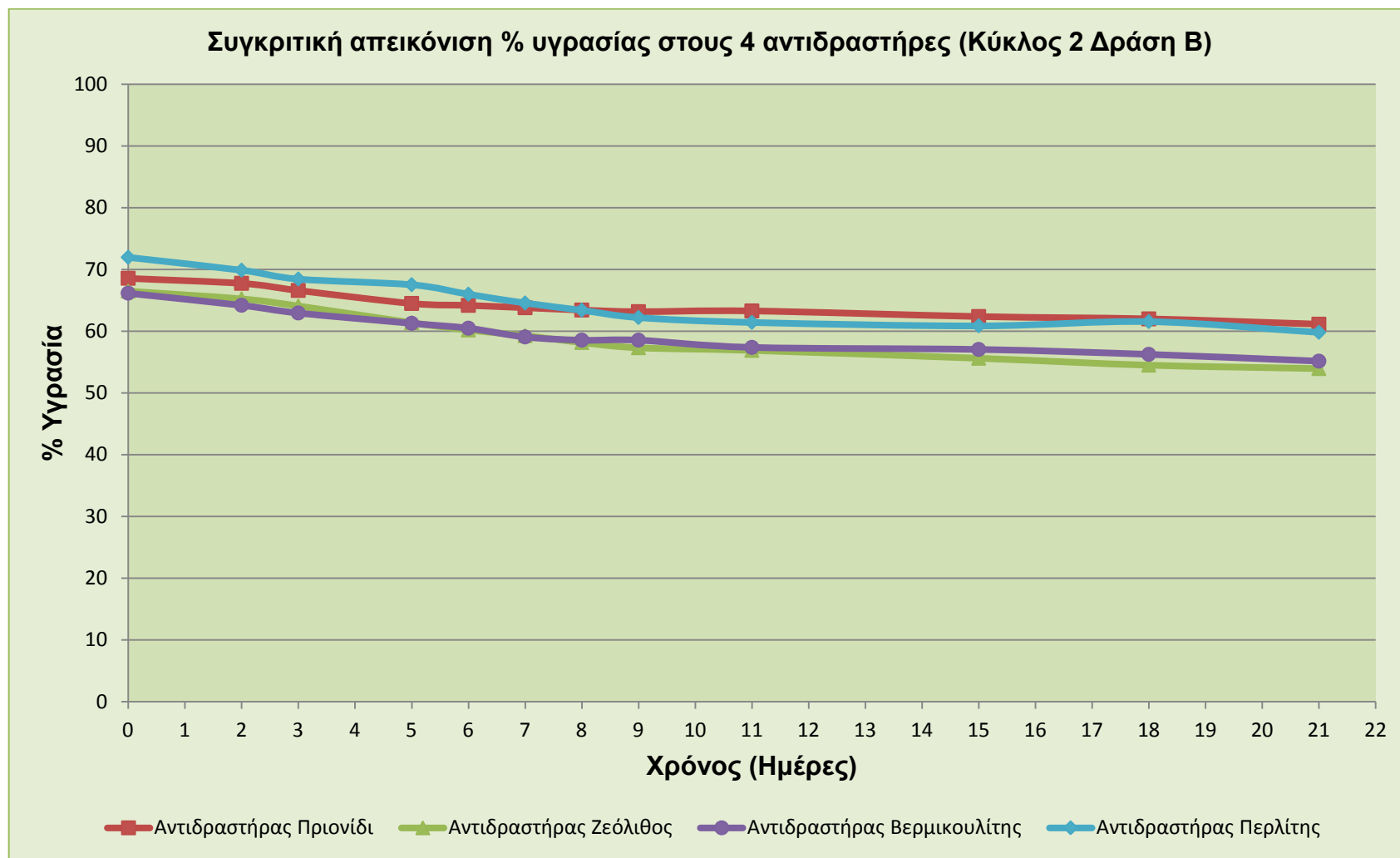
Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές της υγρασίας (%) για όλους τους αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου της Δράσης Β.

Πίνακας 5.14 Τιμές υγρασίας (%) για τους τέσσερις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
0	68,56	66,48	66,15	71,96
2	67,74	65,22	64,19	69,87
3	66,59	64,07	62,94	68,44
5	64,48	61,36	61,27	67,52
6	64,17	60,18	60,48	65,98
7	63,79	59,27	59,06	64,56
8	63,41	58,16	58,54	63,39
9	63,15	57,31	58,54	62,21
11	63,27	56,88	57,37	61,42
15	62,36	55,61	57,04	60,86
18	61,98	54,49	56,24	61,55
21	61,12	53,94	55,14	59,81

Οι καμπύλες της υγρασίας, στο διάγραμμα 5.9, που ακολουθεί, και στους τέσσερις αντιδραστήρες ξεκινούν από υψηλά αρχικά επίπεδα κοντά στο 70%, γεγονός αναμενόμενο λόγω της υψηλής υγρασίας του υλικού που χρησιμοποιήθηκε ως αρχικό υπόστρωμα. Συγκεκριμένα η αρχική υγρασία στους αντιδραστήρες ήταν αντιστοίχως 68,56%, 66,48%, 64,15%. Εξάιρεση αποτελεί ο αντιδραστήρας με πρόσθετο περλίτη που ξεκινά από υψηλότερο επίπεδο υγρασίας κοντά στο 71,96% λόγω μη προσθήκης σ' αυτόν με πρόσθετο πριονίδι. Ο αντιδραστήρας με το πριονίδι παρουσιάζει επίσης μεγάλη τιμή, και αυτό οφείλεται στο γεγονός της απουσίας κάποιου ορυκτού. Τα ορυκτά έχουν την ιδιότητα προσρόφησης της υγρασίας και αύξησης του πορώδους του υποστρώματος, με αποτέλεσμα τον καλύτερο αερισμό και συνακόλουθα τον καλύτερο έλεγχο της υγρασίας.

Στη συνέχεια λόγω της έναρξης των βιολογικών διεργασιών εκλύεται θερμότητα με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες που οδηγούν στη σταδιακή μείωση της περιεχόμενης υγρασίας. Το ποσοστό της υγρασίας στο υπόστρωμα ακολουθεί φθίνουσα πορεία κατά την διάρκεια της κομποστοποίησης και προς το τέλος της διεργασίας στον αντιδραστήρα τα προϊόντα λαμβάνουν ποσοστά 61,12%, 53,94%, 55,14 και 59,81%.



Διάγραμμα 5.9 Συγκριτική απεικόνιση % υγρασίας στους 4 αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Β

Ο αντιδραστήρας με πρόσθετο περλίτη και αυτός με πρόσθετο πριονίδι πάλι εμφανίζουν μεγαλύτερο ποσοστό υγρασίας, συγκριτικά με τους άλλους. Η ιδανική περιεχόμενη υγρασία στο τελικό κόμποστ κυμαίνεται μεταξύ 40% και 50% καθότι εξασφαλίζεται περιορισμένη μικροβιακή δραστηριότητα γεγονός επιθυμητό όταν γίνεται εναπόθεση κόμποστ στο έδαφος, ενώ σε καμία περίπτωση δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 25% καθότι δεν μπορεί να ενσωματωθεί εύκολα στο έδαφος. Οι καταγεγραμμένες πειραματικές τιμές κυμαίνονται από 53,94% μέχρι 61,12% και οφείλεται στην υψηλή αρχική υγρασία των υλικών τροφοδοσίας. Για το λόγο αυτό πριν την χρήση του κόμποστ συνιστάται να αφεθεί το τελικό προϊόν εκτός αντιδραστήρα για μια επιπλέον χρονική περίοδο ενός μήνα για την περαιτέρω μείωση της υγρασίας και ωρίμανσής του.

Προσδιορισμός του pH του υποστρώματος (Κύκλος 2 Δράση Β)

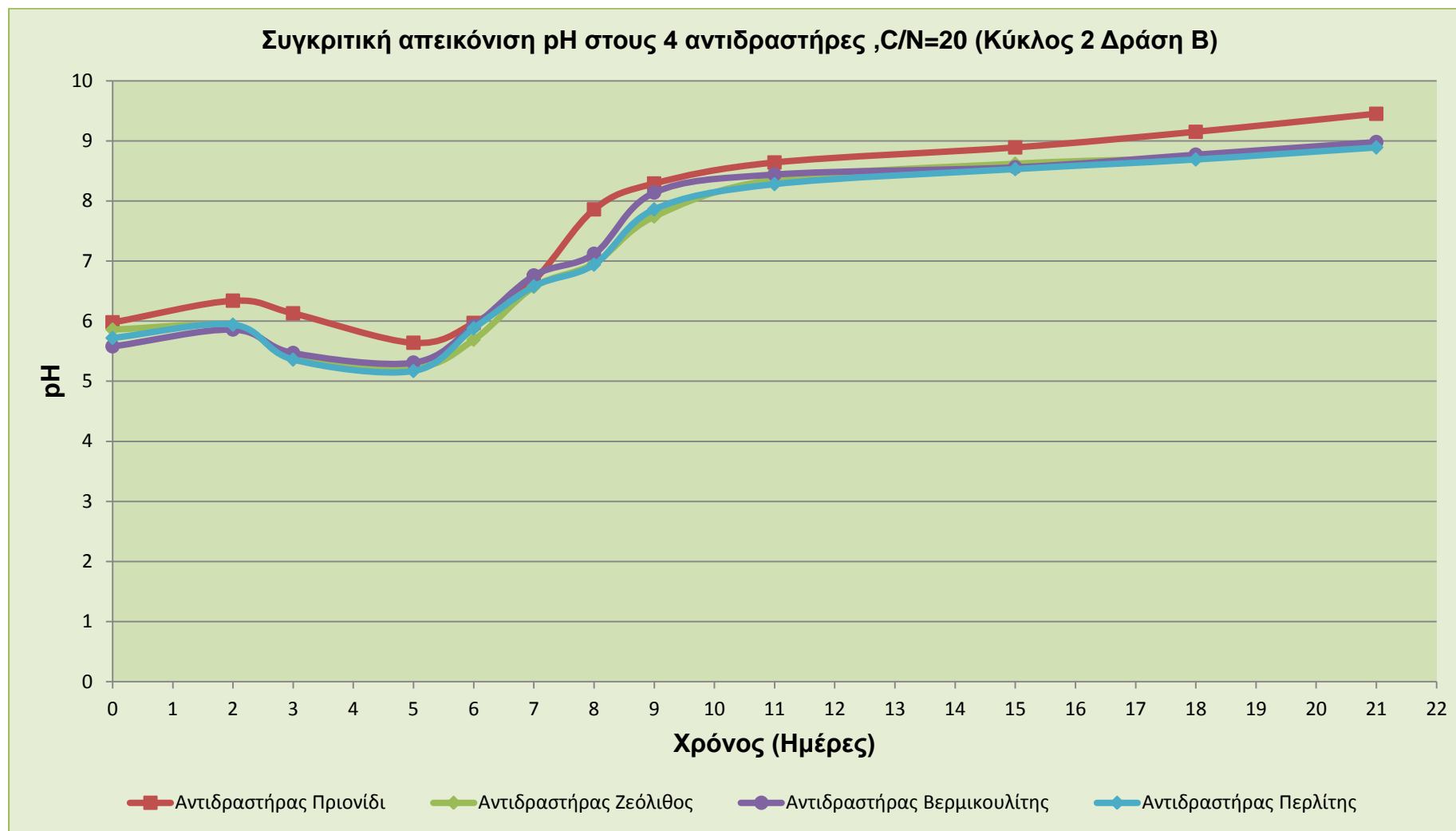
Το pH αναφέρεται στην οξύτητα ή αλκαλικότητα του υλικού, και αποτελεί εξαιρετικά σημαντική παράμετρο για την διεργασία της κομποστοποίησης. Το pH είναι αυτό που ρυθμίζει ποια είδη μικροοργανισμών θα αναπτυχθούν κατά την βιοαποδόμηση της οργανικής ύλης. Παρόλο που η διεργασία μπορεί να λάβει χώρα σε ένα μεγάλο εύρος τιμών pH , είναι επιθυμητό η τιμή του να βρίσκεται μεταξύ 6,0 και 8,5.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές του pH για όλους τους αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου της Δράσης Β..

Πίνακας 5.15 Τιμές pH για τους τέσσερις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
0	5,98	5,86	5,58	5,72
2	6,34	5,92	5,86	5,94
3	6,13	5,41	5,47	5,36
5	5,64	5,22	5,31	5,17
6	5,97	5,69	5,92	5,88
7	6,68	6,57	6,76	6,58
8	7,86	6,96	7,12	6,94
9	8,29	7,74	8,14	7,86
11	8,64	8,36	8,44	8,28
15	8,89	8,62	8,56	8,53
18	9,15	8,73	8,77	8,69
21	9,45	8,95	8,98	8,89

Στο διάγραμμα 5.10 παρουσιάζεται η πορεία της τιμής του pH για τους αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου.



Διάγραμμα 5.10 Συγκριτική απεικόνιση pH στους 4 αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Β

Στον αντιδραστήρα με το πριονίδι, το pH έχει αρχική τιμή 5,98. Η τιμή αυτή μειώνεται μέχρι και την 5^η μέρα φτάνοντας στο 5,64. Μετά αυξάνεται ραγδαία μέχρι και την 9^η μέρα όπου και σταθεροποιείται την 21^η μέρα κοντά στο 9,45. Κατά τα αρχικά στάδια λειτουργίας του κομποστοποιητή με ζεόλιθο, παρατηρείται ότι το pH του μίγματος με αρχική τιμή 5,86 παρουσιάζει μείωση μέχρι και την 5^η μέρα με χαμηλότερη τιμή την 5,22. Στην συνέχεια αυξάνεται γρήγορα έως και την 9^η μέρα όπου φαίνεται να σταθεροποιείται με μικρές αυξομειώσεις μέχρι την 21^η μέρα κοντά στο 8,95. Το pH του αντιδραστήρα με ορυκτό βερμικουλίτη έχει αρχική τιμή 5,58 και παρουσιάζει ελαφρώς ανοδική πορεία χωρίς εμφανή μείωση τις τέσσερις πρώτες μέρες, με χαμηλότερη τιμή την 5^η μέρα στο 5,31. Στην συνέχεια πραγματοποίησε απότομη άνοδο φτάνοντας κοντά στο 8,14 για να συνεχίσει την σταδιακή ανοδική του πορεία φτάνοντας τιμή κοντά στο 8,98 την 21^η μέρα. Στον αντιδραστήρα με τον περλίτη, το pH έχει αρχική τιμή 5,72. Η τιμή αυτή μειώνεται μέχρι και την 5^η μέρα φτάνοντας στο 5,17. Μετά αυξάνεται ραγδαία μέχρι και την 9^η μέρα, ενώ σταθεροποιείται μέχρι την 21^η μέρα κοντά στο 8,89. Από το διάγραμμα 5.10 παρατηρείται ότι το pH μειώνεται στις πρώτες φάσεις της βιοαποδόμησης, γεγονός που οφείλεται στη δράση οξυγενούς βακτηριακής μικροχλωρίδας που αποδομεί τις σύνθετες οργανικές ενώσεις σε οργανικά οξέα. Έπειτα αναπτύσσονται πρωτεϊνολυτικές διεργασίες (διάσπαση των οργανικών οξέων) που έχουν ως συνέπεια την παραγωγή αμμωνίας με αποτέλεσμα την αύξηση της τιμής του pH , ενώ στη συνέχεια οι τιμές του pH μειώνονται όσο προχωρεί η διεργασία της κομποστοποίησης και κατά συνέπεια η ωρίμανση του υποστρώματος. Όταν το κόμποστ ωριμάσει η τιμή του pH κυμαίνεται γύρω στο 7 ενώ το εύρος τιμών pH στο τέλος του χρόνου παραμονής στον οικιακό κομποστοποιητή κυμαίνεται γύρω στο 8. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι το προϊόν κομποστοποίησης δεν είναι πλήρως σταθεροποιημένο και απαιτείται η παραμονή του σε υπαίθριο χώρο μέχρι την πλήρη σταθεροποίηση του.

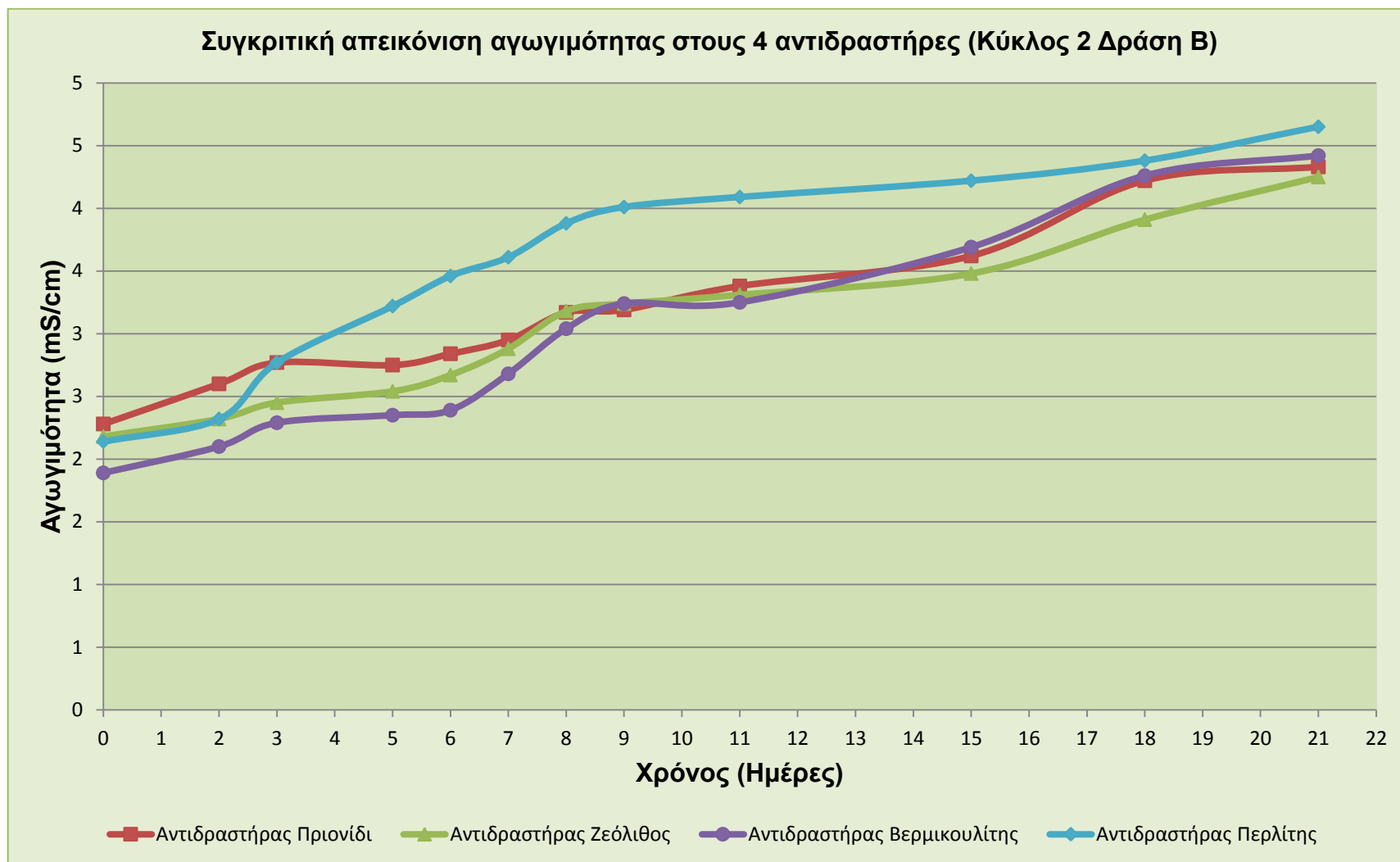
Προσδιορισμός της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του υποστρώματος (Κύκλος 2 Δράση Β)

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι ένα μέτρο του διαλυτού άλατος που περιέχεται στο κόμποστ, όπου τα διαλυτά άλατα αναφέρονται στην συγκέντρωση διαλυτών ιόντων σ' ένα διάλυμα. Η αγωγιμότητα ποικίλει και στα νούμερα και στους τύπους των ιόντων που περιέχονται στο διάλυμα και μπορεί να υποδείξει εάν ένα προϊόν είναι φυτοτοξικό όταν χρησιμοποιείται ως βελτιωτικό εδάφους. Υψηλή περιεκτικότητα σε άλας για ένα κόμποστ μπορεί να του προσδίδει υψηλή θρεπτική αξία, αλλά μπορεί και να καταστρέψει τα φυτά, ειδικά τους σπόρους ενδέχεται να κάψει τις ρίζες και να καθυστερήσει τη διαδικασία βλάστησης. Η υπερβολικά υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα ελαττώνει την ικανότητα απορρόφησης νερού από τις ρίζες και συνεπακόλουθα την θρεπτική λήψη αφού τα θρεπτικά συστατικά είναι διαλυμένα στο νερό και με αυτό μπορούν να μεταφερθούν. Αντιθέτως όμως, πολύ χαμηλά επίπεδα σε περιεκτικότητα άλατος ειδικά όπως το κάλιο, το ασβέστιο ή το μαγνήσιο μπορεί να οδηγήσουν σε χαμηλά επίπεδα γονιμότητας.

Πίνακας 5.16 Τιμές αγωγιμότητας για τους τέσσερις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου (mS/cm)

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
0	2,28	2,18	1,89	2,14
2	2,60	2,32	2,10	2,32
3	2,77	2,45	2,29	2,77
5	2,75	2,54	2,35	3,22
6	2,84	2,67	2,39	3,46
7	2,95	2,88	2,68	3,61
8	3,17	3,18	3,04	3,88
9	3,19	3,24	3,24	4,01
11	3,38	3,31	3,25	4,09
15	3,62	3,48	3,69	4,22
18	4,22	3,91	4,26	4,38
21	4,33	4,25	4,42	4,65

Στο διάγραμμα 6.5 παρουσιάζεται η εξέλιξη της τιμής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για τους αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου. Οι καμπύλες της αγωγιμότητας στους αντιδραστήρες παρουσιάζουν αύξουσα πορεία. Ξεκινούν από χαμηλές αρχικές τιμές 2,28, 2,18, 1,86 και 1,96 mS/cm για τους αντιδραστήρες με πριονίδι, ζεόλιθο, βερμικουλίτη και περλίτη αντίστοιχα και, αφού σταθεροποιηθούν μετά την 21^η ημέρα, καταλήγουν στις τιμές 4,33, 4,25, 4,42 και 4,99 mS/cm αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές βρίσκονται σε συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα σε διαφορετικής προέλευσης κόμποστ όπως αυτά μετρήθηκαν από τους J.C. Hargreaves, M.S. Adl, P.R. Warman. Στο διάγραμμα 6.5 παρατηρείται σταδιακή αύξηση της αγωγιμότητας καθόλη τη διάρκεια της κομποστοποίησης η οποία αύξηση αποδίδεται στην εκτεταμένη αποσύνθεση της οργανικής ύλης η οποία με την σειρά της έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της περιεκτικότητας του υποστρώματος σε άλατα. Το εύρος των τιμών της αγωγιμότητας των προϊόντων του αντιδραστήρα κυμαίνεται από 4,25 έως 4,99 mS/cm το οποίο είναι σύμφωνο με τη διεθνή βιβλιογραφία για αγωγιμότητα κόμποστ από αστικά στερεά απορρίμματα (εύρος 3,69 έως 7,49 mS/cm).



Διάγραμμα 5.11 Συγκριτική απεικόνιση ηλεκτρικής αγωγιμότητας στους 4 αντιδραστήρες του δευτερου κύκλου Δράσης Β

Προσδιορισμός των πτητικών στερεών (VS) στο υπόστρωμα (Κύκλος 2 Δράση Β)

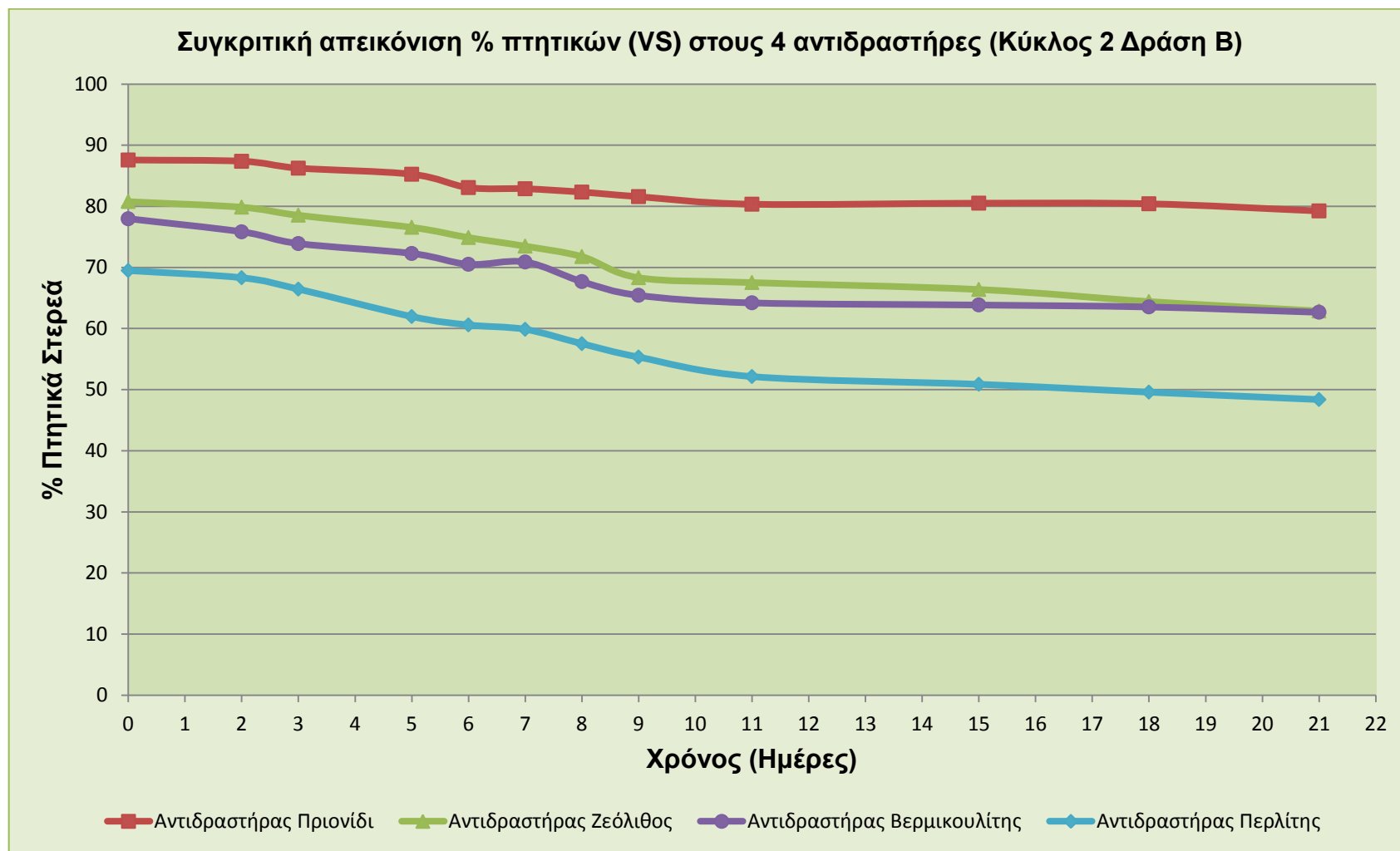
Τα πτητικά στερεά είναι το ποσοστό των ξηρών στερεών που χάνονται με ανάφλεξη στους 550 °C και αποτελούν μια παράμετρο που χρησιμοποιείται για την μέτρηση της οργανικής ύλης. Επειδή η σταθεροποίηση του κόμποστ είναι μια διαδικασία που έχει σχέση με την ποσότητα και την αποσύνθεση του οργανικού υλικού, το περιεχόμενο σε πτητικά στερεά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης της πορείας της αποσύνθεσης. Τα πτητικά στερεά είναι οι πιο άμεσα προσλήψιμες ενώσεις από τους μικροοργανισμούς που εμπεριέχονται στο υπόστρωμα. Η παρουσία τους βοηθάει στην αύξηση της μικροβιακής δραστηριότητας καθότι αποτελούν άμεση πηγή προς κατανάλωση.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές των πτητικών στερεών για όλους τους αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου.

Πίνακας 5.17 Τιμές % πτητικών στερεών για τους τέσσερις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
0	87,57	80,78	77,96	69,49
2	87,36	79,86	75,82	68,31
3	86,24	78,54	73,90	66,45
5	85,24	76,56	72,28	61,96
6	83,06	74,89	70,51	60,59
7	82,87	73,48	70,89	59,87
8	82,32	71,77	67,68	57,52
9	81,58	68,32	65,44	55,33
11	80,34	67,52	64,21	52,14
15	80,51	66,39	63,86	50,88
18	80,41	64,41	63,54	49,59
21	79,24	62,87	62,67	48,38

Στο διάγραμμα 5.12 παρουσιάζεται η πορεία της % συγκέντρωσης των πτητικών στερεών για τους αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου.



Διάγραμμα 5.12 Συγκριτική απεικόνιση των πτητικών στερεών στους 4 αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Β

Σε όλους τους αντιδραστήρες η μεγαλύτερη μείωση των πτητικών στερεών παρατηρείται από την 3^η έως την 10^η ημέρα, περίοδο κατά την οποία εμφανίζονται και οι υψηλότερες θερμοκρασίες (θερμόφιλη φάση), ως αποτέλεσμα της έντονης μεταβολικής δραστηριότητας στη φάση αυτή. Η μεγαλύτερη αρχική τιμή του ποσοστού των πτητικών παρατηρείται στον αντιδραστήρα με πρόσθετο πριονίδι, ενώ η μικρότερη στον αντιδραστήρα με πρόσθετο περλίτη λόγω απουσίας πριονιδιού. Παρατηρείται επίσης, ότι στον αντιδραστήρα με πρόσθετο πριονιδιού υπάρχει η μικρότερη κατανάλωση πτητικών η οποία επαληθεύεται και από την καμπύλη του οργανικού άνθρακα. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα πιθανής μη ορθής ανάπτυξης των διεργασιών. Αντίθετα, στους άλλους τρεις αντιδραστήρες και κυρίως στον αντιδραστήρα με πρόσθετο περλίτη παρατηρείται ταχεία μείωση των πτητικών στερεών και σταθεροποίηση τους μετά το πέρας της διεργασίας. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ορθής διεξαγωγής των διεργασιών της κομποστοποίησης.

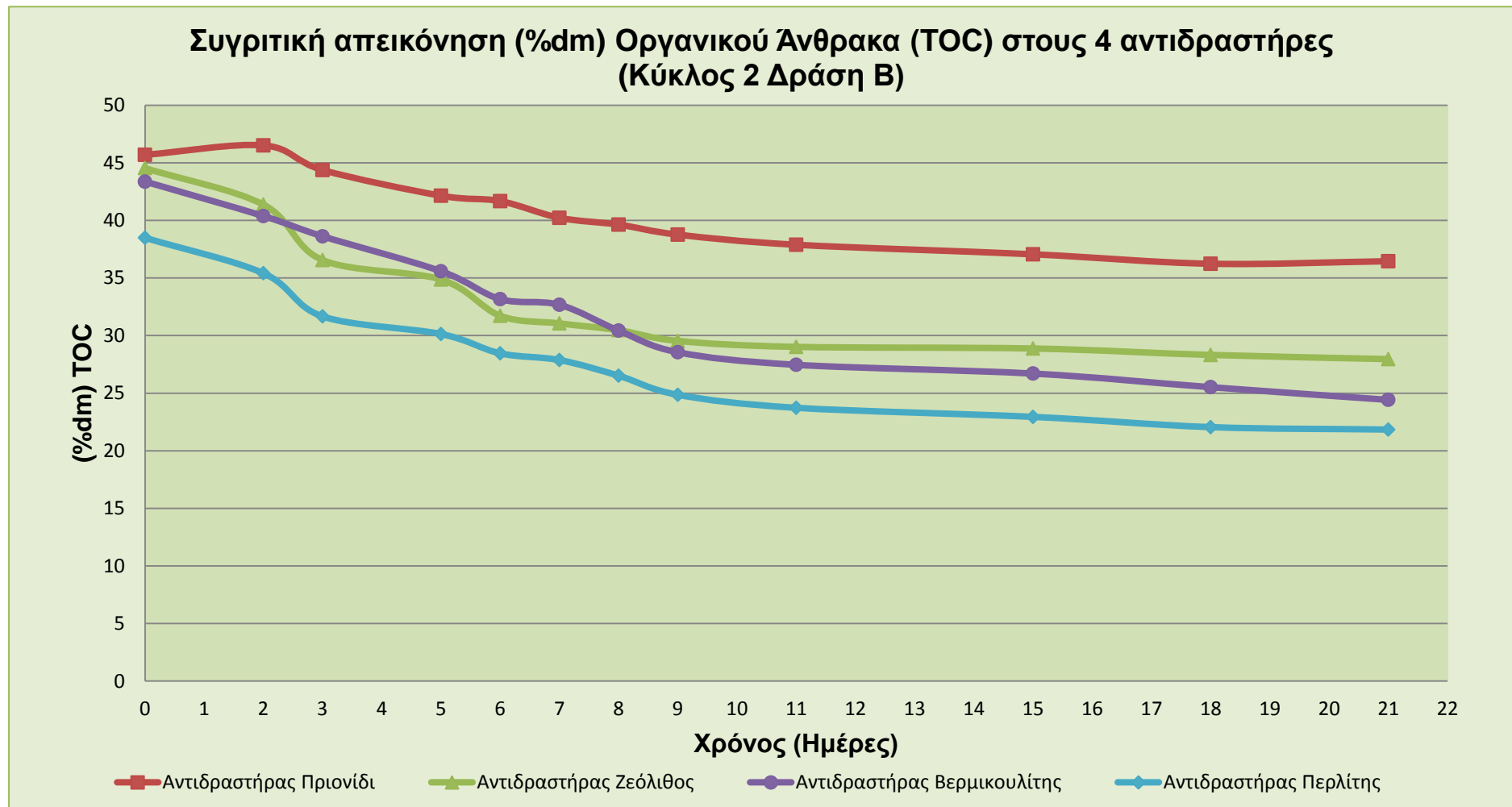
Προσδιορισμός του ολικού οργανικού άνθρακα στο υπόστρωμα (Κύκλος 2 Δράση Β)

Κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης ένα μέρος της οργανικής ύλης μετατρέπεται σε CO_2 , NH_3 και νερό. Η απώλεια άνθρακα συντελείται κατά την βιοοξείδωση του οργανικού άνθρακα προς CO_2 . Το CO_2 μπορεί να ελευθερωθεί με την μορφή αερίου ή να είναι διαλυμένο σε υγρό σχηματίζοντας ανθρακικό οξύ (H_2CO_3), όξινο ανθρακικό άλας (HCO_3^-) και ανθρακικό άλας (CO_3^{2-}). Το υπόλοιπο μέρος του οργανικού άνθρακα μετατρέπεται σε χουμικές ενώσεις. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές του ολικού οργανικού άνθρακα (%*dm*) για όλους τους αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου.

Πίνακας 5.18 Τιμές ολικού οργανικού άνθρακα για τους τέσσερις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
0	45,70	44,55	43,37	38,50
2	46,52	41,38	40,38	35,42
3	44,38	36,56	38,62	31,67
5	42,15	34,87	35,59	30,14
6	41,68	31,72	33,17	28,46
7	40,23	31,06	32,68	27,88
8	39,64	30,47	30,44	26,52
9	38,77	29,54	28,56	24,86
11	37,89	29,02	27,47	23,73
15	37,06	28,88	26,71	22,94
18	36,24	28,32	25,53	22,05
21	36,46	27,96	24,43	21,84

Στο διάγραμμα 5.13 διακρίνονται οι τιμές του οργανικού άνθρακα για τους αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης.



Διάγραμμα 5.13 Συγκριτική απεικόνιση (%dm) οργανικού άνθρακα (TOC) στους 4 αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Β

Ο αντιδραστήρας με το πριονίδι, ξεκινά από την τιμή 45,7% και με φθίνουσα πορεία φθάνει την 21^η μέρα στο 36,46% , γεγονός που σημαίνει ότι το τελικό προϊόν, παρά το μικρό ποσοστό διάσπασης του άνθρακα, έχει μικρή ποσότητα άνθρακα. Ο ολικός οργανικός άνθρακας για τον αντιδραστήρα με ζεόλιθο ξεκινάει από 44,55% και φθίνει με πολύ γρήγορο ρυθμό λόγω της βιοαποδόμησης της οργανικής ύλης. Τελικά την 21^η ημέρα από την έναρξη του κύκλου η περιεκτικότητα του υποστρώματος σε οργανικό άνθρακα σταθεροποιείται στο 27,96%. Σχετικά με τον αντιδραστήρα όπου χρησιμοποιήθηκε πρόσθετο βερμικουλίτης ο ολικός άνθρακας ξεκινάει από 43,37% και φθίνει με πολύ γρήγορο ρυθμό λόγω της βιοαποδόμησης. Τελικά σταθεροποιείται στο 24,43% την 21^η ημέρα. Ο αντιδραστήρας με τον περλίτη, ξεκινά από τη τιμή 38,50% και με φθίνουσα πορεία φθάνει την 21^η μέρα στο 21,84%. Πρέπει να σημειωθεί ότι η μείωση του συνολικού οργανικού άνθρακα στην περίπτωση της χρήσης ορυκτών ήταν σαφέστατα μεγαλύτερη απ' ό τι στον αντιδραστήρα που περιείχε μόνο πριονίδι. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι η χρήση ορυκτών επιβοηθεί και επιταχύνει την βιοαποδόμηση της οργανικής ύλης βελτιώνοντας τις συνθήκες αερισμού και ύγρανσης του υποστρώματος κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης. Οι υψηλές αυτές τιμές ήταν αναμενόμενες λόγω του μεγάλου αρχικού ποσοστού των πτητικών που παρατηρήθηκε στον αντιδραστήρα του πριονιδιού. Παρατηρείται επίσης, ότι στον αντιδραστήρα με πρόσθετο πριονίδι υπάρχει η μικρότερη κατανάλωση οργανικού άνθρακα η οποία επαληθεύεται και από την καμπύλη των πτητικών. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα πιθανής μη ορθής ανάπτυξης των διεργασιών. Αντίθετα, στους άλλους τρεις αντιδραστήρες και κυρίως στον αντιδραστήρα με πρόσθετο περλίτη παρατηρείται ταχεία μείωση του οργανικού άνθρακα και σταθεροποίηση τους μετά το πέρας της διεργασίας. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ορθής διεξαγωγής των διεργασιών της κομποστοποίησης.

Προσδιορισμός του ολικού αζώτου κατά Kjeldahl στο υπόστρωμα (Κύκλος 2 Δράση Β)

Το άζωτο αποτελεί συστατικό των πρωτεϊνών, των νουκλεϊκών οξέων, των αμινοξέων και των ενζύμων και είναι ύψιστης σημασίας για την μικροβιακή ανάπτυξη. Κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης το N μεταβολίζεται κυρίως σε NH_3 , ενώ οι μη διαλυτές ενώσεις αζώτου κατά την κομποστοποίηση μετατρέπονται σε διαλυτές μορφές που είναι πιο εύκολα διαθέσιμες για τις μεταβολικές δραστηριότητες. Οι αέριες απώλειες του αζώτου οφείλονται κυρίως στην έκλυση NH_3 , αλλά μπορεί να οφείλονται και στην έκλυση νιτρικών ιόντων και νιτρικών οξέων.

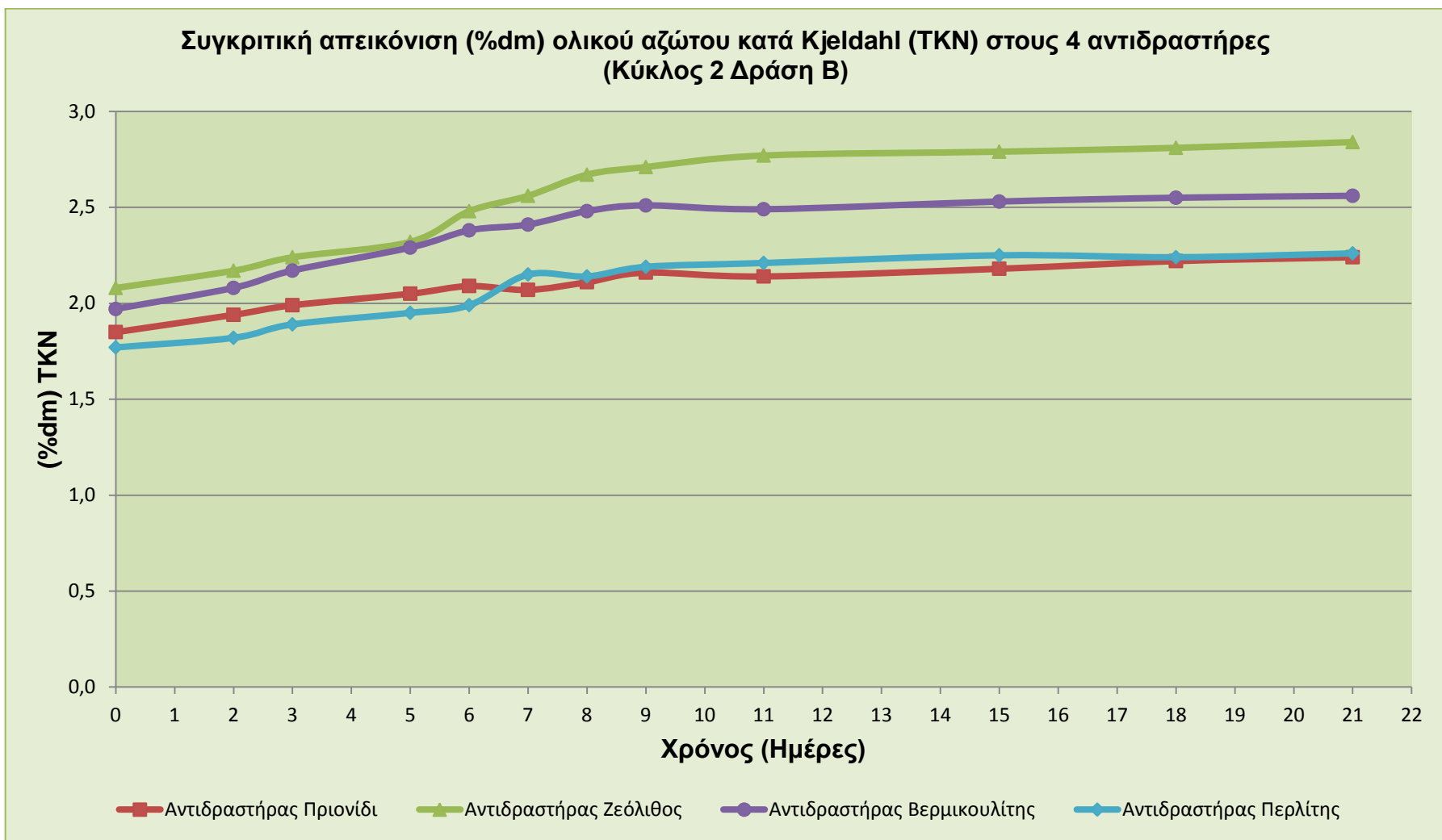
Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές του TKN (% dm) για όλους τους αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου της Δράσης Β.

Πίνακας 5.19 Τιμές %dm TKN για τους τέσσερις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
0	1,85	2,08	1,97	1,77
2	1,94	2,17	2,08	1,82
3	1,99	2,24	2,17	1,89
5	2,05	2,32	2,29	1,95
6	2,09	2,48	2,38	1,99
7	2,07	2,56	2,41	2,15
8	2,11	2,67	2,48	2,14
9	2,16	2,71	2,51	2,19
11	2,14	2,77	2,49	2,21
15	2,18	2,79	2,53	2,25
18	2,22	2,81	2,55	2,24
21	2,24	2,84	2,56	2,26

Στο διάγραμμα 5.14 παρουσιάζεται η εξέλιξη της %dm τιμής του ολικού αζώτου κατά Kjeldahl για τους αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου της Δράσης Β.

Παρατηρείται η αύξουσα πορεία του αζώτου σε ποσοστό επί ξηρής μάζας επειδή υπάρχει μεγαλύτερος ρυθμός μείωσης του ποσοστού του οργανικού άνθρακα. Ο αντιδραστήρας με πρόσθετο πριονίδι ξεκινά με ποσοστό αζώτου στο 1,85% διατηρώντας αύξουσα πορεία για να καταλήξει την 21^η ημέρα στο 2,24%. Ο αντιδραστήρας με ζεόλιθο ξεκινά με ποσοστό αζώτου στο 2,08% διατηρώντας αύξουσα πορεία για να καταλήξει την 21^η ημέρα στο 2,84%. Ο αντιδραστήρας με πρόσθετο βερμικουλίτη ξεκινά με ποσοστό αζώτου στο 1,97% και ακολουθώντας αύξουσα πορεία καταλήγει στο 2,56% την 21^η μέρα. Ο αντιδραστήρας με πρόσθετο περλίτη αρχικά έχει 1,77% και έπειτα από την ανοδική πορεία καταλήγει την 21^η ημέρα στο 2,26%. Παρατηρείται ότι το ποσοστό αζώτου στο κόμποστ με πρόσθετο ζεόλιθου είναι αυξημένο. Αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί από το γεγονός ότι ο ζεόλιθος έχει την ιδιότητα να κατακρατά την αμμωνία NH_3 οπότε μειώνονται και οι απώλειες του αζώτου μέσω της αέριας φάσης.



Διάγραμμα 5.14 Συγκριτική απεικόνιση του (%dm) ολικού αζώτου κατά kjeldahl στους 4 αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου της Δράσης Β κύκλου

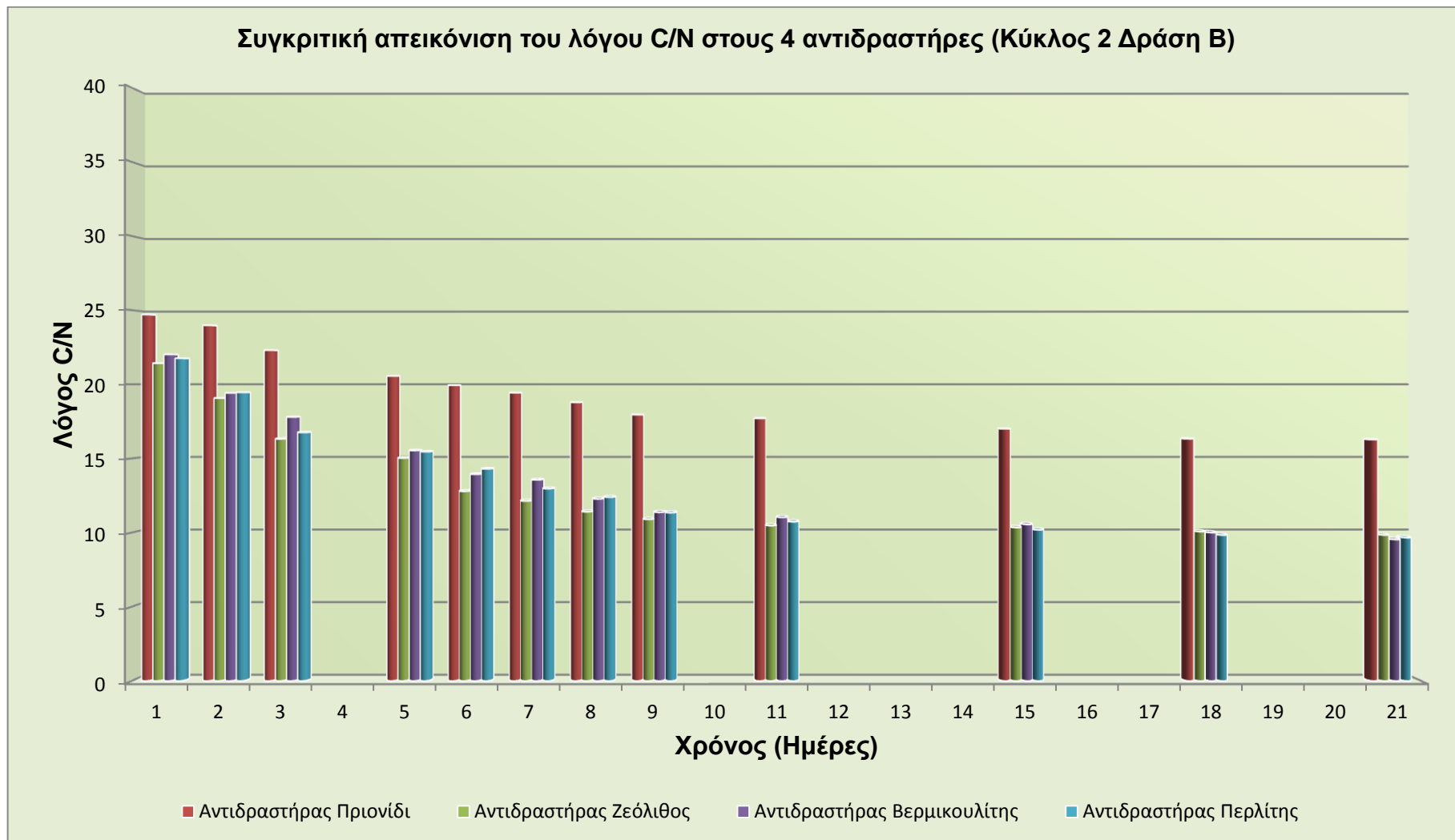
Προσδιορισμός του λόγου C/N στο υπόστρωμα (Κύκλος 2 Δράση Β)

Από ένα σύνολο στοιχείων που χρειάζονται οι μικροοργανισμοί για την αποδόμηση, ο άνθρακας και το άζωτο είναι από τα πλέον βασικά. Ο άνθρακας προσφέρει την πηγή ενέργειας ενώ το άζωτο είναι βασικό συστατικό των πρωτεϊνών τα οποία είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών υπεύθυνων για την διεξαγωγή της κομποστοποίησης. Κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης είναι βασικό να καθοριστεί η περιεκτικότητα σε θρεπτικά συστατικά του μίγματος. Αν ο λόγος C/N του οργανικού υλικού είναι μεγαλύτερος από 40 προκαλείται μια αργή αποσύνθεση που ευνοεί απώλειες αζώτου. Σε αυτή την περίπτωση οι μικροοργανισμοί υποχρεούνται να αναπτύσσονται σε διαδοχικούς βιολογικούς κύκλους, οξειδώνοντας έτσι αργά το πλεόνασμα του άνθρακα μέχρι να φέρουν λόγο σε ευνοϊκές τιμές για τον μεταβολισμό τους. Στην περίπτωση όπου το αρχικό οργανικό υλικό παρουσιάζει χαμηλή αναλογία C/N τότε ευνοούνται απώλειες αζώτου σαν αμμωνία. Η αναλογία C/N παρακολουθείται πειραματικά ανά ημέρα, για τις πρώτες δέκα ημέρες λειτουργίας και τρεις φορές την εβδομάδα μέχρι το πέρας λειτουργίας του αντιδραστήρα, για τον πλήρη έλεγχο της διεργασίας. Ο δεύτερος κύκλο της Δράσης Β ξεκινά από αρχικό λόγο κοντά στο 20. Η επίτευξη ενός ικανοποιητικού λόγου C/N στο αρχικό υπόστρωμα συνίσταται κυρίως στην εμπειρία. Αν και υπάρχουν πρότυποι πίνακες στους οποίους εμφανίζεται ο λόγος C/N για τα διάφορα ζυμώσιμα απορρίμματα, ο σωστός συνδυασμός τους παραμένει εξαιρετικά δύσκολος. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τιμές της αναλογίας C/N για όλους τους αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου.

Πίνακας 5.20 Τιμές C/N για τους τέσσερις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
1	24,70	21,42	22,02	21,75
2	23,98	19,07	19,41	19,46
3	22,30	16,32	17,80	16,76
5	20,56	15,03	15,54	15,46
6	19,94	12,79	13,94	14,30
7	19,43	12,13	13,56	12,97
8	18,79	11,41	12,27	12,39
9	17,95	10,90	11,38	11,35
11	17,71	10,48	11,03	10,74
15	17,00	10,35	10,56	10,20
18	16,32	10,08	10,01	9,84
21	16,28	9,85	9,54	9,66

Στο διάγραμμα 5.15 παρατίθενται οι λόγοι C/N για τους αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Β.



Διάγραμμα 5.15 Συγκριτική απεικόνιση του λόγου C/N στους 4 αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου της Δράσης Β κύκλου

Ο αντιδραστήρας με πριονίδι ξεκινά με λόγο 24,70 και μειώνεται μέχρι την τιμή 16,28. Ο αντιδραστήρας με ζεόλιθο έχει αρχική τιμή 21,42. Παρατηρείται ταχεία μείωση του λόγου και σταθεροποίηση αυτού την 21^η ημέρα. Από την 2^η ημέρα ο λόγος έχει πέσει κάτω από την τιμή 20 και συγκεκριμένα στο 19,07. Ο αντιδραστήρας με βερμικουλίτη ξεκινά με λόγο 22,02. Ακολουθεί μείωση και μάλιστα από την 2^η μέρα ο λόγος πέφτει κάτω από το 20 και συγκεκριμένα στο 19,41. Τέλος, ο αντιδραστήρας με περλίτη ξεκινά με λόγο 21,75. Παρουσιάζεται η ίδια τάση μείωσης ενώ ο λόγος πέφτει κάτω από την τιμή 20, και συγκεκριμένα στο 19,46 από την 2^η μέρα. Παρατηρείται ότι οι αντιδραστήρες όπου είχε προστεθεί φυσικό ορυκτό ως πρόσθετο εμφάνισαν χαμηλότερες τιμές C/N γεγονός που οφείλεται στην μεγαλύτερη μείωση συνολικού οργανικού άνθρακα καθόλη τη διάρκεια της διεργασίας. Με βάση την διεθνή βιβλιογραφία το ώριμο κόμποστ από οικιακά οργανικά απόβλητα πρέπει να έχει λόγο C/N από 10 – 20 για να θεωρηθεί καλής ποιότητας. Εντός του εύρους των τιμών αυτών, βρίσκεται ο λόγος στο παραγόμενο τελικό προϊόν και των τεσσάρων αντιδραστήρων αναδεικνύοντας την βέλτιστη ποιότητά του ως προς αυτήν την παράμετρο.

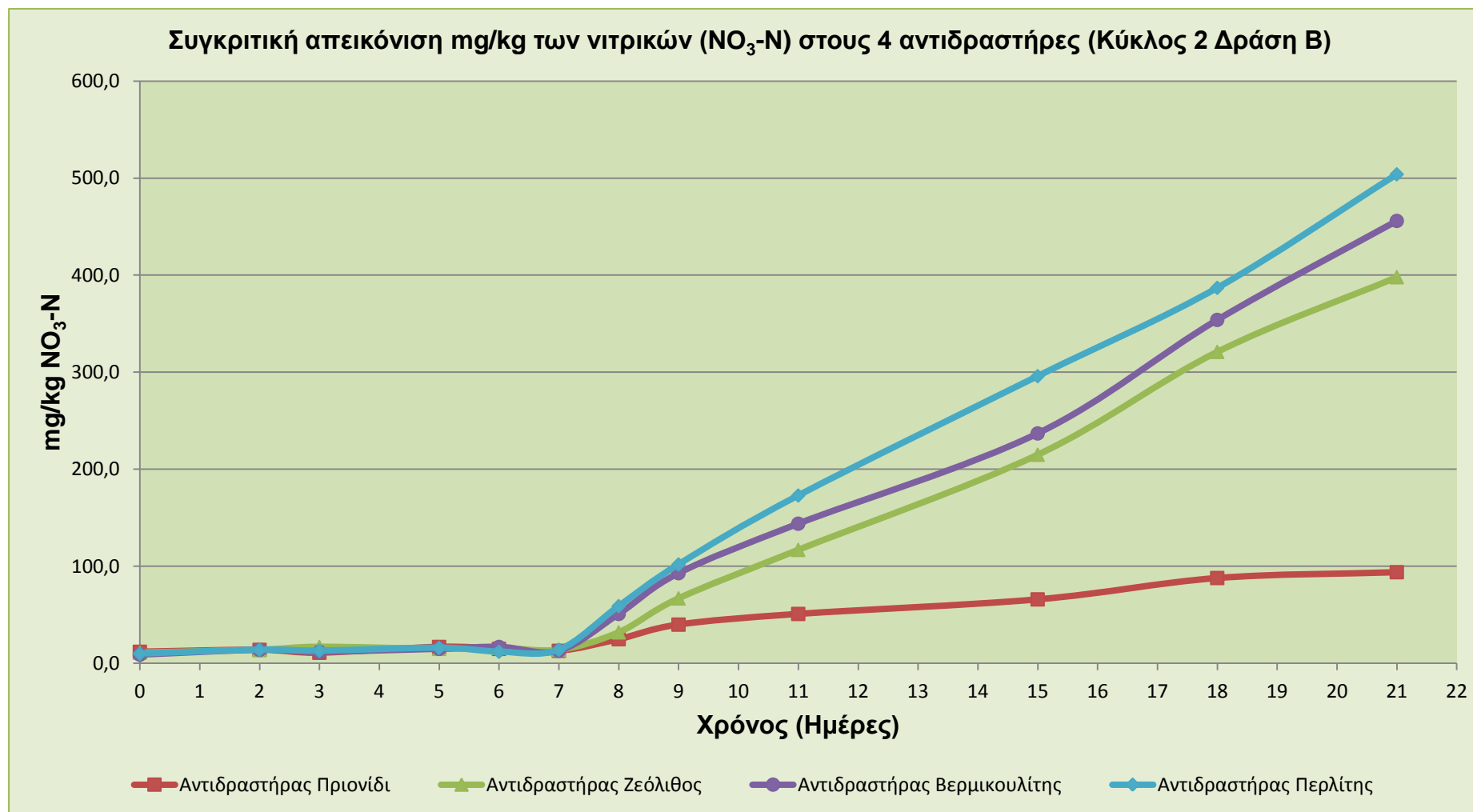
Προσδιορισμός νιτρικών ($NO_3^- - N$) και αμμωνιακών ($NH_4^+ - N$) στο υπόστρωμα (Κύκλος 2 Δράση Β)

Η ποσότητα των νιτρικών στο τελικό προϊόν είναι σημαντική, γιατί καθορίζει τον λόγο $(NH_4^+ - N) / (NO_3^- - N)$ που αποτελεί μία από τις παραμέτρους ένδειξης της ωριμότητας του τελικού προϊόντος. Τα νιτρικά αυξάνονται κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης μετά τη θερμόφιλη φάση κατά την αποδόμηση των αμμωνιακών που έχουν δημιουργηθεί κατά τη φάση αυτή.

Στον πίνακα 5.21 παρατίθενται οι τιμές των νιτρικών για τους τέσσερις αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου.

Πίνακας 5.21 Τιμές $NO_3^- - N$ σε mg/kg για τους τέσσερις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
0	12,00	11,00	9,00	10,00
2	14,00	14,00	14,00	14,00
3	11,00	17,00	12,00	13,00
5	17,00	15,00	15,00	16,00
6	15,00	16,00	17,00	12,00
7	13,00	14,00	13,00	14,00
8	25,00	32,00	51,00	59,00
9	40,00	67,00	93,00	102,00
11	51,00	117,00	144,00	173,00
15	66,00	215,00	237,00	296,00
18	88,00	321,00	354,00	387,00
21	94,00	398,00	456,00	504,00



Διάγραμμα 5.16 Συγκριτική απεικόνιση των νιτρικών $NO_3^- - N$ στους 4 αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου της Δράσης Β

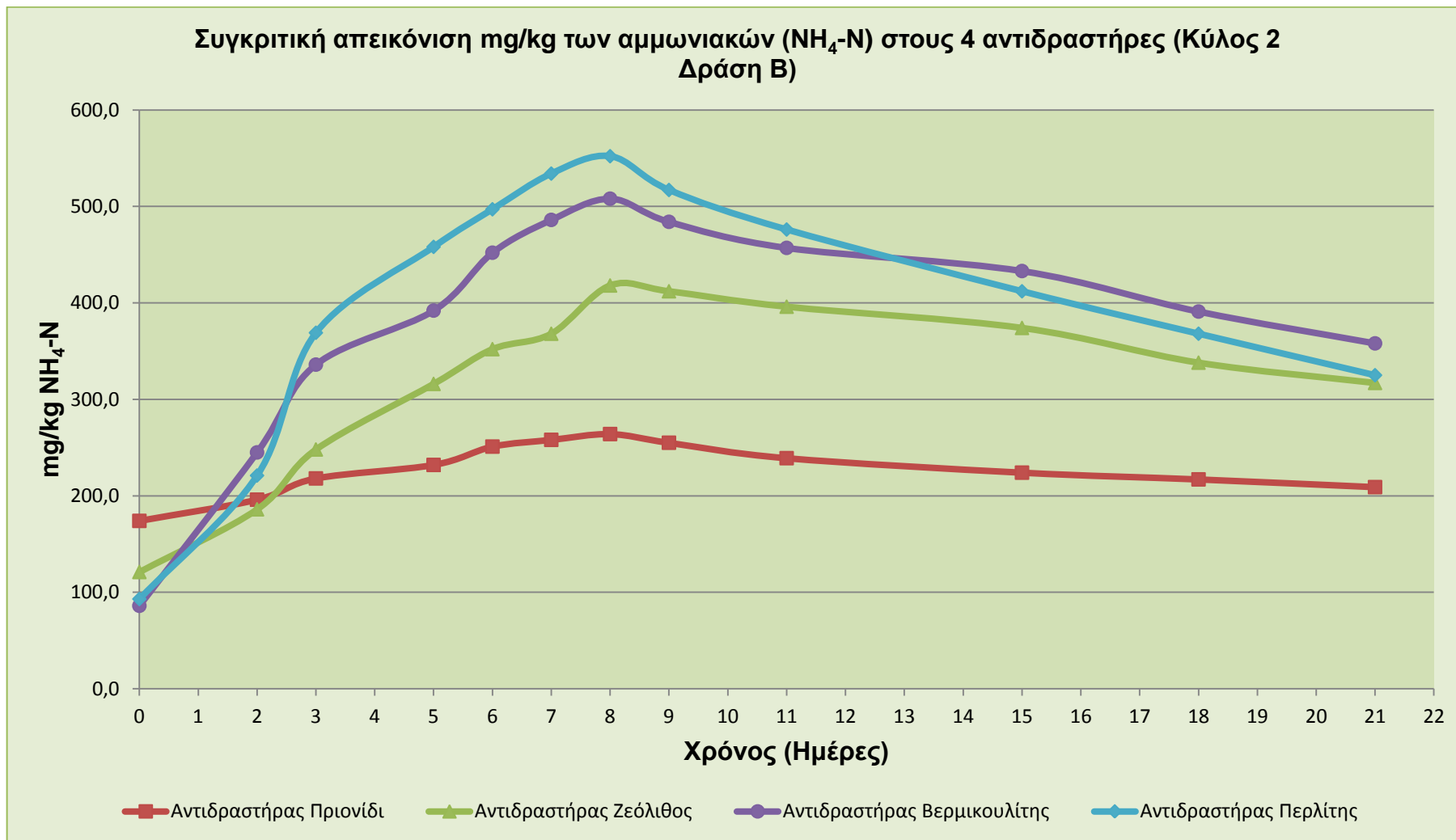
Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζεται η αναμενόμενη αύξηση των νιτρικών μετά τη θερμόφιλη φάση. Οι τελικές τιμές είναι οι αναμενόμενες σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, με εξαίρεση τις τιμές νιτρικών του αντιδραστήρα με πρόσθετο πριονίδι. Στον αντιδραστήρα αυτόν είναι προφανές πως η διεργασία δεν εξελίχθηκε εντελώς ομαλά, γεγονός που αποδεικνύεται από το σύνολο το διαγραμμάτων που παρουσιάστηκαν.

Κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης και ειδικότερα κατά τη θερμόφιλη φάση σχηματίζονται αμμωνιακά. Η δημιουργία τους εξαρτάται κατά κύριο λόγο απ' το αρχικό υπόστρωμα και συγκεκριμένα απ' το διαθέσιμο άζωτο των αρχικών υλικών. Κατά τη θερμόφιλη φάση αυξάνεται η συγκέντρωση των αμμωνιακών λόγω της διάσπασης του αζώτου του αρχικού υποστρώματος. Εν συνεχεία, η συγκέντρωση των αμμωνιακών μειώνεται λόγω της μετατροπής τους σε νιτρικά. Υψηλές συγκεντρώσεις αμμωνιακών επηρεάζουν το τελικό προϊόν και το καθιστούν αδύνατο για χρήση στη γεωργία.

Στον πίνακα 5.22 παρατίθενται οι τιμές των αμμωνιακών για τους τέσσερις αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου.

Πίνακας 5.22 Τιμές $NH_4^+ - N$ σε mg/kg για τους τέσσερις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
0	174	121	86	93
2	196	186	245	221
3	218	248	336	369
5	232	316	392	458
6	251	352	452	497
7	258	368	486	534
8	264	418	508	552
9	255	412	484	517
11	239	396	457	476
15	224	374	433	412
18	217	338	391	368
21	209	317	358	325



Διάγραμμα 5.17 Συγκριτική απεικόνιση των αμμωνιακών $NH_4^+ - N$ στους 4 αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου της Δράσης Β

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται η αύξηση των αμμωνιακών κατά τη διάρκεια της θερμόφιλης φάσης. Παρατηρείται, επίσης, ιδιαίτερα μικρή αύξηση των τιμών στον αντιδραστήρα με πρόσθετο πριονίδι κατά τη θερμόφιλη φάση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι δεν πραγματοποιήθηκε επαρκής διάσπαση του αζώτου του αρχικού υποστρώματος. Αντιθέτως, στους αντιδραστήρες που χρησιμοποιήθηκαν ορυκτά, η πορεία των αμμωνιακών είναι αναμενόμενη καθώς η συγκέντρωσή τους αυξάνεται κατά τη θερμόφιλη φάση, αρκετά, και έπειτα μειώνεται λόγω μετατροπής τους σε νιτρικά. Η πορεία αυτή είναι ενδεικτική της ορθής διεξαγωγής της διεργασίας.

5.2.2.2.3 Τρίτος Κύκλος πειραμάτων Δράσης Β

Στον Κύκλο 3 χρησιμοποιήθηκαν 4 αντιδραστήρες με αρχικό λόγο C/N στο υπόστρωμα 30 και χρήση προσθέτων σε ποσοστό 10% κ.β. επί της αρχικής μάζας υποστρώματος.

Τροφοδοσία των αντιδραστήρων (Κύκλος 3 Δράση Β)

Στον πίνακα 5.22 παρουσιάζονται τα υλικά που τροφοδότησαν κάθε ένα από τους τέσσερις αντιδραστήρες. Οι τιμές του πίνακα είναι σε γραμμάρια. Η τροφοδοσία έγινε με γνώμονα να διατηρηθεί η αρχική αναλογία C/N κοντά στο 30. Για να επιτευχθεί ο συγκεκριμένος λόγος υπολογίστηκε θεωρητικά η εξής αναλογία:

- 60% κυτταρινούχων συστατικών (μαρούλι, σπανάκι, πορτοκάλια και λεμόνια)
- 20% πρωτεϊνούχων συστατικών (ρεβύθια και φασόλια βρασμένα)
- 20% υδατανθρακούχων συστατικών (ψωμί)

Σε κάθε αντιδραστήρα έγινε προσθήκη κάποιου πρόσθετου.

- Στον πρώτο αντιδραστήρα προστέθηκε πριονίδι ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας.
- Στον δεύτερο αντιδραστήρα προστέθηκε πριονίδι ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας, αλλά και ζεόλιθος ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας.
- Στον τρίτο αντιδραστήρα προστέθηκε πριονίδι ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας, αλλά και βερμικουλίτης ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας.
- Στον τέταρτο αντιδραστήρα προστέθηκε περλίτης ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας.

Πίνακας 5.23 Τροφοδοσία σε g των αντιδραστήρων του τρίτου κύκλου της Δράσης Β

Αντιδραστήρας	Ημέρα	Κυτταρινούχα				Πρωτεΐνες		Υδατάνθρακες		Ορυκτό			Σύνολο	Τελικό Σύνολο
		Μαρούλι	Σπανάκι	Πορτοκάλι	Λεμόνι	Ρεβύθι	Φασόλι	Ψωμί	Πριονίδι	Ζεόλιθος	Βερμικουλίτης	Περλίτης		
1	1	2250	2250	1000	500	1000	1000	2000	1000				11000	13200
	1	225	225	100	50	100	100	200	100				1100	
	2	225	225	100	50	100	100	200	100				1100	
2	1	2250	2250	1000	500	1000	1000	2000	1000	1000			12000	14400
	1	225	225	100	50	100	100	200	100	100			1200	
	2	225	225	100	50	100	100	200	100	100			1200	
3	1	2250	2250	1000	500	1000	1000	2000	1000		1000		12000	14400
	1	225	225	100	50	100	100	200	100		100		1200	
	2	225	225	100	50	100	100	200	100		100		1200	
4	1	2250	2250	1000	500	1000	1000	2000				1000	11000	13200
	1	225	225	100	50	100	100	200				100	1100	
	2	225	225	100	50	100	100	200				100	1100	

Δειγματοληψία – Απώλεια μάζας (Κύκλος 3 Δράση Β)

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων του πρώτου κύκλου και συγκεκριμένα των εννέα πρώτων ημερών γινόταν καθημερινή δειγματοληψία από τους τέσσερις αντιδραστήρες. Ακολούθησαν άλλες τέσσερις δειγματοληψίες ανά τρεις ημέρες.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η μάζα του υλικού που αφαιρέθηκε σε κάθε αντιδραστήρα τις μέρες της δειγματοληψίας. Οι τιμές του πίνακα είναι σε γραμμάρια.

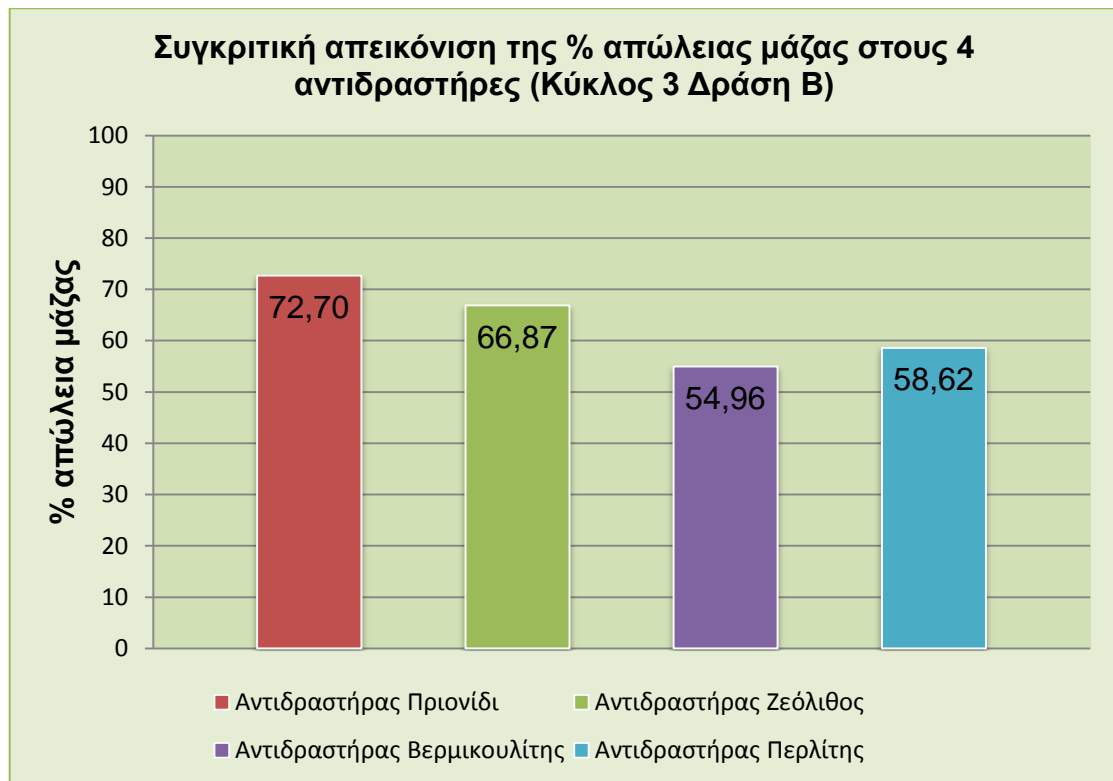
Πίνακας 5.24 Δειγματοληψία σε g από τους αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
1	104,22	101,54	102,6	102,34
2	146	146,74	136,46	147,72
3	138,24	150,22	164,42	177,95
5	151,72	166,04	145,83	138,16
6	151,68	149,85	148,7	167,61
7	146,36	152,95	145,12	148,74
8	103,27	108,64	103,59	112,05
9	109,6	108,89	104,22	113,3
11	109,26	106,3	116,87	106,64
15	109,1	107	107,56	104,75
18	104,98	108,56	103,87	108,08
21	102,34	102,75	99,28	106,24
ΣΥΝΟΛΟ	1476,77	1509,48	1478,52	1533,58

Οι ποσότητες που αφαιρέθηκαν από κάθε αντιδραστήρα σε συνδυασμό, με τις λοιπές απώλειες (π.χ. υγρασία), την αρχική τροφοδοσία, και την ζύγιση του τελικού προϊόντος μας δίνουν το επί τις εκατό ποσοστό απώλειας μάζας στον κάθε αντιδραστήρα. Αναλυτικότερα τα δεδομένα παρουσιάζονται στον πίνακα 5.25 και στο διάγραμμα 5.18.

Πίνακας 5.25 Ποσοστό % συνολικής μείωσης της μάζας σε κάθε αντιδραστήρα του πρώτου κύκλου

	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
Αρχική Τροφοδοσία	13200,00g	14400,00g	14400,00g	13200,00g
Σύνολο Δειγματοληψίας	1476,77g	1509,48g	1478,52g	1533,58g
Θεωρητικά στον αντιδραστήρα	11723,23g	12890,52g	12921,48g	11666,42g
Πραγματικά στον αντιδραστήρα	3201,00g	4270,00g	5820,00g	4827,00g
Ποσοστό μείωσης της μάζας	72,70%	66,87%	54,96%	58,62%



Διάγραμμα 5.18 Συγκριτική απεικόνιση της % απώλειας μάζας στους 4 αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου της Δράσης Β

Προσδιορισμός της θερμοκρασίας του υποστρώματος (Κύκλος 3 Δράση Β)

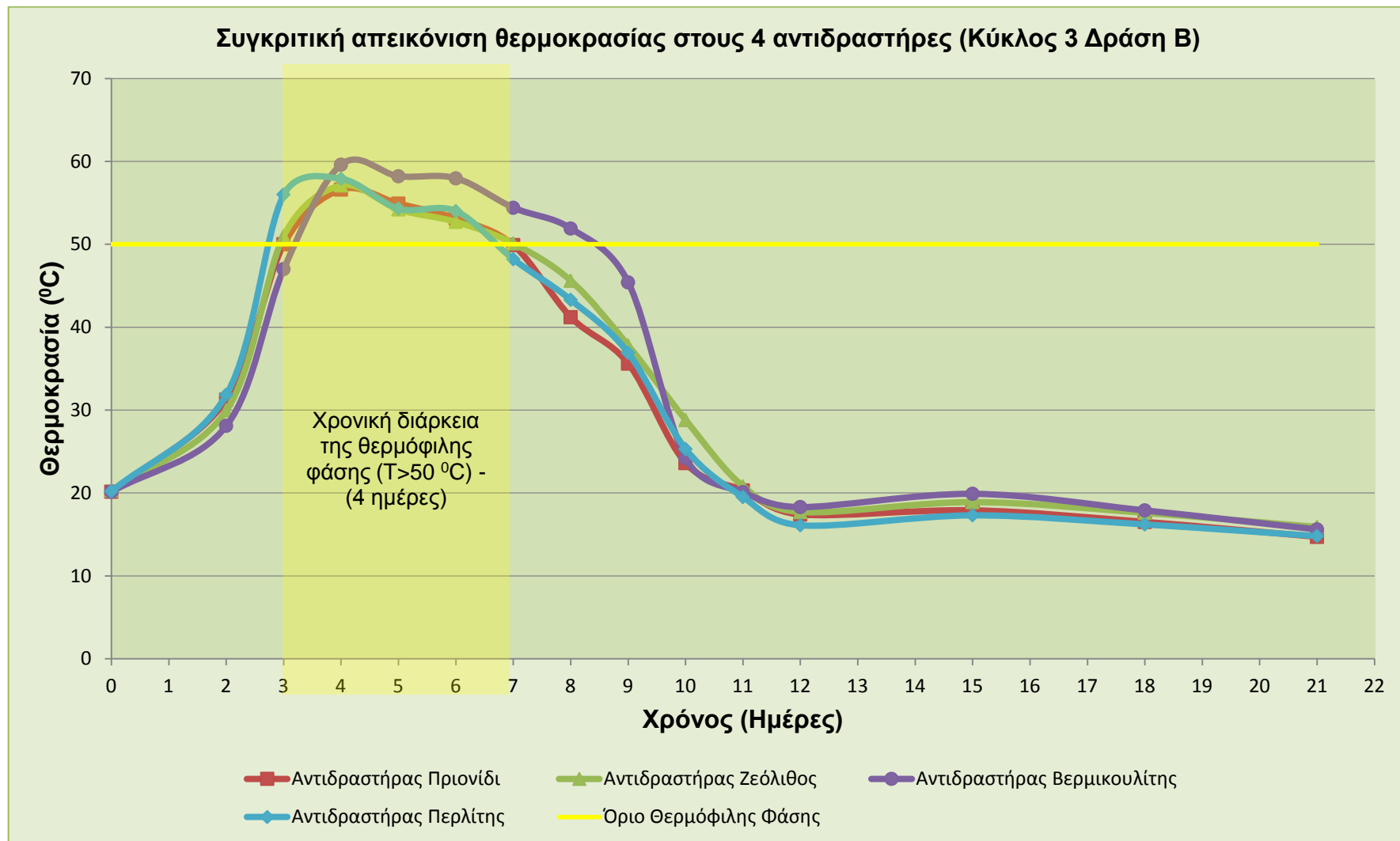
Οι μεταβολές στη θερμοκρασία του υποστρώματος αποτελούν ένδειξη της μικροβιακής δραστηριότητας της κομποστοποίησης και της σταθερότητας του τελικού οργανικού προϊόντος. Το υπόστρωμα διέπεται από μια αρχική μεσόφιλη φάση (<40 °C) κατά την οποία οι μικροοργανισμοί διασπούν γρήγορα τις διαλυτές και εύκολα αποδομήσιμες οργανικές ενώσεις οι οποίες εμπεριέχονται στα οργανικά απόβλητα (Manios, 2004). Η μικροβιακή αυτή δραστηριότητα έχει ως φυσικό επακόλουθο την απελευθέρωση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας υπό μορφή θερμότητας η οποία σταδιακά συσσωρεύεται λόγω της αυτομονωτικής ιδιότητας του υποστρώματος με αποτέλεσμα την άμεση αύξηση της θερμοκρασίας.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές της θερμοκρασίας για όλους τους αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου.

Πίνακας 5.26 Τιμές θερμοκρασίας (°C) για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
0	20,15	20,30	20,15	20,20
2	31,25	29,95	28,10	31,85
3	50,00	51,00	47,00	56,00
4	56,60	57,10	59,60	57,90
5	54,90	54,20	58,20	54,30
6	53,10	52,70	57,95	54,00
7	49,90	50,10	54,40	48,20
8	41,20	45,60	51,90	43,30
9	35,60	37,80	45,40	36,90
10	23,60	28,80	24,20	25,30
11	20,30	20,80	20,10	19,50
12	17,40	17,70	18,30	16,10
15	17,90	18,90	19,90	17,30
18	16,50	17,60	17,90	16,20
21	14,70	15,90	15,60	14,80

Στο διάγραμμα 5.19 παρατίθενται τα προφίλ της θερμοκρασίας για όλους τους αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου της Δράσης Β.



Διάγραμμα 5.19 Συγκριτική απεικόνιση θερμοκρασίας στους 4 αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου της Δράσης Β

Την 3^η ημέρα λειτουργίας τους συστήματος σημειώνεται άνοδος της θερμοκρασίας σε επίπεδα μεγαλύτερα των 50°C. Σε αυτές τις συνθήκες οι μεσόφιλοι μικροοργανισμοί γίνονται λιγότερο ανταγωνιστικοί και αντικαθίστανται διαδοχικά από θερμοφίλους. Κατά τη θερμοφιλή φάση ο ρυθμός διάσπασης της οργανικής ουσίας είναι ταχύτερος διαμορφώνοντας υψηλές θερμοκρασίες οι οποίες κυμαίνονται από 55 έως 60°C για συνολική διάρκεια 4 ημερών (3^η έως 7^η ημέρα) με τη μέγιστη θερμοκρασία να επιτυγχάνεται την 4^η ημέρα λειτουργίας των αντιδραστήρων. Μετέπειτα παρατηρείται σταδιακή μείωση της θερμοκρασίας ενώ την 9^η ημέρα της διεργασίας το υπόστρωμα μεταβαίνει σε μια δεύτερη μεσόφιλη φάση όπου η θερμοκρασία καταγράφει φθίνουσα πορεία και τείνει να προσεγγίσει αυτή του περιβάλλοντος, ενδεικτικό του χαμηλού ρυθμού διάσπασης της οργανικής ουσίας.

Προσδιορισμός της υγρασίας του υποστρώματος (Κύκλος 3 Δράση Β)

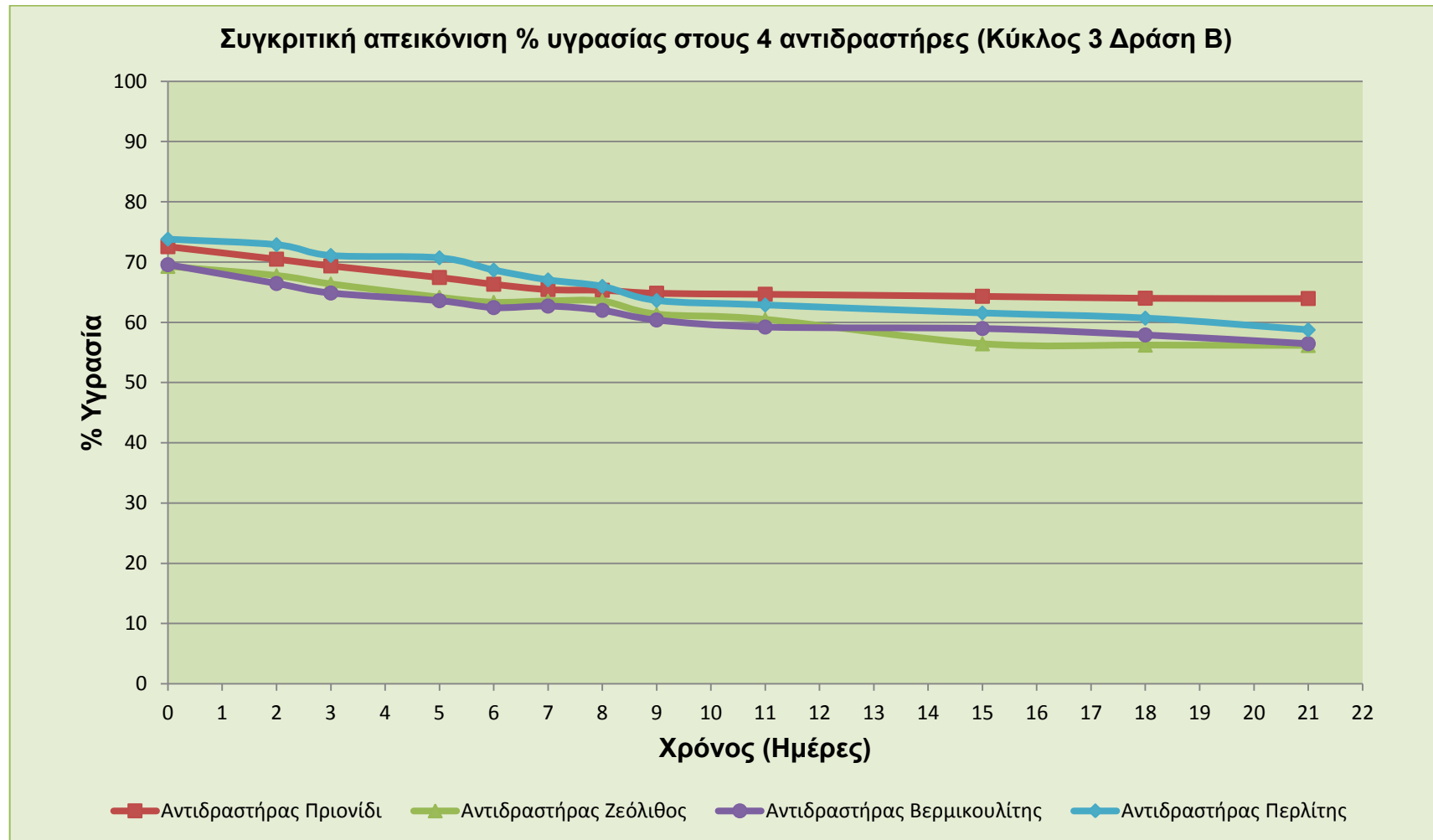
Η εξασφάλιση επαρκούς υγρασίας στο υπόστρωμα αποτελεί βασική παράμετρο για τη διεξαγωγή της διεργασίας της κομποστοποίησης προκειμένου να αποφευχθεί τόσο η πρόωγη αφυδάτωση του οργανικού υλικού, σε περίπτωση χαμηλής περιεχόμενης υγρασίας, όσο και η διαμόρφωση αναερόβιων συνθηκών σε περίπτωση περίσσειας ποσότητας νερού (Tiquia et al., 2002, 1996a; de Bertoldi et al., 1983).

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές της υγρασίας (%) για όλους τους αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου.

Πίνακας 5.27 Τιμές υγρασίας (%) για τους τέσσερις αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
0	72,55	69,28	69,56	73,80
2	70,48	67,75	66,44	72,88
3	69,36	66,35	64,86	71,09
5	67,44	64,14	63,58	70,70
6	66,32	63,31	62,44	68,67
7	65,44	63,52	62,69	67,04
8	65,32	63,50	61,98	65,96
9	64,83	61,35	60,38	63,62
11	64,66	60,47	59,21	62,87
15	64,32	56,43	58,97	61,54
18	64,00	56,21	57,90	60,69
21	63,95	56,15	56,45	58,74

Στο διάγραμμα 5.20 παρουσιάζεται η εξέλιξη του % ποσοστού της υγρασίας για τους αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου.



Διάγραμμα 5.20 Συγκριτική απεικόνιση % υγρασίας στους 4 αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου της Δράσης Β

Η αρχική υγρασία του υποστρώματος είναι, για τον αντιδραστήρα με πρόσθετο μόνο το πριονίδι 72,55%, για τον αντιδραστήρα με πρόσθετο ζεόλιθο μαζί με πριονίδι 69,28%, για τον αντιδραστήρα με πρόσθετο βερμικουλίτη μαζί με πριονίδι 69,56 και για τον αντιδραστήρα με περλίτη 73,8%. Οι τιμές αυτές είναι αρκετά υψηλές και οφείλονται στη φύση του υποστρώματος. Η υγρασία σε συνδυασμό παροχή οξυγόνου στο υπόστρωμα, μέσω της επαρκούς ανάδευσης, ενισχύει τις μεταβολικές δραστηριότητες των μικροοργανισμών διαμορφώνοντας άμεσα υψηλές θερμοκρασίες στο σύστημα. Κατά το θερμοφιλό στάδιο η περιεχόμενη υγρασία μειώνεται σημαντικά κυρίως λόγω της εξάτμισης του νερού. Στο τελικό στάδιο της διεργασίας παρατηρείται πως η υγρασία έχει μειωθεί σημαντικά στους αντιδραστήρες όπου προστέθηκαν ορυκτά, πλησιάζοντας τιμές κοντα στο 55%, ενώ στον αντιδραστήρα με πρόσθετο μόνο το πριονίδι η υγρασία παρέμεινε σε υψηλά επίπεδα, με τελική τιμή αρκετά πάνω από το 60% (63,95%).

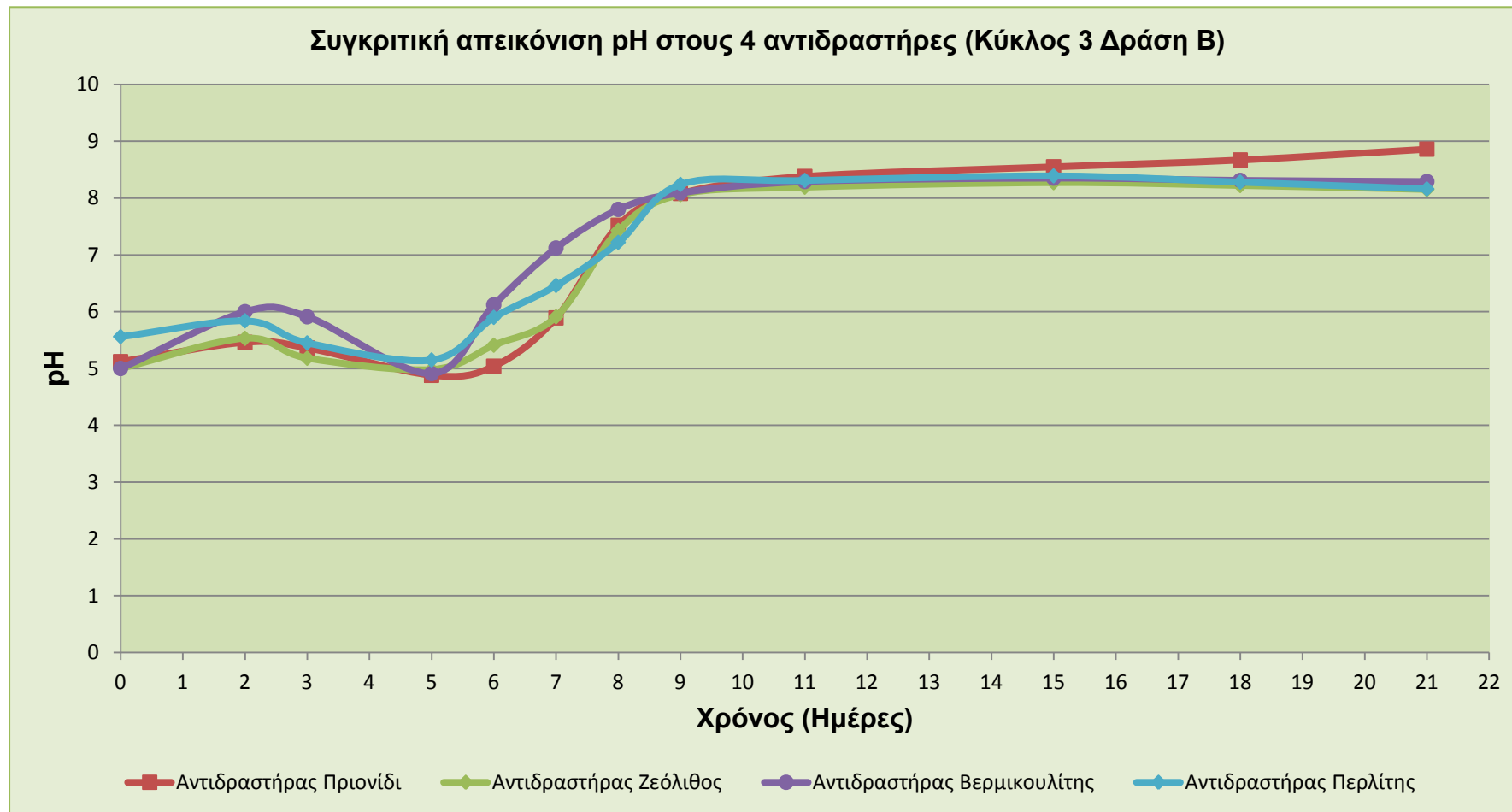
Προσδιορισμός του *pH* του υποστρώματος (Κύκλος 3 Δράση Β)

Το διάγραμμα 5.21 παρουσιάζει την εξέλιξη του *pH* κατά τη διάρκεια του 3^{ου} κύκλου της Δράσης Β. Κατά τις πρώτες ημέρες λειτουργίας του συστήματος το *pH* εμφανίζεται ελαφρώς όξινο λόγω της διάσπασης των εύκολα αποδομήσιμων ενώσεων και το σχηματισμό οργανικών οξέων (Gajalakshmi and Abbasi, 2008). Τα οργανικά αυτά οξέα καταναλίσκονται άμεσα ενώ παράλληλα σχηματίζεται αμμωνία κατά την αποδόμηση των αζωτούχων ενώσεων που εμπεριέχονται στην οργανική ουσία με αποτέλεσμα την αύξηση του *pH* στο υπόστρωμα.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές του *pH* για όλους τους αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου.

Πίνακας 5.28 Τιμές *pH* για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
0	5,12	5,00	5,00	5,56
2	5,46	5,53	6,00	5,84
3	5,36	5,18	5,91	5,45
5	4,88	4,98	4,91	5,15
6	5,04	5,41	6,12	5,90
7	5,89	5,91	7,12	6,46
8	7,52	7,43	7,80	7,22
9	8,08	8,06	8,09	8,24
11	8,38	8,19	8,29	8,31
15	8,55	8,27	8,35	8,39
18	8,67	8,22	8,31	8,28
21	8,86	8,15	8,29	8,16



Διάγραμμα 5.21 Συγκριτική απεικόνιση pH στους 4 αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου της Δράσης Β

Επομένως, η δράση πρωτεολυτικών βακτηρίων και η συνεπακόλουθη αμμωνιοποίηση μέρους του οργανικού αζώτου έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της τιμής του pH φτάνοντας σε ένα μέγιστο την 15^η ημέρα, για τους τρεις αντιδραστήρες που χρησιμοποιήθηκαν ορυκτά. Λόγω της πτητικότητας της αμμωνίας της παράλληλης οξείδωσης των αμμωνιακών σε νιτρικά (νιτροποίηση), η συγκέντρωση των αμμωνιακών μειώνεται με παράλληλη μικρή μείωση του pH, που σχεδόν σταθεροποιείται σε τιμές κοντά στο 8. Αντιθέτως ο αντιδραστήρας που χρησιμοποιήθηκε ως πρόσθετο μόνο πριονίδι παρουσιάζει, προς το τέλος της διεργασίας, υψηλότερη τιμή pH (8,86), ένδειξη ότι δεν πραγματοποιήθηκε επαρκής διάσπαση των αμμωνιακών.

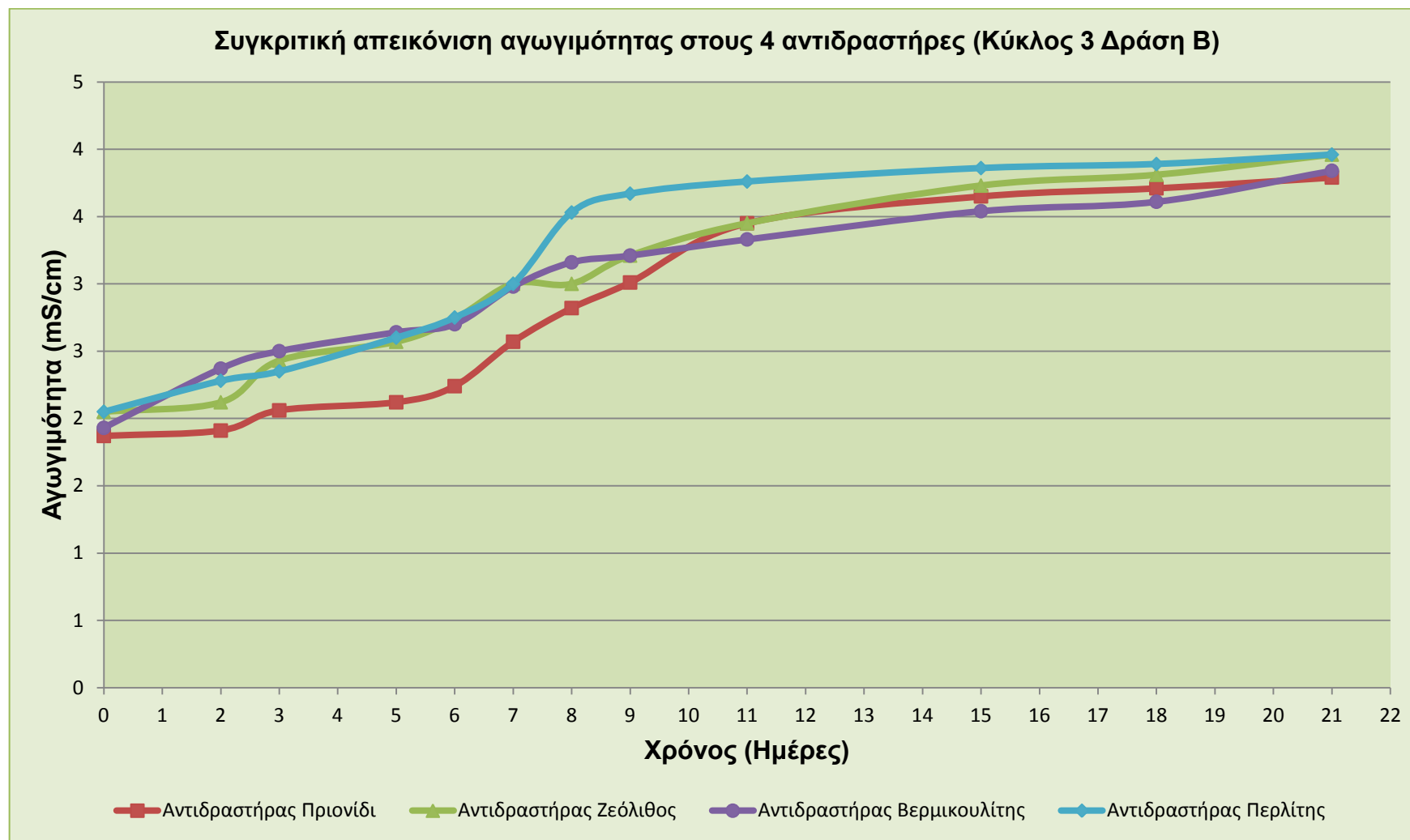
Προσδιορισμός της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του υποστρώματος (Κύκλος 3 Δράση Β)

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα, όπως προαναφέρθηκε, σχετίζεται άμεσα με το είδος και τον αριθμό των ιόντων σε ένα διάλυμα. Ως μέτρο του διαλυτού άλατος που περιέχεται στο κόμποστ, όπου τα διαλυτά άλατα αναφέρονται στην συγκέντρωση διαλυτών ιόντων σ' ένα διάλυμα, υψηλές τιμές αγωγιμότητας στο κόμποστ δύναται να του προσδίδει υψηλή θρεπτική αξία, αλλά μπορεί και να καταστρέψει τα φυτά, ειδικά τους σπόρους και ενδέχεται να καθυστερήσει τη διαδικασία βλάστησης. Η υπερβολικά υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα ελαττώνει την ικανότητα απορρόφησης νερού από τις ρίζες και συνεπακόλουθα την θρεπτική λήψη αφού τα θρεπτικά συστατικά είναι διαλυμένα στο νερό και με αυτό μπορούν να μεταφερθούν.

Στον πίνακα 5.29 παρατίθενται οι τιμές της αγωγιμότητας για όλους τους αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου της Δράσης Β.

Πίνακας 5.29 Τιμές αγωγιμότητας για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου (*mS/cm*)

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
0	1,87	2,05	1,93	2,05
2	1,91	2,12	2,37	2,28
3	2,06	2,43	2,50	2,35
5	2,12	2,57	2,64	2,60
6	2,24	2,74	2,70	2,75
7	2,57	3,00	2,98	3,00
8	2,82	3,00	3,16	3,53
9	3,01	3,21	3,21	3,67
11	3,45	3,45	3,33	3,76
15	3,65	3,73	3,54	3,86
18	3,71	3,81	3,61	3,89
21	3,79	3,96	3,84	3,96



Διάγραμμα 5.22 Συγκριτική απεικόνιση ηλεκτρικής αγωγιμότητας στους 4 αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου της Δράσης Β

Στο διάγραμμα 5.22 παρουσιάζεται η εξέλιξη της τιμής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για τους αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου της Δράσης Β.

Οι καμπύλες της αγωγιμότητας στους αντιδραστήρες παρουσιάζουν αύξουσα πορεία. Ξεκινούν από χαμηλές αρχικές τιμές 1,87, 2,05, 1,93 και 2,05 mS/cm για τους αντιδραστήρες με πριονίδι, ζεόλιθο, βερμικουλίτη και περλίτη αντίστοιχα και, έχοντας ανοδική πορεία, καταλήγουν στις τιμές 3,79, 3,96, 3,84 και 3,96 mS/cm αντίστοιχα.

Στο διάγραμμα 5.22 παρατηρείται σταδιακή αύξηση της αγωγιμότητας καθόλη τη διάρκεια της διεργασίας, η οποία αύξηση αποδίδεται στην εκτεταμένη αποσύνθεση της οργανικής ύλης, που συνακόλουθα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της περιεκτικότητας του υποστρώματος σε άλατα.

Μέτρηση των πτητικών στερεών (VS) στο υπόστρωμα (Κύκλος 3 Δράση Β)

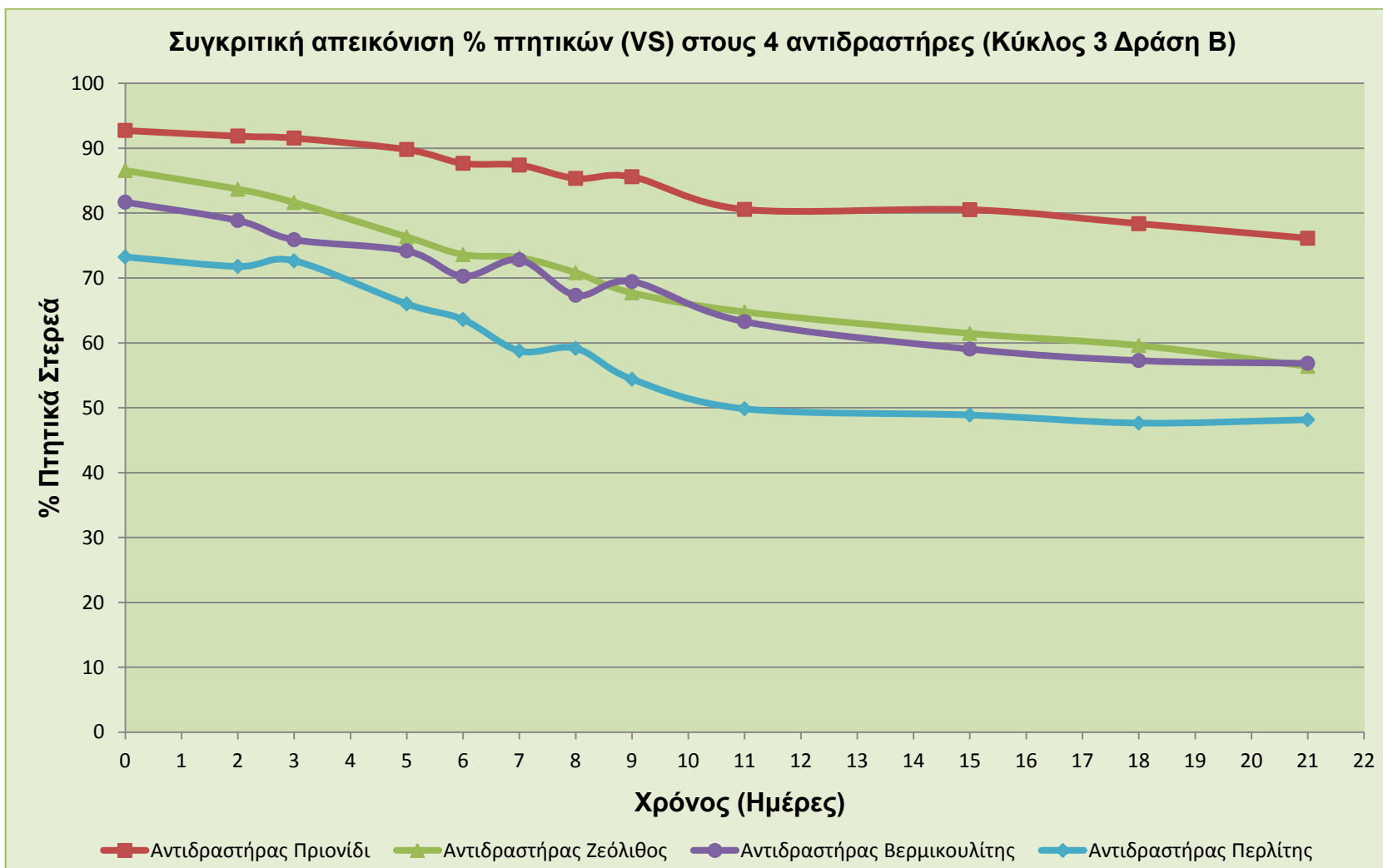
Τα πτητικά στερεά αποτελούν μια πολύ βασική παράμετρο της διεργασίας, καθώς χρησιμοποιούνται συχνά ως δείκτης της πορείας της αποσύνθεσης και η σταθεροποίηση του κόμποστ είναι μια διαδικασία που έχει σχέση με την ποσότητα και την αποσύνθεση του οργανικού υλικού.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές των πτητικών στερεών για όλους τους αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου.

Πίνακας 5.30 Τιμές % πτητικών στερεών για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
0	92,74	86,55	81,68	73,23
2	91,87	83,67	78,85	71,78
3	91,56	81,62	75,90	72,64
5	89,80	76,32	74,18	66,00
6	87,67	73,59	70,27	63,60
7	87,40	73,14	72,80	58,76
8	85,34	70,80	67,33	59,15
9	85,60	67,70	69,44	54,39
11	80,56	64,76	63,27	49,84
15	80,52	61,44	59,05	48,88
18	78,36	59,58	57,27	47,64
21	76,12	56,38	56,85	48,15

Στο διάγραμμα 5.23 παρουσιάζεται η πορεία της % συγκέντρωσης των πτητικών στερεών για τους αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου.



Διάγραμμα 5.23 Συγκριτική απεικόνιση ηλεκτρικής αγωγιμότητας στους 4 αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου της Δράσης Β.

Σε όλους τους αντιδραστήρες η μεγαλύτερη μείωση των πτητικών στερεών παρατηρείται από την 3^η έως την 10^η ημέρα, περίοδο κατά την οποία εμφανίζονται και οι υψηλότερες θερμοκρασίες (θερμόφιλη φάση), ως αποτέλεσμα της έντονης μεταβολικής δραστηριότητας στη φάση αυτή. Η μεγαλύτερη αρχική τιμή του ποσοστού των πτητικών παρατηρείται στον αντιδραστήρα με πρόσθετο πριονίδι, ενώ η μικρότερη στον αντιδραστήρα με πρόσθετο περλίτη λόγω απουσίας πριονιδιού. Στον αντιδραστήρα με πρόσθετο μόνο το πριονίδι υπάρχει η μικρότερη κατανάλωση πτητικών η οποία επαληθεύεται και από την καμπύλη του οργανικού άνθρακα. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα πιθανής μη ορθής ανάπτυξης των διεργασιών. Αντίθετα, στους άλλους τρεις αντιδραστήρες και κυρίως στον αντιδραστήρα με πρόσθετο περλίτη παρατηρείται ταχεία μείωση των πτητικών στερεών και σταθεροποίηση τους μετά το πέρας της διεργασίας. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ορθής διεξαγωγής των διεργασιών της κομποστοποίησης.

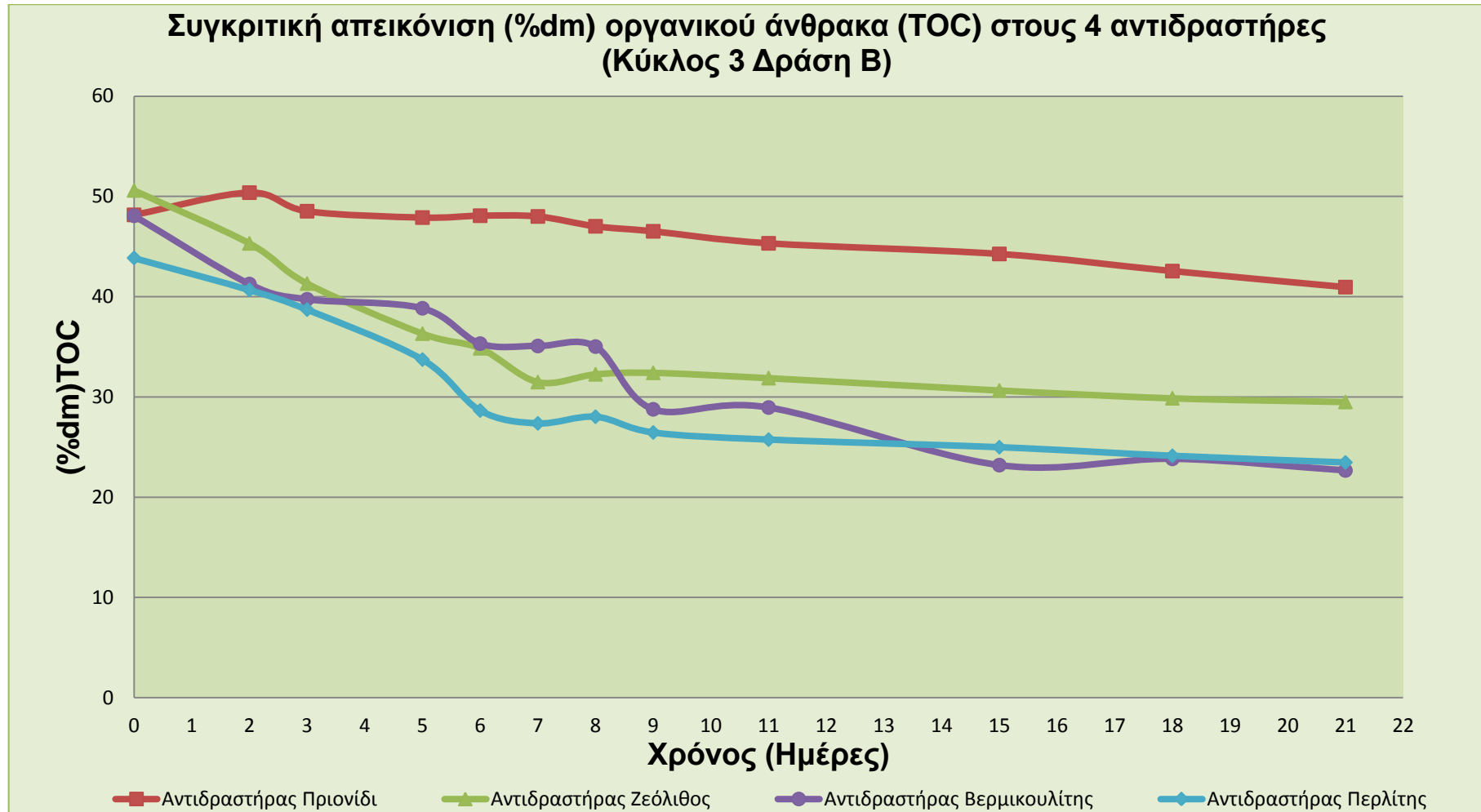
Προσδιορισμός του ολικού οργανικού άνθρακα στο υπόστρωμα (Κύκλος 3 Δράση Β)

Στο διάγραμμα 5.24 παρουσιάζεται η εξέλιξη του οργανικού άνθρακα στον 3^ο πειραματικό κύκλο της Δράσης Β. Ο ολικός οργανικός άνθρακας παρουσιάζει μείωση καθόλη τη διάρκεια της κομποστοποίησης εξαιτίας των βιοξειδωτικών διεργασιών και της μετατροπής του σε CO₂.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές του ολικού οργανικού άνθρακα (%*dm*) για όλους τους αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου της Δράσης Β.

Πίνακας 5.31 Τιμές ολικού οργανικού άνθρακα για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
0	48,16	50,59	48,07	43,86
2	50,38	45,31	41,26	40,67
3	48,52	41,31	39,74	38,71
5	47,89	36,31	38,84	33,72
6	48,08	34,85	35,31	28,64
7	48,00	31,48	35,08	27,36
8	47,02	32,25	35,02	28,02
9	46,52	32,40	28,76	26,45
11	45,32	31,87	28,94	25,74
15	44,26	30,64	23,19	24,98
18	42,55	29,86	23,82	24,12
21	40,95	29,49	22,66	23,46



Διάγραμμα 5.24 Συγκριτική απεικόνιση (%dm) οργανικού άνθρακα TOC στους 4 αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου της Δράσης Β

Η εντονότερη κατανάλωση του οργανικού άνθρακα επιτυγχάνεται κατά τη θερμόφιλη φάση της διεργασίας όπου και παρατηρείται η εντονότερη μικροβιακή δραστηριότητα λόγω των άμεσα διαθέσιμων οργανικών ενώσεων. Η αρχική περιεκτικότητα οργανικού άνθρακα στο υπόστρωμα είναι 48,16%, 50,59%, 48,07%, 43,86% dm για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο μόνο πριονίδι, πριονίδι και ζεόλιθο, πριονίδι και βερμικουλίτη και περλίτη αντίστοιχα. Στο τέλος του λειτουργικού χρόνου στον βιοαντιδραστήρα καταγράφονται πολύ μειωμένες τιμές του ποσοστού του οργανικού άνθρακα σε όλους τους αντιδραστήρες που χρησιμοποιήθηκε ορυκτό ως πρόσθετο. Πρέπει να σημειωθεί ότι η μείωση του ποσοστού του οργανικού άνθρακα στην περίπτωση της χρήσης ορυκτών ήταν σαφέστατα μεγαλύτερη απ' ό,τι στον αντιδραστήρα που περιείχε μόνο πριονίδι. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι η χρήση ορυκτών είναι ιδιαίτερως σημαντική και επιταχύνει την βιοαποδόμηση της οργανικής ύλης βελτιώνοντας τις συνθήκες αερισμού και τα ποσοστά υγρασίας του υποστρώματος κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης.

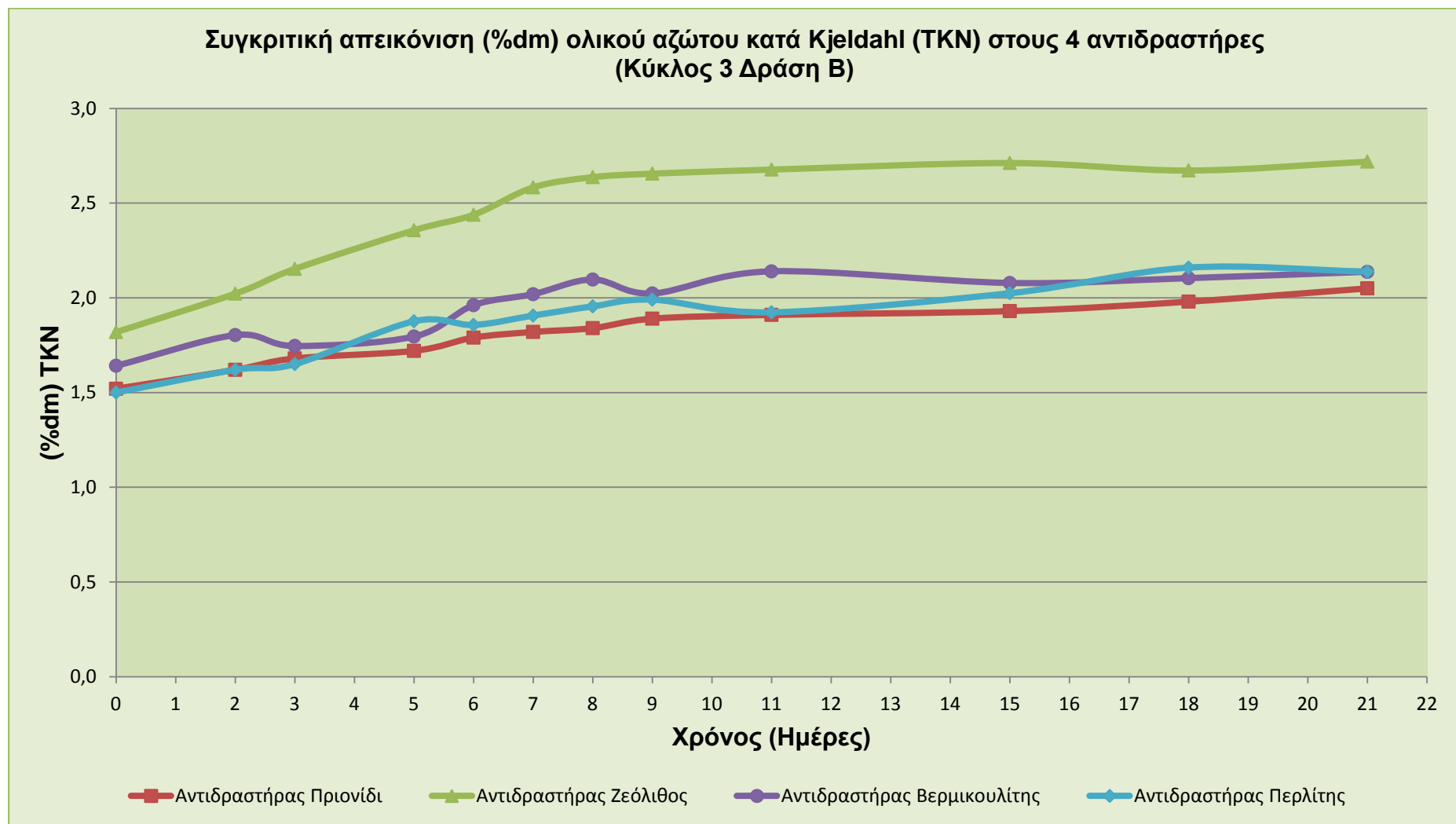
Προσδιορισμός του ολικού αζώτου κατά Kjeldahl στο υπόστρωμα (Κύκλος 3 Δράση Β)

Το διάγραμμα 5.25 παρουσιάζει τη μεταβολή του ολικού αζώτου στο υπόστρωμα καθώς και την εξέλιξη των απωλειών του κατά τη διάρκεια του 3^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης. Η περιεκτικότητα του ολικού αζώτου στο αρχικό υπόστρωμα είναι ίση με 2.87% dm, ενώ κατά τη διάρκεια του 1^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης παρουσιάζει μικρή αύξηση λαμβάνοντας τελική τιμή ίση με 3.15% dm.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές του TKN (%dm) για όλους τους αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου.

Πίνακας 5.32 Τιμές %dm TKN για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
0	1,52	1,82	1,64	1,50
2	1,62	2,02	1,80	1,62
3	1,68	2,15	1,75	1,65
5	1,72	2,36	1,80	1,88
6	1,79	2,44	1,96	1,86
7	1,82	2,58	2,02	1,91
8	1,84	2,64	2,10	1,95
9	1,89	2,66	2,02	1,99
11	1,91	2,68	2,14	1,92
15	1,93	2,71	2,08	2,02
18	1,98	2,67	2,10	2,16
21	2,05	2,72	2,14	2,14



Διάγραμμα 5.25 Συγκριτική απεικόνιση (%dm) TKN στους 4 αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου της Δράσης Β

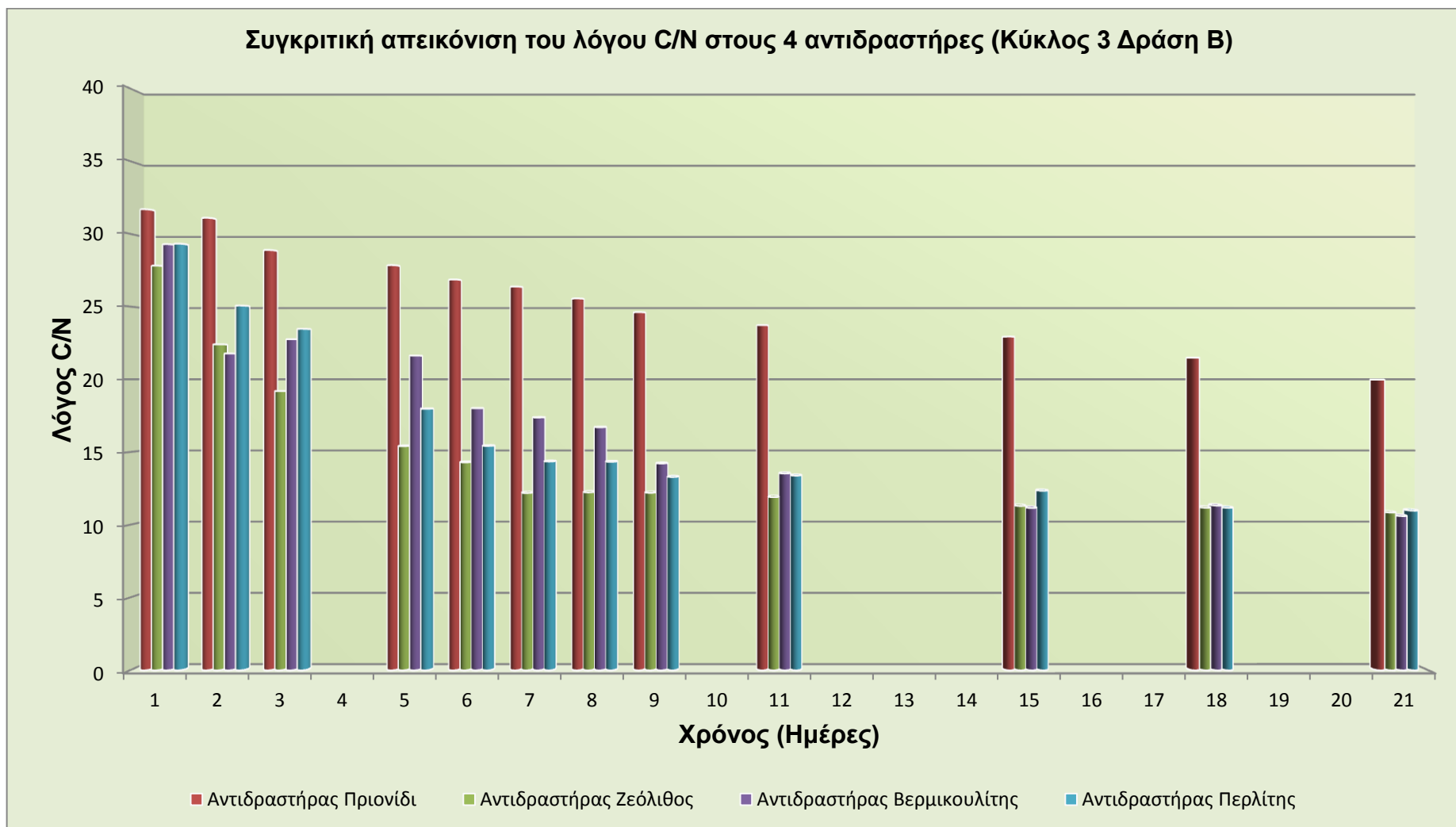
Στη συνέχεια της διεργασίας παρουσιάζεται μικρή ποσοστιαία αύξηση στο άζωτο η οποία οφείλεται στη μείωση της οργανικής μάζας κατά τη θερμόφιλη φάση της κομποστοποίησης όπου οι βιοξειδωτικές διεργασίες είναι εντονότερες και ο οργανικός άνθρακας επιδέχεται τις μεγαλύτερες απώλειες. Προς το τέλος της διεργασίας σημειώνεται περαιτέρω αύξηση του αζώτου η οποία μπορεί να εξηγηθεί εν μέρει από τη συνεχή, αλλά μειωμένη, κατανάλωση του οργανικού άνθρακα, καθώς και από την ανάκτηση μέρους των απωλειών του αζώτου μέσω της δράσης ελεύθερων αζωτοδεσμευτικών βακτηρίων (*Insam and de Bertoldi, 2007; Beauchamp et al., 2006*). Το ποσοστό του αζώτου στον αντιδραστήρα που προστέθηκε ζεόλιθος είναι εμφανώς αυξημένο. Ο ζεόλιθος, λόγω της ιοντοεναλλακτικής του ικανότητας, έχει την ιδιότητα να δεσμεύει τα αμμωνιακά ιόντα, με αποτέλεσμα να μειώνονται οι απώλειες αζώτου. Αντιθέτως, το ποσοστό του αζώτου στον αντιδραστήρα που προστέθηκε μόνο πριονίδι, παρουσιάζει τη μικρότερη αύξηση.

Προσδιορισμός του λόγου C/N στο υπόστρωμα (Κύκλος 3 Δράση Β)

Στο διάγραμμα 5.26 απεικονίζεται η μεταβολή του λόγου C/N κατά τη διεργασία του 3^{ου} κύκλου της Δράσης Β. Ο αρχικός λόγος C/N του υποστρώματος, όπως αυτός διαμορφώθηκε από την ανάμιξη των οργανικών αποβλήτων με τα πρόσθετα, είναι κοντά στο 30 και για τους τέσσερις αντιδραστήρες. Ο λόγος C/N παρουσιάζει φθίνουσα πορεία καθόλη τη διάρκεια της κομποστοποίησης. Προς το τέλος της διεργασίας η αναλογία C/N τείνει να σταθεροποιηθεί, σε τιμές μικρότερες του 12, λόγω του χαμηλού ρυθμού βιοξειδωσης της εναπομένουσας βιοαποδομησίμης οργανικής ουσίας, με εξαίρεση τον αντιδραστήρα με πριονίδι. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές του λόγου C/N για όλους τους αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου.

Πίνακας 5.33 Τιμές C/N για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου Δράσης Β

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
1	31,68	27,81	29,28	29,32
2	31,10	22,41	21,77	25,07
3	28,88	19,19	22,76	23,47
5	27,84	15,41	21,63	17,97
6	26,86	14,29	18,01	15,42
7	26,37	12,19	17,37	14,35
8	25,55	12,23	16,70	14,33
9	24,61	12,20	14,22	13,29
11	23,73	11,90	13,53	13,38
15	22,93	11,30	11,16	12,34
18	21,49	11,17	11,32	11,17
21	19,98	10,85	10,60	10,97



Διάγραμμα 5.26 Συγκριτική απεικόνιση του λόγου C/N στους 4 αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου της Δράσης Β

Παρατηρείται ότι οι αντιδραστήρες όπου είχε προστεθεί φυσικό ορυκτό ως πρόσθετο εμφάνισαν χαμηλότερες τιμές C/N γεγονός που οφείλεται στην μεγαλύτερη μείωση συνολικού οργανικού άνθρακα καθόλη τη διάρκεια της διεργασίας.

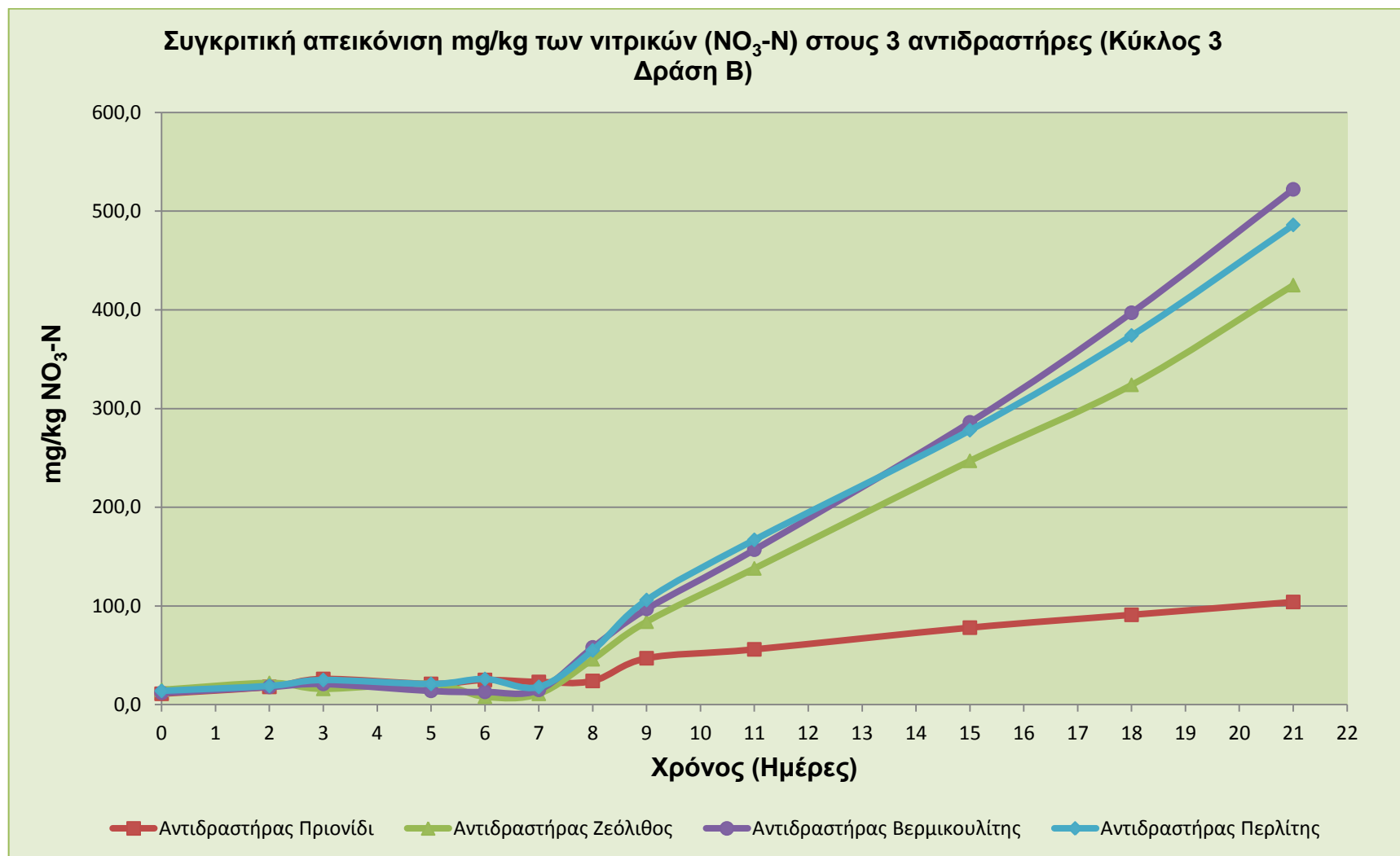
Προσδιορισμός νιτρικών ($NO_3^- - N$) και αμμωνιακών ($NH_4^+ - N$) στο υπόστρωμα (Κύκλος 3 Δράση Β)

Στα διαγράμματα 5.27 και 5.28 παρουσιάζεται η εξέλιξη των αμμωνιακών και των νιτρικών κατά τη διεργασία του 3^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης. Κατά τη διεργασία της αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας των οργανικών αποβλήτων ένα μέρος του οργανικού αζώτου μεταβολίζεται σε αμμωνιακά μέσω της δράσης πρωτεολυτικών βακτηρίων με αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης αυτών τις πρώτες ημέρες της διεργασίας (από τιμές κοντά στα 50 mg kg^{-1} αρχικά σε τιμές μεταξύ $400-500 \text{ mg kg}^{-1}$ την 7^η ημέρα). Η μέγιστη συγκέντρωση αμμωνιακών, σε όλους τους αντιδραστήρες, παρουσιάζεται κατά τη θερμόφιλη φάση (6^η – 7^η ημέρα) όπου παρατηρείται και απότομη αύξηση του pH.

Στους πίνακες 5.34 και 5.35 παρατίθενται οι τιμές των νιτρικών και των αμμωνιακών για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου.

Πίνακας 5.34 Τιμές $NO_3^- - N$ σε mg/kg για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
0	11,00	15,00	12,00	14,00
2	18,00	22,00	18,00	19,00
3	26,00	16,00	21,00	25,00
5	21,00	21,00	14,00	21,00
6	25,00	8,00	13,00	26,00
7	23,00	11,00	15,00	18,00
8	24,00	46,00	58,00	55,00
9	47,00	84,00	97,00	106,00
11	56,00	138,00	157,00	167,00
15	78,00	247,00	286,00	278,00
18	91,00	324,00	397,00	374,00
21	104,00	425,00	522,00	486,00

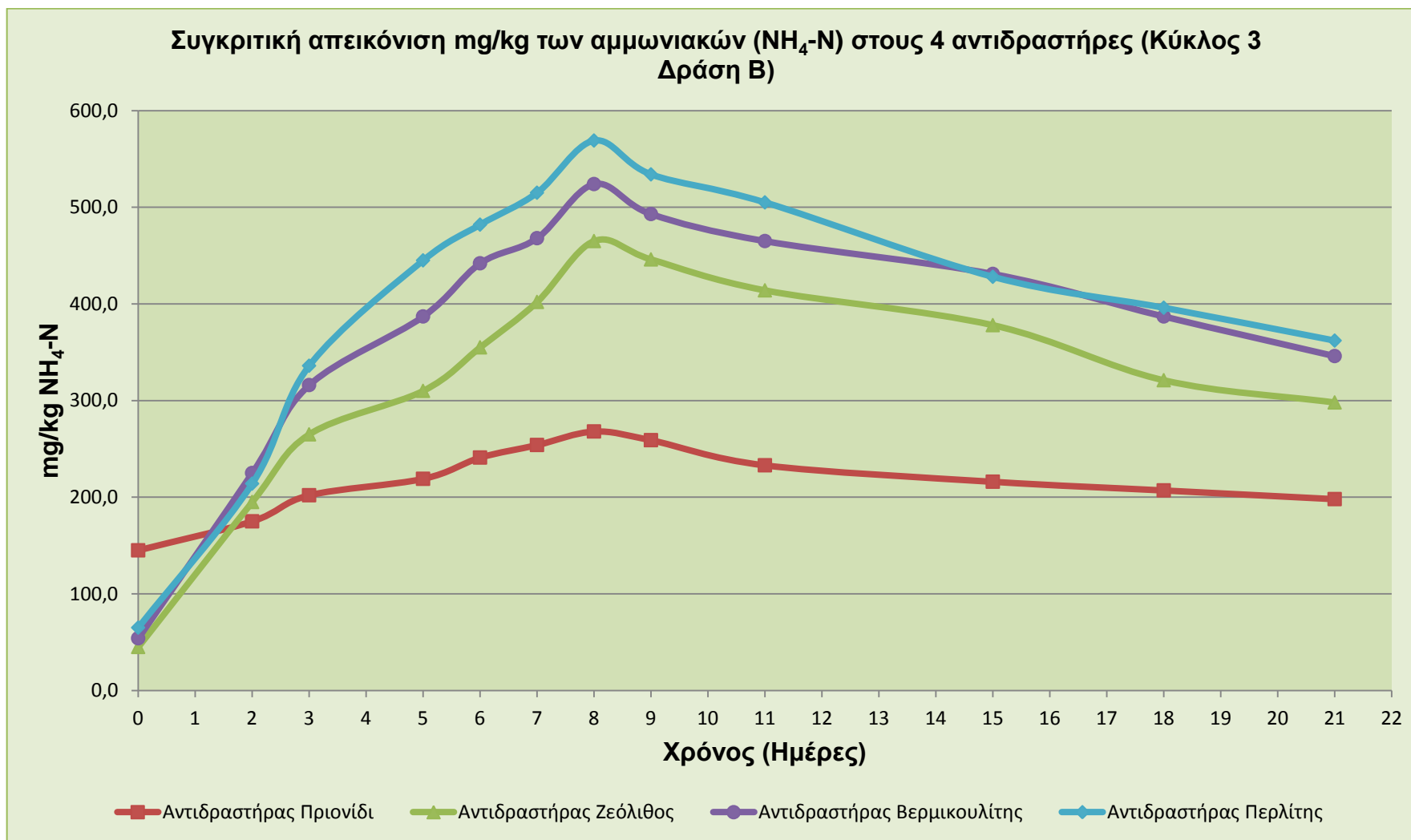


Διάγραμμα 5.27 Συγκριτική απεικόνιση των νιτρικών NO₃⁻ – N στους 4 αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου της Δράσης Β

Πίνακας 5.35 Τιμές $NH_4^+ - N$ σε mg/kg για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
0	145,00	45,00	54,00	65,00
2	175,00	195,00	225,00	214,00
3	202,00	265,00	316,00	336,00
5	219,00	310,00	387,00	445,00
6	241,00	355,00	442,00	482,00
7	254,00	402,00	468,00	515,00
8	268,00	465,00	524,00	569,00
9	259,00	446,00	493,00	534,00
11	233,00	414,00	465,00	505,00
15	216,00	378,00	431,00	428,00
18	207,00	321,00	387,00	396,00
21	198,00	298,00	346,00	362,00

Μετά το πέρας της θερμοφίλης φάσης σημειώνεται σημαντική μείωση τους εν μέρει λόγω της διεργασίας της νιτροποίησης και της μετατροπής τους σε νιτρικά, αλλά και εξαιτίας της πτητικότητας και απελευθέρωσης της εκπεμπόμενης αμμωνίας στην ατμόσφαιρα. Όπως παρατηρείται από το διάγραμμα 5.27, κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης η συγκέντρωση των νιτρικών αυξάνεται λόγω της οξείδωσης αμμωνιακών προς νιτρικά. Υπάρχουν δύο διαφορετικοί τύποι νιτροποίησης που λαμβάνουν χώρα κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης. Ο πρώτος τύπος αφορά στην ετερότροφη νιτροποίηση η οποία οφείλεται αποκλειστικά στη μετατροπή των αμμωνιακών σε νιτρικά στα αρχικά στάδια της διεργασίας με τη δράση ετερότροφων νιτροποιητικών βακτηρίων (*Insam and de Bertoldi, 2007; de Bertoldi et al., 1982; Alexander, 1977*). Η δράση αυτού του τύπου των βακτηρίων έχει ως αποτέλεσμα τη μικρή αύξηση της συγκέντρωσης των νιτρικών από τιμές κοντά στα 50 mg kg^{-1} στην αρχή της διεργασίας σε τιμές μεταξύ $80-100 \text{ mg kg}^{-1}$ την 8^η ημέρα. Η αυτότροφη νιτροποίηση αποτελεί το δεύτερο τύπο νιτροποίησης και αναπτύσσεται κυρίως σε μεταγενέστερο στάδιο της διεργασίας, διότι περιορίζεται από παράγοντες όπως η υψηλή θερμοκρασία και το αλκαλικό pH (*Insam and de Bertoldi, 2007; de Bertoldi et al., 1982*). Η σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης των νιτρικών από τη 11^η ημέρα της διεργασίας και έπειτα, επιβεβαιώνει τις ενδείξεις για την επικράτηση αερόβιων συνθηκών στο μίγμα καθώς τα αυτότροφα νιτροβακτήρια απαιτούν περιβάλλον πλούσιο σε οξυγόνο για τη μετατροπή των αμμωνιακών σε νιτρικά η συγκέντρωση των οποίων στο τέλος της διεργασίας στους βιοαντιδραστήρες που προστέθηκε ορυκτό (21^η ημέρα) ανέρχεται στα $425-522 \text{ mg kg}^{-1}$. Εξαιρέση και σε αυτή την περίπτωση αποτελεί ο αντιδραστήρας με πρόσθετο μόνο πριονίδι, τα νιτρικά παρουσιάζουν πολύ μικρή αύξηση και τα αμμωνιακά πολύ μικρή μείωση μετά τη θερμοφίλη φάση, γεγονός ενδεικτικό της μη ολοκληρωμένης διεξαγωγής της διεργασίας.



Διάγραμμα 5.28 Συγκριτική απεικόνιση των αμμωνιακών NH₄⁺ - N στους 4 αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου της Δράσης Β

5.2.2.2.4 Τέταρτος Κύκλος πειραμάτων

Στον Κύκλο 4 χρησιμοποιήθηκαν 4 αντιδραστήρες με αρχικό λόγο C/N στο υπόστρωμα 40 και χρήση προσθέτων σε ποσοστό 10% κ.β. επί της αρχικής μάζας υποστρώματος.

Τροφοδοσία των αντιδραστήρων (Κύκλος 4 Δράση Β)

Στον πίνακα 5.36 παρουσιάζονται τα υλικά που τροφοδότησαν κάθε ένα από τους τέσσερις αντιδραστήρες. Οι τιμές του πίνακα είναι σε γραμμάρια. Η τροφοδοσία έγινε με γνώμονα να διατηρηθεί η αρχική αναλογία C/N κοντά στο 40. Για να επιτευχθεί ο συγκεκριμένος λόγος υπολογίστηκε θεωρητικά η εξής αναλογία:

- 80% κυτταρινούχων συστατικών (μαρούλι, σπανάκι, πορτοκάλια και λεμόνια)
- 10% πρωτεϊνούχων συστατικών (ρεβύθια και φασόλια βρασμένα)
- 10% υδατανθρακούχων συστατικών (ψωμί)

Σε κάθε αντιδραστήρα έγινε προσθήκη κάποιου πρόσθετου.

- Στον πρώτο αντιδραστήρα προστέθηκε πριονίδι ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας.
- Στον δεύτερο αντιδραστήρα προστέθηκε πριονίδι ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας, αλλά και ζεόλιθος ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας.
- Στον τρίτο αντιδραστήρα προστέθηκε πριονίδι ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας, αλλά και βερμικουλίτης ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας
- Στον τέταρτο αντιδραστήρα προστέθηκε περλίτης ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας.

Οι επιπλέον πληρώσεις των αντιδραστήρων έγιναν με βάση τα προαναφερθέντα ποσοστά.

Πίνακας 5.36 Τροφοδοσία των αντιδραστήρων του τέταρτου κύκλου της Δράσης Β

Αντιδραστήρας	Ημέρα	Κυτταρινούχα				Πρωτεΐνες		Υδατάνθρακες		Ορυκτό			Σύνολο	Τελικό Σύνολο
		Μαρούλι	Μπανάνα	Πορτοκάλι	Λεμόνι	Ρεβύθι	Φασόλι	Ψωμί	Πριονίδι	Ζεόλιθος	Βερμικουλίτης	Περλίτης		
1	1	5000	500	1500	1000	500	500	1000	1000				11000	15400
	1	1000	100	300	200	100	100	200	200				2200	
	2	1000	100	300	200	100	100	200	200				2200	
2	1	5000	500	1500	1000	500	500	1000	1000	1000			12000	16800
	1	1000	100	300	200	100	100	200	200	200			2400	
	2	1000	100	300	200	100	100	200	200	200			2400	
3	1	5000	500	1500	1000	500	500	1000	1000		1000		12000	16800
	1	1000	100	300	200	100	100	200	200		200		2400	
	2	1000	100	300	200	100	100	200	200		200		2400	
4	1	5000	500	1500	1000	500	500	1000				1000	11000	15400
	1	1000	100	300	200	100	100	200				200	2200	
	2	1000	100	300	200	100	100	200				200	2200	

Δειγματοληψία – Απώλεια μάζας (Κύκλος 4 Δράση Β)

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων του τέταρτου κύκλου της Δράσης Β, και συγκεκριμένα των πρώτων οχτώ ημερών, πραγματοποιήθηκε καθημερινή δειγματοληψία. Ακολούθησαν άλλες πέντε δειγματοληψίες ανά δύο ημέρες.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η μάζα του υλικού που αφαιρέθηκε σε κάθε αντιδραστήρα τις μέρες της δειγματοληψίας. Οι τιμές του πίνακα είναι σε γραμμάρια.

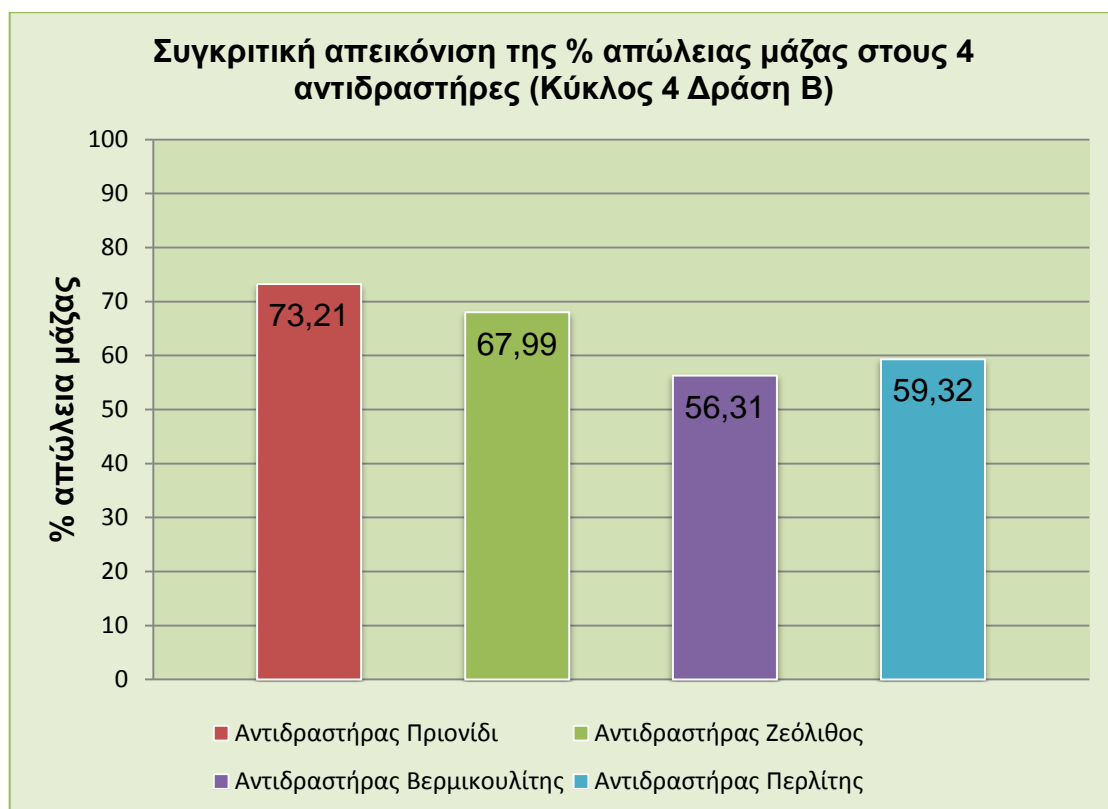
Πίνακας 5.37 Δειγματοληψία από τους αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου (g)

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
1	100	100	115	120
2	150	150	172	124
3	265	143	145	136
4	128	130	172	151
7	143	146	130	150
8	146	150	130	139
11	120	140	146	160
14	137	154	142	158
16	141	145	150	145
18	137	139	150	148
21	149	145	150	150
ΣΥΝΟΛΟ	1616	1542	1602	1581

Οι ποσότητες που αφαιρέθηκαν από κάθε αντιδραστήρα σε συνδυασμό, με τις λοιπές απώλειες (π.χ. υγρασία), την αρχική τροφοδοσία και την ζύγιση του τελικού προϊόντος μας δίνουν το επί τις εκατό ποσοστό απώλειας μάζας στον κάθε αντιδραστήρα. Αναλυτικότερα τα δεδομένα παρουσιάζονται στον πίνακα 5.37 και στο διάγραμμα 5.29.

Πίνακας 5.38 Ποσοστό % συνολικής μείωσης της μάζας σε κάθε αντιδραστήρα του τέταρτου κύκλου

	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
Αρχική Τροφοδοσία	15400,00g	16800,00g	16800,00g	13400,00g
Σύνολο Δειγματοληψίας	1616g	1542g	1602g	1581g
Θεωρητικά στον αντιδραστήρα	13784,00g	15258,00g	15198,00g	11819,00g
Πραγματικά στον αντιδραστήρα	3386,00g	4259,00g	5542,00g	4389,00g
Ποσοστό μείωσης της μάζας	75,44%	72,09%	63,53%	62,86%



Διάγραμμα 5.29 Συγκριτική απεικόνιση της % απώλειας μάζας στους 4 αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου της Δράσης Β

Προσδιορισμός της θερμοκρασίας του υποστρώματος (Κύκλος 4 Δράση Β)

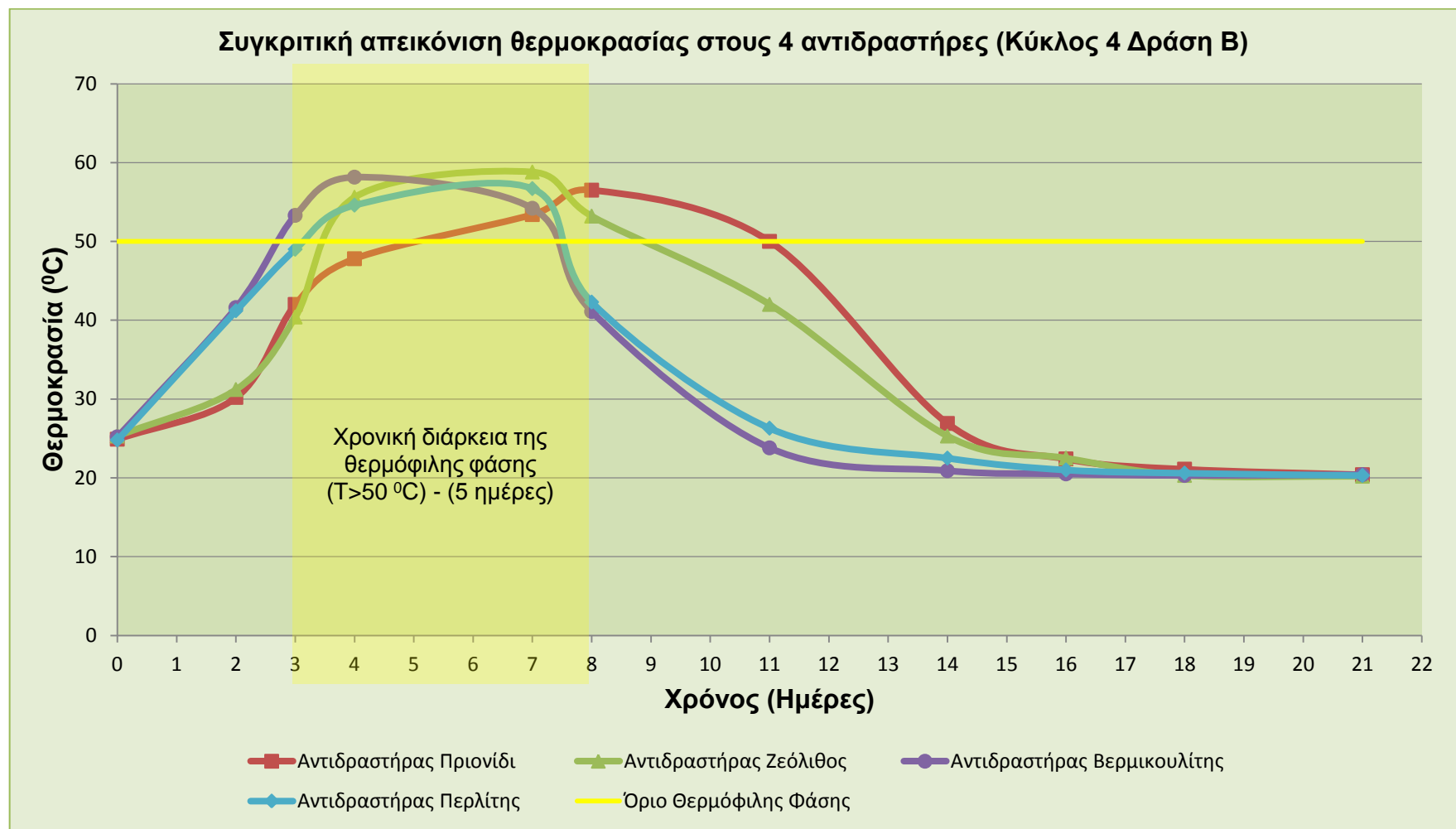
Στο διάγραμμα 5.38 παρουσιάζεται η εξέλιξη της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια του 4^{ου} πειραματικού κύκλου της Δράσης Β. Η έντονη μικροβιακή δραστηριότητα αρχίζει από τις πρώτες ημέρες της διεργασίας διαμορφώνοντας μια πρώτη μεσόφιλη φάση την οποία διαδέχεται τη 2^η ημέρα η θερμόφιλη.

Εξαιτίας της διάσπασης των διαλυτών και άμεσα διαθέσιμων βιοαποδομήσιμων οργανικών ενώσεων οι οποίες εμπεριέχονται στα οργανικά απορρίμματα, μεγάλες ποσότητες ενέργειας σε μορφή θερμότητας εκλύονται και συσσωρεύονται στο υπόστρωμα με αποτέλεσμα η θερμοκρασία να αυξηθεί σημαντικά σε σύντομο χρονικό διάστημα λαμβάνοντας τη μέγιστη τιμή, σε όλους τους αντιδραστήρες, την 4^η ημέρα διεξαγωγής της διεργασίας. Οι υψηλές θερμοκρασίες (>50°C) διατηρούνται στο βιοαντιδραστήρα για πέντε συνεχείς ημέρες (3^η έως 8^η ημέρα), για τους αντιδραστήρες που προστέθηκε ορυκτό, ενώ για τον αντιδραστήρα με σκέτο πριονίδι η θερμόφιλη φάση ξεκινάει με 2 ημέρες καθυστέρηση. Η μείωση των επιπέδων της θερμοκρασίας και η διαμόρφωση μιας δεύτερης μεσόφιλης φάσης (9^η ημέρα) πραγματοποιείται μόνο εφόσον έχει βιοαποδομηθεί σημαντικό μέρος του οργανικού κλάσματος του υποστρώματος ικανό να ενισχύσει και να συντηρήσει την έντονη μικροβιακή δραστηριότητα.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τιμές της θερμοκρασίας για τους τέσσερις αντιδραστήρες.

Πίνακας 5.39 Τιμές θερμοκρασίας (°C) για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
0	24,90	25,30	25,20	24,80
2	30,20	31,20	41,60	41,20
3	42,00	40,40	53,30	49,00
4	47,80	55,60	58,15	54,60
7	53,40	58,80	54,20	56,70
8	56,50	53,20	41,10	42,30
11	50,00	42,00	23,80	26,30
14	26,90	25,30	20,90	22,50
16	22,40	22,50	20,50	21,00
18	21,10	20,30	20,30	20,60
21	20,40	20,20	20,40	20,30



Διάγραμμα 5.30 Συγκριτική απεικόνιση θερμοκρασίας στους 4 αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου της Δράσης Β

Προσδιορισμός της υγρασίας του υποστρώματος (Κύκλος 4 Δράση Β)

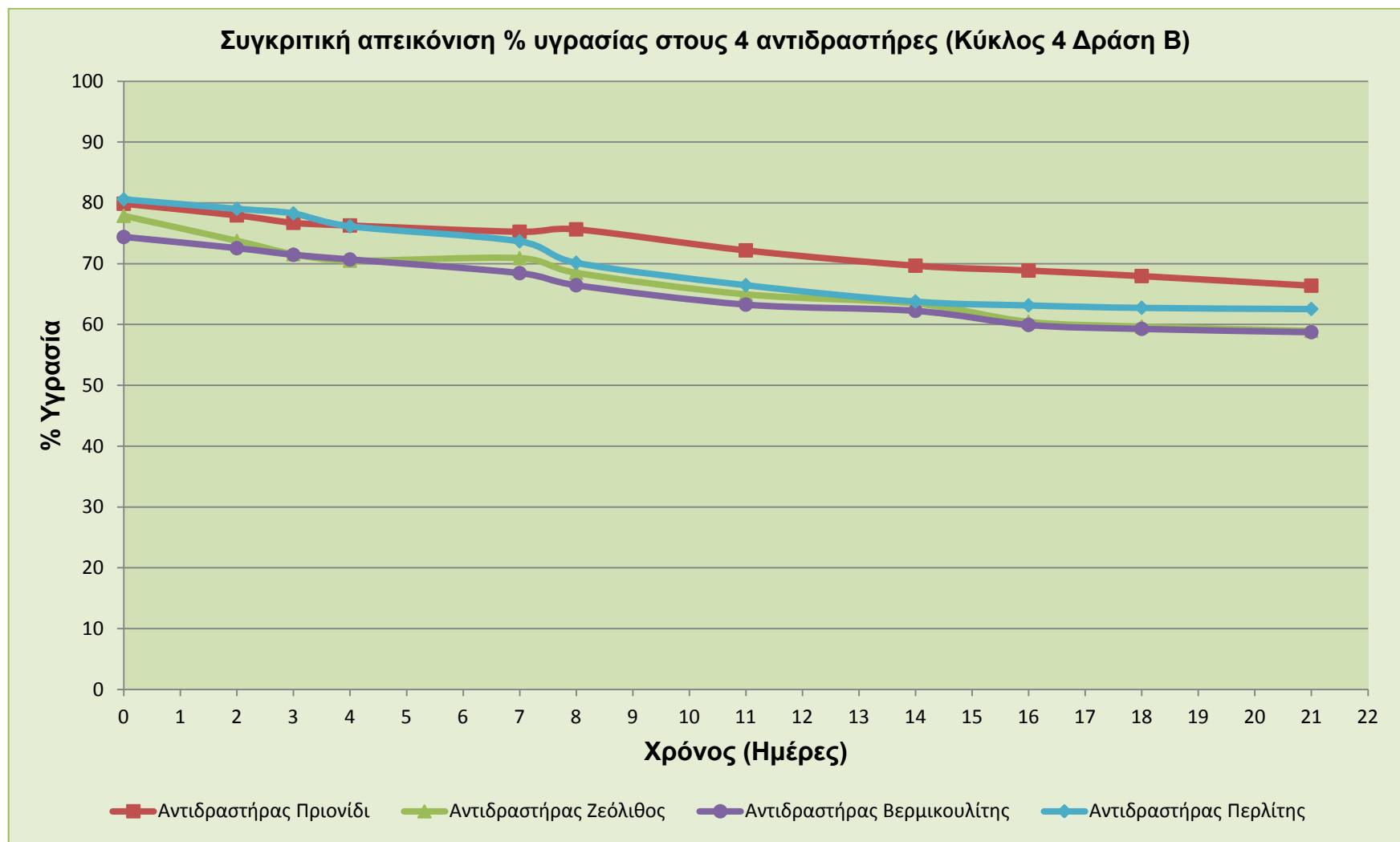
Στο διάγραμμα 5.31 απεικονίζεται η μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας κατά τη διεξαγωγή του 4^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης της Δράσης Β. Η περιεκτικότητα σε υγρασία του αρχικού μίγματος και στους τέσσερις αντιδραστήρες, βρίσκεται σε υψηλά επίπεδα μεταξύ 74,38% και 80,57%. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο καθώς για την επίτευξη λόγου C/N στο αρχικό υπόστρωμα κοντά στην τιμή 40, χρειάζεται αυτό να εμπεριέχει μεγάλες ποσότητες κυτταρινούχων τροφών. Η μεγαλύτερη μείωση της θερμοκρασίας παρατηρείται προς το τέλος της θερμόφυλης φάσης, καθώς εκεί έχουν προηγηθεί οι υψηλές τιμές της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του υποστρώματος. Κατά την έναρξη της 2^{ης} μεσόφιλης φάσης (9^η ημέρα) παρατηρείται μικρή μείωση της υγρασίας, μέχρι να σταθεροποιηθεί ομαλά προς το τέλος της διεργασίας.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές της υγρασίας (%) για όλους τους αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου της Δράσης Β.

Πίνακας 5.40 Τιμές υγρασίας (%) για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
0	79,85	77,86	74,38	80,57
2	77,94	73,75	72,54	79,03
3	76,71	71,55	71,45	78,26
4	76,28	70,49	70,68	76,15
7	75,24	70,91	68,44	73,67
8	75,64	68,49	66,45	70,15
11	72,18	64,96	63,27	66,47
14	69,67	63,45	62,24	63,78
16	68,87	60,44	59,93	63,15
18	67,96	59,67	59,28	62,75
21	66,38	58,95	58,74	62,55

Η ιδανική περιεχόμενη υγρασία στο τελικό κόμποστ κυμαίνεται μεταξύ 40% και 50% καθότι εξασφαλίζεται περιορισμένη μικροβιακή δραστηριότητα γεγονός επιθυμητό όταν γίνεται εναπόθεση κόμποστ στο έδαφος, ενώ σε καμία περίπτωση δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 25% καθότι δεν μπορεί να ενσωματωθεί εύκολα στο έδαφος. Οι καταγεγραμμένες πειραματικές τιμές κυμαίνονται από 58,74% μέχρι 66,38% και οφείλεται στην υψηλή αρχική υγρασία των υλικών τροφοδοσίας. Για το λόγο αυτό πριν την χρήση του κόμποστ συνίσταται να αφεθεί το τελικό προϊόν εκτός αντιδραστήρα για μια επιπλέον χρονική περίοδο ενός μήνα για την περαιτέρω μείωση της υγρασίας του.



Διάγραμμα 5.31 Συγκριτική απεικόνιση % υγρασίας στους 4 αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου της Δράσης Β

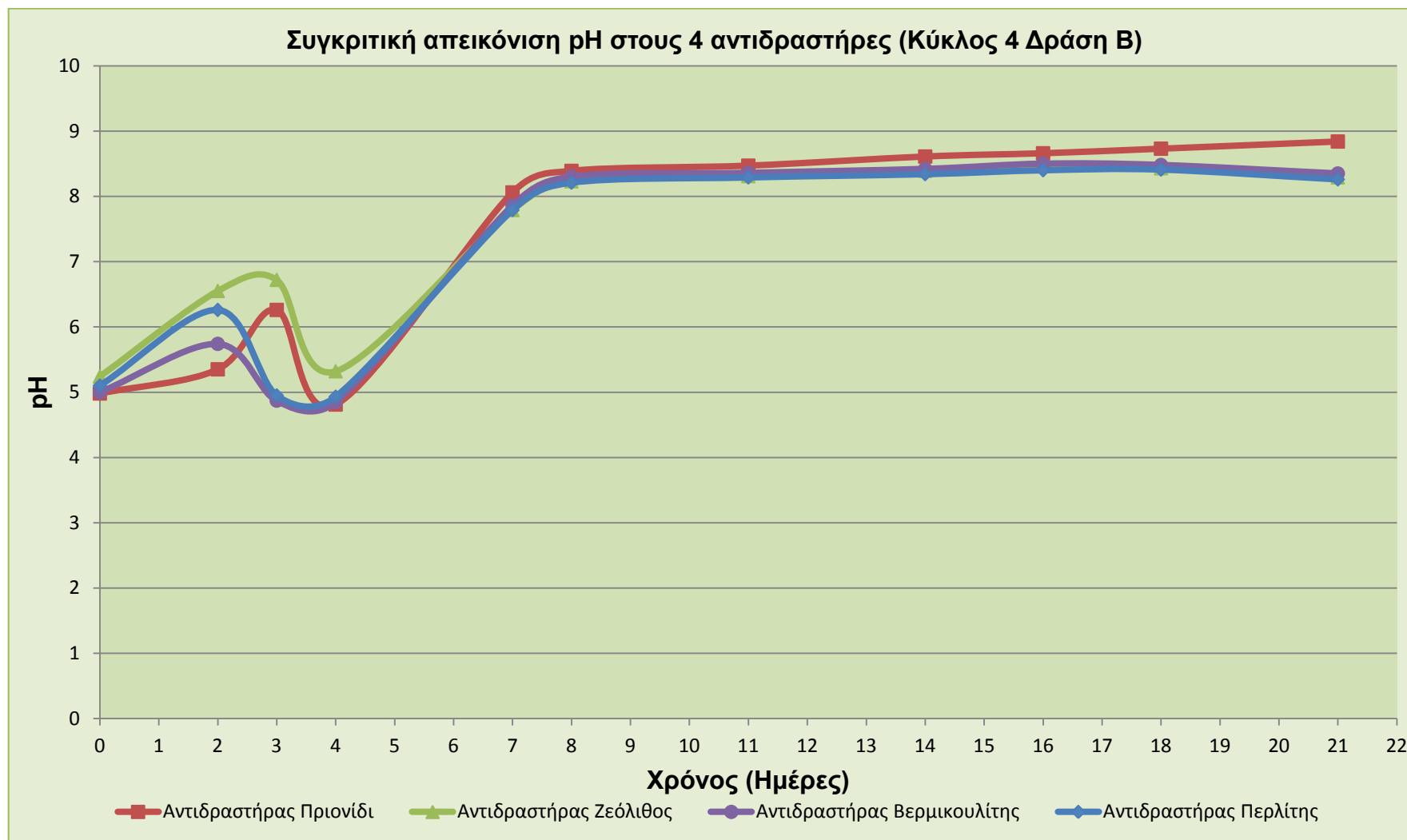
Προσδιορισμός του pH του υποστρώματος (Κύκλος 4 Δράση Β)

Η εξέλιξη του pH κατά τη διάρκεια του 4^{ου} κύκλου παρουσιάζεται στο διάγραμμα 5.32. Στο διάγραμμα φαίνεται ότι η εξέλιξη του pH είναι παρόμοια σε όλους του κύκλους πειραμάτων παρατηρείται δηλαδή ότι το pH μειώνεται στις πρώτες φάσεις της βιοαποδόμησης, γεγονός που οφείλεται στη δράση οξυγενούς βακτηριακής μικροχλωρίδας που αποδομεί τις σύνθετες οργανικές ενώσεις σε οργανικά οξέα. Έπειτα αναπτύσσονται πρωτεϊνολυτικές διεργασίες (διάσπαση των οργανικών οξέων) που έχουν ως συνέπεια την παραγωγή αμμωνίας με αποτέλεσμα την αύξηση της τιμής του pH, ενώ στη συνέχεια οι τιμές του pH μειώνονται όσο προχωρεί η διεργασία της κομποστοποίησης και κατά συνέπεια η ωρίμανση του υποστρώματος. Όταν το κόμποστ ωριμάσει η τιμή του pH κυμαίνεται γύρω στο 7 ενώ το εύρος τιμών pH στο τέλος του χρόνου παραμονής στον οικιακό κομποστοποιητή κυμαίνεται γύρω στο 8, με εξαίρεση το κόμποστ με πρόσθετο σκέτο πριονίδι, όπου το pH του προς το τέλος της διεργασίας πλησιάζει το 9. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι το προϊόν κομποστοποίησης δεν είναι πλήρως σταθεροποιημένο και απαιτείται η παραμονή του σε υπαίθριο χώρο μέχρι την πλήρη σταθεροποίηση του.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές του pH για όλους τους αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου της Δράσης Β.

Πίνακας 5.41 Τιμές pH για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
0	4,98	5,24	5,00	5,10
2	5,35	6,55	5,74	6,26
3	6,26	6,72	4,87	4,95
4	4,81	5,32	4,85	4,93
7	8,06	7,79	7,86	7,79
8	8,39	8,23	8,30	8,21
11	8,47	8,31	8,36	8,29
14	8,61	8,39	8,42	8,34
16	8,66	8,47	8,50	8,40
18	8,73	8,43	8,48	8,41
21	8,84	8,29	8,35	8,26



Διάγραμμα 5.32 Συγκριτική απεικόνιση pH στους 4 αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου της Δράσης Β

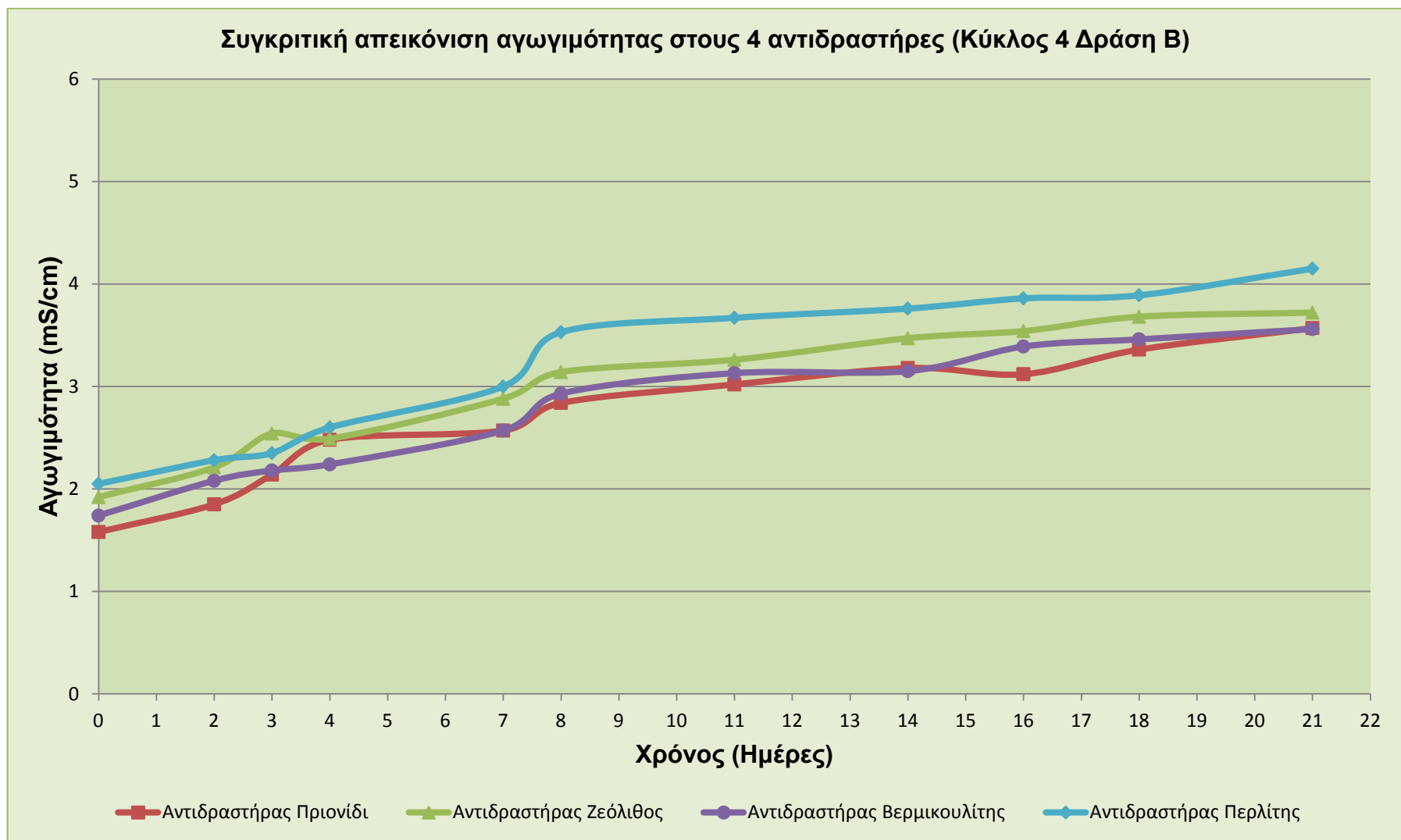
Προσδιορισμός της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του υποστρώματος (Κύκλος 4 Δράση Β)

Στο διάγραμμα 5.33 παρατηρείται σταδιακή αύξηση της αγωγιμότητας καθόλη τη διάρκεια της κομποστοποίησης, η οποία αποδίδεται στην εκτεταμένη αποσύνθεση της οργανικής ύλης που με την σειρά της έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της περιεκτικότητας του υποστρώματος σε άλατα. Το εύρος των τιμών της αγωγιμότητας των προϊόντων του αντιδραστήρα κυμαίνεται από 3,56 έως 4,15 *mS*.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για όλους τους αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου.

Πίνακας 5.42 Τιμές αγωγιμότητας για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου (*mS/cm*)

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
0	1,58	1,92	1,74	2,05
2	1,85	2,21	2,08	2,28
3	2,14	2,54	2,18	2,35
4	2,48	2,49	2,24	2,60
7	2,57	2,88	2,57	3,00
8	2,84	3,14	2,93	3,53
11	3,02	3,26	3,13	3,67
14	3,18	3,47	3,15	3,76
16	3,12	3,54	3,39	3,86
18	3,36	3,68	3,46	3,89
21	3,57	3,72	3,56	4,15



Διάγραμμα 5.33 Συγκριτική απεικόνιση ηλεκτρικής αγωγιμότητας στους 4 αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου της Δράσης Β

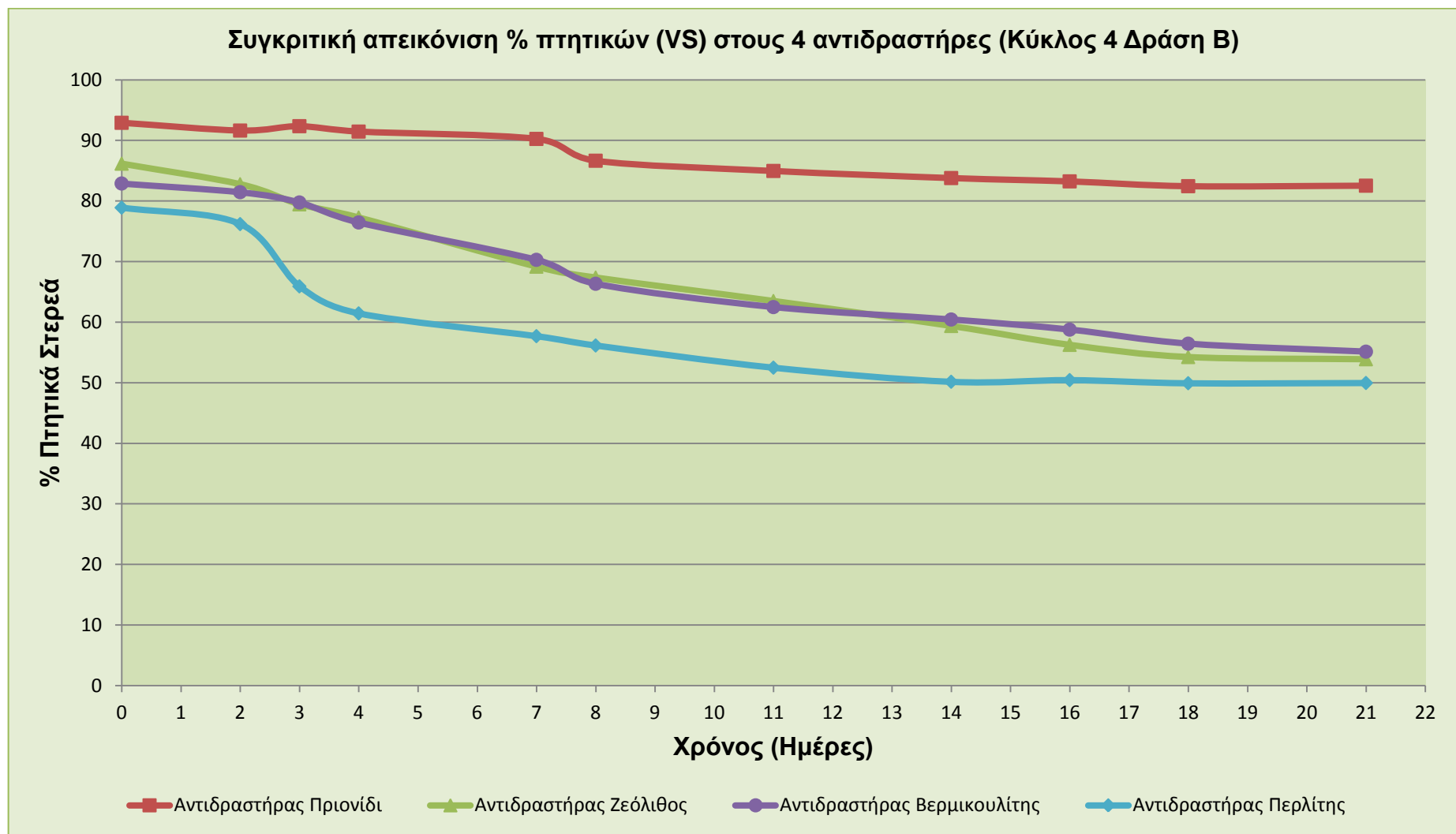
Προσδιορισμός των πτητικών στερεών (%) στο υπόστρωμα (Κύκλος 4 Δράση Β)

Στο διάγραμμα 5.34 παρουσιάζεται η πορεία της % συγκέντρωσης των πτητικών στερεών στερεών για τους αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου της Δράσης Β. Η μεγαλύτερη μείωση των πτητικών στερεών παρατηρείται την 3^η έως την 11^η ημέρα, περίοδο κατά την οποία εμφανίζονται και οι υψηλότερες θερμοκρασίες (θερμόφιλη φάση) για τους συγκεκριμένους αντιδραστήρες, επιβεβαιώνοντας το γεγονός, ότι αποτελούν άμεση πηγή προς κατανάλωση για τους μικροοργανισμούς. Η μεγαλύτερη αρχική τιμή του ποσοστού των πτητικών παρατηρείται στον αντιδραστήρα με πρόσθετο πριονίδι, ενώ η μικρότερη στον αντιδραστήρα με πρόσθετο περλίτη λόγω απουσίας πριονιδιού. Στους άλλους τρεις αντιδραστήρες και κυρίως στον αντιδραστήρα με πρόσθετο περλίτη παρατηρείται ταχεία μείωση των πτητικών στερεών και σταθεροποίηση τους μετά το πέρας της διεργασίας. Αντίθετα στον αντιδραστήρα με πρόσθετο πριονίδι παρατηρείται η μικρότερη κατανάλωση πτητικών η οποία επαληθεύεται και από την καμπύλη του οργανικού άνθρακα.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές των πτητικών στερεών για όλους τους αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου.

Πίνακας 5.43 Τιμές % πτητικών στερεών για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
0	92,90	86,15	82,88	78,89
2	91,62	82,76	81,45	76,18
3	92,34	79,44	79,75	65,90
4	91,45	77,26	76,45	61,44
7	90,24	69,15	70,28	57,68
8	86,64	67,35	66,33	56,14
11	84,95	63,48	62,48	52,48
14	83,78	59,36	60,43	50,15
16	83,23	56,24	58,76	50,43
18	82,44	54,23	56,44	49,91
21	82,52	53,87	55,12	49,95



Διάγραμμα 5.34 Συγκριτική απεικόνιση των πτητικών στερεών (%) στους 4 αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου της Δράσης Β

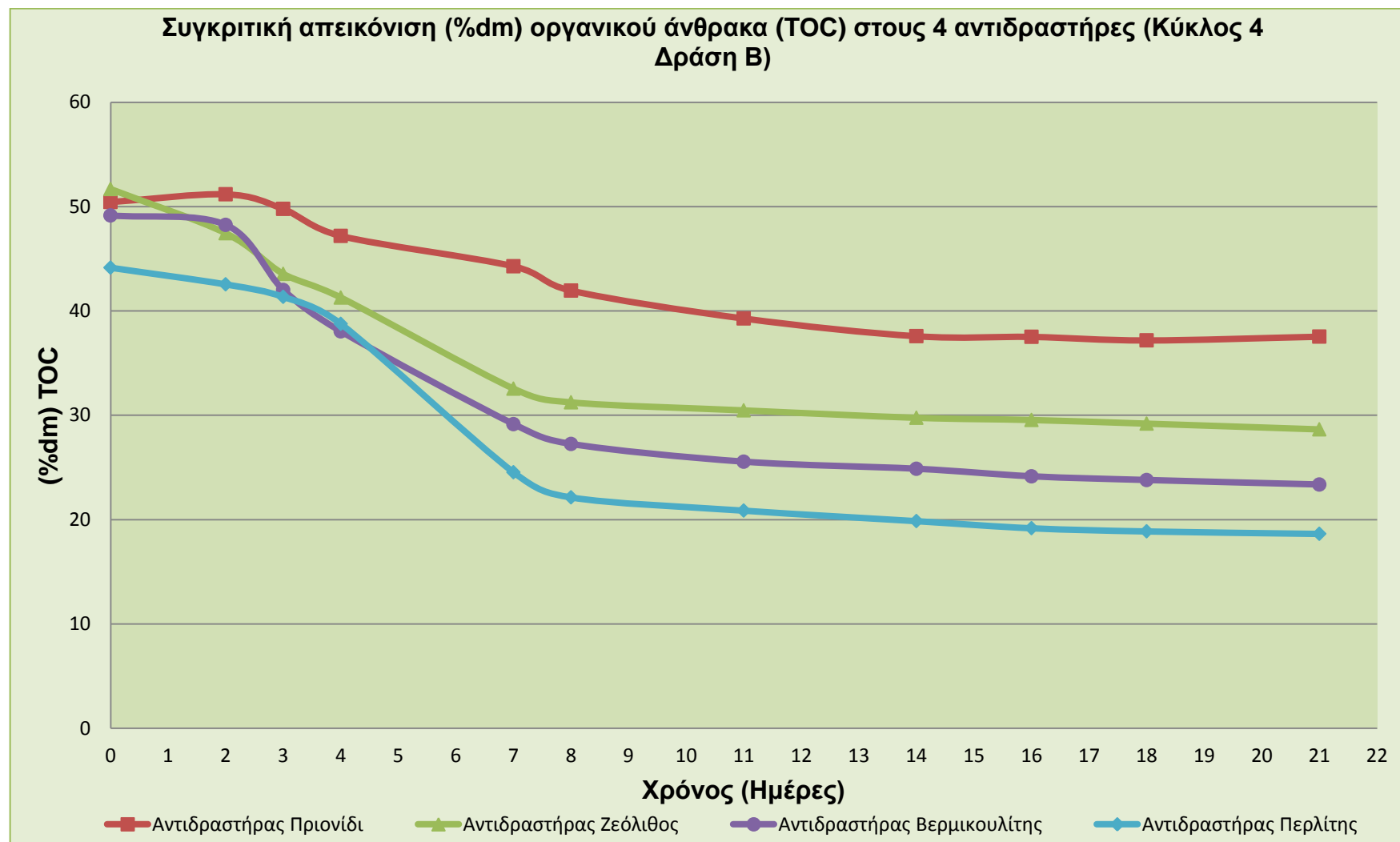
Προσδιορισμός του ολικού οργανικού άνθρακα TOC % στο υπόστρωμα (Κύκλος 4 Δράση Β)

Η διάσπαση της οργανικής ουσίας του υποστρώματος και η μετατροπή της σε ανόργανα συστατικά κατά την παραμονή του υλικού τροφοδοσίας στον βιοαντιδραστήρα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του ολικού οργανικού άνθρακα στον 4^ο πειραματικό κύκλο κομποστοποίησης της Δράσης Β, όπως απεικονίζεται στο διάγραμμα 5.35. Τις πρώτες ημέρες της διεργασίας καταγράφεται σημαντική μείωση του ολικού άνθρακα από 44,15-51,68% αρχικά σε 18,64-31,24% την 8^η ημέρα λειτουργίας (όσον αφορά στους αντιδραστήρες που πραγματοποιήθηκε προσθήκη ορυκτού, καθώς στον αντιδραστήρα με σκέτο πριονίδι ως πρόσθετο η είωση ήταν πολύ μικρότερη), η οποία οφείλεται στην αποδόμηση του άμεσα διαθέσιμου άνθρακα. Επομένως, οι μικροοργανισμοί καταναλώνουν αρχικά τις ασταθείς και εύκολα διαθέσιμες οργανικές ενώσεις, μειώνοντας σημαντικά τον περιεχόμενο ολικό οργανικό άνθρακα ενώ σε μετέπειτα στάδιο ο ρυθμός μείωσής του καθορίζεται από το ρυθμό διάσπασης πιο πολύπλοκων και σύνθετων οργανικών ουσιών οι οποίες είναι λιγότερο επιδεκτικές στη μικροβιακή επίδραση (Mena et al., 2003). Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές του ολικού οργανικού άνθρακα (%dm) για όλους τους αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου.

Πίνακας 5.44 Τιμές ολικού οργανικού άνθρακα (%dm) για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
0	50,44	51,68	49,15	44,15
2	51,18	47,44	48,25	42,55
3	49,78	43,55	42,01	41,35
4	47,19	41,28	38,04	38,76
7	44,28	32,55	29,15	24,54
8	41,95	31,24	27,25	22,14
11	39,28	30,47	25,55	20,87
14	37,58	29,76	24,87	19,86
16	37,52	29,55	24,15	19,18
18	37,18	29,20	23,79	18,88
21	37,54	28,65	23,36	18,64

Πρέπει να σημειωθεί ότι η μείωση του συνολικού οργανικού άνθρακα στην περίπτωση της χρήσης ορυκτών ήταν σαφέστατα μεγαλύτερη απ' ό,τι στον αντιδραστήρα που περιείχε μόνο πριονίδι. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι η χρήση ορυκτών επιβραδύνει και επιταχύνει την βιοαποδόμηση της οργανικής ύλης βελτιώνοντας τις συνθήκες αερισμού και ύγρανσης του υποστρώματος κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης.



Διάγραμμα 5.35 Συγκριτική απεικόνιση (%dm) οργανικού άνθρακα TOC στους 4 αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου της Δράσης Β

Προσδιορισμός του ολικού αζώτου κατά Kjeldahl TKN (%) στο υπόστρωμα (Κύκλος 4 Δράση Β)

Στο διάγραμμα 5.36 απεικονίζεται η μεταβολή του ολικού αζώτου κατά τη διεργασία του 4^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης της Δράσης Β. Η αύξηση του ολικού περιεχόμενου αζώτου αποδίδεται στην αυξημένη κατανάλωση του οργανικού άνθρακα και τη συνεπακόλουθη μείωση της συνολικής μάζας του υποστρώματος καθόλη τη διάρκεια της κομποστοποίησης (Καπετάνιος, 1990). Επιπλέον, όπως επισημαίνουν οι Insam and de Bertoldi (2007) και Beauchamp et al. (2006), η αύξηση της περιεκτικότητας του αζώτου προς το τέλος της διεργασίας, αν και περιορισμένη, οφείλεται στη δραστηριότητα των ελεύθερων αζωτοδεσμευτικών βακτηρίων. Επομένως, η περιεκτικότητα του αζώτου στο υπόστρωμα αυξάνεται από τιμές μεταξύ 1,21-1,36% dm αρχικά σε τιμές μεταξύ 1,86-2,79% dm στο τέλος της διεργασίας.

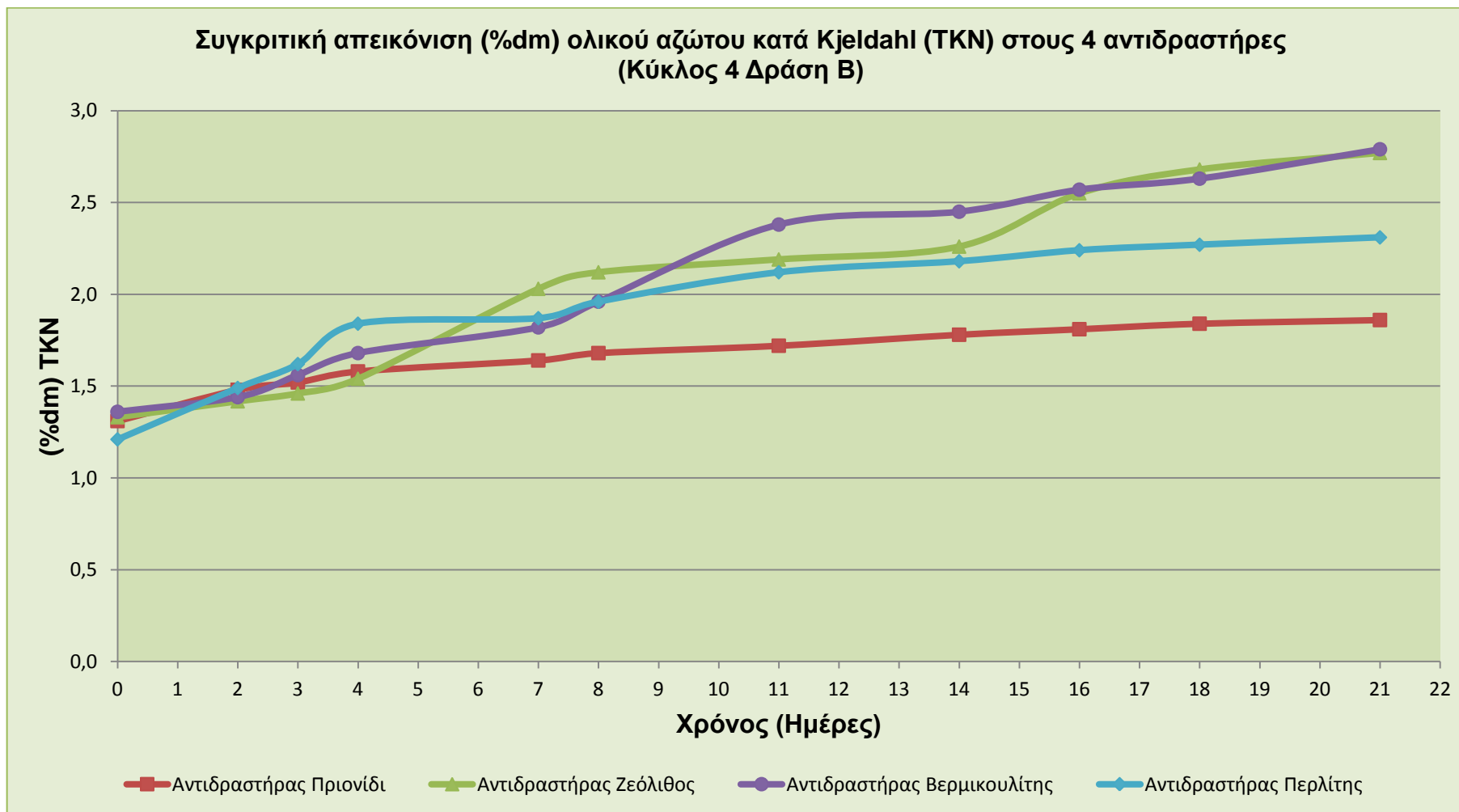
Οι μεγαλύτερες απώλειες του ολικού αζώτου παρουσιάζονται κυρίως στη θερμόφιλη φάση της διεργασίας (3^η έως 8^η ημέρα) λόγω της πτητικότητας της σχηματιζόμενης αμμωνίας

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές του TKN (%dm) για όλους τους αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου.

Πίνακας 5.45 Τιμές (%dm) TKN για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου της Δράσης Β

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
1	1,31	1,33	1,36	1,21
2	1,48	1,42	1,44	1,49
3	1,52	1,46	1,56	1,62
4	1,58	1,54	1,68	1,84
7	1,64	2,03	1,82	1,87
8	1,68	2,12	1,96	1,96
11	1,72	2,19	2,38	2,12
14	1,78	2,26	2,45	2,18
16	1,81	2,55	2,57	2,24
18	1,84	2,68	2,63	2,27
21	1,86	2,77	2,79	2,31

Παρατηρείται ότι το ποσοστό αζώτου στο κόμποστ που χρησιμοποιήθηκε ως πρόσθετο ο ζεόλιθος, είναι εμφανώς αυξημένο και σε αυτόν τον πειραματικό κύκλο, γεγονός που επιβεβαιώνει τις πολύ σημαντικές ιδιότητες του ζεόλιθου.



Διάγραμμα 5.36 Συγκριτική απεικόνιση του % ολικού αζώτου κατά kjeldahl στους 4 αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου της Δράσης Β

Προσδιορισμός του λόγου C/N στο υπόστρωμα (Κύκλος 4 Δράση Β)

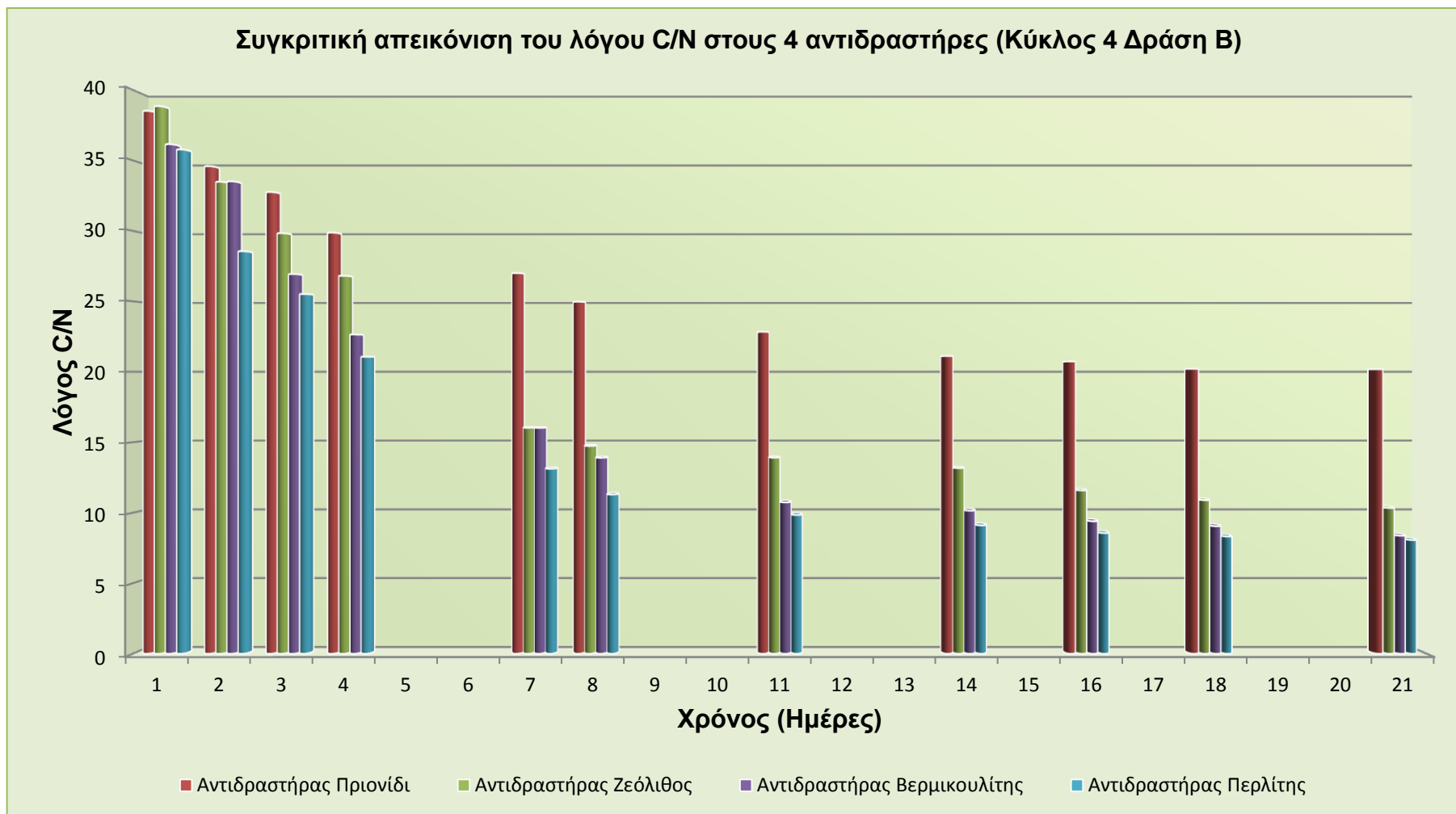
Το διάγραμμα 5.37 απεικονίζει την εξέλιξη του λόγου C/N κατά τη διεργασία του 4^{ου} κύκλου κομποστοποίησης της Δράσης Β. Όπως παρατηρείται ο αρχικός λόγος C/N του υποστρώματος διαμορφώνεται από την ανάμιξη των υλικών τροφοδοσίας σε τιμές κοντά στο 40.

Λόγω της εμφάνισης υψηλού αρχικού λόγου C/N στο υπόστρωμα οι μικροοργανισμοί βιοαποδομούν την οργανική ουσία διαμορφώνοντας συνθήκες ταχείας κομποστοποίησης με υψηλές θερμοκρασίες και με παράλληλη σημαντική μείωση του περιεχόμενου άνθρακα για τις πρώτες επτά ημέρες λειτουργίας του συστήματος με την αναλογία C/N να λαμβάνει τιμές κάτω από το 20 για τους αντιδραστήρες που προστέθηκε ορυκτό. Η κατανάλωση του διαθέσιμου οργανικού άνθρακα του υποστρώματος αντικατοπτρίζει τη μείωση του λόγου C/N στα αρχικά στάδια του πειράματος. Έπειτα από την κατανάλωση της άμεσα διαθέσιμης οργανικής ουσίας ο ρυθμός μείωσης του λόγου C/N επιβραδύνεται προσεγγίζοντας τιμές μικρότερες του 10 την 21^η ημέρα λειτουργίας.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές της αναλογίας C/N για όλους τους αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου.

Πίνακας 5.46 Τιμές C/N για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
1	38,50	38,84	36,14	35,77
2	34,58	33,48	33,50	28,55
3	32,75	29,83	26,93	25,51
4	29,87	26,81	22,64	21,07
7	27,00	16,03	16,02	13,12
8	24,97	14,74	13,90	11,29
11	22,84	13,91	10,74	9,84
14	21,11	13,17	10,15	9,11
16	20,73	11,59	9,40	8,56
18	20,21	10,90	9,05	8,32
21	20,18	10,34	8,37	8,07



Διάγραμμα 5.37 Συγκριτική απεικόνιση του λόγου C/N στους 4 αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου της Δράσης Β

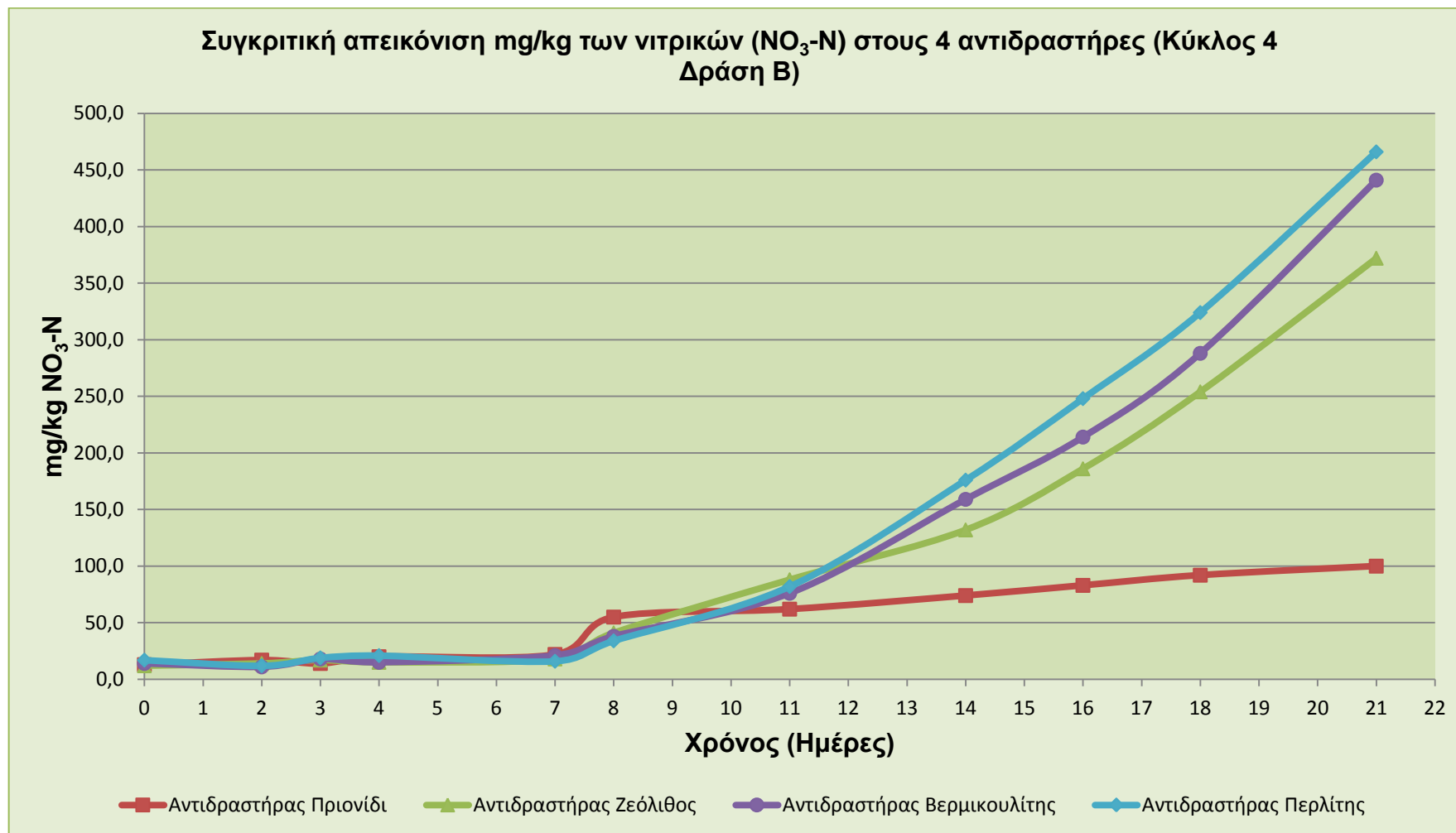
Προσδιορισμός νιτρικών ($NO_3^- - N$) και αμμωνιακών ($NH_4^+ - N$) στο υπόστρωμα (Κύκλος 4 Δράση Β)

Στα διαγράμματα 5.46 και 5.47 παρουσιάζεται η εξέλιξη των αμμωνιακών και των νιτρικών κατά τη διεργασία του 4^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης της Δράσης Β. Η βιοαποδόμηση της οργανικής ουσίας και η δράση πρωτεολυτικών βακτηρίων κατά την έναρξη της διεργασίας έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της συγκέντρωσης των αμμωνιακών στο υπόστρωμα παρουσιάζοντας μέγιστη τιμή, την 8^η ημέρα. Για την ίδια περίοδο η συγκέντρωση των νιτρικών σημειώνει μικρή αύξηση, λόγω της μετατροπής μέρους των αμμωνιακών σε νιτρικά μέσω της διεργασίας της ετερότροφης νιτροποίησης. Από την 8^η ημέρα και έπειτα εμφανίζεται απότομη μείωση των αμμωνιακών με ταυτόχρονη αύξηση της συγκέντρωσης των νιτρικών που αποδίδεται στη δράση αυτότροφων νιτροποιητικών βακτηρίων. Πρέπει να αναφερθεί ότι ο ρυθμός μείωσης της συγκέντρωσης των αμμωνιακών δεν συμπίπτει με το ρυθμό αύξησης των νιτρικών στο υπόστρωμα υποδεικνύοντας ότι παρουσιάζονται σημαντικές απώλειες αζώτου κυρίως λόγω της πτητικότητας της αμμωνίας (Bernal et al., 2009).

Στους πίνακες 5.47 και 5.48 παρατίθενται οι τιμές των νιτρικών και των αμμωνιακών για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου της Δράσης Β.

Πίνακας 5.47 Τιμές $NO_3^- - N$ σε mg/kg για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
0	13	12	14	17
2	17	14	11	12
3	14	17	18	19
4	20	15	15	21
7	22	18	21	16
8	55	41	38	34
11	62	88	76	82
14	74	132	159	176
16	83	186	214	248
18	92	254	288	324
21	100	372	441	466



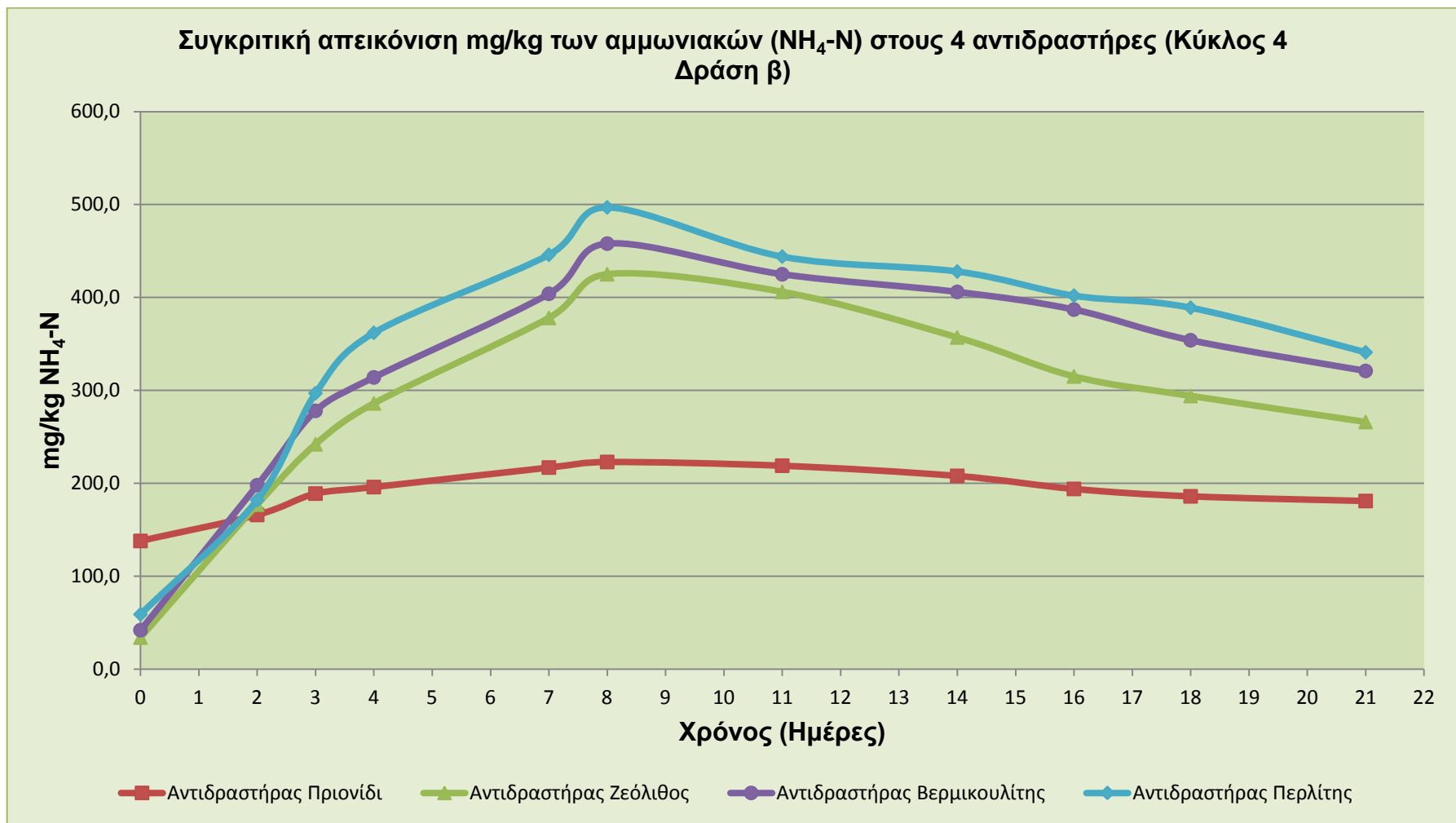
Διάγραμμα 5.38 Συγκριτική απεικόνιση των νιτρικών NO₃⁻ – N στους 4 αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου της Δράσης Β

Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζεται η αναμενόμενη αύξηση των νιτρικών μετά τη θερμόφιλη φάση. Οι τελικές τιμές είναι οι αναμενόμενες σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, με εξαίρεση τις τιμές νιτρικών του αντιδραστήρα με πρόσθετο πριονίδι. Στον αντιδραστήρα αυτό, κατά τη λειτουργία του, πιθανά οι διεργασίες της βιοαποδόμησης να μην ολοκληρώθηκαν επιτυχώς.

Πίνακας 5.48 Τιμές $NH_4^+ - N$ σε mg/kg για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
1	138,00	34,00	42,00	59,00
2	166,00	177,00	198,00	182,00
3	189,00	242,00	278,00	297,00
4	196,00	286,00	314,00	362,00
7	217,00	378,00	404,00	446,00
8	223,00	425,00	458,00	497,00
11	219,00	406,00	425,00	444,00
14	208,00	357,00	406,00	428,00
16	194,00	315,00	387,00	402,00
18	186,00	294,00	354,00	389,00
21	181,00	266,00	321,00	341,00

Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρατηρείται η αύξηση των αμμωνιακών κατά τη διάρκεια της θερμόφιλης φάσης. Παρατηρούνται, επίσης, ιδιαίτερα αυξημένες τιμές στον αντιδραστήρα με πρόσθετο πριονίδι, οι οποίες αυξάνονται κατά τη θερμόφιλη φάση. Το γεγονός ότι η συγκέντρωση των αμμωνιακών ακολουθεί σχεδόν σταθερή πορεία και μετά τη θερμόφιλη φάση οδηγεί στο συμπέρασμα της μη ορθής διεξαγωγής της διεργασίας. Αντιθέτως, στους αντιδραστήρες που χρησιμοποιήθηκαν ορυκτά, η πορεία των αμμωνιακών είναι αναμενόμενη καθώς η συγκέντρωσή τους αυξάνεται κατά τη θερμόφιλη φάση και έπειτα μειώνεται λόγω μετατροπής τους σε νιτρικά. Η πορεία αυτή είναι ενδεικτική της ορθής διεξαγωγής της διεργασίας.



Διάγραμμα 5.39 Συγκριτική απεικόνιση των αμμωνιακών $NH_4^+ - N$ στους 4 αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου της Δράσης Β

5.2.2.2.5 Σύγκριση Κύκλων 2,3 και 4 ως προς το λόγο με σταθερή παράμετρο το πρόσθετο.

Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται συγκριτικά διαγράμματα των Κύκλων 2,3 και 4 της Δράσης Β για κάθε τύπο αντιδραστήρα, διατηρώντας σταθερή παράμετρο το πρόσθετο που χρησιμοποιήθηκε, και συγκρίνοντας για το ίδιο πρόσθετο σε είδος και ποσοστό τους διαφορετικούς αρχικούς λόγους C/N στο υποστρώμα..

Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι τιμές όλων των παραμέτρων ξεχωριστά για τους αντιδραστήρες με κοινά πρόσθετα. Ακολουθούν τα διαγράμματα , όπου παρουσιάζεται η εξέλιξη της διεργασίας σε κάθε παράμετρο, για όλους τους αντιδραστήρες με κοινά πρόσθετα, και δύναται να εξαχθούν συγκριτικά συμπεράσματα όσον αφορά στο πως επηρεάζει την εξέλιξη της διεργασίας ο αρχικός λόγος C/N του υποστρώματος.

Προσδιορισμός της θερμοκρασίας του υποστρώματος (Συγκριτικός Κύκλος Υποστρωμάτων Δράσης Β)

Ακολουθεί συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων της θερμοκρασίας του υποστρώματος και για τους τέσσερις αντιδραστήρες που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε έναν από τους τρεις κύκλους, με αρχικό λόγο υποστρώματος C/N, 20, 30 και 40, και παρατίθενται τα αντίστοιχα διαγράμματα.

Στα διαγράμματα που ακολουθούν διακρίνονται τα τρία μεταβατικά στάδια της διεργασίας. Παρατηρείται ότι στον αντιδραστήρα του τέταρτου κύκλου (C/N=40) υπάρχει μία υστέρηση στην επίτευξη της θερμόφιλης φάσης και της μέγιστης θερμοκρασίας. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας μεγαλύτερης αρχικής υγρασίας του υποστρώματος στον δεύτερο κύκλο. Επίσης, στον τέτατο κύκλο η θερμόφιλη φάση διήρκησε περισσότερες ημέρες.

Συμπερασματικά και στους τρεις κύκλους το προφίλ της θερμοκρασίας ακολουθεί την αναμενόμενη πορεία επιτυγχάνοντας αρκετά υψηλές θερμοκρασίες για οικιακή κομποστοποίηση στη θερμόφιλη φάση, ένδειξη της ορθής διεξαγωγής της διεργασίας.

Πίνακας 5.49 Τιμές θερμοκρασίας (°C) για τον αντιδραστήρα του πριονιδιού στους τρεις κύκλους της Δράσης Β

Αντιδραστήρας Πριονίδι	Ημέρα	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4
	0	20,56	20,15	24,90
	2	30,48	31,25	30,20
	3	48,62	50,00	42,00
	4	53,14	56,60	47,80
	5	54,72	54,90	
	6	53,44	53,10	
	7	48,55	49,90	53,40
	8	42,16	41,20	56,50
	9	34,87	35,60	
	10	25,25	23,60	
	11	22,18	20,30	50,00
	12			
	14	19,45	17,90	26,90
	15			
	16			22,40
	18	18,96	16,50	21,10
21	18,54	14,70	20,40	

Πίνακας 5.50 Τιμές θερμοκρασίας (°C) για τον αντιδραστήρα του ζεόλιθου στους τρεις κύκλους της Δράσης Β

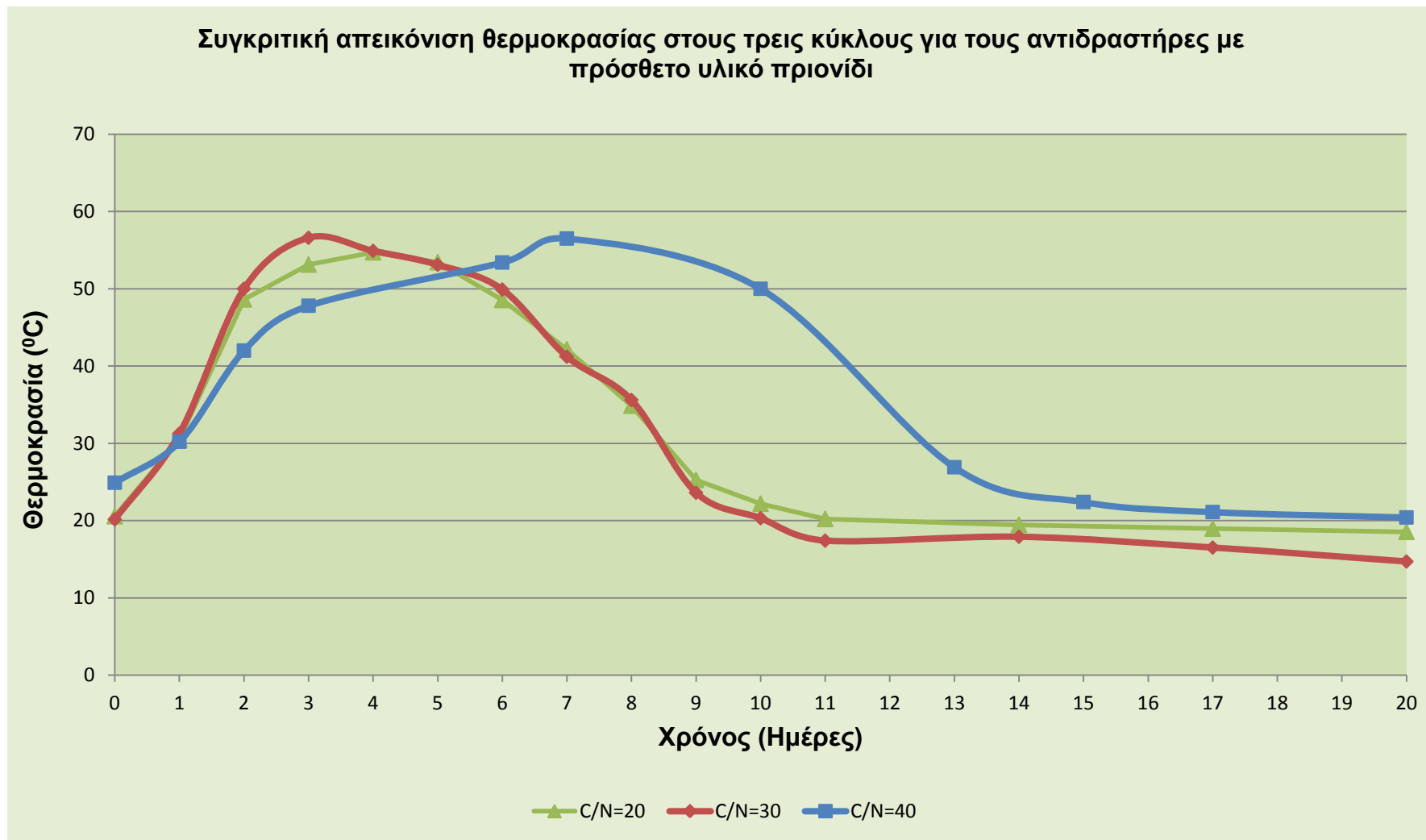
Αντιδραστήρας Ζεόλιθος	Ημέρα	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4
	0	22,07	20,30	25,30
	2	30,18	29,95	31,20
	3	51,41	51,00	40,40
	4	58,64	57,10	55,60
	5	55,32	54,20	
	6	52,97	52,70	
	7	50,48	50,10	58,80
	8	45,82	45,60	53,20
	9	37,17	37,80	
	10	29,21	28,80	
	11	26,18	20,80	42,00
	12			
	14	24,19	18,90	25,30
	15			
	16			22,50
	18	20,17	17,60	20,30
21	21,26	15,90	20,20	

Πίνακας 5.51 Τιμές θερμοκρασίας (°C) για τον αντιδραστήρα του βερμικουλίτη στους τρεις κύκλους της Δράσης Β

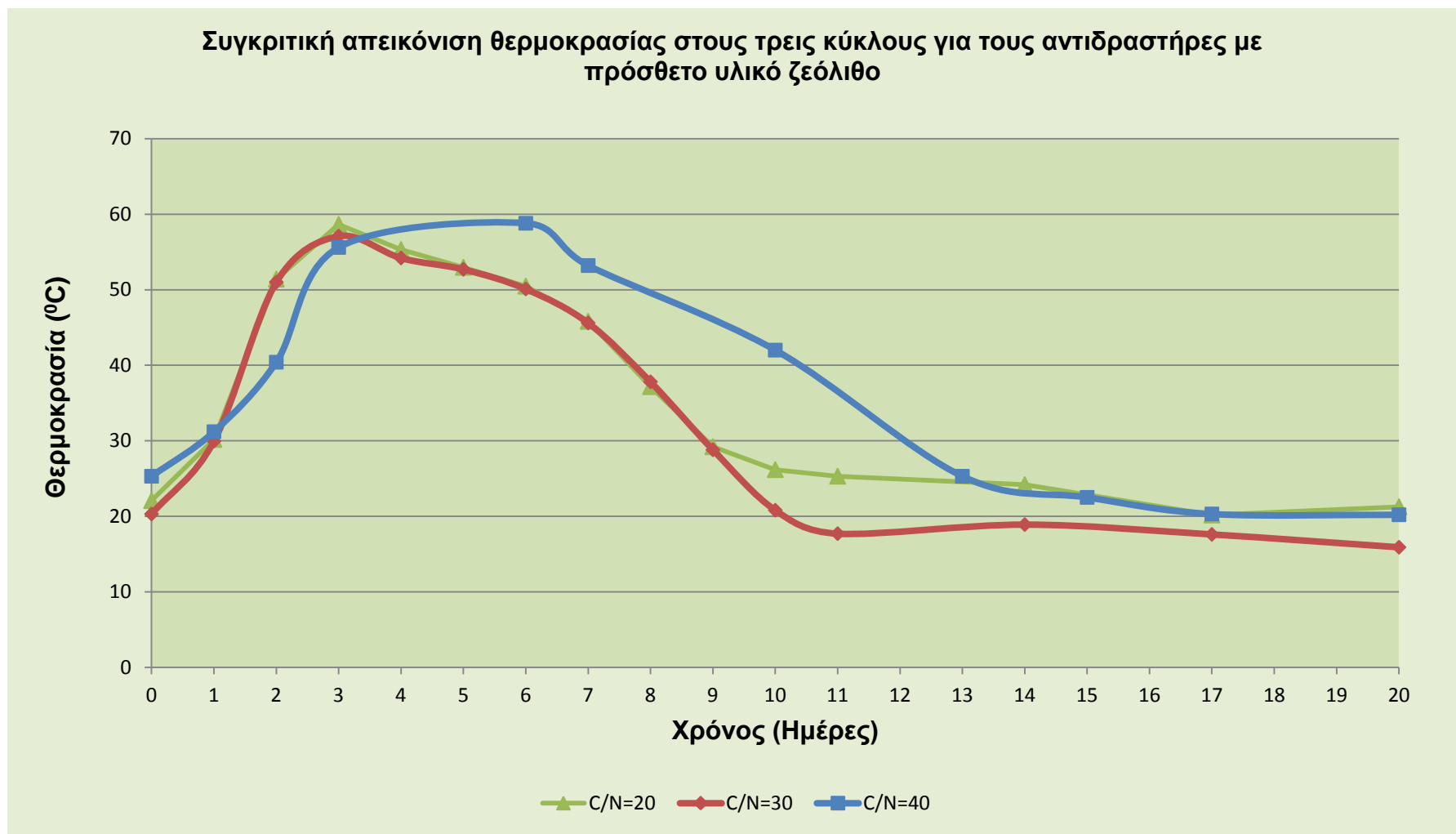
Αντιδραστήρας Βερμικουλίτης	Ημέρα	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4
	0	22,25	20,15	25,20
	2	29,44	28,10	41,60
	3	50,17	47,00	53,30
	4	58,82	59,60	58,15
	5	57,95	58,20	
	6	56,14	57,95	
	7	53,25	54,40	54,20
	8	50,48	51,90	41,10
	9	42,14	45,40	
	10	33,18	24,20	
	11	29,25	20,10	23,80
	12			
	14	25,37	19,90	20,90
	15			
	16			20,50
	18	22,24	17,90	20,30
21	22,62	15,60	20,40	

Πίνακας 5.52 Τιμές θερμοκρασίας (°C) για τον αντιδραστήρα του περλίτη στους τρεις κύκλους της Δράσης Β

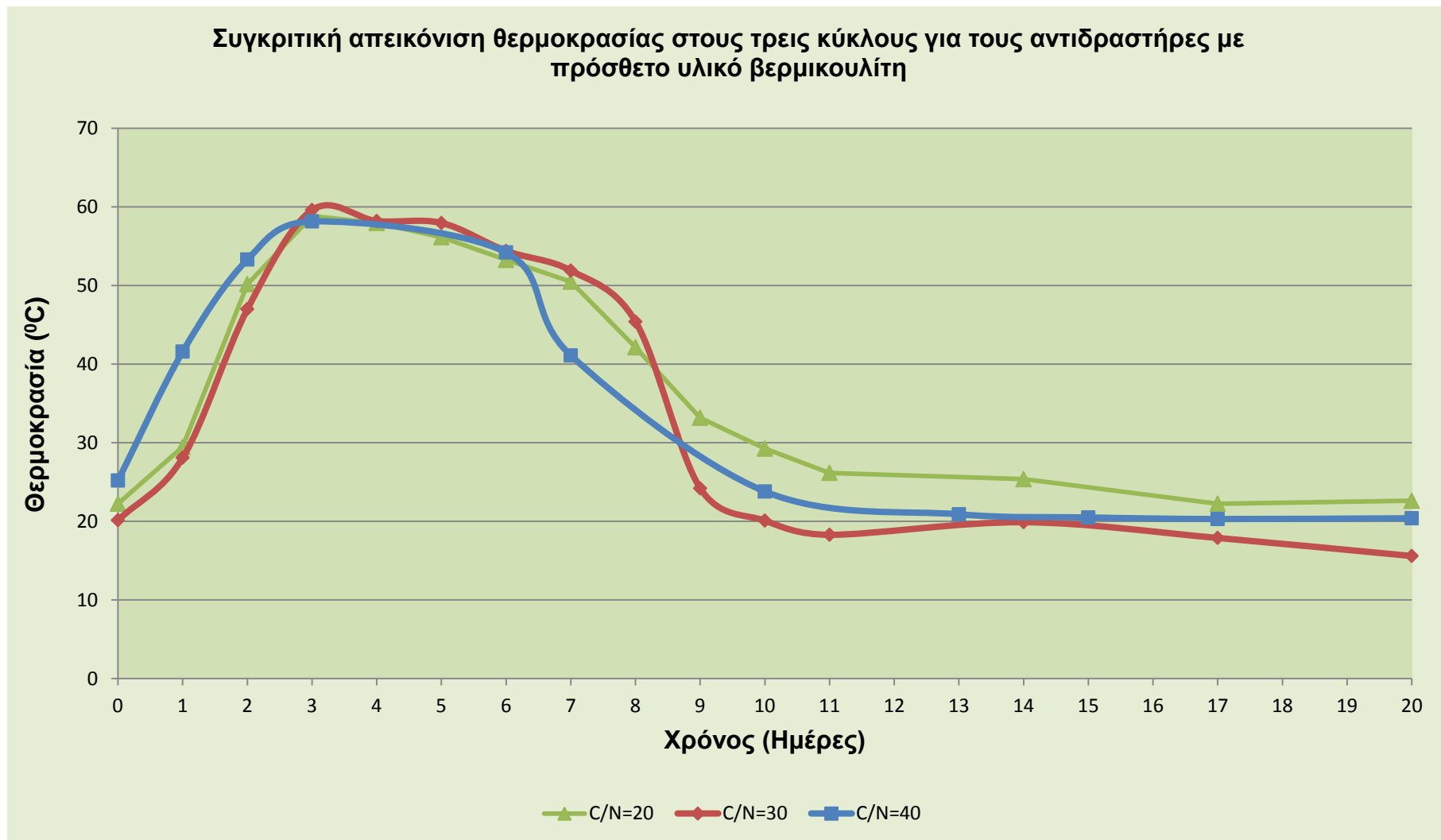
Αντιδραστήρας Περλίτης	Ημέρα	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4
	0	21,88	20,20	24,80
	2	31,47	31,85	41,20
	3	50,38	56,00	49,00
	4	56,57	57,90	54,60
	5	55,82	54,30	
	6	53,12	54,00	
	7	49,84	48,20	56,70
	8	46,28	43,30	42,30
	9	38,56	36,90	
	10	30,77	25,30	
	11	27,42	19,50	26,30
	12			
	14	23,76	17,30	22,50
	15			
	16			21,00
	18	21,17	16,20	20,60
21	21,33	14,80	20,30	



Διάγραμμα 5.40 Συγκριτική απεικόνιση θερμοκρασίας στους τρεις κύκλους για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό πριονίδι

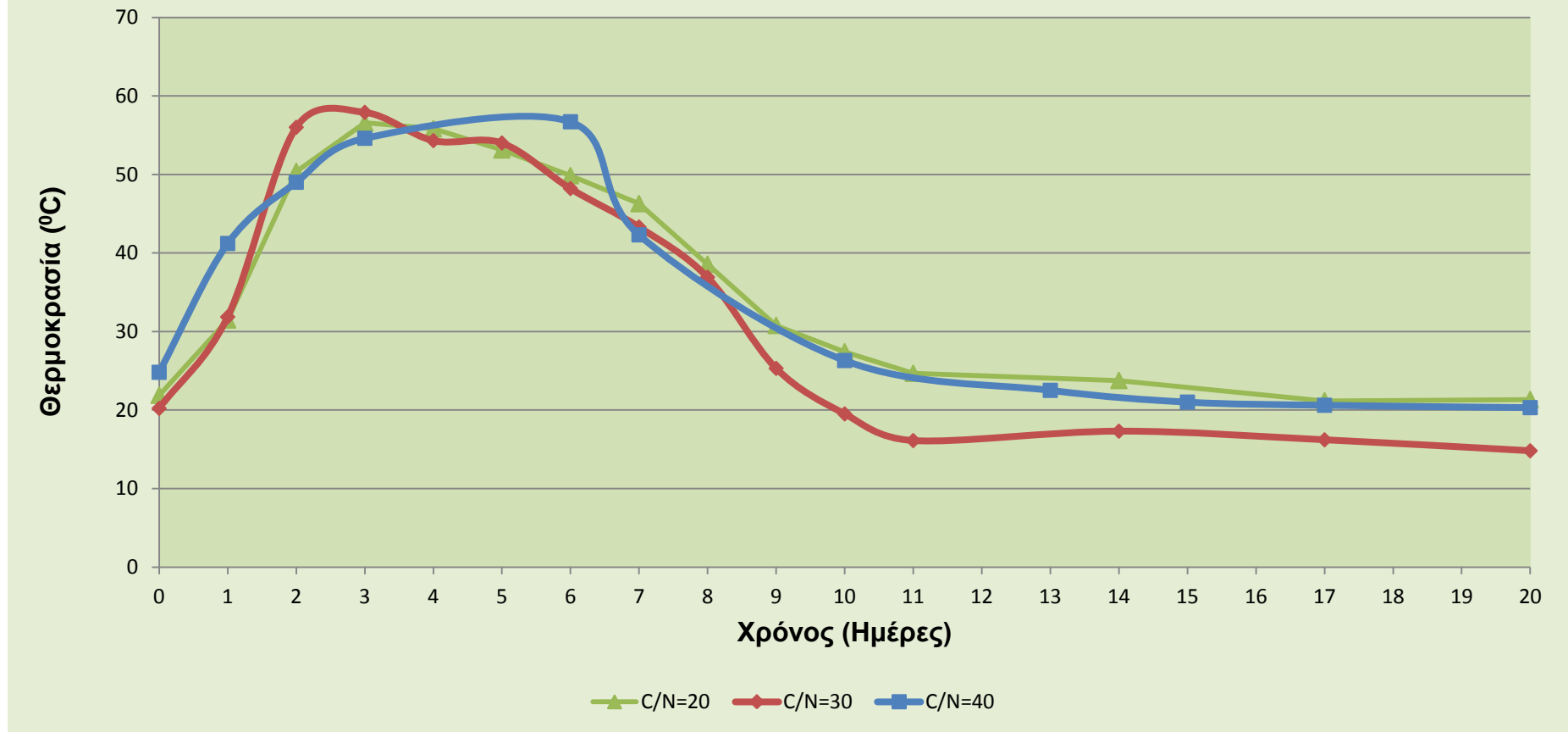


Διάγραμμα 5.41 Συγκριτική απεικόνιση θερμοκρασίας στους τρεις κύκλους για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό ζεόλιθο



Διάγραμμα 5.42 Συγκριτική απεικόνιση θερμοκρασίας στους τρεις κύκλους για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό βερμικουλίτη

Συγκριτική απεικόνιση θερμοκρασίας στους τρεις κύκλους για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό περλίτη



Διάγραμμα 5.43 Συγκριτική απεικόνιση θερμοκρασίας στους τρεις κύκλους για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό περλίτη

Προσδιορισμός της υγρασίας του υποστρώματος (Συγκριτικός Κύκλος Υποστρωμάτων Δράσης Β)

Ακολουθεί συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων της υγρασίας του υποστρώματος και για τους τέσσερις αντιδραστήρες που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε έναν από τους τρεις κύκλους, με αρχικό λόγο υποστρώματος C/N, 20, 30 και 40, και παρατίθενται τα αντίστοιχα διαγράμματα.

Στο διάγραμμα 5.44 διακρίνεται σχετικά πτωτική πορεία των τιμών της υγρασίας, γεγονός αναμενόμενο λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας στη θερμόφιλη φάση. Παρατηρείται ότι στον αντιδραστήρα του τέταρτου κύκλου υπάρχει 10% επιπλέον αρχική υγρασία σε σχέση με αυτούς των άλλων δύο κύκλων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η τροφοδοσία του τέταρτου κύκλου ήταν πλουσιότερη σε κυτταρινούχα υλικά τα οποία έχουν μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε υγρασία. Οι τελικές τιμές της υγρασίας του δεύτερου και τρίτου κύκλου (61,12 και 63,95%) κρίνονται ικανοποιητικές, ενώ στον τέταρτο κύκλο έχει παραμείνει σε λίγο υψηλότερα επίπεδα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην πολύ υψηλή υγρασία του αρχικού υποστρώματος και δείχνει ότι το τελικό προϊόν χρειάζεται επιπλέον ημέρες για να ωριμάσει πλήρως. Όσον αφορά στους αντιδραστήρες, όπου προστέθηκε ζεόλιθος και βερμικουλίτης παρατηρούμε ότι στο τέλος της διεργασίας οι τιμές της υγρασίας βρίσκονται πολύ κοντά στο 60%, που αποτελεί αρκετά καλό ποσοστό πριν το κόμποστ οδηγηθεί προς ωρίμανση.

Στους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό περλιτη, όπως φαίνεται και από το διάγραμμα 5.47, παρατηρούνται σχετικά υψηλές αρχικές τιμές. Η σωστή, ωστόσο, πορεία της διεργασίας εξασφάλισε ικανοποιητικές τιμές την 21^η μέρα.

Σε όλους τους αντιδραστήρες και των δύο κύκλων παρατηρείται η αναμενόμενη μείωση της υγρασίας. Τέλος, πρέπει να τονιστεί ότι το παραγόμενο κόμποστ θα πρέπει να παραμείνει εκτός του αντιδραστήρα για περαιτέρω μείωση της υγρασίας του, μέσω της ωρίμανσής του.

Πίνακας 5.53 Τιμές υγρασίας (%) για τον αντιδραστήρα του πριονιδιού στους τρεις κύκλους της Δράσης Β

Αντιδραστήρας Πριονίδι	Ημέρα	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4
	0	68,56	72,55	79,85
	2	67,74	70,48	77,94
	3	66,59	69,36	76,71
	4			76,28
	5	64,48	67,44	
	6	64,17	66,32	
	7	63,79	65,44	75,24
	8	63,41	65,32	75,64
	9	63,15	64,83	
	10			
	11	63,27	64,66	72,18
	12			
	14	62,36	64,32	69,67
	15			
	16			68,87
	18	61,98	64,00	67,96
21	61,12	63,95	66,38	

Πίνακας 5.54 Τιμές υγρασίας (%) για τον αντιδραστήρα του ζεόλιθου στους τρεις κύκλους της Δράσης Β

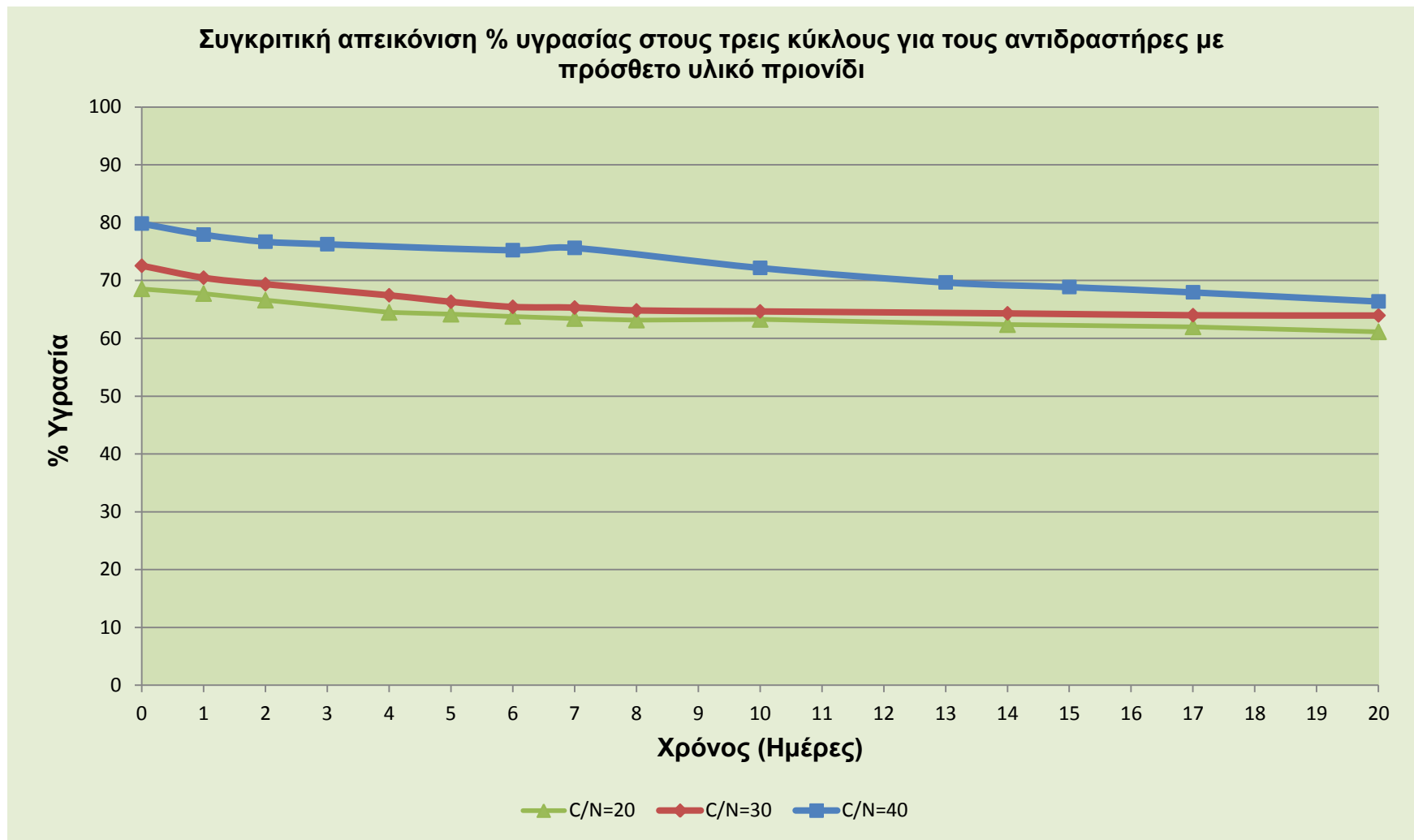
Αντιδραστήρας Ζεόλιθος	Ημέρα	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4
	0	66,48	69,28	77,86
	2	65,22	67,75	73,75
	3	64,07	67,35	71,55
	4			70,49
	5	61,36	64,14	
	6	60,18	63,31	
	7	59,27	63,52	70,91
	8	58,16	63,50	68,49
	9	57,31	61,35	
	10			
	11	56,88	60,47	64,96
	12			
	14	55,61	56,43	63,45
	15			
	16			60,44
	18	54,49	56,21	59,67
21	53,94	56,15	58,95	

Πίνακας 5.55 Τιμές υγρασίας (%) για τον αντιδραστήρα του βερμικουλίτη στους τρεις κύκλους της Δράσης Β

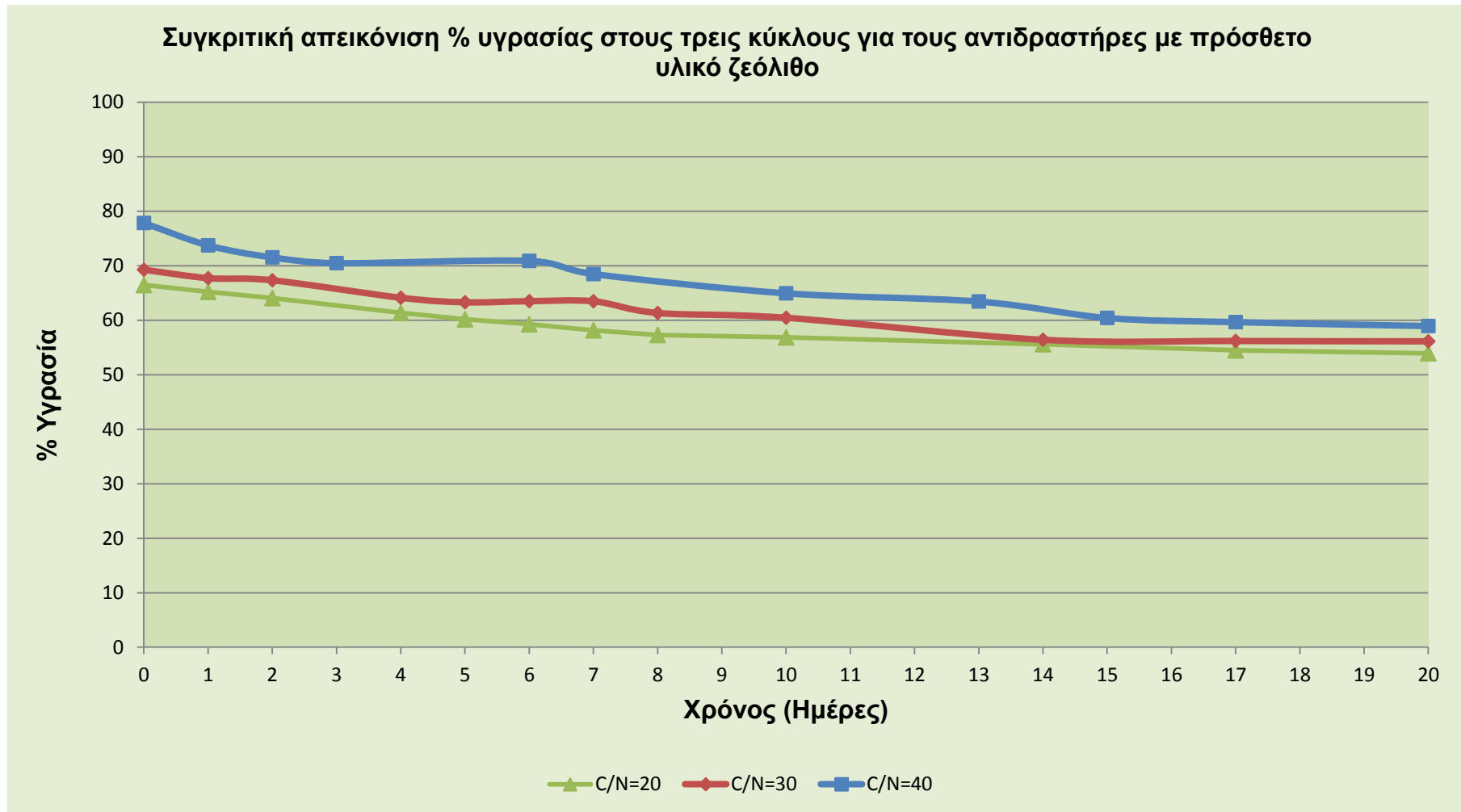
Αντιδραστήρας Βερμικουλίτης	Ημέρα	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4
	0	66,15	69,56	74,38
	2	64,19	66,44	72,54
	3	62,94	64,86	71,45
	4			70,68
	5	61,27	63,58	
	6	60,48	62,44	
	7	59,06	62,69	68,44
	8	58,54	61,98	66,45
	9	58,54	60,38	
	10			
	11	57,37	59,21	63,27
	12			
	14	57,04	58,97	62,24
	15			
	16			59,93
	18	56,24	57,90	59,28
21	55,14	56,45	58,74	

Πίνακας 5.56 Τιμές υγρασίας (%) για τον αντιδραστήρα του περλίτη στους τρεις κύκλους της Δράσης Β

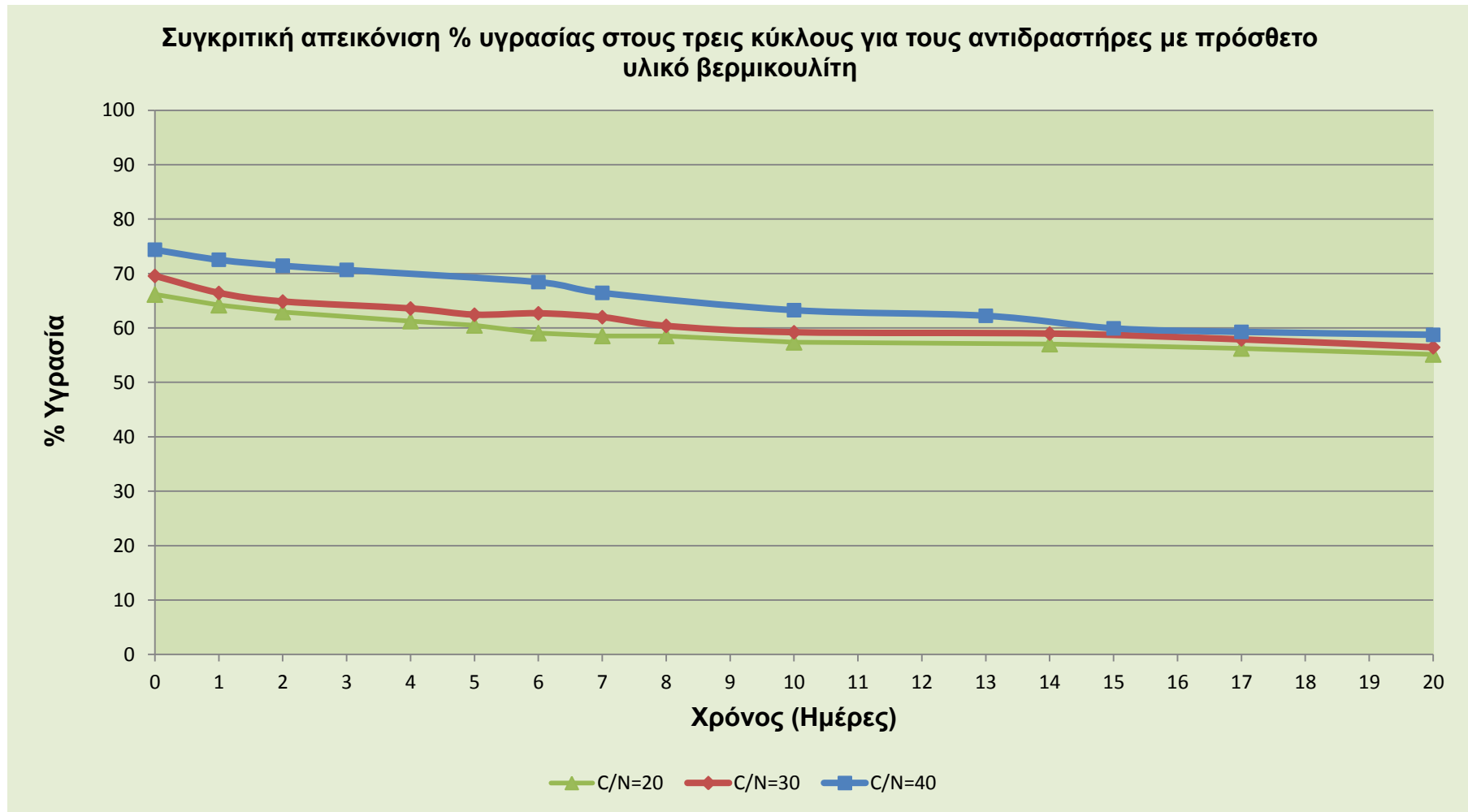
Αντιδραστήρας Περλίτης	Ημέρα	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4
	0	71,96	74,80	81,47
	2	69,87	72,88	79,03
	3	68,44	72,09	78,26
	4			76,15
	5	67,52	70,70	
	6	65,98	68,67	
	7	64,56	67,04	74,67
	8	63,39	67,63	70,15
	9	62,21	66,96	
	10			
	11	61,41	64,64	66,47
	12			
	14	60,86	62,22	64,78
	15			
	16			64,31
	18	60,36	61,87	63,96
21	59,15	61,44	63,45	



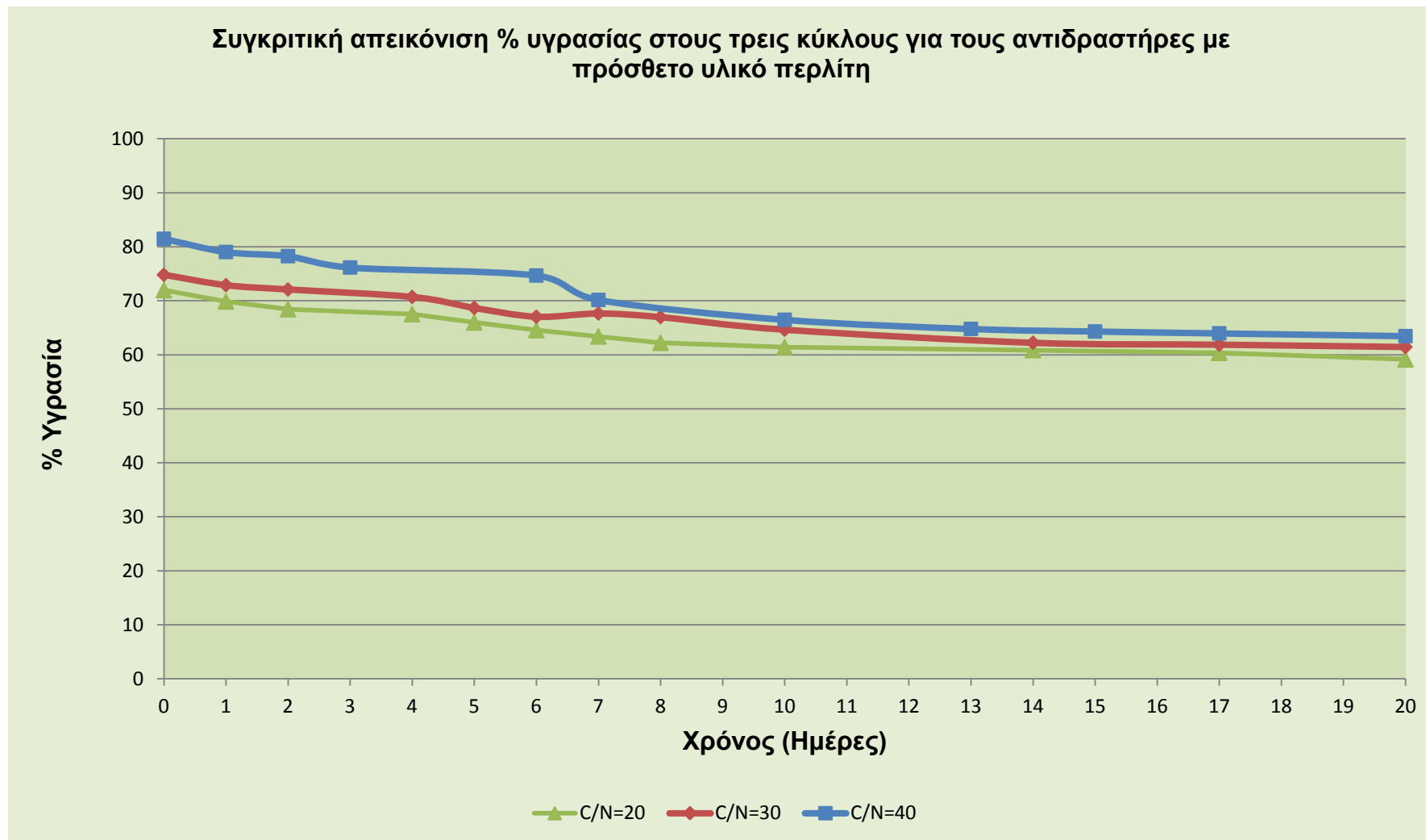
Διάγραμμα 5.44 Συγκριτική απεικόνιση υγρασίας (%) στους τρεις κύκλους για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό πριονίδι



Διάγραμμα 5.45 Συγκριτική απεικόνιση υγρασίας (%) στους τρεις κύκλους για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό ζεόλιθο



Διάγραμμα 5.46 Συγκριτική απεικόνιση υγρασίας στους τρεις κύκλους για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό βερμικουλίτη



Διάγραμμα 5.47 Συγκριτική απεικόνιση υγρασίας στους τρεις κύκλους για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό περλίτη

Προσδιορισμός του pH του υποστρώματος (Συγκριτικός Κύκλος Υποστρωμάτων Δράσης Β)

Ακολουθεί συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων του pH του υποστρώματος και για τους τέσσερις αντιδραστήρες που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε έναν από τους τρεις κύκλους, με αρχικό λόγο υποστρώματος C/N, 20, 30 και 40, και παρατίθενται τα αντίστοιχα διαγράμματα.

Από τα διαγράμματα συμπεραίνεται η σωστή πορεία της διεργασίας και στους τρεις κύκλους πειραμάτων. Οι διάφορες φάσεις της διεργασίας της βιοαποδόμησης αποτυπώνονται ξεκάθαρα. Η αρχική τροφοδοσία των αντιδραστήρων με υλικό μεταφράζεται σε αύξηση των τιμών του *pH*. Στη συνέχεια, η παραγωγή οργανικών οξέων παρουσιάζεται με την μικρή πτώση των τιμών που ακολουθείται με απότομη αύξηση τους κατά τη διάρκεια της θερμοφιλής φάσης, κάτι που προκαλείται από την διάσπαση των διαθέσιμων μορφών αζώτου αυτών των οξέων με ταυτόχρονη παραγωγή αμμωνιακών. Η τελική σταθεροποίηση των τιμών του pH (με μικρή μείωση) είναι ομαλή και οι τελικές τιμές αποτελούν ένδειξη της καλής ποιότητας της διεργασίας.

Σε γενικές γραμμές τα διαγράμματα των τιμών του *pH* που παρουσιάστηκαν είναι ενδεικτικά της σωστής λειτουργίας τόσο των αντιδραστήρων, όσο και της διεργασίας που έλαβε χώρα μέσα σε αυτούς. Εξαιρέση αποτελούν οι αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό το πριονίδι. Και στους δύο κύκλους, σε αυτούς τους αντιδραστήρες, οι τελικές τιμές του *pH* κρίνονται αρκετά υψηλές, κάτι που, σε συνδυασμό με τις υπόλοιπες παραμέτρους, παραπέμπει στην μη ομαλή πορεία της διεργασίας της κομποστοποίησης. Αξίζει να σημειωθεί πως το προϊόν κομποστοποίησης δεν είναι πλήρως σταθεροποιημένο και απαιτείται η παραμονή του σε υπαίθριο χώρο μέχρι την πλήρη σταθεροποίησή του.

Πίνακας 5.57 Τιμές pH για τον αντιδραστήρα του πριονιδιού στους τρεις κύκλους της Δράσης Β

Αντιδραστήρας Πριονίδι	Ημέρα	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4
	0	5,98	5,12	4,98
	2	6,34	5,46	5,35
	3	6,13	5,36	6,26
	4			4,81
	5	5,64	4,88	
	6	5,97	5,04	
	7	6,68	5,89	8,06
	8	7,86	7,52	8,39
	9	8,29	8,08	
	10			
	11	8,64	8,38	8,47
	12			
	14	8,89	8,55	8,61
	15			
	16			8,66
	18	9,15	8,67	8,73
21	9,45	8,86	8,44	

Πίνακας 5.58 Τιμές pH για τον αντιδραστήρα του ζεόλιθου στους τρεις κύκλους της Δράσης Β

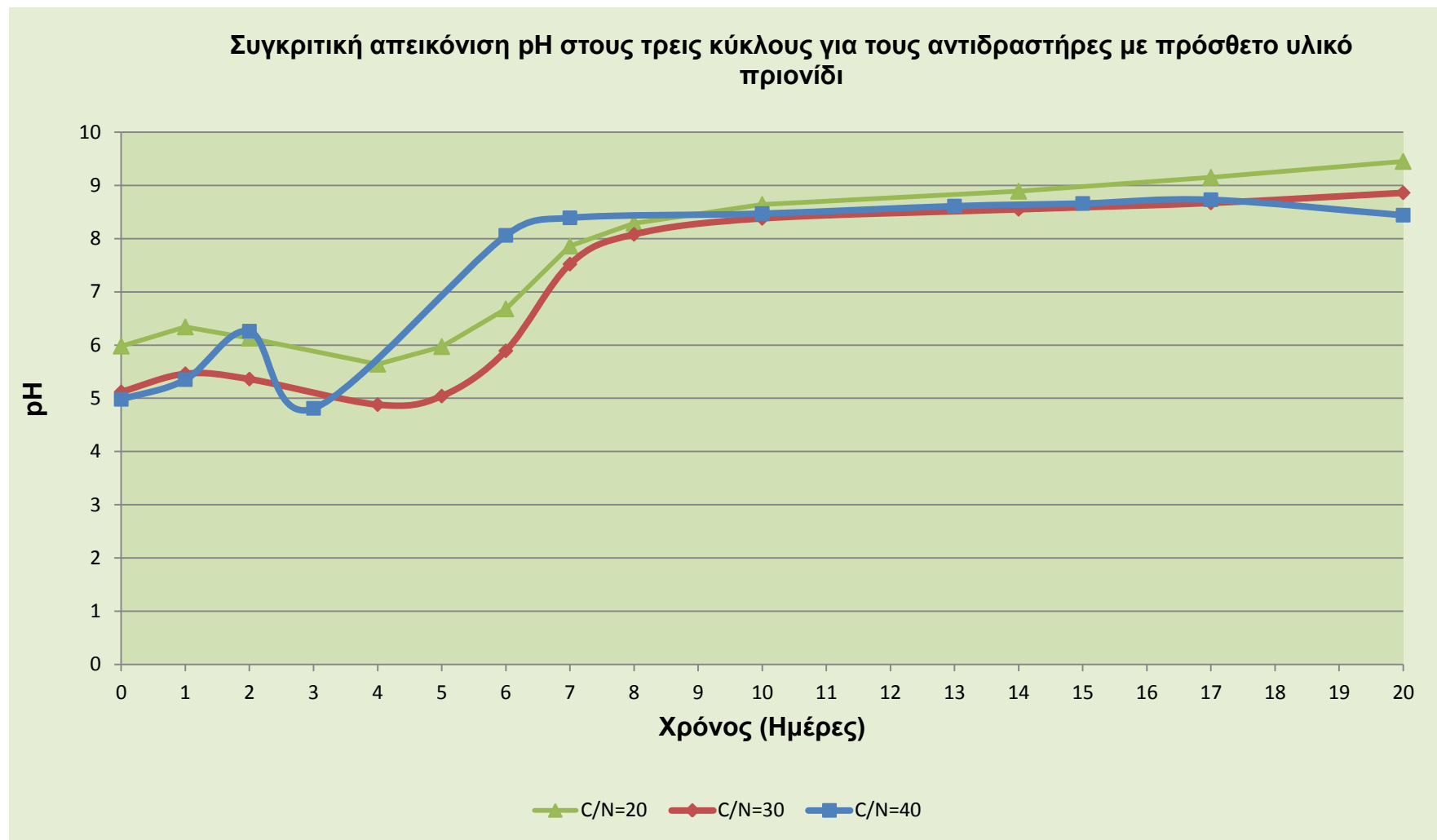
Αντιδραστήρας Ζεόλιθος	Ημέρα	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4
	0	5,86	5,00	5,24
	2	5,92	5,53	6,55
	3	5,41	5,18	6,72
	4			5,32
	5	5,22	4,98	
	6	5,69	5,41	
	7	6,57	5,91	7,79
	8	6,96	7,43	8,23
	9	7,74	8,06	
	10			
	11	8,36	8,19	8,31
	12			
	14	8,62	8,27	8,39
	15			
	16			8,47
	18	8,73	8,22	8,43
21	8,95	8,15	8,29	

Πίνακας 5.59 Τιμές pH για τον αντιδραστήρα του βερμικουλίτη στους τρεις κύκλους της Δράσης Β

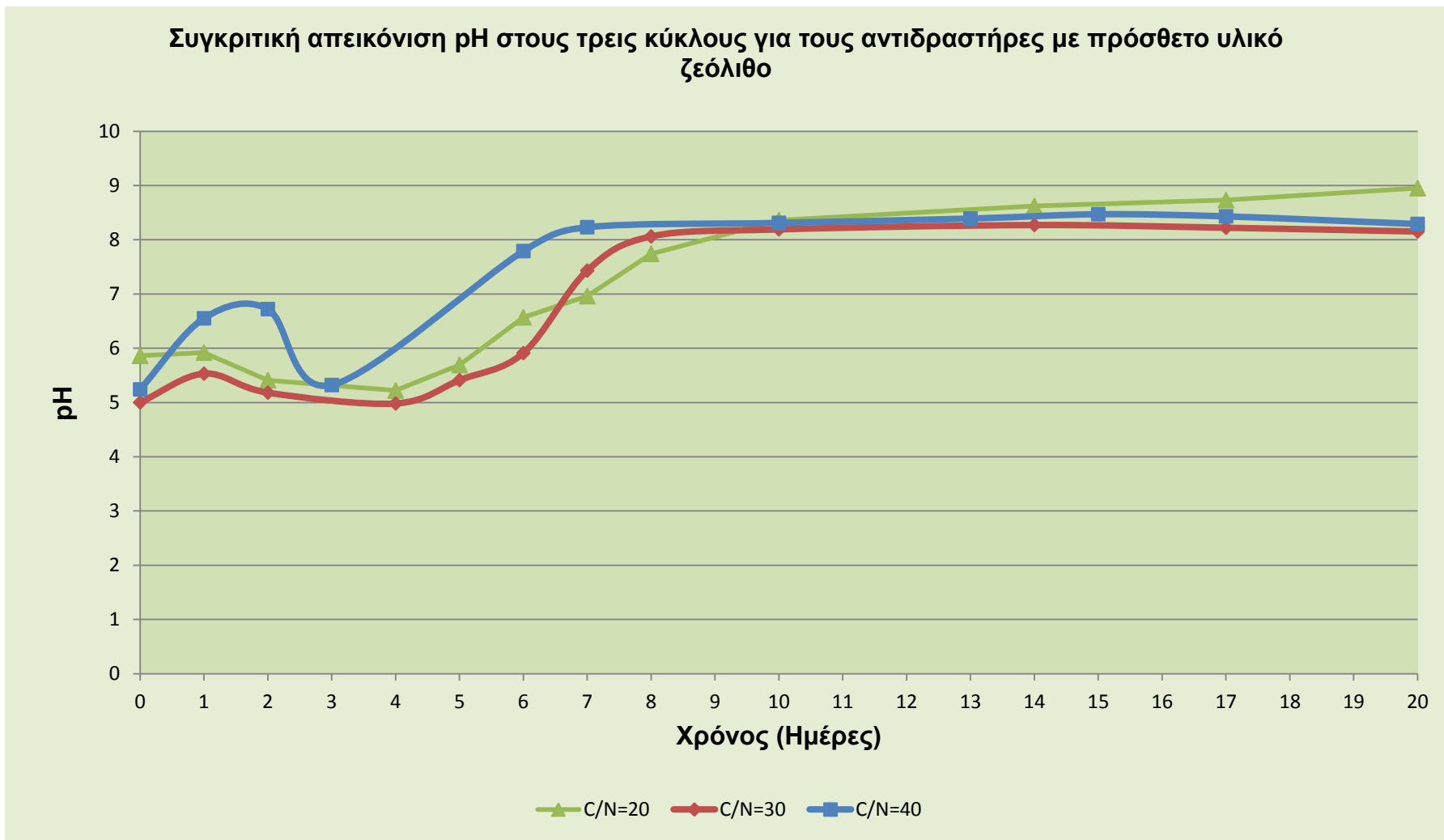
Αντιδραστήρας Βερμικουλίτης	Ημέρα	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4
	0	5,58	5,00	5,00
	2	5,86	6,00	5,74
	3	5,47	5,91	4,87
	4			4,85
	5	5,31	4,91	
	6	5,92	6,12	
	7	6,76	7,12	7,86
	8	7,12	7,80	8,30
	9	8,14	8,09	
	10			
	11	8,44	8,29	8,36
	12			
	14	8,56	8,35	8,42
	15			
	16			8,50
	18	8,77	8,31	8,48
21	8,98	8,29	8,35	

Πίνακας 5.60 Τιμές pH για τον αντιδραστήρα του περλίτη στους τρεις κύκλους της Δράσης Β

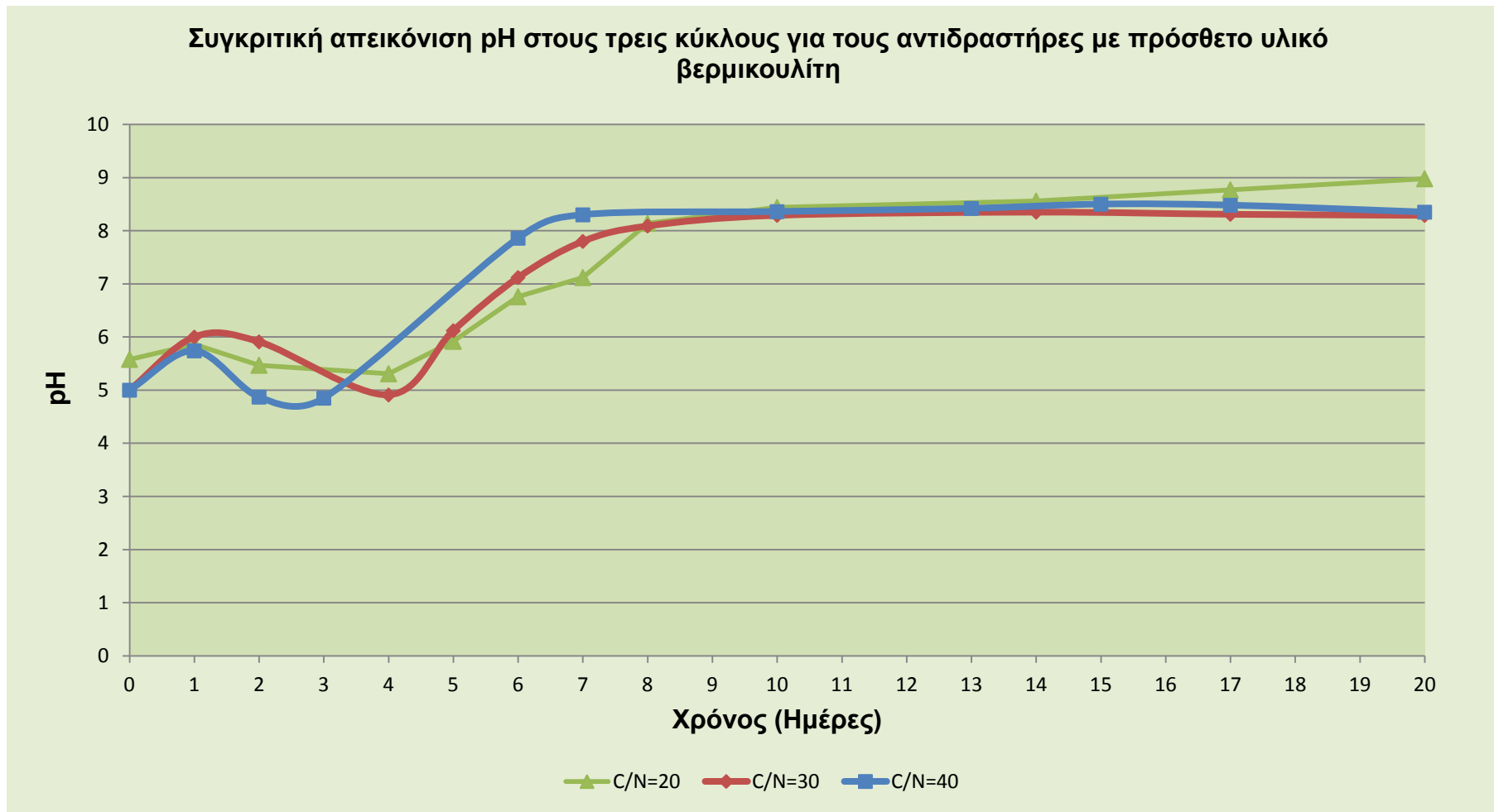
Αντιδραστήρας Περλίτης	Ημέρα	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4
	0	5,72	5,56	5,10
	2	5,94	5,84	6,26
	3	5,36	5,45	4,95
	4			4,93
	5	5,17	5,15	
	6	5,88	5,90	
	7	6,58	6,46	7,79
	8	6,94	7,22	8,21
	9	7,86	8,24	
	10			
	11	8,28	8,31	8,29
	12			
	14	8,53	8,39	8,34
	15			
	16			8,40
	18	8,69	8,28	8,41
21	8,89	8,16	8,26	



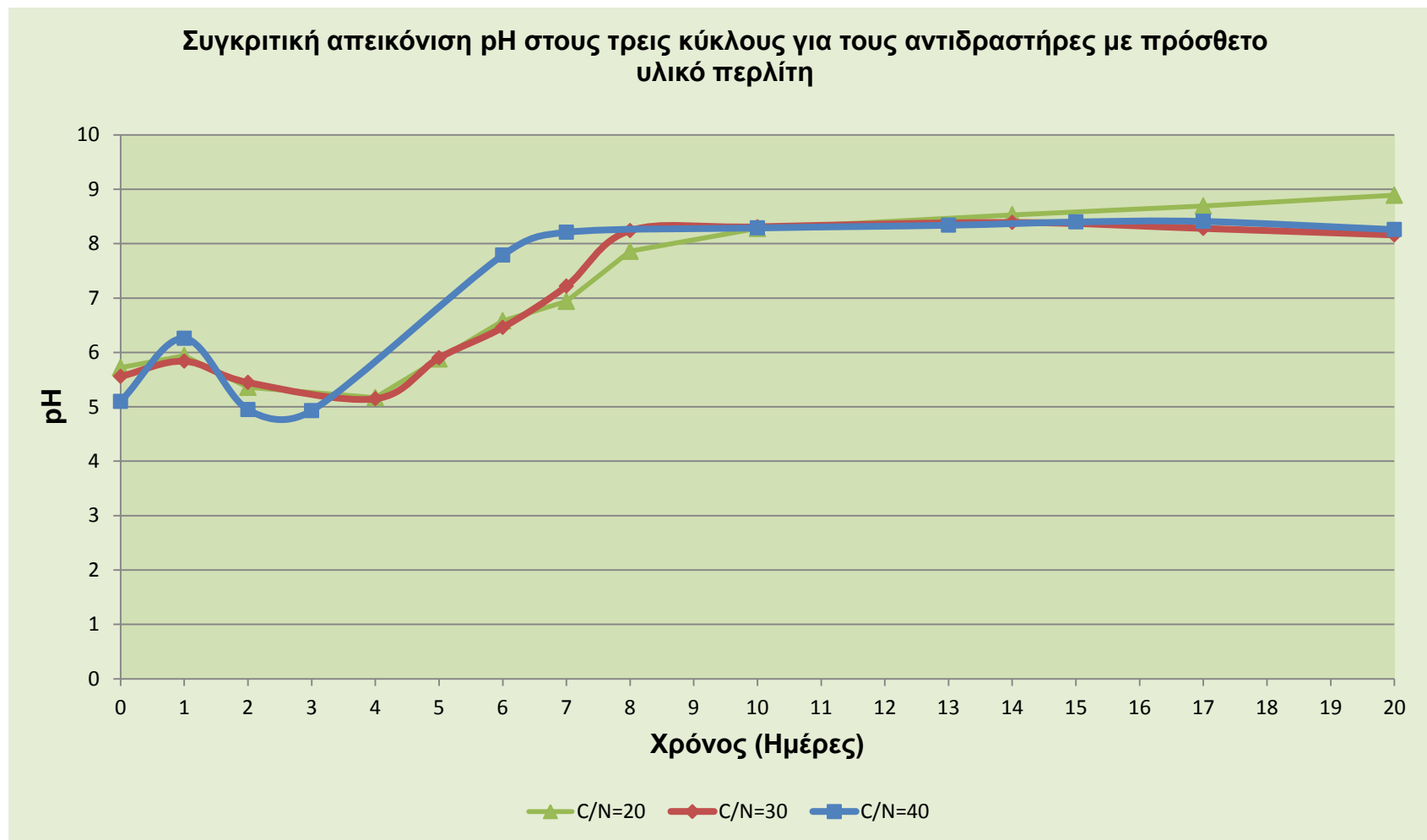
Διάγραμμα 5.48 Συγκριτική απεικόνιση του pH στους τρεις κύκλους για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό πριονίδι



Διάγραμμα 5.49 Συγκριτική απεικόνιση του pH στους τρεις κύκλους για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό ζεόλιθο



Διάγραμμα 5.50 Συγκριτική απεικόνιση του pH στους τρεις κύκλους για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό βερμικουλίτη



Διάγραμμα 5.51 Συγκριτική απεικόνιση του pH στους τρεις κύκλους για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό περλίτη

Προσδιορισμός των πτητικών στερεών (%) του υποστρώματος (Συγκριτικός Κύκλος Υποστρωμάτων Δράσης Β)

Ακολουθεί συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων των πτητικών στερεών του υποστρώματος και για τους τέσσερις αντιδραστήρες που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε έναν από τους τρεις κύκλους, με αρχικό λόγο υποστρώματος C/N, 20, 30 και 40, και παρατίθενται τα αντίστοιχα διαγράμματα.

Στο διάγραμμα 7.15 παρατηρείται πολύ μικρή μείωση των πτητικών στερεών και στους δύο κύκλους. Ειδικά στον δεύτερο η μείωση είναι της τάξης του 7,46% ενδεικτικό της μη ορθής έκβασης της διεργασίας της βιοαποδόμησης. Είναι δεδομένο ότι στους αντιδραστήρες με το πριονίδι υπήρχε μεγάλη συγκέντρωση πτητικών στερεών, όπως παρατηρήθηκε και στην αντίστοιχη παράγραφο του έκτου κεφαλαίου. Η αναμενόμενη πτώση του ποσοστού δεν πραγματοποιήθηκε, κάτι που υποδεικνύει την πιθανή ύπαρξη αναερόβιων συνθηκών στους εν λόγω αντιδραστήρες.

Στο διάγραμμα 7.16 παρατηρείται η αναμενόμενη μείωση της συγκέντρωσης των πτητικών στερεών. Η μικρή απόκλιση που παρατηρείται κατά την 7^η μέρα στον πρώτο κύκλο οφείλεται σε προσθήκη πριονιδιού που έχει σαν άμεσο αποτέλεσμα την αύξηση της συγκέντρωσης των πτητικών στερεών στον αντιδραστήρα. Ο ρυθμός μείωσης των πτητικών στερεών είναι μεγαλύτερος κατά τη θερμόφιλη φάση και στους δύο πειραματικούς κύκλους. Τέλος η σταθεροποίηση των τιμών κρίνεται ομαλή και οι τελικές τιμές απολύτως αποδεκτές.

Παρατηρούνται παρόμοιες τιμές πτητικών και στους δύο κύκλους. Απ' αυτό συμπεραίνεται ότι υπάρχει κοινή πορεία αποσύνθεσης, λόγω του ότι τα πτητικά είναι οι πιο άμεσα προσλήψιμες ενώσεις απ' τους μικροοργανισμούς.

Πίνακας 5.61 Τιμές πτητικών στερεών (%) για τον αντιδραστήρα του πριονιδιού στους τρεις κύκλους της Δράσης Β

Αντιδραστήρας Πριονίδι	Ημέρα	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4
	0	87,57	92,74	92,90
	2	87,36	91,87	91,62
	3	86,24	91,56	92,34
	4			91,45
	5	85,24	89,80	
	6	83,06	87,67	
	7	82,87	87,40	90,24
	8	82,32	85,34	86,64
	9	81,58	85,60	
	10	80,34	80,56	84,95
	11			
	12	80,51	80,52	83,78
	14			
	15			83,23
	16	80,41	78,36	82,44
	18	79,24	76,12	81,52
21	87,57	92,74	92,90	

Πίνακας 5.62 Τιμές πτητικών στερεών (%) για τον αντιδραστήρα του ζεόλιθου στους τρεις κύκλους της Δράσης Β

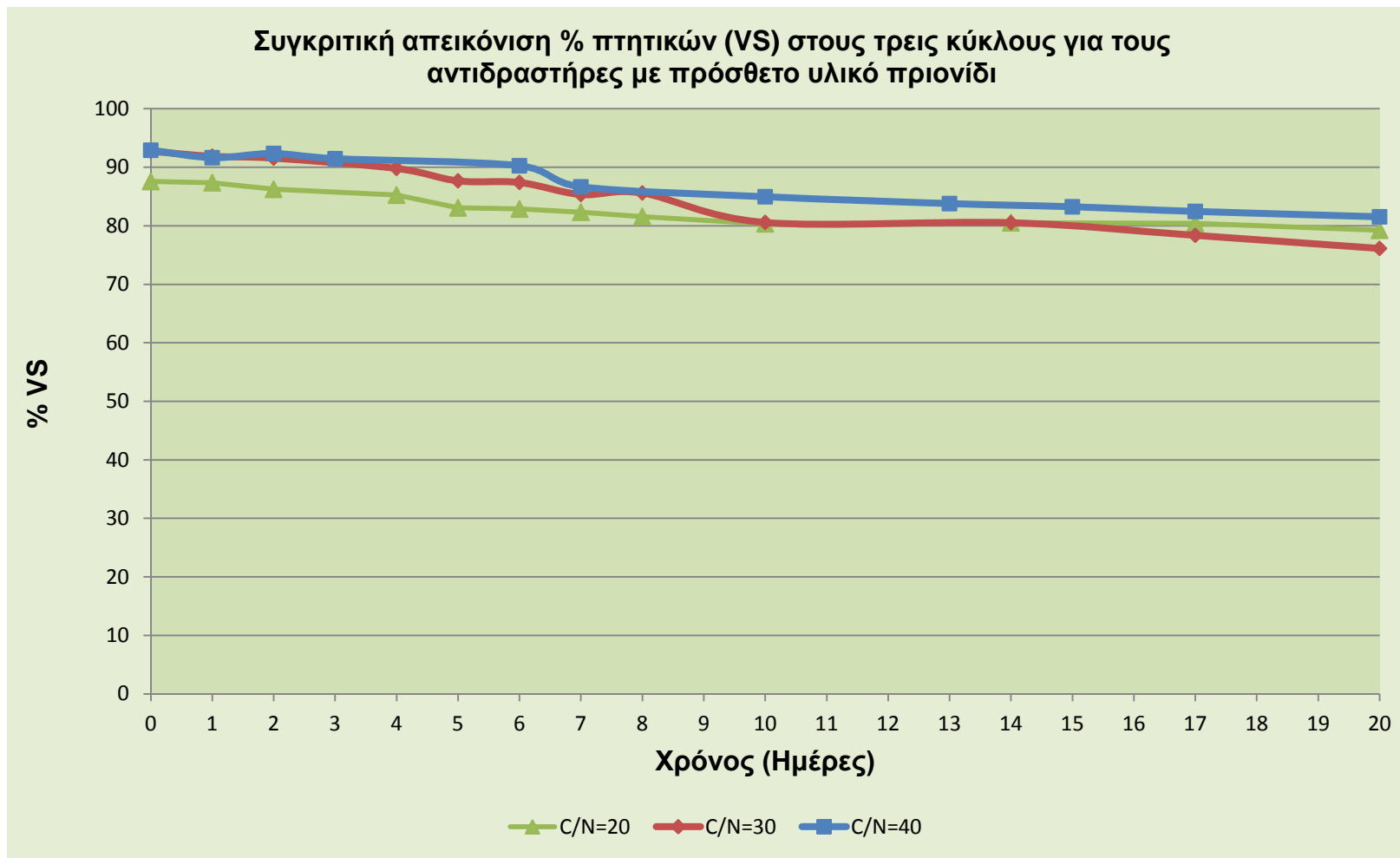
Αντιδραστήρας Ζεόλιθος	Ημέρα	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4
	0	80,78	85,55	86,15
	2	79,86	83,67	82,76
	3	78,54	81,62	79,44
	4			77,26
	5	76,56	76,32	
	6	74,89	73,59	
	7	73,48	73,14	69,15
	8	71,77	70,80	67,35
	9	68,32	67,70	
	10			
	11	67,52	64,76	63,48
	12			
	14	66,39	61,44	59,36
	15			
	16			56,24
	18	64,41	59,58	54,23
21	62,87	56,38	53,87	

Πίνακας 5.63 Τιμές πτητικών στερεών (%) για τον αντιδραστήρα του βερμικουλίτη στους τρεις κύκλους της Δράσης Β

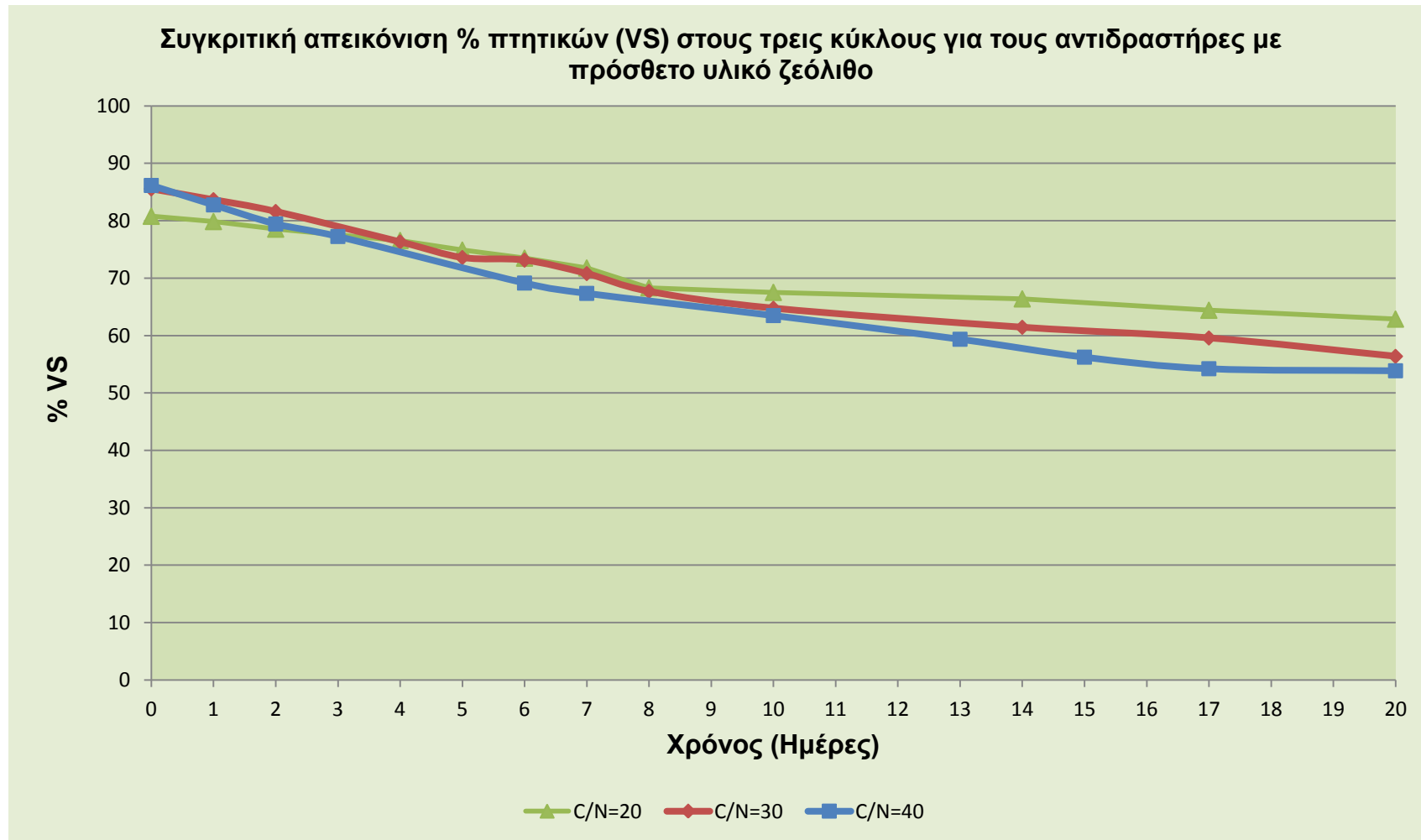
Αντιδραστήρας Βερμικουλίτης	Ημέρα	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4
	0	77,96	81,68	82,88
	2	75,82	78,85	81,45
	3	73,9	75,90	79,75
	4			76,45
	5	72,28	74,18	
	6	70,51	70,27	
	7	70,89	73,80	73,15
	8	67,68	67,33	70,28
	9	65,44	69,44	
	10			
	11	64,21	63,27	66,33
	12			
	14	63,86	59,05	62,48
	15			
	16			60,43
	18	63,54	57,27	58,76
21	62,67	56,85	55,12	

Πίνακας 5.64 Τιμές πτητικών στερεών (%) για τον αντιδραστήρα του περλίτη στους τρεις κύκλους της Δράσης Β

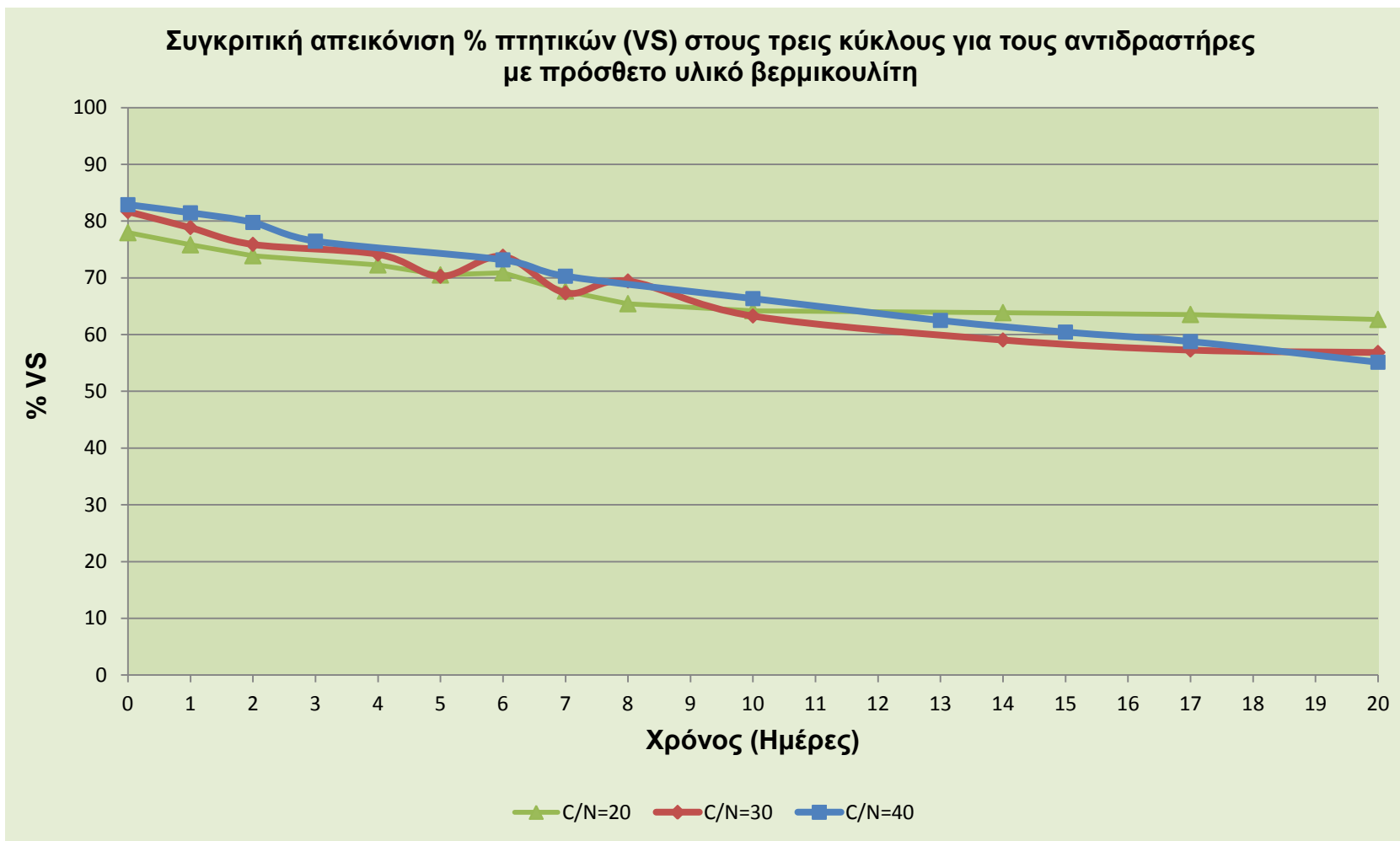
Αντιδραστήρας Περλίτης	Ημέρα	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4
	0	69,49	73,23	78,89
	2	68,31	71,78	76,18
	3	66,45	72,64	65,90
	4			61,44
	5	61,96	66,00	
	6	60,59	63,60	
	7	59,87	58,76	57,68
	8	57,52	59,15	56,14
	9	55,33	54,39	
	10			
	11	52,14	49,84	52,48
	12			
	14	50,88	48,88	51,15
	15			
	16			50,43
	18	49,59	47,64	49,91
21	48,38	48,15	49,95	



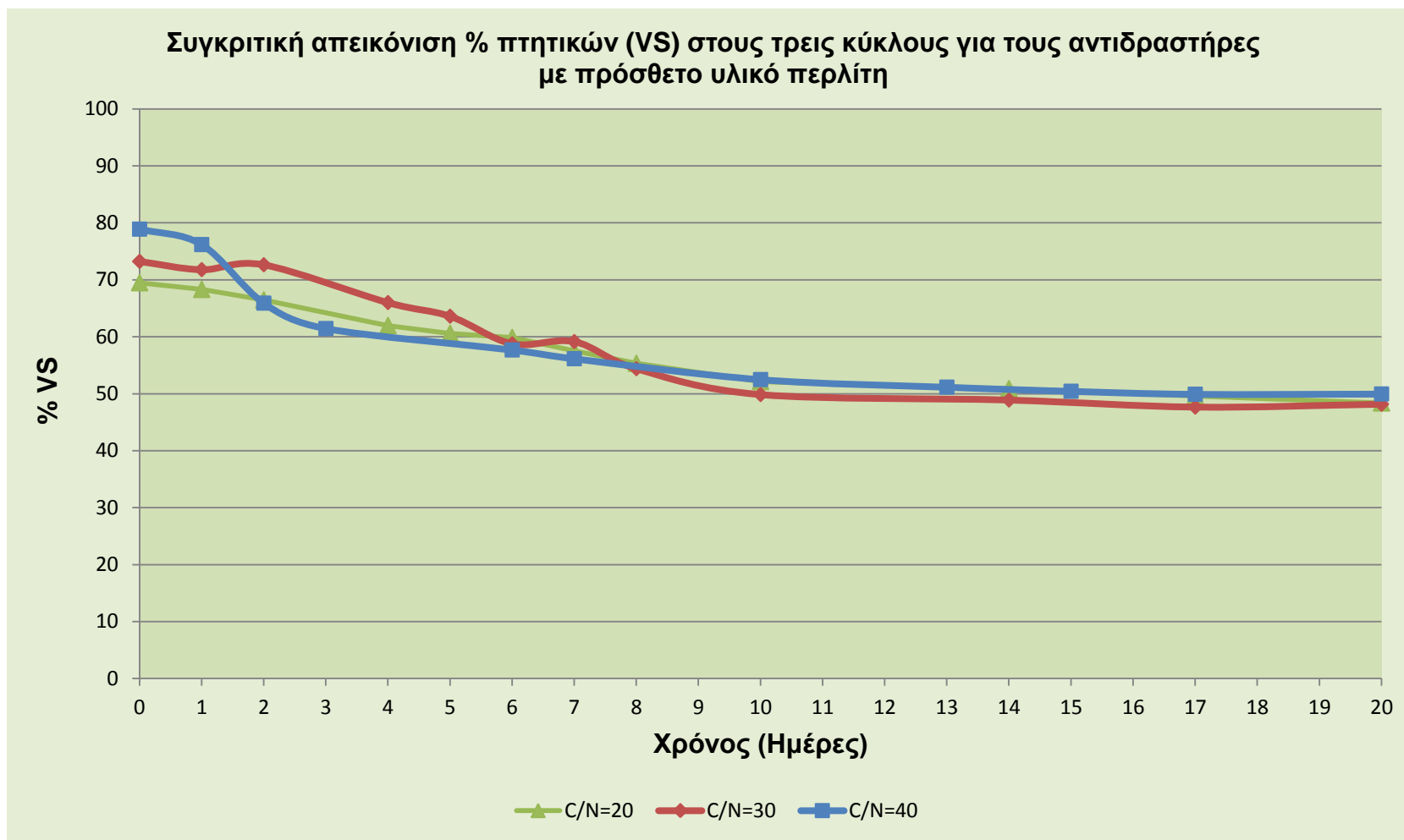
Διάγραμμα 5.52 Συγκριτική απεικόνιση πτητικών στερεών (%) στους τρεις κύκλους για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό πριονίδι



Διάγραμμα 5.53 Συγκριτική απεικόνιση πτητικών στερεών (%) στους τρεις κύκλους για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό ζεόλιθο



Διάγραμμα 5.54 Συγκριτική απεικόνιση πτητικών στερεών (%) στους τρεις κύκλους για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό βερμικουλίτη



Διάγραμμα 5.55 Συγκριτική απεικόνιση πτητικών στερεών (%) στους τρεις κύκλους για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό περλίτη

Προσδιορισμός του ολικού οργανικού άνθρακα TOC (%dm) του υποστρώματος (Συγκριτικός Κύκλος Υποστρωμάτων Δράσης Β)

Ακολουθεί συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων του οργανικού άνθρακα του υποστρώματος και για τους τέσσερις αντιδραστήρες που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε έναν από τους τρεις κύκλους, με αρχικό λόγο υποστρώματος C/N, 20, 30 και 40, και παρατίθενται τα αντίστοιχα διαγράμματα.

Στο διάγραμμα 7.19 παρατηρείται ότι το αρχικό ποσοστό του οργανικού άνθρακα στον τέταρτο κύκλο είναι μεγαλύτερο από αυτό του τρίτου και αυτό με τη σειρά του μεγαλύτερο από του δεύτερου. Αυτό είναι λογικό και εξηγείται απόλυτα από την διαφορετική τροφοδοσία που είχαν οι τρεις αντιδραστήρες. Στον τέταρτο κύκλο μειώθηκαν οι ποσότητες των πρωτεϊνών και των υδατανθράκων που τροφοδότησαν τον αντιδραστήρα σε σχέση με αυτές του πρώτου και αυξήθηκαν αντίστοιχα αυτές των κυτταρινούχων υλικών. Το αποτέλεσμα ήταν το αρχικό υλικό στον τέταρτο κύκλο να είναι πιο πλούσιο σε άνθρακα σε σύγκριση με το υλικό του πρώτου.

Η κατανάλωση του άνθρακα στους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό πριονίδι κρίνεται πολύ μικρή. Το γεγονός αυτό αποτελεί ένδειξη πως η διεργασία της κομποστοποίησης δεν ολοκληρώθηκε ορθά στους εν λόγω αντιδραστήρες. Αντιθέτως στους υπόλοιπους αντιδραστήρες παρατηρείται ιδιαίτερα σημαντική μείωση του ποσοστού του οργανικού άνθρακα, ειδικά κατά τη θερμόφιλη φάση, ενώ στη συνέχεια το ποσοστό του οργανικού άνθρακα σταθεροποιείται ομαλώς. Είναι εμφανής η σημαντική συνεισφορά των ορυκτών στην ομαλή διεξαγωγή της διεργασίας, που έχει ως αποτέλεσμα την αποδόμηση της οργανικής ύλης,

Πίνακας 5.65 Τιμές TOC (%dm) για τον αντιδραστήρα του πριονιδιού στους τρεις κύκλους της Δράσης Β

Αντιδραστήρας Πριονίδι	Ημέρα	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4
	0	45,7	48,16	54,44
	2	46,52	50,38	54,18
	3	44,38	48,52	52,14
	4			47,19
	5	42,15	47,89	
	6	41,68	48,08	
	7	40,23	48,00	44,28
	8	39,64	47,02	41,95
	9	38,77	46,52	
	10			
	11	37,89	45,32	39,28
	12			
	14	37,06	44,26	37,58
	15			
	16			36,05
	18	36,24	42,55	35,88
21	36,46	40,95	35,54	

Πίνακας 5.66 Τιμές TOC (%dm) για τον αντιδραστήρα του ζεόλιθου στους τρεις κύκλους της Δράσης Β

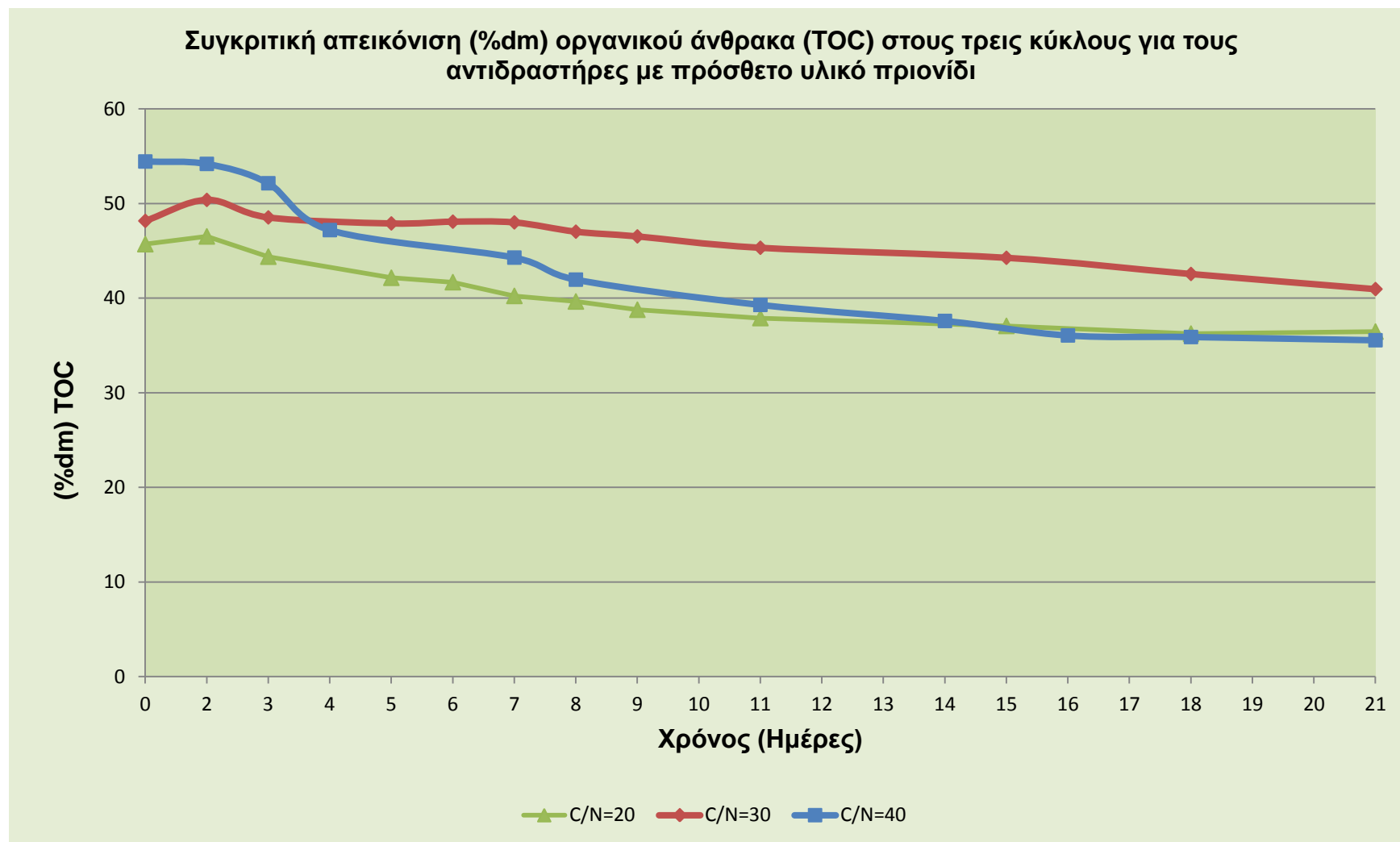
Αντιδραστήρας Ζεόλιθος	Ημέρα	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4
	0	44,55	50,59	51,68
	2	41,38	45,31	47,44
	3	36,56	41,31	43,55
	4			41,28
	5	34,87	36,31	
	6	31,72	34,85	
	7	31,06	31,48	32,55
	8	30,47	32,25	31,24
	9	29,54	32,40	
	10			
	11	29,02	31,87	30,47
	12			
	14	28,88	30,64	29,76
	15			
	16			29,55
	18	28,32	29,86	29,20
21	27,96	29,49	28,65	

Πίνακας 5.67 Τιμές TOC (%dm) για τον αντιδραστήρα του βερμικουλίτη στους τρεις κύκλους της Δράσης Β

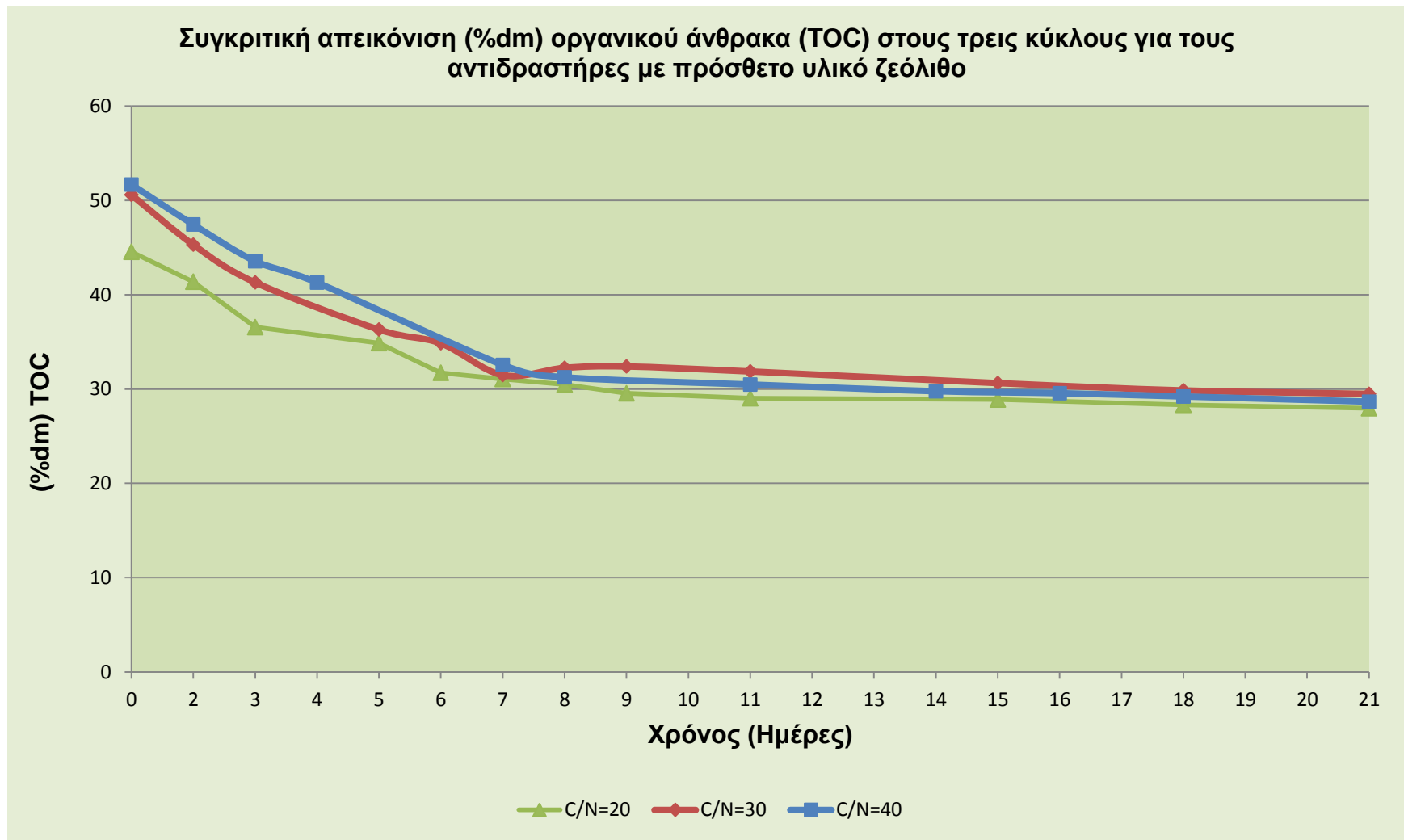
Αντιδραστήρας Βερμικουλίτης	Ημέρα	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4
	0	43,37	48,07	49,15
	2	40,38	41,26	48,25
	3	38,62	39,74	42,01
	4			38,04
	5	35,59	38,84	
	6	33,17	35,31	
	7	32,68	35,08	29,15
	8	30,44	35,02	27,25
	9	28,56	28,76	
	10			
	11	27,47	28,94	25,55
	12			
	14	26,71	23,19	24,87
	15			
	16			24,15
	18	25,53	23,82	23,79
21	24,43	22,66	23,36	

Πίνακας 5.68 Τιμές TOC (%dm) για τον αντιδραστήρα του περλίτη στους τρεις κύκλους της Δράσης Β

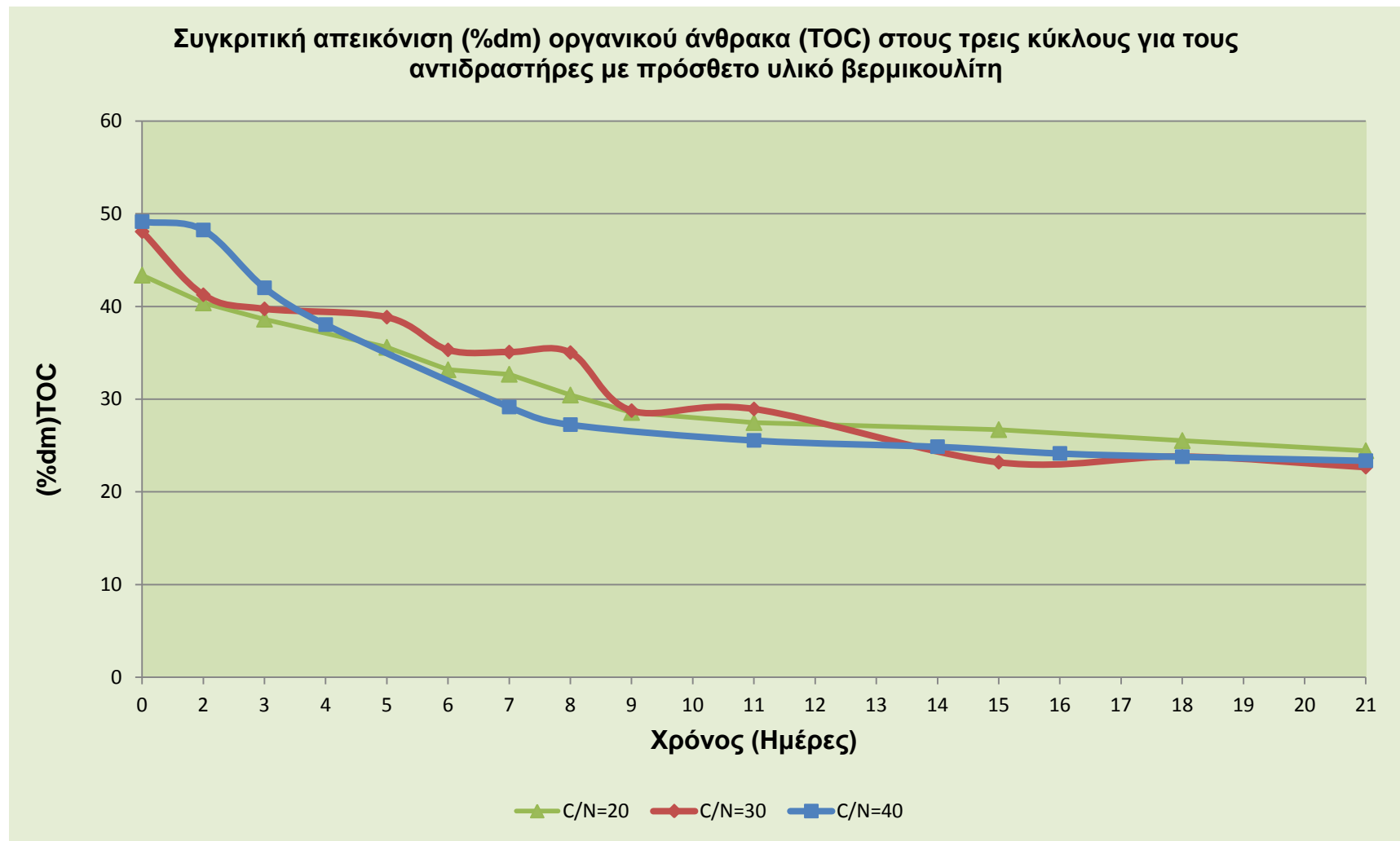
Αντιδραστήρας Περλίτης	Ημέρα	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4
	0	38,5	43,86	43,15
	2	35,42	40,67	42,55
	3	31,67	38,71	41,35
	4			38,76
	5	30,14	33,72	
	6	28,46	28,64	
	7	27,88	27,36	24,54
	8	26,52	28,02	22,14
	9	24,86	26,45	
	10			
	11	23,73	25,74	20,87
	12			
	14	22,94	24,98	19,86
	15			
	16			19,18
	18	22,05	24,12	18,88
21	21,84	23,46	18,64	



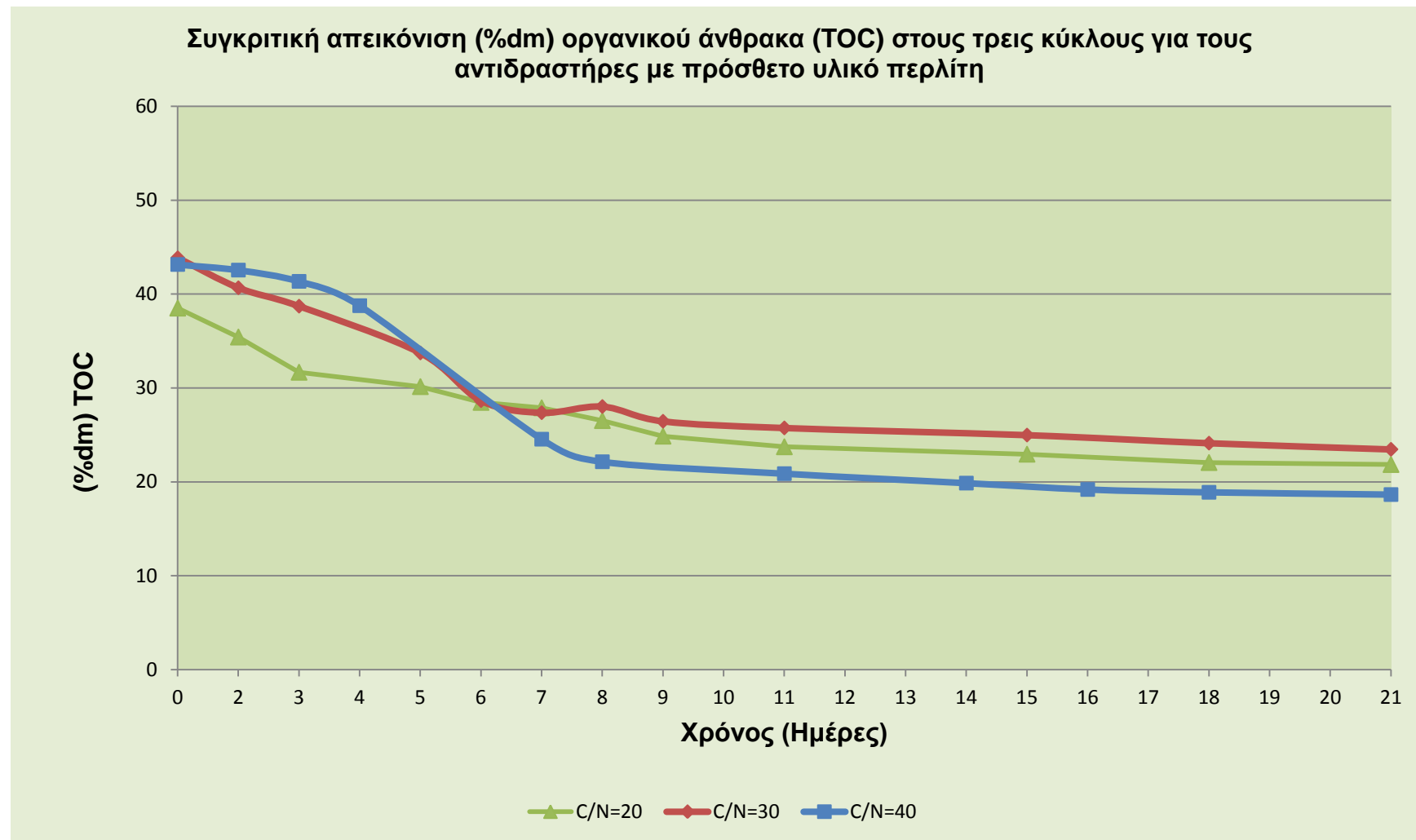
Διάγραμμα 5.56 Συγκριτική απεικόνιση TOC (%dm) στους τρεις κύκλους για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό πριονίδι



Διάγραμμα 5.57 Συγκριτική απεικόνιση TOC (%dm) στους τρεις κύκλους για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό ζεόλιθο



Διάγραμμα 5.58 Συγκριτική απεικόνιση TOC (%dm) στους τρεις κύκλους για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό βερμικουλίτη



Διάγραμμα 5.59 Συγκριτική απεικόνιση TOC (%dm) στους τρεις κύκλους για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό περλίτη

Προσδιορισμός του ολικού αζώτου κατά Kjeldahl (%dm) του υποστρώματος (Συγκριτικός Κύκλος Υποστρωμάτων Δράσης Β)

Ακολουθεί συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων του ολικού αζώτου κατά Kjeldahl του υποστρώματος και για τους τέσσερις αντιδραστήρες που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε έναν από τους τρεις κύκλους, με αρχικό λόγο υποστρώματος C/N, 20, 30 και 40, και παρατίθενται τα αντίστοιχα διαγράμματα.

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρατηρείται ότι το αρχικό ποσοστό του ολικού αζώτου στον τέταρτο κύκλο είναι μικρότερο από αυτό του τρίτου και αυτό με τη σειρά του μικρότερο από αυτό του δεύτερου κύκλου. Αυτό συμβαίνει λόγω της διαφοράς του αρχικού λόγου C/N των των τριών κύκλων, καθώς για να αυξηθεί ο λόγος C/N πρέπει το αρχικό υπόστρωμα να αποτελείται από τρόφιμα με μεγαλύτερα ποσοστά σε άνθρακα και μικρότερα σε άζωτο. Ενώ αντιθέτως, μικρός αρχικός λόγος σημαίνει πως το αρχικό υπόστρωμα αποτελείται από τρόφιμα με μικρότερα ποσοστά άνθρακα ή μεγαλύτερα ποσοστά αζώτου, ή και τα δύο ταυτόχρονα. Αξίζει να σημειωθεί, σε αυτό το σημείο, πως αναφερόμαστε σε ποσοστό επί ξηρής μάζας, που σημαίνει πως όπου υπάρχει μεγαλύτερη διάθεση αζώτου λόγω μεγαλύτερης τροφοδοσίας σε πρωτεϊνούχα υλικά, αναμένουμε μεγαλύτερο ποσοστό ολικού αζώτου στο υπόστρωμα, κάτι που επαληθεύεται από τις πειραματικές μετρήσεις. Οι τελικές τιμές, ωστόσο δεν είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικές, γεγονός που προδίδει την μη σωστή λειτουργία των εργασιών της βιοαποδόμησης στους δύο αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό πριονίδι.

Σε όλους τους κύκλους παρατηρείται μία αύξηση των τιμών του ποσοστού του αζώτου στη θερμόφιλη φάση, που συμβαδίζει με την αντίστοιχη κατανάλωση άνθρακα. Αυξημένο είναι το ποσοστό του αντιδραστήρα του βερμικουλίτη στον τέταρτο κύκλο, αλλά αυτό συμβαίνει επειδή υπάρχει μεγαλύτερη μείωση του οργανικού άνθρακα στον εν λόγω αντιδραστήρα. Παρά το γεγονός ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο αρχικός λόγος C/N στο υπόστρωμα τόσο μικρότερο ποσοστό αζώτου παρουσιάζει αρχικά, εντούτοις δε συμβαίνει το ίδιο και στις τελικές τιμές, καθώς το ποσοστό του αζώτου συμβαδίζει με το ποσοστό του άνθρακα στο υπόστρωμα. Στους κύκλους μεγάλους αρχικούς λόγους C/N στο υπόστρωμα παρατηρείται και μεγαλύτερη κατανάλωση άνθρακα κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Σε αυτό το γεγονός βασίζονται οι τιμές του αζώτου προς το τέλος της διεργασίας, όπου σημειώνονται στα ίδια επίπεδα και στους τρεις κύκλους και σε κάποιες περιπτώσεις είναι μεγαλύτερες στους κύκλους με μεγάλους αρχικούς λόγους C/N. Η σταθεροποίηση των τιμών είναι ομαλή και οι τελικές τιμές ικανοποιητικές σε όλους τους κύκλους.

Πίνακας 5.69 Τιμές TKN (%dm) για τον αντιδραστήρα του πριονιδιού στους τρεις κύκλους της Δράσης Β

Αντιδραστήρας Πριονίδι	Ημέρα	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4
	0	1,85	1,70	1,41
	2	1,94	1,74	1,48
	3	1,99	1,79	1,52
	4			1,58
	5	2,05	1,82	
	6	2,09	1,87	
	7	2,07	1,88	1,64
	8	2,11	1,91	1,68
	9	2,16	1,96	
	10			
	11	2,14	1,95	1,72
	12			
	14	2,18	1,99	1,78
	15			
	16			1,81
	18	2,22	2,10	1,84
21	2,24	2,05	1,86	

Πίνακας 5.70 Τιμές TKN (%dm) για τον αντιδραστήρα του ζεόλιθου στους τρεις κύκλους της Δράσης Β

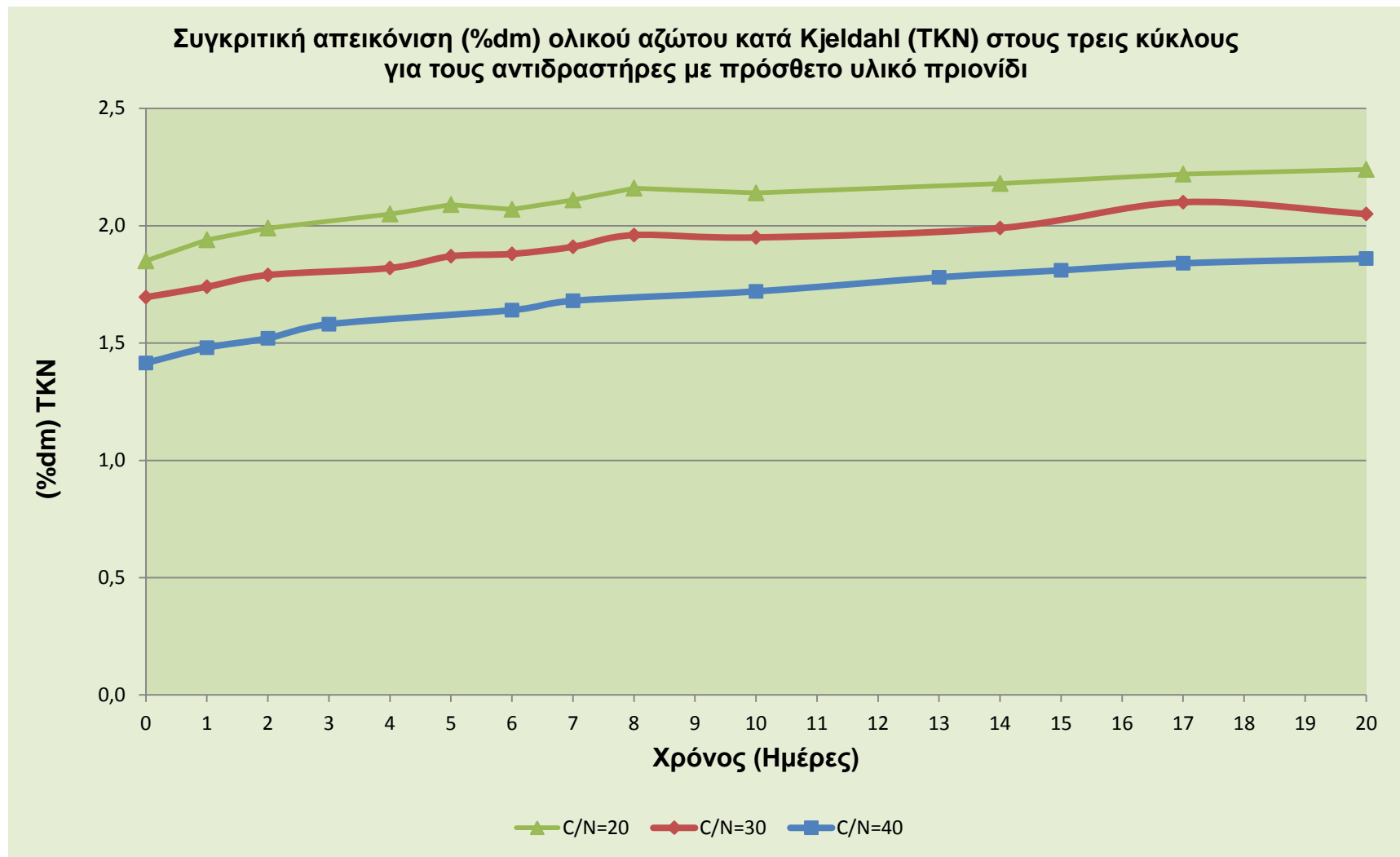
Αντιδραστήρας Ζεόλιθος	Ημέρα	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4
	0	2,08	1,82	1,33
	2	2,17	2,02	1,42
	3	2,24	2,15	1,46
	4			1,54
	5	2,32	2,36	
	6	2,48	2,44	
	7	2,56	2,58	2,03
	8	2,67	2,64	2,12
	9	2,71	2,66	
	10			
	11	2,77	2,68	2,19
	12			
	14	2,79	2,71	2,26
	15			
	16			2,55
	18	2,81	2,67	2,68
21	2,84	2,72	2,77	

Πίνακας 5.71 Τιμές TKN (%dm) για τον αντιδραστήρα του βερμικουλίτη στους τρεις κύκλους της Δράσης Β

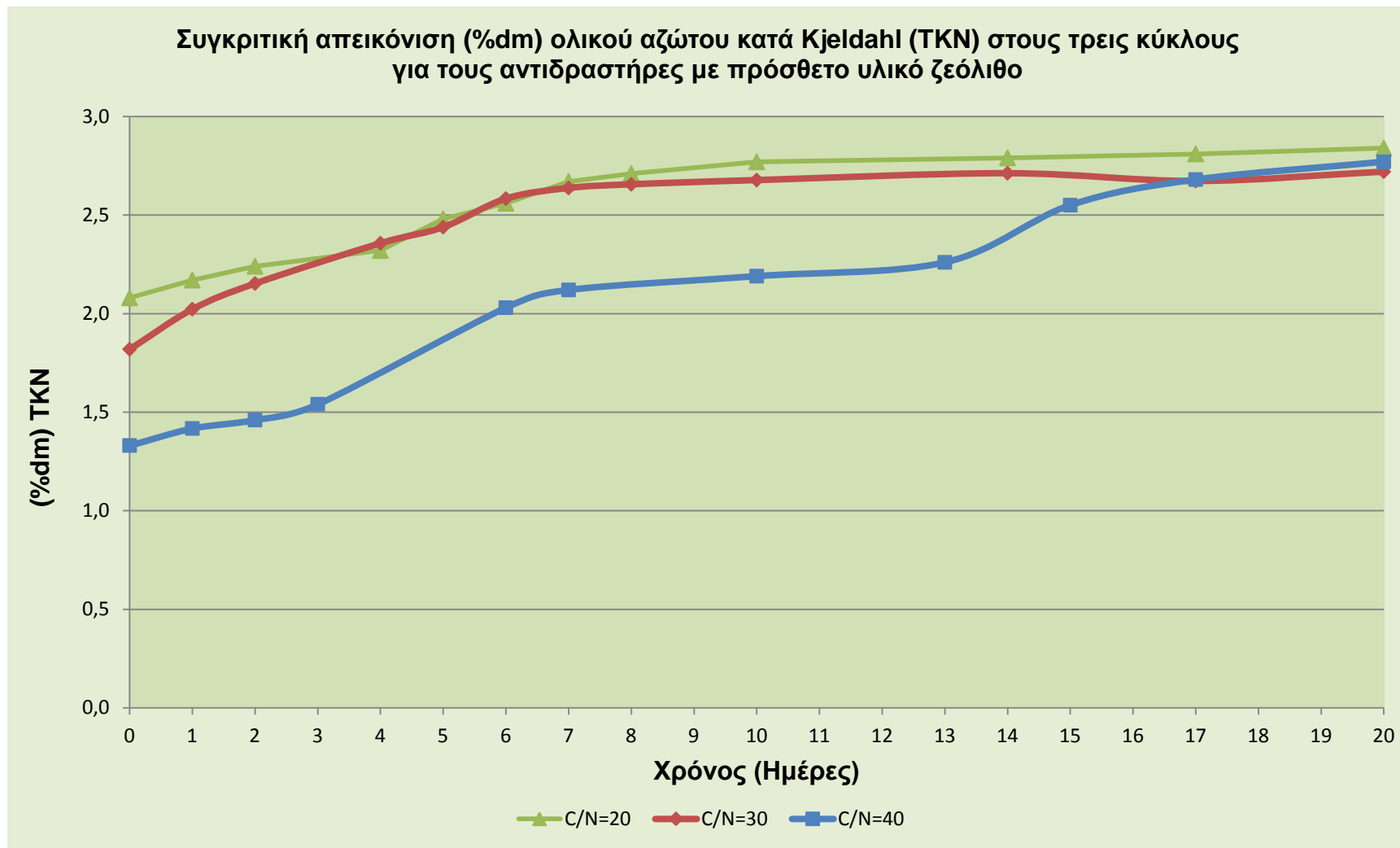
Αντιδραστήρας Βερμικουλίτης	Ημέρα	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4
	0	1,97	1,64	1,36
	2	2,08	1,80	1,44
	3	2,17	1,75	1,56
	4			1,68
	5	2,29	1,80	
	6	2,38	1,96	
	7	2,41	2,02	1,82
	8	2,48	2,10	1,96
	9	2,51	2,02	
	10			
	11	2,49	2,14	2,38
	12			
	14	2,53	2,08	2,45
	15			
	16			2,57
	18	2,55	2,10	2,63
21	2,56	2,14	2,79	

Πίνακας 5.72 Τιμές TKN (%dm) για τον αντιδραστήρα του περλίτη στους τρεις κύκλους της Δράσης Β

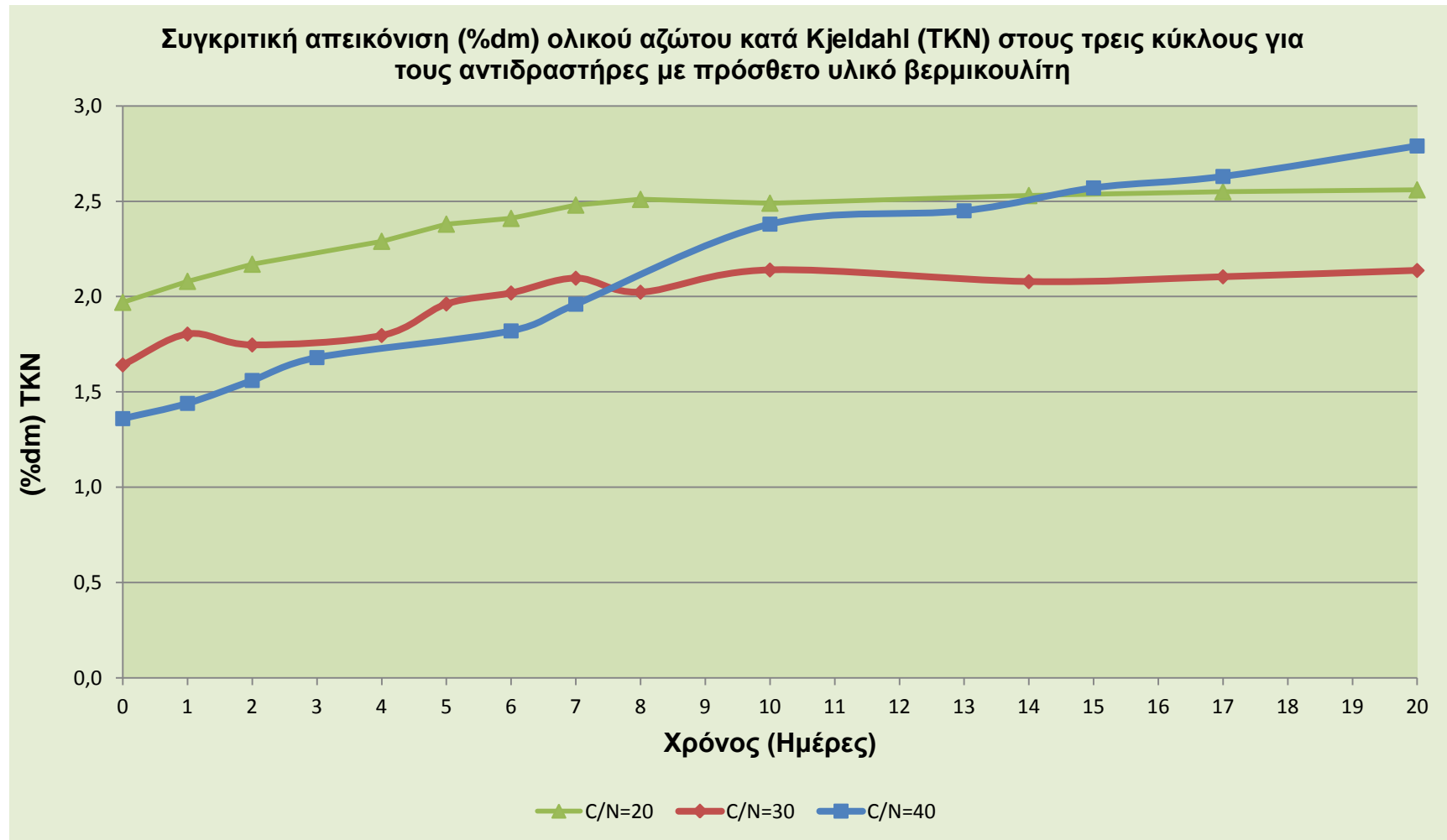
Αντιδραστήρας Περλίτης	Ημέρα	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4
	0	1,77	1,50	1,21
	2	1,82	1,62	1,49
	3	1,89	1,65	1,62
	4			1,84
	5	1,95	1,88	
	6	1,99	1,86	
	7	2,15	1,91	1,87
	8	2,14	1,95	1,96
	9	2,19	1,99	
	10			
	11	2,21	1,92	2,12
	12			
	14	2,25	2,02	2,18
	15			
	16			2,24
	18	2,24	2,16	2,27
21	2,26	2,14	2,31	



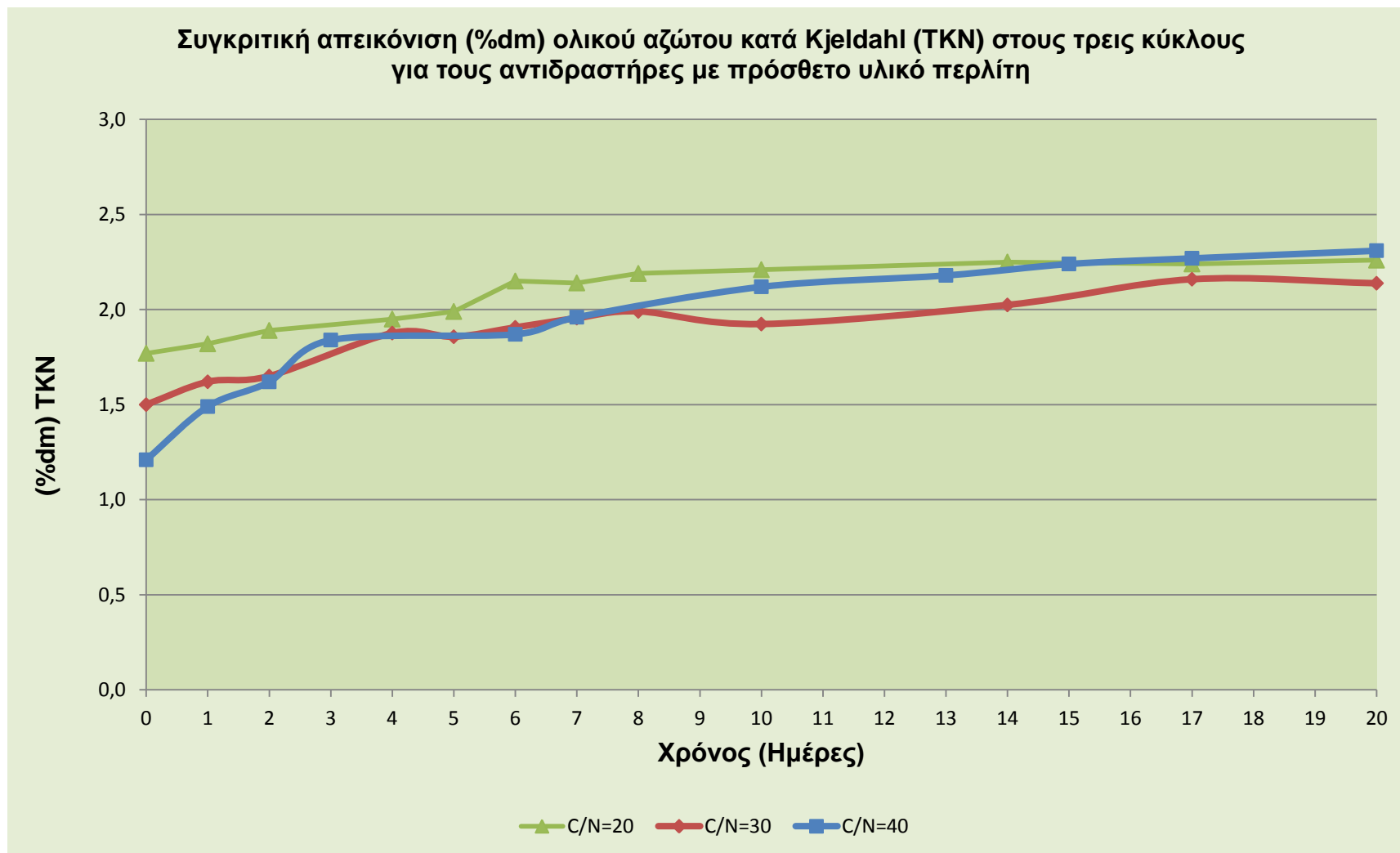
Διάγραμμα 5.60 Συγκριτική απεικόνιση TKN (%dm) στους τρεις κύκλους για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό πριονίδι



Διάγραμμα 5.61 Συγκριτική απεικόνιση TKN (%dm) στους τρεις κύκλους για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό ζεόλιθο



Διάγραμμα 5.62 Συγκριτική απεικόνιση TKN (%dm) στους τρεις κύκλους για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό βερμικουλίτη



Διάγραμμα 5.63 Συγκριτική απεικόνιση TKN (%dm) στους τρεις κύκλους για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό περλίτη

Προσδιορισμός του λόγου C/N του υποστρώματος (Συγκριτικός Κύκλος Υποστρωμάτων Δράσης Β)

Ακολουθεί συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων του λόγου C/N του υποστρώματος και για τους τέσσερις αντιδραστήρες που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε έναν από τους τρεις κύκλους, με αρχικό λόγο υποστρώματος C/N, 20, 30 και 40, και παρατίθενται τα αντίστοιχα διαγράμματα.

Στα διάγραμμα παρατηρείται ξεκάθαρα ότι ο αρχικός λόγος C/N στα υποστρώματα του δεύτερου κύκλου προσεγγίζει το 20 που ήταν και ο στόχος της αρχικής τροφοδοσίας. Αντίστοιχα στον τρίτο κύκλο πειραμάτων προσεγγίζεται ο αρχικός λόγος C/N των υποστρωμάτων σε τιμές κοντά στο 30, καθώς το ίδιο συμβαίνει και με τον αρχικό λόγο των υποστρωμάτων και στον τέταρτο πειραματικό κύκλο της Δράσης Β. Στη συνέχεια διακρίνεται μία μείωση του λόγου στους αντιδραστήρες και των τριών κύκλων, κατά τη διάρκεια της θερμόφιλης φάσης, λόγω κατανάλωσης του οργανικού άνθρακα του υποστρώματος.

Στις πρώτες μέρες, και κατά τη διάρκεια της θερμόφιλης φάσης, σημειώνεται ραγδαία μείωση του λόγου και στους αντιδραστήρες που προστέθηκε ορυκτό, ενώ στον κύκλο που χρησιμοποιήθηκε σκέτο πριονίδι η μείωση του λόγου κατά τη θερμόφιλη φάση είναι πολύ μικρότερη και οι τελικές τιμές του οριακά υψηλές προσεγγίζοντας την τιμή 20. Αντιθέτως, στους αντιδραστήρες που προστέθηκε ορυκτό παρατηρείται μία ομαλή σταθεροποίηση των τιμών οι οποίες τελικά προσεγγίζουν την τιμή 10. Αυτό δείχνει πως το παραγόμενο προϊόν είναι καλής ποιότητας και η διαδικασία της βιοαποδόμησης διεξήχθη με επιτυχία.

Πίνακας 5.73 Τιμές C/N για τον αντιδραστήρα του πριονιδιού στους τρεις κύκλους της Δράσης Β

Αντιδραστήρας Πριονίδι	Ημέρα	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4
	1	24,7	28,40	38,48
	2	23,98	28,95	36,61
	3	22,30	27,11	34,30
	4			29,87
	5	20,56	26,31	
	6	19,94	25,71	
	7	19,43	25,63	27,00
	8	18,79	24,62	24,97
	9	17,95	23,73	
	10			
	11	17,71	23,24	22,84
	12			
	14	17,00	22,24	21,11
	15			
	16			19,92
	18	16,32	20,26	19,50
21	16,28	19,98	19,11	

Πίνακας 5.74 Τιμές C/N για τον αντιδραστήρα του ζεόλιθου στους τρεις κύκλους της Δράσης Β

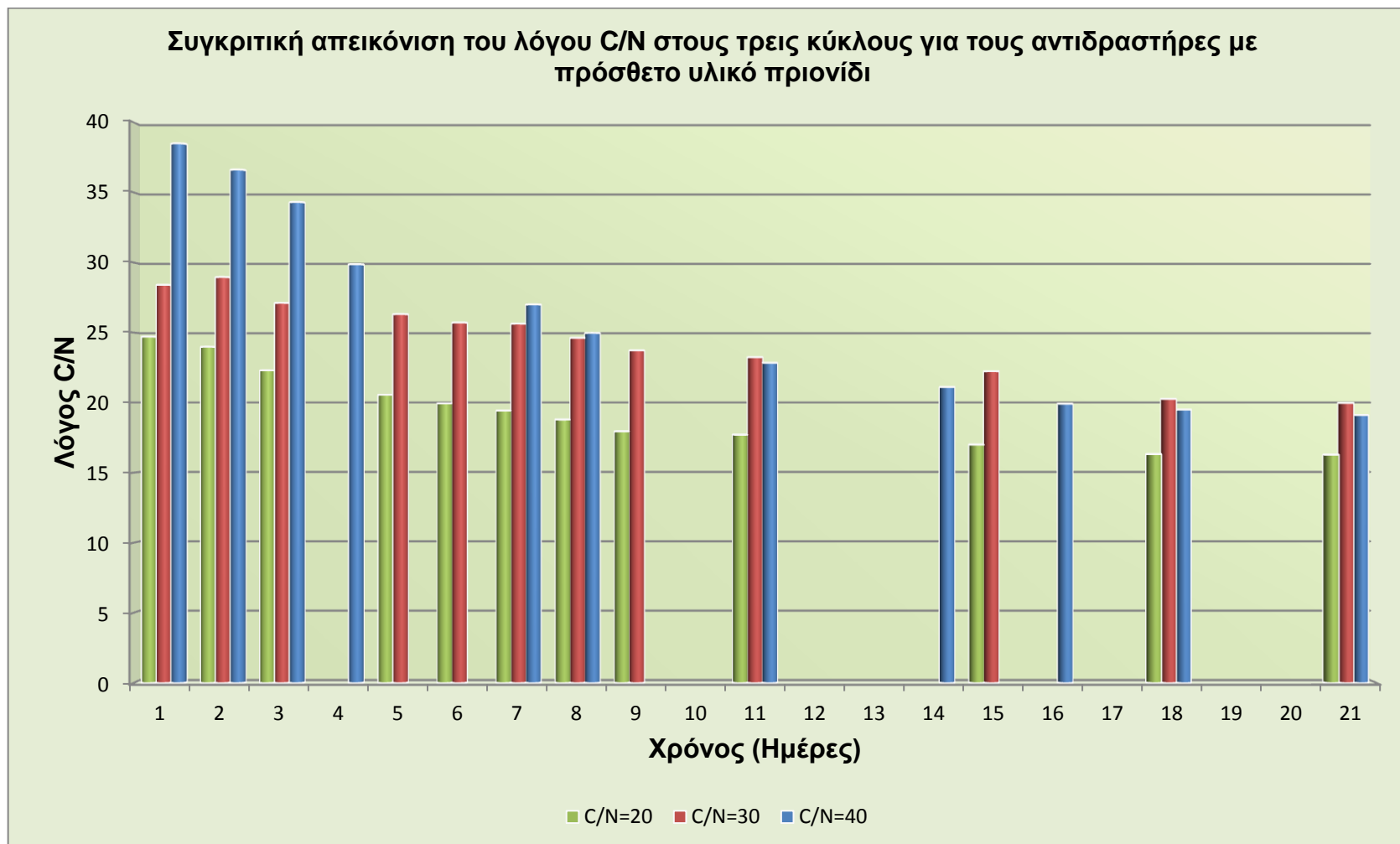
Αντιδραστήρας Ζεόλιθος	Ημέρα	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4
	1	21,42	27,81	38,84
	2	19,07	22,41	33,48
	3	16,32	19,19	29,83
	4			26,81
	5	15,03	15,41	
	6	12,79	14,29	
	7	12,13	12,19	16,03
	8	11,41	12,23	14,74
	9	10,9	12,20	
	10			
	11	10,48	11,90	13,91
	12			
	14	10,35	11,30	13,17
	15			
	16			11,59
	18	10,08	11,17	10,90
21	9,85	10,85	10,34	

Πίνακας 5.75 Τιμές C/N για τον αντιδραστήρα του βερμικουλίτη στους τρεις κύκλους της Δράσης Β

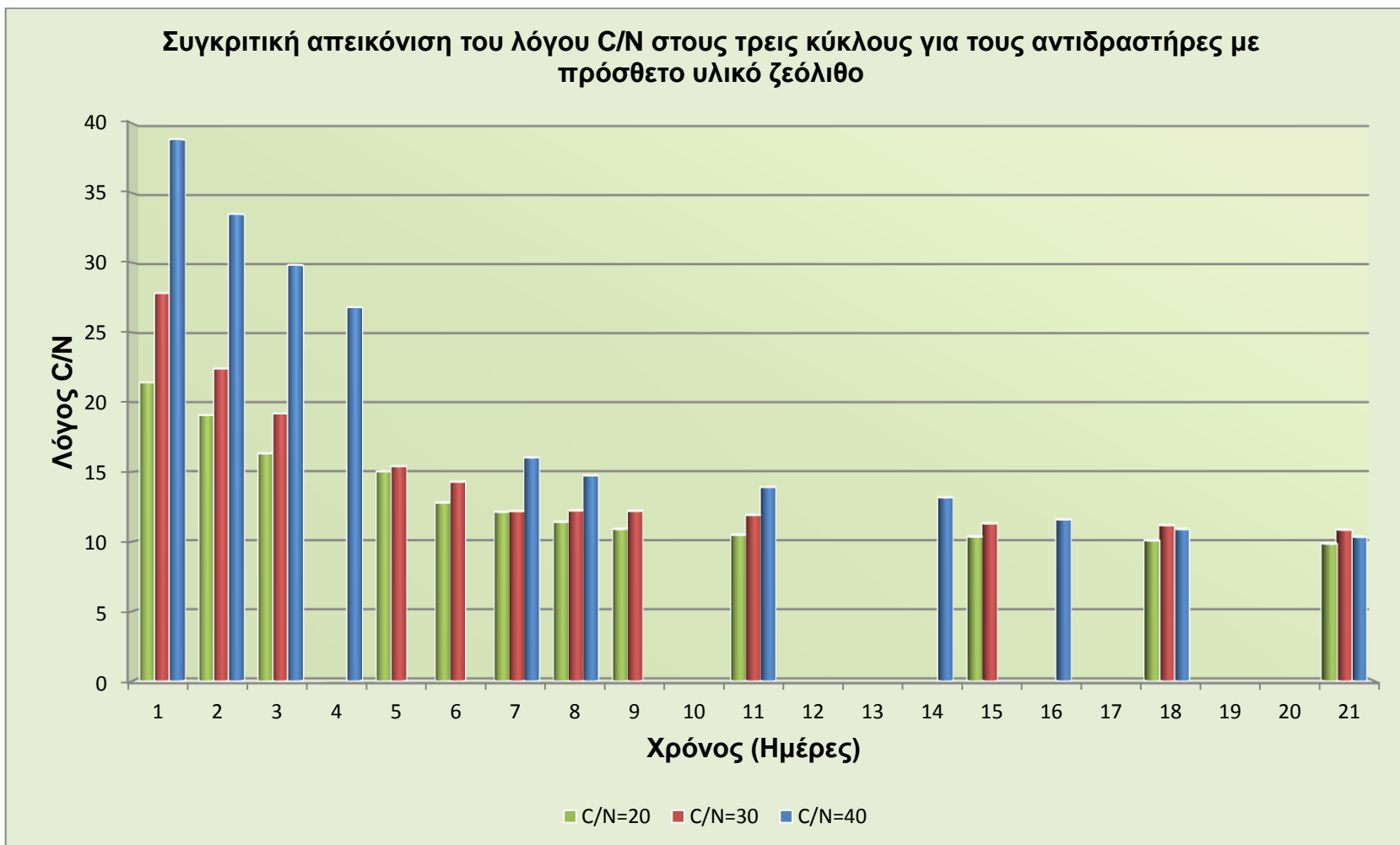
Αντιδραστήρας Βερμικουλίτης	Ημέρα	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4
	1	22,02	29,28	36,14
	2	19,41	21,77	33,50
	3	17,8	22,76	26,93
	4			22,64
	5	15,54	21,63	
	6	13,94	18,01	
	7	13,56	17,37	16,02
	8	12,27	16,70	13,90
	9	11,38	14,22	
	10			
	11	11,03	13,53	10,74
	12			
	14	10,56	11,16	10,15
	15			
	16			9,40
	18	10,01	11,32	9,05
21	9,54	10,60	8,37	

Πίνακας 5.76 Τιμές C/N για τον αντιδραστήρα του περλίτη στους τρεις κύκλους της Δράσης Β

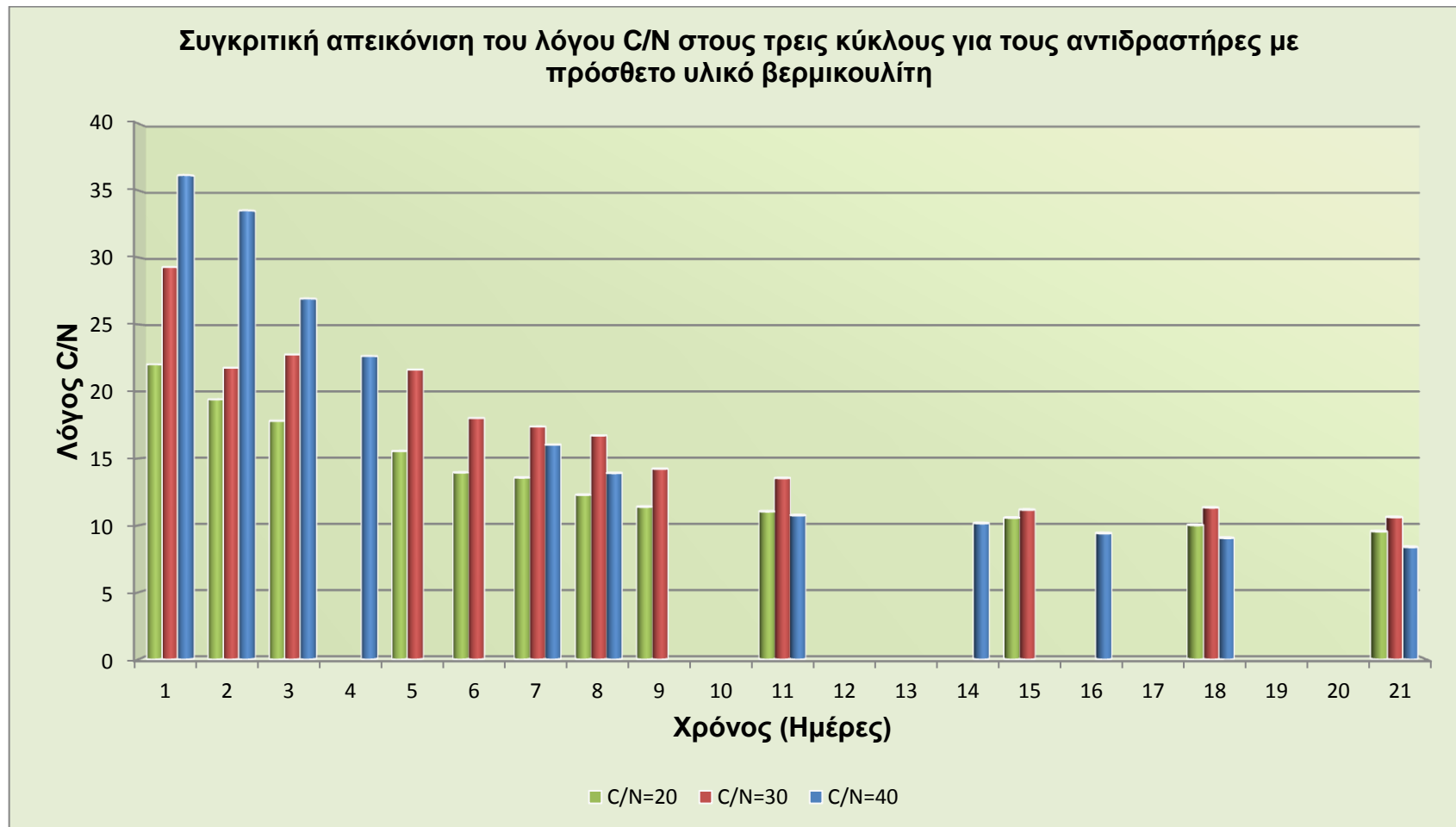
Αντιδραστήρας Περλίτης	Ημέρα	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4
	1	21,75	29,32	35,77
	2	19,46	25,07	28,55
	3	16,76	23,47	25,51
	4			21,07
	5	15,46	17,97	
	6	14,3	15,42	
	7	12,97	14,35	13,12
	8	12,39	14,33	11,29
	9	11,35	13,29	
	10			
	11	10,74	13,38	9,84
	12			
	14	10,2	12,34	9,11
	15			
	16			8,56
	18	9,84	11,17	8,32
21	9,66	10,97	8,07	



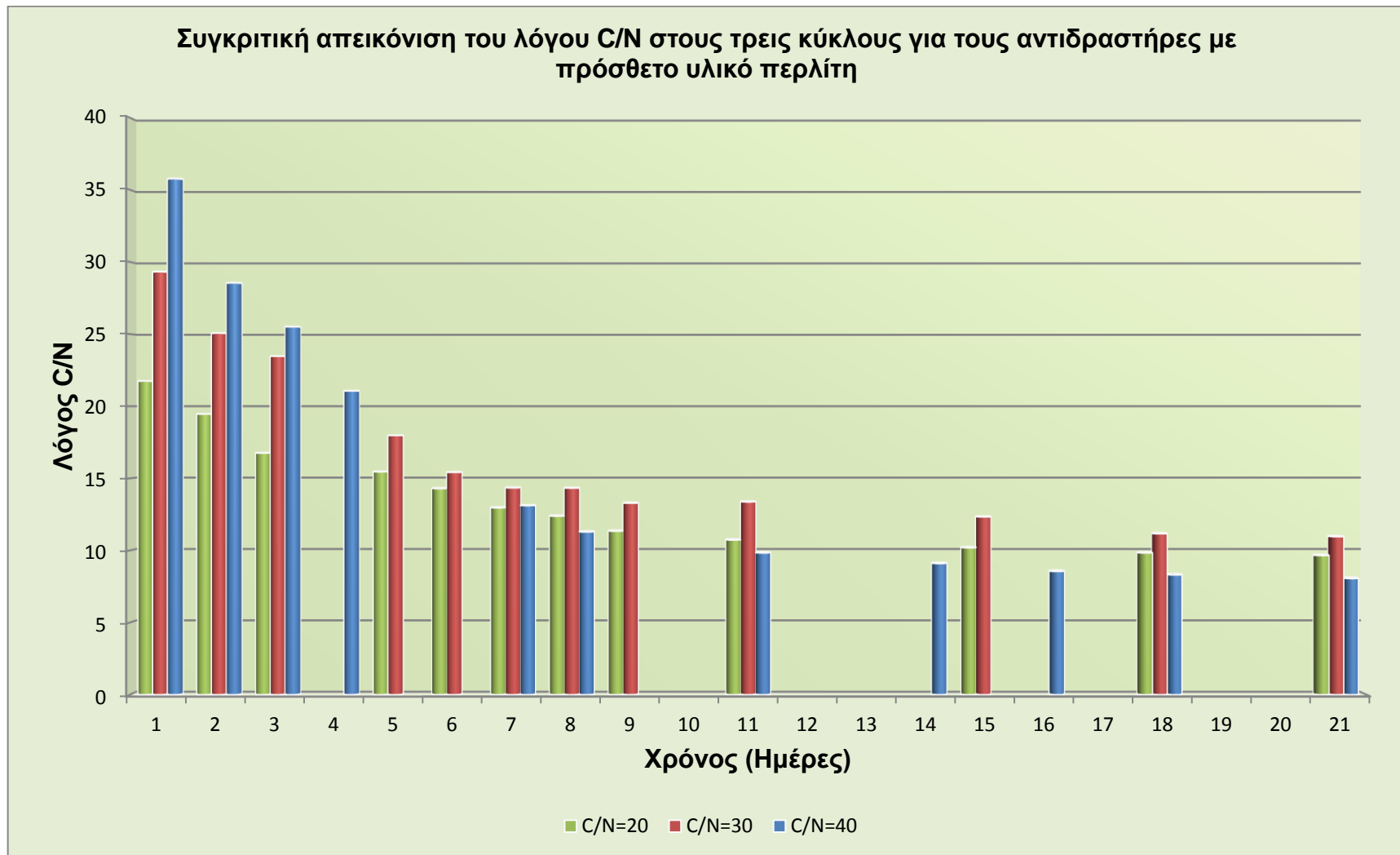
Διάγραμμα 5.64 Συγκριτική απεικόνιση C/N στους τρεις κύκλους για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό πριονίδι



Διάγραμμα 5.65 Συγκριτική απεικόνιση C/N στους τρεις κύκλους για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό ζεόλιθο



Διάγραμμα 5.66 Συγκριτική απεικόνιση C/N στους τρεις κύκλους για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό βερμικουλίτη



Διάγραμμα 5.67 Συγκριτική απεικόνιση C/N στους τρεις κύκλους για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό περλίτη

Προσδιορισμός νιτρικών ($NO_3^- - N$) του υποστρώματος (Συγκριτικός Κύκλος Υποστρωμάτων Δράσης Β)

Ακολουθεί συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων των νιτρικών ($NO_3^- - N$) του υποστρώματος και για τους τέσσερις αντιδραστήρες που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε έναν από τους τρεις κύκλους, με αρχικό λόγο υποστρώματος C/N, 20, 30 και 40, και παρατίθενται τα αντίστοιχα διαγράμματα.

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρατηρείται ξεκάθαρα πως με το πέρας της θερμόφιλης φάσης, ξεκινά η αποδόμηση των αμμωνιακών και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ομαλή αύξηση των νιτρικών. Στο σημείο αυτό, αξίζει να σημειωθεί ότι, αφενός διακόπτεται η παραγωγή αμμωνιακών, αφετέρου, τα ήδη υπάρχοντα αμμωνιακά μετατρέπονται σε νιτρικά συμβάλλοντας με αυτόν τον τρόπο στην ραγδαία αύξησή τους.

Οριακές τιμές έχουν τεθεί και για τα νιτρικά καθότι η υπέρμετρη συγκέντρωσή τους δύναται να διαμορφώσει συνθήκες περίσσειας θρεπτικών συστατικών στο έδαφος. Σύμφωνα με το Σύνδεσμο Ολοκληρωμένης Διαχείρισης Αποβλήτων της Καλιφόρνια των ΗΠΑ, το επιτρεπτό εύρος συγκέντρωσης νιτρικών στο τελικό κόμποστ κυμαίνεται από 250-350 mg kg⁻¹ dm (CIWMB, 2004), ενώ κατά τους Bary et al. (2002) το οριακό εύρος τιμών είναι 200-500 mg kg⁻¹ dm. Επομένως, παρατηρείται ότι οι συγκεντρώσεις των νιτρικών με εξαίρεση, σε κάθε κύκλο, τον αντιδραστήρα όπου προστέθηκε σκέτο πριονίδι, βρίσκονται πολύ κοντά στα προαναφερθέντα όρια. Οι τιμές των νιτρικών στους αντιδραστήρες που χρησιμοποιήθηκε ως πρόσθετο μόνο το πριονίδι βρίσκονται κάτω από τα όρια, γεγονός ενδεικτικό της μη ορθής διεξαγωγής της διεργασίας.

Πίνακας 5.77 Τιμές νιτρικών ($NO_3^- - N$) ($\frac{mg}{kg}$) για τον αντιδραστήρα του πριονιδιού στους τρεις κύκλους της Δράσης Β

Αντιδραστήρας Πριονίδι	Ημέρα	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4
	0	12,00	11,00	13,00
	2	14,00	18,00	17,00
	3	11,00	26,00	14,00
	4			20,00
	5	17,00	21,00	
	6	15,00	25,00	
	7	13,00	23,00	22,00
	8	25,00	24,00	55,00
	9	40,00	47,00	
	10			
	11	51,00	56,00	62,00
	12			
	14	66,00	78,00	74,00
	15			
	16			83,00
	18	88,00	91,00	92,00
21	94,00	104,00	100,00	

Πίνακας 5.78 Τιμές νιτρικών ($NO_3^- - N$) ($\frac{mg}{kg}$) για τον αντιδραστήρα του ζεόλιθου στους τρεις κύκλους της Δράσης Β

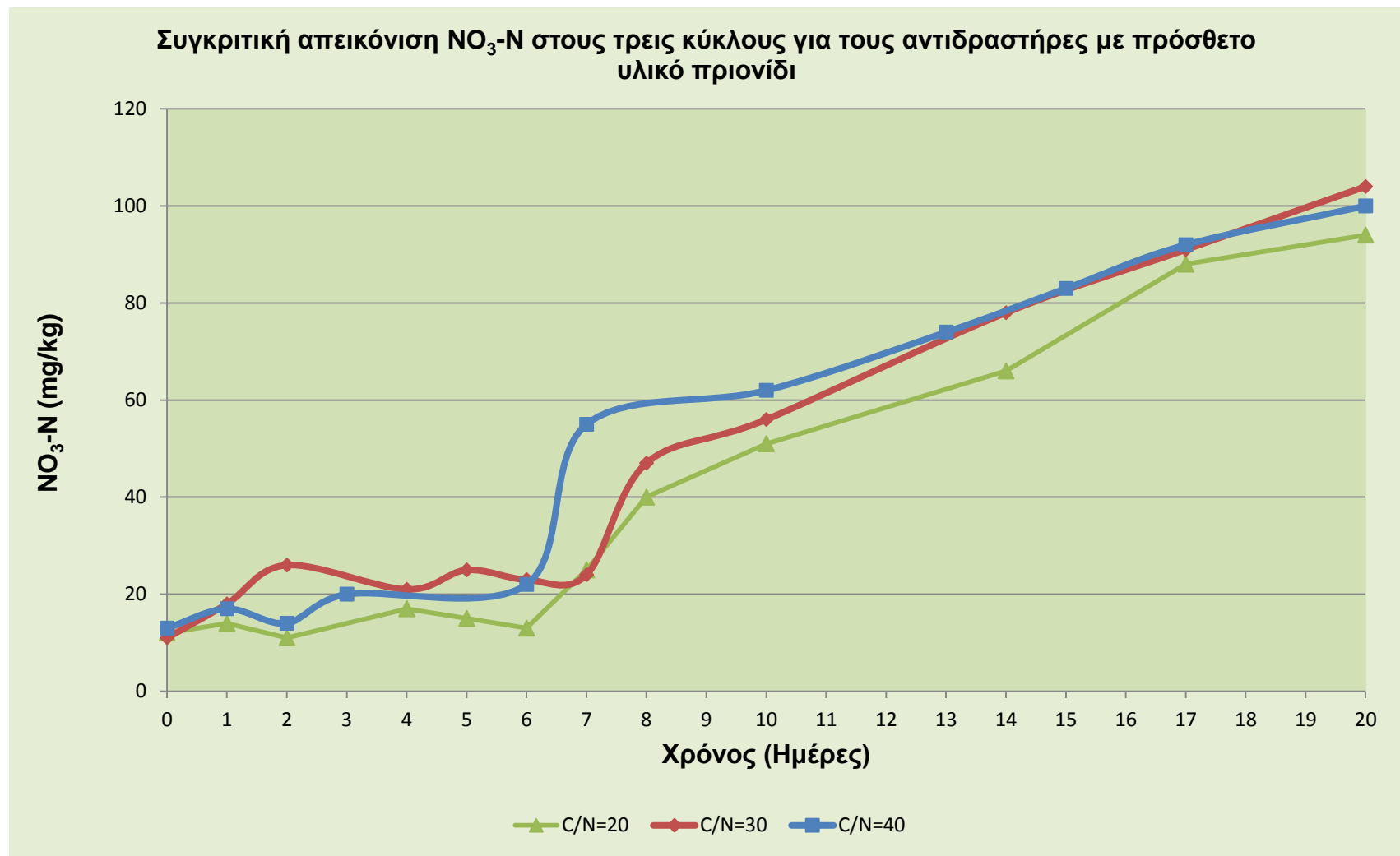
Αντιδραστήρας Ζεόλιθος	Ημέρα	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4
	0	11,00	15,00	12,00
	2	14,00	22,00	14,00
	3	17,00	16,00	17,00
	4			15,00
	5	15,00	21,00	
	6	16,00	8,00	
	7	14,00	11,00	18,00
	8	32,00	46,00	41,00
	9	67,00	84,00	
	10			
	11	117,00	138,00	88,00
	12			
	14	215,00	247,00	132,00
	15			
	16			186,00
	18	321,00	324,00	254,00
21	398,00	425,00	372,00	

Πίνακας 5.79 Τιμές νιτρικών ($NO_3^- - N$) ($\frac{mg}{kg}$) για τον αντιδραστήρα του βερμικουλίτη στους τρεις κύκλους της Δράσης Β

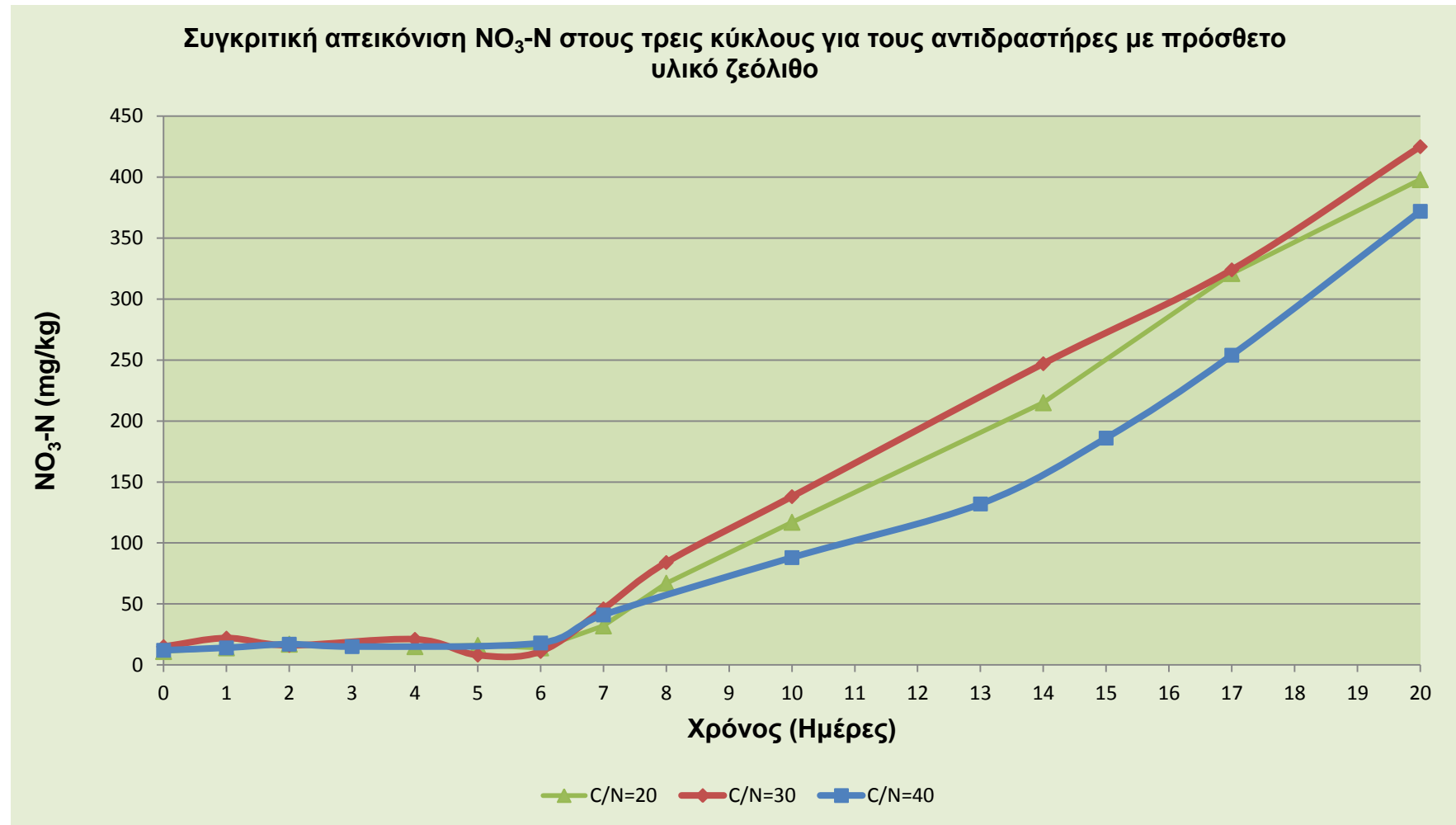
Αντιδραστήρας Βερμικουλίτης	Ημέρα	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4
	0	9,00	12,00	14,00
	2	14,00	18,00	11,00
	3	12,00	21,00	18,00
	4			15,00
	5	15,00	14,00	
	6	17,00	13,00	
	7	13,00	15,00	21,00
	8	51,00	58,00	38,00
	9	93,00	97,00	
	10			
	11	144,00	157,00	76,00
	12			
	14	237,00	286,00	159,00
	15			
	16			214,00
	18	354,00	397,00	288,00
21	456,00	522,00	441,00	

Πίνακας 5.80 Τιμές νιτρικών ($NO_3^- - N$) ($\frac{mg}{kg}$) για τον αντιδραστήρα του περλίτη στους τρεις κύκλους της Δράσης Β

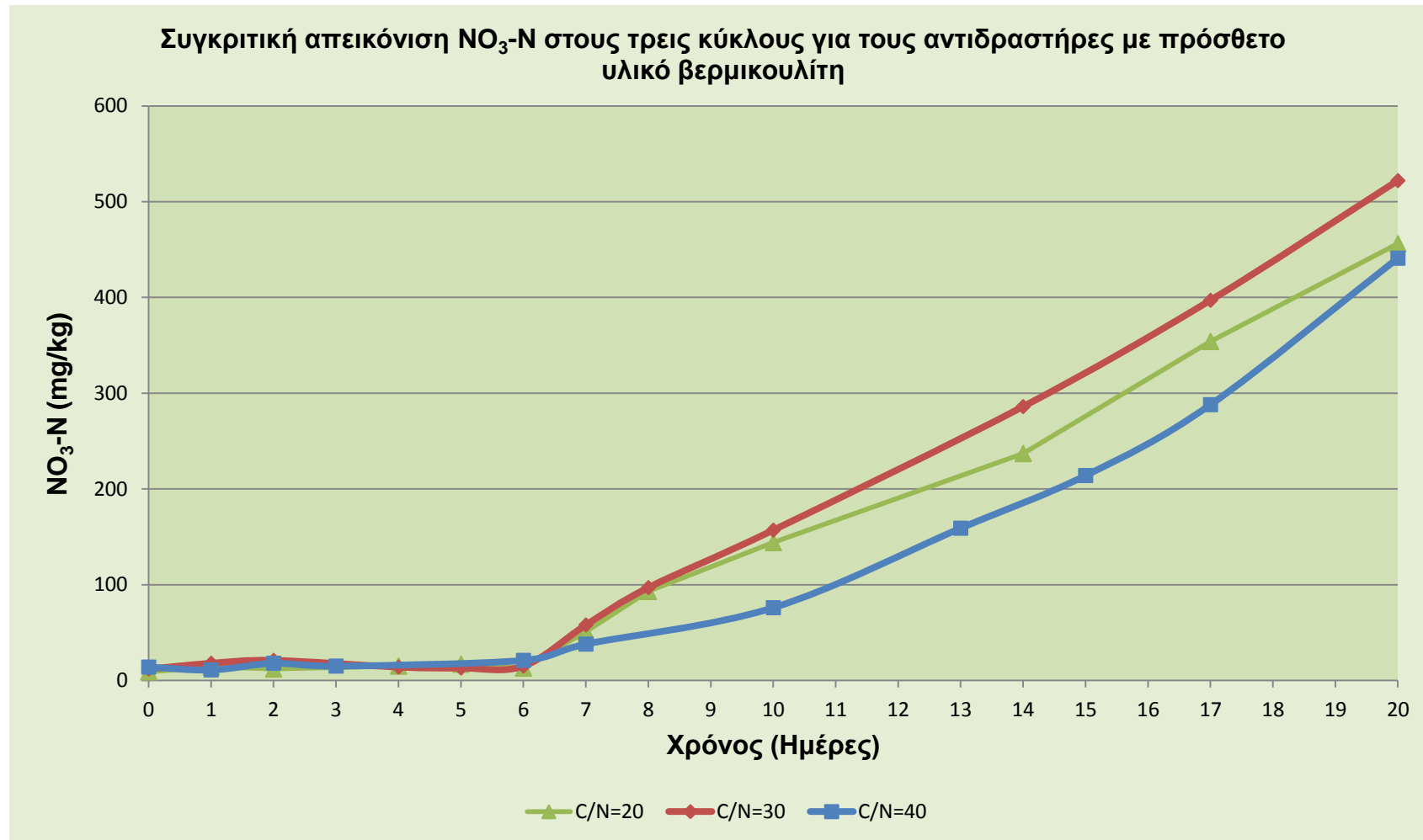
Αντιδραστήρας Περλίτης	Ημέρα	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4
	0	10,00	14,00	17,00
	2	14,00	19,00	12,00
	3	13,00	25,00	19,00
	4			21,00
	5	16,00	21,00	
	6	12,00	26,00	
	7	14,00	18,00	16,00
	8	59,00	55,00	34,00
	9	102,00	106,00	
	10			
	11	173,00	167,00	82,00
	12			
	14	296,00	278,00	176,00
	15			
	16			248,00
	18	387,00	374,00	324,00
21	504,00	486,00	466,00	



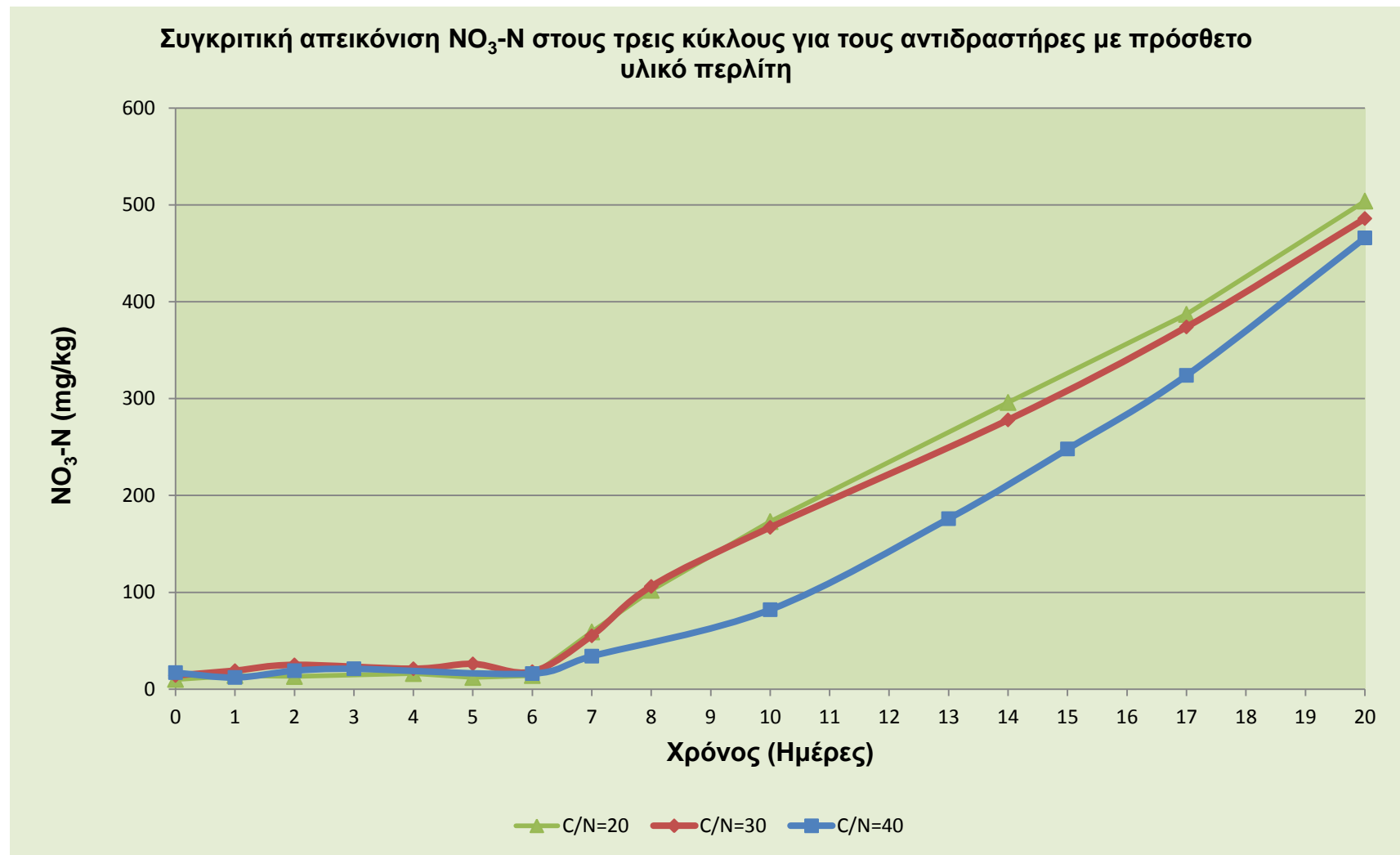
Διάγραμμα 5.68 Συγκριτική απεικόνιση νιτρικών ($\text{NO}_3^- - \text{N}$) ($\frac{\text{mg}}{\text{kg}}$) στους τρεις κύκλους για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό πριονίδι



Διάγραμμα 5.69 Συγκριτική απεικόνιση νιτρικών ($\text{NO}_3^- - \text{N}$) ($\frac{\text{mg}}{\text{kg}}$) στους τρεις κύκλους για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό ζεόλιθο



Διάγραμμα 5.70 Συγκριτική απεικόνιση νιτρικών ($\text{NO}_3^- - \text{N}$) ($\frac{\text{mg}}{\text{kg}}$) στους τρεις κύκλους για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό βερμικουλίτη



Διάγραμμα 5.71 Συγκριτική απεικόνιση νιτρικών ($\text{NO}_3^- - \text{N}$) ($\frac{\text{mg}}{\text{kg}}$) στους τρεις κύκλους για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό περλίτη

Προσδιορισμός αμμωνιακών ($NH_4^+ - N$) του υποστρώματος (Συγκριτικός Κύκλος Υποστρωμάτων Δράσης Β)

Ακολουθεί συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων των αμμωνιακών ($NH_4^+ - N$) του υποστρώματος και για τους τέσσερις αντιδραστήρες που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε έναν από τους τρεις κύκλους, με αρχικό λόγο υποστρώματος C/N, 20, 30 και 40, και παρατίθενται τα αντίστοιχα διαγράμματα.

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρατηρούνται ευκρινώς τα στάδια της πορείας της συγκέντρωσης των αμμωνιακών στους αντιδραστήρες και για τους τρεις πειραματικούς κύκλους της Δράσης Β. Και στους τρεις πειραματικούς κύκλους διακρίνεται η αύξηση των αμμωνιακών κατά τη διάρκεια της θερμόφιλης φάσης. Ύστερα παρατηρείται μία ομαλή σταθεροποίηση, συνοδευόμενη από μία ήπια μείωση των αμμωνιακών. Η μείωση αυτή οφείλεται στην μετατροπή των αμμωνιακών σε νιτρικά και στην απελευθέρωση μικρού ποσοστού των αμμωνιακών στο περιβάλλον. Τέλος, ο αντιδραστήρας του δεύτερου κύκλου, του οποίου το αρχικό υπόστρωμα ήταν πλούσιο σε πρωτεΐνες και υδατάνθρακες, και ως εκ τούτου είχε μεγαλύτερη αρχική διάθεση αζώτου, παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές στο τέλος της διεργασίας, χωρίς να παρατηρούνται μεγάλες αποκλίσεις των τελικών τιμών και για τους τρεις κύκλους.

Υψηλές συγκεντρώσεις αμμωνιακών στο κόμποστ υποδηλώνουν μη σταθεροποιημένο υλικό το οποίο κατά την εναπόθεσή του προσροφάται η αμμωνία στο έδαφος και δύναται να οδηγήσει σε ακινητοποίηση του αζώτου, όπως έχει παρατηρηθεί από τους Korner and Stegmann (2002) και Liang et al. (2000). Ως ανώτατο επιτρεπτό όριο περιεκτικότητας του κόμποστ σε αμμωνιακά έχει ορισθεί από τους Bernal et al. (1998a) και Zucconi and Bertoldi (1987) ίσο με $400 \text{ mg kg}^{-1} \text{ dm}$, ενώ κατά τους Bary et al., (2002) το όριο είναι ίσο με $500 \text{ mg kg}^{-1} \text{ dm}$.

Συνεπώς οι τελικές τιμές των συγκεντρώσεων των αμμωνιακών είναι ενδεικτικές της ορθής διεξαγωγής της διεργασίας, για όλους τους κύκλους που χρησιμοποιήθηκαν ορυκτά, σε αντίθεση, και στην περίπτωση αυτή, τους αντιδραστήρες όπου προστέθηκε σκέτο πριονίδι, στους οποίους οι γραφικές ακολουθούν την αναμενόμενη πορεία για τη διεργασία, αλλά σε πολύ χαμηλότερες συγκεντρώσεις.

Πίνακας 5.81 Τιμές αμμωνιακών ($NH_4^+ - N$) ($\frac{mg}{kg}$) για τον αντιδραστήρα του πριονιδιού στους τρεις κύκλους κύκλους της Δράσης Β

Αντιδραστήρας Πριονίδι	Ημέρα	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4
	0	174,00	145,00	138,00
	2	196,00	175,00	166,00
	3	218,00	202,00	189,00
	4			196,00
	5	232,00	219,00	
	6	251,00	241,00	
	7	258,00	254,00	217,00
	8	264,00	268,00	223,00
	9	255,00	259,00	
	10			
	11	239,00	233,00	219,00
	12			
	14	224,00	216,00	208,00
	15			
	16			194,00
	18	217,00	207,00	186,00
21	209,00	198,00	181,00	

Πίνακας 5.82 Τιμές αμμωνιακών ($NH_4^+ - N$) ($\frac{mg}{kg}$) για τον αντιδραστήρα του ζεόλιθου στους τρεις κύκλους κύκλους της Δράσης Β

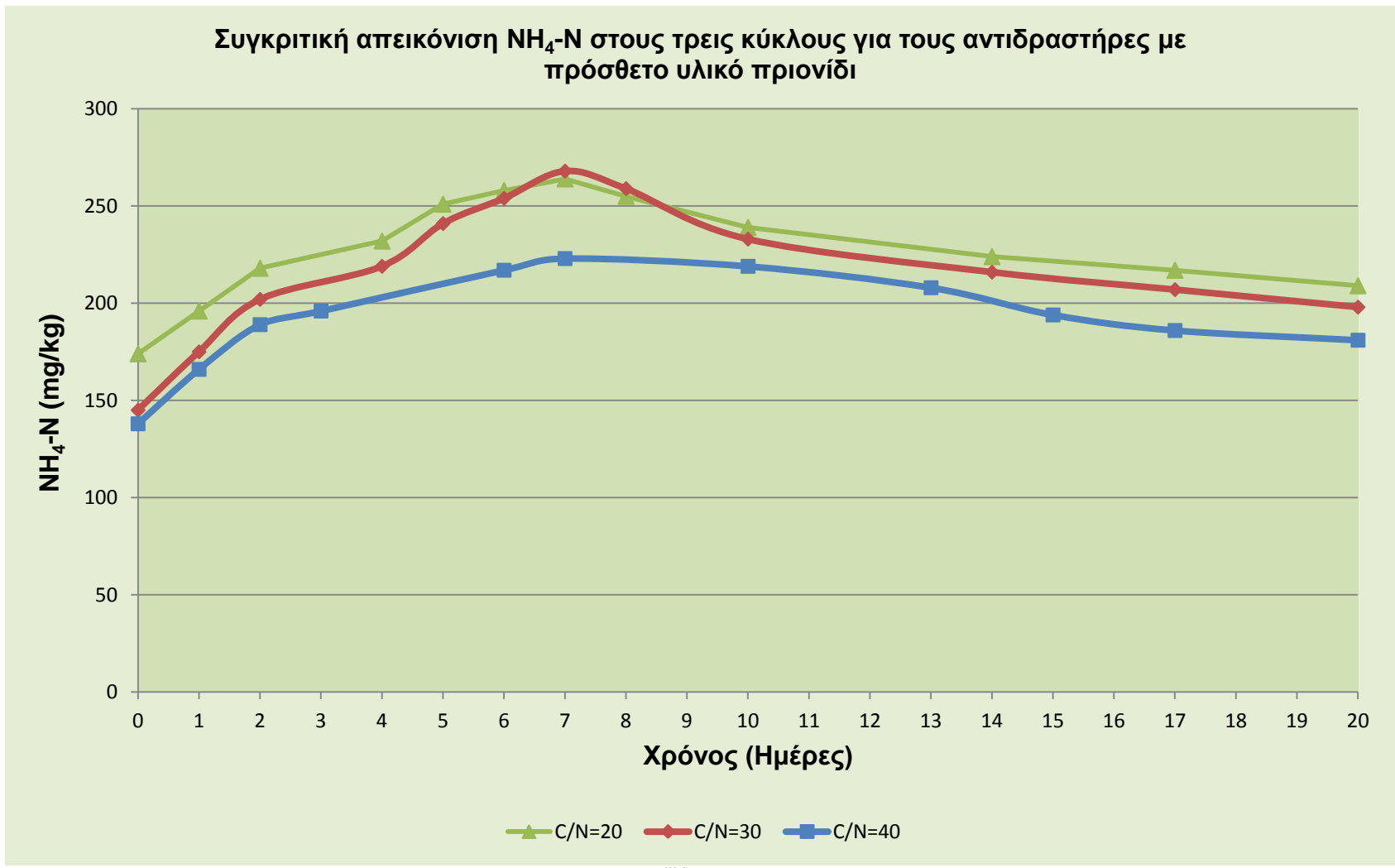
Αντιδραστήρας Ζεόλιθος	Ημέρα	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4
	0	112,00	45,00	34,00
	2	186,00	195,00	177,00
	3	248,00	265,00	242,00
	4			286,00
	5	316,00	310,00	
	6	352,00	355,00	
	7	368,00	402,00	378,00
	8	418,00	465,00	425,00
	9	412,00	446,00	
	10			
	11	396,00	414,00	406,00
	12			
	14	374,00	378,00	357,00
	15			
	16			315,00
	18	338,00	321,00	294,00
21	317,00	298,00	266,00	

Πίνακας 5.83 Τιμές αμμωνιακών ($NH_4^+ - N$) ($\frac{mg}{kg}$) για τον αντιδραστήρα του βερμικουλίτη στους τρεις κύκλους κύκλους της Δράσης Β

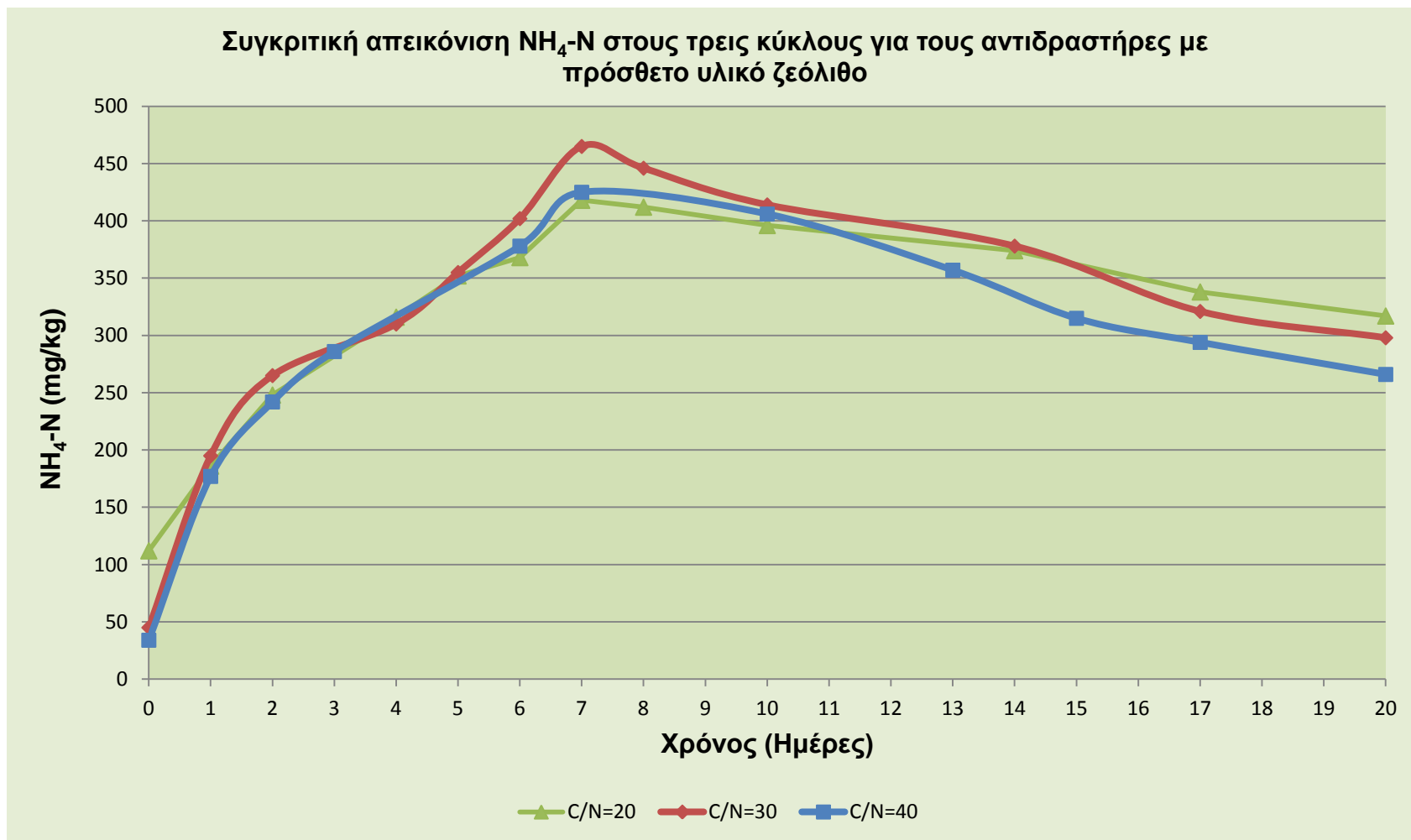
Αντιδραστήρας Βερμικουλίτης	Ημέρα	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4
	0	86,00	54,00	42,00
	2	245,00	225,00	198,00
	3	336,00	316,00	278,00
	4			314,00
	5	392,00	387,00	
	6	452,00	442,00	
	7	486,00	468,00	404,00
	8	508,00	524,00	458,00
	9	484,00	493,00	
	10			
	11	457,00	465,00	425,00
	12			
	14	433,00	431,00	406,00
	15			
	16			387,00
	18	391,00	387,00	354,00
21	358,00	346,00	321,00	

Πίνακας 5.84 Τιμές αμμωνιακών ($NH_4^+ - N$) ($\frac{mg}{kg}$) για τον αντιδραστήρα του περλίτη στους τρεις κύκλους κύκλους της Δράσης Β

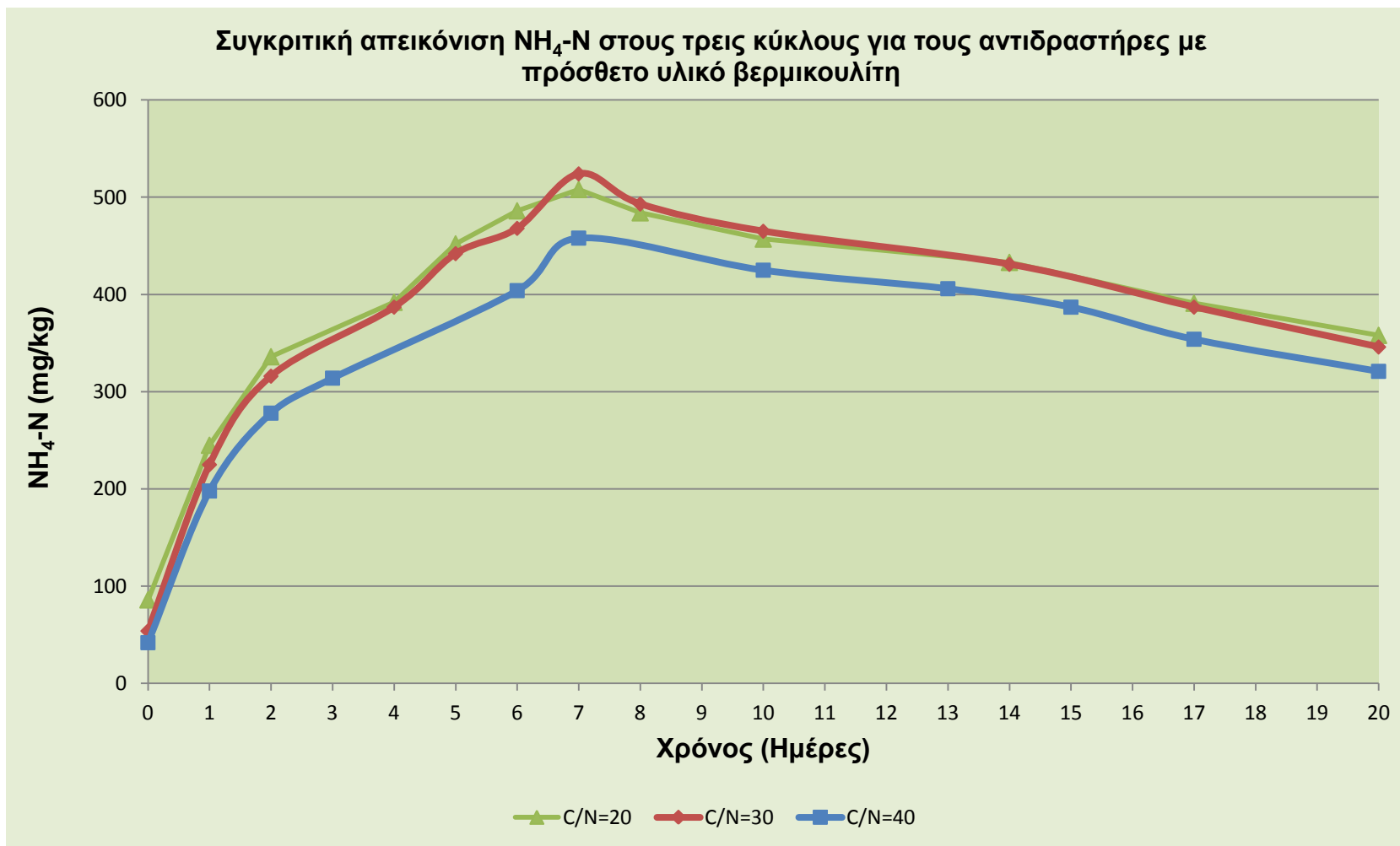
Αντιδραστήρας Περλίτης	Ημέρα	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4
	0	93,00	65,00	59,00
	2	221,00	214,00	182,00
	3	369,00	336,00	297,00
	4			362,00
	5	458,00	445,00	
	6	497,00	482,00	
	7	534,00	515,00	446,00
	8	552,00	569,00	497,00
	9	517,00	534,00	
	10			
	11	476,00	505,00	444,00
	12			
	14	412,00	428,00	428,00
	15			
	16			402,00
	18	368,00	396,00	389,00
21	325,00	362,00	341,00	



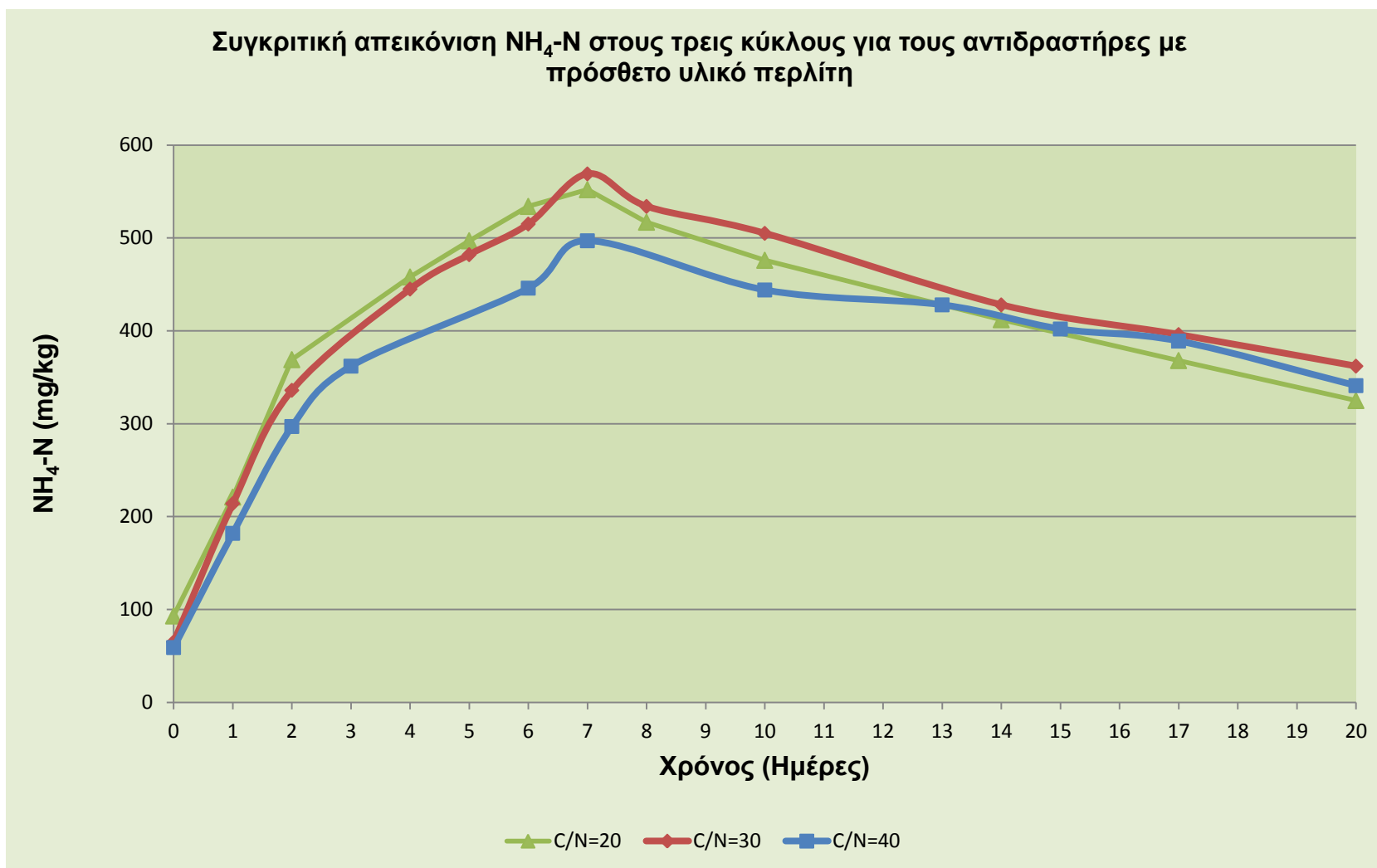
Διάγραμμα 5.72 Συγκριτική απεικόνιση αμμωνιακών ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) ($\frac{\text{mg}}{\text{kg}}$) στους τρεις κύκλους για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό πριονίδι



Διάγραμμα 5.73 Συγκριτική απεικόνιση αμμωνιακών ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) ($\frac{\text{mg}}{\text{kg}}$) στους τρεις κύκλους για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό ζεόλιθο



Διάγραμμα 5.74 Συγκριτική απεικόνιση αμμωνιακών ($NH_4^+ - N$) ($\frac{mg}{kg}$) στους τρεις κύκλους για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό βερμικουλίτη



Διάγραμμα 5.75 Συγκριτική απεικόνιση αμμωνιακών ($NH_4^+ - N$) ($\frac{mg}{kg}$) στους τρεις κύκλους για τους αντιδραστήρες με πρόσθετο υλικό περλίτη

5.2.2.3 Δράση Γ

Από τα αποτελέσματα της Δράσης Β και σε συνδυασμό με την περιορισμένη, κατά τα άλλα, διεθνή βιβλιογραφία σχετικά με τη χρήση του περλίτη ως πρόσθετο κομποστοποίησης, εξήχθη το συμπέρασμα πως το ορυκτό αυτό βοηθάει σημαντικά τη διεργασία της κομποστοποίησης, ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζει μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον η ενδεδειγμένη μελέτη της συνεισφοράς του στη βελτιστοποίηση της διεργασίας. Συγκεκριμένα ο περλίτης βοηθάει στην ορθή και ταχεία εξέλιξη της διεργασίας και στην παραγωγή ενός ανάλαφρου τελικού προϊόντος με πάρα πολύ καλές ιδιότητες ως λίπασμα, κατάλληλο για τη χρήση ως εδαφοβελτιωτικό. Τέλος ο περλίτης αποτελεί ένα υλικό με πολύ χαμηλό κόστος αγοράς και εύκολο να το προμηθευτεί το κάθε νοικοκυριό. Από όλα τα παραπάνω είναι φανερό πως η διεξοδικότερη μελέτη της επίδρασης του περλίτη στη διεργασία της κομποστοποίησης καθώς και στις ιδιότητες του τελικού προϊόντος είναι επιβεβλημένη. Αυτός είναι και ο στόχος των δύο πρώτων πειραματικών κύκλων της Δράσης Γ. Παράλληλα περιορισμένη είναι η βιβλιογραφία διεθνώς και όσον αφορά στη χρήση του ώριμου κόμποστ ως πρόσθετο της κομποστοποίησης, ενώ το συγκεκριμένο υλικό πληρή όλες τις προϋποθέσεις ενός κατάλληλου υλικού για πρόσθετο στη διεργασία της κομποστοποίησης, καθώς προσφέρει πολύ καλό πορώδες στο υπόστρωμα, του δίνει όγκο, το κάνει ανάλαφρο, ενώ ταυτόχρονα λόγω των πολύ καλών ιδιοτήτων του, μετά την ωρίμανσή του, βελτιώνει αρκετά τις ιδιότητες του αρχικού υποστρώματος. Ο στόχος, λοιπόν, των κύκλων 3 και 4 της Δράσης Γ ήταν ακριβώς η μελέτη του ώριμου κόμποστ ως πρόσθετο στη διεργασία της κομποστοποίησης. Σε όλους τους κύκλους της Δράσης Γ, η αρχική αναλογία C/N διατηρήθηκε σταθερή και ίση με 30.

5.2.2.3.1 Πρώτος Κύκλος Πειραμάτων Δράσης Γ

Για να μελετηθεί η επίδραση του περλίτη στη διεργασία, σχεδιάστηκαν και πραγματοποιήθηκαν δύο κύκλοι πειραμάτων. Ο πρώτος κύκλος είχε ως στόχο να μελετηθεί και να καταλήξει σε συμπέρασμα σχετικά με το ποσοστό του ορυκτού επί της συνολικής μάζας του αρχικού υποστρώματος, που οδηγεί σε ορθότερη διεξαγωγή της διεργασίας, ενώ από τα αποτελέσματα του πρώτου κύκλου σχεδιάστηκε ο δεύτερος κύκλος πειραμάτων, όπου πραγματοποιήθηκε η προσθήκη επιπλέον ορυκτών (ζεόλιθος, βερμικουλίτης) για να μελετηθεί η πιθανή περεταίρω βελτίωση της διεργασίας και φυσικά των ιδιοτήτων του τελικού προϊόντος.

Πιο συγκεκριμένα στον πρώτο κύκλο χρησιμοποιήθηκαν τρεις αντιδραστήρες, με σταθερή, αρχική αναλογία υποστρώματος (C/N=30), ενώ προστέθηκε περλίτης σε ποσοστό 10% στον πρώτο αντιδραστήρα, 5% στον δεύτερο και 5% περλίτης + 5% πριονίδι στον τρίτο. Η διεργασία λειτούργησε εμφανώς καλύτερα στον πρώτο αντιδραστήρα (10% περλίτης).

Τροφοδοσία των αντιδραστήρων (Κύκλος 1 Δράση Γ)

Στον πίνακα 5.85 παρουσιάζονται τα υλικά που τροφοδότησαν κάθε ένα από τους τρεις αντιδραστήρες. Οι τιμές του πίνακα είναι σε γραμμάρια.

Η τροφοδοσία έγινε με γνώμονα να διατηρηθεί η αναλογία C/N σε τιμές κοντά στο 30. Για να επιτευχθεί ο συγκεκριμένος λόγος κρίθηκε σκόπιμο να διατηρηθεί αναλογία:

- 60% κυτταρινούχων συστατικών (μαρούλι, σπανάκι, πορτοκάλια και λεμόνια)
- 20% πρωτεϊνούχων συστατικών (ρεβύθια και φασόλια βρασμένα)
- 20% υδατανθρακούχων συστατικών (ψωμί)

Σε κάθε αντιδραστήρα έγινε προσθήκη περλίτη ή και πριονιδίου.

- Στον πρώτο αντιδραστήρα προστέθηκε περλίτης ποσότητας ίσης με το 10% της συνολικής μάζας τροφοδοσίας.
- Στον δεύτερο αντιδραστήρα προστέθηκε περλίτης ποσότητας ίσης με το 5% της συνολικής μάζας της τροφοδοσίας.
- Στον τρίτο αντιδραστήρα προστέθηκε περλίτης ποσότητας ίσης με το 5% της συνολικής μάζας της τροφοδοσίας, αλλά και πριονίδι ποσότητας ίσης με το 5% της συνολικής μάζας της τροφοδοσίας.

Πίνακας 5.85 Τροφοδοσία των αντιδραστήρων του πρώτου κύκλου Δράσης Γ

Αντιδραστήρας	Ημέρα	Κυτταρινούχα				Πρωτεΐνες		Υδατάνθρακες		Ορυκτό			Σύνολο	Τελικό Σύνολο
		Μαρούλι	Σπανάκι	Πορτοκάλι	Λεμόνι	Ρεβύθι	Φασόλι	Ψωμί	Πριονίδι	Ζεόλιθος	Βερμικουλίτης	Περλίτης		
1	1	2250	2250	1000	500	1000	1000	2000				1000	11000	13200
	1	225	225	100	50	100	100	200				100	1100	
	2	225	225	100	50	100	100	200				100	1100	
2	1	3940	3940	1750	875	1750	1750	3500				875	18380	22070
	1	395	395	175	90	175	175	350				90	1845	
	2	395	395	175	90	175	175	350				90	1845	
3	1	2250	2250	1000	500	1000	1000	2000	500			500	11000	13200
	1	225	225	100	50	100	100	200	50			50	1100	
	2	225	225	100	50	100	100	200	50			50	1100	

Δειγματοληψία – Απώλεια μάζας

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων του πρώτου κύκλου και συγκεκριμένα των εννέα πρώτων ημερών γινόταν καθημερινή δειγματοληψία από τους τρεις αντιδραστήρες. Ακολούθησαν άλλες τέσσερις δειγματοληψίες ανά τρεις ημέρες. Με τα δείγματα που λήφθηκαν έγινε η πλειοψηφία των πειραμάτων.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η μάζα του υλικού που αφαιρέθηκε σε κάθε αντιδραστήρα τις μέρες της δειγματοληψίας. Οι τιμές του πίνακα είναι σε γραμμάρια.

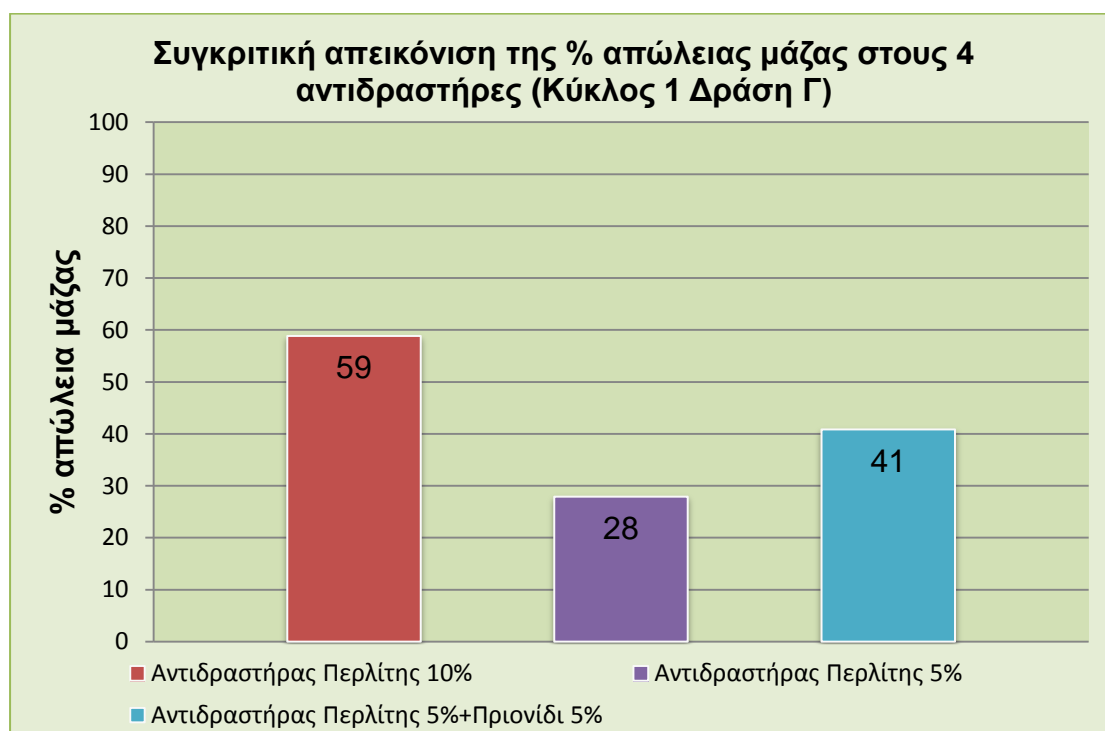
Πίνακας 5.86 Δειγματοληψία από τους αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου Δράσης Γ

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3
1	102	125	128
2	147	138	143
3	177	135	128
5	138	127	136
6	167	148	145
7	148	151	154
8	112	142	149
9	113	154	148
11	106	158	152
15	104	148	149
18	108	123	118
21	106	132	139
ΣΥΝΟΛΟ	1528	1681	1700

Οι ποσότητες που αφαιρέθηκαν από κάθε αντιδραστήρα σε συνδυασμό, με τις λοιπές απώλειες (π.χ. υγρασία), την αρχική τροφοδοσία, και την ζύγιση του τελικού προϊόντος μας δίνουν το επί τις εκατό ποσοστό απώλειας μάζας στον κάθε αντιδραστήρα. Αναλυτικότερα τα δεδομένα παρουσιάζονται στον πίνακα 5.87 και στο διάγραμμα 5.76.

Πίνακας 5.87 Ποσοστό % συνολικής μείωσης της μάζας σε κάθε αντιδραστήρα του πρώτου κύκλου Δράσης Γ

	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3
Αρχική Τροφοδοσία	13200	22070	13200
Σύνολο Δειγματοληψίας	1528	1681	1700
Θεωρητικά στον αντιδραστήρα	11672	20389	11300
Πραγματικά στον αντιδραστήρα	4800	14700	6800
Ποσοστό μείωσης της μάζας	59%	28%	41%



Διάγραμμα 5.76 Συγκριτική απεικόνιση της % απώλειας μάζας στους αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου Δράσης Γ

Προσδιορισμός της θερμοκρασίας του υποστρώματος (Κύκλος 1 Δράση Γ)

Κατά τη διεργασία του 1^{ου} πειραματικού κύκλου της Δράσης Γ το υπόστρωμα περνάει άμεσα από την πρώτη μεσόφιλη στη θερμόφιλη φάση τη δεύτερη κιόλας ημέρα λειτουργίας του συστήματος όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 5.77. Εξαιτίας της αφομοίωσης και της κατανάλωσης της άμεσα διαθέσιμης οργανικής ουσίας που εμπεριέχεται στα οργανικά απορρίμματα (Mena et al., 2003) σε συνδυασμό με τις αυτομονωτικές ιδιότητες, την αποδοτική ανάδευση και τον επαρκή αερισμό του υποστρώματος (λόγω της παρουσίας του περλίτη), αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες στον πρώτο αντιδραστήρα.

Πιο συγκεκριμένα όσον αφορά στον αντιδραστήρα όπου προστέθηκε στο υπόστρωμα περλίτης 10%κ.β., επετεύχθη η θερμόφιλη φάση η οποία ξεκίνησε με το πέρας της 2^{ης} μέρας και κράτησε μέχρι και την 7^η μέρα. Η μέγιστη θερμοκρασία που σημειώθηκε ήταν 57,90 °C. Στην συνέχεια η διεργασία πέρασε στην δεύτερη μεσόφιλη φάση στην οποία η θερμοκρασία σταθεροποιήθηκε σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Για τον δεύτερο αντιδραστήρα, στον οποίο προστέθηκε περλίτης 5%κ.β., η θερμόφιλη φάση ξεκίνησε από την 5^η ημέρα και κράτησε μέχρι και την 9^η. Η μέγιστη θερμοκρασία που σημειώθηκε ήταν 43,86 °C. Εν συνεχεία, η διεργασία πέρασε στην δεύτερη μεσόφιλη φάση στην οποία η θερμοκρασία σταθεροποιήθηκε σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Σχετικά με τον αντιδραστήρα που προστέθηκε περλίτης 5%+πριονίδι 5%, το προφίλ της θερμοκρασίας είναι πανομοιότυπο με αυτό του προηγούμενου αντιδραστήρα. Η θερμόφιλη φάση ξεκίνησε από την 5^η ημέρα λειτουργίας και κράτησε μέχρι και την 9^η. Η μέγιστη θερμοκρασία που σημειώθηκε ήταν 45,65 °C. Εν συνεχεία, η διεργασία πέρασε στην δεύτερη μεσόφιλη φάση στην οποία η θερμοκρασία σταθεροποιήθηκε σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα 5.77 η θερμοκρασία αυξάνεται γρήγορα και διατηρείται σε υψηλά επίπεδα για αρκετή χρονική περίοδο μόνο στην περίπτωση του πρώτου αντιδραστήρα (περλίτης 10%). Η χρονική αυτή περίοδος σε υψηλές θερμοκρασίες, ικανοποιεί τα χρονικά-θερμοκρασιακά όρια καταστροφής παθογόνων μικροοργανισμών, που πιθανόν να υπάρχουν στο υπόστρωμα, κατά τη διεργασία. Δε συμβαίνει, όμως, το ίδιο με τους υπόλοιπους δύο αντιδραστήρες, όπου η θερμοκρασία στη θερμόφιλη φάση είναι σε χαμηλά επίπεδα.

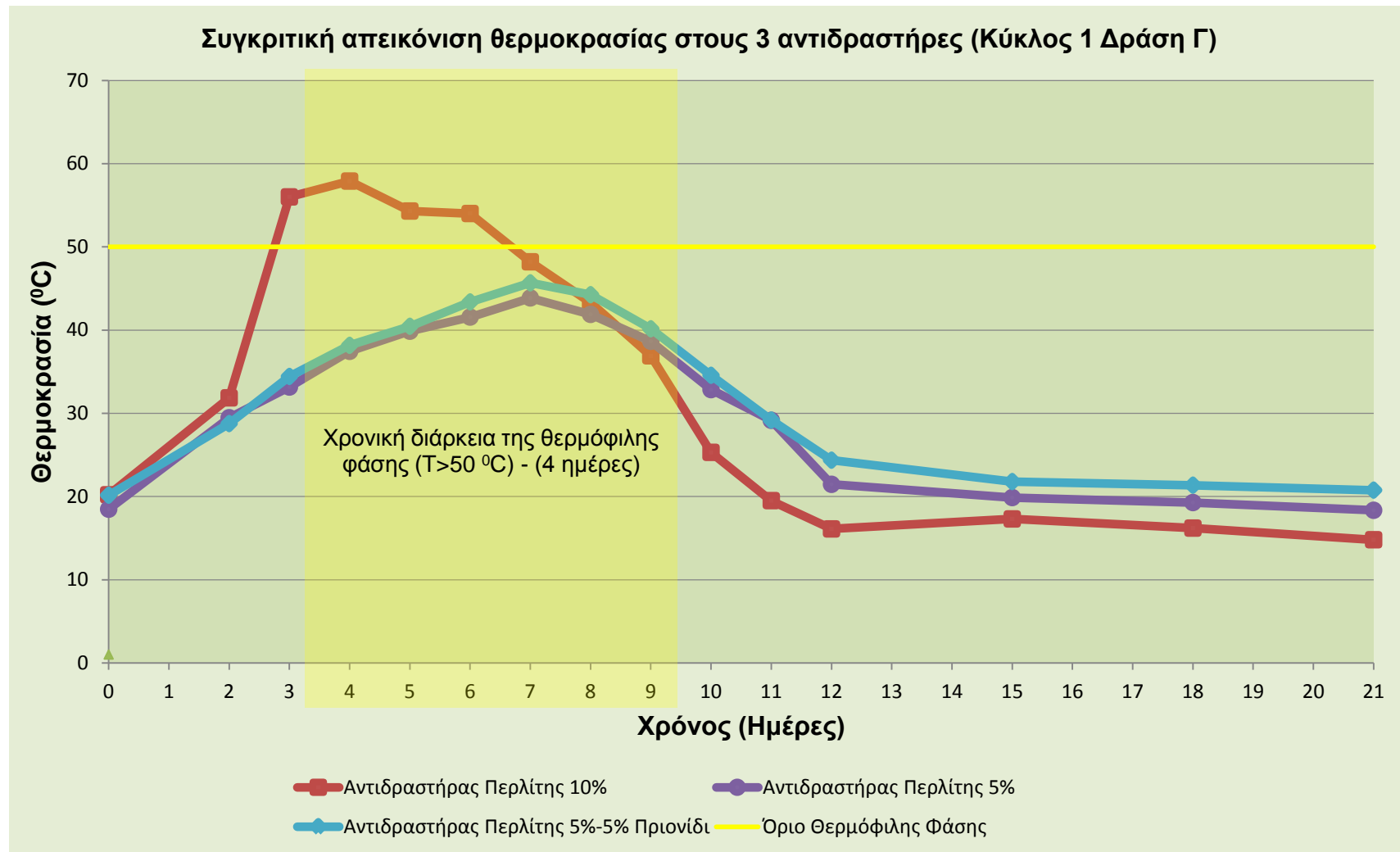
Η φθίνουσα πορεία της θερμοκρασίας καταγράφεται και προς το τέλος της διεργασίας αποτυπώνοντας τη μείωση του ρυθμού βιοαποδόμησης της οργανικής ουσίας και τη διαμόρφωση σταθερότερων συνθηκών στο υπόστρωμα αναφορικά με τη μικροβιακή δραστηριότητα.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές της θερμοκρασίας για όλους τους αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου.

Πίνακας 5.88 Τιμές θερμοκρασίας (°C) για τους τρεις αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου Δράσης Γ

Ημερα	Αντιδραστηρας 1	Αντιδραστηρας 2	Αντιδραστηρας3
0	20,20	18,47	20,15
2	31,85	29,46	28,76
3	56,00	33,15	34,42
4	57,90	37,44	38,16
5	54,30	39,86	40,45
6	54,00	41,56	43,38
7	48,20	43,86	45,67
8	43,30	41,88	44,25
9	36,90	38,65	40,15
10	25,30	32,84	34,56
11	19,50	29,15	29,18
12	16,10	21,46	24,36
15	17,30	19,87	21,79
18	16,20	19,27	21,36
21	14,80	18,34	20,76

Στο διάγραμμα 5.77 παρατίθενται τα προφίλ της θερμοκρασίας για όλους τους αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου της Δράσης Γ.



Διάγραμμα 5.77 Συγκριτική απεικόνιση θερμοκρασίας στους 3 αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου Δράσης Γ

Προσδιορισμός της υγρασίας του υποστρώματος (Κύκλος 1 Δράση Γ)

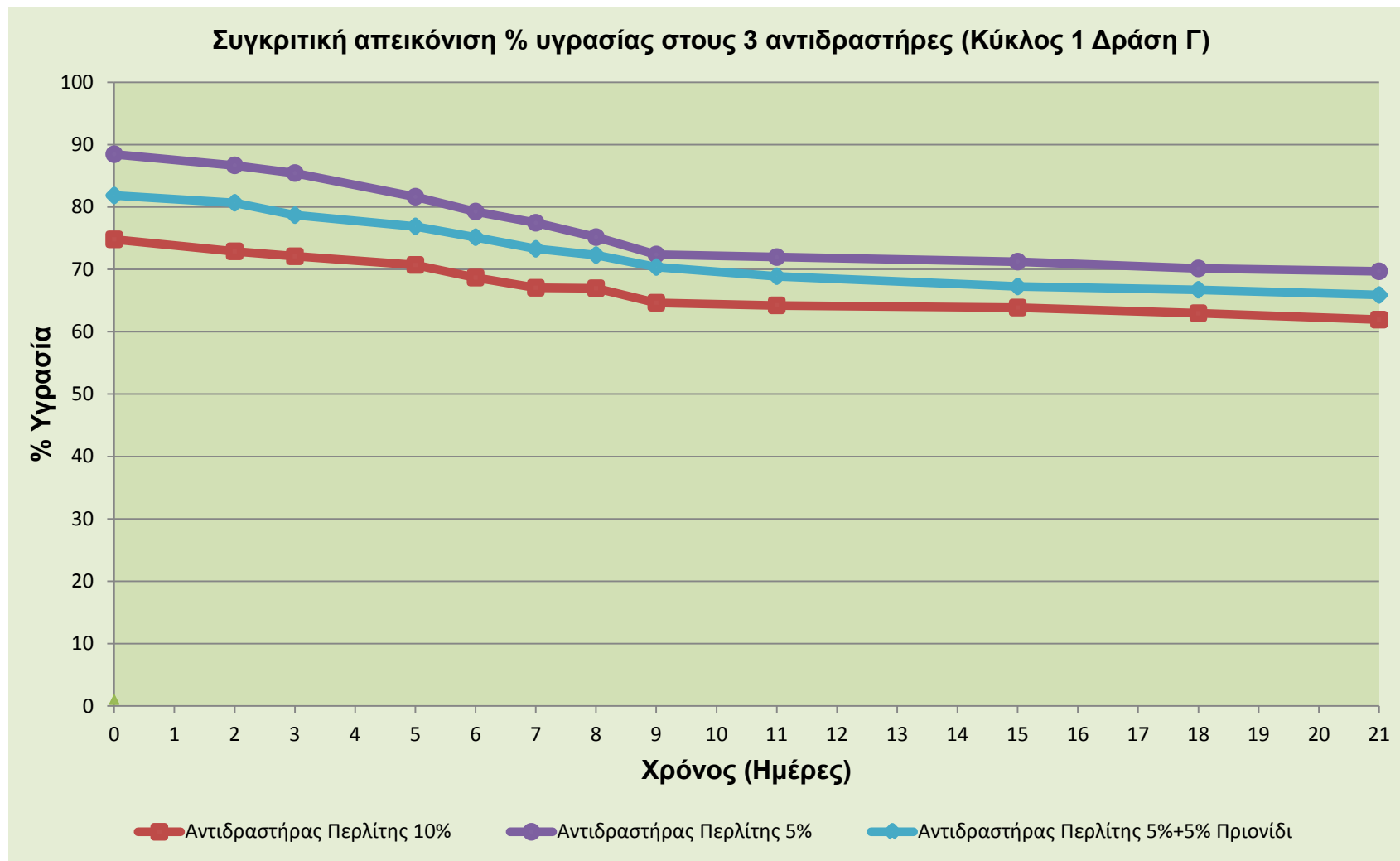
Οι καμπύλες της υγρασίας, στο διάγραμμα 5.78, και στους τρεις αντιδραστήρες, ξεκινούν από υψηλά αρχικά επίπεδα κοντά στο 75 – 90%, γεγονός αναμενόμενο λόγω της υψηλής υγρασίας του υλικού που χρησιμοποιήθηκε ως αρχικό υπόστρωμα. Συγκεκριμένα η αρχική υγρασία στους αντιδραστήρες ήταν αντιστοίχως 74,80%, 88,45%, 81,83%, με εμφανώς υψηλότερη τιμή να εμφανίζει το υπόστρωμα στο οποίο προστέθηκε περλίτης σε ποσοστό 5%κ.β. Στη συνέχεια λόγω της έναρξης των βιολογικών διεργασιών εκλύεται θερμότητα με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες που οδηγούν στη σταδιακή μείωση της περιεχόμενης υγρασίας. Το ποσοστό της υγρασίας στο υπόστρωμα ακολουθεί φθίνουσα πορεία κατά την διάρκεια της κομποστοποίησης και στο τέλος της διεργασίας στον αντιδραστήρα, τα προϊόντα λαμβάνουν ποσοστά 61,93%, 69,68%, και 65,88%. Ο αντιδραστήρας με πρόσθετο περλίτη 10%κ.β. εμφανίζει χαμηλότερο ποσοστό από τους υπόλοιπους, γεγονός που επαληθεύεται και από τις υψηλότερες θερμοκρασίες που αναπτύσσει στη θερμόφιλη φάση. Αντιθέτως τα ποσοστά υγρασίας στο τελικό προϊόν για τους δύο άλλους αντιδραστήρες κειμένονται σε υψηλές τιμές.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές της υγρασίας (%) για όλους τους αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου.

Πίνακας 5.89 Τιμές υγρασίας (%). για τους τρεις αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου

Ημερα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3
0	74,80	88,45	81,83
2	72,88	86,67	80,67
3	72,09	85,43	78,68
5	70,70	81,64	76,89
6	68,67	79,26	75,14
7	67,04	77,46	73,28
8	66,96	75,16	72,27
9	64,64	72,37	70,36
11	64,22	71,96	68,89
15	63,87	71,23	67,24
18	62,96	70,14	66,72
21	61,93	69,68	65,88

Στο διάγραμμα 5.78 παρουσιάζεται η εξέλιξη της % τιμής της υγρασίας για τους αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου της Δράσης Γ.



Διάγραμμα 5.78 Συγκριτική απεικόνιση % υγρασίας στους 3 αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου Δράσης Γ

Προσδιορισμός του pH του υποστρώματος (Κύκλος 1 Δράση Γ)

Στον αντιδραστήρα όπου προστέθηκε περλίτης 10%κ.β., το pH έχει αρχική τιμή 5,56. Η τιμή αυτή μειώνεται μέχρι και την 5^η μέρα φτάνοντας στο 5,15. Μετά αυξάνεται ραγδαία μέχρι και την 9^η μέρα ενώ μετά με μικρές αυξομειώσεις σταθεροποιείται την 21^η μέρα κοντά στο 8,64.

Κατά τα αρχικά στάδια λειτουργίας του κομποστοποιητή με πρόσθετο περλίτη 5%, παρατηρείται ότι το pH του μίγματος με αρχική τιμή 4,90 παρουσιάζει μια μικρή αύξηση και έπειτα μείωση μέχρι και την 5^η μέρα με χαμηλότερη τιμή την 4,85. Στην συνέχεια αυξάνεται γρήγορα έως και την 9^η μέρα όπου φαίνεται να σταθεροποιείται με μικρές αυξομειώσεις μέχρι την 21^η μέρα κοντά στο 9,14.

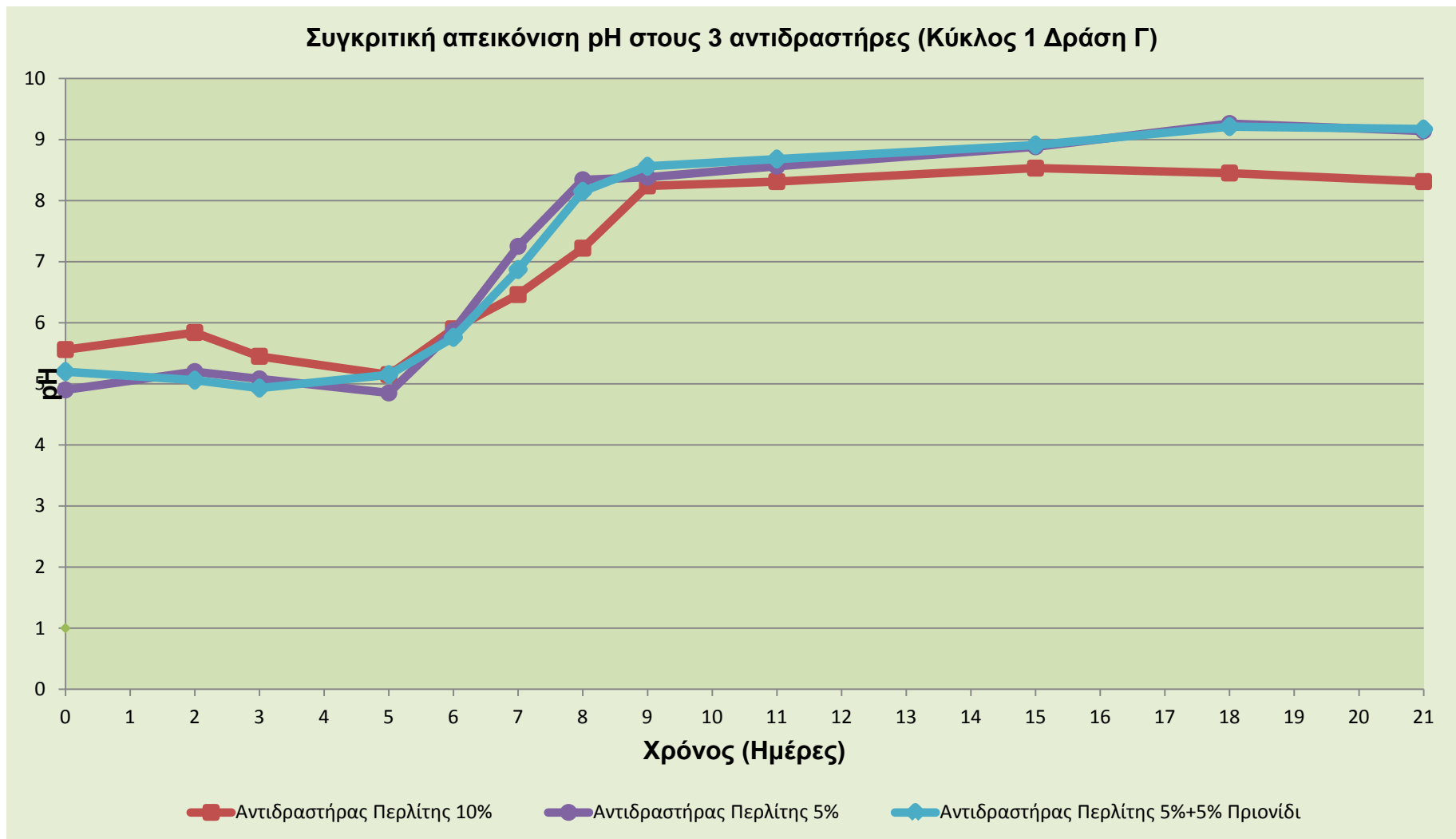
Το pH του αντιδραστήρα με πρόσθετα περλίτη 5%κ.β. και πριονίδι 5%κ.β. έχει αρχική τιμή 5,2 και παρουσιάζει ελαφρώς καθοδική πορεία τις τέσσερις πρώτες μέρες, με χαμηλότερη τιμή την 3^η μέρα στο 4,93. Στην συνέχεια πραγματοποίησε απότομη άνοδο φτάνοντας κοντά στο 8,5 για να συνεχίσει την σταδιακή ανοδική του πορεία φτάνοντας τιμή κοντά στο 9,22 την 21^η μέρα.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές του pH για όλους τους αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου της Δράσης Γ.

Πίνακας 5.90 Τιμές pH για τους τρεις αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου Δράσης Γ

Ημερα	Αντιδραστηρας 1	Αντιδραστηρας 2	Αντιδραστηρας 3
0	5,56	4,90	5,2
2	5,84	5,20	5,06
3	5,45	5,08	4,93
5	5,15	4,85	5,15
6	5,90	5,87	5,76
7	6,46	7,25	6,87
8	7,22	8,34	8,15
9	8,24	8,38	8,56
11	8,31	8,56	8,68
15	8,53	8,88	8,91
18	8,45	9,26	9,21
21	8,31	9,14	9,17

Στο διάγραμμα 5.79 παρουσιάζεται η πορεία της τιμής του pH για τους αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου.



Διάγραμμα 5.79 Συγκριτική απεικόνιση pH στους 3 αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου Δράσης Γ

Προσδιορισμός της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του υποστρώματος (Κύκλος 1 Δράση Γ)

Στο διάγραμμα 5.80 παρουσιάζεται η εξέλιξη της τιμής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για τους αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου της Δράσης Γ.

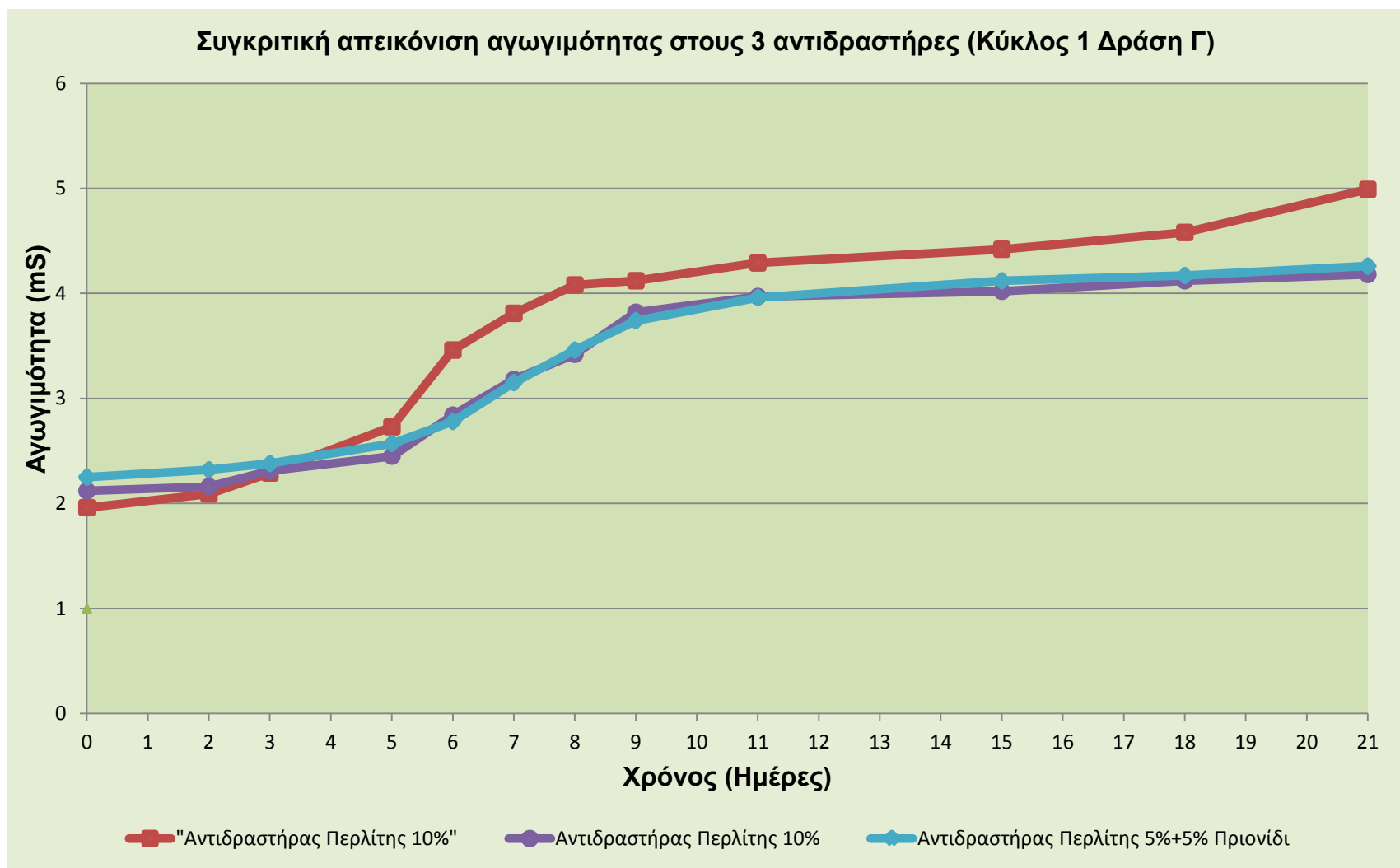
Οι καμπύλες της αγωγιμότητας στους αντιδραστήρες παρουσιάζουν αύξουσα πορεία. Ξεκινούν από χαμηλές αρχικές τιμές 1,96, 2,12, 1,86 και 2,25 *mS/cm* για τους αντιδραστήρες με περλίτη 10%, 5% και 5% περλίτη + 5% πριονίδι κ.β. αντίστοιχα, και, αφού σταθεροποιηθούν μετά την 21^η ημέρα, καταλήγουν στις τιμές 4,99, 4,18, 4,26 και *mS/cm* αντίστοιχα.

Στο παρατηρείται σταδιακή αύξηση της αγωγιμότητας καθόλη τη διάρκεια της διεργασίας της κομποστοποίησης η οποία αποδίδεται στην εκτεταμένη αποσύνθεση της οργανικής ύλης, που με την σειρά της έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της περιεκτικότητας του υποστρώματος σε άλατα. Το εύρος των τιμών της αγωγιμότητας των προϊόντων των αντιδραστήρων κυμαίνεται από 4,25 έως 4,99 *mS/cm*.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για όλους τους αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου.

Πίνακας 5.91 Τιμές αγωγιμότητας για τους τρεις αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου Δράσης Γ (*mS/cm*)

Ημερα	Αντιδραστηρας 1	Αντιδραστηρας 2	Αντιδραστηρας 3
0	1,96	2,12	2,25
2	2,09	2,16	2,32
3	2,29	2,31	2,38
5	2,73	2,45	2,57
6	3,46	2,84	2,78
7	3,81	3,18	3,15
8	4,08	3,42	3,46
9	4,12	3,82	3,74
11	4,29	3,97	3,96
15	4,42	4,02	4,12
18	4,58	4,12	4,17
21	4,99	4,18	4,26



Διάγραμμα 5.80 Συγκριτική απεικόνιση ηλεκτρικής αγωγιμότητας στους 3 αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου Δράσης Γ

Προσδιορισμός των πτητικών στερεών (VS) στο υπόστρωμα (Κύκλος 1 Δράση Γ)

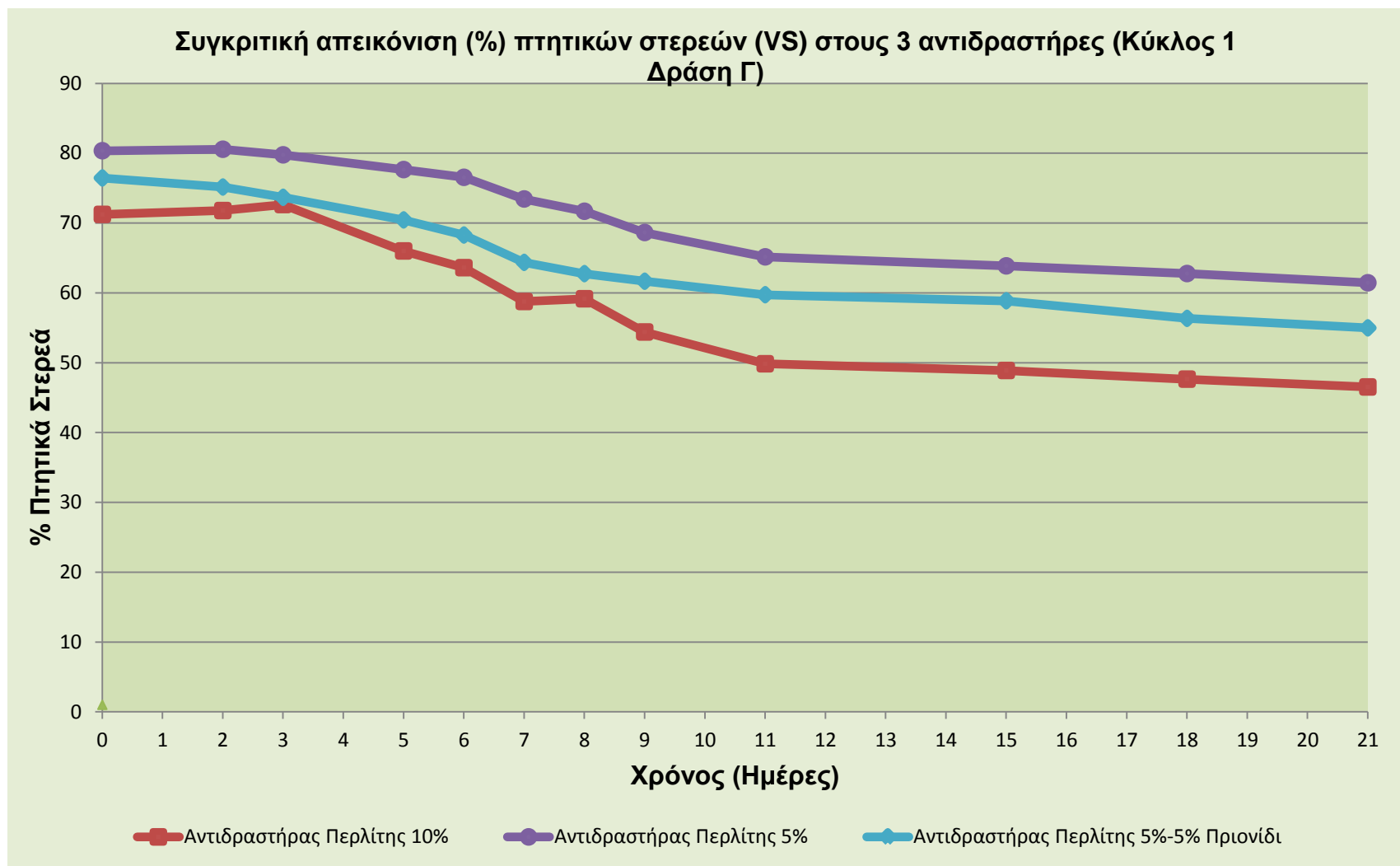
Στο διάγραμμα 5.81 παρουσιάζεται η φθίνουσα πορεία των πτητικών στερεών κατά τη διάρκεια του πρώτου πειραματικού κύκλου της Δράσης Γ. Η μεγαλύτερη μείωση των πτητικών στερεών παρατηρείται την 3^η έως την 10^η ημέρα, περίοδο κατά την οποία εμφανίζονται και οι υψηλότερες θερμοκρασίες (θερμόφιλη φάση) και πραγματοποιείται το μεγαλύτερο ποσοστό αποδόμησης της οργανικής ύλης, για τους συγκεκριμένους αντιδραστήρες. Τη μεγαλύτερη μείωση στο ποσοστό των πτητικών στερεών παρουσιάζει ο αντιδραστήρας στον οποίο έγινε προσθήκη περλίτη 10%κ.β. , ενώ αντίθετα ο αντιδραστήρας με περλίτη 5% παρουσιάζει πολύ μικρότερη πτώση του ποσοστού των πτητικών, μία ακόμα ένδειξη της ελλειπούς αποδόμησης της οργανικής ύλης, ως αποτέλεσμα της μη ορθής διεξαγωγής της διεργασίας στο συγκεκριμένο αντιδραστήρα.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές των πτητικών στερεών για όλους τους αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου.

Πίνακας 5.92 Τιμές (%) πτητικών στερεών για τους τρεις αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου Δράσης Γ

Ημερα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3
0	71,23	80,35	76,45
2	71,78	80,56	75,15
3	72,64	79,76	73,68
5	66,00	77,65	70,44
6	63,60	76,54	68,28
7	58,76	73,44	64,36
8	59,15	71,68	62,75
9	54,39	68,64	61,66
11	49,84	65,15	59,73
15	48,88	63,86	58,86
18	47,64	62,76	56,34
21	46,52	61,44	54,98

Στο διάγραμμα 5.81 παρουσιάζεται η πορεία του % ποσοστού των πτητικών στερεών για τους αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου.



Διάγραμμα 5.81 Συγκριτική απεικόνιση πτητικών στερεών (%) στους 3 αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου Δράσης Γ

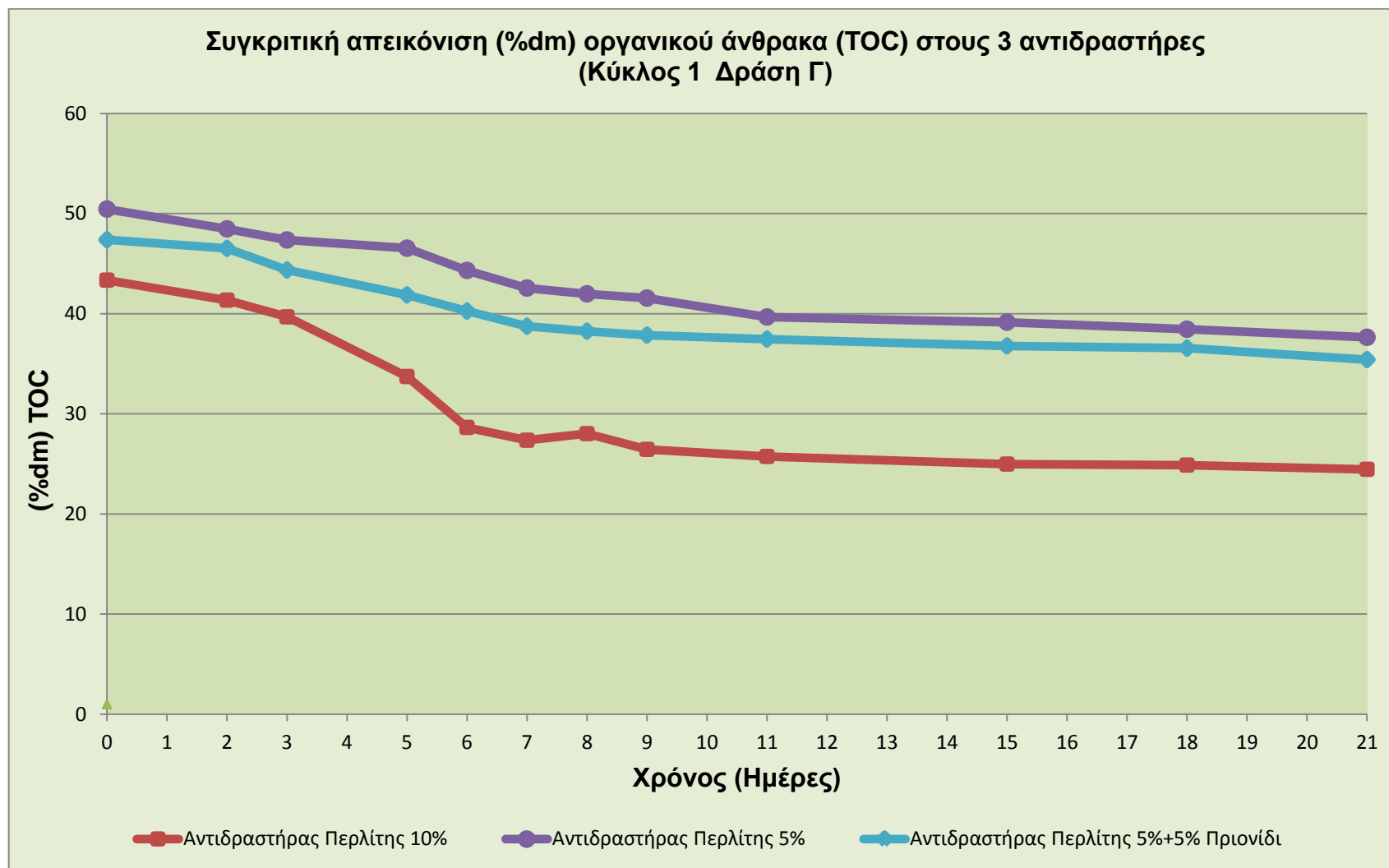
Προσδιορισμός του οργανικού άνθρακα TOC στο υπόστρωμα (Κύκλος 1 Δράση Γ)

Το ποσοστό του ολικού οργανικού άνθρακα για τον αντιδραστήρα που έγινε προσθήκη περλίτη 10% ξεκινάει από 43,35% και φθίνει με πολύ γρήγορο ρυθμό λόγω της βιοαποδόμησης της οργανικής ύλης. Τελικά μετά την 21^η ημέρα από την έναρξη του κύκλου η περιεκτικότητα του υποστρώματος σε οργανικό άνθρακα σταθεροποιείται στο κοντά στο 25% (2,46%) παρουσιάζοντας μια αρκετά μεγάλη συνολική μείωση. Ο αντιδραστήρας με πρόσθετο περλίτη 5% ξεκινά από την τιμή 50,45% και με αργή φθίνουσα πορεία φθάνει την 21^η μέρα στο 37,64% γεγονός που σημαίνει ότι το τελικό προϊόν διατηρεί μεγάλη ποσότητα άνθρακα και δεν αποδομήθηκε επαρκώς η οργανική ύλη. Σχετικά με τον αντιδραστήρα όπου έγινε προσθήκη περλίτη 5% και πριονιδίου 5% ο ολικός άνθρακας ξεκινάει από 47,38% και φθίνει με πολύ αργό ρυθμό λόγω της περιορισμένης βιοαποδόμησης. Τελικά σταθεροποιείται στο 35,42% την 21^η ημέρα. Η συνολική μείωση του ποσοστού του οργανικού άνθρακα στο υπόστρωμα είναι επίσης πολύ μικρή, όπως και στον Αντιδραστήρα 2. Πρέπει να σημειωθεί ότι η μείωση του ποσοστού του συνολικού οργανικού άνθρακα στην περίπτωση όπου πραγματοποιήθηκε προσθήκη περλίτη 10% ήταν σαφέστατα μεγαλύτερη απ' ό,τι στους υπόλοιπους αντιδραστήρες. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι η χρήση μεγαλύτερης ποσότητας περλίτη ως προσθέτου επιταχύνει την βιοαποδόμηση της οργανικής ύλης βελτιώνοντας τις συνθήκες αερισμού και υγρασίας του υποστρώματος κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές του ολικού οργανικού άνθρακα (%) για όλους τους αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου.

Πίνακας 5.93 Τιμές ολικού οργανικού άνθρακα (%dm) για τους τρεις αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου Δράσης Γ

Ημερα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3
1	43,35	50,45	47,38
2	41,35	48,47	46,52
3	39,68	47,36	44,36
5	33,72	46,54	41,87
6	28,64	44,32	40,26
7	27,36	42,56	38,74
8	28,02	41,98	38,25
9	26,45	41,56	37,86
11	25,74	39,67	37,46
15	24,98	39,15	36,78
18	24,88	38,45	36,56
21	24,46	37,64	35,42

Στο διάγραμμα 5.82 διακρίνονται οι τιμές του οργανικού άνθρακα για τους αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης.



Διάγραμμα 5.82 Συγκριτική απεικόνιση (%dm) οργανικού άνθρακα (TOC) στους 3 αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου Δράσης Γ

Προσδιορισμός του ολικού αζώτου κατά Kjeldahl στο υπόστρωμα (Κύκλος 1 Δράση)

Παρατηρείται η αύξουσα πορεία του αζώτου σε ποσοστό επί ξηρής μάζας, κυρίως κατά τη θερμόφιλη και τη δεύτερη μεσόφιλη φάση, καθώς υπάρχει ταυτόχρονη μεγαλύτερη μείωση του ποσοστού του άνθρακα επί της ίδιας ξηρής μάζας, ενώ ταυτόχρονα πραγματοποιείται ανάκτηση μέρους των απωλειών του αζώτου ενδεχομένως από τη δράση αζωτοδεσμευτικών βακτηρίων τα οποία επικρατούν σε μεσόφιλες θερμοκρασίες και σε χαμηλές συγκεντρώσεις αμμωνιακών (*Insam and de Bertoldi, 2007*). Ο αντιδραστήρας στον οποίο έγινε προσθήκη περλίτη 10% κ.β. ξεκινά με ποσοστό αζώτου στο 1,65% διατηρώντας αύξουσα πορεία για να καταλήξει την 21^η ημέρα στο 2,14%. Ο αντιδραστήρας προσθήκης περλίτη 5% κ.β. ξεκινά με ποσοστό αζώτου στο 1,85% διατηρώντας αύξουσα πορεία για να καταλήξει την 21^η ημέρα στο 2,12%. Ο αντιδραστήρας στον οποίο προστέθηκε περλίτης 5% και πριονίδι 5% κ.β. ξεκινά με ποσοστό αζώτου στο 1,59% και ακολουθώντας αύξουσα πορεία καταλήγει στο 1,98% την 21^η μέρα.

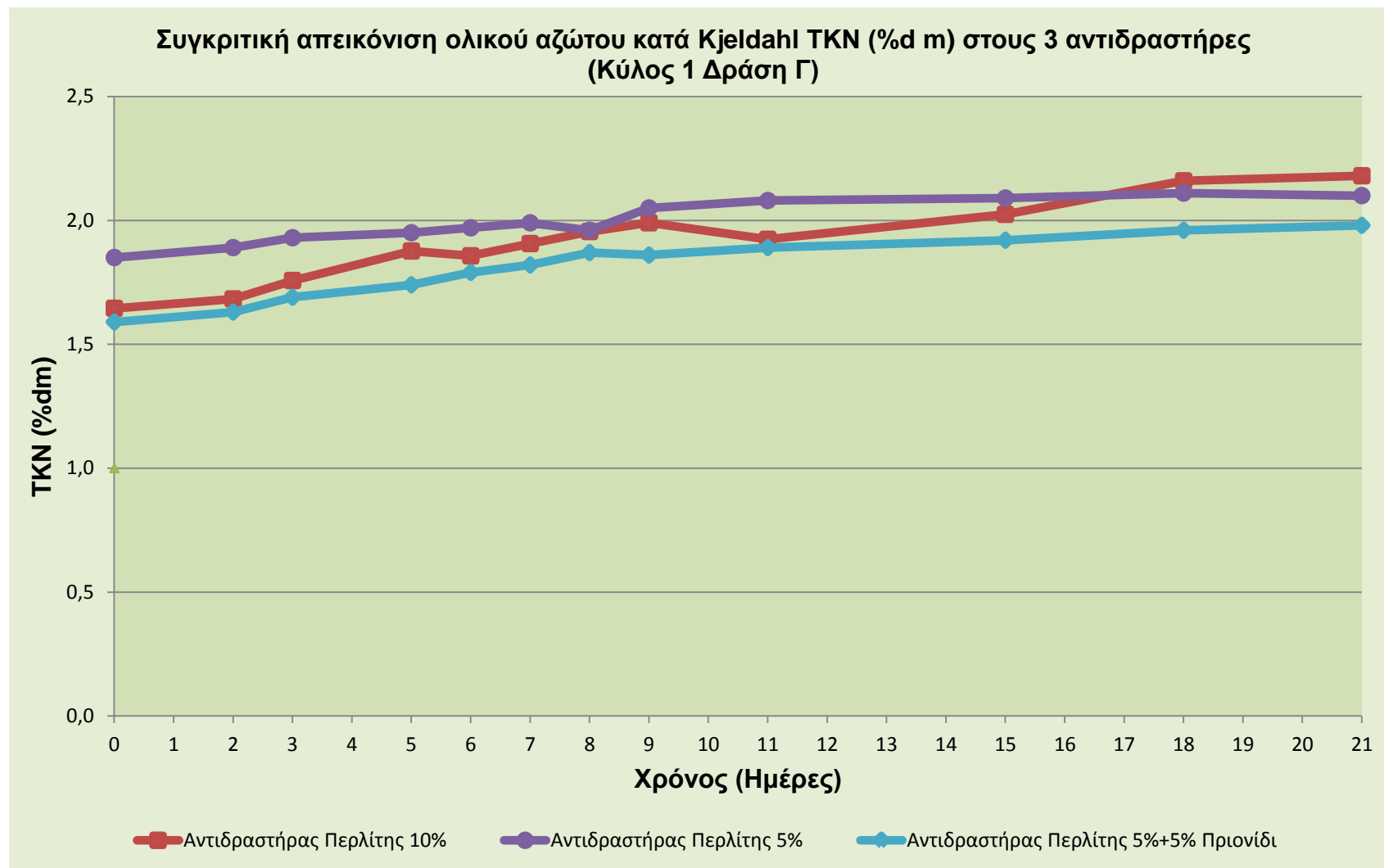
Παρατηρείται ότι η μεγαλύτερη αύξηση στο ποσοστό του αζώτου σημειώνεται στον αντιδραστήρα που πραγματοποιήθηκε προσθήκη περλίτη 10% κ.β., γεγονός αναμενόμενο καθώς ο συγκεκριμένος αντιδραστήρας παρουσίασε πολύ μεγαλύτερη αποδόμηση της οργανικής ύλης, σε σχέση με τους δύο άλλους.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές του TKN (%) για όλους τους αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου.

Πίνακας 5.94 Τιμές (%dm) TKN για τους τρεις αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου

Ημερα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3
0	1,65	1,85	1,59
2	1,68	1,89	1,63
3	1,76	1,93	1,69
5	1,88	1,95	1,74
6	1,86	1,97	1,79
7	1,91	1,99	1,82
8	1,95	1,96	1,87
9	1,99	2,05	1,86
11	1,92	2,08	1,89
15	2,02	2,09	1,92
18	2,16	2,11	1,96
21	2,18	2,10	1,98

Στο διάγραμμα 5.83 παρουσιάζεται η εξέλιξη του % ποσοστού του ολικού αζώτου κατά Kjeldahl για τους αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου



Προσδιορισμός του λόγου C/N στο υπόστρωμα (Κύκλος 1 Δράση Γ)

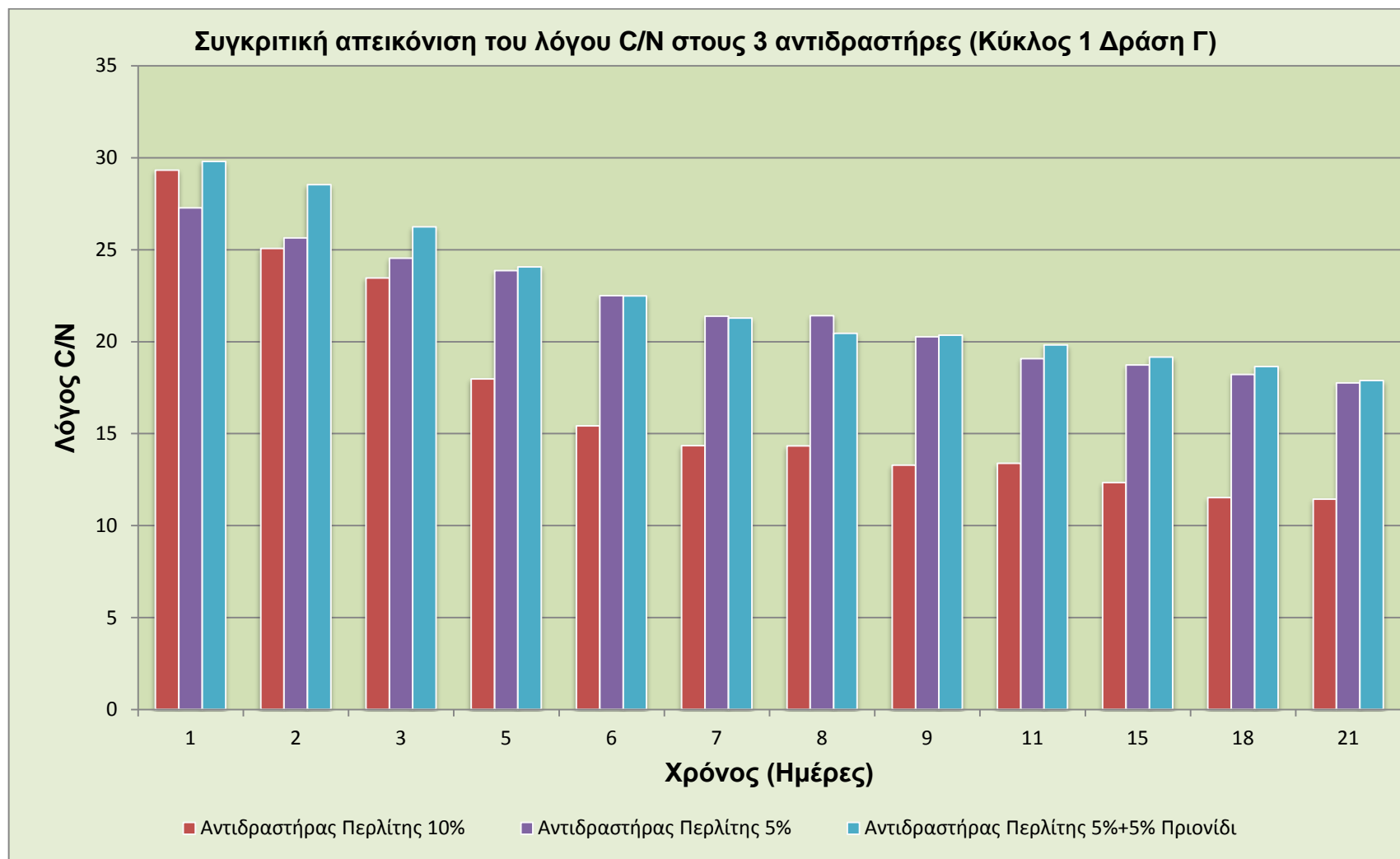
Στο διάγραμμα 5.84 παρουσιάζεται η εξέλιξη του λόγου C/N για όλους τους αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου της Δράσης Γ. Ο αντιδραστήρας με πρόσθετο στο υπόστρωμα περλίτη 10% κ.β. ξεκινά με λόγο 29,32 και μειώνεται μέχρι την τιμή 11,44. Αυτός αποτελεί ένα πολύ καλό λόγο για το προϊόν που εξάγεται από τον αντιδραστήρα, ένδειξη της ορθής διεξαγωγής της διεργασίας. Αντιθέτως στους επόμενους δύο αντιδραστήρες, με προσθήκη περλίτη 5%κ.β. και περλίτι 5% + πριονίδι 5% κ.β., λόγος C/N ξεκινάει από επιθυμητή τιμή κοντά στο 30 (27,27 και 29,8 αντίστοιχα), αλλά καθυστερεί πολύ να μειωθεί κάτω από επιθυμητά επίπεδα και καταλήγει την 21^η ημέρα στο 17,75 και 17,89 αντίστοιχα.

Παρατηρείται ότι ο αντιδραστήρας όπου είχε προστεθεί φυσικό ορυκτό περλίτη σε ποσοστό 10% κ.β. εμφάνισε αισθητά χαμηλότερες τιμές C/N μετά το πέρας της διεργασίας, γεγονός που οφείλεται στην μεγαλύτερη μείωση συνολικού οργανικού άνθρακα καθόλη τη διάρκεια της διεργασίας, και αποτελεί ένδειξη της ορθότερης διεξαγωγής αυτής.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές της αναλογίας C/N για όλους τους αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου.

Πίνακας 5.95 Τιμές C/N για τους τρεις αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου δράσης Γ

Ημερα	Αντιδραστηρας 1	Αντιδραστηρας 2	Αντιδραστηρας 3
1	29,32	27,27	29,80
2	25,07	25,65	28,54
3	23,47	24,54	26,25
5	17,97	23,87	24,06
6	15,42	22,50	22,49
7	14,35	21,39	21,29
8	14,33	21,42	20,45
9	13,29	20,27	20,35
11	13,38	19,07	19,82
15	12,34	18,73	19,16
18	11,52	18,22	18,65
21	11,44	17,75	17,89



Διάγραμμα 5.84 Συγκριτική απεικόνιση του λόγου C/N στους 4 αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου Δράσης Γ

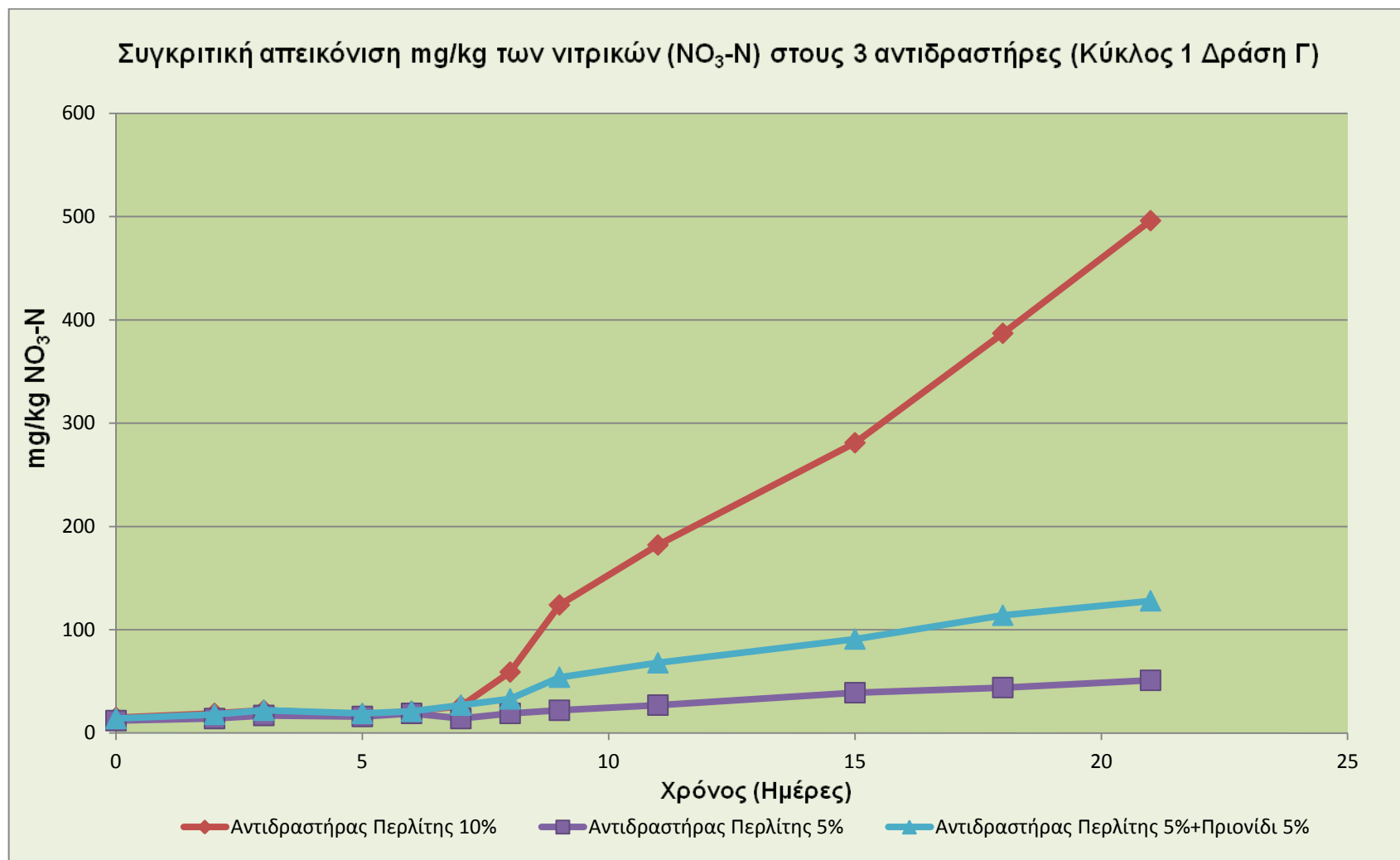
Προσδιορισμός νιτρικών ($NO_3^- - N$) και αμμωνιακών ($NH_4^+ - N$) στο υπόστρωμα (Κύκλος 1 Δράση Γ)

Ακολουθεί συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων των νιτρικών ($NO_3^- - N$) του υποστρώματος και για τους τρεις αντιδραστήρες που χρησιμοποιήθηκαν στον πρώτο πειραματικό κύκλο της Δράσης Γ. Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρατηρείται ξεκάθαρα πως με το πέρας της θερμοφίλης φάσης, ξεκινά η αποδόμηση των αμμωνιακών στον αντιδραστήρα που προστέθηκε 10% κ.β. περλίτης, και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ομαλή αύξηση των νιτρικών. Φυσικά δε συμβαίνει το ίδιο στους άλλους δύο αντιδραστήρες. Σε αυτούς η καμπύλη των νιτρικών ακολουθεί τη σωστή τάση, με βάση τα δεδομένα της διεργασίας, αλλά οι συγκεντρώσεις των νιτρικών παραμένουν σε πολύ χαμηλά επίπεδα και μετά το πέρας της θερμοφίλης φάσης, ενδεικτικό της μη ορθής διεξαγωγής της διεργασίας.

Στον πίνακα 5.96 παρατίθενται οι τιμές των νιτρικών για τους τέσσερις αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου.

Πίνακας 5.96 Τιμές $NO_3^- - N$ σε mg/kg για τους τρεις αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου της Δράσης Γ

Ημερα	Αντιδραστηρας 1	Αντιδραστηρας 2	Αντιδραστηρας 3
0	15	12	14
2	19	14	18
3	22	17	22
5	18	16	19
6	21	19	21
7	26	14	27
8	59	19	33
9	124	22	54
11	182	27	68
15	281	39	91
18	387	44	114
21	496	51	128



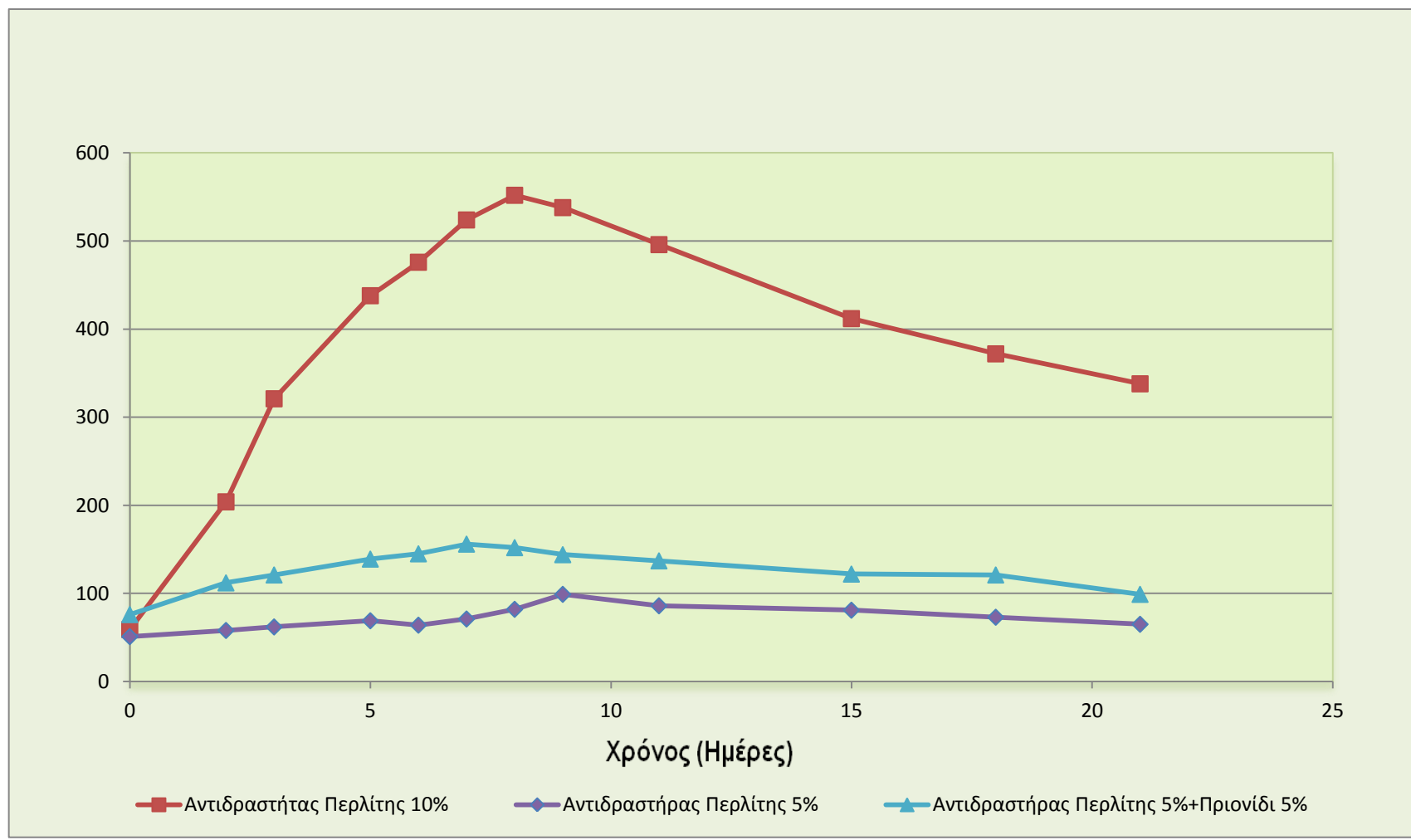
Διάγραμμα 5.85 Συγκριτική απεικόνιση των νιτρικών $\text{NO}_3^- - \text{N}$ στους 3 αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου Δράσης Γ

Κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης και ειδικότερα κατά τη θερμοφιλή φάση σχηματίζονται αμμωνιακά ιόντα. Η δημιουργία τους εξαρτάται κατά κύριο λόγο απ' το αρχικό υπόστρωμα και συγκεκριμένα απ' το διαθέσιμο άζωτο των αρχικών υλικών. Ωστόσο μόνο στον αντιδραστήρα που προστέθηκε περλίτης 10% κ.β. παρατηρείται η αναμενόμενη αύξηση των αμμωνιακών κατά τη θερμοφιλή φάση, που προκύπτει από τη διάσπαση της οργανικής ύλης, καθώς στους άλλους δύο αντιδραστήρες η αντίστοιχη αύξηση παρατηρείται μεν, αλλά σε τόσο μικρό βαθμό που εύκολα εξάγεται το συμπέρασμα η οργανική ύλη δεν αποδομήθηκε στο βαθμό που χρειάζεται για να διεξαχθεί σωστά η διεργασία.

Στον πίνακα 5.97 παρατίθενται οι τιμές των αμμωνιακών για τους τρεις αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου της Δράσης Γ.

Πίνακας 5.97 Τιμές $NH_4^+ - N$ σε mg/kg για τους τρεις αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου της Δράσης Γ

Ημερα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3
0	59	51	76
2	204	58	112
3	321	62	121
5	438	69	139
6	476	64	145
7	524	71	156
8	552	82	152
9	538	99	144
11	496	86	137
15	412	81	122
18	372	73	121
21	338	65	99



Διάγραμμα 5.86 Συγκριτική απεικόνιση των αμμωνιακών $NH_4^+ - N$ στους 3 αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου της Δράσης Γ

5.2.2.3.2 Δεύτερος πειραματικός Κύκλος Δράσης Γ

Στο δεύτερο πειραματικό κύκλο της Δράσης Γ στόχος είναι να αξιοποιηθούν τα αποτελέσματα του πρώτου και με βάσει αυτά να μελετηθεί η περεταίρω βελτίωση της διεργασίας της κομποστοποίησης με την προσθήκη ορυκτών, που αποδεδειγμένα, πλέον, βελτιώνουν τις ιδιότητες του υποστρώματος. Ως εκ τούτου, με βάση το συμπέρασμα του πρώτου κύκλου, όπου διαπιστώθηκε πως η διεργασία εξελίσσεται εμφανώς αρτιότερα με την προσθήκη στο υπόστρωμα περλίτη σε ποσοστό 10% κ.β., καθώς και με την αποδεδειγμένη, από προηγούμενους κύκλους, συνεισφορά του ζεόλιθου και του βερμικουλίτη στη βελτίωση των ιδιοτήτων του υποστρώματος, σχεδιάστηκε ο δεύτερος κύκλος της Δράσης Γ, με στόχο να μελετηθεί την πορεία της διεργασίας της κομποστοποίησης, όταν πραγματοποιείται στο υπόστρωμα προσθήκη συνδυασμού ορυκτών (περλίτης+ζεόλιθος, περλίτης+βερμικουλίτης) σε ποσοστό 10% κ.β. το καθένα.

Πιο συγκεκριμένα στο δεύτερο κύκλο πειραμάτων της Δράσης Γ χρησιμοποιήθηκαν τρεις αντιδραστήρες. Στους αντιδραστήρες αυτούς διατηρήθηκε σταθερή και η αναλογία C/N του αρχικού υποστρώματος (κοντά στο 30) και το ποσοστό του περλίτη που εισήχθη ως πρόσθετο (10%), ενώ προστέθηκαν επιπλέον 10% ζεόλιθος στο δεύτερο και 10% βερμικουλίτης στον τρίτο αντιδραστήρα για να μελετηθεί η πιθανή καλύτερη λειτουργία της διεργασίας με συνδυασμό ορυκτών ως πρόσθετα. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως η διεργασία και στους δύο αντιδραστήρες βελτιώθηκε αισθητά και τα τελικά προϊόντα είχαν βελτιωμένες ιδιότητες.

Τροφοδοσία των αντιδραστήρων

Στον πίνακα 5.98 παρουσιάζονται τα υλικά που τροφοδότησαν κάθε ένα από τους τρεις αντιδραστήρες. Οι τιμές του πίνακα είναι σε γραμμάρια. Η τροφοδοσία έγινε με γνώμονα να διατηρηθεί η αρχική αναλογία C/N κοντά στο 30. Για να επιτευχθεί ο συγκεκριμένος λόγος χρησιμοποιήθηκε η αναλογία: 60% κυτταρινούχων συστατικών (μαρούλι, σπανάκι, πορτοκάλια και λεμόνια) - 20% πρωτεϊνούχων συστατικών (ρεβύθια και φασόλια βρασμένα) - 20% υδατανθρακούχων συστατικών (ψωμί).

Σε κάθε αντιδραστήρα έγινε προσθήκη περλίτη 10% ή και άλλου ορυκτού 10%.

- Στον πρώτο αντιδραστήρα προστέθηκε περλίτης ποσότητας ίσης με το 10% της συνολικής μάζας της αρχικής τροφοδοσίας.
- Στον δεύτερο αντιδραστήρα προστέθηκε περλίτης ποσότητας ίσης με το 10% της συνολικής μάζας της αρχικής τροφοδοσίας, αλλά και ζεόλιθος ποσότητας ίσης με το 10% της συνολικής μάζας της αρχικής τροφοδοσίας.
- Στον τρίτο αντιδραστήρα προστέθηκε περλίτης ποσότητας ίσης με το 10% της συνολικής μάζας της αρχικής τροφοδοσίας, αλλά και βερμικουλίτης ποσότητας ίσης με το 10% της συνολικής μάζας της αρχικής τροφοδοσίας.

Πίνακας 5.98 Τροφοδοσία σε (g) των αντιδραστήρων του δεύτερου κύκλου της Δράσης Γ

Αντιδραστήρας	Ημέρα	Κυτταρινούχα				Πρωτεΐνες		Υδατάνθρακες		Ορυκτό			Σύνολο	Τελικό Σύνολο
		Μαρούλι	Σπανάκι	Πορτοκάλι	Λεμόνι	Ρεβύθι	Φασόλι	Ψωμί	Πριονίδι	Ζεόλιθος	Βερμικουλίτης	Περλίτης		
1	1	2250	2250	1000	500	1000	1000	2000				1000	11000	13200
	2	225	225	100	50	100	100	200				100	1100	
	3	225	225	100	50	100	100	200				100	1100	
2	1	2250	2250	1000	500	1000	1000	2000		1000		1000	12000	14600
	2	225	225	100	50	100	100	200		150		150	1300	
	3	225	225	100	50	100	100	200		100		200	1300	
3	1	2250	2250	1000	500	1000	1000	2000			1000	1000	12000	14600
	2	225	225	100	50	100	100	200			150	150	1300	
	3	225	225	100	50	100	100	200			100	200	1300	

Δειγματοληψία – Απώλεια μάζας (Κύκλος 2 Δράση Γ)

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων του τρίτου κύκλου και συγκεκριμένα των εννέα πρώτων ημερών γινόταν καθημερινή δειγματοληψία από τους τρεις αντιδραστήρες. Ακολούθησαν άλλες τέσσερις δειγματοληψίες ανά τρεις ημέρες. Με τα δείγματα που ελήφθησαν έγινε η πλειοψηφία των πειραμάτων.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η μάζα του υλικού που αφαιρέθηκε σε κάθε αντιδραστήρα τις μέρες της δειγματοληψίας. Οι τιμές του πίνακα είναι σε γραμμάρια.

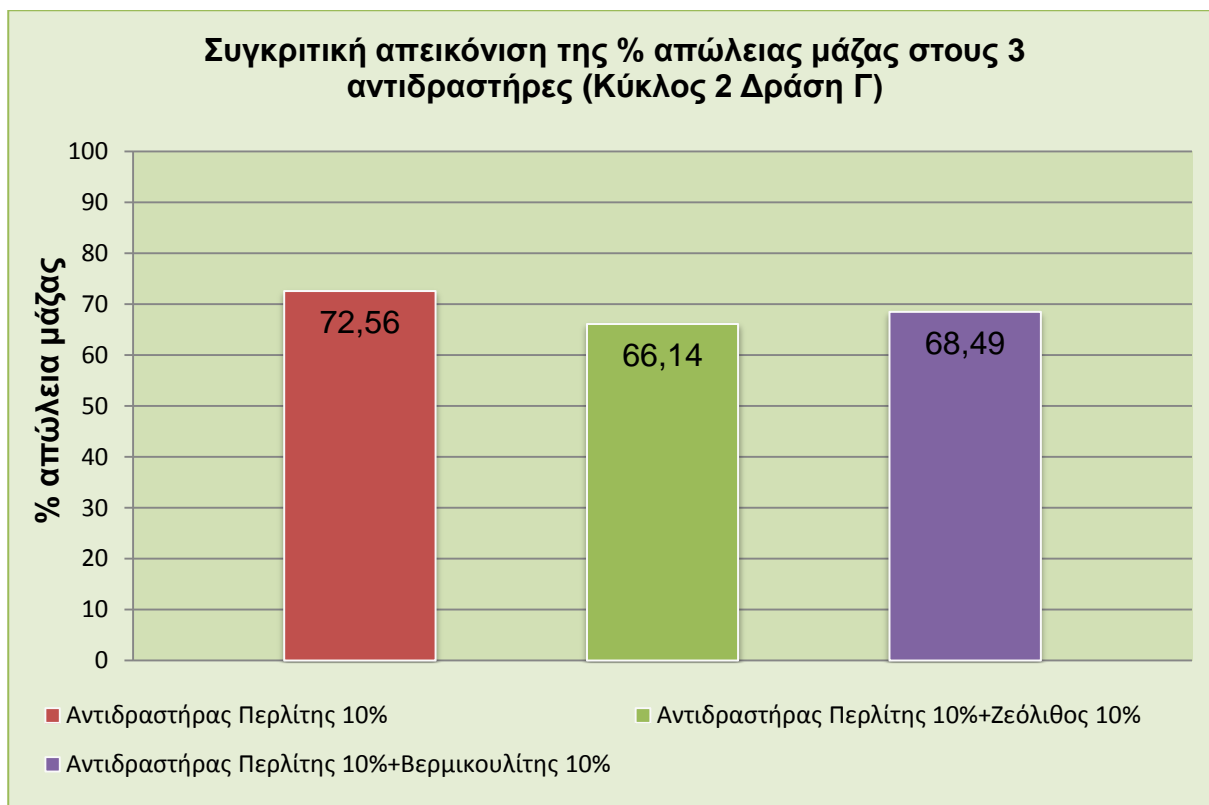
Πίνακας 5.99 Δειγματοληψία από τους αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου (g)

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3
1	102	114	122
2	147	124	114
3	177	132	132
5	138	118	124
6	167	136	142
7	148	154	137
8	112	142	162
9	113	136	15
11	106	157	122
15	104	144	127
18	108	116	116
21	106	127	134
ΣΥΝΟΛΟ	1533g	1607g	1590g

Οι ποσότητες που αφαιρέθηκαν από κάθε αντιδραστήρα σε συνδυασμό, με τις λοιπές απώλειες (π.χ. υγρασία), την αρχική τροφοδοσία, και την ζύγιση του τελικού προϊόντος δίνουν το επί τις εκατό ποσοστό απώλειας μάζας στον κάθε αντιδραστήρα. Αναλυτικότερα τα δεδομένα παρουσιάζονται στον πίνακα 5.100 και στο διάγραμμα 5.87.

Πίνακας 5.100 Ποσοστό % συνολικής μείωσης της μάζας σε κάθε αντιδραστήρα του πρώτου κύκλου

	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3
Αρχική Τροφοδοσία	13200g	14600g	14600
Σύνολο Δειγματοληψίας	1533g	1607g	1590g
Θεωρητικά στον αντιδραστήρα	11667g	12993g	13010g
Πραγματικά στον αντιδραστήρα	3201g	4400g	4100g
Ποσοστό μείωσης της μάζας	73,56%	66,14%	68,49%



Διάγραμμα 5.87 Συγκριτική απεικόνιση της % απώλειας μάζας στους 3 αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Γ

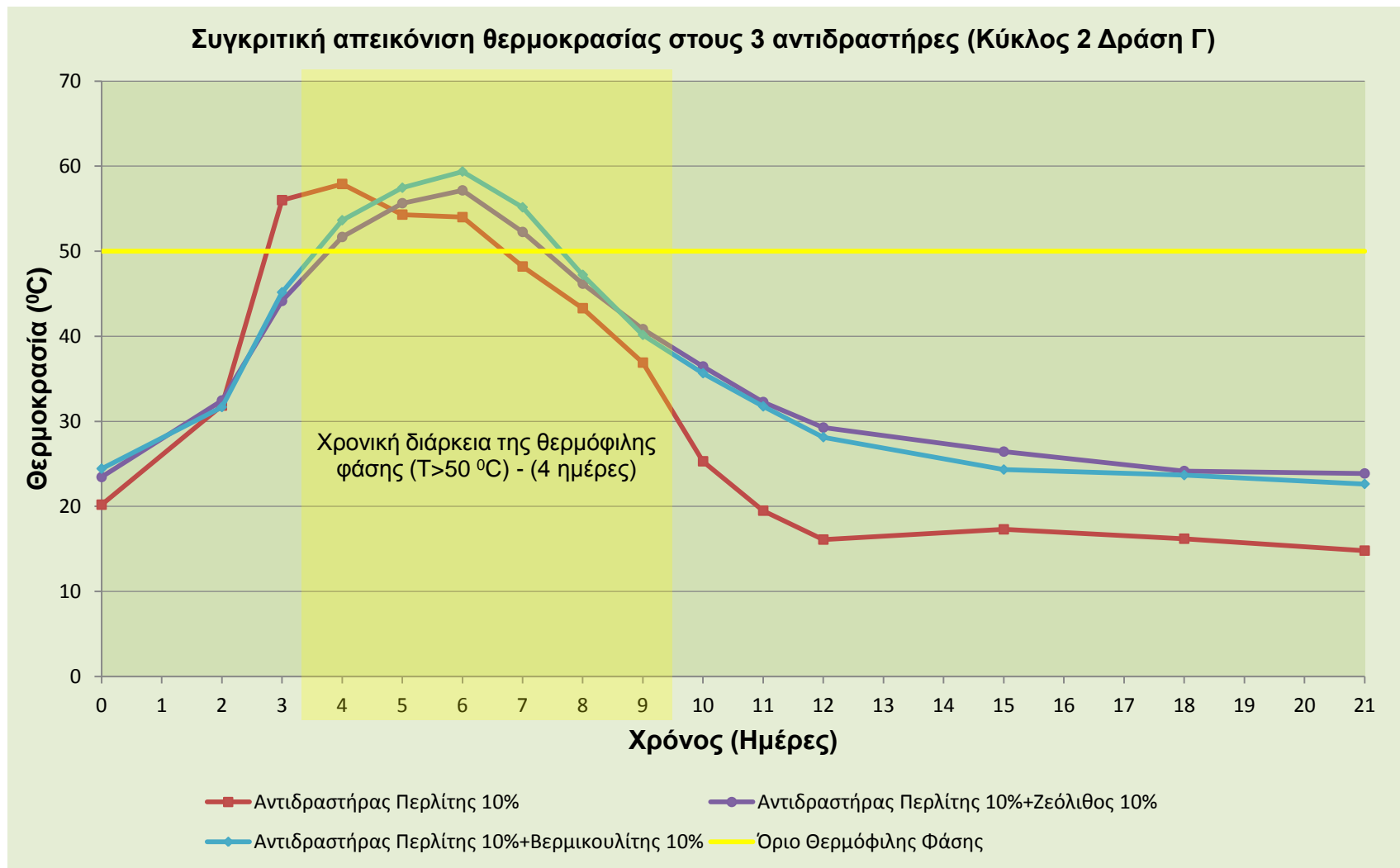
Προσδιορισμός της θερμοκρασίας του υποστρώματος (Κύκλος 2 Δράση Γ)

Στο διάγραμμα 5.88 παρουσιάζονται τα προφίλ της θερμοκρασίας για τους τρεις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου. Είναι εμφανές ότι και στους τρεις κύκλους αναπτύσσεται ένα τυπικό διάγραμμα της διεργασίας της κομποστοποίησης, που επιβεβαιώνεται από τη μετάβαση του υποστρώματος από μια αρχική μεσόφιλη φάση σε μια θερμόφιλη φάση και μετά την πάροδο ορισμένων ημερών, αφότου οι άμεσα διαθέσιμες οργανικές ενώσεις έχουν καταναλωθεί, το υπόστρωμα μεταβαίνει σε μια δεύτερη μεσόφιλη φάση. Σχετικά με τον αντιδραστήρα με προσθήκη περλίτη 10% επετεύχθη η θερμόφιλη φάση η οποία ξεκίνησε με το πέρας της 2^{ης} μέρας και κράτησε μέχρι και την 7^η μέρα. Η μέγιστη θερμοκρασία που σημειώθηκε ήταν 57,90 °C. Στην συνέχεια η διεργασία πέρασε στην δεύτερη μεσόφιλη φάση στην οποία η θερμοκρασία σταθεροποιήθηκε σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Πανομοιότυπη πορεία ακολούθησαν και οι δύο άλλοι αντιδραστήρες, όπου για τον αντιδραστήρα προσθήκης περλίτη 10%-ζεόλιθου 10%, η θερμόφιλη φάση ξεκίνησε από την 4^η κιόλας μέρα και κράτησε μέχρι και την 7^η. Η μέγιστη θερμοκρασία που σημειώθηκε ήταν 57,15 °C, ενώ για τον αντιδραστήρα προσθήκης περλίτη 10%- βερμικουλίτη 10%, η θερμόφιλη φάση ξεκίνησε από την 4^η μέρα και κράτησε μέχρι και την 8^η. Η μέγιστη θερμοκρασία που σημειώθηκε ήταν 59,37 °C.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές της θερμοκρασίας για όλους τους αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου.

Πίνακας 5.101 Τιμές θερμοκρασίας (°C) για τους τρεις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Γ

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3
0	20,20	23,45	24,44
2	31,85	32,45	31,68
3	56,00	44,15	45,17
4	57,90	51,67	53,64
5	54,30	55,64	57,46
6	54,00	57,15	59,37
7	48,20	52,26	55,16
8	43,30	46,18	47,22
9	36,90	40,84	40,16
10	25,30	36,45	35,66
11	19,50	32,27	31,76
12	16,10	29,27	28,14
15	17,30	26,44	24,33
18	16,20	24,16	23,68
21	14,80	23,87	22,64



Διάγραμμα 5.88 Συγκριτική απεικόνιση θερμοκρασίας στους 3 αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Γ

Προσδιορισμός της υγρασίας του υποστρώματος (Κύκλος 2 Δράσης Γ)

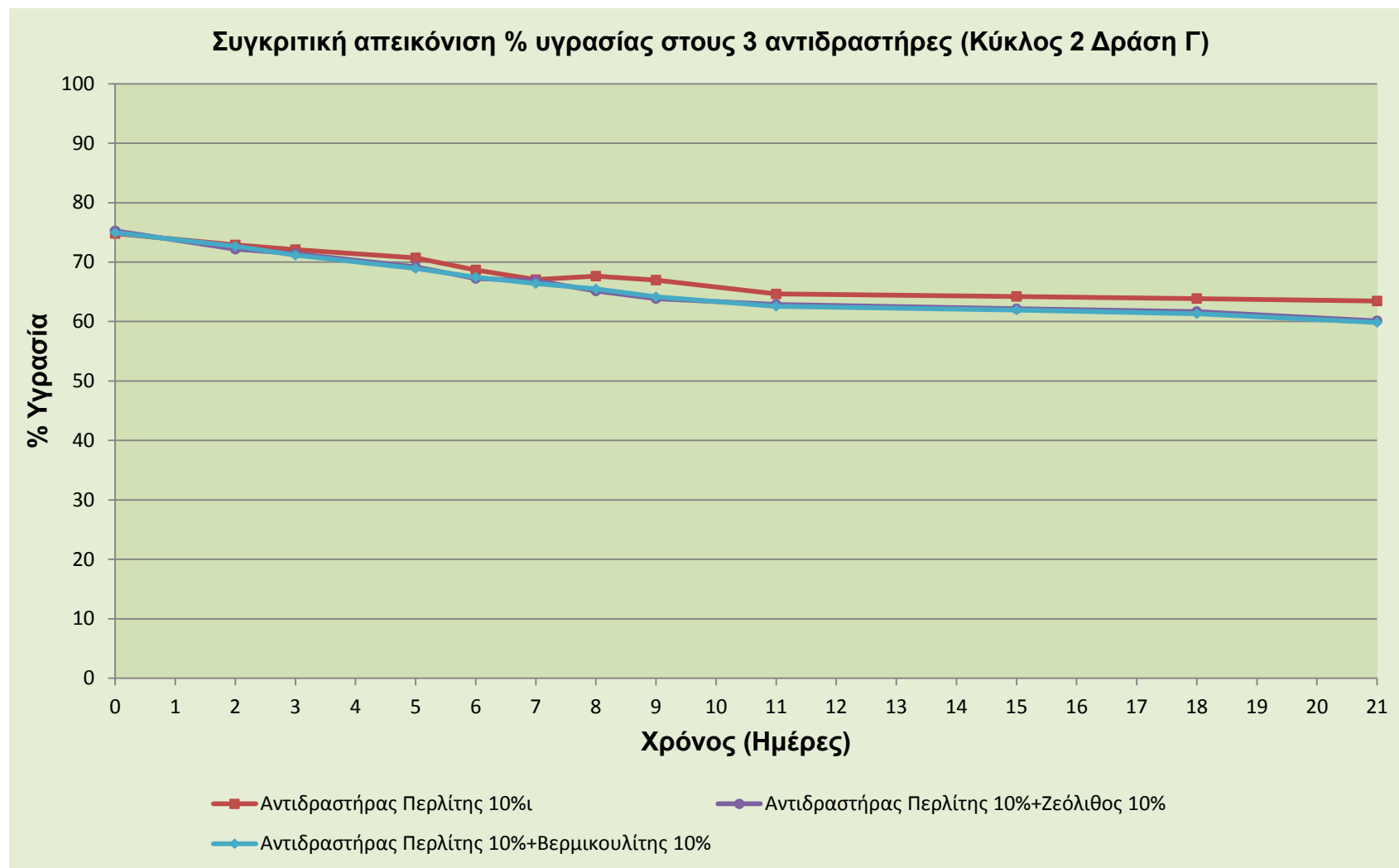
Οι καμπύλες της υγρασίας, στο διάγραμμα 6.3, και στους τρεις αντιδραστήρες ξεκινούν από υψηλά αρχικά επίπεδα κοντά στο 75%, γεγονός αναμενόμενο λόγω της υψηλής υγρασίας του υλικού που χρησιμοποιήθηκε ως αρχικό υπόστρωμα. Συγκεκριμένα η αρχική υγρασία στους αντιδραστήρες ήταν αντιστοίχως 74,80%, 75,24%, 74,96%. Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται κατά το θερμόφιλο στάδιο παρουσιάζονται σημαντικές απώλειες υγρασίας κυρίως από την εξάτμιση του νερού. Το ποσοστό της υγρασίας στο υπόστρωμα ακολουθεί φθίνουσα πορεία κατά την διάρκεια της κομποστοποίησης και στο τέλος της διεργασίας στο εσωτερικό του αντιδραστήρα τα προϊόντα λαμβάνουν ποσοστά 63,45%, 60,13 και 59,84%. Το προφίλ της υγρασίας για τους αντιδραστήρες όπου πραγματοποιήθηκε επιπλέον προσθήκη ορυκτών, πέραν του περλίτη, εξελίσσεται πανομοιότυπα και από ποσοστά της υγρασίας στο τελικό προϊόν είναι εμφανής η βελτίωση του ποσοστού της υγρασίας σε σχέση με τον πρώτο αντιδραστήρα.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές της υγρασίας (%) για όλους τους αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου.

Πίνακας 5.102 Τιμές υγρασίας (%) για τους τέσσερις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Γ

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3
0	74,80	75,24	74,96
2	72,88	72,16	72,67
3	72,09	71,44	71,15
5	70,70	69,18	68,92
6	68,67	67,24	67,45
7	67,04	66,88	66,37
8	67,63	65,14	65,48
9	66,96	63,86	64,15
11	64,64	62,88	62,56
15	64,22	62,14	61,94
18	63,87	61,67	61,31
21	63,45	60,13	59,84

Στο διάγραμμα 5.89 παρουσιάζεται η εξέλιξη του % ποσοστού της υγρασίας για τους αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου.



Διάγραμμα 5.89 Συγκριτική απεικόνιση % υγρασίας στους 3 αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Γ

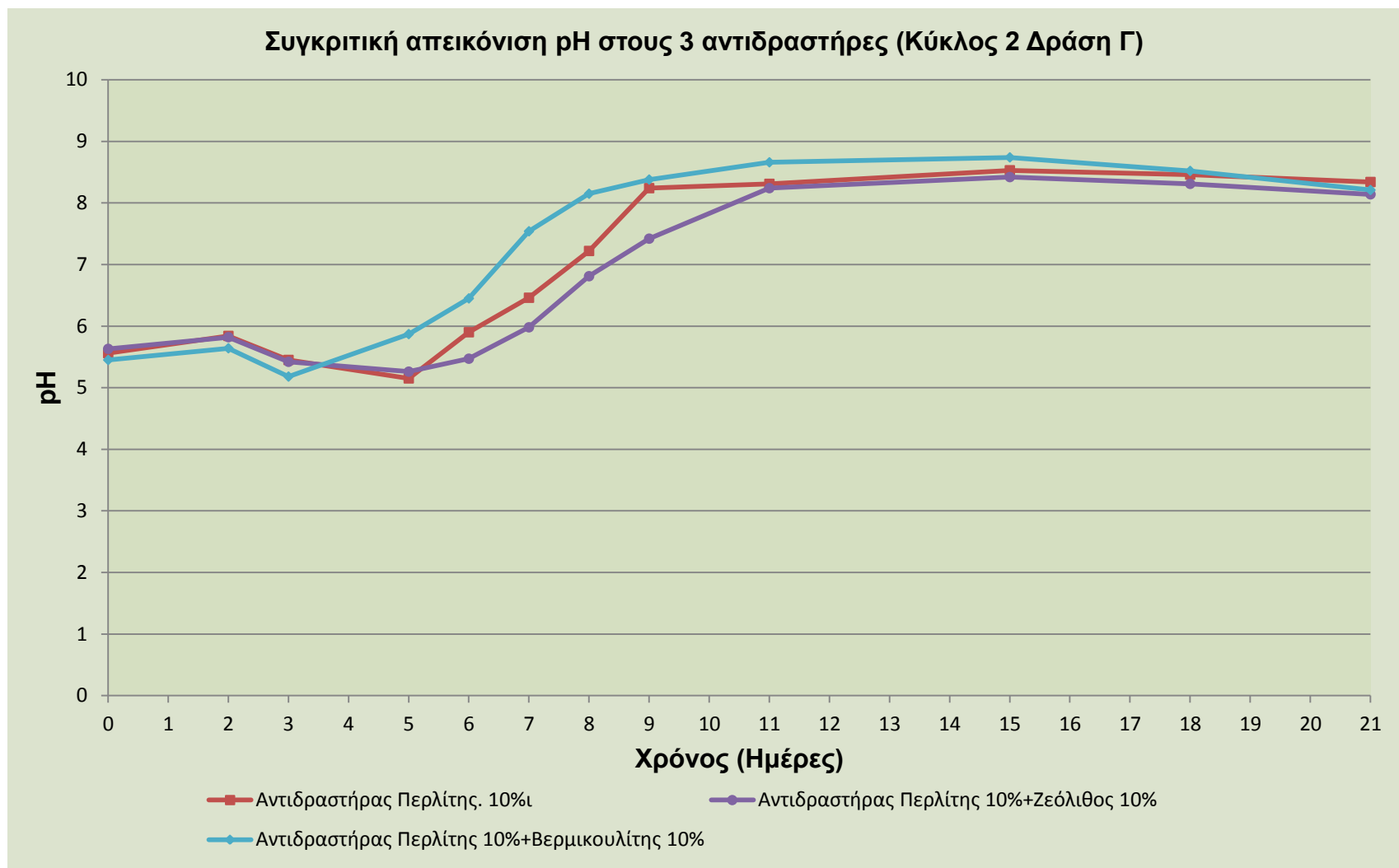
Προσδιορισμός του *pH* του υποστρώματος (Κύκλος 2 Δράση Γ)

Στο διάγραμμα 5.90 παρουσιάζεται η πορεία που διαγράφει το *pH* καθόλη τη διάρκεια της διεργασίας και στους τρεις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου της Δράσης Γ. Στον αντιδραστήρα προσθήκης περλίτη 10%, το *pH* έχει αρχική τιμή 5,56. Η τιμή αυτή μειώνεται μέχρι και την 5^η μέρα φτάνοντας στο 5,15. Μετά αυξάνεται ραγδαία μέχρι και την 9^η μέρα ενώ μετά με μικρές αυξομειώσεις σταθεροποιείται την 21^η μέρα κοντά στο 8,34. Κατά τα αρχικά στάδια λειτουργίας του κομποστοποιητή με περλίτη 10% +ζεόλιθο 10%, παρατηρείται ότι το *pH* του μίγματος με αρχική τιμή 5,63 παρουσιάζει μείωση μέχρι και την 5^η μέρα με χαμηλότερη τιμή την 5,26. Στην συνέχεια αυξάνεται γρήγορα έως και την 9^η μέρα όπου φαίνεται να σταθεροποιείται (με ελφάρως πτωτική πορεία) μέχρι την 21^η μέρα κοντά στο 8,14. Το *pH* του αντιδραστήρα στον οποίο πραγματοποιήθηκε προσθήκη με ορυκτό περλίτη 10%+10%βερμικουλίτη έχει αρχική τιμή 5,45 και παρουσιάζει ελαφρώς ανοδική πορεία, και ακολουθεί απότομη μείωση την 3^η ημέρα φτάνοντας την τιμή 5,18. Στην συνέχεια πραγματοποίησε απότομη άνοδο φτάνοντας κοντά στο 8,74 για να συνεχίσει με μικρή πτωτική πορεία φτάνοντας τιμή κοντά στο 8,21 την 21^η μέρα. Είναι εμφανής η βελτιωμένη τιμή του *pH* στο τελικό προϊόν που προήλθε από τους αντιδραστήρες με την επιπλέον προσθήκη ορυκτών

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές του *pH* για όλους τους αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου.

Πίνακας 5.103 Τιμές *pH* για τους τρεις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Γ

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3
0	5,56	5,63	5,45
2	5,84	5,82	5,64
3	5,45	5,42	5,18
5	5,15	5,26	5,87
6	5,90	5,47	6,45
7	6,46	5,98	7,54
8	7,22	6,81	8,15
9	8,24	7,42	8,38
11	8,31	8,24	8,66
15	8,53	8,42	8,74
18	8,46	8,31	8,52
21	8,34	8,14	8,21



Διάγραμμα 5.90 Συγκριτική απεικόνιση pH στους τρεις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου (Δράσης Γ)

Προσδιορισμός της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του υποστρώματος (Κύκλος 2 Δράση Γ)

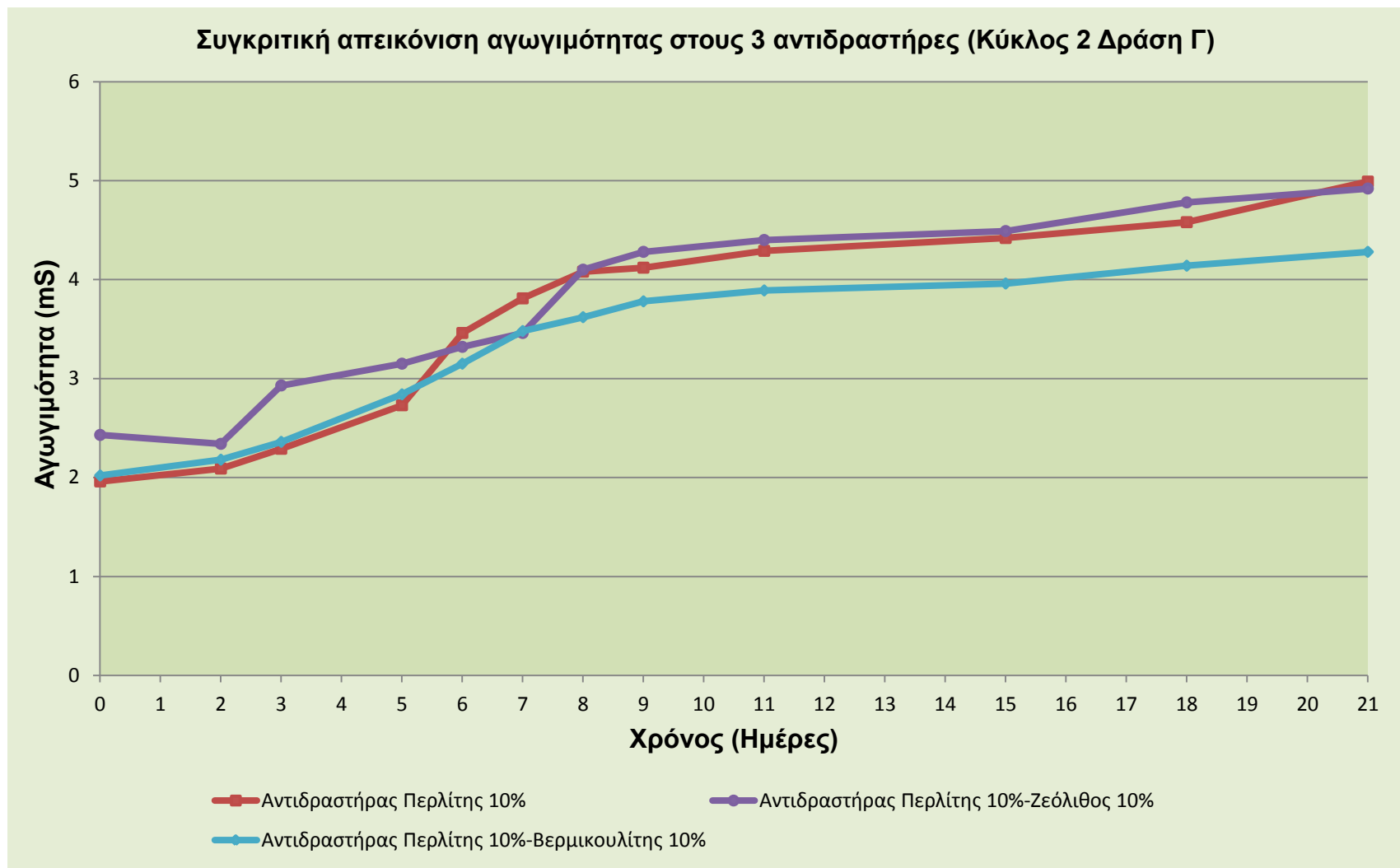
Στο διάγραμμα 5.91 παρουσιάζεται η εξέλιξη της τιμής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για τους αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου.

Οι καμπύλες της αγωγιμότητας στους αντιδραστήρες παρουσιάζουν αύξουσα πορεία. Ξεκινούν από χαμηλές αρχικές τιμές 1,96, 2,43, 1,86 και 2,02 mS/cm για τους αντιδραστήρες με περλίτη 10%, περλίτη 10%-ζεόλιθο 10% και περλίτη 10%-βερμικουλίτη 10% αντίστοιχα και, αφού σταθεροποιηθούν μετά την 21^η ημέρα, καταλήγουν στις τιμές 4,99, 4,92, και 4,28 mS/cm αντίστοιχα.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για όλους τους αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου.

Πίνακας 5.104 Τιμές αγωγιμότητας για τους τρεις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Γ (mS/cm)

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3
0	1,96	2,43	2,02
2	2,09	2,34	2,18
3	2,29	2,93	2,36
5	2,73	3,15	2,84
6	3,46	3,32	3,15
7	3,81	3,46	3,48
8	4,08	4,1	3,62
9	4,12	4,28	3,78
11	4,29	4,4	3,89
15	4,42	4,49	3,96
18	4,58	4,78	4,14
21	4,99	4,92	4,28



Διάγραμμα 5.91 Συγκριτική απεικόνιση ηλεκτρικής αγωγιμότητας στους τρεις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Γ

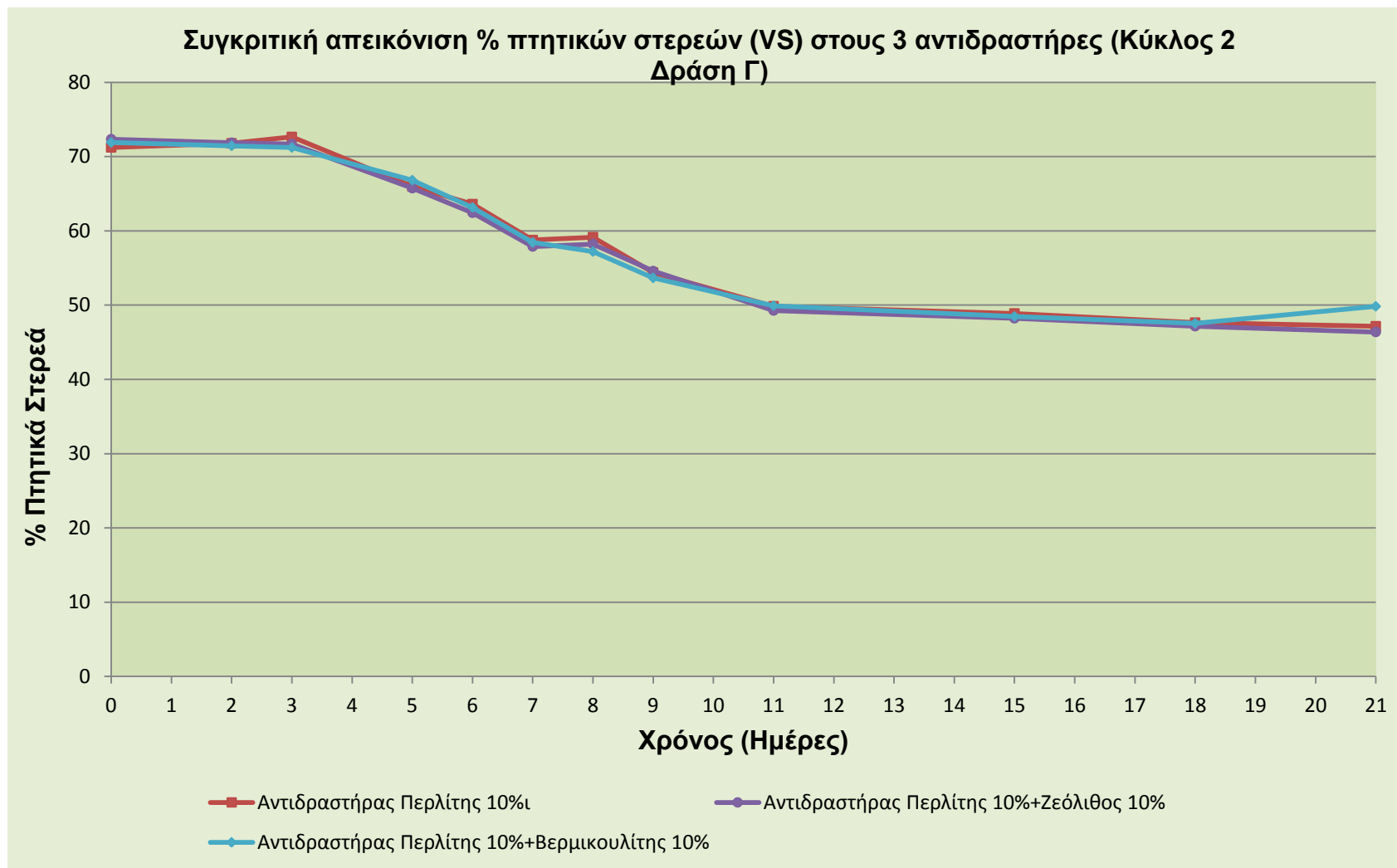
Προσδιορισμός των πτητικών στερεών (VS) στο υπόστρωμα (Κύκλος 2 Δράση Γ)

Η μεγαλύτερη μείωση των πτητικών στερεών παρατηρείται από την 3^η έως την 10^η ημέρα, περίοδο κατά την οποία εμφανίζονται και οι υψηλότερες θερμοκρασίες (θερμόφιλη φάση) για τους συγκεκριμένους αντιδραστήρες. Το προφίλ της εξέλιξης του ποσοστού των πτητικών στερεών παρουσιάζεται σχεδόν ταυτόσημο και στους τρεις αντιδραστήρες, ένδειξη της ταχείας κατανάλωσης της οργανικής ύλης που πραγματοποιήθηκε και στους τρεις, ως αποτέλεσμα της πολύ καλής διεξαγωγής της διεργασίας. (Διάγραμμα 5.92)

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές των πτητικών στερεών για όλους τους αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου.

Πίνακας 5.105 Τιμές % πτητικών στερεών για τους τρεις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Γ

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3
1	71,23	72,34	71,89
2	71,78	71,86	71,45
3	72,64	71,68	71,22
5	66,00	65,74	66,82
6	63,60	62,43	63,15
7	58,76	57,89	58,44
8	59,15	58,22	57,21
9	54,39	54,58	53,66
11	49,84	49,27	49,92
15	48,88	48,22	48,47
18	47,64	47,16	47,54
21	47,15	46,38	49,83



Διάγραμμα 5.92 Συγκριτική απεικόνιση των πτητικών στερεών στους 3 αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Γ

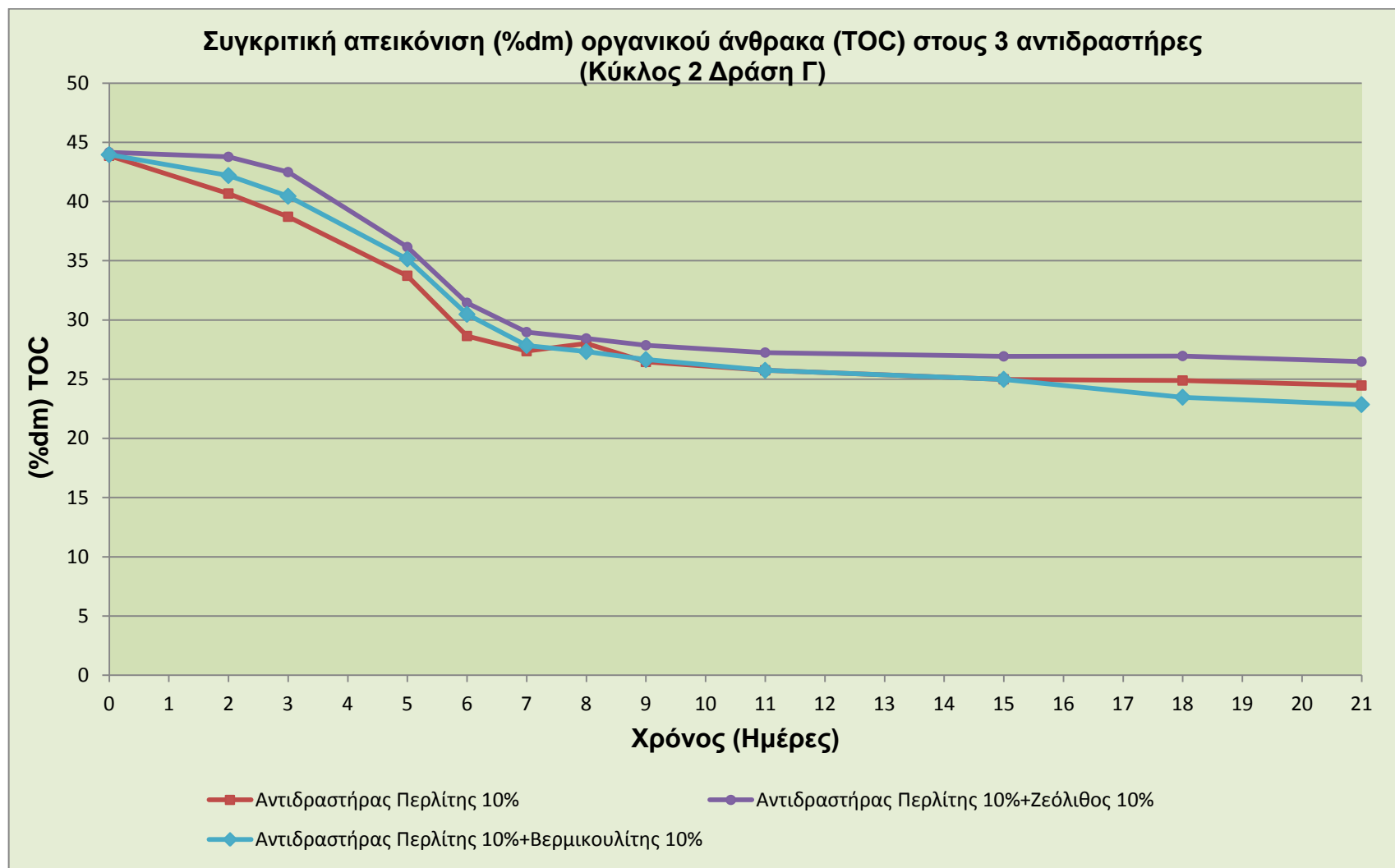
Προσδιορισμός του ολικού οργανικού άνθρακα στο υπόστρωμα (Κύκλος 2 Δράση Γ)

Στο διάγραμμα 5.93 παρουσιάζεται η εξέλιξη της πορείας της αποδόμησης του οργανικού άνθρακα, κατά τη διάρκεια της διεργασίας, για όλους τους αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου της Δράσης Γ. Ο αντιδραστήρας με προσθήκη περλίτη 10% κ.β., ξεκινά από την τιμή 43,86% και με φθίνουσα πορεία φθάνει την 21^η μέρα στο 24,46% γεγονός που μαρτυρεί μεγάλη αποδόμηση του οργανικού άνθρακα. Αντίστοιχα μεγάλη αποδόμηση παρατηρείται και στους επόμενους αντιδραστήρες. Συγκεκριμένα, ο ολικός οργανικός άνθρακας για τον αντιδραστήρα με προσθήκη περλίτη 10%-ζεόλιθο 10% κ.β. ξεκινάει από 44,15% και φθίνει με πολύ γρήγορο ρυθμό λόγω της βιοαποδόμησης της οργανικής ύλης. Τελικά την 21^η ημέρα από την έναρξη του κύκλου η περιεκτικότητα του υποστρώματος σε οργανικό άνθρακα σταθεροποιείται στο 26,48% παρουσιάζοντας μια συνολική μείωση κατά 17,67%. Τέλος, σχετικά με τον αντιδραστήρα προσθήκης περλίτη 10%-βερμικουλίτη 10% κ.β. ο ολικός άνθρακας ξεκινάει από 43,95% και φθίνει με πολύ γρήγορο ρυθμό λόγω της βιοαποδόμησης. Τελικά σταθεροποιείται στο 22,85% την 21^η ημέρα. Η συνολική μείωση του περιεχόμενου οργανικού άνθρακα στο υπόστρωμα ανέρχεται στο 21,11% για τις πρώτες 21 μέρες από την έναρξη της διεργασίας της κομποστοποίησης.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές του ολικού οργανικού άνθρακα (%dm) για όλους τους αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου κύκλου.

Πίνακας 5.106 Τιμές ολικού οργανικού άνθρακα (%dm) για τους τρεις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Γ

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3
1	43,86	44,15	43,95
2	40,67	43,77	42,19
3	38,71	42,48	40,44
5	33,72	36,15	35,15
6	28,64	31,44	30,47
7	27,36	28,97	27,84
8	28,02	28,43	27,33
9	26,45	27,86	26,65
11	25,74	27,24	25,74
15	24,98	26,92	24,98
18	24,88	26,95	23,47
21	24,46	26,48	22,85



Διάγραμμα 5.93 Συγκριτική απεικόνιση % οργανικού άνθρακα TOC στους 3 αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου της Δράσης Γ

Προσδιορισμός του ολικού αζώτου κατά Kjeldahl στο υπόστρωμα (Κύκλος 2 Δράση Γ)

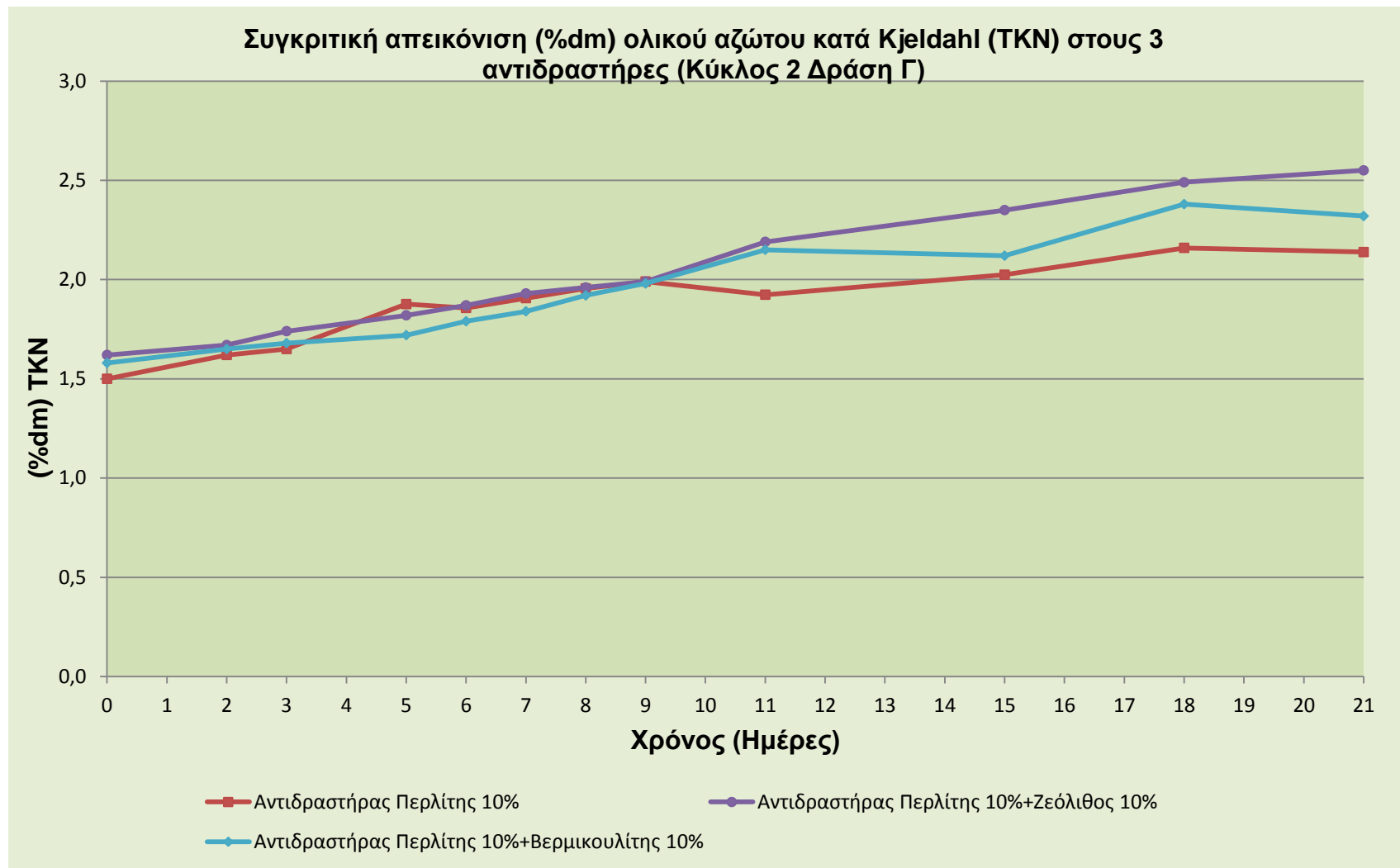
Στο διάγραμμα 5.94 παρατηρείται η αύξουσα πορεία του αζώτου σε ποσοστό επί ξηρής μάζας για όλους τους αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου της Δράσης Γ. Ο αντιδραστήρας με προσθήκη περλίτη 10% κ.β. ξεκινά με ποσοστό αζώτου στο 1,50% διατηρώντας αύξουσα πορεία για να καταλήξει την 21^η ημέρα στο 2,14%. Ο αντιδραστήρας με προσθήκη περλίτη 10%-ζεόλιθο 10% κ.β. ξεκινά με ποσοστό αζώτου στο 1,62% διατηρώντας, επίσης, αύξουσα πορεία για να καταλήξει την 21^η ημέρα στο 2,55%. Τέλος, ο αντιδραστήρας προσθήκης περλίτη 10%-βερμικουλίτη 10% κ.β. ξεκινά με ποσοστό αζώτου στο 1,58% και ακολουθώντας αύξουσα πορεία καταλήγει στο 2,32% την 21^η μέρα.

Το τελικό προϊόν και στους τρεις αντιδραστήρες παρουσιάζει πολύ καλό ποσοστό αζώτου, ενδειξη της ορθής διεξαγωγής της διεργασίας. Παρατηρείται ότι το ποσοστό αζώτου στο κόμποστ με επιπλέον προσθήκη ζεόλιθου είναι ελαφρώς αυξημένο. Αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί από το γεγονός ότι ο ζεόλιθος έχει την ιδιότητα να κατακρατά την αμμωνία NH_3 οπότε μειώνονται και οι απώλειες του αζώτου μέσω της αέριας φάσης.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές του TKN (%) για όλους τους αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου της δράσης Γ.

Πίνακας 5.107 Τιμές (%dm) TKN για τους τρεις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Γ

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3
0	1,50	1,62	1,58
2	1,62	1,67	1,65
3	1,65	1,74	1,68
5	1,88	1,82	1,72
6	1,86	1,87	1,79
7	1,91	1,93	1,84
8	1,95	1,96	1,92
9	1,99	1,99	1,98
11	1,92	2,19	2,15
15	2,02	2,35	2,12
18	2,16	2,49	2,38
21	2,14	2,55	2,32



Διάγραμμα 5.94 Συγκριτική απεικόνιση του % ολικού αζώτου κατά kjeldahl στους 3 αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Γ

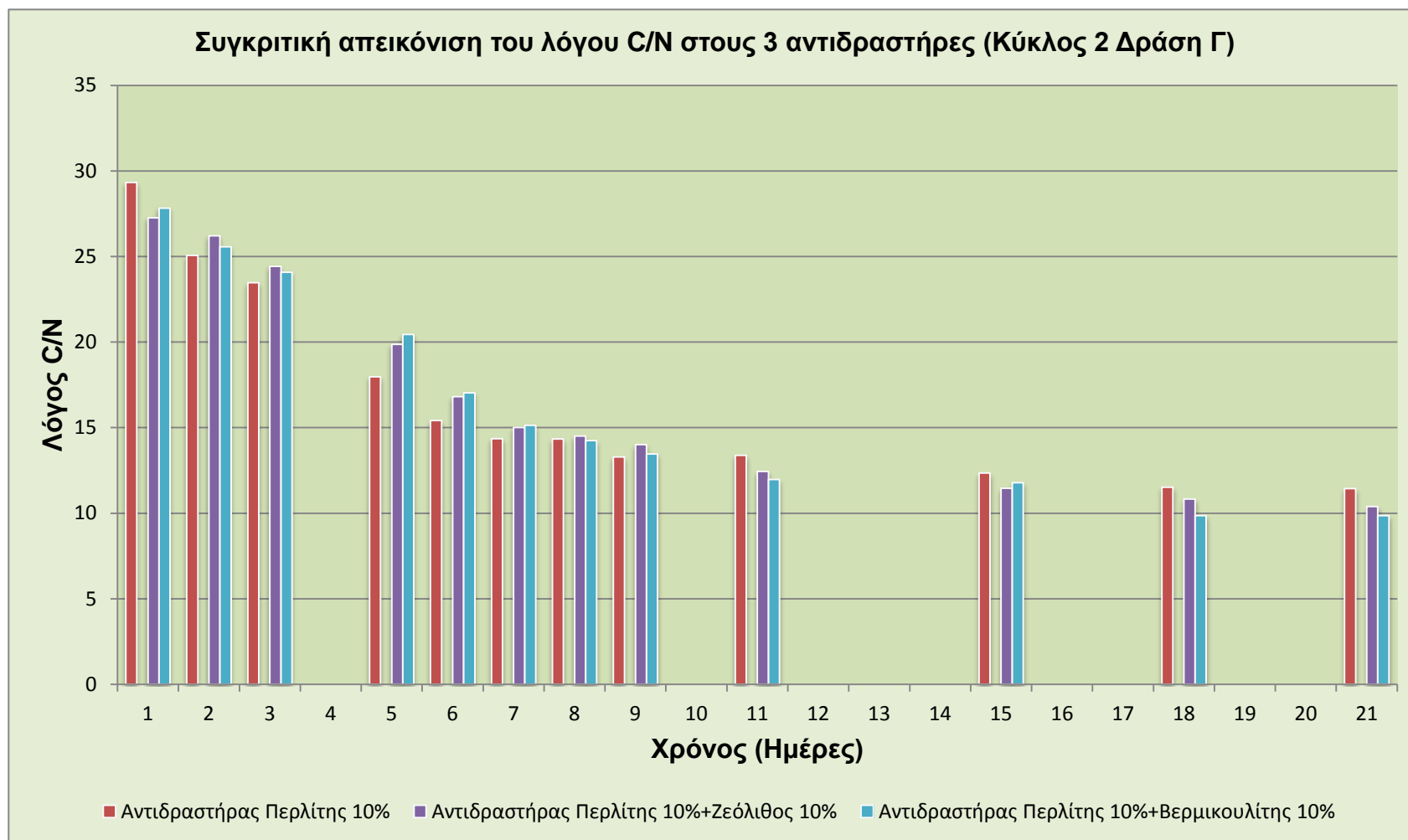
Προσδιορισμός του λόγου C/N στο υπόστρωμα (Κύκλος 2 Δράση Γ)

Στο διάγραμμα 5.95 παρουσιάζεται η εξελικτική πορεία του λόγου C/N για όλους τους αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου της Δράσης Γ. Όπως είναι αναμενόμενο οι αρχικοί λόγοι ξεκινούν από τιμές κοντά στο 30 και για τους 3τρεις αντιδραστήρες και μειώνονται δραστικά και σχεδόν ταυτόχρονα, λόγω της μεγάλης αποδόμησης του οργανικού άνθρακα που παρατηρήθηκε και στους τρεις. Συγκεκριμένα, ο αντιδραστήρας με προσθήκη περλίτη 10%κ.β. ξεκινά με λόγο 29,32 που μειώνεται μέχρι την τιμή 11,44. Ο αντιδραστήρας με προσθήκη περλίτη 10%-ζεόλιθο 10% κ.β. έχει αρχική τιμή 27,25. Παρατηρείται ταχεία μείωση του λόγου και σταθεροποίηση αυτού την 21^η ημέρα. Από την 5^η ημέρα ο λόγος έχει πέσει κάτω από την τιμή 20 και συγκεκριμένα στο 17,97. Ο αντιδραστήρας με προσθήκη περλίτη 10%-βερμικουλίτη 10%κ.β. ξεκινά με λόγο 27,82. Ακολουθεί μείωση και μάλιστα από την 6^η μέρα ο λόγος πέφτει κάτω από το 20 και συγκεκριμένα στο 17,02. Και στους τρεις αντιδραστήρες ο λόγος C/N στο τελικό προϊόν είναι ενδεικτικός της ποιότητάς του, αποτέλεσμα της ορθής διεξαγωγής της διεργασίας.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές της αναλογίας C/N για όλους τους αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου της Δράσης Γ.

Πίνακας 5.108 Τιμές C/N για τους τρεις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Γ

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3
1	29,32	27,25	27,82
2	25,07	26,21	25,57
3	23,47	24,41	24,07
5	17,97	19,86	20,44
6	15,42	16,81	17,02
7	14,35	15,01	15,13
8	14,33	14,51	14,23
9	13,29	14,00	13,46
11	13,38	12,44	11,97
15	12,34	11,46	11,78
18	11,52	10,82	9,86
21	11,44	10,38	9,85



Διάγραμμα 5.95 Συγκριτική απεικόνιση του λόγου C/N στους 3 αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Γ

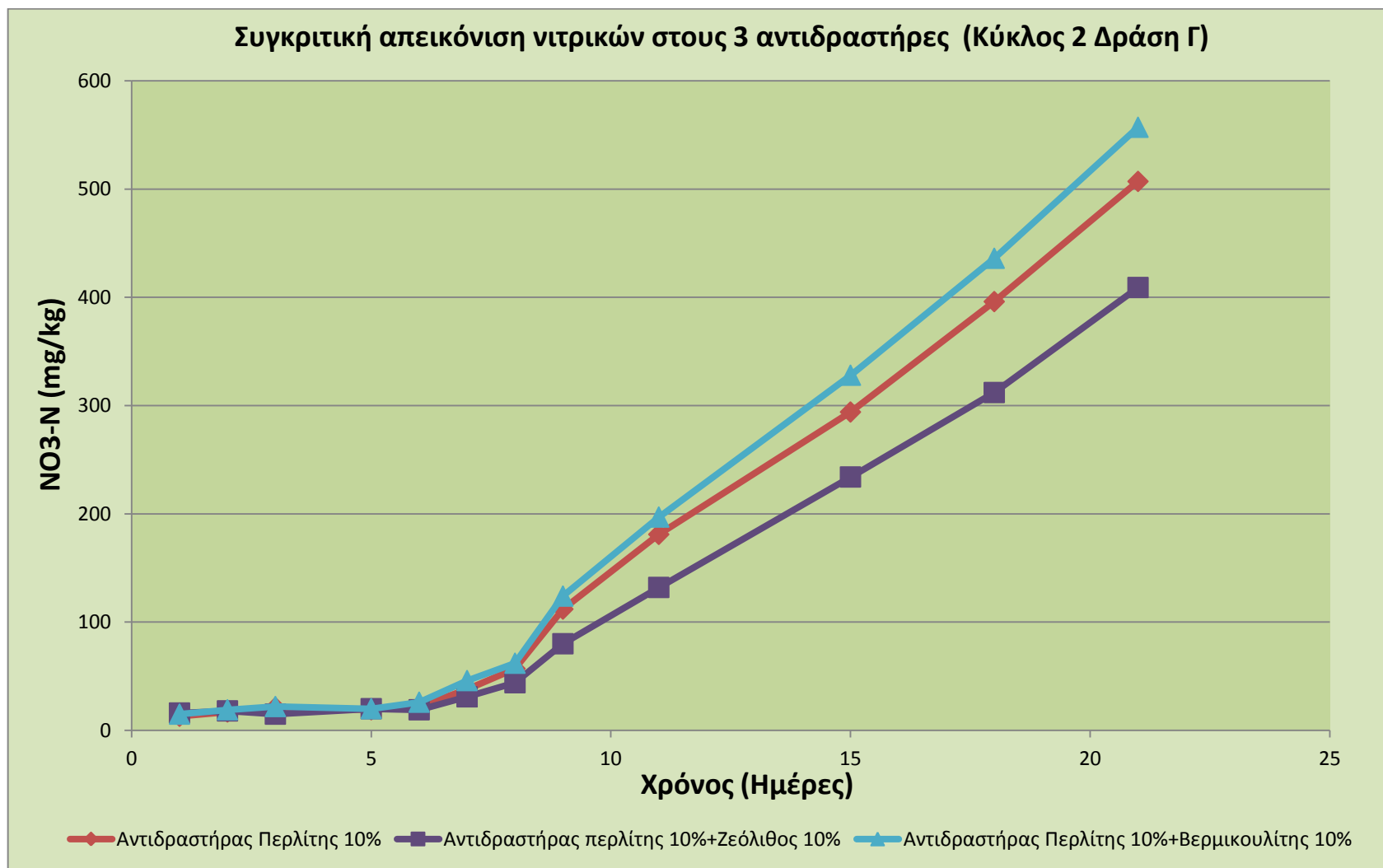
Προσδιορισμός νιτρικών ($NO_3^- - N$) και αμμωνιακών ($NH_4^+ - N$) στο υπόστρωμα (Κύκλος 2 Δράση Γ)

Ακολουθεί συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων των νιτρικών ($NO_3^- - N$) του υποστρώματος και για τους τρεις αντιδραστήρες που χρησιμοποιήθηκαν στον δεύτερο πειραματικό κύκλο της Δράσης Γ. Στο διάγραμμα παρατηρείται ξεκάθαρα πως με το πέρας της θερμόφιλης φάσης, ξεκινά η αποδόμηση των αμμωνιακών και στους τρεις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου, με αποτέλεσμα την ομαλή αύξηση των νιτρικών ιόντων.

Στον πίνακα 5.109 παρατίθενται οι τιμές των νιτρικών για τους τέσσερις αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου.

Πίνακας 5.109 Τιμές $NO_3^- - N$ σε mg/kg για τους τρεις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Γ

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3
0	13	16	15
2	17	18	19
3	21	15	22
5	19	20	20
6	22	19	26
7	38	31	46
8	57	44	62
9	112	80	124
11	181	132	197
15	294	234	328
18	396	312	436
21	507	409	557



Διάγραμμα 5.96 Συγκριτική απεικόνιση των νιτρικών $NO_3^- - N$ στους 3 αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Γ

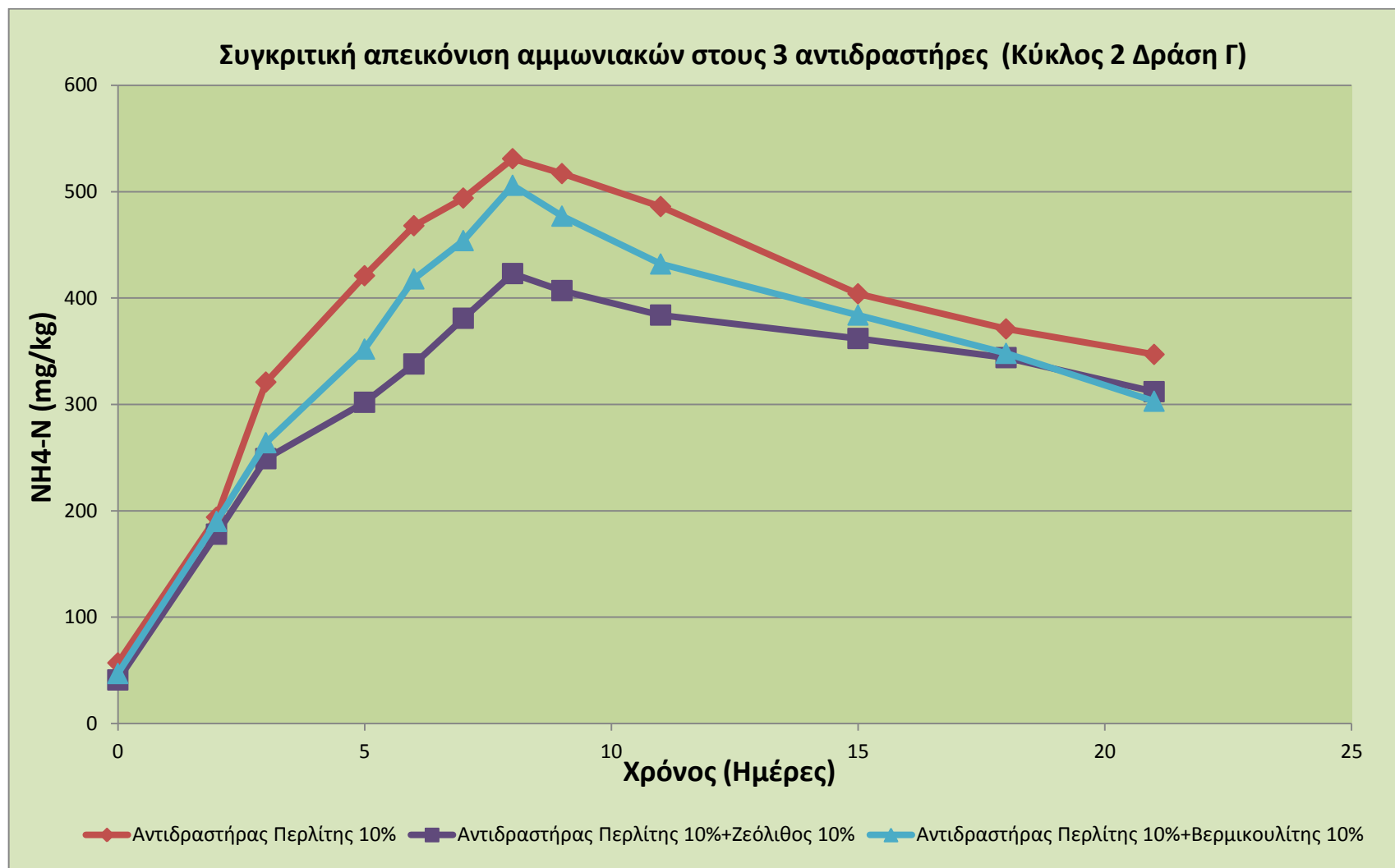
Κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης και ειδικότερα κατά τη θερμοφιλή φάση σχηματίζονται αμμωνιακά ιόντα, από τη δράση πρωτεϊνολυτικών βακτηρίων ευθυνόμενων για τη διάσπαση αζωτούχων ενώσεων. Η δημιουργία τους εξαρτάται κατά κύριο λόγο απ' το αρχικό υπόστρωμα και συγκεκριμένα απ' το διαθέσιμο άζωτο των αρχικών υλικών. Στο διάγραμμα 5.97 παρατηρείται η αναμενόμενη αύξηση των αμμωνιακών κατά τη θερμοφιλή φάση, σε όλους τους αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου της Δράσης Γ, που προκύπτει από τη διάσπαση της οργανικής ύλης. Μετά το πέρας της θερμοφιλής φάσης η συγκέντρωση των αμμωνιακών μειώνεται, καθώς ένα μέρος τους μετατρέπεται σε νιτρικά, μέσω της απονιτροποίησης και ένα μικρότερο μέρος τους διφεύγει στην ατμόσφαιρα με τη μορφή της αμμωνίας. Προφανώς μικρότερη μείωση των αμμωνιακών παρατηρείται στον αντιδραστήρα που προστέθηκε επιπλέον ζεόλιθος, λόγω της ικανότητας του ζεόλιθου να συγκρατεί τα αμμωνιακά ιόντα. Τα διαγράμματα 5.96 και 5.97 είναι ενδεικτικά της ορθής εξέλιξης της διεργασίας της κομποστοποίησης και για τους τρεις αντιδραστήρες.

Στον πίνακα 5.110 παρατίθενται οι τιμές των αμμωνιακών για τους τρεις αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου της Δράσης Γ.

Πίνακας 5.110 Τιμές $NH_4^+ - N$ σε mg/kg για τους τρεις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Γ

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3
0	57	41	47
2	194	178	190
3	321	249	264
5	421	302	352
6	468	338	418
7	494	381	454
8	531	423	506
9	517	407	477
11	486	384	432
15	404	362	384
18	371	344	348
21	347	312	303

Συμπερασματικά από τον δεύτερο κύκλο πειραμάτων φαίνεται ξεκάθαρα πως η διεργασία και στους τρεις αντιδραστήρες ακολούθησε ορθή πορεία, παράγοντας ένα τελικό προϊόν με πολύ καλές ιδιότητες. Η προσθήκη ζεόλιθου και βερμικουλίτη, σε συνδυασμό με τον περλίτη, βοήθησε ακόμα περισσότερο τη διεργασία βελτιώνοντας περαιτέρω τις ιδιότητες του τελικού προϊόντος.



Διάγραμμα 5.97 Συγκριτική απεικόνιση των αμμωνιακών $NH_4^+ - N$ στους 3 αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Γ

5.2.2.3.3 Τρίτος πειραματικός Κύκλος Δράσης Γ

Στον τρίτο πειραματικό κύκλο της Δράσης Γ στόχο αποτελεί η μελέτη της επίδρασης του ώριμου κόμποστ, ως πρόσθετο κομποστοποίησης, στη διεργασία. Το ώριμο κόμποστ αποτελεί υλικό κατάλληλο ως πρόσθετο κομποστοποίησης, καθώς πληροί σε μεγάλο βαθμό τις προδιαγραφές ενός αξιόλογου πρόσθετου (δίνει όγκο στο υπόστρωμα, κατάλληλο πορώδες, υγρασία σε ικανοποιητικά επίπεδα). Ωστόσο, πρέπει να δωθεί ιδιαίτερη προσοχή στη σύσταση του αρχικού υποστρώματος, όταν σε αυτό πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ως πρόσθετο διεργασίας το ώριμο κόμποστ, καθώς μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τις ιδιότητες του υποστρώματος. Ένα ώριμο κόμποστ, προερχόμενο από διεργασίες οικιακής κομποστοποίησης, συνήθως έχει pH αρκετά μεγαλύτερο από αυτό των τροφίμων που αποτελούν το αρχικό υπόστρωμα. Συνάμα, το ώριμο κόμποστ είναι υλικό, το οποίο προκύπτει στο τέλος της διεργασίας και αφού αυτό ωριμάσει, γεγονός που σημαίνει πως έχει περάσει το στάδιο της αποδόμησης της οργανικής ύλης, άρα έχει πολύ χαμηλότερα ποσοστά οργανικού άνθρακα σε σχέση με το υπόστρωμα, συνακόλουθα, μεγαλύτερα ποσοστά αζώτου και, φυσικά, πολύ μικρότερο λόγο C/N σε σχέση με το αρχικό υπόστρωμα. Σε μία διεργασία, συνεπώς, ελεγχόμενη, που επιδίωξη αποτελεί η διατήρηση σταθερού του λόγου C/N στο αρχικό υπόστρωμα, η χρήση ώριμου κόμποστ ως πρόσθετο χρήζει ιδιαίτερης προσοχής.

Με γνώση των ανωτέρω σχεδιάστηκαν οι Κύκλοι 3 και 4 της Δράσης Γ. Ο στόχος, εν γένει της διαδοκτορικής διατριβής, αποτελεί η μελέτη της διεργασίας της οικιακής κομποστοποίησης και μέσω αυτής οι δυνατότητες βελτιστοποίησης της διεργασίας με αποτέλεσμα την παραγωγή τελικού προϊόντος βελτιωμένων ιδιοτήτων. Στόχο, λοιπόν, αυτών των δύο κύκλων της Δράσης Γ, αποτέλεσε η μελέτη της επίδρασης του ώριμου κόμποστ στη διεργασία με σκοπό τη βελτίωση αυτής και συνακόλουθα των ιδιοτήτων του τελικού προϊόντος. Για το λόγο αυτό προστέθηκε ώριμο κόμποστ στους αντιδραστήρες σε ποσοστό μόνο 5% κ.β. μαζί με 10% πρόσθετο, το αντίστοιχο με αυτό που το ώριμο κόμποστ εμπεριέχει ήδη. Με τον τρόπο αυτό, παρά το γεγονός πως το ώριμο κόμποστ έχει πολύ μικρή αναλογία C/N, δεν επηρεάζει σημαντικά τα ποσοστά άνθρακα και αζώτου του νέου αρχικού υποστρώματος, και ως εκ τούτου μόνο θετικά συνεισφέρει στη διεργασία. Με προσθήκη ώριμου κόμποστ σε μεγαλύτερα ποσοστά (10%κ.β.), δε θα ήταν εφικτή η δημιουργία αρχικού υποστρώματος με κατάλληλες ιδιότητες.

Τροφοδοσία των αντιδραστήρων

Στον πίνακα 5.111 παρουσιάζονται τα υλικά που τροφοδότησαν κάθε ένα από τους τέσσερις αντιδραστήρες. Οι τιμές του πίνακα είναι σε γραμμάρια. Η τροφοδοσία έγινε με γνώμονα να διατηρηθεί η αρχική αναλογία C/N κοντά στο 30. Για να επιτευχθεί ο συγκεκριμένος λόγος υπολογίστηκε θεωρητικά η εξής αναλογία:

- 60% κυτταρινούχων συστατικών (μαρούλι, σπανάκι, πορτοκάλια και λεμόνια)
- 20% πρωτεϊνούχων συστατικών (ρεβύθια και φασόλια βρασμένα)
- 20% υδατανθρακούχων συστατικών (ψωμί)

Σε κάθε αντιδραστήρα έγινε προσθήκη κάποιου πρόσθετου.

- Στον πρώτο αντιδραστήρα προστέθηκε περλίτης ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας, καθώς και 5% ώριμο κόμποστ ίδιας αναλογίας C/N που περιείχε 10% επιπρόσθετα περλίτη. Συνολικό ποσοστό του πρόσθετου 15%κ.β.
- Στο δεύτερο αντιδραστήρα προστέθηκε βερμικουλίτης ποσότητας ίσης με το 5% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας, πριονίδι 5% καθώς και 5% ώριμο κόμποστ ίδιας αναλογίας C/N που περιείχε επιπρόσθετα βερμικουλίτη σε ποσοστό 10% και πριονίδι 10%. Συνολικό ποσοστό του πρόσθετου 15%κ.β.
- Στον τρίτο αντιδραστήρα προστέθηκε πριονίδι ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας, καθώς και 5% ώριμο κόμποστ ίδιας αναλογίας C/N που περιείχε 10% επιπρόσθετα πριονίδι. Συνολικό ποσοστό του πρόσθετου 15%κ.β.
- Στον τέταρτο αντιδραστήρα προστέθηκε ζεόλιθος ποσότητας ίσης με το 5% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας, πριονίδι 5% καθώς και 5% ώριμο κόμποστ ίδιας αναλογίας C/N που περιείχε 10% επιπρόσθετα ζεόλιθο και 10% πριονίδι. Συνολικό ποσοστό του πρόσθετου 15%κ.β.

Πίνακας 5.111 Τροφοδοσία σε g των αντιδραστήρων του τρίτου κύκλου Δράσης Γ

Αντιδραστήρας	Ημέρα	Κυτταρινούχα				Πρωτεΐνες		Υδατάνθρακες		Ορυκτό			Όριμο Κόμποστ	Σύνολο	Τελικό Σύνολο
		Μαρούλι	Σπανάκι	Πορτοκάλι	Λεμόνι	Ρεβύθι	Φασόλι	Ψωμί	Περλίτης	Βερμικουλίτης	Πριονίδι	Ζεώλιθος			
1	1	2250	2250	1000	500	1000	1000	2000	1000				500	11500	13800
	1	225	225	100	500	100	100	200	100				50	1150	
	2	225	225	100	500	100	100	200	100				50	1150	
2	1	2250	2250	1000	500	1000	1000	2000		500	500		500	11500	13800
	1	225	225	100	500	100	100	200		50	50		50	1150	
	2	225	225	100	500	100	100	200		50	50		50	1150	
3	1	2250	2250	1000	500	1000	1000	2000			1000		500	11500	13800
	1	225	225	100	500	100	100	200			100		50	1150	
	2	225	225	100	500	100	100	200			100		50	1150	
4	1	2250	2250	1000	500	1000	1000	2000				1000	500	11500	13800
	1	225	225	100	500	100	100	200				100	50	1150	
	2	225	225	100	500	100	100	200				100	50	1150	

Δειγματοληψία – Απώλεια μάζας (Κύκλος 3 Δράση Γ)

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων του πρώτου κύκλου και συγκεκριμένα των πρώτων επτά ημερών γινόταν καθημερινή δειγματοληψία από τους τέσσερις αντιδραστήρες. Ακολούθησαν άλλες έξι δειγματοληψίες ανά δύο ημέρες, μέχρι τη 17^η ημέρα της διεργασίας. Η θερμοκρασία ήταν η μόνη παράμετρος που μετρήθηκε σε καθημερινή βάση.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η μάζα του υλικού που αφαιρέθηκε σε κάθε αντιδραστήρα τις μέρες της δειγματοληψίας. Οι τιμές του πίνακα είναι σε γραμμάρια.

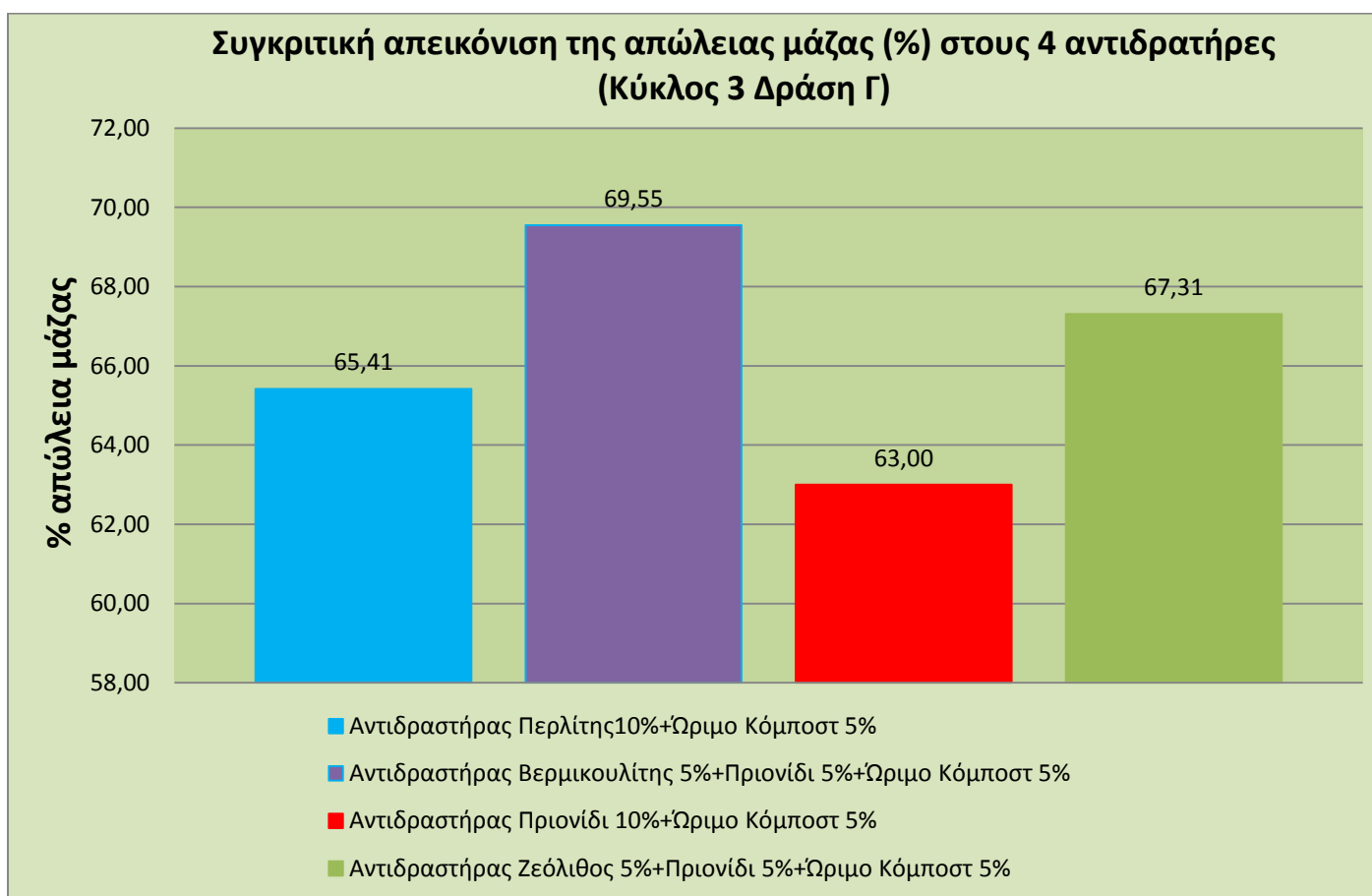
Πίνακας 5.112 Δειγματοληψία σε g από τους αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου Δράσης Γ

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
1	99,63	98,65	101,18	102,54
2	134,56	127,45	123	134,45
3	143,55	135,68	135,24	138,52
4	127,58	117,45	138,65	144,15
5	149,63	129,85	122,45	121,36
6	132,25	136,45	132,15	147,18
7	107,54	98,92	108,55	109,15
9	102,37	102,86	102,35	102,68
11	99,86	112,35	99,86	99,45
13	94,56	105,65	102,65	102,22
15	101,49	97,35	98,65	100,56
17	102,87	102,47	101,95	96,45
ΣΥΝΟΛΟ	1395,89	1365,13	1366,68	1398,71

Οι ποσότητες που αφαιρέθηκαν από κάθε αντιδραστήρα σε συνδυασμό, με τις λοιπές απώλειες (π.χ. υγρασία), την αρχική τροφοδοσία, και την ζύγιση του τελικού προϊόντος μας δίνουν το επί τις εκατό ποσοστό απώλειας μάζας στον κάθε αντιδραστήρα. Αναλυτικότερα τα δεδομένα παρουσιάζονται στον πίνακα 5.113 και στο διάγραμμα 4.1

Πίνακας 5.113 Ποσοστό % συνολικής μείωσης της μάζας σε κάθε αντιδραστήρα του τρίτου κύκλου Δράσης Γ

	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
Αρχική Τροφοδοσία	13800,00	13800,00	13800,00	13800,00
Σύνολο Δειγματοληψίας	1395,89	1365,13	1366,68	1398,71
Θεωρητικά στον αντιδραστήρα	12404,11	12434,87	12433,32	12401,29
Πραγματικά στον αντιδραστήρα	4290,00	4534,00	3626,79	4054,00
Ποσοστό μείωσης της μάζας	65,41	63,54	70,83	67,31



Διάγραμμα 5.98 Συγκριτική απεικόνιση της % απώλειας μάζας στους 4 αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου Δράσης Γ

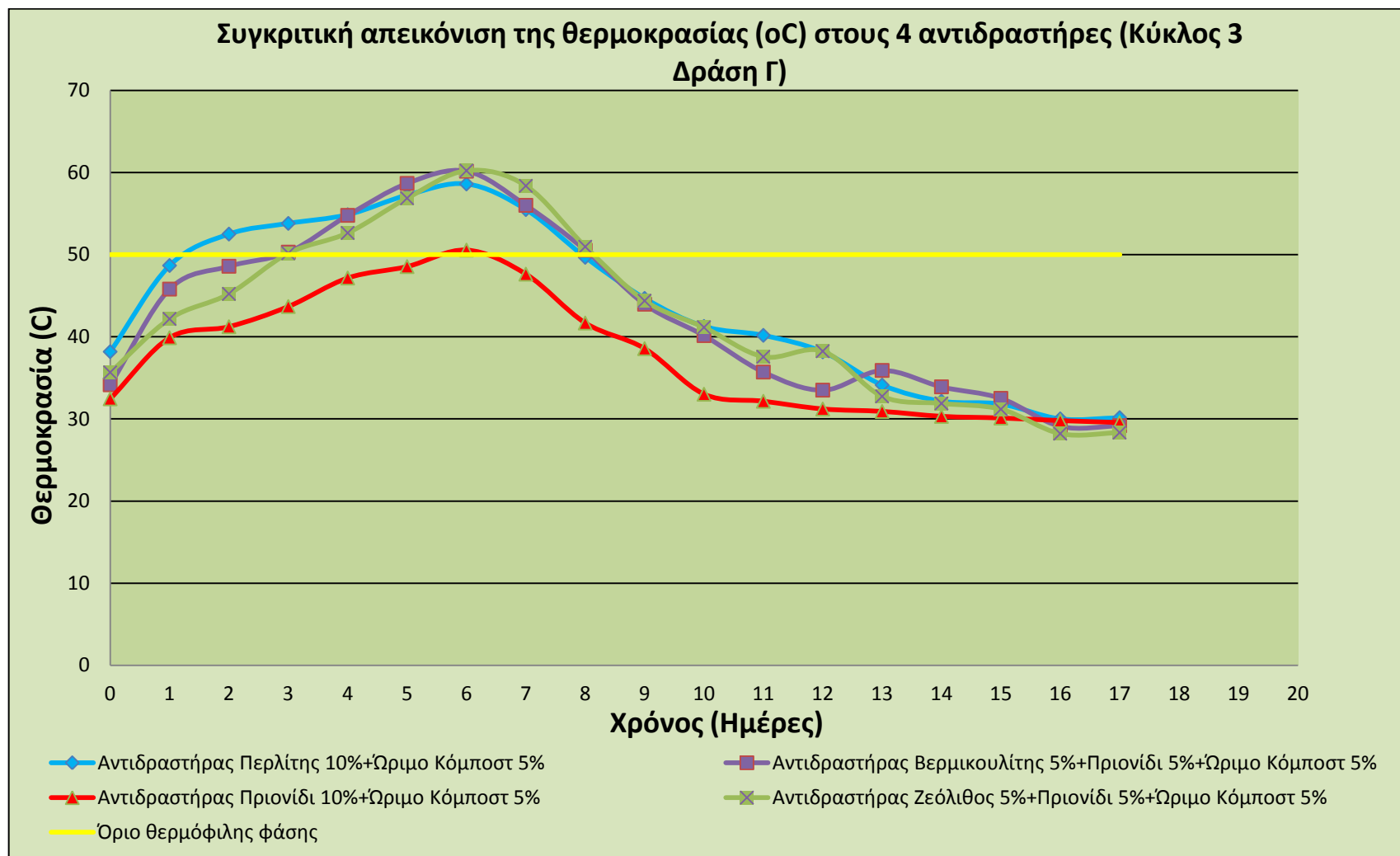
Προσδιορισμός της θερμοκρασίας του υποστρώματος (Κύκλος 3 Δράση Γ)

Στο διάγραμμα 5.9 διακρίνονται τα τρία μεταβατικά στάδια της διεργασίας. Στον αντιδραστήρα με πρόσθετο περλίτη και ώριμο κόμποστ η θερμόφιλη φάση ξεκίνησε με το πέρας της 1^{ης} μέρας και κράτησε μέχρι την 9^η μέρα. Η μέγιστη θερμοκρασία που σημειώθηκε ήταν 58,6 °C. Για τον αντιδραστήρα με πρόσθετο βερμικουλίτη, πριονίδι και ώριμο κόμποστ η θερμόφιλη φάση ξεκίνησε από την 3^η μέρα και κράτησε μέχρι και την 9^η. Η μέγιστη θερμοκρασία που σημειώθηκε ήταν 60,2 °C. Σχετικά με τον αντιδραστήρα με πρόσθετο πριονίδι και ώριμο κόμποστ επετεύχθη η θερμόφιλη φάση η οποία κράτησε μία μέρα, την 6^η. Η μέγιστη θερμοκρασία που σημειώθηκε ήταν 50,6 °C. Για τον αντιδραστήρα με πρόσθετο ζεόλιθο, πριονίδι και ώριμο κόμποστ η θερμόφιλη φάση ξεκίνησε από την 3^η μέρα και κράτησε μέχρι και την 9^η. Η μέγιστη θερμοκρασία που σημειώθηκε ήταν 60,2 °C. En συνεχεία, η διεργασία πέρασε στην δεύτερη μεσόφιλη φάση στην οποία η θερμοκρασία σταθεροποιήθηκε σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές της θερμοκρασίας για όλους τους αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου.

Πίνακας 5.114 Τιμές θερμοκρασίας (°C) για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου Δράσης Γ

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
0	38,2	34,2	32,4	35,7
1	48,7	45,8	39,9	42,2
2	52,5	48,6	41,2	45,2
3	53,8	50,3	43,7	50,2
4	54,9	54,8	47,2	52,6
5	57,2	58,7	48,5	56,9
6	58,6	60,2	50,6	60,2
7	55,5	56	47,6	58,4
8	53,6	52,3	41,7	53,2
9	49,7	49,8	38,6	48,7
10	45,4	46,4	33	42,1
11	40,2	35,7	32,1	37,6
12	38,2	33,5	31,2	38,2
13	34,1	35,9	30,9	32,7
14	32,2	33,9	30,3	31,9
15	31,8	32,5	30,1	31,2
16	30	29,1	29,8	28,2
17	30,2	29,2	29,6	28,3



Διάγραμμα 5.99 Συγκριτική απεικόνιση θερμοκρασίας (οC) στους 4 αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου Δράση Γ

Προσδιορισμός της υγρασίας του υποστρώματος (Κύκλος 3 Δράση Γ)

Η περιεχόμενη υγρασία στο τελικό προϊόν αποτελεί μια βασική φυσική παράμετρο αξιολόγησης του κόμποστ. Η χαμηλή περιεκτικότητα σε υγρασία στο κόμποστ δυσκολεύει την ενσωμάτωσή του στο έδαφος ενώ ενδέχεται να αποκρύψει τη βιολογική του σταθερότητα (Eggerth et al., 2007; Bary et al., 2002; Karetanios et al., 1993). Αντίθετα, υπερβολικά υψηλή περιεχόμενη υγρασία έχει παρατηρηθεί ότι διεγείρει τη μικροβιακή δραστηριότητα στο έδαφος δρώντας ανταγωνιστικά ως προς τους φυτικούς μικροοργανισμούς (Diaz and Savage, 2007a), ενώ παράλληλα δυσχεραίνει τις διεργασίες του χειρισμού, της μεταφοράς και της διάθεσής του (Eggerth et al., 2007).

Οι καμπύλες της υγρασίας, στο διάγραμμα 5.100, όσον αφορά τους αντιδραστήρες με περλίτη και πριονίδι ξεκινούν από υψηλά αρχικά επίπεδα πάνω από 70% γεγονός αναμενόμενο λόγω της υψηλής υγρασίας του υλικού που χρησιμοποιήθηκε ως αρχικό υπόστρωμα σε συνδυασμό με τα αντίστοιχα πρόσθετα. (οι άλλοι δηλαδή δεν ξεκινούν με υψηλή υγρασία?) Ο αντιδραστήρας με το πριονίδι παρουσιάζει τη μεγαλύτερη αρχική τιμή (72,14%), και αυτό οφείλεται στο γεγονός της απουσίας κάποιου ορυκτού. Τα ορυκτά έχουν την ιδιότητα προσρόφησης της υγρασίας και αύξησης του πορώδους του υποστρώματος, με αποτέλεσμα τον καλύτερο αερισμό και συνακόλουθα τον καλύτερο έλεγχο της υγρασίας. Την ίδια ιδιότητα έχει και το ώριμο κόμποστ που προήλθε από διεργασία κομποστοποίησης με χρήση ορυκτών.

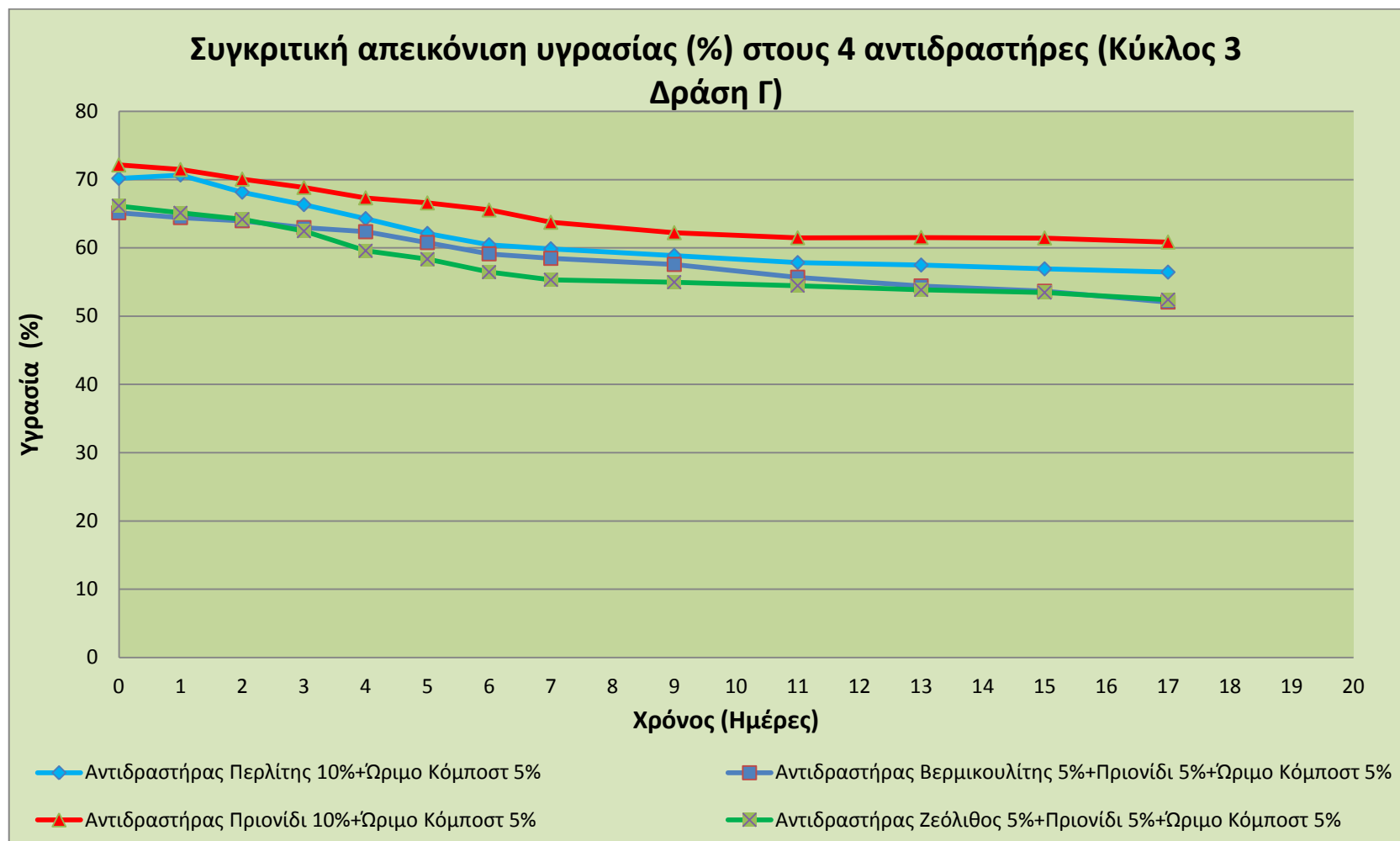
Στη συνέχεια λόγω της έναρξης των βιολογικών διεργασιών εκλύεται θερμότητα με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες που οδηγούν στη σταδιακή μείωση της περιεχόμενης υγρασίας. Το ποσοστό της υγρασίας στο υπόστρωμα ακολουθεί φθίνουσα πορεία κατά την διάρκεια της κομποστοποίησης και στο τέλος της διεργασίας στον αντιδραστήρα τα προϊόντα λαμβάνουν ποσοστά 56,44%, 52,06%, 60,85%, 52,41%. Ο αντιδραστήρας με πρόσθετο περλίτη και αυτός με πρόσθετο πριονίδι εμφανίζουν μεγαλύτερο ποσοστό υγρασίας, συγκριτικά με τους άλλους, και σε αυτόν τον κύκλο πειραμάτων. Η ιδανική περιεχόμενη υγρασία στο τελικό κόμποστ κυμαίνεται μεταξύ 40% και 50% καθότι εξασφαλίζεται περιορισμένη μικροβιακή δραστηριότητα γεγονός επιθυμητό όταν γίνεται εναπόθεση κόμποστ στο έδαφος, ενώ σε καμία περίπτωση δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 25% καθότι δεν μπορεί να ενσωματωθεί εύκολα στο έδαφος.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές της υγρασίας (%) για όλους τους αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου της Δράσης Γ.

Πίνακας 5.115 Τιμές υγρασίας (%) για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου Δράσης Γ

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
0	70,17	65,14	72,14	66,14
1	70,67	64,43	70,85	65,12
2	68,15	63,97	70,07	64,18
3	66,33	62,96	68,84	62,44
4	64,28	62,36	67,32	59,57
5	62,11	60,77	66,58	58,35
6	60,45	59,12	65,55	56,44
7	59,86	58,46	63,74	55,32
9	58,88	57,57	62,22	54,97
11	57,84	55,69	61,47	54,46
13	57,48	54,42	61,52	53,84
15	56,92	53,64	61,44	53,45
17	56,44	52,06	60,85	52,41

Οι καταγεγραμμένες πειραματικές τιμές, μετά το τέλος της διεργασίας, κυμαίνονται από 52,06% μέχρι και 60,85% και αυτό οφείλεται στην υψηλή αρχική υγρασία των υλικών τροφοδοσίας. Για το λόγο αυτό πριν την χρήση του κόμποστ συνίσταται να αφεθεί το τελικό προϊόν εκτός αντιδραστήρα για μια επιπλέον χρονική περίοδο ενός μήνα για την περεταίρω μείωση της υγρασίας του και ωρίμανση, ειδικά στην περίπτωση των αντιδραστήρων με πρόσθετα πριονίδι και περλίτη.



Διάγραμμα 5.100 Συγκριτική απεικόνιση % υγρασίας στους 4 αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου Δράσης Γ

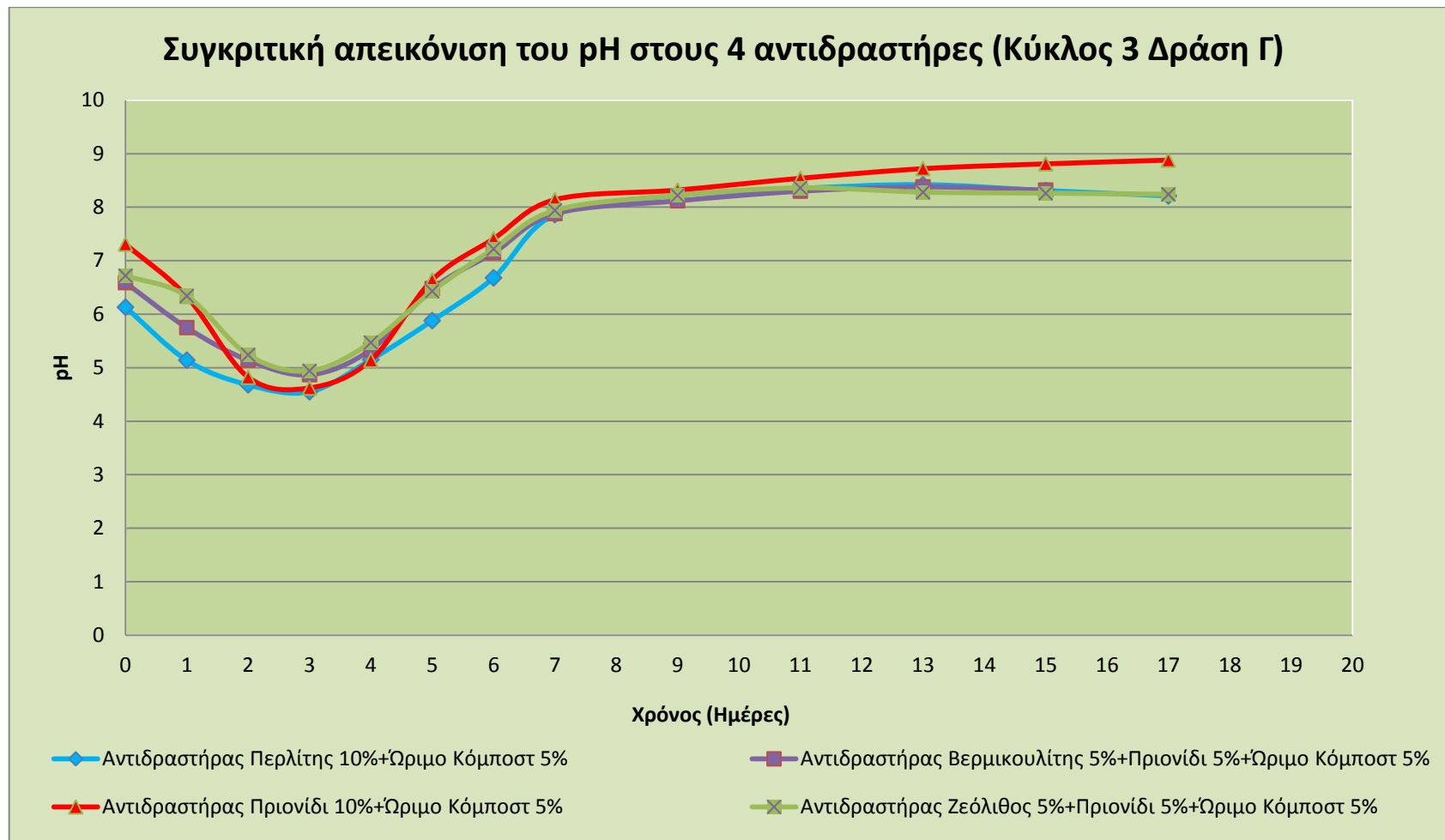
Προσδιορισμός του pH του υποστρώματος (Κύκλος 3 Δράση Γ)

Στο διάγραμμα 5.101 παρουσιάζεται η εξέλιξη του pH για τους 4 αντιδραστήρες του κύλου. Και στους 4 αντιδραστήρες οι αρχικές τιμές του pH είναι αρκετά υψηλές, γεγονός που αποδίδεται στην προσθήκη του ώριμου κόμποστ. Στον αντιδραστήρα με προσθήκη περλίτη και ώριμο κόμποστ, το pH έχει αρχική τιμή 6,13. Η τιμή αυτή μειώνεται μέχρι και την 3^η μέρα φτάνοντας στο 4,55. Μετά αυξάνεται ραγδαία μέχρι και την 7^η μέρα στο 7,86, κατόπιν αυξάνει με πιο αργό ρυθμό, μέχρι που αρχίζει να μειώνεται με αργούς ρυθμούς μετά το πέρας της 13^{ης} ημέρας. Το pH του αντιδραστήρα με πρόσθετο ορυκτό βερμικουλίτη, πριονίδι και ώριμο κόμποστ έχει αρχική τιμή 6,59 παρουσιάζει πτωτική πορεία τις τέσσερις πρώτες μέρες, με χαμηλότερη τιμή την 3^η μέρα στο 4,87. Στη συνέχεια πραγματοποίησε απότομη άνοδο φτάνοντας κοντά στο 7,88 την 7^η ημέρα για να συνεχίσει την σταδιακή ανοδική του πορεία και να αρχίσει να μειώνεται μετά την 13^η ημέρα, αργό ρυθμό. Στον αντιδραστήρα με πρόσθετο πριονίδι και ώριμο κόμποστ, το pH έχει αρχική τιμή 7,31. Η τιμή αυτή μειώνεται μέχρι και την 3^η μέρα φτάνοντας στο 4,62. Μετά αυξάνεται ραγδαία μέχρι και την 7^η μέρα όπου φτάνει στο 8,14, ενώ μετά αυξάνει με πιο αργό ρυθμό όπου φτάνει τελικά στο 8,88 τη 17^η μέρα. Κατά τα αρχικά στάδια λειτουργίας του κομποστοποιητή με προσθήκη ζεόλιθο, πριονίδι και ώριμο κόμποστ παρατηρείται ότι το pH του μίγματος με αρχική τιμή 6,72 παρουσιάζει μείωση μέχρι και την 3^η μέρα με χαμηλότερη τιμή την 4,94. Στη συνέχεια αυξάνεται γρήγορα έως και την 9^η μέρα και έπειτα αυξάνει με πιο αργό ρυθμό μέχρι να αρχίσει να μειώνεται στο 8,24 τη 17^η ημέρα.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές του pH για όλους τους αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου της Δράσης Γ.

Πίνακας 5.116 Τιμές pH για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου Δράσης Γ

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
0	6,13	6,59	7,31	6,72
1	5,14	5,75	6,33	6,34
2	4,68	5,14	4,82	5,24
3	4,55	4,87	4,62	4,94
4	5,15	5,34	5,14	5,47
5	5,88	6,48	6,64	6,43
6	6,68	7,15	7,41	7,22
7	7,86	7,88	8,14	7,94
9	8,22	8,12	8,32	8,22
11	8,35	8,3	8,54	8,36
13	8,42	8,38	8,72	8,28
15	8,31	8,32	8,81	8,26
17	8,21	8,28	8,88	8,24



Διάγραμμα 5.101 Συγκριτική απεικόνιση pH στους 4 αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου Δράσης Γ

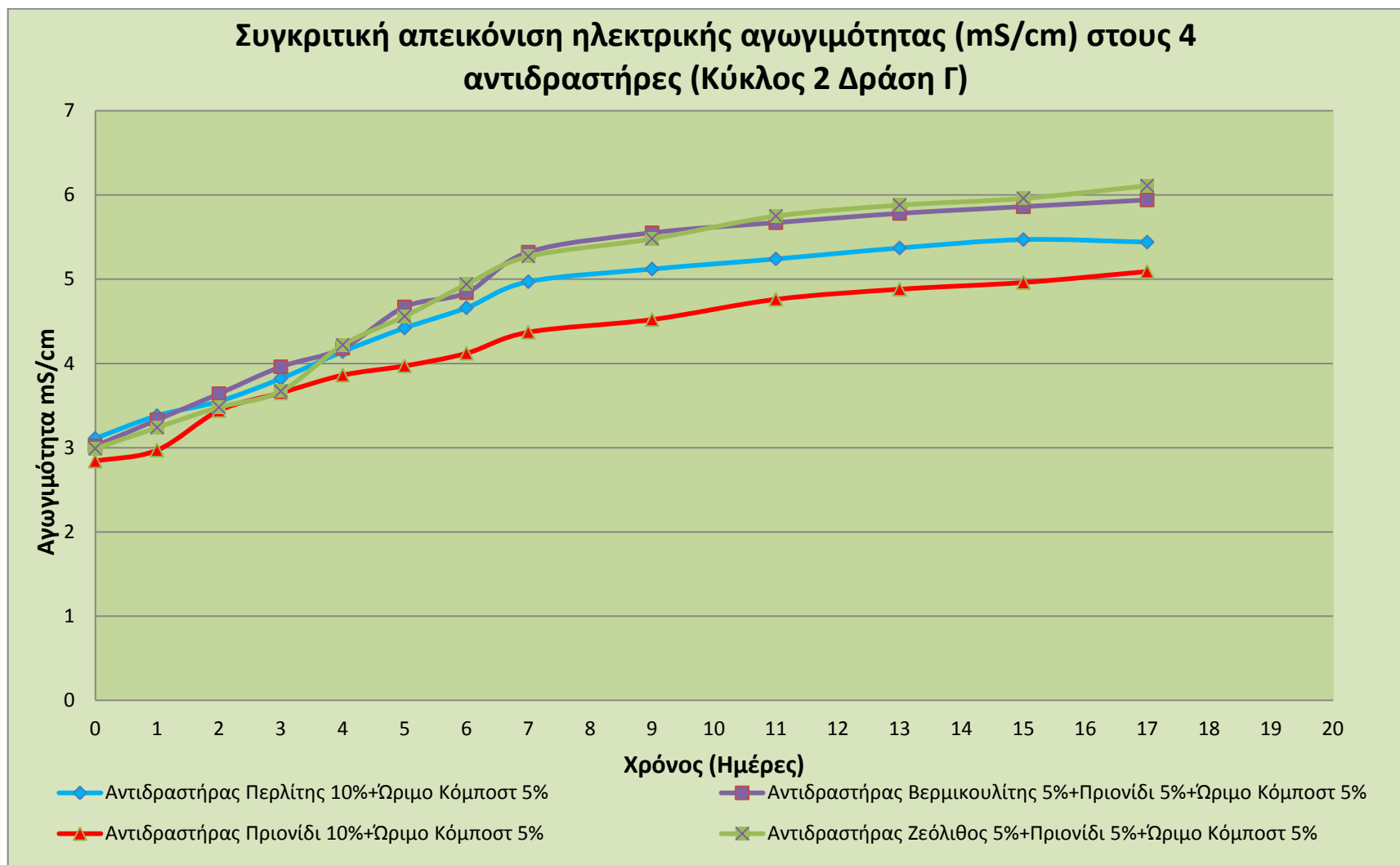
Προσδιορισμός της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του υποστρώματος (Κύκλος 3 Δράση Γ)

Στο διάγραμμα 5.102 παρουσιάζεται η εξέλιξη της τιμής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για τους αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου.

Οι καμπύλες της αγωγιμότητας στους αντιδραστήρες παρουσιάζουν αύξουσα πορεία. Ξεκινούν από χαμηλές αρχικές τιμές 3,11, 3,02, 2,84, 2,99 mS/cm για τους αντιδραστήρες με περλίτη, βερμικουλίτη-πριονίδι, πριονίδι, ζεόλιθο-πριονίδι αντίστοιχα (με ποσότητα 5%κ.β. αντίστοιχου ώριμου κόμποστ σε όλους τους αντιδραστήρες) και, έχοντας σταθερή ανοδική πορεία, καταλήγουν στις τιμές 5,51, 6,13, 5,21 και 6,27 mS/cm αντίστοιχα.

Πίνακας 5.117 Τιμές αγωγιμότητας για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου Δράσης Γ (mS/cm)

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
0	3,11	3,02	2,84	2,99
1	3,38	3,33	2,97	3,24
2	3,55	3,64	3,44	3,48
3	3,82	3,96	3,65	3,67
4	4,14	4,18	3,86	4,22
5	4,42	4,67	3,97	4,56
6	4,66	4,84	4,12	4,94
7	4,97	5,32	4,37	5,27
9	5,12	5,55	4,52	5,48
11	5,24	5,67	4,76	5,75
13	5,37	5,94	4,95	6,04
15	5,55	6,07	5,14	6,18
17	5,51	6,13	5,21	6,27



Διάγραμμα 5.102 Συγκριτική απεικόνιση ηλεκτρικής αγωγιμότητας στους 4 αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου δράσης Γ

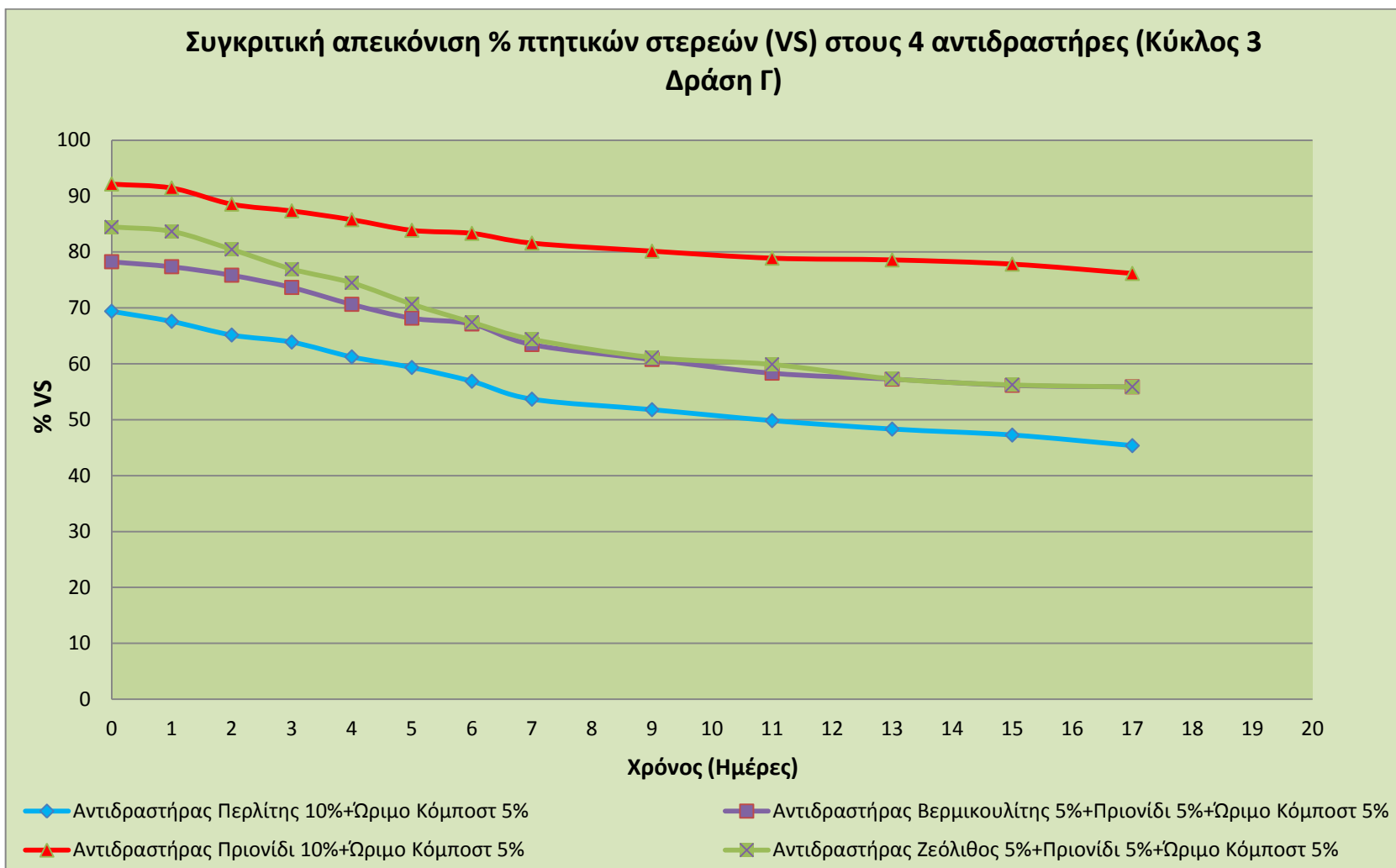
Προσδιορισμός των πτητικών στερεών (VS) στο υπόστρωμα (Κύκλος 3 Δράση Γ)

Στο διάγραμμα 5.103 παρατηρούμε πως στους αντιδραστήρες με περλίτη-ώριμο κόμποστ και βερμικουλίτη-πριονίδι-ώριμο κόμποστ η μεγαλύτερη μείωση των πτητικών στερεών παρατηρείται από την 1^η έως την 7^η ημέρα, περίοδο κατά την οποία εμφανίζονται και οι υψηλότερες θερμοκρασίες (θερμόφιλη φάση), ως αποτέλεσμα της έντονης μεταβολικής δραστηριότητας στη φάση αυτή. Η μεγαλύτερη αρχική τιμή του ποσοστού των πτητικών παρατηρείται στον αντιδραστήρα με πρόσθετο πριονίδι, ενώ η μικρότερη στον αντιδραστήρα με πρόσθετο περλίτη λόγω απουσίας πριονιδιού. Παρατηρείται επίσης, ότι στον αντιδραστήρα με πρόσθετο πριονιδιού υπάρχει η μικρότερη κατανάλωση πτητικών η οποία επαληθεύεται και από την καμπύλη του οργανικού άνθρακα. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα πιθανής μη ορθής ανάπτυξης των διεργασιών. Αντίθετα, στους άλλους τρεις αντιδραστήρες και κυρίως στον αντιδραστήρα με πρόσθετο περλίτη παρατηρείται ταχεία μείωση των πτητικών στερεών και σταθεροποίηση τους μετά το πέρας της διεργασίας. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ορθής διεξαγωγής των διεργασιών της κομποστοποίησης.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές των πτητικών στερεών για όλους τους αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου της Δράσης Γ.

Πίνακας 5.118 Τιμές % πτητικών στερεών για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου Δράσης Γ

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
0	69,39	78,25	92,15	84,47
1	67,58	77,36	91,44	83,66
2	65,14	75,84	88,55	80,44
3	63,87	73,65	87,34	76,93
4	61,22	70,63	85,77	74,47
5	59,33	68,16	83,87	70,66
6	56,86	67,12	83,32	67,42
7	53,66	63,44	81,57	64,38
9	51,78	60,77	80,14	61,15
11	49,82	58,32	78,88	59,89
13	48,31	57,26	78,57	57,32
15	47,24	56,15	77,81	56,24
17	45,35	55,87	76,15	55,88



Διάγραμμα 5.103 Συγκριτική απεικόνιση % πτητικών στερεών (VS) στους 4 αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου Δράσης Γ

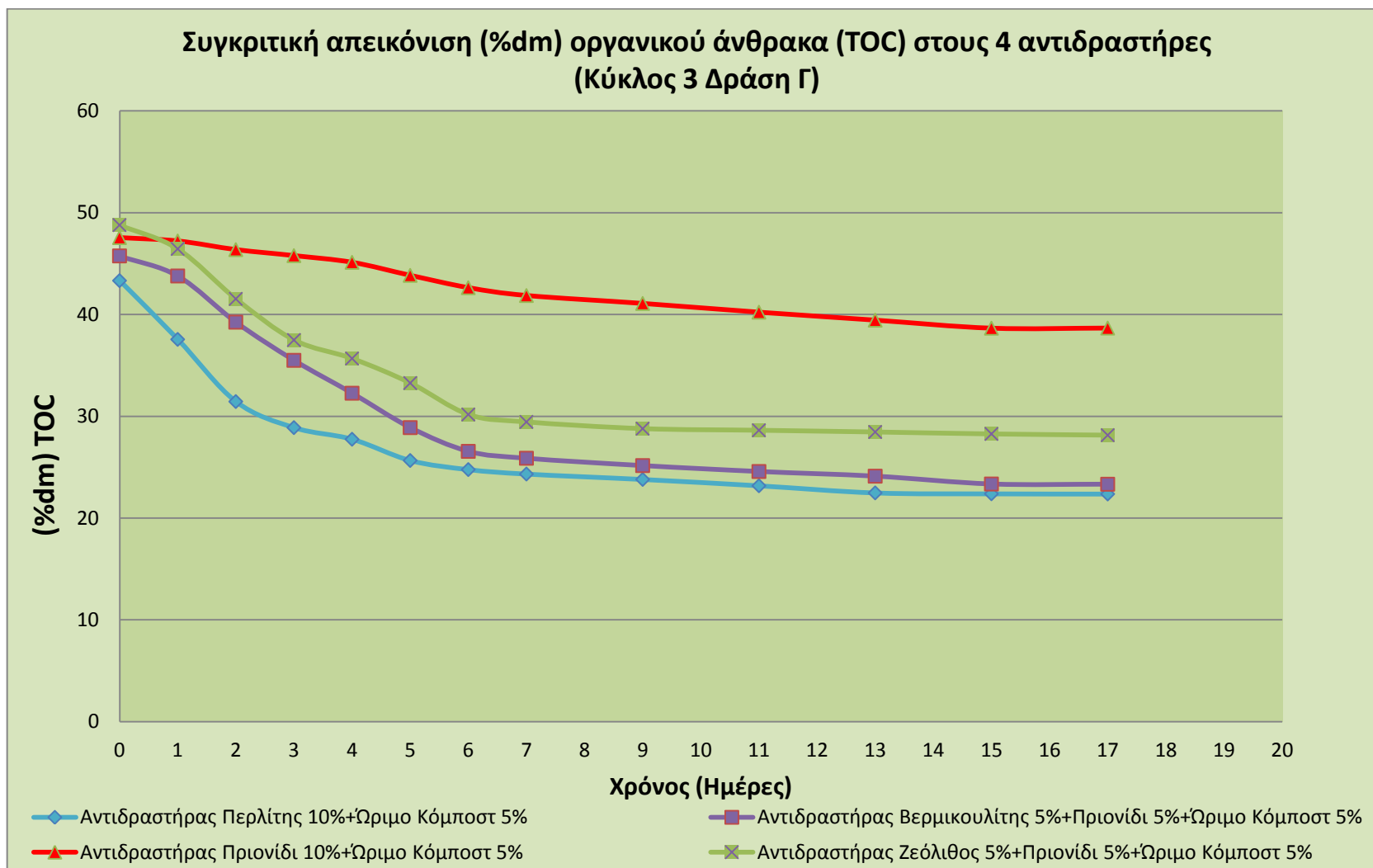
Προσδιορισμός του ολικού οργανικού άνθρακα στο υπόστρωμα (Κύκλος 3 Δράση Γ)

Στο διάγραμμα 5.104 παρουσιάζεται η εξέλιξη της αποδόμησης του οργανικού άνθρακα για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου της Δράσης Γ. Ο αντιδραστήρας με τον περλίτη και ώριμο κόμποστ, ξεκινά από τη τιμή 43,32% και με φθίνουσα πορεία φθάνει την 17^η μέρα στο 22,36%. Σχετικά με τον αντιδραστήρα με βερμικουλίτη, πριονίδι και ώριμο κόμποστ, ο ολικός οργανικός άνθρακας ξεκινάει από 45,75% και φθίνει με πολύ γρήγορο ρυθμό λόγω της βιοαποδόμησης. Τελικά σταθεροποιείται στο 23,32% τη 17^η ημέρα. Η συνολική μείωση του περιεχόμενου οργανικού άνθρακα στο υπόστρωμα ανέρχεται στο 22,25% για τις πρώτες 17 μέρες από την έναρξη της διεργασίας της κομποστοποίησης. Ο αντιδραστήρας με το πριονίδι και το ώριμο κόμποστ, ξεκινά από την τιμή 47,55 % και με φθίνουσα πορεία φθάνει τη 17^η μέρα στο 38,66% γεγονός που σημαίνει ότι το τελικό προϊόν διατηρεί μεγάλη ποσότητα άνθρακα. Ο ολικός οργανικός άνθρακας για τον αντιδραστήρα με ζεόλιθο, πριονίδι και ώριμο κόμποστ ξεκινάει από 48,78% και φθίνει με πολύ γρήγορο ρυθμό λόγω της βιοαποδόμησης της οργανικής ύλης. Τελικά τη 17^η ημέρα από την έναρξη του κύκλου η περιεκτικότητα του υποστρώματος σε οργανικό άνθρακα σταθεροποιείται στο 28,14% παρουσιάζοντας μια συνολική μείωση κατά 20,64%.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές του ολικού οργανικού άνθρακα (%) για όλους τους αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου της Δράσης Γ.

Πίνακας 5.119 Τιμές TOC (%) για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου Δράσης Γ

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
0	43,32	45,75	47,55	48,78
1	37,55	43,78	47,22	46,44
2	31,44	39,24	46,37	41,53
3	28,88	35,49	45,78	37,49
4	27,74	32,26	45,12	35,67
5	25,65	28,88	43,84	33,26
6	24,76	26,55	42,63	30,17
7	24,32	25,87	41,86	29,44
9	23,79	25,15	41,08	28,78
11	23,17	24,57	40,22	28,62
13	22,47	24,11	39,44	28,45
15	22,38	23,34	38,65	28,26
17	22,36	23,32	38,66	28,14



Διάγραμμα 5.104 Συγκριτική απεικόνιση (%dm) οργανικού άνθρακα TOC στους 4 αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου της Δράσης Γ

Πρέπει να σημειωθεί ότι η μείωση του συνολικού οργανικού άνθρακα στην περίπτωση της χρήσης ορυκτών ήταν σαφέστατα μεγαλύτερη απ' ό τι στον αντιδραστήρα που περιείχε μόνο πριονίδι. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι η χρήση ορυκτών επιβροθεί την βιοαποδόμηση της οργανικής ύλης. Σε συνδυασμό με την προσθήκη ώριμου κόμποστ η βιοαποδόμηση επιταχύνεται επιπλέον, ενώ παράλληλα βελτιώνονται οι συνθήκες αερισμού και ύγρανσης του υποστρώματος κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης. Παρατηρείται επίσης, ότι στον αντιδραστήρα με πρόσθετο πριονίδι και αντίστοιχο ώριμο κόμποστ υπάρχει η μικρότερη κατανάλωση οργανικού άνθρακα η οποία επαληθεύεται και από την καμπύλη των πτητικών. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα πιθανής μη ορθής ανάπτυξης των διεργασιών. Αντίθετα, στους άλλους τρεις αντιδραστήρες και κυρίως στον αντιδραστήρα με πρόσθετο περλίτη παρατηρείται ταχεία μείωση του οργανικού άνθρακα και σταθεροποίηση τους μετά το πέρας της διεργασίας. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ορθής διεξαγωγής των διεργασιών της κομποστοποίησης.

Προσδιορισμός του ολικού αζώτου κατά Kjeldahl στο υπόστρωμα (Κύκλος 3 Δράση Γ)

Παρατηρείται η αύξουσα πορεία του αζώτου σε ποσοστό επί ξηρής μάζας επειδή υπάρχει μεγαλύτερος ρυθμός μείωσης του ποσοστού του οργανικού άνθρακα. Ο αντιδραστήρας με πρόσθετο περλίτη και ώριμο κόμποστ αρχικά έχει 1,55% και έπειτα από την ανοδική πορεία καταλήγει τη 17^η ημέρα στο 2,22%. Ο αντιδραστήρας με πρόσθετα βερμικουλίτη πριονίδι και ώριμο κόμποστ ξεκινά με ποσοστό αζώτου στο 1,68% και ακολουθώντας αύξουσα πορεία καταλήγει στο 2,28% τη 17^η μέρα. Ο αντιδραστήρας με πρόσθετο πριονίδι και ώριμο κόμποστ ξεκινά με ποσοστό αζώτου στο 1,74% διατηρώντας αύξουσα πορεία για να καταλήξει τη 17^η ημέρα στο 2,08%. Ο αντιδραστήρας με ζεόλιθο, πριονίδι και ώριμο κόμποστ ξεκινά με ποσοστό αζώτου στο 1,87% διατηρώντας αύξουσα πορεία για να καταλήξει τη 17^η ημέρα στο 2,81%. Το ποσοστό του αζώτου στον τελευταίο αντιδραστήρα, στο τέλος της διεργασίας είναι αυξημένο σε σχέση με τους υπόλοιπους. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός της ύπαρξης ζεολίθου, που περιορίζει τις απώλειες αζώτου, μέσω της δέσμευσης της αμμωνίας.

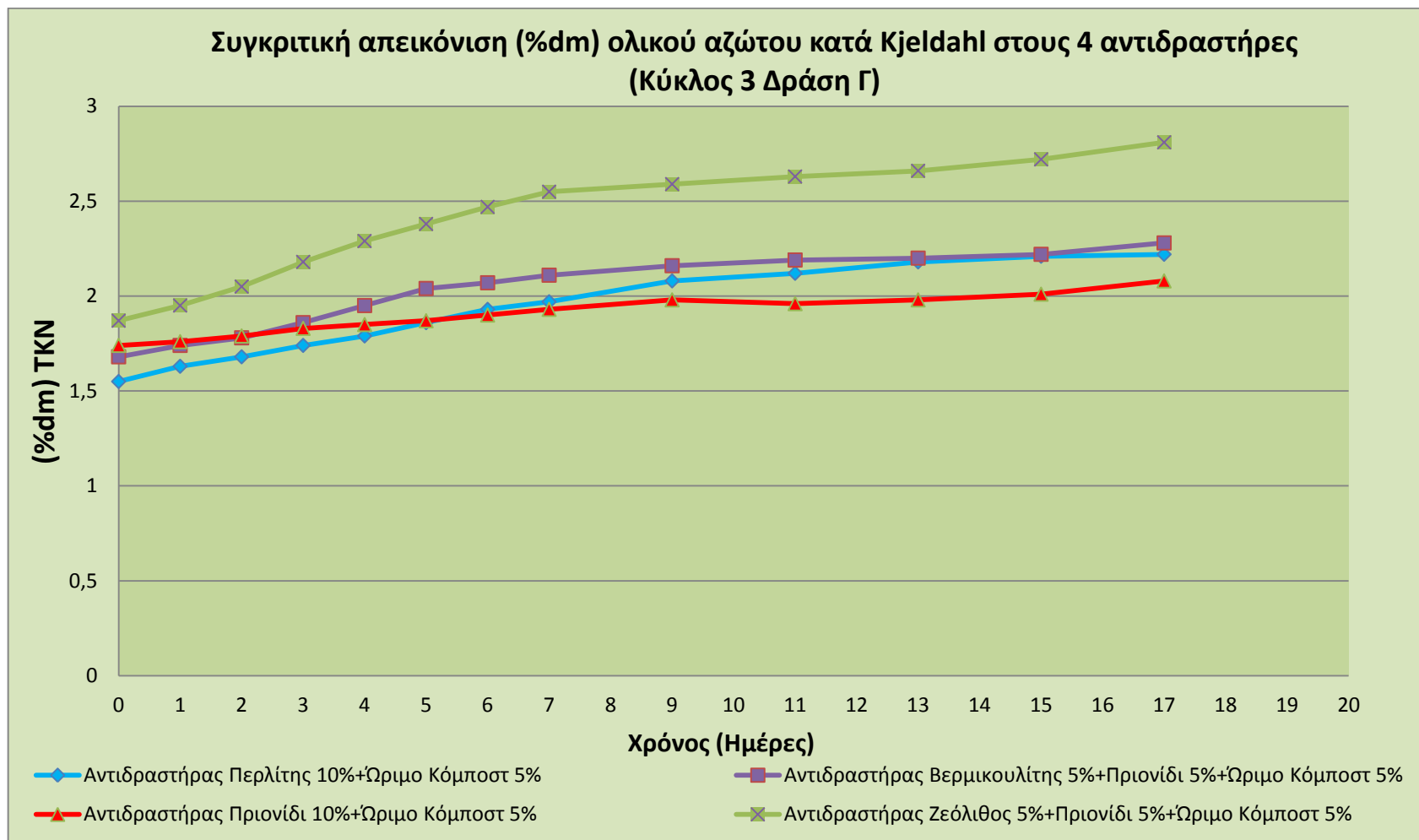
Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές του TKN (%) για όλους τους αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου της Δράσης Γ.

Πίνακας 5.120 Τιμές (%dm) TKN για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου Δράσης Γ

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
0	1,55	1,68	1,74	1,87
1	1,63	1,74	1,76	1,95
2	1,68	1,78	1,79	2,05
3	1,74	1,86	1,83	2,18
4	1,79	1,95	1,85	2,29
5	1,86	2,04	1,87	2,38
6	1,93	2,07	1,9	2,47
7	1,97	2,11	1,93	2,55
9	2,08	2,16	1,98	2,59
11	2,12	2,19	1,96	2,63
13	2,18	2,2	1,98	2,66
15	2,21	2,22	2,01	2,72
17	2,22	2,28	2,08	2,81

Στο διάγραμμα 5.105 παρουσιάζεται η εξέλιξη της % τιμής του ολικού αζώτου κατά Kjeldahl για τους αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου της Δράσης Γ..

Στο διάγραμμα παρατηρείται ξεκάθαρα πως το ποσοστό του αζώτου αυξάνεται συνεχώς καθόλη τη διάρκεια της διεργασίας, και στους τέσσερις αντιδραστήρες, και καθώς το υπόστρωμα μεταβαίνει στη δεύτερη μεσόφιλη φάση, εμφανίζεται επιπλέον σταδιακή αύξηση του περιεχόμενου αζώτου οφειλόμενη τόσο στην απώλεια ολικού άνθρακα, όσο και στην ανάκτηση μέρους των απωλειών του αζώτου ενδεχομένως από τη δράση αζωτοδεσμευτικών βακτηρίων τα οποία επικρατούν σε μεσόφιλες θερμοκρασίες και σε χαμηλές συγκεντρώσεις αμμωνιακών (Insam and de Bertoldi, 2007).



Διάγραμμα 5.105 Συγκριτική απεικόνιση του % ολικού αζώτου κατά kjeldahl στους 4 αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου της Δράσης Γ

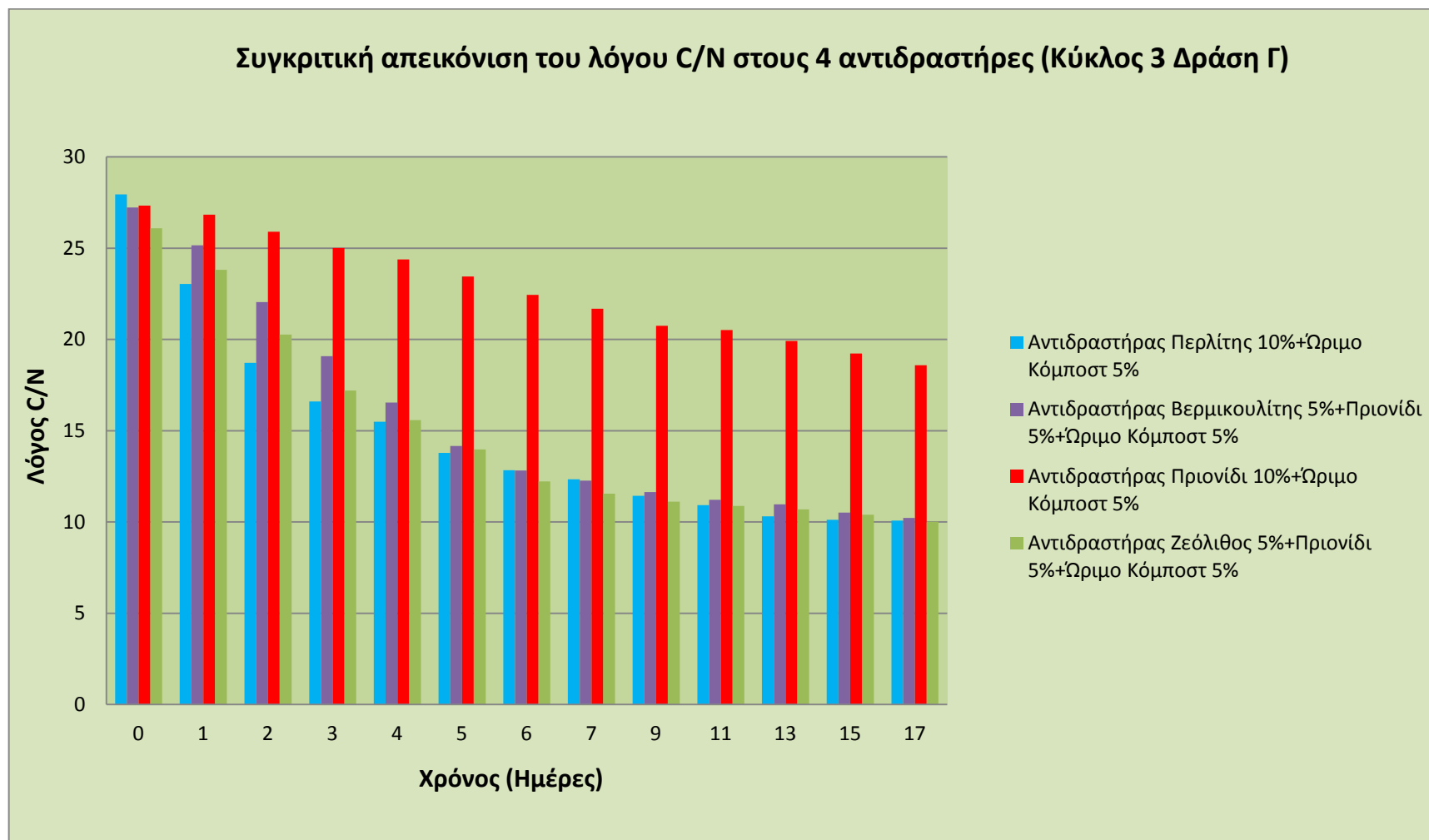
Προσδιορισμός του λόγου C/N στο υπόστρωμα (Κύκλος 3 Δράση Γ)

Στο διάγραμμα 5.106 παρουσιάζεται το προφίλ της εξέλιξης του λόγου C/N των υποστρωμάτων για όλους τους αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου της Δράσης Γ. Ο αντιδραστήρας με περλίτη και ώριμο κόμποστ ξεκινά με λόγο 27,95. Παρουσιάζεται μείωση και ο λόγος πέφτει κάτω από την τιμή 20, και συγκεκριμένα στο 18,71 από τη 2^η μέρα. Ο αντιδραστήρας με βερμικουλίτη, πριονίδι και ώριμο κόμποστ ξεκινά με λόγο 27,23. Ακολουθεί μείωση και μάλιστα από την 3^η μέρα ο λόγος πέφτει κάτω από το 20 και συγκεκριμένα στο 19,08. Ο αντιδραστήρας με πριονίδι και ώριμο κόμποστ ξεκινά με λόγο 27,33 και μειώνεται μέχρι την τιμή 18,59 τη 17^η μέρα. Τέλος, ο αντιδραστήρας με ζεόλιθο, πριονίδι και ώριμο κόμποστ έχει αρχική τιμή 26,09. Παρατηρείται ταχεία μείωση του λόγου και σταθεροποίηση αυτού την 17^η ημέρα. Από την 3^η ημέρα ο λόγος έχει πέσει κάτω από την τιμή 20 και συγκεκριμένα στο 17,2. Όπως παρατηρείται το ώριμο κόμποστ βοηθάει στη διαδικασία της ταχείας αποδόμησης της οργανικής ύλης, γεγονός που επιβεβαιώνεται από την άμεση πτώση του λόγου C/N των υποστρωμάτων από τις πρώτες κιόλας ημέρες της διεργασίας. Εξείρεση αποτελεί ο αντιδραστήρας στον οποίο δε χρησιμοποιήθηκε κάποιο ορυκτό, ως πρόσθετο.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές της αναλογίας C/N για όλους τους αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου.

Πίνακας 5.121 Τιμές C/N για τους αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου Δράσης Γ

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
1	27,95	27,23	27,33	26,09
1	23,04	25,16	26,83	23,82
2	18,71	22,04	25,91	20,26
3	16,6	19,08	25,02	17,2
4	15,5	16,54	24,39	15,58
5	13,79	14,16	23,44	13,97
6	12,83	12,83	22,44	12,21
7	12,35	12,26	21,69	11,55
9	11,44	11,64	20,75	11,11
11	10,93	11,22	20,52	10,88
13	10,31	10,96	19,92	10,7
15	10,13	10,51	19,23	10,39
17	10,07	10,23	18,59	10,01



Διάγραμμα 5.106 Συγκριτική απεικόνιση του λόγου C/N στους 4 αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου της Δράσης Γ

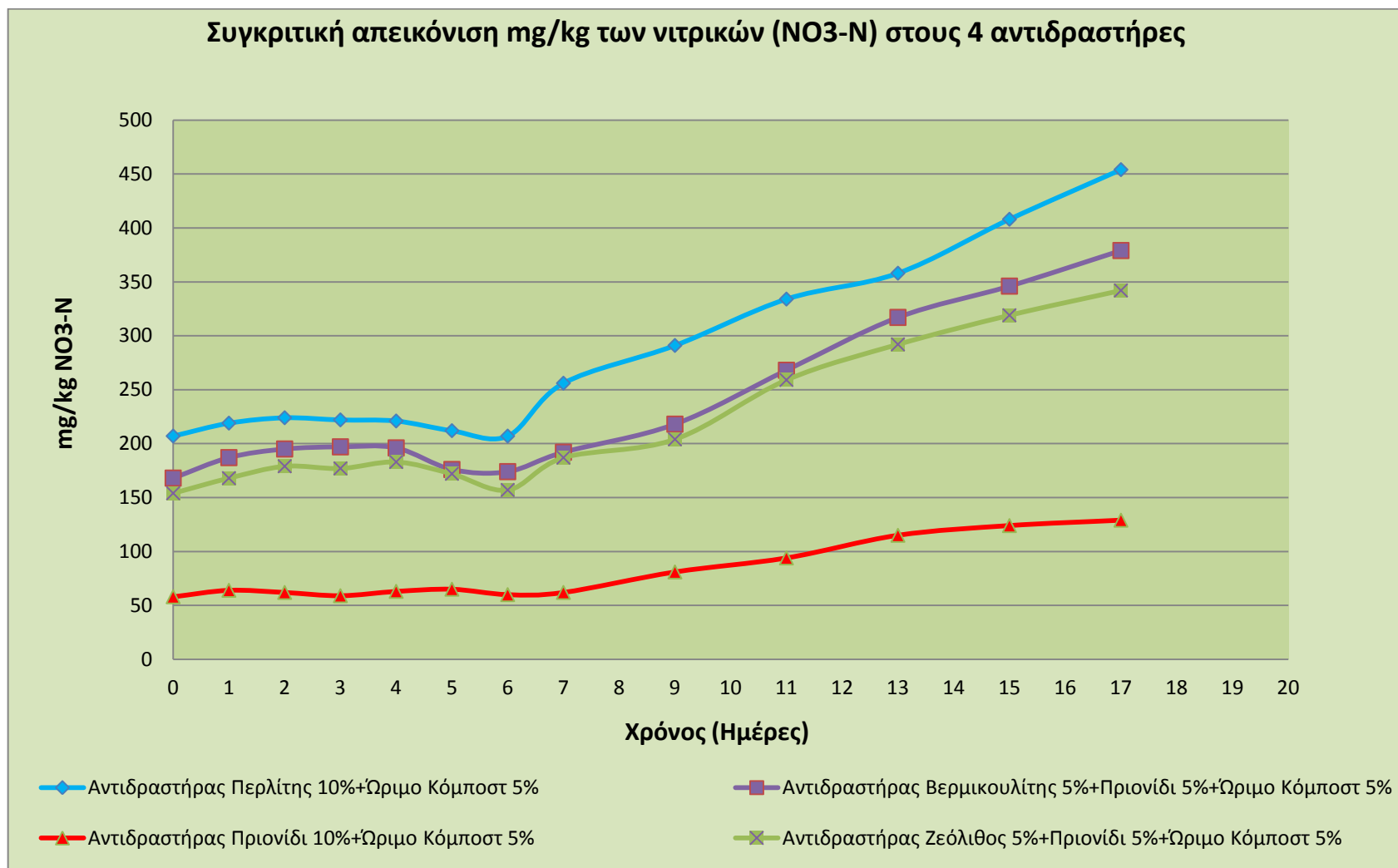
Προσδιορισμός νιτρικών ($NO_3^- - N$) και αμμωνιακών ($NH_4^+ - N$) στο υπόστρωμα (Κύκλος 3 Δράση Γ)

Ακολουθεί συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων των νιτρικών ($NO_3^- - N$) του υποστρώματος και για τους τέσσερις αντιδραστήρες που χρησιμοποιήθηκαν στον τρίτο πειραματικό κύκλο της Δράσης Γ. Στο διάγραμμα παρατηρείται ξεκάθαρα πως με το πέρας της θερμοφιλικής φάσης, ξεκινά η αποδόμηση των αμμωνιακών σε όλους τους αντιδραστήρες του τρίτου πειραματικού κύκλου της Δράσης Γ, με εξαίρεση τον αντιδραστήρα που δεν προστέθηκε κάποιο ορυκτό.

Στον πίνακα 5.122 παρατίθενται οι τιμές των νιτρικών για τους τέσσερις αντιδραστήρες του πρώτου κύκλου.

Πίνακας 5.122 Τιμές $NO_3^- - N$ σε mg/kg για τους τρεις αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου Δράσης Γ

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
0	207	168	58	154
1	219	187	64	168
2	224	195	62	179
3	222	197	59	177
4	221	196	63	183
5	212	176	65	172
6	207	174	60	157
7	256	192	62	187
9	291	218	81	204
11	334	268	94	259
13	358	317	115	292
15	408	346	124	319
17	454	379	129	342



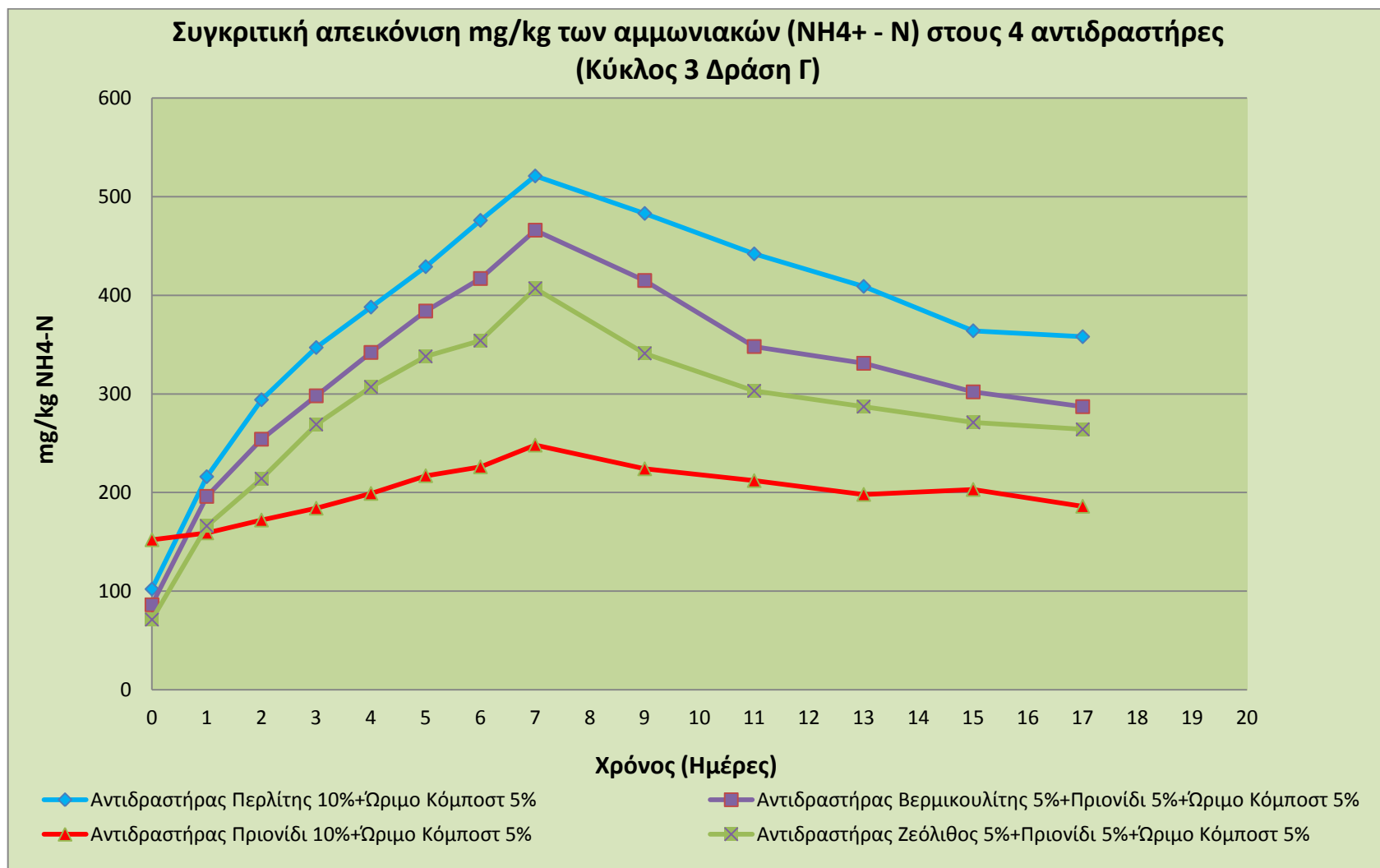
Διάγραμμα 5.107 Συγκριτική απεικόνιση των νιτρικών $NO_3^- - N$ στους 4 αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου Δράσης Γ

Στο διάγραμμα 5.108 παρατηρείται η αναμενόμενη αύξηση των αμμωνιακών κατά τη θερμόφιλη φάση, σε όλους τους αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου της Δράσης Γ (στον αντιδραστήρα που δεν προστέθηκε ορυκτό η αύξηση της συγκέντρωσης των αμμωνιακών πραγματοποιείται σε πολύ μικρό επίπεδο), που προκύπτει από τη διάσπαση της οργανικής ύλης. Μετά το πέρας της θερμόφιλης φάσης η συγκέντρωση των αμμωνιακών μειώνεται, καθώς ένα μέρος τους μετατρέπεται σε νιτρικά, μέσω της απονιτροποίησης και ένα μικρότερο μέρος τους διφεύγει στην ατμόσφαιρα με τη μορφή της αμμωνίας. Προφανώς μικρότερη μείωση των αμμωνιακών παρατηρείται στον αντιδραστήρα που προστέθηκε επιπλέον ζεόλιθος, λόγω της ικανότητας του ζεόλιθου να συγκρατεί τα αμμωνιακά ιόντα. Στον αντιδραστήρα που δεν προστέθηκε κάποιο ορυκτό η διάσπαση των αζωτούχων ενώσεων κατά τη θερμόφιλη φάση δεν εξελίχθηκε ομαλά, με αποτέλεσμα η παραγωγή των αμμωνιακών να είναι πολύ μικρή, ενώ εξίσου μικρή είναι και η μετατροπή τους σε νιτρικά, μετά το πέρας της θερμόφιλης φάσης, ενδεικτικό της μη ορθής διεξαγωγής της διεργασίας. Τα διαγράμματα 5.96 και 5.97 είναι ενδεικτικά της ορθής εξέλιξης της διεργασίας της κομποστοποίησης και για τους τρεις αντιδραστήρες. Στον πίνακα 5.123 παρατίθενται οι τιμές των αμμωνιακών για τους τρεις αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου της Δράσης Γ.

Πίνακας 5.123 Τιμές $NH_4^+ - N$ σε mg/kg για τους τρεις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Γ

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
0	102	86	152	71
1	216	196	159	166
2	294	254	172	214
3	347	298	184	269
4	388	342	199	307
5	429	384	217	338
6	476	417	226	354
7	521	466	248	407
9	483	415	224	341
11	442	348	212	303
13	409	331	198	287
15	364	302	203	271
17	358	287	186	264

Συμπερασματικά από τον τρίτο κύκλο πειραμάτων φαίνεται ξεκάθαρα πως η διεργασία και στους τρεις αντιδραστήρες ακολούθησε ορθή πορεία, παράγοντας ένα τελικό προϊόν με πολύ καλές ιδιότητες. Η προσθήκη ζεόλιθου και βερμικουλίτη βοήθησε ακόμα περισσότερο τη διεργασία βελτιώνοντας περαιτέρω τις ιδιότητες του τελικού προϊόντος.



Διάγραμμα 5.108 Συγκριτική απεικόνιση των αμμωνιακών NH₄⁺ - N στους 4 αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου Δράσης Γ

5.2.2.3.4 Τέταρτος Πειραματικός Κύκλος Δράσης Γ

Ο τέταρτος πειραματικός κύκλος της Δράσης Γ, όπως προαναφέρθηκε, έχει ακριβώς τον ίδιο στόχο με τον τρίτο, με τη διαφορά πως όλα τα πειράματα διεξάγονται πανομοιότυπα, αλλά με αρχικό λόγο C/N στο υπόστρωμα κοντά στο 40.

Τροφοδοσία των αντιδραστήρων

Στον πίνακα 5.124 παρουσιάζονται τα υλικά τροφοδοσίας για κάθε ένα από τους τέσσερις αντιδραστήρες. Οι τιμές του πίνακα είναι σε γραμμάρια.

Η τροφοδοσία έγινε με γνώμονα να διατηρηθεί η αρχική αναλογία C/N κοντά στο 40. Για να επιτευχθεί ο συγκεκριμένος λόγος υπολογίστηκε θεωρητικά η εξής αναλογία:

- 80% κυτταρινούχων συστατικών (μαρούλι, σπανάκι, πορτοκάλια και λεμόνια)
- 10% πρωτεϊνούχων συστατικών (ρεβύθια και φασόλια βρασμένα)
- 10% υδατανθρακούχων συστατικών (ψωμί)

Σε κάθε αντιδραστήρα έγινε προσθήκη κάποιου πρόσθετου.

- Στον πρώτο αντιδραστήρα προστέθηκε περλίτης ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας, καθώς και 5% ώριμο κόμποστ ίδιας αρχικής αναλογίας C/N που περιείχε 10% επιπρόσθετα περλίτη. Σύνολο προσθέτων 15%κ.β.
- Στο δεύτερο αντιδραστήρα προστέθηκε βερμικουλίτης ποσότητας ίσης με το 5% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας, πριονίδι 5% καθώς και 5% ώριμο κόμποστ ίδιας αρχικής αναλογίας C/N που περιείχε επιπρόσθετα βερμικουλίτη σε ποσοστό 5% και πριονίδι 5%. Σύνολο προσθέτων 15%κ.β.
- Στον τρίτο αντιδραστήρα προστέθηκε πριονίδι ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας, καθώς και 5% ώριμο κόμποστ ίδιας αρχικής αναλογίας C/N που περιείχε 10% επιπρόσθετα πριονίδι. Σύνολο προσθέτων 15%κ.β.
- Στον τέταρτο αντιδραστήρα προστέθηκε ζεόλιθος ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας, καθώς και 5% ώριμο κόμποστ ίδιας αρχικής αναλογίας C/N που περιείχε 10% επιπρόσθετα ζεόλιθο. Σύνολο προσθέτων 15%κ.β.

Πίνακας 5.124 Τροφοδοσία σε g των αντιδραστήρων του τέταρτου κύκλου της Δράσης Γ

Αντιδραστήρας	Ημέρα	Κυτταρινούχα				Πρωτεΐνες		Υδατάνθρακες		Ορυκτό			Ωριμο Κόμποστ	Σύνολο	Τελικό Σύνολο
		Μαρούλι	Σπανάκι	Πορτοκάλι	Λεμόνι	Ρεβύθι	Φασόλι	Ψωμί	Περλίτης	Βερμικουλίτης	Πριονίδι	Ζεόλιθος			
1	1	2500	2500	2000	1000	500	500	1000	1000				500	11500	16100
	1	600	600	200	200	100	100	200	200				100	2300	
	2	600	600	200	200	100	100	200	200				100	2300	
2	1	2500	2500	2000	1000	500	500	1000		500	500		500	11500	16100
	1	600	600	200	200	100	100	200		100	100		100	2300	
	2	600	600	200	200	100	100	200		100	100		100	2300	
3	1	2500	2500	2000	1000	500	500	1000			1000		500	11500	16100
	1	600	600	200	200	100	100	200			200		100	2300	
	2	600	600	200	200	100	100	200			200		100	2300	
4	1	2500	2500	2000	1000	500	500	1000			500	500	500	11500	16100
	1	600	600	200	200	100	100	200			100	100	100	2300	
	2	600	600	200	200	100	100	200			100	100	100	2300	

Δειγματοληψία – Απώλεια μάζας

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων του τέταρτου κύκλου της Δράσης Γ και συγκεκριμένα των πρώτων επτά ημερών γινόταν καθημερινή δειγματοληψία από τους τέσσερις αντιδραστήρες. Ακολούθησαν άλλες έξι δειγματοληψίες ανά δύο ημέρες. Η θερμοκρασία ήταν η μόνη παράμετρος που μετρήθηκε σε καθημερινή βάση.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η μάζα του υλικού που αφαιρέθηκε σε κάθε αντιδραστήρα τις μέρες της δειγματοληψίας. Οι τιμές του πίνακα είναι σε γραμμάρια.

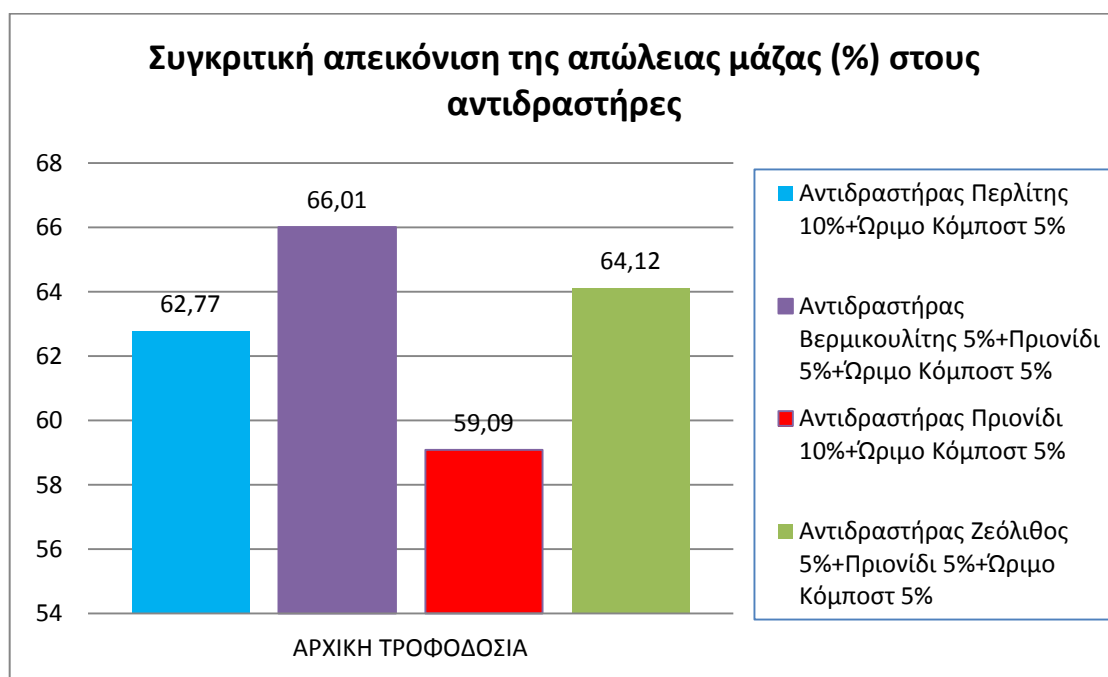
Πίνακας 5.125 Δειγματοληψία από τους αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου Δράσης Γ

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
1	112,34	138,92	132,59	154,92
2	125,86	128,4	127,38	163,28
3	129,05	128,58	155,62	138,27
4	130,23	152,74	137,21	132,75
5	134,9	139,49	162,54	144,24
6	128,94	147,25	122,16	127,58
7	145,74	126,36	163,85	156,63
9	156,92	159,31	148,47	134,29
11	128,87	162,18	130,31	147,11
13	136,26	136,72	158,36	152,88
15	153,82	154,93	148,72	123,42
17	150,38	147,43	143,84	137,73
Σύνολο	1633,31	1722,31	1731,05	1713,1

Οι ποσότητες που αφαιρέθηκαν από κάθε αντιδραστήρα σε συνδυασμό, με τις λοιπές απώλειες (π.χ. υγρασία), την αρχική τροφοδοσία, και την ζύγιση του τελικού προϊόντος μας δίνουν το επί τις εκατό ποσοστό απώλειας μάζας στον κάθε αντιδραστήρα. Αναλυτικότερα τα δεδομένα παρουσιάζονται στον πίνακα 5.126 και στο διάγραμμα 5.109

Πίνακας 5.126 Ποσοστό % συνολικής μείωσης της μάζας σε κάθε αντιδραστήρα του δεύτερου κύκλου

	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
Αρχική Τροφοδοσία	16100.00g	16100.00g	16100.00g	16100.00g
Σύνολο Δειγματοληψίας	1633.31g	1722.31	1731.05g	1713.10g
Θεωρητικά στον αντιδραστήρα	14466.69g	14377.69gg	14368.95g	14386.90g
Πραγματικά στον αντιδραστήρα	5386.00g	4887.00g	5878.32g	5161.48g
Ποσοστό μείωσης της μάζας	62.77%	66.01%	59.09%	64.12%



Διάγραμμα 5.109 Συγκριτική απεικόνιση της % απώλειας μάζας στους 4 αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου Δράσης Γ.

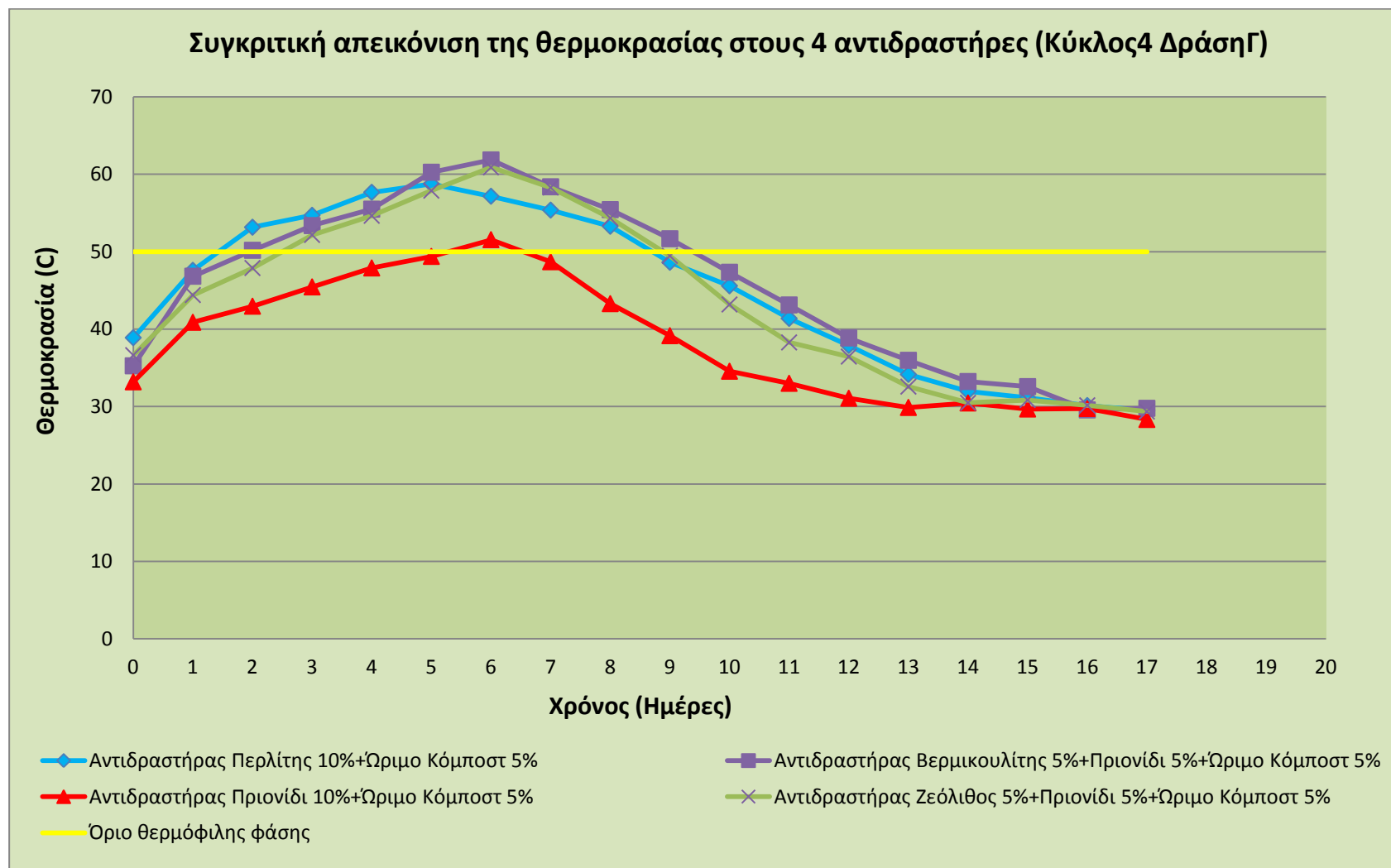
Προσδιορισμός της θερμοκρασίας του υποστρώματος (Κύκλος 4 Δράση Γ)

Στο διάγραμμα 5.110 διακρίνονται τα τρία μεταβατικά στάδια της διεργασίας. Σχετικά με τον αντιδραστήρα με πρόσθετο περλίτη και ώριμο κόμποστ η θερμοφίλη φάση ξεκίνησε με το πέρας της 1^{ης} μέρας και κράτησε μέχρι την 9^η μέρα. Η μέγιστη θερμοκρασία που σημειώθηκε ήταν 58,74 °C. Για τον αντιδραστήρα με πρόσθετο βερμικουλίτη, πριονίδι και ώριμο κόμποστ η θερμοφίλη φάση ξεκίνησε από τη 2^η μέρα και κράτησε μέχρι και την 9^η. Η μέγιστη θερμοκρασία που σημειώθηκε ήταν 61,84 °C. Για τον αντιδραστήρα με πρόσθετο πριονίδι και ώριμο κόμποστ η θερμοφίλη φάση κράτησε μόνο μία μέρα, την 6^η. Η μέγιστη θερμοκρασία που σημειώθηκε ήταν 51,54 °C. Στη συνέχεια η διεργασία πέρασε στην δεύτερη μεσόφιλη φάση στην οποία η θερμοκρασία σταθεροποιήθηκε σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Όσον αφορά τον αντιδραστήρα με πρόσθετο ζεόλιθο, πριονίδι και ώριμο κόμποστ η θερμοφίλη φάση ξεκίνησε από την 2^η μέρα και κράτησε μέχρι και την 9^η. Η μέγιστη θερμοκρασία που σημειώθηκε ήταν 60,88 °C. Εν συνεχεία, η διεργασία πέρασε στη δεύτερη μεσόφιλη φάση στην οποία η θερμοκρασία σταθεροποιήθηκε σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές της θερμοκρασίας για όλους τους αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου Δράσης Γ.

Πίνακας 5.127 Τιμές θερμοκρασίας (°C) για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου Δράσης Γ

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
0	38,88	35,25	33,18	36,62
1	47,58	46,82	40,87	44,39
2	53,15	50,17	42,95	47,88
3	54,69	53,36	45,44	52,15
4	57,66	55,48	47,89	54,63
5	58,74	60,25	49,38	57,87
6	57,15	61,84	51,54	60,88
7	55,36	58,37	48,69	58,27
8	53,27	55,42	43,28	54,32
9	48,62	51,66	39,14	49,45
10	45,58	47,33	34,55	43,17
11	41,37	43,11	32,99	38,27
12	37,88	38,84	31,06	36,44
13	34,14	35,96	29,87	32,56
14	31,96	33,22	30,45	30,47
15	31,14	32,56	29,67	30,84
16	30,12	29,55	29,74	30,15
17	29,48	29,76	28,32	29,34



Διάγραμμα 5.110 Συγκριτική απεικόνιση θερμοκρασίας στους 4 αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου της Δράσης Γ

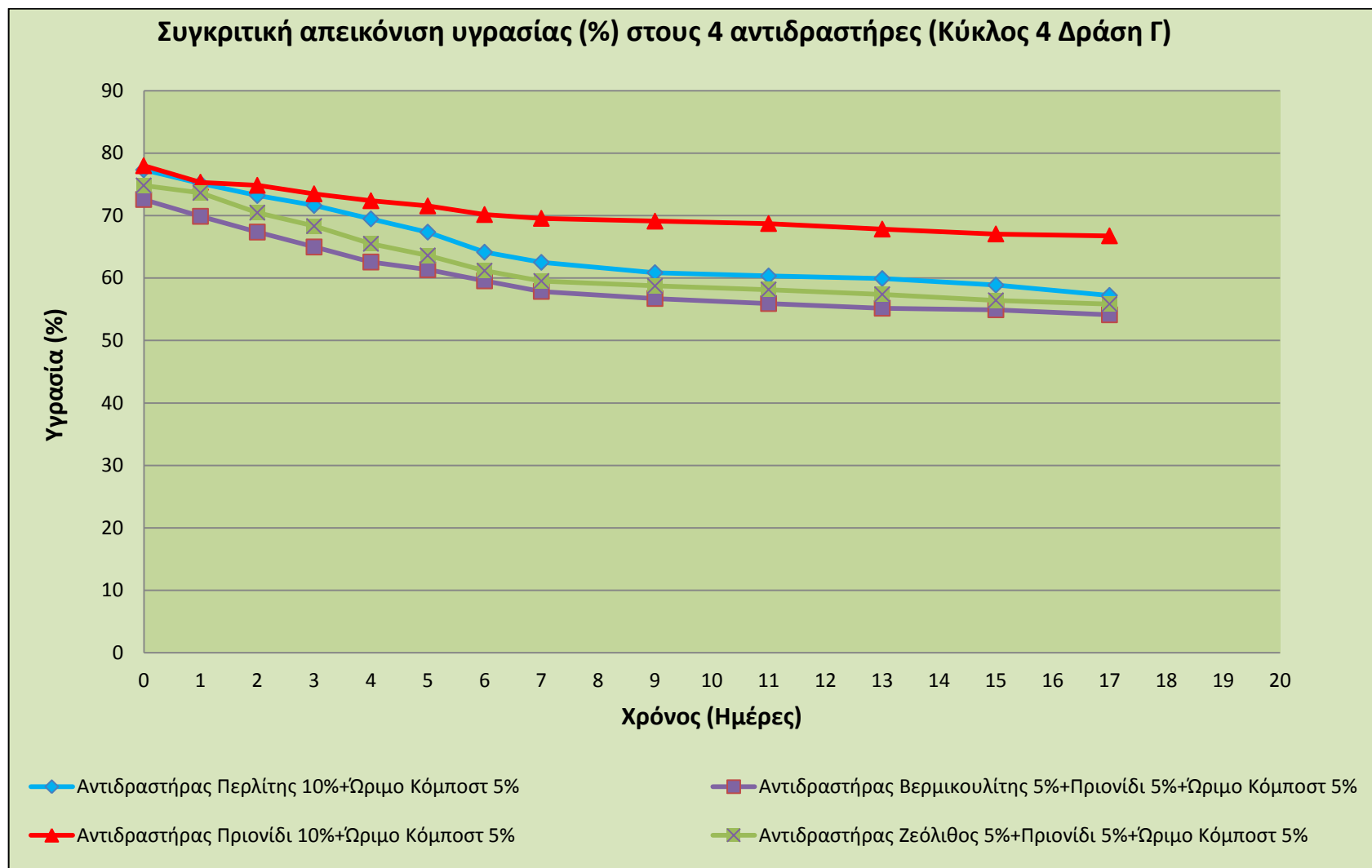
Προσδιορισμός της υγρασίας του υποστρώματος (Κύκλος 4 Δράση Γ)

Οι καμπύλες της υγρασίας και στους τέσσερις αντιδραστήρες ξεκινούν από υψηλά αρχικά επίπεδα πάνω από 70% (διάγραμμα 5.111), γεγονός αναμενόμενο λόγω της υψηλής υγρασίας του υλικού που χρησιμοποιήθηκε ως αρχικό υπόστρωμα. Συγκεκριμένα η αρχική υγρασία στους αντιδραστήρες ήταν αντιστοίχως 77,32%, 72,58%, 77,98%, 74,82%. Στη συνέχεια λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται από τη θερμότητα που εκλύεται μέσω των βιολογικών διεργασιών, μειώνονται τα ποσοστά υγρασίας στο υπόστρωμα, με αποτέλεσμα να ακολουθούν φθίνουσα πορεία και στο τέλος της διεργασίας λαμβάνουν ποσοστά 57,22%, 54,12%, 66,76% και 55,84%. Το μεγαλύτερο τελικό ποσοστό υγρασίας εμφανίζεται στον αντιδραστήρα που δεν προστέθηκε ορυκτό. Το γεγονός αυτό οφείλεται μάλλον στην μη ορθή διεργασία της κομποστοποίησης στον εν λόγω αντιδραστήρα.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές της υγρασίας (%) για όλους τους αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου της Δράσης Γ.

Πίνακας 5.128 Τιμές υγρασίας (%) για τους τέσσερις αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
0	77,32	72,58	77,98	74,82
1	75,15	69,88	75,34	73,64
2	73,21	67,36	74,85	70,47
3	71,62	64,97	73,49	68,32
4	69,47	62,56	72,38	65,48
5	67,35	61,34	71,55	63,61
6	64,14	59,55	70,17	61,17
7	62,51	57,86	69,56	59,52
9	60,86	56,73	69,11	58,74
11	60,34	55,92	68,73	58,15
13	59,92	55,17	67,84	57,39
15	58,88	54,92	67,06	56,43
17	57,22	54,12	66,76	55,84



Διάγραμμα 5.111 Συγκριτική απεικόνιση % υγρασίας στους 4 αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου Δράσης Γ

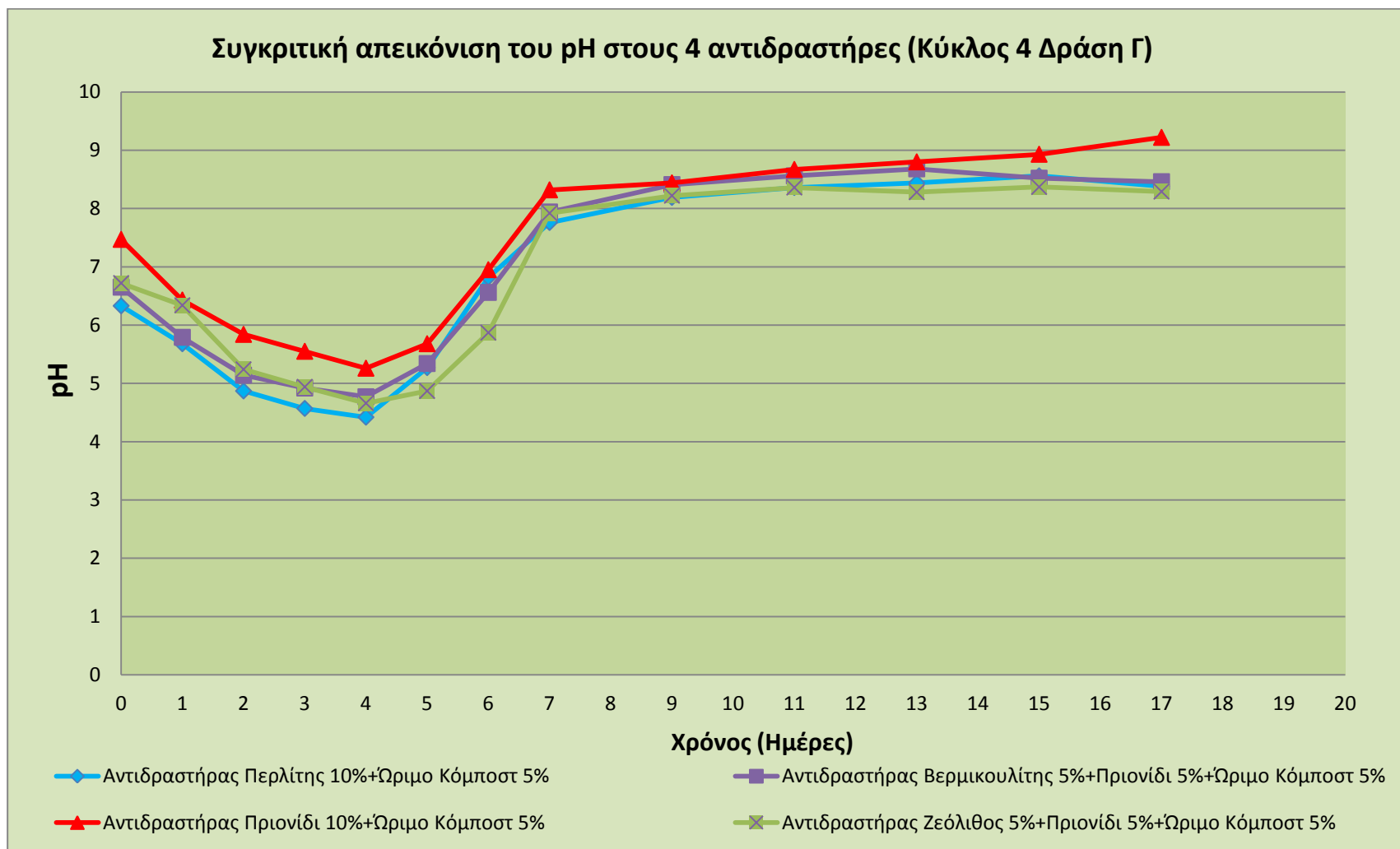
Προσδιορισμός του pH του υποστρώματος (Κύκλος 4 Δράση Γ)

Στο διάγραμμα 5.112 παρουσιάζεται η εξέλιξη του pH κατά τη διάρκεια της διεργασίας και στους τέσσερις αντιδραστήρες. Στον αντιδραστήρα με περλίτη και ώριμο κόμποστ, το pH έχει αρχική τιμή 6,33. Η τιμή αυτή μειώνεται μέχρι και την 4^η μέρα φτάνοντας στο 4,42. Μετά αυξάνεται ραγδαία μέχρι και την 7^η μέρα ενώ μετά με μικρές αυξομειώσεις σταθεροποιείται μέχρι την 17^η μέρα κοντά στο 8,38. Το pH του αντιδραστήρα με ορυκτό βερμικουλίτη, πριονίδι και ώριμο κόμποστ έχει αρχική τιμή 6,65 και μειώνεται μέχρι την 4^η μέρα φτάνοντας στο 4,77. Στη συνέχεια πραγματοποίησε απότομη άνοδο φτάνοντας κοντά στο 7,94 την 7^η ημέρα και να σταθεροποιηθεί 8,46 την 17^η μέρα. Στον αντιδραστήρα με το πριονίδι και το ώριμο κόμποστ, το pH έχει αρχική τιμή 7,47. Η τιμή αυτή μειώνεται μέχρι και την 4^η μέρα φτάνοντας στο 5,26. Μετά αυξάνεται ραγδαία μέχρι και την 7^η μέρα φτάνοντας στο 8,32 και συνεχίζει να αυξάνει με μικρότερο ρυθμό μέχρι και το 9,22 τη 17^η μέρα. Κατά τα αρχικά στάδια λειτουργίας του κομποστοποιητή με ζεόλιθο, πριονίδι και ώριμο κόμποστ, το pH ξεκινά από το 6,72 και μειώνεται μέχρι και την 4^η μέρα όπου φτάνει το 4,66. Στη συνέχεια αυξάνεται γρήγορα έως και την 7^η μέρα όπου φαίνεται να σταθεροποιείται με μικρές αυξομειώσεις μέχρι την 17^η μέρα κοντά στο 8,29.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές του pH για όλους τους αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου.

Πίνακας 5.129 Τιμές pH για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου Δράσης Γ

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
0	6,33	6,65	7,47	6,72
1	5,68	5,79	6,43	6,34
2	4,87	5,14	5,84	5,24
3	4,57	4,92	5,55	4,94
4	4,42	4,77	5,26	4,66
5	5,27	5,34	5,68	4,87
6	6,82	6,56	6,95	5,87
7	7,76	7,94	8,32	7,92
9	8,19	8,41	8,44	8,22
11	8,36	8,56	8,67	8,36
13	8,44	8,68	8,8	8,28
15	8,56	8,52	8,93	8,37
17	8,38	8,46	9,22	8,29



Διάγραμμα 5.112 Συγκριτική απεικόνιση pH στους 4 αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου Δράσης Γ

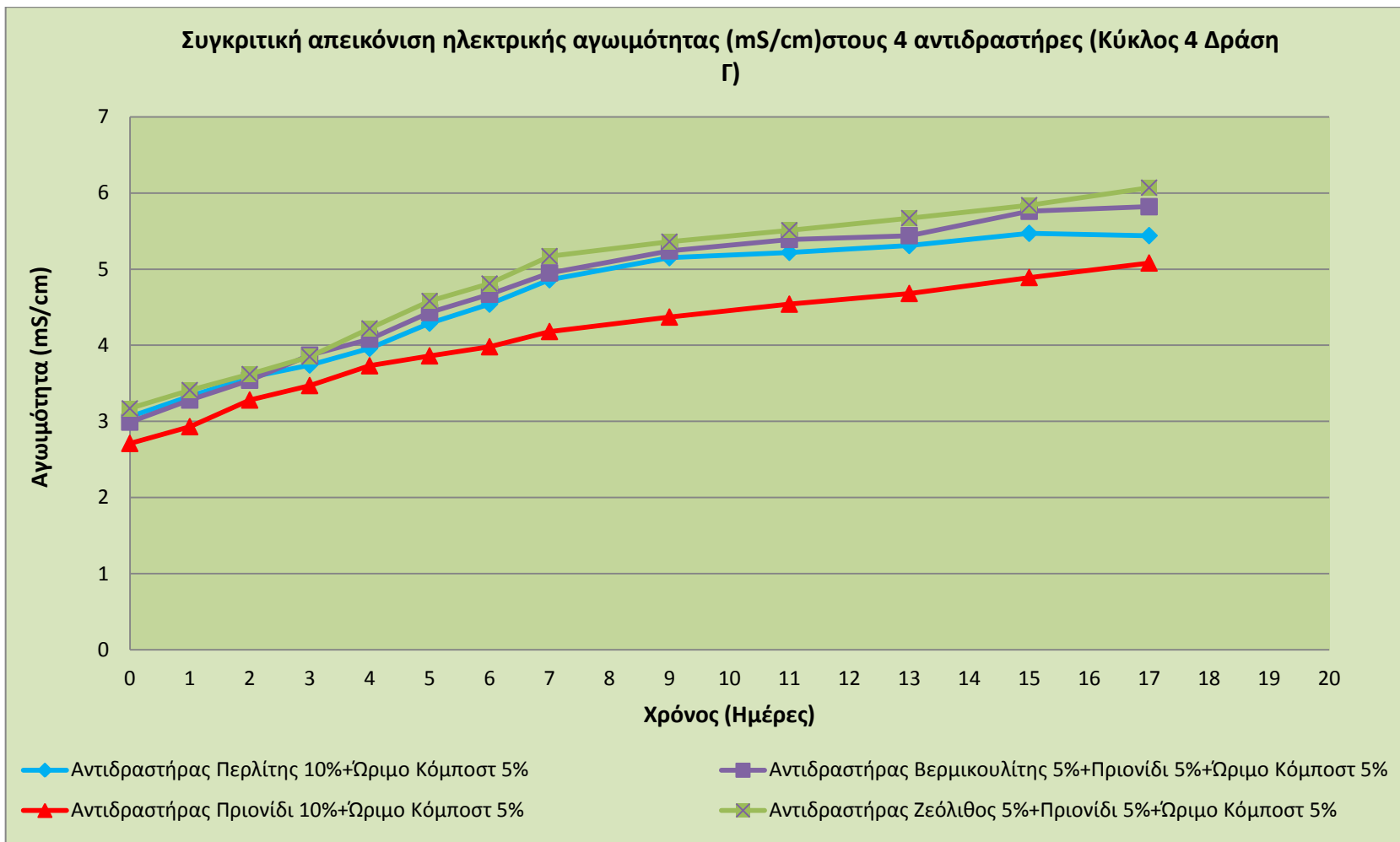
Προσδιορισμός της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του υποστρώματος (Κύκλος 4 Δράση Γ)

Στο διάγραμμα 5.113 παρουσιάζεται η εξέλιξη της τιμής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για τους αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου. Οι καμπύλες της αγωγιμότητας στους αντιδραστήρες παρουσιάζουν αύξουσα πορεία. Ξεκινούν από χαμηλές αρχικές τιμές (3,06, 2,99, 2,71 και 3,17 mS/cm) για τους αντιδραστήρες 1,2,3,4 αντίστοιχα και, έχουν ανοδική πορεία μέχρι τη 17^η ημέρα, όπου καταλήγουν στις τιμές 5,44, 5,82, 5,08 και 6,07 mS/cm αντίστοιχα.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για όλους τους αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου.

Πίνακας 5.130 Τιμές αγωγιμότητας για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου Δράσης Γ (mS/cm)

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
0	3,06	2,99	2,71	3,17
1	3,33	3,28	2,93	3,41
2	3,58	3,54	3,28	3,62
3	3,74	3,87	3,47	3,85
4	3,96	4,08	3,73	4,22
5	4,29	4,43	3,86	4,58
6	4,54	4,67	3,98	4,81
7	4,86	4,95	4,18	5,17
9	5,15	5,24	4,37	5,36
11	5,22	5,39	4,54	5,51
13	5,31	5,44	4,68	5,67
15	5,47	5,76	4,89	5,84
17	5,44	5,82	5,08	6,07



Διάγραμμα 5.113 Συγκριτική απεικόνιση ηλεκτρικής αγωγιμότητας στους 4 αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου Δράσης Γ

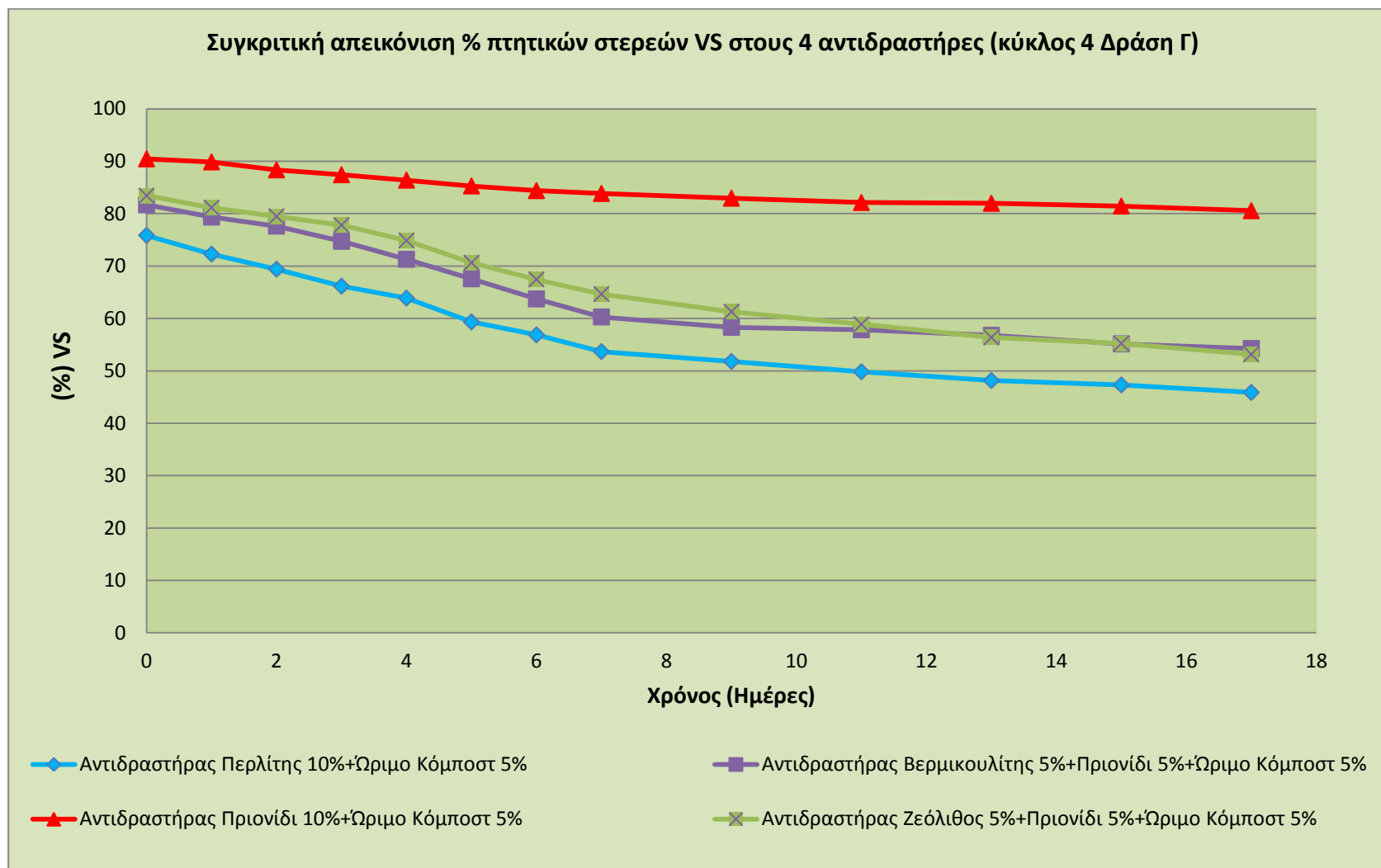
Προσδιορισμός των πτητικών στερεών (VS) στο υπόστρωμα (Κύκλος 4 Δράση Γ)

Στο διάγραμμα 5.114 παρατηρείται, πως κατά την περίοδο της θερμοφίλης φάσης, όπου αναπτύσσονται και οι υψηλότερες θερμοκρασίες ως αποτέλεσμα των μεταβολικών διεργασιών των μικροοργανισμών της διεργασίας, εμφανίζεται και η μεγαλύτερη μείωση των πτητικών στερεών (1^η έως 7^η ημέρα). Η μεγαλύτερη αρχική τιμή του ποσοστού των πτητικών παρατηρείται στον αντιδραστήρα με πρόσθετο πριονίδι, ενώ η μικρότερη στον αντιδραστήρα με πρόσθετο περλίτη λόγω απουσίας πριονιδιού. Παρατηρείται επίσης, ότι στον αντιδραστήρα με πρόσθετο πριονίδι υπάρχει η μικρότερη κατανάλωση πτητικών η οποία επαληθεύεται και από την καμπύλη του οργανικού άνθρακα. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα πιθανής μη ορθής ανάπτυξης των διεργασιών. Αντίθετα, στους άλλους τρεις αντιδραστήρες και κυρίως στον αντιδραστήρα με πρόσθετο περλίτη παρατηρείται ταχεία μείωση των πτητικών στερεών και σταθεροποίηση τους μετά το πέρας της διεργασίας.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές των πτητικών στερεών για όλους τους αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου.

Πίνακας 5.131 Τιμές % πτητικών στερεών για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου δράσης Γ

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
0	75,85	81,68	90,45	83,43
1	72,28	79,35	89,87	81,14
2	69,39	77,62	88,35	79,47
3	66,14	74,71	87,42	77,8
4	63,87	71,28	86,39	74,87
5	59,33	67,56	85,28	70,62
6	56,86	63,72	84,39	67,44
7	53,66	60,28	83,85	64,66
9	51,78	58,3	82,94	61,27
11	49,82	57,84	82,12	58,88
13	48,14	56,77	81,97	56,37
15	47,31	55,14	81,44	55,22
17	45,87	54,26	80,56	53,14



Διάγραμμα 5.114 Συγκριτική απεικόνιση % πτητικών στερεών (VS) στους 4 αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου Δράσης Γ

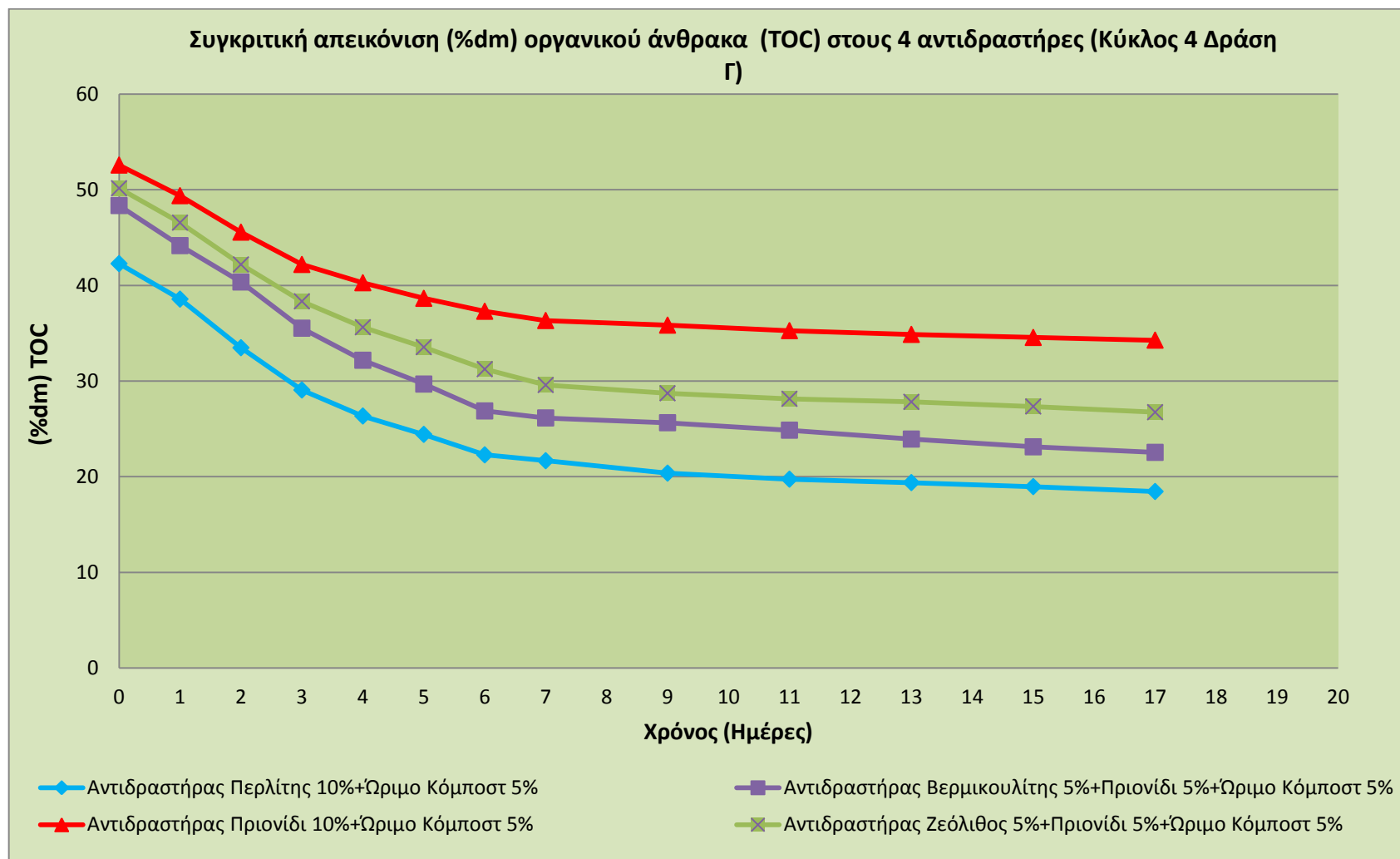
Προσδιορισμός του ολικού οργανικού άνθρακα στο υπόστρωμα (Κύκλος 4 Δράση Γ)

Ο αντιδραστήρας με τον περλίτη και ώριμο κόμποστ, ο ολικός οργανικός άνθρακας ξεκινά από την τιμή 42,27% και με φθίνουσα πορεία φθάνει την 17^η μέρα στο 18,45%. Με τελικές τιμές του ολικού οργανικού άνθρακα κάτω από το 25% συμπεραίνουμε ότι το προϊόν δεσμεύει ελάχιστο άνθρακα. Στον αντιδραστήρα με βερμικουλίτη, πριονίδι και ώριμο κόμποστ ο ολικός οργανικός άνθρακας ξεκινάει από 48,34% και φθίνει με πολύ γρήγορο ρυθμό λόγω της βιοαποδόμησης. Τελικά σταθεροποιείται στο 22,54% τη 17^η ημέρα. Η συνολική μείωση του περιεχόμενου ολικού οργανικού άνθρακα στο υπόστρωμα ανέρχεται στο 25,8% για τις πρώτες 17 μέρες από την έναρξη της διεργασίας της κομποστοποίησης. Ο αντιδραστήρας με το πριονίδι και το ώριμο κόμποστ, ξεκινά από την τιμή 52,57% και με φθίνουσα πορεία φθάνει τη 17^η μέρα στο 34,27%. Ο ολικός οργανικός άνθρακας για τον αντιδραστήρα με ζεόλιθο, πριονίδι και ώριμο κόμποστ ξεκινάει από 50,15% και φθίνει με πολύ γρήγορο ρυθμό λόγω της βιοαποδόμησης της οργανικής ύλης. Τελικά την 17^η ημέρα από την έναρξη του κύκλου η περιεκτικότητα του υποστρώματος σε οργανικό άνθρακα σταθεροποιείται στο 26,74% παρουσιάζοντας μια συνολική μείωση κατά 23,41%.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές του ολικού οργανικού άνθρακα (%) για όλους τους αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου.

Πίνακας 5.132 Τιμές TOC (%dm) για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου Δράσης Γ

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
0	42,27	48,34	52,57	50,15
1	38,56	44,15	49,37	46,55
2	33,48	40,35	45,56	42,18
3	29,06	35,52	42,18	38,33
4	26,34	32,17	40,27	35,62
5	24,42	29,68	38,64	33,54
6	22,28	26,87	37,29	31,24
7	21,67	26,14	36,32	29,58
9	20,37	25,64	35,84	28,72
11	19,74	24,86	35,26	28,14
13	19,38	23,93	34,87	27,82
15	18,96	23,12	34,55	27,34
17	18,45	22,54	34,27	26,74



Διάγραμμα 5.115 Συγκριτική απεικόνιση (%dm) οργανικού άνθρακα TOC στους 4 αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου της Δράσης Γ

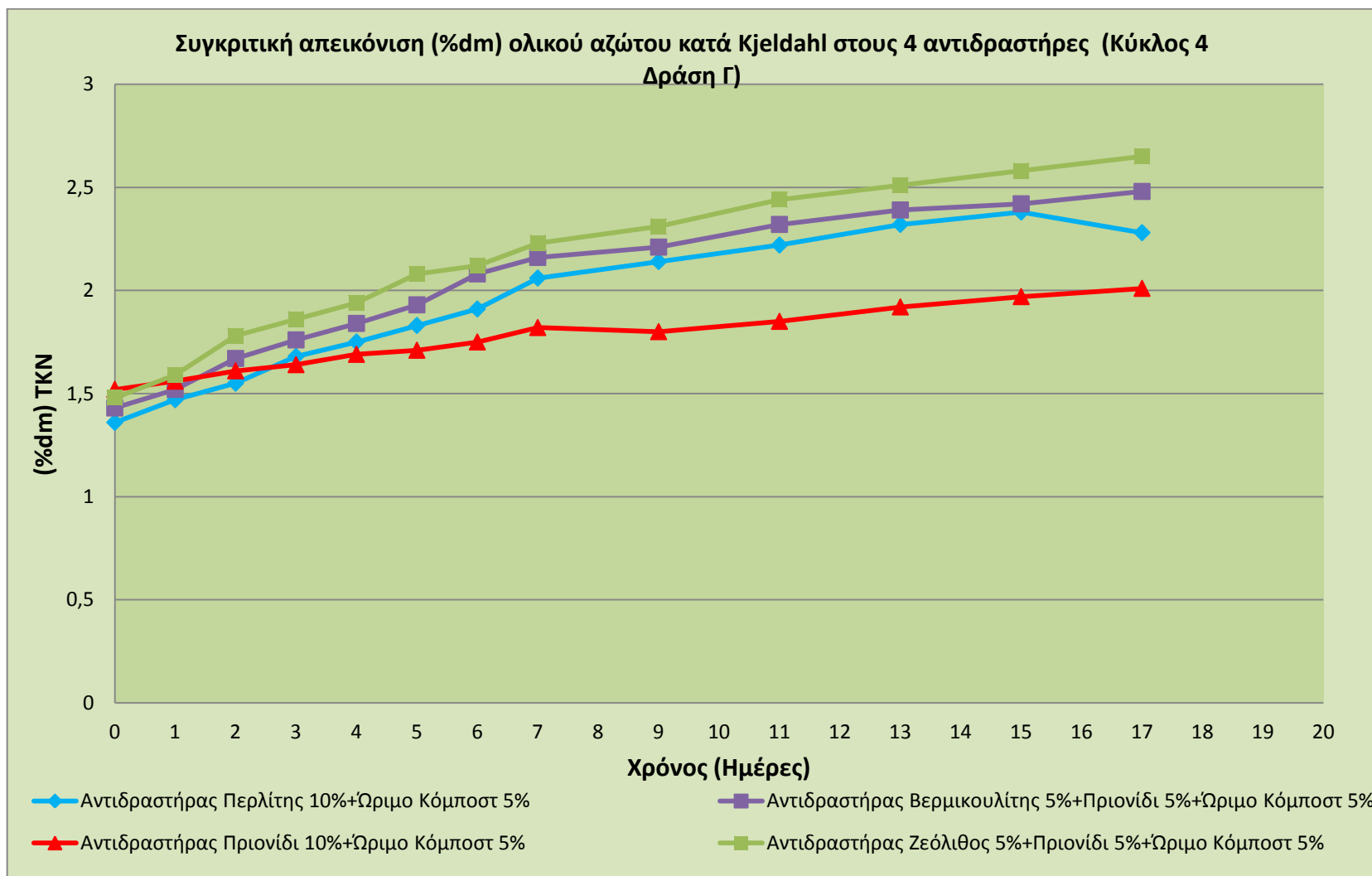
Προσδιορισμός του ολικού αζώτου κατά Kjeldahl στο υπόστρωμα (Κύκλος 4 Δράση Γ)

Το ποσοστό του αζώτου επί ξηράς μάζας υποστρώματος αυξάνεται καθόλη τη διάρκεια της διεργασίας της κομποστοποίησης και στους τέσσερις αντιδραστήρες, του τέταρτου κύκλου, ως αποτέλεσμα της ραγδαίας μείωσης του ποσοστού του οργανικού άνθρακα (διάγραμμα 5.116). Πιο συγκεκριμένα ο αντιδραστήρας με πρόσθετο περλίτη και ώριμο κόμποστ αρχικά έχει 1,36% και έπειτα από την ανοδική πορεία καταλήγει τη 17^η ημέρα στο 2,28%. Ο αντιδραστήρας με βερμικουλίτη, πριονίδι και ώριμο κόμποστ ξεκινά με ποσοστό αζώτου στο 1,43% και ακολουθώντας αύξουσα πορεία καταλήγει στο 2,48% τη 17^η μέρα. Ο αντιδραστήρας με πριονίδι και ώριμο κόμποστ ξεκινά με ποσοστό αζώτου στο 1,52% διατηρώντας αύξουσα πορεία για να καταλήξει τη 17^η ημέρα στο 2,01%. Ο αντιδραστήρας με ζεόλιθο, πριονίδι και ώριμο κόμποστ ξεκινά με ποσοστό αζώτου στο 1,48% διατηρώντας αύξουσα πορεία για να καταλήξει την 17^η ημέρα στο 2,65%.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές του TKN (%) για όλους τους αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου.

Πίνακας 5.133 Τιμές (%dm) TKN για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
0	1,36	1,43	1,52	1,48
1	1,47	1,52	1,56	1,59
2	1,55	1,67	1,61	1,78
3	1,68	1,76	1,64	1,86
4	1,75	1,84	1,69	1,94
5	1,83	1,93	1,71	2,08
6	1,91	2,08	1,75	2,12
7	2,06	2,16	1,82	2,23
9	2,14	2,21	1,8	2,31
11	2,22	2,32	1,85	2,44
13	2,32	2,39	1,92	2,51
15	2,38	2,42	1,97	2,58
17	2,28	2,48	2,01	2,65



Διάγραμμα 5.116 Συγκριτική απεικόνιση του % ολικού αζώτου κατά kjeldahl στους 4 αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου δράσης Γ

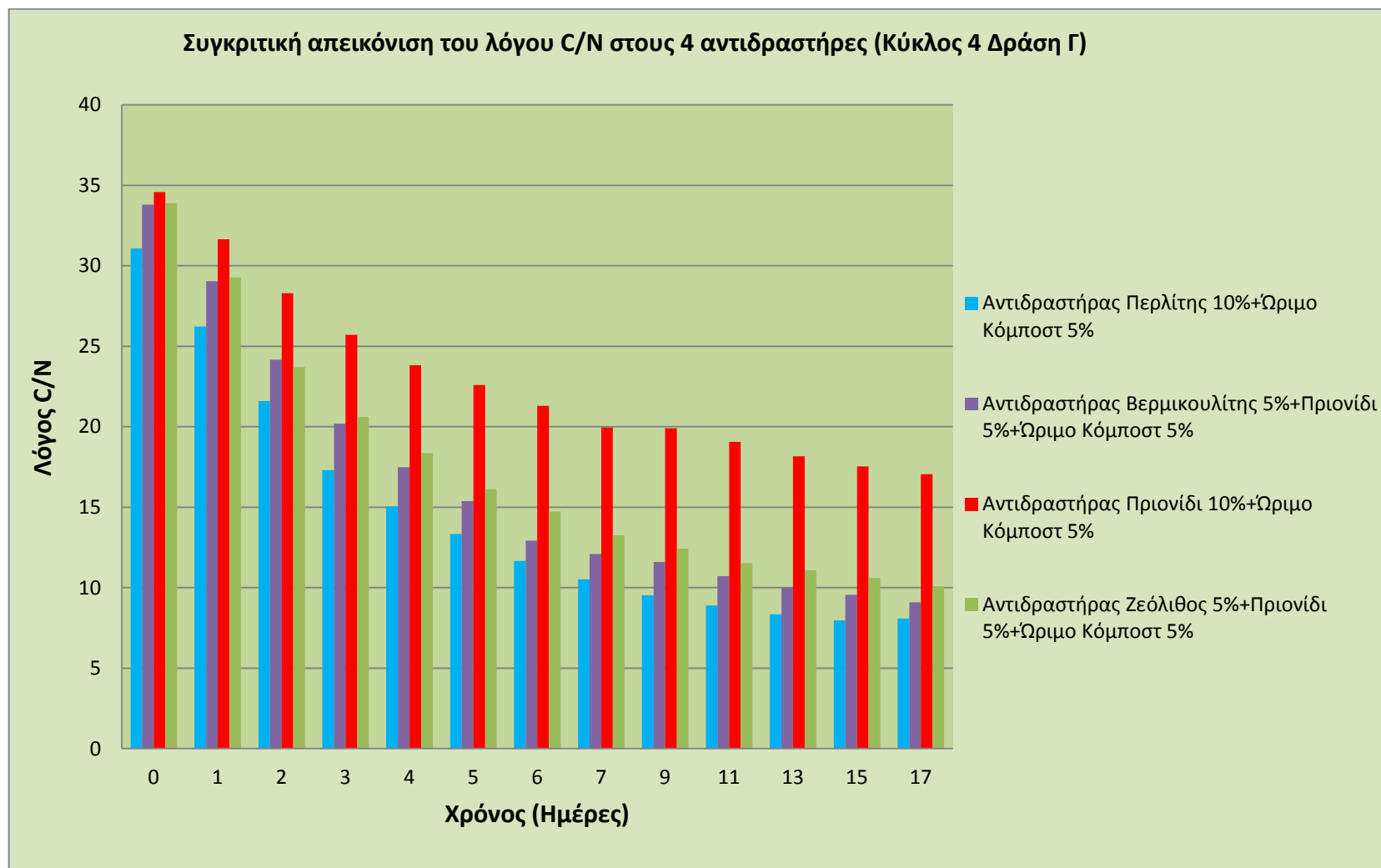
Προσδιορισμός του λόγου C/N στο υπόστρωμα (Κύκλος 4 Δράση Γ)

Ο αντιδραστήρας με περλίτη και ώριμο κόμποστ ξεκινά με λόγο 31,08. Ο λόγος πέφτει κάτω από την τιμή 20 από την 3^η μέρα. Ο αντιδραστήρας με βερμικουλίτη, πριονίδι και ώριμο κόμποστ ξεκινά με λόγο 33,8. Ακολουθεί μείωση και μάλιστα από την 4^η μέρα ο λόγος πέφτει κάτω από το 20 και συγκεκριμένα στο 17,48. Ο αντιδραστήρας με πριονίδι και ώριμο κόμποστ ξεκινά με λόγο 34,59 και μειώνεται μέχρι την τιμή 17,05 τη 17^η μέρα. Τέλος, ο αντιδραστήρας με ζεόλιθο, πριονίδι και ώριμο κόμποστ έχει αρχική τιμή 33,89. Παρατηρείται ταχεία μείωση του λόγου και από την 4^η ημέρα πέφτει κάτω από την τιμή 20 και συγκεκριμένα στο 18,36. Παρατηρείται ότι οι αντιδραστήρες όπου είχε προστεθεί φυσικό ορυκτό ως πρόσθετο εμφάνισαν χαμηλότερες τιμές C/N γεγονός που οφείλεται στη μεγαλύτερη μείωση συνολικού οργανικού άνθρακα καθόλη τη διάρκεια της διεργασίας, λόγω της ταχύτερης αποδόμησης αυτού από τους μικροοργανισμούς.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές της αναλογίας C/N για όλους τους αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου της Δράσης Γ.

Πίνακας 5.134 Τιμές C/N για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου Δράσης Γ

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
1	31,08	33,8	34,59	33,89
1	26,23	29,05	31,65	29,28
2	21,6	24,16	28,3	23,7
3	17,3	20,18	25,72	20,61
4	15,05	17,48	23,83	18,36
5	13,34	15,37	22,6	16,13
6	11,66	12,92	21,31	14,74
7	10,52	12,1	19,96	13,26
9	9,52	11,6	19,91	12,43
11	8,89	10,72	19,06	11,53
13	8,35	10,01	18,16	11,08
15	7,97	9,55	17,54	10,6
17	8,09	9,09	17,05	10,09



Διάγραμμα 5.117 Συγκριτική απεικόνιση του λόγου C/N στους 4 αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου Δράσης Γ

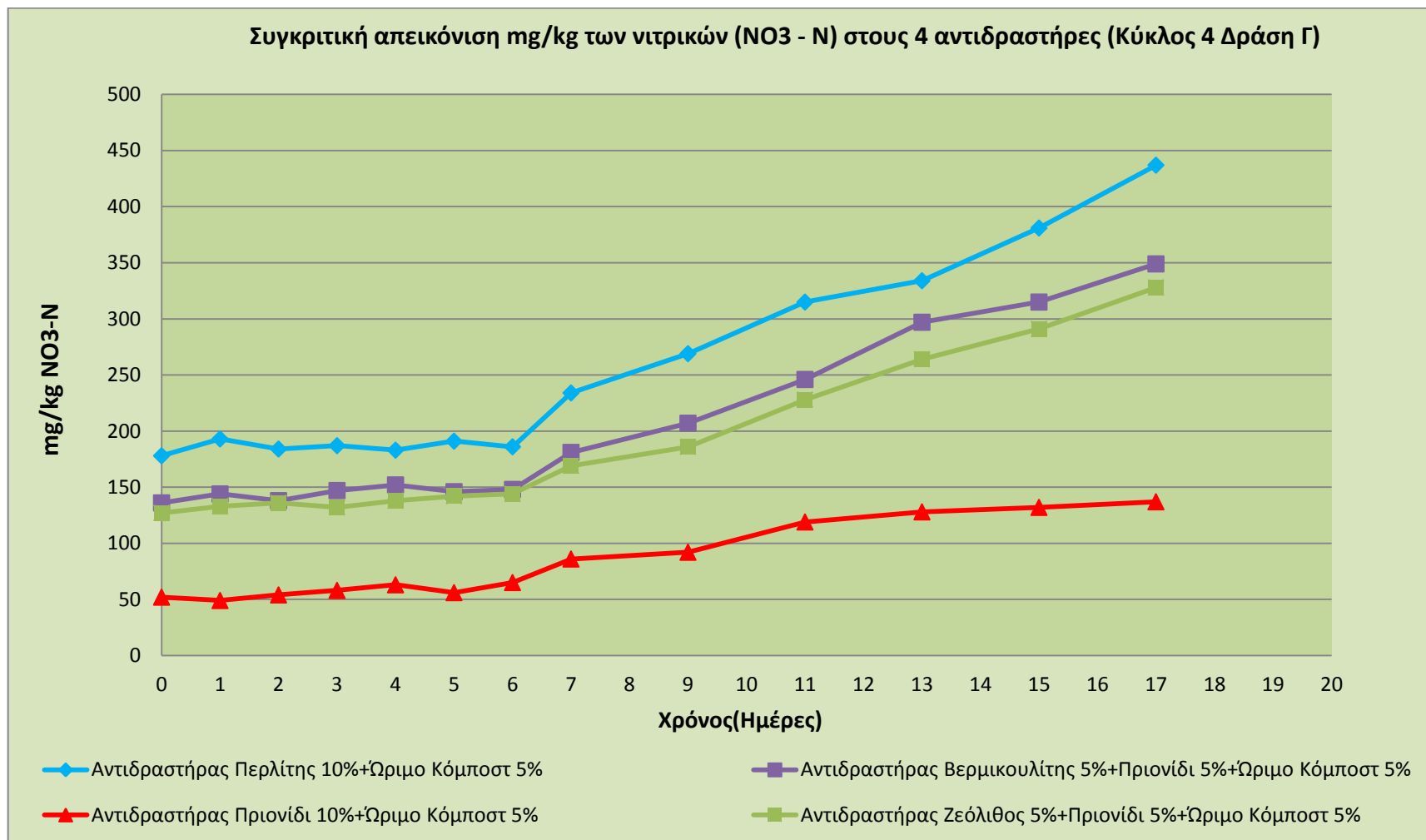
Μέτρηση νιτρικών ($\text{NO}_3^- \text{N}$) στο υπόστρωμα (Κύκλος 4 Δράση Γ)

Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζεται η αναμενόμενη αύξηση των νιτρικών μετά τη θερμοφίλη φάση. Οι τελικές τιμές είναι οι αναμενόμενες σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, με εξαίρεση τις τιμές νιτρικών του αντιδραστήρα με πρόσθετο πριονίδι. Στον αντιδραστήρα αυτό, κατά τη λειτουργία του, πιθανά οι διεργασίες της βιοαποδόμησης να μην ολοκληρώθηκαν επιτυχώς, κάτι που οδήγησε σε τόσο υψηλή συγκέντρωση νιτρικών.

Στον πίνακα 5.135 παρατίθενται οι τιμές των νιτρικών για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου Δράσης Γ.

Πίνακας 5.135 Τιμές σε $\text{NO}_3^- \text{N}$ mg/kg για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου Δράσης Γ

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
0	178	136	52	127
1	193	144	49	133
2	184	138	54	136
3	187	147	58	132
4	183	152	63	138
5	191	146	56	142
6	186	148	65	144
7	234	181	86	169
9	269	207	92	186
11	315	246	119	228
13	334	297	128	264
15	381	315	132	291
17	437	349	137	328



Διάγραμμα 5.118 Συγκριτική απεικόνιση των νιτρικών NO₃⁻ N στους 4 αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου Δράσης Γ

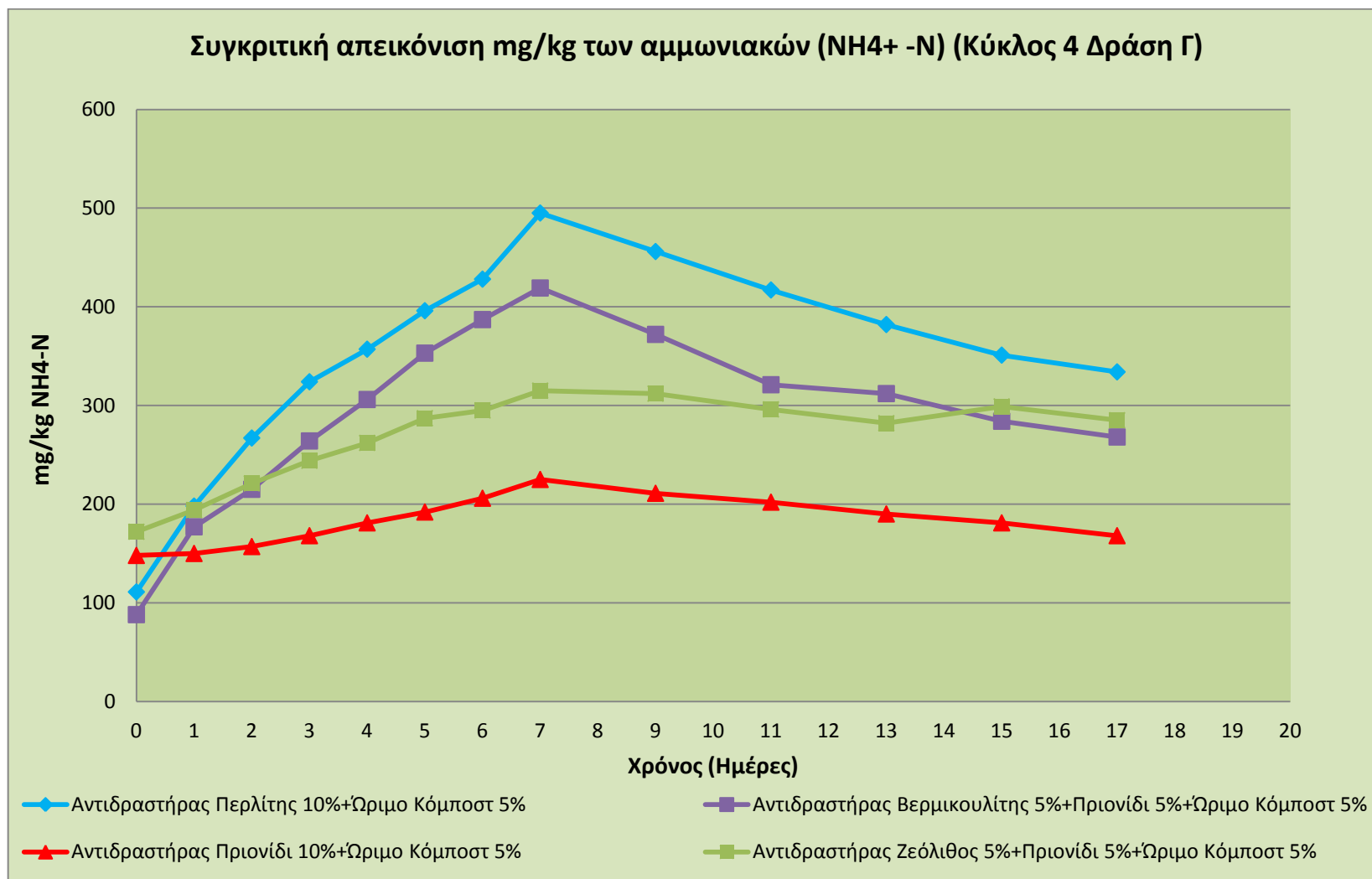
Μέτρηση αμμωνιακών (NH₄⁺-N) στο υπόστρωμα (Κύκλος 4 Δράση Γ)

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται η αύξηση των αμμωνιακών κατά τη διάρκεια της θερμόφιλης φάσης. Παρατηρούνται, επίσης, ιδιαίτερα αυξημένες τιμές στον αντιδραστήρα με πρόσθετο πριονίδι, οι οποίες αυξάνονται κατά τη θερμόφιλη φάση. Το γεγονός ότι η συγκέντρωση των αμμωνιακών ακολουθεί ανοδική πορεία και μετά τη θερμόφιλη φάση οδηγεί στο συμπέρασμα της μη ορθής διεξαγωγής της διεργασίας. Αντιθέτως, στους αντιδραστήρες που χρησιμοποιήθηκαν ορυκτά, η πορεία των αμμωνιακών είναι αναμενόμενη καθώς η συγκέντρωσή τους αυξάνεται κατά τη θερμόφιλη φάση και έπειτα μειώνεται λόγω μετατροπής τους σε νιτρικά. Η πορεία αυτή είναι ενδεικτική της ορθής διεξαγωγής της διεργασίας.

Στον πίνακα 5.136 παρατίθενται οι τιμές των αμμωνιακών για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου Δράσης Γ.

Πίνακας 5.136 Τιμές (NH₄⁺ - N) σε mg/ kg για τους τέσσερις αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου Δράσης Γ

Ημέρα	Αντιδραστήρας 1	Αντιδραστήρας 2	Αντιδραστήρας 3	Αντιδραστήρας 4
0	111	88	148	172
1	198	177	150	194
2	267	215	157	221
3	324	264	168	244
4	357	306	181	262
5	396	353	192	287
6	428	387	206	295
7	495	419	225	315
9	456	372	211	312
11	417	321	202	296
13	382	312	190	282
15	351	284	181	299
17	334	268	168	285



Διάγραμμα 5.119 Συγκριτική απεικόνιση των αμμωνιακών NH₄⁺-N στους 4 αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου Δράσης Γ

5.2.3 Αποτίμηση πειραματικών Δράσεων και εκτίμηση της λειτουργίας του πρότυπου κομποστοποιητή

Στην παρούσα ενότητα γίνεται μία αποτίμηση της μελέτης της διεργασίας μέσω των πειραματικών αποτελεσμάτων και παράλληλα εξετάζεται η αποτελεσματικότητα του συστήματος κομποστοποίησης για την επεξεργασία του οργανικού κλάσματος των οικιακών απορριμμάτων σύμφωνα με τις παραμέτρους οι οποίες καταγράφηκαν σε κάθε πειραματικό κύκλο κομποστοποίησης. Επομένως, η εξέταση αφορά στην αξιολόγηση της μεταβολής της θερμοκρασίας, της υγρασίας, του pH, του ολικού οργανικού άνθρακα, του ολικού αζώτου και των ανόργανων μορφών του καθώς και της αναλογία C/N κατά τα εξελικτικά στάδια των διεργασιών της κομποστοποίησης και τη σύγκρισή τους με βιβλιογραφικά δεδομένα.

5.2.3.1 Θερμοκρασία

Σύμφωνα με τους Hassen et al. (2001), η θερμοκρασία του υποστρώματος κατά την κομποστοποίηση προσδιορίζει το ρυθμό με τον οποίο λαμβάνουν χώρα οι βιολογικές διεργασίες και διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη και τη διαδοχή του πληθυσμού των μικροοργανισμών. Στους όλους τους κύκλους κομποστοποίησης που πραγματοποιήθηκαν διαπιστώνεται ότι το προφίλ της θερμοκρασίας που αναπτύχθηκε είναι τυπικό της διεργασίας της κομποστοποίησης. Αυτό επιβεβαιώνεται από τη μετάβαση του υποστρώματος από μια αρχική μεσόφιλη φάση σε μια θερμόφιλη φάση και μετά την πάροδο ορισμένων ημερών, αφότου οι άμεσα διαθέσιμες οργανικές ενώσεις έχουν καταναλωθεί, το υπόστρωμα μεταβαίνει σε μια δεύτερη μεσόφιλη φάση. Τις πρώτες ημέρες της διεργασίας παρατηρήθηκε άμεση αύξηση της θερμοκρασίας άνω των 40°C σε όλους τους πειραματικούς κύκλους. Εξάιρεση αποτέλεσαν οι αντιδραστήρες στους οποίους δε χρησιμοποιήθηκε ως πρόσθετο κομποστοποίησης κάποιο ορυκτό, παρά μόνο πριονίδι. Παρόμοια συμπεριφορά επισημαίνεται από τους Mena et al. (2003) με θερμόφιλες θερμοκρασίες να διαμορφώνονται στο υπόστρωμα από τη 2^η κιόλας ημέρα της κομποστοποίησης ιλύος με ροκανίδι. Η σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας σε σύντομο χρονικό διάστημα ερμηνεύεται από τη διάσπαση των διαλυτών και άμεσα διαθέσιμων βιοαποδομήσιμων οργανικών ενώσεων οι οποίες εμπεριέχονται κυρίως στο οργανικά απορρίμματα. Η βιοαποδόμηση των ενώσεων αυτών συνοδεύεται με παράλληλη έκλυση και συσσώρευση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας σε μορφή θερμότητας στο υπόστρωμα λόγω των μονωτικών του ιδιοτήτων (Banegas et al., 2007; Diaz and Savage, 2007a; Hassen et al., 2001; Bernal et al., 1998c). Στις ενώσεις αυτές συγκαταλέγονται οι υδατάνθρακες, τα λίπη, οι πρωτεΐνες κ.α. (Li et al., 2001). Στην άμεση αύξηση της θερμοκρασίας στο υπόστρωμα προσμετράται και το γεγονός ότι η βιολογική αερόβια επεξεργασία των οργανικών αποβλήτων λαμβάνει χώρα σε βιοαντιδραστήρα τα τοιχώματα του οποίου έχουν μονωθεί με πετροβάμβακα. Στις διεργασίες κομποστοποίησης σε ανοιχτό χώρο, όπως γίνεται με τη χρήση της τεχνικής των σειραδίων, οι περιβαλλοντικές συνθήκες και κατ' επέκταση η θερμοκρασία του περιβάλλοντος χώρου διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στο θερμοκρασιακό προφίλ του

υποστρώματος κατά τα εξελικτικά στάδια της διεργασίας. Σύμφωνα με τους Margesin et al. (2006), κατά την κομποστοποίηση σε ανοιχτό χώρο και υπό την παρουσία χαμηλών θερμοκρασιών, σημειώνεται μια περίοδος σημαντικής αρχικής χρονικής υστέρησης (lag time) στη διεξαγωγή της διεργασίας και στην επίτευξη των μέγιστων θερμοκρασιακών τιμών. Όσον αφορά στις θερμοκρασίες που αναπτύχθηκαν σε όλους τους πειραματικούς κύκλους κομποστοποίησης είναι στο εύρος των βέλτιστων θερμοκρασιακών τιμών για τη μεγαλύτερη διάρκεια του χρόνου παραμονής του υποστρώματος στον βιοαντιδραστήρα. Το εύρος αυτό των τιμών, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, ορίζεται μεταξύ 43-65°C. (Μαλαμής 2011). Επιπλέον παρατηρείται ότι οι μέγιστες θερμοκρασίες είναι σε ανεκτά επίπεδα και δεν διατρέχει κίνδυνος υπονόμησης των θερμοφίλων μικροοργανισμών (Erstein, 1997; Finstein et al., 1986); Fermor et al., 1989; Mena et al., 2003). Τέλος αναφορικά με τη σχέση θερμοκρασίας και χρόνου, παρατηρείται ότι επίπεδα άνω των 55°C διατηρούνται για τρεις έως πέντε συνεχείς ημέρες σε όλους τους πειραματικούς κύκλους, με εξαίρεση αυτούς που δεν χρησιμοποιήθηκε ορυκτό ως πρόσθετο. Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία και τις εθνικές προδιαγραφές (ενότητα 3.2.3.1), η διάρκεια αυτών των θερμοκρασιακών επιπέδων δύναται να αδρανοποιήσει πιθανούς παθογόνους μικροοργανισμούς. (Μαλαμής 2011) Οι υψηλές θερμοκρασίες στο βιοαντιδραστήρα διατηρούνται για όσο διάστημα υπάρχει άμεσα διαθέσιμο προς αφομοίωση υπόστρωμα το οποίο ενισχύει τη μικροβιακή δραστηριότητα. Μετέπειτα η θερμοκρασία μειώνεται σταδιακά διαμορφώνοντας μια 2^η μεσόφιλη φάση μετά το πέρας της 7^{ης} - 8^{ης} ημέρας της διεργασίας σε όλους τους πειραματικούς κομποστοποίησης. Σύμφωνα με τους Mena et al. (2003), Fernandes et al. (1994) και Rynk et al. (1992) η χαμηλή θερμοκρασία τυπικά υποδηλώνει χαμηλή αερόβια δράση στο υπόστρωμα. Κατά τη φάση αυτή συντελείται η αποδόμηση συμπαγών οργανικών ενώσεων όπως η λιγνίνη που εμπεριέχεται στα διογκωτικά υλικά του υποστρώματος (π.χ. φύλλα, άχυρο) καθώς οι λιγνολυτικοί μικροοργανισμοί που ευθύνονται για αυτή τη διεργασία ευδοκίμουν σε χαμηλές θερμοκρασίες (Choi and Park, 1998; Kaplan and Kaplan, 1982; Nakasaki et al., 1985; Andrews and Kambhu, 1973; και Schulze, 1962). Οι ενώσεις αυτές χρησιμοποιούνται με βραδύ ρυθμό από τους μικροοργανισμούς και η παραγόμενη θερμότητα δεν μπορεί να αναπληρώσει τις απώλειες. Κατά συνέπεια η θερμοκρασία του υποστρώματος εξακολουθεί να μειώνεται και προς το τέλος του λειτουργικού χρόνου στον βιοαντιδραστήρα προσεγγίζει τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος υποδηλώνοντας τη σταθεροποίηση του οργανικού κλάσματος (Richard and Walker, 1998; Rosso et al., 1993; Sikora and Sowers, 1985; Strom, 1985; Ratkowsky et al., 1983; Suler and Finstein, 1977). Επιπλέον, η θερμοκρασία στο στάδιο αυτό δεν παρουσιάζει σημαντικές αυξομειώσεις κατά την ανάδευση του υποστρώματος το οποίο σύμφωνα με τους Bueno et al. (2008), Diaz and Savage (2007a) και Stickelberger (1975) αποτελεί δείκτη ωρίμανσης του οργανικού υλικού.

Το προφίλ της θερμοκρασίας σε όλους τους πειραματικούς κύκλους αποτελεί σημαντικό δείκτη της ορθής διεξαγωγής της διεργασίας και της αποτελεσματικότητας του συστήματος κομποστοποίησης, καθώς δεν παρατηρείται παρεμπόδιση της μικροβιακής δραστηριότητας κατά τη διάρκεια της διεργασίας, η οποία δύναται να επιφέρει μείωση της θερμοκρασίας του υποστρώματος (Diaz and Savage, 2007a). Η παρεμπόδιση της δράσης των αερόβιων μικροοργανισμών ενδέχεται να προκύψει από χαμηλά επίπεδα υγρασίας, την απουσία οξυγόνου ή την

έλλειψη θρεπτικών συστατικών. (Μαλαμής 2011) Εξαίρεση αποτελούν οι πειραματικοί κύκλοι στο υπόστρωμα των οποίων δε χρησιμοποιήθηκε ως πρόσθετο κάποιο ορυκτό, παρά μόνο πριονίδι. Στους κύκλους αυτούς δεν αναπτύχθηκε η θερμοκρασία σε υψηλά επίπεδα κατά τη θερμοφιλή φάση, ενώ ταυτόχρονα τα ποσοστά υγρασίας των υποστρωμάτων έμειναν επίσης υψηλά (όπως αναλύεται στην επόμενη ενότητα). Το γεγονός αυτό είναι ενδεικτικό της σημαντικής δράσης των ορυκτών, στον κατάλληλο αερισμό του υποστρώματος, μέσω της δημιουργίας κατάλληλου πορώδους με αποτέλεσμα τον καλύτερο έλεγχο της υγρασίας και της θερμοκρασίας αυτού και εν τέλει του συνόλου της διεργασίας.

5.2.3.2 Περιεχόμενη Υγρασία

Σε όλους τους πειραματικούς κύκλους το ποσοστό της υγρασίας στο αρχικό υπόστρωμα είναι αρκετά υψηλό, γεγονός αναμενόμενο, λόγω της φύσης του υποστρώματος. Η διακύμανση της αρχικής υγρασίας των υποστρωμάτων οφείλεται στη διαφορετική σύσταση και τις διαφορετικές αναλογίες των βιοαποδομήσιμων οικιακών αποβλήτων που επιλέχτηκαν για κάθε πειραματικό κύκλο κομποστοποίησης στοχεύοντας στη διαμόρφωση μιγμάτων με συγκεκριμένους αρχικούς λόγους C/N (20,30 και 40). Κατά τη θερμοφιλή φάση, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται, παρουσιάζονται σημαντικές απώλειες υγρασίας, σε όλους τους πειραματικούς κύκλους, κυρίως από την εξάτμιση του νερού και δευτερευόντως από την απομάκρυνση μέρους των παραγόμενων στραγγισμάτων (Lu et al., 2009; Kulcu and Yaldiz, 2004; Baddi et al., 2004). Ωστόσο, λόγω του υψηλού αρχικού ποσοστού της υγρασίας δεν παρουσιάζονται φαινόμενα χαμηλής περιεκτικότητας αυτής, κατά τη θερμοφιλή φάση, τα οποία δύναται να αναστείλουν τις μικροβιακές δράσεις εξαιτίας πρόωρης αφυδάτωσης, αλλά ούτε και φαινόμενα υψηλής υγρασίας τα οποία ενδέχεται να διαμορφώσουν αναερόβιες συνθήκες. Εξαίρεση αποτελούν οι πειραματικοί κύκλοι στους οποίους χρησιμοποιήθηκε ως πρόσθετο της διεργασίας μόνο πριονίδι. Σε αυτούς τους πειραματικούς κύκλους το ποσοστό της υγρασίας μειώνεται με πολύ αργό ρυθμό και κατά τη διάρκεια της θερμοφιλής φάσης, και παραμένει εν τέλει σε υψηλά ποσοστά, γεγονός ενδεικτικό της μη ορθής διεξαγωγής της διεργασίας και πιθανής ανάπτυξης αναερόβιων συνθηκών.

5.2.3.3 pH

Σε όλους τους κύκλους πειραμάτων το αρχικό υπόστρωμα παρουσιάζει σχετικά χαμηλό pH, εκτός από τους κύκλους όπου χρησιμοποιήθηκε ώριμο κόμποστ ως πρόσθετο, όπου λόγω του βασικού pH του, δημιούργησε υποστρώματα με υψηλότερο pH. Σε όλους τους κύκλους πειραμάτων είναι εμφανής ο σχηματισμός οργανικών οξέων τις πρώτες ημέρες λειτουργίας του συστήματος διατηρώντας το pH σε ελαφρώς όξινο περιβάλλον, λόγω του σχηματισμού πτητικών οργανικών οξέων τα οποία προκύπτουν κυρίως από τη διάσπαση των εύκολα αποδομήσιμων οργανικών ενώσεων, όπως τα σάκχαρα (Kirchmann and Widen, 1994; Haug, 1993; Nakasaki et al., 1993; Poincelot, 1974). Κατά τη θερμοφιλή φάση, σε όλες τις πειραματικές εφαρμογές διαπιστώθηκε αύξηση του pH διαμορφώνοντας αλκαλικό περιβάλλον στο υπόστρωμα. Η αύξηση αυτή του pH οφείλεται σύμφωνα με τους Μάστακα (2007), Berner (2004) και Fuchs (2001) στην υδρόλυση των πρωτεϊνών και

τη διάσπαση του οργανικού αζώτου από πρωτεϊνολυτικούς μικροοργανισμούς σχηματίζοντας αμμωνιακά και απελευθερώνοντας αμμωνία υπό συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας. Παρόμοια συμπεράσματα έχουν διατυπωθεί τόσο από πρόσφατες όσο και από παλαιότερες έρευνες κατά τις οποίες η παρουσία αμμωνιακών στο υπόστρωμα αυξάνει την τιμή του pH κατά τα αρχικά στάδια της διεργασίας (Roca-Pérez et al., 2009; Barrington et al., 2003; Leth et al., 2001; Kithome et al., 1999; Hellmann et al., 1997; Witter and Lopez-Real, 1988). Στους αντιδραστήρες όπου προστέθηκε αρχικό υπόστρωμα με χαμηλό λόγο C/N, διαμορφώνεται περίσσεια αζώτου η οποία συντελεί στη σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης των αμμωνιακών με αποτέλεσμα την αύξηση του pH κατά τη θερμοφιλή φάση. (Μαλαμής 2011) Αξίζει να σημειωθεί ότι στους πειραματικούς κύκλους που πραγματοποιήθηκε προσθήκη ζεόλιθου και βερμικουλίτη παρουσιάστηκε η μικρότερη μέγιστη τιμή pH. Η χρήση φυσικών προσροφητικών μέσων όπως ο ζεόλιθος επηρεάζει τη διεργασία της κομποστοποίησης λόγω των ιοντοεναλλακτικών του ιδιοτήτων δεσμεύοντας μέρος των παραγόμενων αμμωνιακών και διαμορφώνοντας το pH του υποστρώματος σε χαμηλότερα επίπεδα κατά τα εξελικτικά στάδια της κομποστοποίησης (Reigné and Girardin, 2004; Witter and Lopez-Real, 1988). Στους πειραματικούς κύκλους που έγινε προσθήκη μόνο πριονιδίου ως πρόσθετο οι τιμές του pH στο τέλος της διεργασίας είναι αρκετά υψηλές. Ωστόσο, το γεγονός αυτό από μόνο του, δεν αποτελεί δυσλειτουργία αναφορικά με την εξέλιξη των διεργασιών επιβεβαιώνοντας το γεγονός ότι η κομποστοποίηση μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα ευρύ φάσμα τιμών του pH (Bernal et al., 2009). Εντούτοις, οι υψηλές τιμές του pH ευνοούν τη μετατόπιση του σημείου ισορροπίας $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$ στο υπόστρωμα με αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών αζώτου σε μορφή αμμωνίας ιδιαίτερα όταν διατηρούνται παράλληλα υψηλά θερμοκρασιακά επίπεδα. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τα πειραματικά αποτελέσματα των Al-Jabi et al. (2008), σύμφωνα με την έρευνα των οποίων, η επίδραση του pH στις απώλειες αζώτου ως αέρια αμμωνία είναι καταλυτική για τιμές pH μεγαλύτερες από 8.0 κατά την κομποστοποίηση οικιακών οργανικών απορριμμάτων, ενώ ο Nahm (2005) παραθέτει ότι σε τιμές pH <7 σχεδόν όλη η αμμωνία είναι δεσμευμένη ως αμμωνιακά αποτρέποντας την πτητικοποίησή της. Καθώς το υπόστρωμα μεταβαίνει σε μια δεύτερη μεσόφιλη φάση, το pH σταδιακά μειώνεται σε όλους τους πειραματικούς κύκλους τείνοντας προς ουδέτερες τιμές στο τέλος του λειτουργικού χρόνου του υποστρώματος στον βιοαντιδραστήρα. Σύμφωνα με τους Roca-Pérez et al. (2009), Kalamdhad and Kazmi (2009), Pagans et al. (2005) και Mena et al. (2003) η μείωση του pH συνεπάγεται τόσο από τη δράση νιτροποιητικών μικροοργανισμών για τη μετατροπή αμμωνιακών σε νιτρικά (απελευθέρωση H^+) όσο και από την πτητικότητα της αμμωνίας η οποία απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα. Τα παραπάνω συμπεράσματα επιβεβαιώνονται και από τα πειραματικά δεδομένα αναφορικά με τις απώλειες αζώτου και την εξέλιξη της συγκέντρωσης των νιτρικών και των αμμωνιακών σε όλες τις διεργασίες κομποστοποίησης που πραγματοποιήθηκαν.

5.2.3.4 Ολικός οργανικός άνθρακας

Η μείωση του οργανικού άνθρακα κατά τα εξελικτικά στάδια της διεργασίας της κομποστοποίησης οφείλεται στη μετατροπή του οργανικού άνθρακα σε ανόργανες ενώσεις, κυρίως CO₂, με την παράλληλη έκλυση θερμότητας (Bernal et al., 2009; Mena et al., 2003; Li et al., 2001; Tiquia and Tam, 2000; Iglesias Jiménez and Perez Garcia, 1989; Hernández et al., 1988). Επομένως, ένα σημαντικό μέρος του οργανικού άνθρακα του υποστρώματος οξειδώνεται σε CO₂ μέσω των μεταβολικών διεργασιών των μικροοργανισμών, ενώ ο υπόλοιπος διαθέσιμος οργανικός άνθρακας μετατρέπεται σε μικροβιακή βιομάζα (π.χ. κυτταρικό τοίχωμα, μεμβράνες, πρωτόπλασμα) (Diaz and Savage, 2007a). Αντίστοιχα στους πειραματικούς κύκλους κομποστοποίησης παρατηρείται αυξημένος ρυθμός μείωσης του οργανικού άνθρακα κατά τη θερμόφιλη φάση της κομποστοποίησης ο οποίος οφείλεται στην κατανάλωση και αφομοίωση των άμεσα διαθέσιμων και διαλυτών οργανικών ενώσεων. Παρόμοια συμπεράσματα παρουσιάζονται από τους Hernández et al. (2006) και Bernal et al. (1998c) κατά την κομποστοποίηση ιλύος και από τους Garcia et al. (1993) κατά την κομποστοποίηση οργανικού κλάσματος αστικών αποβλήτων. Οι οργανικές ενώσεις οι οποίες αφομοιώνονται άμεσα από τους μικροοργανισμούς περιέχονται σε μεγαλύτερες ποσότητες στις βιοαποδομήσιμες ροές οργανικών αποβλήτων όπως η ιλύς και η μη σταθεροποιημένη κοπριά (Bernal et al., 2009; Banegas et al., 2007; Yamada and Kawase, 2006) καθώς τα πρόσθετα υλικά του υποστρώματος είτε παρουσιάζουν αδρανείς ιδιότητες (η περίπτωση του ζεόλιθου και του περλίτη) είτε το μεγαλύτερο μέρος τους αποτελείται από πιο σταθερές και συμπαγής ενώσεις, όπως οι λιγνοκυτταρινούχες (γεωργικά υπολείμματα), οι οποίες διασπώνται με βραδύτερους ρυθμούς (Eklind and Kirchmann, 2000b) καθότι οι μικροοργανισμοί υπεύθυνοι για την αποδόμησή τους αναπτύσσονται σε μεσόφιλες θερμοκρασίες (Insam and de Bertoldi, 2007; Καπετάνιος, 1990). Στα μετέπειτα στάδια της διεργασίας η κατανάλωση του οργανικού άνθρακα μειώνεται εξαιτίας της ελάττωσης της μεταβολικής δραστηριότητας των μικροοργανισμών που προκύπτει από την έλλειψη διαλυτών ανθρακούχων ενώσεων όπως συμπεραίνουν οι Turan and Ergun (2007) και Erstein (1997). Επιπλέον, μετά τη θερμόφιλη φάση, οι Mena et al. (2003) επισημαίνουν ότι κυρίαρχη δράση δεν είναι πλέον η μετατροπή του οργανικού άνθρακα σε ανόργανα συστατικά αλλά η διεργασία της σύνθεσης πιο σταθερών ενώσεων γνωστή ως χουμποποίηση.

Συνοψίζοντας, όλους τους πειραματικούς κύκλους παρατηρείται ταχεία και σημαντική μείωση του ποσοστού του οργανικού άνθρακα. Ιδιαίτερα σημαντική κρίνεται η προσθήκη ορυκτών ως πρόσθετα κομποστοποίησης, με εξέχουσα θέση ανάμεσά τους να κατέχει ο περλίτης, καθώς στους πειραματικούς κύκλους στους οποίους συμμετείχε ως πρόσθετο οδήγησε τη διεργασία σε ταχεία και σημαντική μείωση του ποσοστού του οργανικού άνθρακα κατά τη θερμόφιλη φάση. Ανάλογα αποτελέσματα επέφερε και η χρήση ώριμου κόμποστ ως πρόσθετο κομποστοποίησης. Η μελέτη της εξέλιξης της αποδόμησης του οργανικού άνθρακα, επιτείνει ακόμα περισσότερο την άποψη πως στους πειραματικούς κύκλους που χρησιμοποιήθηκε μόνο πριονίδι ως πρόσθετο, η διεργασία δεν εξελίχθηκε ομαλώς, καθώς η αποδόμηση του οργανικού άνθρακα κρίνεται ανεπαρκής για την εξέλιξη των διεργασιών της κομποστοποίησης.

5.2.3.5 Ολικό άζωτο και απώλειες ολικού αζώτου

Η άμεση μείωση του οργανικού άνθρακα κατά τη βιοξείδωση της οργανικής ουσίας τις πρώτες ημέρες της διεργασίας, συντελούν στην αύξηση του ποσοστού του αζώτου στο υπόστρωμα (Bernal et al., 2009; Said-Pullicino et al., 2007; Paredes et al., 2002; Bernal et al., 1996; Paredes et al., 1996a). Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται κυρίως στο δεύτερο αλλά και στον πρώτο πειραματικό κύκλο κομποστοποίησης. Η αύξηση αυτή του ολικού αζώτου κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης έχει διαπιστωθεί και από άλλους ερευνητές κατά τη διάρκεια της οποίας υπήρξε σημαντική μείωση της οργανικής ουσίας (Kalamdhad and Kazmi, 2009; Kalamdhad et al., 2009; Banegas et al., 2007; Iranzo et al., 2004). Οι μεγαλύτερες απώλειες αζώτου στους πειραματικούς κύκλους της Δράσης Β, παρατηρούνται στον 2^ο Κύκλο, όπου υπάρχει ο χαμηλότερος αρχικός λόγος C/N στο υπόστρωμα. Παρόμοια αποτελέσματα παρουσιάζονται από τους Goyal et al. (2005), Sanchez-Monedero et al. (2001) και Reddy et al. (1979), οι οποίοι διαπίστωσαν ότι οι απώλειες αζώτου είναι μεγαλύτερες κατά την κομποστοποίηση υλικών με χαμηλότερο αρχικό λόγο C/N ενώ οι Bernal et al. (1998a) διατυπώνουν ότι αρχικός χαμηλός λόγος σε συνδυασμό με αυξημένες συγκεντρώσεις αμμωνιακών συνεπάγονται μεγαλύτερο ρυθμό απωλειών αζώτου εξαιτίας της πτητικότητας της αμμωνίας. Στο τελικό στάδιο της κομποστοποίησης παρατηρείται σε όλους τους πειραματικούς κύκλους μικρή αύξηση στο ποσοστό του αζώτου γεγονός το οποίο μπορεί να αποδοθεί τόσο στην περαιτέρω μείωση του οργανικού άνθρακα όσο και στην περιορισμένη δράση ελεύθερων αζωτοδεσμευτικών βακτηρίων ανακτώντας μέρος των απωλειών του αζώτου (Kalamdhad et al., 2009; Insam and de Bertoldi, 2007; Bishop and Godfrey, 1983). Σημαντικές απώλειες αζώτου παρουσιάζονται σε όλους τους πειραματικούς κύκλους κομποστοποίησης με το μεγαλύτερο μέρος αυτών να εμφανίζεται κατά τη θερμόφιλη φάση. Η παρουσία άμεσα διαθέσιμων αζωτούχων ενώσεων που εμπεριέχονται στην οργανική ουσία, όπως οι πρωτεΐνες, η ουρία, το ουρικό οξύ κ.α. (Pagans et al., 2005; Mathur, 1991), έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της συγκέντρωσης των αμμωνιακών και τη συνεπακόλουθη αύξηση του pH στο υπόστρωμα. Επιπλέον, οι υψηλές θερμοκρασίες κατά τη θερμόφιλη φάση της κομποστοποίησης σε συνδυασμό με το αλκαλικό περιβάλλον περιορίζουν τη διεργασία της νιτροποίησης των αμμωνιακών (Bernal et al., 1998c; Bernal et al., 1993; Bishop and Godfrey, 1983) ευνοώντας την πτητικότητα της αμμωνίας στην ατμόσφαιρα (Witter and Lopez-Real, 1988). Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία το εύρος απωλειών αζώτου διαφοροποιείται σημαντικά κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης εξαρτώμενο κυρίως από το είδος του υλικού τροφοδοσίας, τη μέθοδο και τις συνθήκες κομποστοποίησης. Αναλυτικότερα οι Tiquia and Tam (2000), Eghball et al. (1997), Rao Bhamidimarri and Pandey (1996), Martins and Dewes (1992) και Hansen et al. (1989) διαπίστωσαν απώλειες αζώτου με εύρος 21-77% του αρχικού ολικού αζώτου κατά την κομποστοποίηση κοπριάς ζώων, ενώ οι Brink (1995) και Kirchmann and Widen (1994) σημείωσαν απώλειες της τάξης του 50 έως 60% του αρχικού ολικού αζώτου χρησιμοποιώντας οικιακά οργανικά απορρίμματα από διαλογή στην πηγή. Καθοριστικό ρόλο στη μείωση των απωλειών αζώτου διαδραματίζουν ορुकτά με ιοντοεναλλακτική ικανότητα, όπως ο ζεόλιθος, έχοντας την ικανότητα να δεσμεύουν τα αμμωνιακά ιόντα. (Inglezakis et al., 2010; Turan and Ergun, 2007; Witter and Lopez-Real, 1988). Παρόμοια μεγέθη μείωσης

των απωλειών αζώτου εμφανίζουν και οι Al-Jabi et al. (2008) κατά τη χρήση ζεόλιθου 5 και 10% wb ενώ σύμφωνα με τους Villaseñor et al. (2011) η αύξηση της ποσοστιαίας περιεκτικότητας του ζεόλιθου στο οργανικό μίγμα αυξάνει τη μείωση των απωλειών αζώτου. Αέριες απώλειες αζώτου καταγράφονται κυρίως ως αμμωνία (Eklind and Kirchmann, 2000b), αλλά ενδέχεται να εμφανιστούν και ως N₂ (Mahimairaja et al., 1994), NO_x (Martins and Dewes, 1992) και N₂O (Sibbesen and Lind, 1993) μέσω της διεργασίας την απονιτροποίησης κατά την οποία οι μικροοργανισμοί, υπό ανοξικές συνθήκες, χρησιμοποιούν τα νιτρικά ως πηγή οξυγόνου για τις μεταβολικές τους διεργασίες. Για την εξέλιξη της διεργασίας της απονιτροποίησης απαιτείται στο υπόστρωμα να επικρατούν, έστω και τοπικά, συνθήκες ανοξικές κατά τις οποίες τα νιτρικά ανάγονται κυρίως σε N₂ και N₂O σε όξινο περιβάλλον λόγω του σχηματισμού πτητικών οξέων (Gajalakshmi and Abbasi, 2008; Germon and Couton, 1999). Στους πειραματικούς κύκλους κομποστοποίησης διαπιστώνεται η διαρκής αύξηση της συγκέντρωσης των νιτρικών, η απουσία όξινου pH⁽⁸⁾ και η εξασφάλιση υψηλών επιπέδων οξυγόνου στο υπόστρωμα, συνθήκες οι οποίες επιβεβαιώνουν ότι δεν συντελείται σε σημαντικό βαθμό η διεργασία της απονιτροποίησης σε κανέναν από τους πειραματικούς κύκλους (Hwang and Hanaki, 2000; Hellmann et al., 1997). Εξαίρεση αποτελούν, όπως προαναφέρθηκε, οι πειραματικοί κύκλοι στους οποίους δεν προστέθηκε κάποιο ορυκτό στο υπόστρωμα. Σύμφωνα με τα παραπάνω μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι οι αέριες απώλειες αζώτου κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης οφείλονται κατά κύριο λόγο στην πτητικότητα της αμμωνίας γεγονός το οποίο επιβεβαιώνεται και από τους Tiquia and Tam (2000) και Kirchmann and Witter (1989). Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι προς τα τελικά στάδια των διεργασιών ο ρυθμός των συνολικών απωλειών του αζώτου παρουσιάζεται σημαντικά περιορισμένος υποδηλώνοντας ότι στο υπόστρωμα σχηματίζονται σταθερότερες μορφές αζώτου οι οποίες υπόκεινται σε λιγότερο βαθμό σε διεργασίες πτητικότητας, απονιτροποίησης και εκχύλισης (Bernal et al., 2009).

5.2.3.6 Αμμωνιακά και νιτρικά

Σε όλους τους πειραματικούς κύκλους τα αμμωνιακά ξεκινούν από χαμηλές συγκεντρώσεις. Λίγο μεγαλύτερες αρχικές συγκεντρώσεις παρουσιάζουν τα αμμωνιακά στον κύκλο, όπου χρησιμοποιήθηκε αρχικό υπόστρωμα με χαμηλότερο λόγο C/N (20). Κατά τη θερμοφιλή φάση παρατηρείται σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης των αμμωνιακών, ως αποτέλεσμα της διάσπασης αζωτούχων ενώσεων. Δεν παρατηρείται αυτό στους κύκλους, όπου προστέθηκε μόνο πριονίδι ως πρόσθετο. Στους κύκλους αυτούς παρατηρείται μικρή, έως ελάχιστη αύξηση των αμμωνιακών κατά τη θερμοφιλή φάση, ενδεικτικό της ελλειπούς αποδόμησης των αζωτούχων ενώσεων και συνακόλουθα μη ομαλής διεξαγωγής της διεργασίας. Η συγκέντρωση των αμμωνιακών στα μετέπειτα στάδια των πειραματικών κύκλων παρουσιάζει σημαντική μείωση οφειλόμενη τόσο στον περιορισμό της άμεσα διαθέσιμης οργανικής ουσίας όσο και στην παράλληλη μετατροπή τους σε αμμωνία και νιτρικά (Mena et al., 2003; Paredes et al., 2001). Επιπλέον, ο ρυθμός με τον οποίο μειώνεται η συγκέντρωση των αμμωνιακών δεν συμβαδίζει με το ρυθμό

⁽⁸⁾ Με εξαίρεση τις πρώτες ημέρες των διεργασιών

αύξησης των νιτρικών επιβεβαιώνοντας το γεγονός ότι μέρος του αζώτου χάνεται υπό τη μορφή αμμωνίας στην ατμόσφαιρα δεδομένου των ευνοϊκών συνθηκών πτητικοποίησης της αμμωνίας που επικρατούν στον βιοαντιδραστήρα (pH, C/N, θερμοκρασία, ανάδευση, αερισμός) (Fernández et al., 2010; Morisaki et al., 1989). Στους αντιδραστήρες όπου προστέθηκε ζεόλιθος, παρατηρείται μικρότερη παραγωγή αμμωνιακών κατά τη θερμοφιλή φάση. Η δέσμευση μέρους των παραγόμενων αμμωνιακών μέσω του ζεόλιθου περιορίζει την εκλυόμενη αμμωνία, μέρος της οποίας προσροφάται στο ζεόλιθο ενώ παράλληλα ρυθμίζεται και η διεργασία της νιτροποίησης με βάση τόσο την εναπομένουσα συγκέντρωση των αμμωνιακών στο υπόστρωμα όσο και από το ρυθμό εκρόφησής τους από το ζεόλιθο (Inglezakis et al. 2010). Η θερμοκρασία και το pH αποτελούν τους βασικούς περιοριστικούς παράγοντες της βιολογικής οξείδωσης των αμμωνιακών σε νιτρικά. Έχει αναφερθεί από τους Eklind and Kirchmann (2000b), Καπετάνιος (1990) και Alexander (1977) ότι για θερμοκρασία υποστρώματος άνω των 40°C η διεργασία της νιτροποίησης τελείται υπό αργό ρυθμό ενώ σύμφωνα με τους de Bertoldi and Zucconi (1980), υψηλές συγκεντρώσεις αμμωνιακών και κατ' επέκταση υψηλό pH, εμποδίζουν την ανάπτυξη των αυτότροφων νιτροβακτηρίων, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για τη διεργασία της αυτότροφης νιτροποίησης. Επομένως, η περιορισμένη αύξηση των νιτρικών που παρουσιάζεται κατά τη θερμοφιλή φάση των πειραματικών διεργασιών οφείλεται αποκλειστικά στη δράση ετερότροφων νιτροποιητικών βακτηρίων που είναι ανθεκτικότεροι μικροοργανισμοί σε συνθήκες αλκαλικού pH και υψηλών θερμοκρασιών (de Bertoldi et al., 1982; Alexander, 1977). Κατά τα εξελικτικά στάδια της κομποστοποίησης η θερμοκρασία και το pH μειώνονται ενώ η δράση των πρωτεϊνολυτικών βακτηρίων, ευθυνόμενα κυρίως για την αύξηση της συγκέντρωσης των αμμωνιακών, περιορίζεται με αποτέλεσμα την ανάπτυξη της αυτότροφης νιτροποίησης. Πρέπει να επισημανθεί ότι οι αποδοτικές και επαρκής συνθήκες αερισμού και ανάδευσης του υποστρώματος εμπλουτίζουν το υπόστρωμα σε οξυγόνο, απαραίτητη προϋπόθεση για την εξέλιξη της νιτροποίησης και τη σταδιακή αύξηση των νιτρικών ειδικά προς το τέλος των διεργασιών της κομποστοποίησης (Ko et al., 2008; Eklind and Kirchmann, 2000b; Alexander, 1977). Παρόμοιες ενδείξεις παρουσιάζουν και οι Said-Pullicino et al. (2007), Busby et al. (2007), Cooperband et al. (2003), Sánchez-Monedero et al. (2001) και Tiquia and Tam (2000), με τη συγκέντρωση των νιτρικών να αυξάνονται αισθητά κατά τα τελευταία στάδια της επεξεργασίας του οργανικού υλικού διαμορφώνοντας χαμηλές αναλογίες $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$. Η συνεχής αυτή αύξηση των νιτρικών και κατ' επέκταση η απουσία διεργασιών απονιτροποίησης αποτελούν δείκτη της επικράτησης αερόβιων συνθηκών στο σύστημα καθόλη τη διάρκεια των πειραματικών κύκλων κομποστοποίησης. (Μαλαμής 2011)

5.2.3.7 Αναλογία C/N

Από τα στοιχεία που θεωρούνται ως αναγκαία για τη διεξαγωγή της διεργασίας της κομποστοποίησης ο άνθρακας και το άζωτο είναι τα σημαντικότερα. Οι αρχικοί λόγοι των υποστρωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στους πειραματικούς κύκλους ήταν σταθεροί και ελεγχόμενοι (C/N=20,30 και 40), καθώς ο λόγος C/N του αρχικού υποστρώματος αποτέλεσε μία εκ των βασικών παραμέτρων μελέτης της συγκεκριμένης διατριβής. Αναφορικά με την εξέλιξη του C/N στους πειραματικούς

κύκλους διαπιστώνεται ότι η διαμόρφωση της αναλογίας C/N εξαρτάται κυρίως από την κατανάλωση και αφομοίωση του διαθέσιμου οργανικού άνθρακα στο υπόστρωμα με αποτέλεσμα να παρατηρείται μείωση στο λόγο C/N κατά τα εξελικτικά στάδια της κομποστοποίησης (Li et al., 2001).

Προς το τέλος των πειραματικών διεργασιών η αναλογία C/N στο υπόστρωμα τείνει να σταθεροποιηθεί λόγω της επιβράδυνσης των βιοξειδωτικών διεργασιών του οργανικού άνθρακα σε συνδυασμό με τη μερική ανάκτηση των απωλειών αζώτου που δύναται να επιτευχθεί από τη δράση αζωτοδεσμευτικών βακτηρίων (*Insam and de Bertoldi, 2007*). Επομένως, οι λόγοι C/N στο τέλος του λειτουργικού χρόνου του υποστρώματος σε όλους τους βιοαντιδραστήρες διαμορφώνονται σε τιμές κοντά στο 10. Εξαιρέση αποτελεί, ως αναμενόταν, κάθε πειραματικός κύκλος στον οποίο χρησιμοποιήθηκε μόνο πριονίδι ως πρόσθετο κομποστοποίησης, καθώς λόγω της μειωμένης αποδόμησης του οργανικού άνθρακα, ο λόγος C/N παρέμεινε σε υψηλά επίπεδα. Αξίζει να τονισθεί ότι η χρήση περλίτη και ώριμου κόμποστ στους αντιδραστήρες επιτάχυνε τις διαδικασίες αποδόμησης, με αποτέλεσμα στους κύκλους αυτούς να σταθεροποιείται πολύ γρήγορα ο λόγος C/N σε τιμές κοντά στο 10.

5.2.4 Ποιότητα παραγόμενου κόμποστ (Σειρά Γ)

Στην ενότητα αυτή γίνεται η ανάλυση και η αξιολόγηση της ποιότητας του παραγόμενου κόμποστ που προέκυψε από τους πειραματικούς κύκλους με τη χρήση του πρότυπου συστήματος κομποστοποίησης και ύστερα από την ωρίμανση του υλικού κατά την τοποθέτησή του σε εξωτερικό στεγαζόμενο χώρο για διάρκεια 30 ημερών. Ο χαρακτηρισμός της ποιότητας του κόμποστ βασίζεται στον προσδιορισμό των φυσικοχημικών και βιολογικών του ιδιοτήτων σε σχέση με δείκτες ωρίμανσης και σταθεροποίησης, όπως αυτοί προτείνονται από τη διεθνή επιστημονική βιβλιογραφία. Επιπλέον, δείκτες αξιολόγησης του τελικού προϊόντος λαμβάνονται και από διαθέσιμες ποιοτικές προδιαγραφές κόμποστ σε εθνικό, ευρωπαϊκό και διεθνές επίπεδο από αρμόδιες αρχές και οργανισμούς δημόσιους ή ιδιωτικούς. Πρέπει να τονιστεί ότι ο ορθός προσδιορισμός της ποιότητας του κόμποστ βασίζεται στο συνδυασμό διαφορετικών και αξιόπιστων δεικτών ποιότητας και όχι σύμφωνα με τον προσδιορισμό μεμονωμένων χαρακτηριστικών (Goyal et al., 2005; Eggen and Vethe, 2001; Mathur et al., 1993; Riffaldi et al., 1986).

5.2.4.1 Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά παραγόμενου κόμποστ

Ο χαρακτηρισμός του παραγόμενου κόμποστ σύμφωνα με τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του περιλαμβάνει μια σειρά παραμέτρων βάσει των οποίων δύναται να προσδιοριστεί η καταλληλότητα της εδαφικής του εναπόθεσης. Το σύνολο των παραμέτρων αυτών, όπως αυτές προσδιορίστηκαν μετά το πέρας 30 ημερών και την ωρίμανση του τελικού προϊόντος, παρατίθενται στους πίνακες που ακολουθούν για όλους τους πειραματικούς κύκλους. Εκτός των ποσοτικών παραμέτρων περιλαμβάνονται και ποιοτικές παράμετροι αξιολόγησης του τελικού προϊόντος όπως η οσμή και το χρώμα.

Πίνακας 5.137 Πειραματικά αποτελέσματα στο ώριμο κόμποστ (50 ημέρες από την έναρξη της διεργασίας) (Δράση Β Σειρά Β)

Δεύτερος πειραματικός κύκλος Δράσης Β (C/N=20)				
Μέτρηση 50 ημερών	Αντιδραστήρας Πριονίδι	Αντιδραστήρας Ζεόλιθος	Αντιδραστήρας Βερμικουλίτης	Αντιδραστήρας Περλίτης
<i>pH</i>	9,06	8,14	8,12	8,06
% υγρασία	60,15	49,88	51,48	54,36
Λόγος C/N	18,55	9,89	10,15	10,36
Λόγος NH_4^+/NO_3^-	2,03	0,77	0,74	0,63
Δεύτερος πειραματικός κύκλος Δράσης Β (C/N=30)				
Μέτρηση 50 ημερών	Αντιδραστήρας Πριονίδι	Αντιδραστήρας Ζεόλιθος	Αντιδραστήρας Βερμικουλίτης	Αντιδραστήρας Περλίτης
<i>pH</i>	8,55	7,73	7,86	7,77
% υγρασία	58,48	52,21	51,46	53,91
Λόγος C/N	20,06	10,92	10,75	11,07
Λόγος NH_4^+/NO_3^-	1,85	0,64	0,59	0,69
Τρίτος πειραματικός κύκλος Δράσης Β (C/N=40)				
Μέτρηση 50 ημερών	Αντιδραστήρας Πριονίδι	Αντιδραστήρας Ζεόλιθος	Αντιδραστήρας Βερμικουλίτης	Αντιδραστήρας Περλίτης
<i>pH</i>	8,47	7,82	7,97	7,92
% υγρασία	59,73	53,32	52,97	55,67
Λόγος C/N	20,21	10,38	9,17	8,96
Λόγος NH_4^+/NO_3^-	1,78	0,69	0,66	0,7

Πίνακας 5.138 Πειραματικά αποτελέσματα στο ώριμο κόμποστ (50 ημέρες από την έναρξη της διεργασίας) (Δράση Γ Σειρά Β)

Πρώτος πειραματικός κύκλος Δράσης Γ				
Μέτρηση 50 ημερών	Αντιδραστήρας Περγλίτης 10%	Αντιδραστήρας Περγλίτης 5%	Αντιδραστήρας Περγλίτης-Πριονίδι	
<i>pH</i>	8,04	8,75	8,56	
% υγρασία	55,25	68,15	62,27	
Λόγος C/N	11,17	18,05	18,32	
Λόγος NH_4^+/NO_3^-	0,65	1,32	0,79	
Δεύτερος πειραματικός κύκλος Δράσης Γ				
Μέτρηση 50 ημερών	Αντιδραστήρας Περγλίτης 10%	Αντιδραστήρας Περγλίτης+Ζεόλιθος	Αντιδραστήρας Περγλίτης+Βερμικουλίτης	
<i>pH</i>	7,93	7,89	7,91	
% υγρασία	55,48	53,94	52,39	
Λόγος C/N	11,28	10,46	10,12	
Λόγος NH_4^+/NO_3^-	0,65	0,71	0,5	
Τρίτος πειραματικός κύκλος Δράσης Γ (C/N=30)				
Μέτρηση 50 ημερών	Αντ. Περγλίτης+ΩΚ ⁹	Αντ. Βερμ.+Πριονίδι+ΩΚ	Αντ. Πριονίδι+ΩΚ	Αντ. Ζεόλ.+Πριονίδι+ΩΚ
<i>pH</i>	7,86	7,83	8,38	7,76
% υγρασία	52,51	50,27	55,63	49,64
Λόγος C/N	10,11	10,32	19,17	10,14
Λόγος NH_4^+/NO_3^-	0,73	0,70	1,45	0,72
Τέταρτος πειραματικός κύκλος Δράσης Γ (C/N=40)				
Μέτρηση 50 ημερών	Αντ. Περγλίτης+ΩΚ	Αντ. Βερμ.+Πριονίδι+ΩΚ	Αντ. Πριονίδι+ΩΚ	Αντ. Ζεόλ.+Πριονίδι+ΩΚ
<i>pH</i>	8,05	7,91	8,40	7,84
% υγρασία	53,86	52,37	59,54	51,55
Λόγος C/N	8,86	9,33	18,14	10,21
Λόγος NH_4^+/NO_3^-	0,74	0,72	1,28	0,82

⁹ ΩΚ: Ωριμο Κόμποστ

Χρώμα και οσμή

Το χρώμα και η οσμή του κόμποστ αποτελούν φυσικά χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος τα οποία δύναται να παρέχουν άμεσα και εύκολα πληροφορίες αναφορικά με το βαθμό ωρίμανσής του (Bernal et al., 2009; Thompson, 2002). Εντούτοις, οι δείκτες αυτοί είναι ποιοτικοί και περιλαμβάνουν σε μεγάλο βαθμό το υποκειμενικό κριτήριο του αναλυτή (Diaz et al., 2002). Τα αρχικά οργανικά μίγματα που αποτέλεσαν το υλικό τροφοδοσίας των πειραματικών κύκλων δεν παρουσίαζαν καμία δυσσομία, καθώς επρόκειτο για τρόφιμα προερχόμενα από διαλογή στην πηγή. Κατά τα εξελικτικά στάδια της διεργασίας το υπόστρωμα σταδιακά αλλάζει χρώμα, ενώ στο τελικό προϊόν παρατηρείται σκούρα καφετί προς καστανή απόχρωση με ευχάριστη χωμάτινη οσμή χαρακτηριστικά τα οποία είναι ενδεικτικά σε ώριμο κόμποστ (CIWMB, 2004; Thompson, 2002; USEPA, 1995). Παρόμοια αποτελέσματα παρουσιάζονται και από άλλους ερευνητές τόσο κατά την κομποστοποίηση ιλύος (Roca-Pérez et al., 2009) όσο και κατά την κομποστοποίηση αστικών οργανικών απορριμμάτων (Adhikari et al., 2009a; Iyengar and Bhave, 2006). Πρέπει να σημειωθεί ότι στο τελικό προϊόν δεν είναι ευδιάκριτα τα σωματίδια του αρχικού οργανικού υποστρώματος που συνθέταν το οργανικό μίγμα και είναι ξεκάθαρη η μετατροπή του αρχικού υποστρώματος σε εδαφοβελτιωτικό, σε αντίθεση με τα πρόσθετα που διακρίνονται με ευκρίνεια.

Υγρασία

Η περιεχόμενη υγρασία στο τελικό προϊόν αποτελεί μια βασική φυσική παράμετρο αξιολόγησης του κόμποστ. Η χαμηλή περιεκτικότητα σε υγρασία στο κόμποστ δυσκολεύει την ενσωμάτωσή του στο έδαφος ενώ ενδέχεται να αποκρύψει τη βιολογική του σταθερότητα (Eggerth et al., 2007; Bary et al., 2002; Karpetanios et al., 1993). Αντίθετα, υπερβολικά υψηλή περιεχόμενη υγρασία έχει παρατηρηθεί ότι διεγείρει τη μικροβιακή δραστηριότητα στο έδαφος δρώντας ανταγωνιστικά ως προς τους φυτικούς μικροοργανισμούς (Diaz and Savage, 2007a), ενώ παράλληλα δυσχεραίνει τις διεργασίες του χειρισμού, της μεταφοράς και της διάθεσής του (Eggerth et al., 2007). Επιπλέον σύμφωνα με τους Turan and Ergun (2007) η περιεχομένη υγρασία επηρεάζει τη φαινομενική πυκνότητα (bulk density) του κόμποστ και κατ' επέκταση το κόστος μεταφοράς. Οι Diaz et al. (2002) ορίζουν ως ενδεικτικές εμπορικές προδιαγραφές ποιότητας του τελικού προϊόντος, αναφορικά με την περιεχόμενη υγρασία του, ως κλάσης Α για εύρος τιμών 40-60% και κλάσης Β από 30-70%. Οι Hams and Becker (1999) και Karpetanios et al. (1993) θεωρούν ότι το ιδανικό εύρος τιμών της περιεχόμενης υγρασίας στο κόμποστ πρέπει κυμαίνεται από 35 έως 45% ενώ ο Alexander (1994) θέτει βέλτιστες τιμές μεταξύ 45-50%. Οι Eggerth et al. (2007) και Bary et al. (2002) συνιστούν η περιεχόμενη υγρασία να κυμαίνεται από 40-60% και 20-50% αντίστοιχα ενώ ο Faithfull (2002) ορίζει ως μέγιστη επιτρεπτή τιμή αυτή του 40%. Με βάση τις προδιαγραφές ποιότητας κόμποστ του Συνδέσμου Ολοκληρωμένης Διαχείρισης Αποβλήτων στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ (California Integrated Waste Management Board), το τελικό προϊόν πρέπει να έχει υγρασία μεταξύ 30 και 40% (CIWMB, 2004) ενώ σύμφωνα με τις Βελγικές προδιαγραφές η τιμή δεν πρέπει να ξεπερνάει το 40% (VLACO, 1995). Στα ίδια επίπεδα ορίζεται και η υγρασία από τις Αυστριακές προδιαγραφές με την περιεχόμενη υγρασία να τίθεται μεταξύ 35 και 45% (Österreichische bundesregierung, 2001). Τέλος αξίζει να αναφερθεί ότι σύμφωνα με την Κοινοτική Απόφαση 2006/799/ΕΚ της Ε.Ε., περί

καθορισμού αναθεωρημένων οικολογικών κριτηρίων και των σχετικών απαιτήσεων αξιολόγησης και εξακρίβωσης για την απονομή κοινοτικού οικολογικού σήματος σε βελτιωτικά εδάφους, το τελικό προϊόν πρέπει να περιέχουν υγρασία μικρότερη του 75 %. (Μαλαμής 2011)

Όπως παρατηρείται από τη διεθνή βιβλιογραφία, καθώς και από ενδεικτικές προδιαγραφές για την περιεχομένη υγρασία του τελικού προϊόντος υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση όσων αφορά στη βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρασία του τελικού κόμποστ με πιο σύνηθες το εύρος τιμών μεταξύ 40 έως 50%. Το παραγόμενο κόμποστ κατά τη διεργασία όλων των πειραματικών κύκλων κομποστοποίησης εμπίπτει στο προτεινόμενο εύρος, παρουσιάζοντας τιμές που βρίσκονται πολύ κοντά στο 50%. (Πίνακες 5.137-5.138). Η μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε υγρασία παρουσιάζεται στο κόμποστ παραγόμενο από κύκλους διεργασιών που χρησιμοποιήθηκε ως πρόσθετο μόνο πριονίδι, καθώς και στον κύκλο που χρησιμοποιήθηκε περλίτης, αλλά σε ποσοστό 5%κ.β. Στα κόμποστ αυτά η υγρασία, ακόμα και μετά το πέρας 30 ημερών από το τέλος της διεργασίας εντός των αντιδραστήρων, παραμένει σε υψηλά επίπεδα, ξεπερνώντας αρκετές φορές και το 60%. Αυτό αποτελεί βασικό συμπέρασμα για τη συμβολή των ορυκτών στον έλεγχο της υγρασίας του υποστρώματος και, εν τέλει, του τελικού προϊόντος. Συμπερασματικά τα ορυκτά, σε ποσοστό 10%κ.β., δημιουργούν κατάλληλο πορώδες στο υπόστρωμα, ώστε να γίνεται σωστά ο αερισμός του, με αποτέλεσμα να οξυγονώνονται οι αερόβιοι μικροοργανισμοί που βιοαποδομούν την οργανική ύλη, και μέσω της μεταβολικής διεργασίας παράγουν υψηλές θερμοκρασίες κατά τη θερμόφιλη φάση, ρυθμίζοντας ταυτόχρονα και τα επίπεδα της υγρασίας.

pH

Το pH του παραγόμενου κόμποστ αποτελεί μια επιπλέον φυσική παράμετρο αξιολόγησης του τελικού προϊόντος. Η σημαντικότητα ελέγχου του pH στο κόμποστ αφορά στην επίδρασή του στο pH του εδάφους και κατ' επέκταση στη διαθεσιμότητα των χημικών ενώσεων στους φυτικούς οργανισμούς (DoE, 1996). Η επίδραση της εναπόθεσης κόμποστ στο pH του εδάφους επηρεάζεται από παραμέτρους όπως η ρυθμιστική ικανότητα του εδάφους, το pH του κόμποστ, η ποσότητα του κόμποστ που επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί και το βαθμό ανάμιξής του με το έδαφος καθώς και από το ρυθμό βιοαποδόμησης του κόμποστ κατά τη διάθεσή του (Watson, 2002).

Αναφορικά με το κόμποστ που προέκυψε από τη διεργασία όλων των πειραματικών κύκλων κομποστοποίησης, το τελικό προϊόν εμφανίζεται να έχει ελαφρώς βασικές τιμές. Αναλυτικότερα το pH λαμβάνει 7,76 – 8,14. Εξαιρέση αποτελούν τα κόμποστ που προήλθαν από διεργασίες στις οποίες δε χρησιμοποιήθηκε κάποιο ορυκτό ως πρόσθετο. Τα κόμποστ αυτά εμφανίζουν εμφανώς υψηλότερες τιμές pH, που σε αρκετές περιπτώσεις ξεπερνούν και το 8,5, ακόμα και μετά την "ωρίμανση" του προϊόντος. Το γεγονός αυτό είναι ενδεικτικό της μη ορθής διεξαγωγής της διεργασίας (Πίνακα 5.137-5.138). Σύμφωνα με τους Hogg et al. (2002), Fogarty et al. (1991) και Καπετάνιος (1990) το προτεινόμενο εύρος του pH στο τελικό κόμποστ είναι μεταξύ 6.0-8.5, ενώ οι Faithfull (2002) και Μανιός και Μανιαδάκης (2001) περιορίζουν το εύρος των βέλτιστων τιμών από 7.0 έως 8.0. Σύμφωνα με τους Bary et al. (2002) τιμές μικρότερες του 5.0 ή μεγαλύτερες του 8.0 δύναται να προκαλέσουν επιβλαβείς συνθήκες στα φυτά, ενώ ως επιθυμητό εύρος ορίζουν τιμές pH μεταξύ 6.0 – 7.0. Παρόμοιες αποτελέσματα

παρουσιάζουν και οι Κουλουμπής και Τσαντήλας (2007) σύμφωνα με τους οποίους το pH του κόμποστ πρέπει να κυμαίνεται σε ουδέτερο προς ελαφρώς όξινο περιβάλλον (6.0-7.5), τονίζοντας ότι τιμές άνω του 8.4 ενδέχεται να επιβαρύνουν την υγεία των φυτικών οργανισμών ενώ υπό αυτές τις συνθήκες παρουσιάζονται συνήθως οσμές και απώλειες αζώτου υπό μορφή αμμωνίας κατά τη διάθεση του κόμποστ στο έδαφος. Επιπλέον τιμές pH στο κόμποστ μικρότερες ή ίσες του 5.0 αυξάνουν σημαντικά την κινητικότητα των βαρέων μετάλλων στο έδαφος με ενδεχόμενες επιπτώσεις τόσο στα φυτά όσο και στους υδάτινους αποδέκτες (Κουλουμπής και Τσαντήλας, 2007). Οι Diaz et al. (2002), αναφορικά με το pH, ορίζουν ως ενδεικτικές εμπορικές προδιαγραφές ποιότητας του τελικού προϊόντος ως κλάσης A κόμποστ για εύρος τιμών 5.5-6.5 και κλάσης B από 5.0-8.0. Επιπλέον, ο Alexander (1994) θέτει ως βέλτιστες τιμές pH μεταξύ 6.8-7.3. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι Zmora-Nahum et al. (2007) εξετάζοντας το pH σε τριάντα επτά (37) εμπορικά διαθέσιμα κόμποστ χωρών της Ε.Ε. με διαφορετικό τροφοδοτικό υλικό, προέκυψαν τιμές με εύρος 5.27-8.36 και μέση τιμή ίση με 7.41. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές ποιότητας κόμποστ του Βελγίου και του Συνδέσμου Ολοκληρωμένης Διαχείρισης Αποβλήτων της Καλιφόρνια των ΗΠΑ το pH του τελικού κόμποστ πρέπει να έχει τιμές μεταξύ 6.5 και 8.5 (CIWMB, 2004; VLACO, 1995). Με βάση τα παραπάνω προκύπτει ότι το παραγόμενο κόμποστ παρουσιάζει επιθυμητό εύρος τιμών αναφορικά με το pH και δεν ενδέχεται να επιδράσει αρνητικά στο περιβάλλον κατά την εναπόθεση του στο έδαφος, με εξαίρεση το κόμποστ που παράχθηκε από διεργασίες με πρόσθετο μόνο πριονίδι ή ορυκτό σε αναλογία 5%κ.β. Το pH στις περιπτώσεις αυτές έχει οριακές τιμές για εναπόθεση του κόμποστ στο έδαφος.

Αναλογία C/N

Η αναλογία C/N χρησιμοποιείται από πολλούς ερευνητές ως μία από τις βασικές χημικές παραμέτρους ελέγχου και αξιολόγησης της ποιότητας του τελικού προϊόντος καθότι ο άνθρακας και το άζωτο αποτελούν τα πλέον σημαντικά στοιχεία αναφορικά με τη θρεπτική αξία του κόμποστ. Εντούτοις, σύμφωνα με τους Cofie et al. (2009) και Ko et al. (2008) δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως απόλυτος δείκτης ωρίμανσης του κόμποστ, καθότι παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση στις τιμές του εξαρτώμενο από τα χαρακτηριστικά του αρχικού υποστρώματος.

Οι Diaz et al. (2002) ορίζουν ως ενδεικτικές εμπορικές προδιαγραφές ποιότητας του τελικού προϊόντος, αναφορικά με τον λόγο C/N, ως κλάσης A για μέγιστη τιμή ίση με 15 και κλάσης B για μέγιστη τιμή ίση με 20. Οι Zmora-Nahum et al. (2007) εξετάζοντας την αναλογία C/N σε τριάντα επτά (37) εμπορικά διαθέσιμα κόμποστ σε χώρες της Ε.Ε. με διαφορετικό τροφοδοτικό υλικό, προέκυψαν τιμές με εύρος 9.8-21.6 με μέση τιμή ίση με 14.9. Σύμφωνα με το Συμβούλιο Ποιότητας Κόμποστ της Καλιφόρνια των ΗΠΑ (California Compost Quality Council), το κόμποστ για να τεθεί υπό περαιτέρω έλεγχο αξιολόγησης της ποιότητάς του προϋποθέτει η αναλογία C/N να είναι μικρότερη ή ίση του 25 (CCQC, 2001). Επίσης, στις προδιαγραφές ποιότητας κόμποστ του Συνδέσμου Ολοκληρωμένης Διαχείρισης Αποβλήτων της Καλιφόρνια ορίζεται ως καλής ποιότητας κόμποστ υλικά με αναλογία C/N<17 (CIWMB, 2004). Επιπλέον, στις Καναδικές προδιαγραφές έχει τεθεί ως ανώτατο όριο αναλογίας C/N ίσο με 25 (CCME, 2005), ενώ με βάση τις προδιαγραφές του Βελγίου το κόμποστ πρέπει να κατέχει λόγο C/N<18 (VLACO, 1995). Στον Πίνακα 5.139 παρουσιάζονται προτεινόμενοι λόγοι C/N στο τελικό προϊόν από διάφορους ερευνητές.

Πίνακας 5.139: Προτεινόμενη αναλογία C/N στο κόμποστ σύμφωνα με τη βιβλιογραφία

Αναλογία C/N	Βιβλιογραφική αναφορά
<25	Aslam et al. (2008), Brewer and Sullivan (2003), Erhart and Burian (1997)
Ενδείκνυται <20 Προτιμότερο <15	Golueke (1981), Poincelot (1974)
<18	De Baere et al. (1986)
<12	Jimenez and Garcia (1992)
15-25	Canet and Pomares (1995), Mathur et al. (1993)
15-20	Sharma et al. (1997)
10-20 , Μέγιστο 22	Faithfull (2002)
Ιδανικά ίση με 10	Mathur (1991)
<20	Goyal et al. (2005), Μανιός και Μανιαδάκης (2001), Li et al.(2001)
12-15	Bary et al. (2002)
15-25	Sæbø and Ferrini (2006)
≤ 17 (εκτός αν στο κόμποστ παραμένουν ογκώδη ξύλινα υλικά)	WERL (2005)

Σε όλους τους πειραματικούς κύκλους κομποστοποίησης η αναλογία C/N στο τελικό προϊόν κειμένεται από 8,86-11,28, με εξαίρεση τα κόμποστ στα οποία δεν προστέθηκε ορυκτό στο αρχικό υπόστρωμα, όπου ο λόγος C/N έχει τελικές τιμές κοντά στο 20. (Πίνακες 5.137-5.138).

Σύμφωνα με τους Gutser et al. (2005) σε αναλογίες μεγαλύτερες του 25 διαπίστωσαν ότι η διάθεση κόμποστ καταλήγει σε ακινητοποίηση του αζώτου ενώ οι McConnell et al. (1993), Sikora et al. (1980) και Tester et al. (1977) παρατηρούν τα ίδια αποτελέσματα για C/N μεγαλύτερο του 30. Παρατηρείται ότι στα τελικά προϊόντα των πειραματικών κύκλων δεν εμφανίζονται υψηλές αναλογίες C/N. Συνεπώς, η εναπόθεση του παραγόμενου κόμποστ στο έδαφος δεν αναμένεται να προκαλέσει ακινητοποίηση του αζώτου και κατ' επέκταση ενσωμάτωση του ανόργανου αζώτου στη μικροβιακή βιομάζα όπως παρατηρείται από τους Diaz and Savage (2007a), Brinton (2000), Bannick and Joergensen (1993) και Kostov et al. (1991). Ως εκ τούτου, ενδεχόμενη χρήση του δεν προβλέπει τη διαμόρφωση συνθηκών έλλειψης αζώτου κατά τις οποίες οι φυτικοί οργανισμοί ανταγωνίζονται τους μικροοργανισμούς ως προς το διαθέσιμο προς αφομοίωση άζωτο παρεμποδίζοντας την ανάπτυξη των φυτών. Αντίθετα, αρκετά χαμηλές αναλογίες C/N στο κόμποστ δύναται να διαμορφώσουν τοξικές συνθήκες στους μικροοργανισμούς λόγω της παρουσίας αυξημένων συγκεντρώσεων αμμωνιακών που προέρχονται από την ανοργανοποίηση της περίσσειας αζώτου (Diaz and Savage, 2007a; Hoitink and Boehm, 1999; Epstein, 1997). Οι Iglesias-Jimenez and Alvarez (1993) συμπέραναν ότι κατά τη χρήση κόμποστ με αναλογία C/N μικρότερη του 12 η ανοργανοποίηση του αζώτου είναι μεγαλύτερη από την ακινητοποίησή του. Οι Nevens and Reheul (2003), Eriksen et al. (1999) και Bazzoffi et al. (1998) κατέληξαν ότι αναλογία με εύρος τιμών από 9 έως 15 αποτρέπει αρνητικές επιπτώσεις του κόμποστ στις καλλιέργειες με τους μηχανισμούς ανοργανοποίησης και ακινητοποίησης του αζώτου να είναι σε ισορροπία.

Επομένως, στο κόμποστ σχεδόν από όλους τους πειραματικούς κύκλους στους οποίους προστέθηκαν ορυκτά ως πρόσθετα της διεργασίας, ο λόγος C/N έχει τελικές τιμές, μετά την ωρίμανση, που κειμένονται από 9,5-11,5, και ως εκ τούτου αναμένεται να διαμορφώσει ευνοϊκές συνθήκες αναφορικά με τους μηχανισμούς του αζώτου κατά την

εναπόθεσή του. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τους Amlinger et al. (2003) κατά την ανασκόπηση της δυναμικής του αζώτου για ανοργανοποίηση ή ακινητοποίησή του κατά την εναπόθεση κόμποστ σε βοσκότοπους και αρόσιμο έδαφος όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.140. Δε συμβαίνει το ίδιο και για το κόμποστ που προήλθε από διεργασίες που πραγματοποιήθηκαν απουσία ορυκτών, όπου παρουσιάζει τιμές C/N κοντά στο 20. Οι τιμές αυτές για ένα τελικό προϊόν, δεν αποτελούν από μόνες τους ένδειξη ύπαρξης κόμποστ όχι καλής ποιότητας, σε συνδυασμό, όμως, με τις υπόλοιπες μετρούμενες παραμέτρους καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως σε αυτούς τους πειραματικούς κύκλους η διεργασία δεν εξελίχθηκε ομαλά.

Πίνακας 5.140 Δυναμική του αζώτου σχετιζόμενη με το λόγο C/N του τελικού προϊόντος κατά την εναπόθεσή του σε βοσκότοπους και αρόσιμο έδαφος (Amlinger et al., 2003)

C/N σε βοσκότοπο	C/N σε Αρόσιμο/καλλιεργήσιμο έδαφος	Δυναμική Αζώτου
<7.5	<8	Διακριτή απελευθέρωση αζώτου (N-release distinct)
7.5-8.5	8-9	Απελευθέρωση αζώτου (N-release)
8.5-9.5	9-11	Άζωτο σε ισορροπία (Balanced)
9.5-10.5	11-14	Δεσμευμένο άζωτο (N-binding)
>10.5	>14	Διακριτά Δεσμευμένο άζωτο (N-binding distinct)

Αμμωνιακά και νιτρικά

Η αξιολόγηση του παραγόμενου κόμποστ προσδιορίζεται επιπλέον και με βάση τη εξέλιξη των ανόργανων μορφών του αζώτου κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης καθώς και την περιεκτικότητα αυτών στο τελικό προϊόν. Σύμφωνα με τους Brinton (2000) και Finstein and Miller (1985) όταν η συγκέντρωση των αμμωνιακών μειώνεται και τα νιτρικά αρχίζουν και εμφανίζονται στην προς κομποστοποίηση οργανική ουσία τότε το υλικό μπορεί να χαρακτηριστεί ως κόμποστ, καθότι η τάση αυτή υποδηλώνει ότι η εντατική βιολογική αποσύνθεση έχει επιβραδυνθεί και ότι οι διεργασίες εξετελέσθησαν υπό αερόβιες συνθήκες. Σε συνέχεια των παραπάνω οι Cooperband et al. (2003) διατυπώνουν ότι στο ώριμο κόμποστ η συγκέντρωση των αμμωνιακών πρέπει να είναι περιορισμένη ενώ η αντίστοιχη των νιτρικών πρέπει να είναι σε υπολογίσιμα μεγέθη.

Υψηλές συγκεντρώσεις αμμωνιακών στο κόμποστ υποδηλώνουν μη σταθεροποιημένο υλικό το οποίο κατά την εναπόθεσή του προσροφάται η αμμωνία στο έδαφος και δύναται να οδηγήσει σε ακινητοποίηση του αζώτου, όπως έχει παρατηρηθεί από τους Korner and Stegmann (2002) και Liang et al. (2000). Ως ανώτατο επιτρεπτό όριο περιεκτικότητας του κόμποστ σε αμμωνιακά έχει ορισθεί από τους Bernal et al. (1998a) και Zucconi and Bertoldi (1987) ίσο με $400 \text{ mg kg}^{-1} \text{ dm}$, ενώ κατά τους Bary et al., (2002) το όριο είναι ίσο με $500 \text{ mg kg}^{-1} \text{ dm}$. Επιπλέον, σύμφωνα με τις προδιαγραφές ποιότητας κόμποστ του Συμβουλίου Ποιότητας Κόμποστ της Καλιφόρνια των ΗΠΑ, το τελικό κόμποστ ορίζεται ως πολύ ώριμο για περιεκτικότητα σε αμμωνιακά μικρότερη του $75 \text{ mg kg}^{-1} \text{ dm}$, ως ώριμο για εύρος τιμών μεταξύ $75-500 \text{ mg kg}^{-1} \text{ dm}$ και ως μη ώριμο για τιμές μεγαλύτερες του $500 \text{ mg kg}^{-1} \text{ dm}$ (TMEEC, 2002; CCQC, 2001). Παρατηρείται ότι οι συγκεντρώσεις των αμμωνιακών στο παραγόμενο κόμποστ κατά τις διεργασίες όλων των

πειραματικών κύκλων (με εξαίρεση τους κύκλους με πρόσθετο μόνο πριονίδι) είναι συνεπείς με τις προαναφερόμενες οριακές τιμές όπως αυτές αναφέρονται στη βιβλιογραφία. (Πίνακες 5.137-5.138). Πρέπει να σημειωθεί ότι η μικρότερη συγκέντρωση αμμωνιακών παρουσιάζεται στους κύκλους όπου προστέθηκε ζεόλιθος, του οποίου η ιοντοεναλλακτική και προσροφητική του ικανότητα ως προς τα αμμωνιακά ιόντα έχει ως αποτέλεσμα τη ρύθμιση τόσο της συγκέντρωσης των αμμωνιακών όσο και των νιτρικών στο υπόστρωμα.

Οριακές τιμές έχουν τεθεί και για τα νιτρικά καθότι η υπέρμετρη συγκέντρωσή τους δύναται να διαμορφώσει συνθήκες περίσσειας θρεπτικών συστατικών στο έδαφος. Σύμφωνα με το Σύνδεσμο Ολοκληρωμένης Διαχείρισης Αποβλήτων της Καλιφόρνια των ΗΠΑ, το επιτρεπτό εύρος συγκέντρωσης νιτρικών στο τελικό κόμποστ κυμαίνεται από 250-350 mg kg⁻¹ dm (CIWMB, 2004), ενώ κατά τους Bary et al. (2002) το οριακό εύρος τιμών είναι 200–500 mg kg⁻¹ dm. Επομένως, παρατηρείται ότι οι συγκεντρώσεις των νιτρικών, με εξαίρεση αυτές των κύκλων που προστέθηκε μόνο πριονίδι, είναι συνεπείς με τις προαναφερόμενες οριακές τιμές, όπως αυτές αναφέρονται στη βιβλιογραφία. Θα πρέπει στο σημείο αυτό να τονιστεί πως, η διάσπαση του οργανικού αζώτου και κατ'επέκταση ο βαθμός εκχύλισης και απορροής θρεπτικών συστατικών στο περιβάλλον εξαρτάται από παραμέτρους που επηρεάζουν την ανοργανοποίηση του αζώτου οι οποίες μεταξύ άλλων είναι το είδος του κόμποστ, η σύσταση του εδάφους όπου γίνεται η εφαρμογή του, ο ρυθμός, η ποσότητα και η πρακτική εναπόθεσης του κόμποστ καθώς και οι κλιματολογικές συνθήκες (Hargreaves et al., 2008; Amlinger et al., 2003). Για το λόγο αυτό απαιτείται περαιτέρω έρευνα για την περιβαλλοντική διαχείριση του αζώτου του παραγόμενου κόμποστ και για την κατανόηση των παραμέτρων και των διεργασιών οι οποίες επηρεάζουν το βαθμό και το ρυθμό μετατροπής του οργανικού αζώτου στις ανόργανες μορφές του προκειμένου να εκτιμηθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της χρήσης του. Γενικότερα τα οργανικά εδαφοβελτιωτικά παρουσιάζουν μικρότερες απώλειες σε νιτρικά από ότι τα χημικά λιπάσματα, καθότι το μεγαλύτερο τμήμα του αζώτου παρουσιάζεται δεσμευμένο στο οργανικό άζωτο (EC, 2003). Οι Burgos et al. (2006) σημείωσαν ποσοστιαίες απώλειες νιτρικών με εύρος τιμών μεταξύ 0.34-0.73% του αρχικού ολικού αζώτου, κατά την προσθήκη διαφορετικού κόμποστ σε στήλες εδάφους. Εντούτοις, οι απώλειες αυτές είναι μικρότερες από ότι παρατηρούνται σε άλλες έρευνες στις οποίες έγινε χρήση οργανικών και ανόργανων λιπασμάτων σε καλλιέργειες. (Stopes et al., 2002; Tan et al., 2002; Addiscott et al., 1991)

Πέραν των συγκεντρώσεων των νιτρικών και αμμωνιακών στο κόμποστ, σημαντικός δείκτης ποιότητας και αξιολόγησης του τελικού προϊόντος αποτελεί η αναλογία αμμωνιακών προς νιτρικά (NH₄⁺/NO₃⁻) (Sanchez-Monedero et al., 2001; Epstein, 1997). Σύμφωνα με τους Ko et al. (2008) ο δείκτης NH₄⁺/NO₃⁻ θεωρείται πιο αξιόπιστος από την αναλογία C/N για τον καθορισμό της ποιότητας του τελικού προϊόντος, ενώ το Συμβούλιο Ποιότητας Κόμποστ της Καλιφόρνια θεωρεί ότι η αναλογία δύναται να χρησιμοποιηθεί ως αξιόπιστο μέτρο της ωρίμανσης του κόμποστ μόνο εφόσον το άθροισμα των συγκεντρώσεων των αμμωνιακών και των νιτρικών του δείγματος είναι μεγαλύτερο από 250 mg kg⁻¹ dm (CCQC, 2001). (Μαλαμής 2011)

Οι Pare et al. (1998) και Garcia et al. (1992) ορίζουν ως γενικό δείκτη ωρίμανσης του κόμποστ λόγους NH₄⁺/NO₃⁻ μικρότερους του 1.0 ενώ σύμφωνα με τον Brinton (2000) η αντίστοιχη αναλογία είναι ίση με 0.5. Αυστηρότερα όρια θέτουν οι Bernal et al. (1998a) κατά τους οποίους, για καλής ποιότητας κόμποστ, ο λόγος NH₄⁺/NO₃⁻ πρέπει να είναι

μικρότερος του 0.16. Σύμφωνα με το Συμβούλιο Ποιότητας Κόμποστ της Καλιφόρνια, το τελικό κόμποστ ορίζεται ως πολύ ώριμο για $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^- < 0.5$, ως ώριμο $0.5 < \text{NH}_4^+/\text{NO}_3^- < 3.0$ και ως μη ώριμο $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^- > 3.0$ (CCQC, 2001). Αναφορικά με τους πειραματικούς κύκλους, το παραγόμενο κόμποστ, παρουσιάζει αναλογία $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ που κειμένεται από 0,5-0,82, με εξαίρεση τους κύκλους που πραγματοποιήθηκαν με προσθήκη μόνο πριονιδίου, όπου ο αντίστοιχος λόγος παρουσιάζει τιμές από 1,28-2,1. Οι αναλογίες $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ των προϊόντων σε όλους τους κύκλους που έγινε χρήση ορυκτών εμπίπτουν στο εύρος τιμών που ορίζεται για το ώριμο κόμποστ, καθώς κειμένονται από 0,5-0,82, ενώ οι αναλογίες στους κύκλους με σκέτο πριονίδι ως πρόσθετο είναι αρκετά έξω από τα όρια, όσον αφορά σε κόμποστ καλής ποιότητας, καθώς κειμένονται από 1,28 έως 2,03.

Μακροστοιχεία

Η σημαντικότητα ελέγχου της περιεκτικότητας των μακροστοιχείων στο κόμποστ έγκειται στο γεγονός ότι αποτελούν το βασικό παράγοντα της θρεπτικής αξίας του τελικού προϊόντος για την εναπόθεσή του, καθώς κάθε φυτικός οργανισμός απαιτεί συγκεκριμένες ποσότητες σε θρεπτικά στοιχεία για την ανάπτυξή του. Τα στοιχεία αυτά που απαιτούνται σε μεγαλύτερες ποσότητες από τα φυτά είναι τα μακροστοιχεία με κυρίαρχα, κατά σειρά προτεραιότητας, το άζωτο το φώσφορο και το κάλιο. Επιπλέον το μαγνήσιο είναι εξίσου σημαντικό για την ανάπτυξη των φυτικών οργανισμών, μαζί με άλλα ιχνοστοιχεία (Na, Ca), αλλά χρησιμοποιούνται σε μικρότερες ποσότητες. Η περιεκτικότητα του κόμποστ σε μακροστοιχεία δεν αποτελεί περιοριστικό παράγοντα για την τελική του χρήση. Εντούτοις, κόμποστ με χαμηλή ποσότητα σε θρεπτικά συστατικά (κυρίως άζωτο, φώσφορο ή κάλιο) παρουσιάζουν μειωμένη θρεπτική αξία με αποτέλεσμα είτε να χρειάζονται μεγάλες ποσότητες χρήσης αυτού είτε να γίνεται η συμπλήρωση των αναγκαίων ποσοτήτων από χημικά λιπάσματα. (Μαλαμής 2011). Αντίθετα, η εναπόθεση κόμποστ με υψηλή περιεκτικότητα μακροστοιχείων δύναται να δημιουργήσει συνθήκες οι οποίες μπορούν να επιβαρύνουν το περιβάλλον με ενδεχόμενη αποστράγγιση – εκχύλιση αυτών και τη ρύπανση παρακείμενων υδατικών οικοσυστημάτων (υπόγειων ή επιφανειακών) (WSDE, 1994). Για τους παραπάνω λόγους η πλειονότητα των Κρατών Μελών της Ε.Ε. έχει θεσπίσει κανόνες ορθολογικής γεωργικής πρακτικής του κόμποστ (π.χ. Οδηγία 91/676/ΕΟΚ σχετικά με την προστασία των υδάτων από τη νιτρορύπανση γεωργικής προέλευσης), ώστε να εξασφαλιστεί τόσο η μέγιστη απαίτηση των καρπών σε θρεπτικά όσο και η ισορροπία μεταξύ εδάφους και θρεπτικών συναρτήσεως του χρόνου. Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα αναφορικά με την περιεκτικότητα του παραγόμενου κόμποστ σε άζωτο, κάλιο, μαγνήσιο και ασβέστιο (Πίνακες 5.141-5.142) και παρατίθενται τα αντίστοιχα διαγράμματα. Πρέπει να τονισθεί ότι η περιεκτικότητα σε μακροστοιχεία στο τελικό προϊόν παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις εξαρτώμενη κυρίως από την επεξεργαζόμενη οργανική πρώτη ύλη, το πρόσθετο κομποστοποίησης (κυρίως όταν πρόκειται για ορυκτό), καθώς και από τον βαθμό βιοαποδόμησης που έχει υποστεί το υπόστρωμα (Bary et al., 2002; Zaccheo et al., 2002).

Άζωτο

Το άζωτο αποτελεί αναπόσπαστο στοιχείο για την ανάπτυξη των φυτών και η σημαντικότητά του έγκειται στο γεγονός ότι αποτελεί βασικό στοιχείο για τη σύνθεση των πρωτεϊνών. Το άζωτο είναι διαθέσιμο στα φυτά σε ανόργανες μορφές με κυρίαρχες αυτές των αμμωνιακών και των νιτρικών. Το μεγαλύτερο ποσοστό του αζώτου στο κόμποστ είναι δεσμευμένο στα οργανικά μόρια και η διαθεσιμότητά του κατά την εναπόθεσή του στο έδαφος εξαρτάται από το ρυθμό με τον οποίο οι μικροοργανισμοί το διασπούν προς ανόργανα συστατικά. Επομένως, η διαθεσιμότητα του αζώτου από το κόμποστ στα φυτά δεν είναι άμεση όπως γίνεται στην περίπτωση των ανόργανων χημικών λιπασμάτων γεγονός που καθιστά το κόμποστ ως επιθυμητό καθότι η απελευθέρωση αζώτου επιτυγχάνεται με βραδύτερο ρυθμό. (Μαλαμής 2011). Σύμφωνα με τον Faithfull (2002) για τον έλεγχο της διαθεσιμότητας του αζώτου στους φυτικούς μικροοργανισμούς το ελάχιστο όριο οργανικού αζώτου που πρέπει να εμπεριέχεται στο κόμποστ είναι ίσο με 90% του ολικού αζώτου, ενώ σύμφωνα με την Απόφαση 2006/799/ΕΚ της Ε.Ε. σχετικά με απονομή κοινοτικού οικολογικού σήματος σε βελτιωτικά εδάφους, το ανόργανο άζωτο δεν πρέπει να ξεπερνά το 20% του ολικού αζώτου. Το περιεχόμενο ολικό άζωτο του κόμποστ που προέκυψε από όλους τους πειραματικούς κύκλους καταγράφει τιμές μεταξύ 1,82-2,68 % dm. Τις υψηλότερες τιμές παρουσιάζουν τα κόμποστ, που είχαν το μικρότερο λόγο C/N (20) στο αρχικό υπόστρωμα, καθώς για την επίτευξη μικρότερου λόγου C/N χρησιμοποιείται μεγαλύτερη ποσότητα σε τροφές πλούσιες σε αζωτούχες ενώσεις (όσπρια). Ταυτόχρονα, υψηλές τιμές, ανεξαρτήτως λόγου C/N στο αρχικό υπόστρωμα, παρουσιάζουν όλοι οι κύκλοι στους οποίους χρησιμοποιήθηκε ζεόλιθος ως πρόσθετο, λόγω της γνωστής ιδιότητας του ζεόλιθου να δεσμεύει τις μορφές αζώτου στο εσωτερικό του, με αποτέλεσμα να περιορίζει τις απώλειές του. Οι Zmora-Nahum et al. (2007), Wolkowski (2003) και Iglesias-Jimenez and Alvarez (1993) παρουσιάζουν τυπικές τιμές ολικού αζώτου σε κόμποστ, διαφορετικού τροφοδοτικού υλικού, με εύρος τιμών 0.8-3.0% ενώ σε αναλύσεις που διεξήγαγε ο Gomez (1998) σε ογδόντα δύο (82) διαφορετικά είδη κόμποστ αστικών στερεών αποβλήτων, η περιεκτικότητα σε ολικό άζωτο είναι κατά μέσο όρο ίση με 1.7%. Οι Hargreaves et al. (2008) σε εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση του ολικού αζώτου σε κόμποστ αστικών οργανικών απορριμμάτων αναφέρει τιμές με εύρος από 0.5 έως 3.5%. Αντίστοιχα οι Vogtman et al. (1996) και Lawrence (1996) μέτρησαν την περιεκτικότητα διαφορετικού είδους κόμποστ σε ολικό άζωτο με τις τιμές να κυμαίνονται από 0.9-2.0%. Επιπλέον έχει προταθεί εύρος ενδεικτικών τιμών ως προς την περιεκτικότητα του ολικού αζώτου στο κόμποστ. Αναφορικά οι Diaz et al. (2002) ορίζουν εμπορικές προδιαγραφές ποιότητας του τελικού προϊόντος ως κόμποστ κλάσης Α και Β με ελάχιστη περιεκτικότητα σε ολικού αζώτου ίση με 1.0% και 0.5% αντίστοιχα. Ο Alexander (1994) θέτει ως βέλτιστο εύρος τιμών μεταξύ 1.0-2.0%. Οι Iyengar and Bhave (2006) και Soumaré et al. (2003) ορίζουν ότι η περιεκτικότητα του κόμποστ σε ολικό άζωτο πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 1.0% για να μπορεί να χαρακτηριστεί ως εδαφοβελτιωτικό ενώ ο Ravin (2005) θέτει αντίστοιχα την τιμή μεγαλύτερη από 1.8%. Σύμφωνα με το Σύνδεσμο Ολοκληρωμένης Διαχείρισης Αποβλήτων της Καλιφόρνια των ΗΠΑ το τελικό κόμποστ πρέπει να περιέχει ολικό άζωτο 1.0-2.0% ενώ με βάση τις προδιαγραφές του Βελγίου το ολικό άζωτο πρέπει να λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες του 0.7% (CIWMB, 2004; VLACO, 1995). Επιπλέον, με την Απόφαση 2006/799/ΕΚ της Ε.Ε. για την απονομή κοινοτικού οικολογικού σήματος σε βελτιωτικά εδάφους, το ανώτατο επιτρεπτό όριο τιμών ολικού αζώτου τίθεται ίσο με 3.0% ενώ κατά το Υπουργείο

Γεωργίας του Καναδά η περιεκτικότητά του πρέπει να κυμαίνεται από 1.0 έως 4.5% (CCME, 2005). Συμπερασματικά το παραγόμενο κόμποστ εμφανίζεται πλούσιο σε ολικό άζωτο σε όλους τους πειραματικούς κύκλους συγκριτικά τόσο με τις βιβλιογραφικές αναφορές όσο και με τις ενδεικτικές προδιαγραφές περιεκτικότητας σε ολικό άζωτο. Η αυξημένη αυτή περιεκτικότητα αντικατοπτρίζει το υψηλό ποσοστό αζώτου των οργανικών προς επεξεργασία αποβλήτων που επιλέχθηκαν για την εφαρμογή των πειραματικών κύκλων κομποστοποίησης. Πρέπει, όμως, να ληφθεί υπόψη ότι το περιεχόμενο άζωτο του κόμποστ είναι κυρίως σε οργανική μορφή με αποτέλεσμα ο βαθμός της διαθεσιμότητας του να εξαρτάται από το ρυθμό ανοργανοποίησής του. Επιπλέον, σύμφωνα με την Οδηγία 91/676/ΕΟΚ και τον Κανονισμό 1804/1999/ΕΚ ⁽¹⁰⁾, η υψηλή περιεκτικότητα σε άζωτο δεν είναι απαγορευτική συνθήκη για τη χρήση του παραγόμενου κόμποστ στο έδαφος αλλά κρίνεται αναγκαία η ρύθμιση και η σωστή πρακτική εφαρμογής του οργανικού αυτού υλικού με τρόπο ώστε να μην ξεπερνάει τα όρια εναπόθεσης αζώτου το οποία έχουν καθοριστεί στα 170 kg ha⁻¹ yr⁻¹.

Κάλιο

Το κάλιο είναι το τρίτο κατά σειρά μακροστοιχείο ως προς το επίπεδο αναγκαιότητας για την ανάπτυξη των φυτικών οργανισμών μετά το άζωτο και το φώσφορο, καθότι αποτελεί σημαντικό παράγοντα βασικών λειτουργιών των ενζύμων. Η σημαντικότητα στα φυτά έγκειται περισσότερο στη σύνθεση αμινοξέων και πρωτεϊνών καθώς και στη διεργασία της φωτοσύνθεσης. Στα κόμποστ που παράχθηκαν από όλους τους πειραματικούς κύκλους οι τιμές του περιεχόμενου καλίου κυμαίνονται μεταξύ 2,31-4,57 % dm, όπως φαίνεται στους πίνακες 5.141-5.142. Τις υψηλότερες τιμές παρουσιάζει ο κύκλος στον οποίο προστέθηκε περλίτης σε ποσοστό 55 κ.β., καθώς στον κύκλο αυτό χρησιμοποιήθηκε αρκετά μεγαλύτερη ποσότητα τροφίμων για τη δημιουργία του αρχικού υποστρώματος, σε σχέση με τους υπόλοιπους κύκλους. Υψηλή τιμή μαρουσιάζει και ο κύκλος 4 της Δράσης Β στον οποίο χρησιμοποιήθηκε και μπανάνα στα κυτταρινούχα υλικά, η οποία έχει υψηλή περιεκτικότητα σε κάλιο. Η περιεκτικότητα καλίου σε κόμποστ από αστικά οργανικά απορρίμματα σύμφωνα με τους Hargreaves et al. (2008) λαμβάνουν τιμές μεταξύ 0.12-1.80% K₂O dm ενώ ο Gomez (1998) βρήκε κατά μέσο όρο τιμή ίση με 0.90% K₂O dm σε δείγμα ογδόντα δύο (82) κόμποστ αστικών απορριμμάτων. Τυπικές τιμές καλίου κατά τον Alexander (1994) κυμαίνονται από 0.24-0.60% K₂O dm. Επίσης, ενδεικτικές τιμές στην περιεκτικότητα καλίου παρουσιάζει και ο Faithfull (2002) με εύρος τιμών από 0.45-1.80% K₂O dm, ενώ ορίζει ως ελάχιστο ποσοστό ίσο με 0.30% K₂O dm. Τέλος, ως κατώτερο επιτρεπτό όριο προτείνεται ίσο με 1.20% K₂O dm και 0.75% K₂O dm από τους Iyengar and Bhave (2006) και τις Βελγικές προδιαγραφές ποιότητας αντίστοιχα (VLACO, 1995). Σύμφωνα με τα παραπάνω παρατηρείται ότι το κόμποστ το οποίο προέρχεται από όλους τους πειραματικούς κύκλους κομποστοποίησης είναι εμπλουτισμένο σε κάλιο λόγω της υψηλής περιεκτικότητας των τροφών που αποτελούν τον αρχικό υπόστρωμα, με κύριες πηγές τα λαχανικά και τα φρούτα.

⁽¹⁰⁾ Κανονισμός (ΕΚ) αριθ. 1804/1999 του Συμβουλίου της 19^{ης} Ιουλίου 1999 για συμπλήρωση, για τα κτηνοτροφικά προϊόντα, του κανονισμού (ΕΟΚ) αριθ. 2092/91 περί του βιολογικού τρόπου παραγωγής γεωργικών προϊόντων και των σχετικών ενδείξεων στα γεωργικά προϊόντα και στα είδη διατροφής

Μαγνήσιο

Το μαγνήσιο απαιτείται από τους φυτικούς μικροοργανισμούς σε μικρότερες ποσότητες απ' ό τι το άζωτο, ο φώσφορος και το κάλιο, αλλά είναι εξίσου σημαντικό στοιχείο για την ανάπτυξή τους. Η λειτουργία της φωτοσύνθεσης καθώς και η δραστηριότητα βασικών ενζύμων υπεύθυνα για το ρυθμό ανάπτυξης των φυτών εξαρτώνται από την παρουσία του μαγνησίου. Το περιεχόμενο μαγνήσιο του κόμποστ που προέκυψε από όλους τους πειραματικούς κύκλους παρουσιάζει τιμές 0,41-3,97% dm (Πίνακες 1.541-1.542). Οι υψηλότερες τιμές παρουσιάζονται στα κόμποστ που προστέθηκε ως πρόσθετο το ορυκτό βερμικουλίτης. Ο βερμικουλίτης έχει υψηλή περιεκτικότητα σε μαγνήσιο (12%κ.β.), και είναι πιθανό ένα μέρος από το ποσοστό αυτό να το απελευθερώνει στο κόμποστ. Σε ανασκόπηση που πραγματοποίησαν οι Hargreaves et al. (2008) σε κόμποστ από αστικά οργανικά απορρίμματα αναφέρει εύρος τιμών 0.30-0.73% MgO dm, ενώ ο Καπετάνιος (1990) για το ίδιο ρεύμα οργανικών αποβλήτων παρουσιάζει τιμές μεταξύ 0.30 και 1.90% MgO dm. Σύμφωνα με τους Faithfull (2002) και Hams and Becker (1999), ενδεικτικές τιμές μαγνησίου στο κόμποστ είναι 0.3-3.0% MgO dm και 0.4-1.6% MgO dm αντίστοιχα ενώ με βάση τις βελγικές προδιαγραφές η ελάχιστη ενδεικτική περιεκτικότητα σε μαγνήσιο είναι 0.35% MgO (VLACO, 1995). Όπως και στα προηγούμενα μακροστοιχεία, το παραγόμενο κόμποστ με τη χρήση του συστήματος κομποστοποίησης παρουσιάζεται πλούσιο σε μαγνήσιο και εμπίπτει σε όλες τις περιπτώσεις στο ενδεικτικό εύρος τιμών όπως αυτό παρατίθεται από τη βιβλιογραφία.

Ασβέστιο

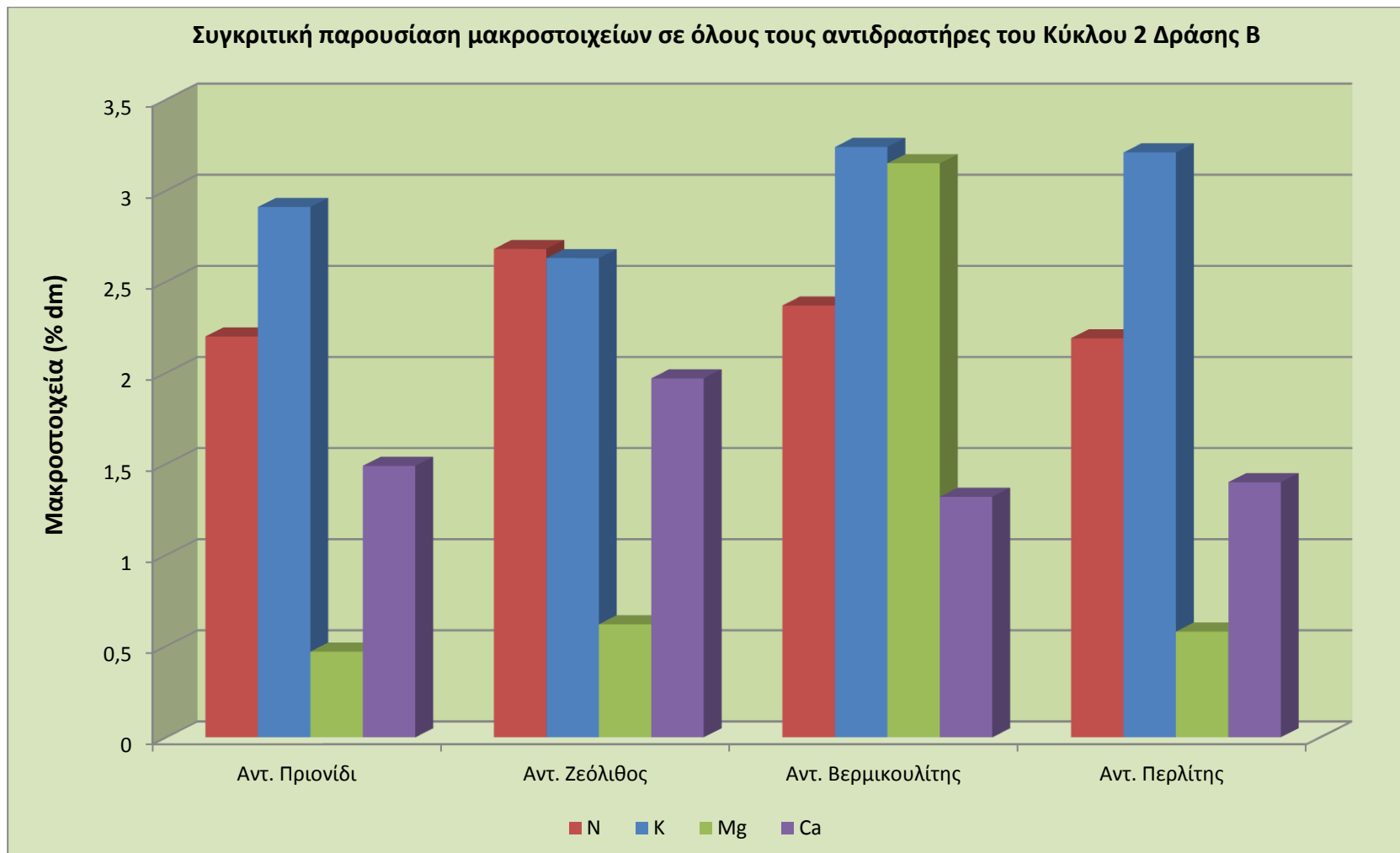
Το ασβέστιο είναι απαραίτητο συστατικό της κυτταρικής μεμβράνης και η παρουσία του κρίνεται σημαντική στο σχηματισμό νέων κυττάρων. Η περιεκτικότητα ασβεστίου στο παραγόμενο κόμποστ κατά τη λειτουργία του συστήματος κομποστοποίησης σε όλους τους πειραματικούς κύκλους παρουσιάζει τιμές μεταξύ 1,26-2,27% dm (Πίνακες 5.141-5.142). Αναφορικά με την ποσοστιαία περιεκτικότητα του ασβεστίου σε κομποστοποιημένη ιλύ, το τμήμα οικολογίας της πολιτείας της Ουάσινγκτον μετρήσε εύρος τιμών 1.45-3.89% CaO dm (μέση τιμή 2.52% CaO dm), ο Manios (2004) σημείωσε τιμή ίση με 6.45% CaO dm και ο Kuchenrither et al. (1985) ίση με 3.66% CaO dm. Υψηλότερες τιμές μεταξύ 9.0-9.2% CaO dm εμφανίζουν οι Roca-Pérez et al. (2009) κατά την κομποστοποίηση ιλύος με γεωργικά υπολείμματα. Οι Hargreaves et al. (2008) σημειώνουν εύρος τιμών σε κόμποστ από αστικά απορρίμματα μεταξύ 0.1-9.2% CaO dm, ενώ ενδεικτικές τιμές ασβεστίου σε κόμποστ από κοπριά κυμαίνονται από 2.89-4.32% CaO dm (BCMAFF, 1998). Οι Faithfull (2002) και Hams and Becker (1999) προτείνουν εύρος τιμών μεταξύ 1.5-10.0% CaO dm και 3.5-14.0% CaO dm αντίστοιχα. Επιπλέον, ως ελάχιστη ενδεικτική τιμή ασβεστίου στο κόμποστ ορίζεται από τις βελγικές προδιαγραφές (VLACO, 1995) και τον Faithfull (2002) ίση με 2.0% CaO dm. Με βάση τα παραπάνω προκύπτει ότι η περιεκτικότητα του ασβεστίου στο παραγόμενο κόμποστ εμπίπτει στο εύρος τιμών που παρατίθεται από τη βιβλιογραφία.

Πίνακας 5.141 Πειραματικά αποτελέσματα μακροστοιχείων (%dm) στο ώριμο κόμποστο (50 ημέρες από την έναρξη της διεργασίας) (Δράση Β Σειρά Β)

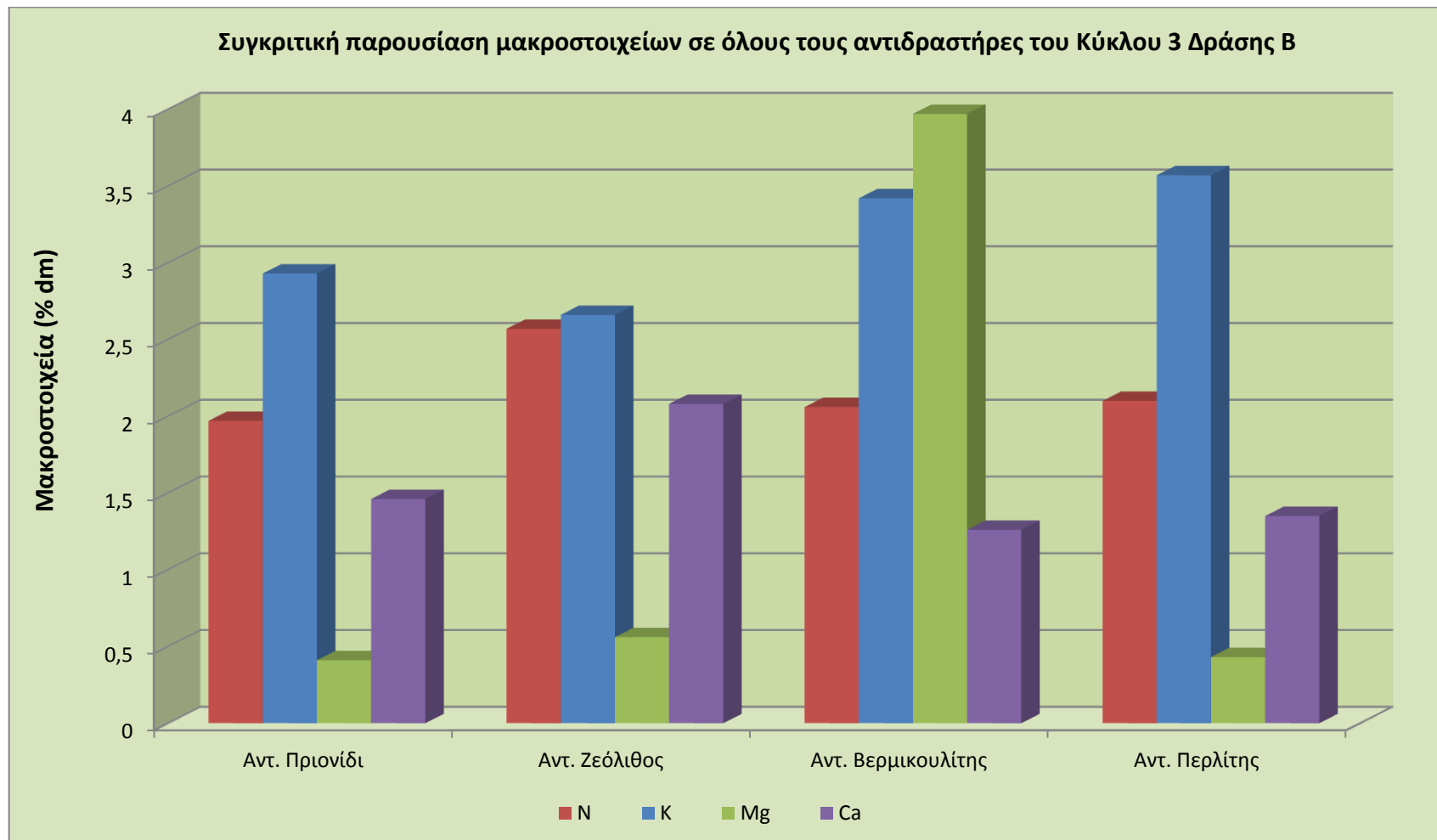
Δεύτερος πειραματικός κύκλος Δράσης Β (C/N=20)				
Μακροστοιχεία(%dm)	Αντιδραστήρας Πριονίδι	Αντιδραστήρας Ζεόλιθος	Αντιδραστήρας Βερμικουλίτης	Αντιδραστήρας Περλίτης
N	2,2	2,68	2,37	2,19
K	2,91	2,63	3,24	3,21
Mg	0,47	0,62	3,15	0,58
Ca	1,49	1,97	1,32	1,40
Δεύτερος πειραματικός κύκλος Δράσης Β (C/N=30)				
Μακροστοιχεία(%dm)	Αντιδραστήρας Πριονίδι	Αντιδραστήρας Ζεόλιθος	Αντιδραστήρας Βερμικουλίτης	Αντιδραστήρας Περλίτης
N	1,97	2,57	2,06	2,1
K	2,93	2,66	3,42	3,57
Mg	0,41	0,56	3,97	0,43
Ca	1,46	2,08	1,26	1,35
Τρίτος πειραματικός κύκλος Δράσης Β (C/N=40)				
Μακροστοιχεία(%dm)	Αντιδραστήρας Πριονίδι	Αντιδραστήρας Ζεόλιθος	Αντιδραστήρας Βερμικουλίτης	Αντιδραστήρας Περλίτης
N	1,82	2,46	2,42	2,16
K	3,99	3,15	3,93	4,18
Mg	0,95	0,84	2,97	0,64
Ca	1,96	2,15	1,28	1,56

Πίνακας 5.142 Πειραματικά αποτελέσματα μακροστοιχείων (%dm) στο ώριμο κόμποστ (50 ημέρες από την έναρξη της διεργασίας) (Δράση Γ Σειρά Β)

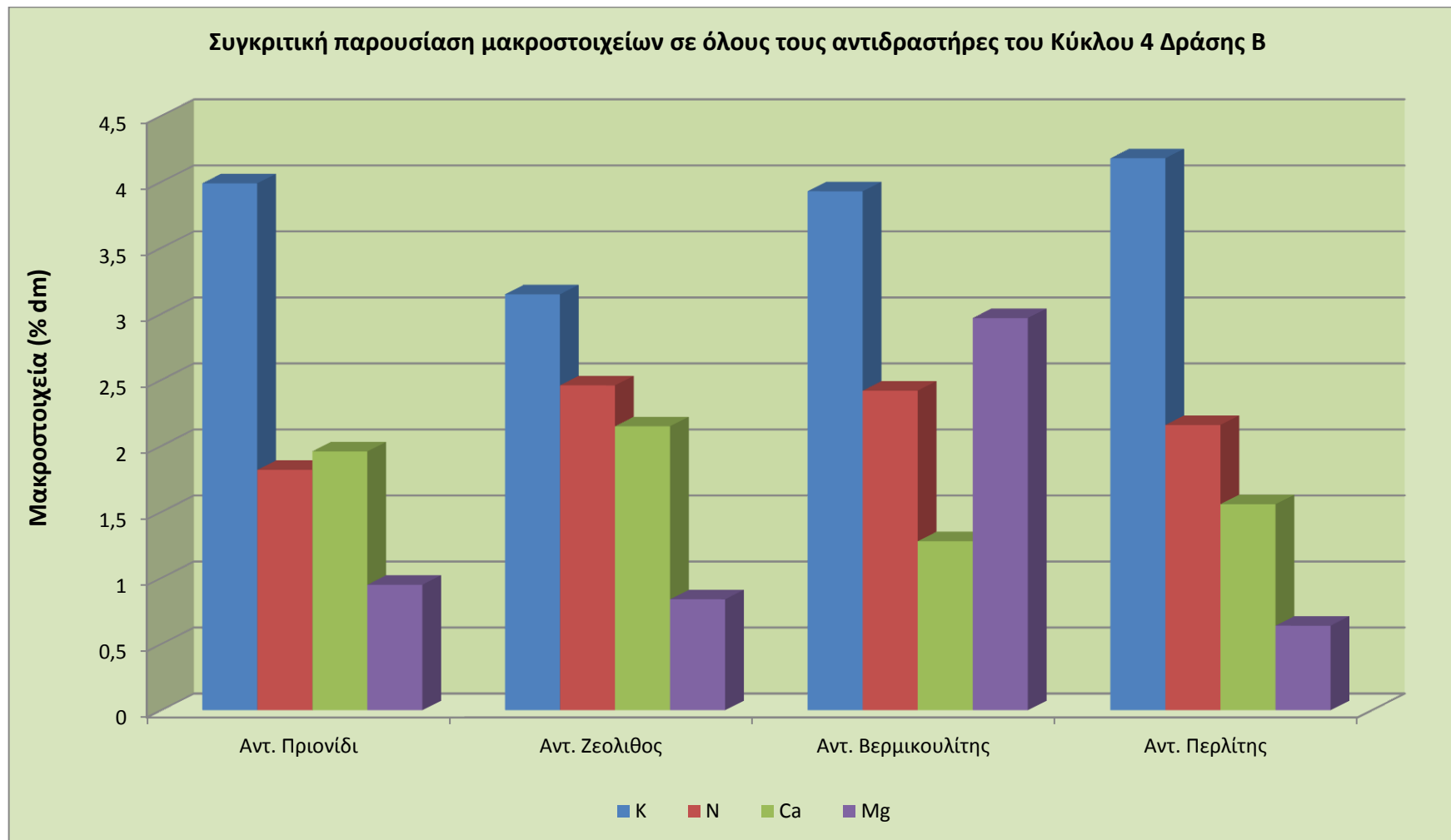
Πρώτος πειραματικός κύκλος Δράσης Γ				
Μακροστοιχεία	Αντιδραστήρας Περγλίτης 10%	Αντιδραστήρας Περγλίτης 5%	Αντιδραστήρας Περγλίτης-Πριονίδι	
N	2,06	1,94	1,83	
K	4,27	4,57	3,45	
Mg	0,52	0,63	0,45	
Ca	1,45	1,56	1,28	
Δεύτερος πειραματικός κύκλος Δράσης Γ				
Μακροστοιχεία	Αντιδραστήρας Περγλίτης 10%	Αντιδραστήρας Περγλίτης+Ζεόλιθος	Αντιδραστήρας Περγλίτης+Βερμικουλίτης	
N	2,02	2,48	2,27	
K	4,41	3,98	3,42	
Mg	0,64	0,94	2,93	
Ca	1,57	1,96	1,32	
Τρίτος πειραματικός κύκλος Δράσης Γ (C/N=30)				
Μακροστοιχεία	Αντ. Περγλίτης+ΩΚ	Αντ. Βερμ.+Πριονίδι+ΩΚ	Αντ. Πριονίδι+ΩΚ	Αντ. Ζεόλ.+Πριονίδι+ΩΚ
N	2,11	2,21	1,93	2,68
K	2,64	2,76	2,67	2,31
Mg	0,67	3,44	0,55	0,76
Ca	1,46	1,38	1,54	2,05
Τέταρτος πειραματικός κύκλος Δράσης Γ (C/N=40)				
Μακροστοιχεία	Αντ. Περγλίτης+ΩΚ	Αντ. Βερμ.+Πριονίδι+ΩΚ	Αντ. Πριονίδι+ΩΚ	Αντ. Ζεόλ.+Πριονίδι+ΩΚ
N	2,21	2,39	1,94	2,57
K	2,96	3,08	3,05	2,72
Mg	0,88	2,93	0,98	1,05
Ca	1,62	1,44	1,72	2,27



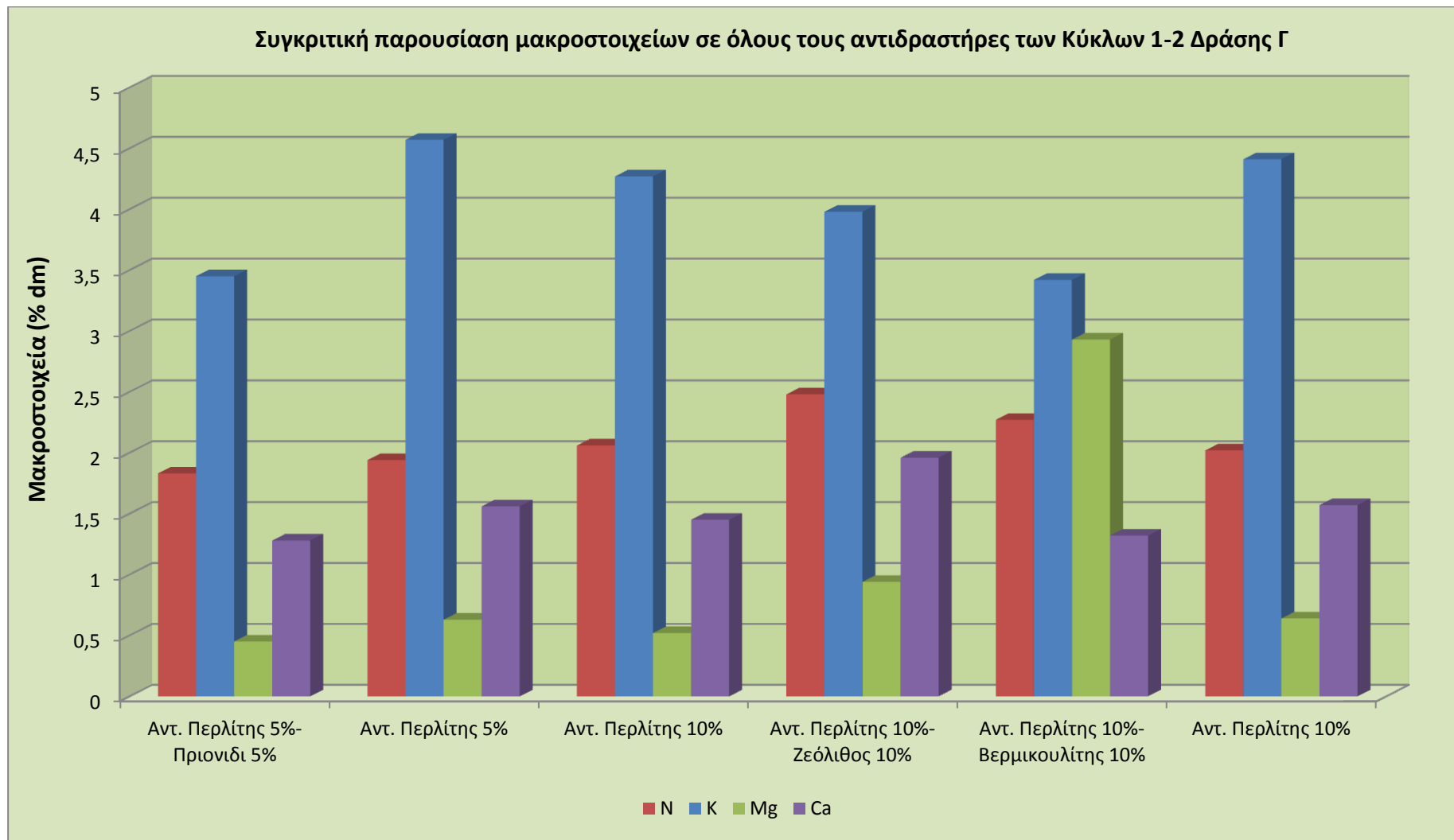
Διάγραμμα 5.120 Συγκριτική απεικόνιση των μακροστοιχείων (%dm) στους 4 αντιδραστήρες του δεύτερου κύκλου Δράσης Β



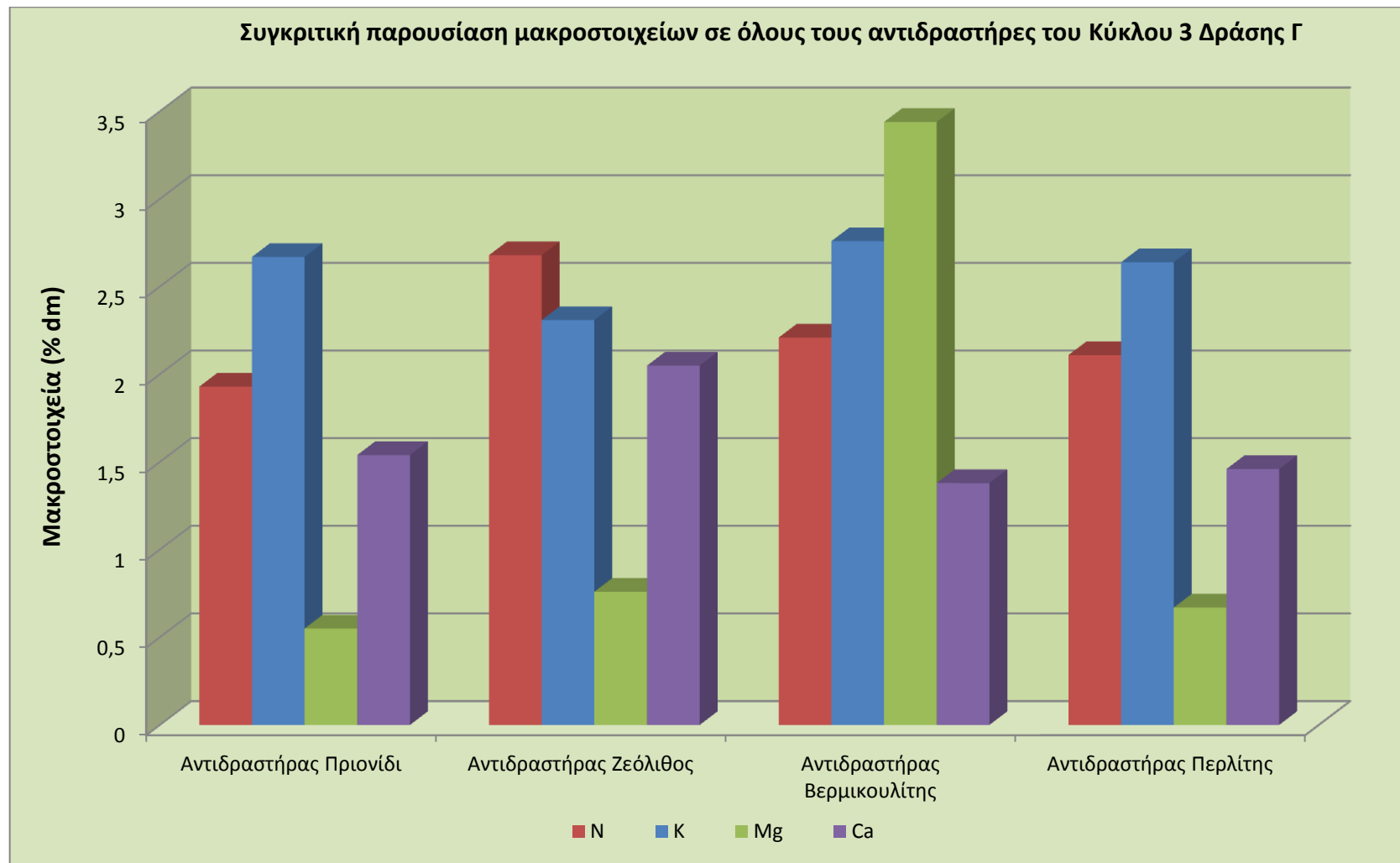
Διάγραμμα 5.121 Συγκριτική απεικόνιση των μακροστοιχείων (%dm) στους 4 αντιδραστήρες του τρίτου κύκλου Δράσης Β



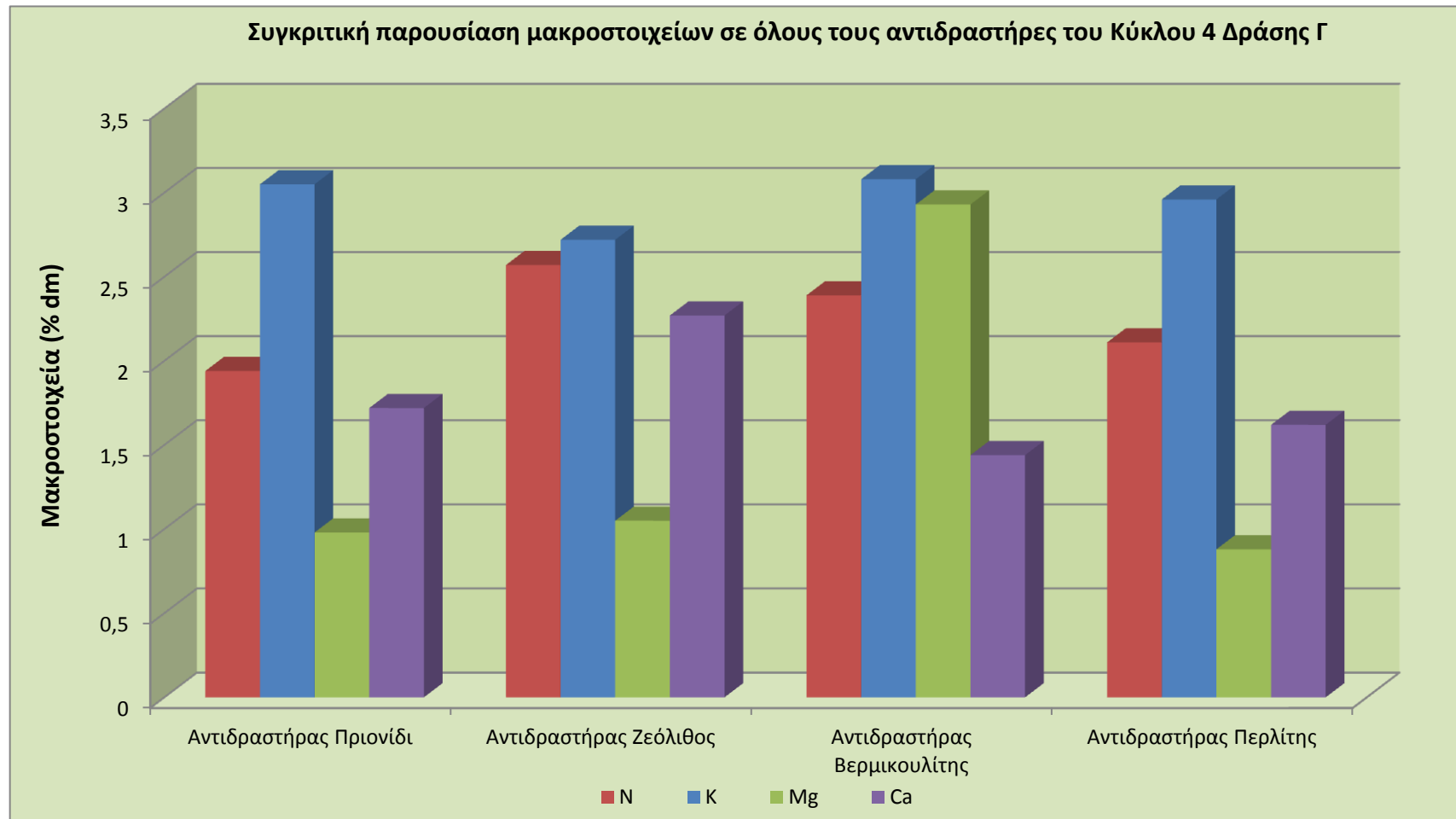
Διάγραμμα 5.122 Συγκριτική απεικόνιση των μακροστοιχείων (%dm) στους 4 αντιδραστήρες του τέταρτου κύκλου Δράσης Β



Διάγραμμα 5.123 Συγκριτική απεικόνιση των μακροστοιχείων (%dm) στους 6 αντιδραστήρες των Κύκλων 1-2 Δράσης Γ



Διάγραμμα 5.124 Συγκριτική απεικόνιση των μακροστοιχείων (%dm) στους 4 αντιδραστήρες του Κύκλου 3 Δράσης Γ



Διάγραμμα 5.125 Συγκριτική απεικόνιση των μακροστοιχείων (%dm) στους 4 αντιδραστήρες του Κύκλου 4 Δράσης Γ

5.2.4.2 Βιολογικά χαρακτηριστικά παραγόμενου κόμποστ

Η περαιτέρω αξιολόγηση της ποιότητας του παραγόμενου κόμποστ πραγματοποιείται σύμφωνα με τα βιολογικά του χαρακτηριστικά στα οποία περιλαμβάνονται ο προσδιορισμός της φυτοτοξικότητας και η συγκέντρωση παθογόνων μικροοργανισμών.

Φυτοτοξικότητα στο παραγόμενου κόμποστ

Από τις επικρατέστερες βιολογικές μεθόδους αξιολόγησης του τελικού προϊόντος, η συνηθέστερη και πιο συχνά αναφερόμενη στη διεθνή βιβλιογραφία είναι ο προσδιορισμός του επιπέδου της φυτοτοξικότητας του κόμποστ με τη χρήση του Δείκτη Βλαστικότητας (Δ.Β.), όπως αυτή πρώτα αναπτύχθηκε, μελετήθηκε και αναλύθηκε από τους Zucconi et al. (1981). Ο προσδιορισμός του Δ.Β. έγκειται στην ποσοτικοποίηση της ανάπτυξης επιλεγμένων καρπών κατά τη χρήση υγρού εκχυλίσματος του κόμποστ σε σύγκριση με την ανάπτυξη των καρπών σε τυφλό δείγμα (συνήθως απιονισμένο νερό). Ο Δ.Β. επιτρέπει τον υπολογισμό τόσο της επίδρασης χαμηλών επιπέδων φυτοτοξικότητας, η οποία επηρεάζει το βαθμό ανάπτυξης των ριζών του καρπού, όσο και την επίδραση υψηλών επιπέδων φυτοτοξικότητας η οποία επηρεάζει τη βλαστικότητα των καρπών. (Μαλαμής 2011) Λαμβάνοντας υπόψη τον τρόπο προσδιορισμού του Δ.Β. θα αναμενόταν τιμές κάτω του 100% να υποδεικνύουν ενδεχόμενη φυτοτοξικότητα ενώ αντίστοιχα τιμές μεγαλύτερες του 100% να υποδεικνύουν τη θετική επίδραση του προϊόντος στους καρπούς και κατ' επέκταση την ωριμότητά του. Αντιθέτως, με βάση τη βιβλιογραφία, διαπιστώνεται ότι δεν υπάρχει ένα κοινό κατώτερο όριο του Δ.Β. πάνω από το οποίο διασφαλίζεται ότι το κόμποστ είναι ώριμο. Αναλυτικότερα, οι Zucconi et al. (1981) αναφέρουν ότι κόμποστ που παρουσιάζουν τιμές Δ.Β. μεγαλύτερες από 80% υποδηλώνουν την απουσία φυτοτοξικών ενώσεων και μπορούν να θεωρηθούν ότι έχουν ολοκληρώσει το στάδιο ωρίμανσής τους, ενώ παρόμοιες εισηγήσεις έχουν διατυπωθεί και από τους Lasaridi et al. (2006), Fang and Wong (1999) και Tiquia et al. (1996b). Οι Mena et al. (2003) χρησιμοποιώντας καρπούς βρώμης (*Hordeum vulgare*) και κάρδαμου (*Lepidium sativum*) σε κόμποστ από ιλύ και πράσινα απόβλητα προτείνουν Δ.Β. ίσο με 110 και 80% αντίστοιχα για ώριμο προϊόν. Οι Μανιός και Μανιαδάκης (2001) ορίζουν ως ενδεικτική τιμή Δ.Β. για καλής ποιότητας κόμποστ μεγαλύτερη από 90%, ενώ σύμφωνα με τους Ko et al. (2008) η χρήση κόμποστ από κοπριά ζώων για γεωργικούς σκοπούς που κατέχει Δ.Β. περίπου 90% δημιουργεί αρνητικές συνθήκες στη βλάστηση και την ανάπτυξη των φυτών ενώ για το συγκεκριμένο τύπο κόμποστ προτείνουν Δ.Β. με τιμή μεγαλύτερη του 110 ως δείκτη ωριμότητάς του. Έχει ακόμα διατυπωθεί από τους Bernal et al. (1998a) ότι Δ.Β. μεγαλύτερος από 50% ενδέχεται να αποτελέσει δείκτη ωρίμανσης του κόμποστ σε συνδυασμό με άλλους δείκτες (π.χ. $\text{NH}_4\text{-N} < 400 \text{ mg kg}^{-1} \text{ dm}$, $\text{C/N} < 12$). Επιπλέον, με βάση τις Καναδικές προδιαγραφές ως ελάχιστο επιτρεπτό όριο του Δ.Β. στο κόμποστ ορίζεται ίσο με 90% με τη χρήση κάρδαμου ή ραπανάκι, ενώ σύμφωνα με τις προδιαγραφές ωριμότητας του κόμποστ στην πολιτεία της Καλιφόρνια το εύρος αποδεκτού ορίου είναι μεταξύ 80-90% (CCME, 2005; CCQC, 2001)

Για τον προσδιορισμό του Δείκτη Βλαστικότητας των παραγόμενων κόμποστ χρησιμοποιήθηκαν δέκα διαφορετικά είδη σπόρων. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν οι σπόροι από κρεμμύδι, μαρούλι Tinella, σπανάκι, μαρούλι Parris Island Cos, τομάτα Βιομηχ. Rio Grande, αγγούρι, τομάτα Μεσογειακή, καρότο, αγγούρι Mini Safaa F1 και φασόλι μαυρομάτικο. Στους Κύκλους 3 και 4 της Δράσης Β χρησιμοποιήθηκε επιπλέον ο σπόρος Φασόλι Βυσσινί. Η επιλογή των συγκεκριμένων καρπών βασίστηκε αρχικά στην ευρεία εφαρμογή του μαρουλιού αναφορικά με τη χρήση του για τον προσδιορισμό του Δ.Β. στο κόμποστ (Haug, 1993), καθώς και στο ερευνητικό ενδιαφέρον που παρουσιάζει η μελέτη της επίδρασης του κόμποστ στην ανάπτυξη διαφορετικών ειδών καλλιεργήσιμων καρπών. Τέλος όλοι οι καρποί που χρησιμοποιήθηκαν έχουν μικρό μέγεθος, αναπτύσσονται γρήγορα και είναι ευαίσθητοι σε ενδεχόμενη παρουσία φυτοτοξινών (CCME, 2005).

Ο χαρακτηρισμός των ορίων του δείκτη βλαστικότητας που χρησιμοποιείται είναι ο εξής:

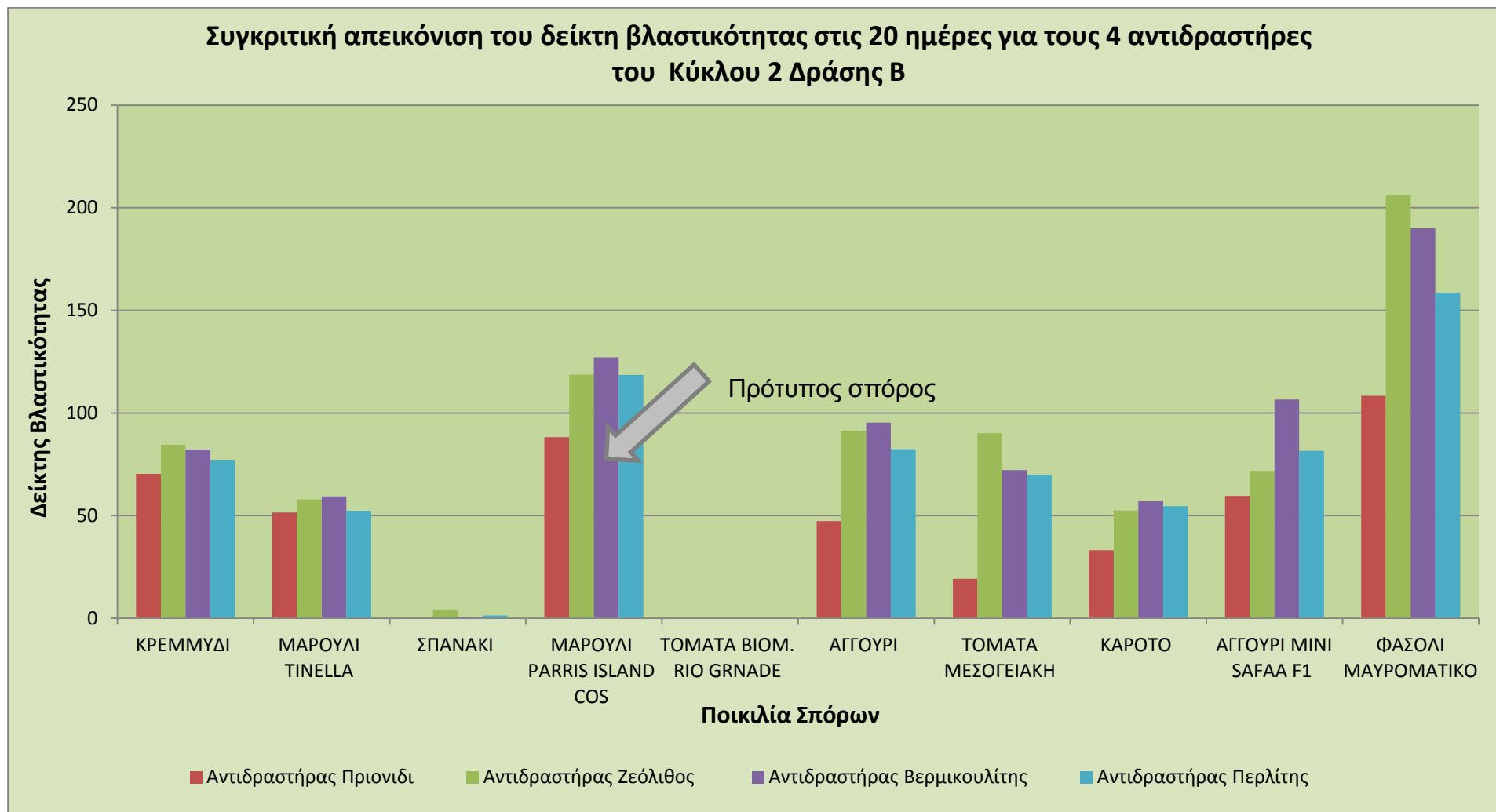
- $0 < \Delta.B. < 25 \rightarrow$ πολύ φυτοτοξικό
- $26 < \Delta.B. < 65 \rightarrow$ φυτοτοξικό
- $66 < \Delta.B. < 100 \rightarrow$ μη φυτοτοξικό
- $\Delta.B. > 101 \rightarrow$ φυτοδιέγερση – φυτοθρεπτικό

Η διακύμανση του επιτρεπτού κατώτερου ορίου του Δ.Β. οφείλεται τόσο στη χρήση διαφορετικών καρπών για τη διεξαγωγή των πειραμάτων όσο και στις διαφορετικές ποσότητες εκχυλισμάτων κόμποστ που χρησιμοποιούνται ενώ ενδέχεται να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο η σύσταση και το είδος του προς κομποστοποίηση οργανικού υλικού (Ko et al., 2008; Tang et al., 2006; Mena et al., 2003; Bernal et al., 1998a). Πρέπει ακόμη να σημειωθεί ότι ο προσδιορισμός του Δ.Β. είναι μια βιολογική μέθοδος για την ποσοτικοποίηση της φυτοτοξικότητας του κόμποστ αλλά δεν προσδίδει στοιχεία ως προς την αιτία της πιθανής φυτοτοξικότητας των προϊόντων. Με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία τα πιθανά αίτια τα οποία σχετίζονται με την φυτοτοξικότητα του κόμποστ αφορούν κατά κύριο λόγο στην παρουσία αμμωνίας (Wong et al., 1983), αλάτων (Adriano et al., 1973), βαρέων μετάλλων και/ή οργανικών οξέων (Brinton, 2000; Tam and Tiquia, 1994). Οι προαναφερόμενοι παράγοντες επιδρούν ταυτόχρονα στη ανάπτυξη των καρπών και ο προσδιορισμός της παραμέτρου με τη μεγαλύτερη επίδραση στο Δ.Β. δεν είναι πάντοτε εφικτός (Hoekstra et al., 2002; Zucconi et al., 1985).

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι Δ.Β. του παραγόμενου κόμποστ όλων των πειραματικών κύκλων, όπως αυτοί υπολογίστηκαν για τα δέκα διαφορετικά είδη καρπών.

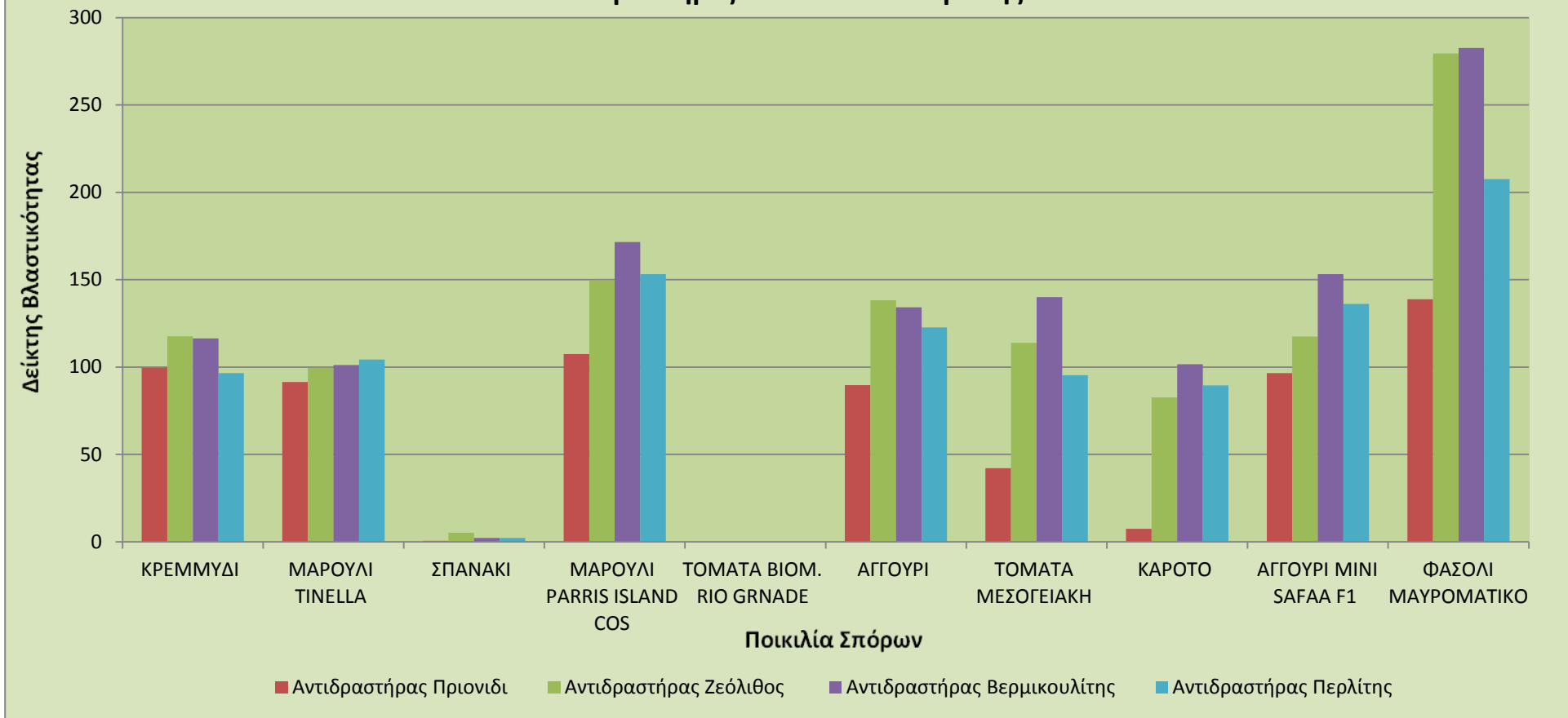
Παρατηρείται ότι σχεδόν σε όλους τους σπόρους, την ημέρα αφαίρεσης του υλικού από τους αντιδραστήρες, το κόμποστ είναι μη τοξικό και σε αρκετούς από αυτούς (μαρούλι parris island cos, αγγούρι και φασόλι μαυρομάτικο) είναι φυτοθρεπτικό. Η φυτοτοξικότητα βελτιώνεται αισθητά σχεδόν σε όλους τους σπόρους μετά το πέρας 50 ημερών, όπου για τους περισσότερους σπόρους το κόμποστ είναι πλέον φυτοθρεπτικό, ενώ έχουν βλαστήσει ακόμα και σπόροι που δε βλάστησαν στις 20 ημέρες από την έναρξη της διεργασίας. Παράλληλα η προσθήκη ορυκτών βελτίωσε σημαντικά το δείκτη βλαστικότητας σχεδόν σε όλους τους σπόρους. Το φαινόμενο αυτό είναι εντονότερο στις ποικιλίες φασολιού, γεγονός που πιθανόν οφείλεται στη μεγαλύτερη περιεκτικότητα του τελικού προϊόντος σε άζωτο.

Πρέπει να τονισθεί ότι η πρότυπη φυτοθρεπτική ικανότητα του τελικού παραγόμενου προϊόντος, εξετάζεται με τη χρήση σπόρου μαρούλι Parris Island Cos. Ο πειραματικός προσδιορισμός της φυτοτοξικότητας του τελικού προϊόντος για τους υπόλοιπους σπόρους, πραγματοποιήθηκε για την εύρεση αυτών για τους οποίους το παραγόμενο κόμποστ είναι κατάλληλο για χρήση του ως εδαφοβελτιωτικό. Η μη ανάπτυξη συγκεκριμένων βλαστών με τη χρήση του κόμποστ δεν συνεπάγεται τον χαρακτηρισμό του ως φυτοτοξικό, αλλά επισημαίνει το γεγονός ότι η βλαστικότητα δεν εξαρτάται μόνο από τις ιδιότητες του κόμποστ αλλά και από τον τύπο του βλαστού που χρησιμοποιείται.



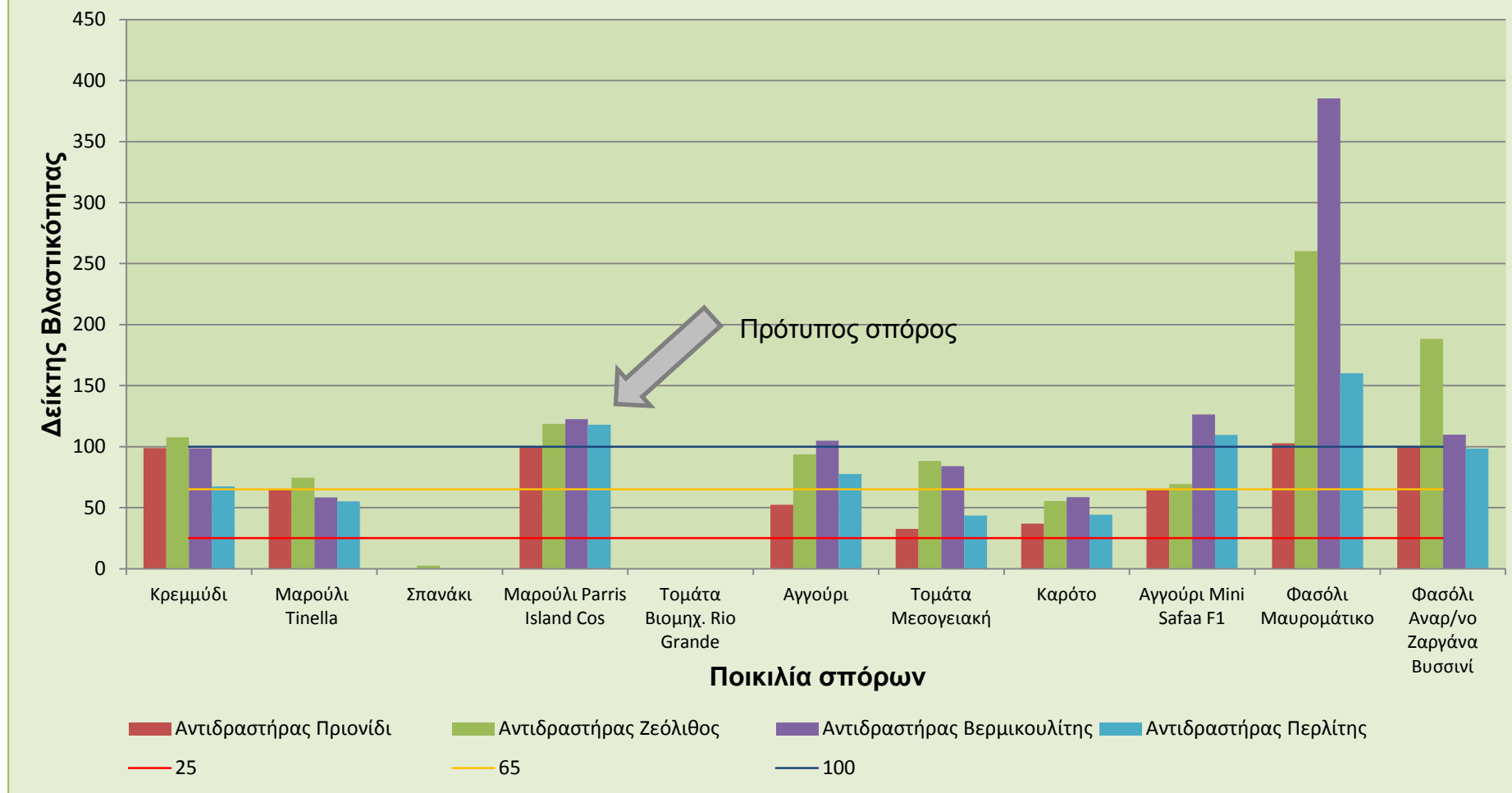
Διάγραμμα 5.126 Συγκριτική απεικόνιση του δείκτη βλαστικότητα στις 20 ημέρες για τους 4 αντιδραστήρες του Κύκλου 2 Δράσης Β

Συγκριτική απεικόνιση του δείκτη βλαστικότητας στις 50 ημέρες για τους 4 αντιδραστήρες του Κύκλου 2 Δράσης Β



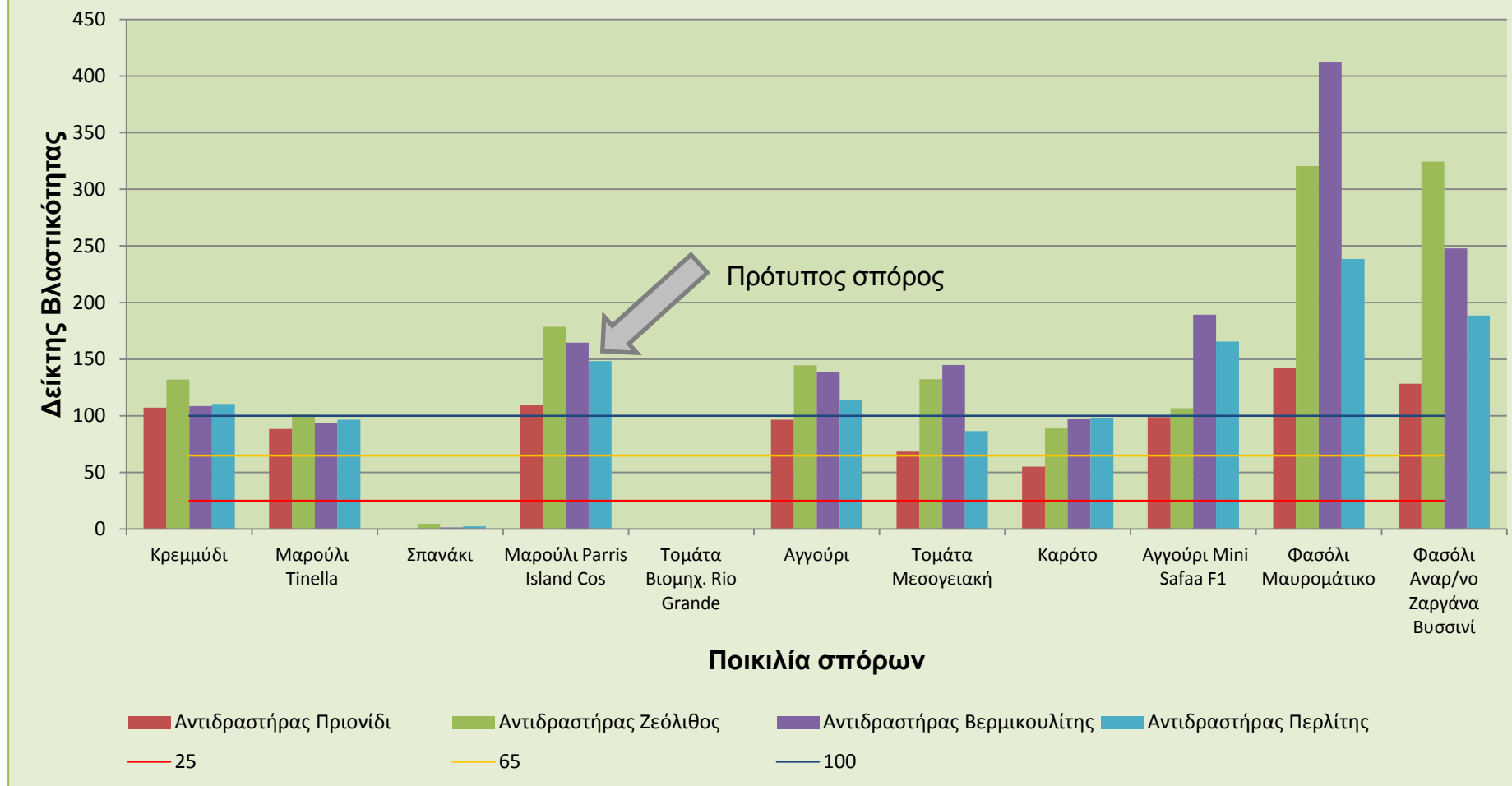
Διάγραμμα 5.127 Συγκριτική απεικόνιση του δείκτη βλαστικότητας στις 50 ημέρες για τους 4 αντιδραστήρες του Κύκλου 2 Δράσης Β

Συγκριτική απεικόνιση του δείκτη βλαστικότητας στις 20 ημέρες για τους 4 αντιδραστήρες του Κύκλου 3 Δράσης Β

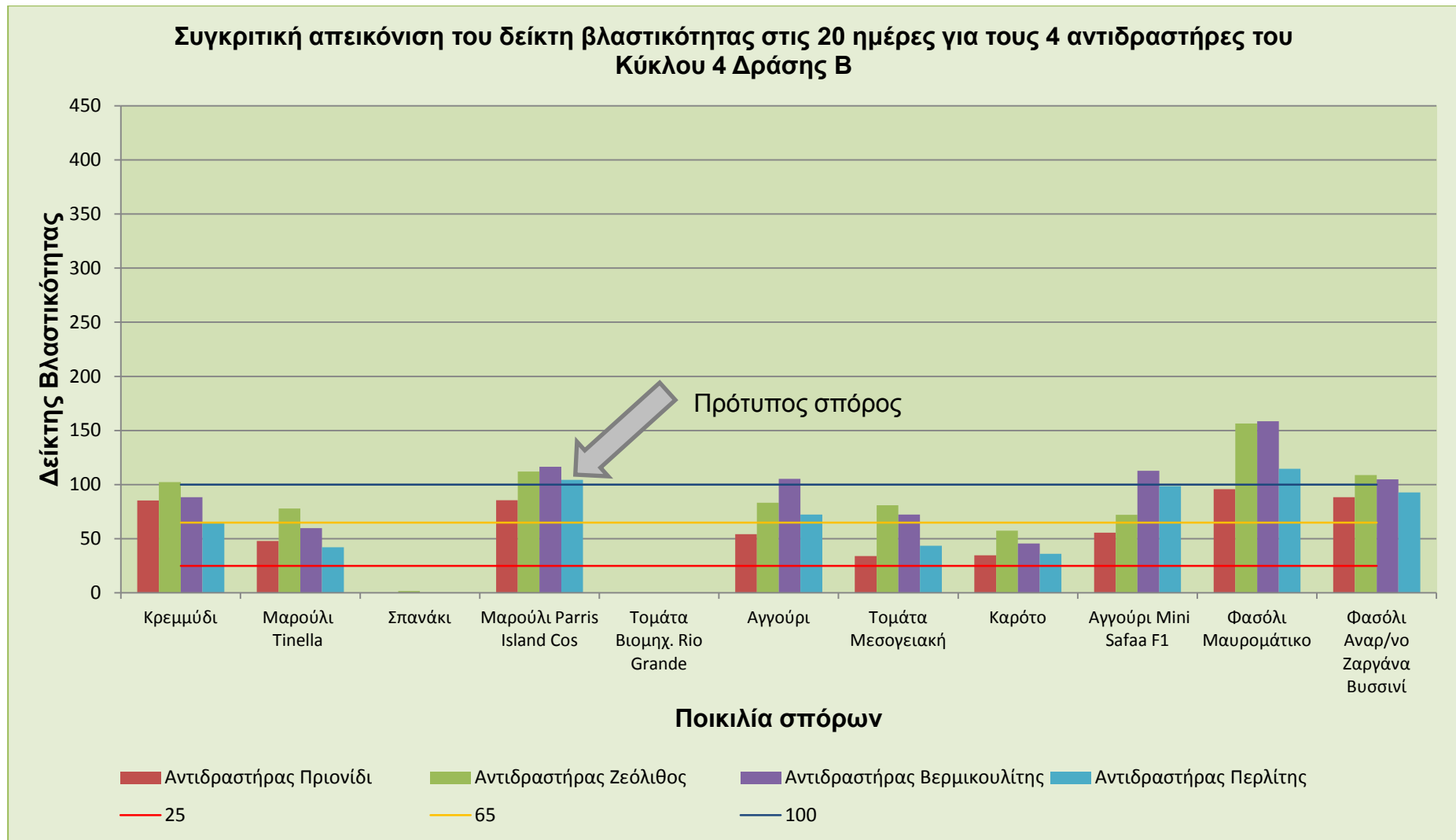


Διάγραμμα 5.128 Συγκριτική απεικόνιση του δείκτη βλαστικότητας στις 20 ημέρες για τους 4 αντιδραστήρες του Κύκλου 3 Δράσης Β

Συγκριτική απεικόνιση του δείκτη βλαστικότητας στις 50 ημέρες για τους 4 αντιδραστήρες του Κύκλου 3 Δράσης Β

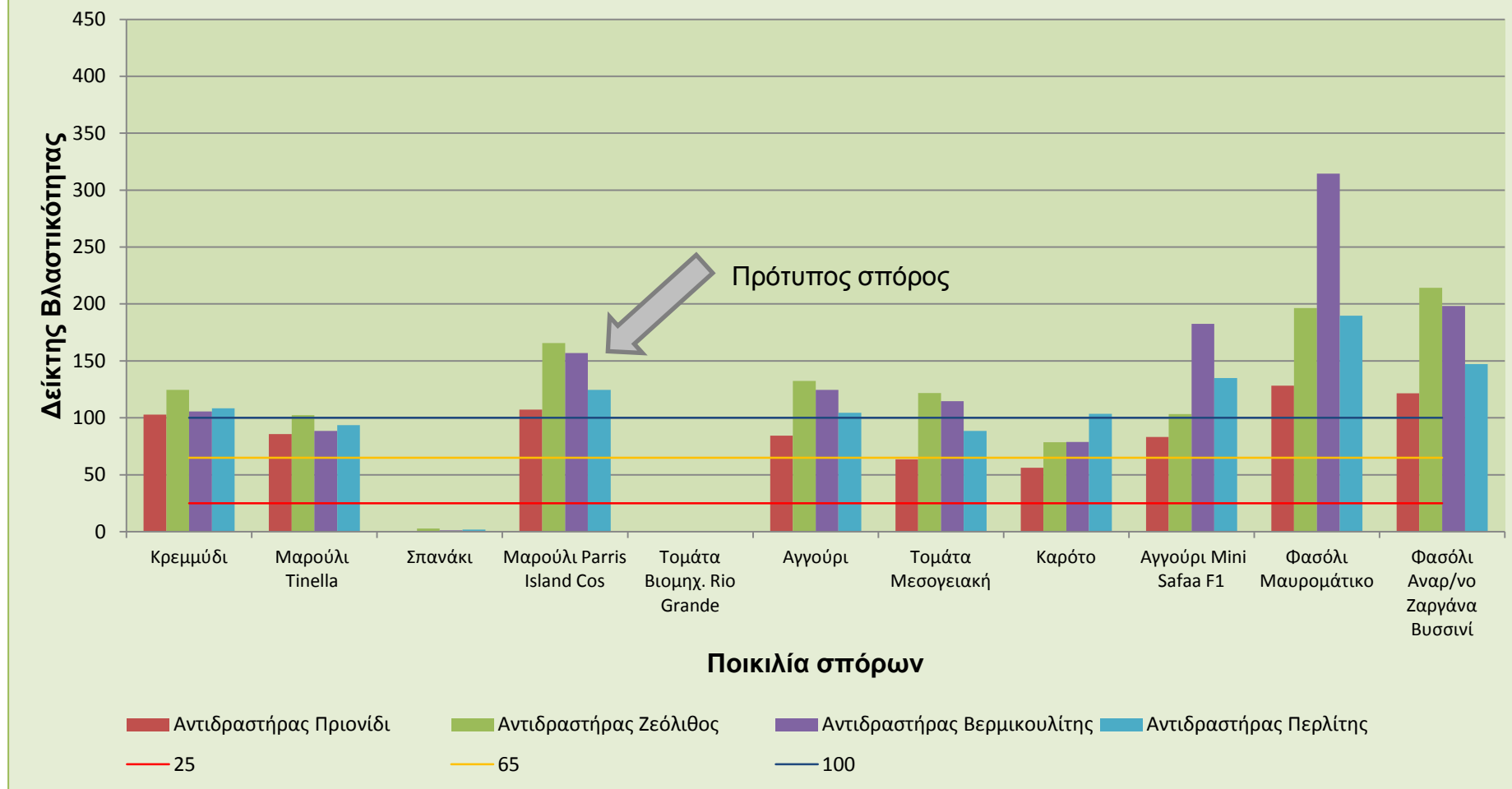


Διάγραμμα 5.129 Συγκριτική απεικόνιση του δείκτη βλαστικότητας στις 50 ημέρες για τους 4 αντιδραστήρες του Κύκλου 3 Δράσης Β



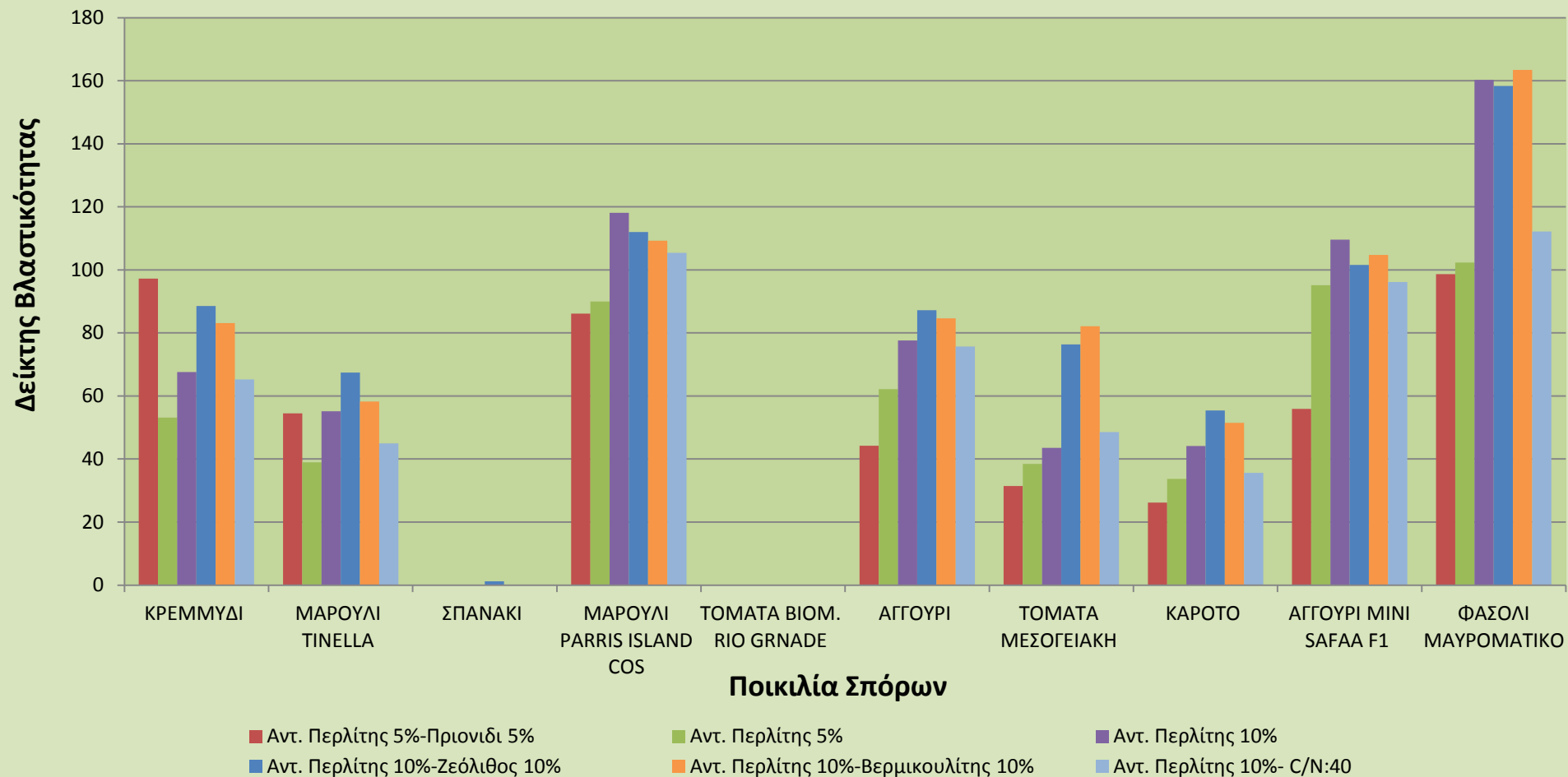
Διάγραμμα 5.130 Συγκριτική απεικόνιση του δείκτη βλαστικότητας στις 20 ημέρες για τους 4 αντιδραστήρες του Κύκλου 4 Δράσης Β

Συγκριτική απεικόνιση του δείκτη βλαστικότητας στις 50 ημέρες για τους 4 αντιδραστήρες του Κύκλου 4 Δράσης Β



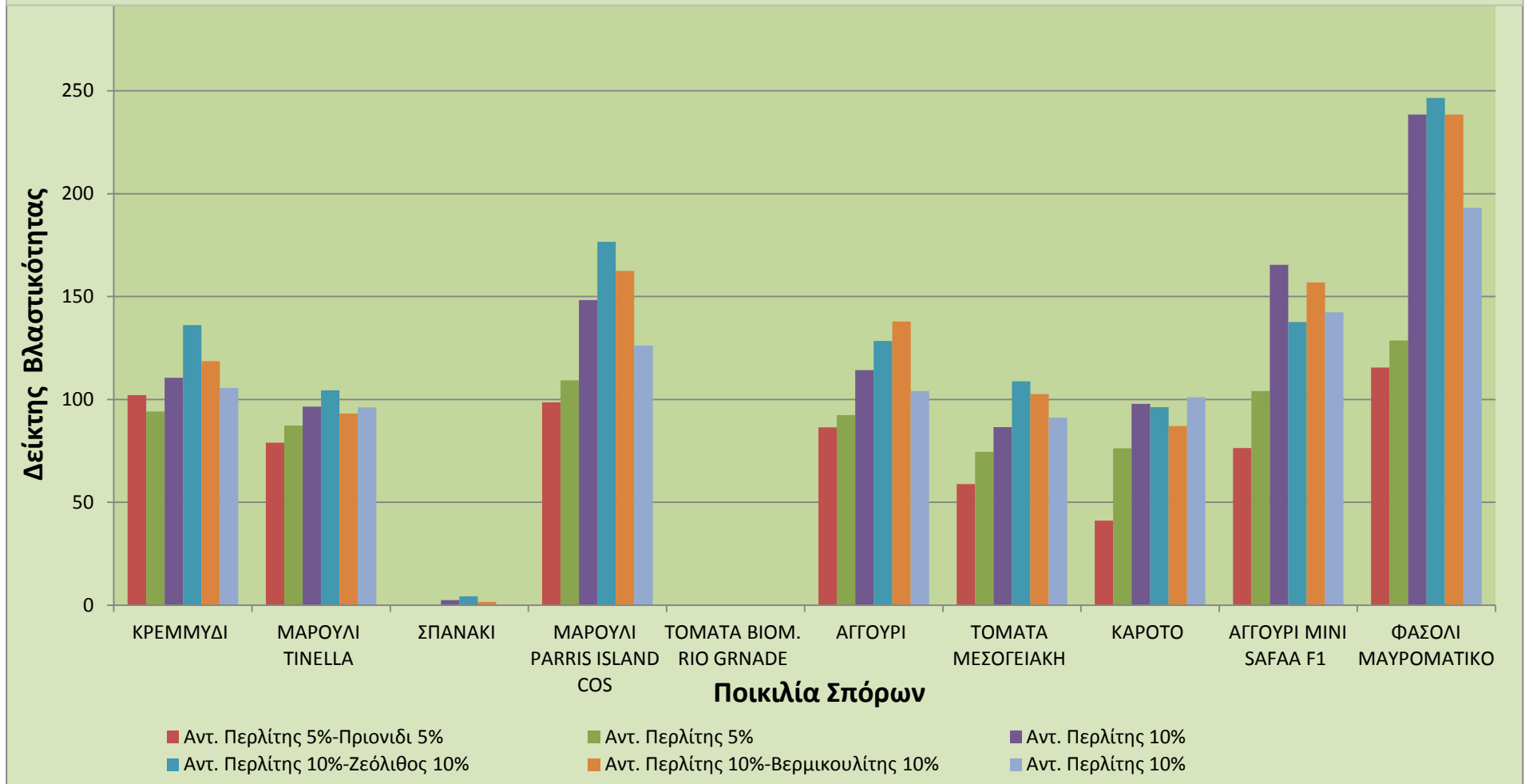
Διάγραμμα 5.131 Συγκριτική απεικόνιση του δείκτη βλαστικότητας στις 50 ημέρες για τους 4 αντιδραστήρες του Κύκλου 4 Δράσης Β

Συγκριτική απεικόνιση του δείκτη βλαστικότητας στις 20 ημέρες για όλους τους αντιδραστήρες των Κύκλων 1 & 2 της Δράσης Γ

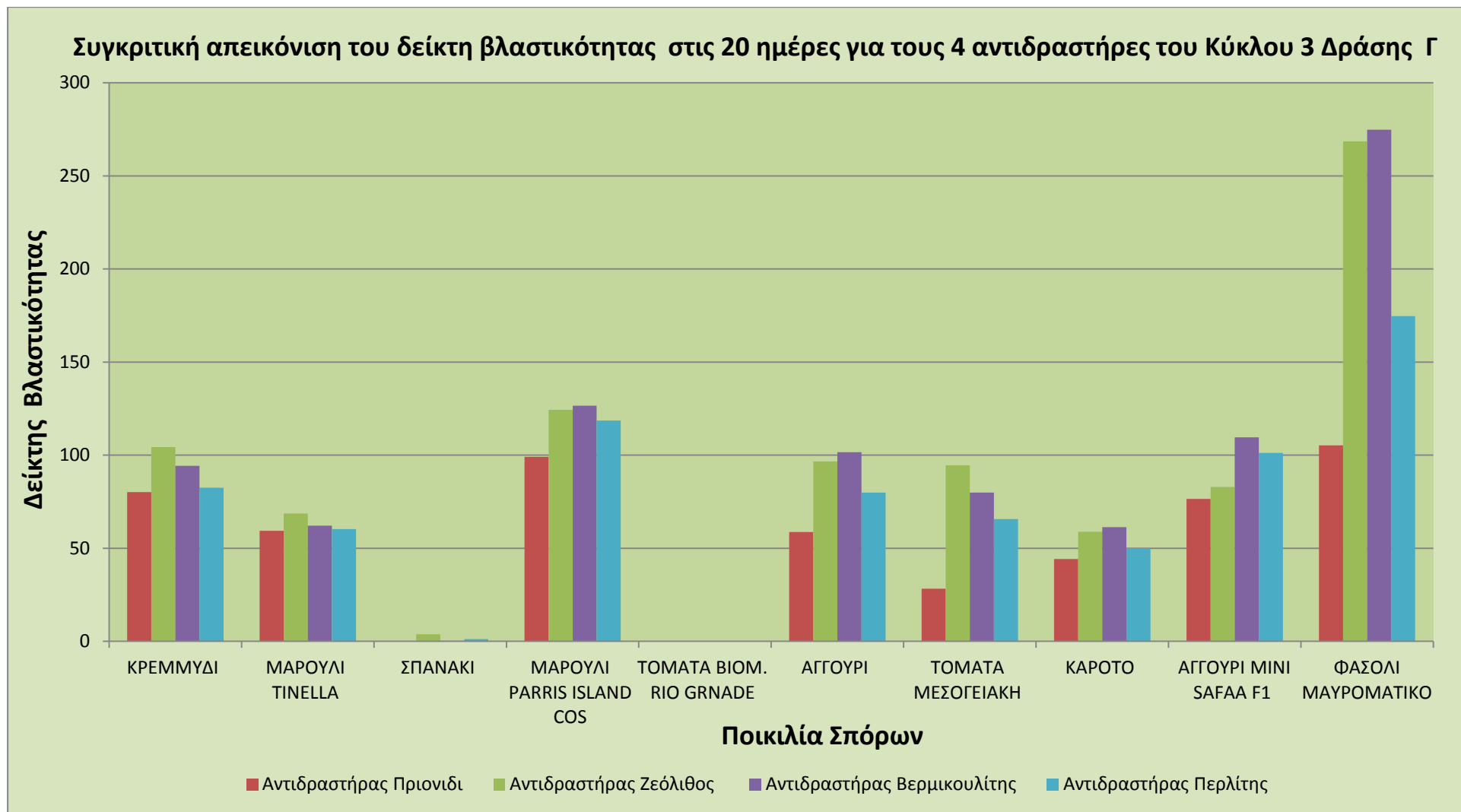


Διάγραμμα 5.132 Συγκριτική απεικόνιση του δείκτη βλαστικότητας στις 20 ημέρες για τους όλους τους αντιδραστήρες των κύκλων 1 & 2 Δράσης Γ

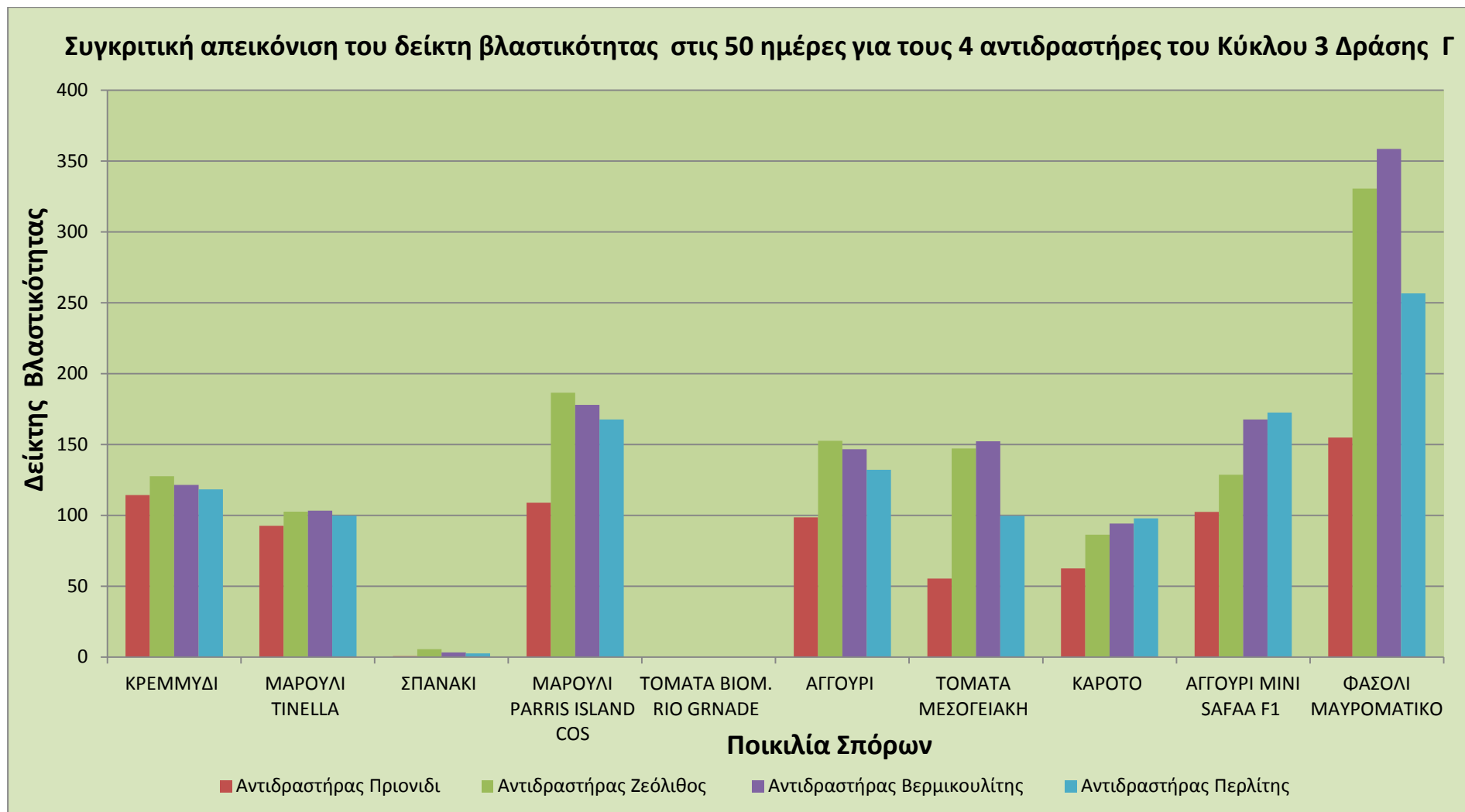
Συγκριτική απεικόνιση δείκτη βλαστικότητας στις 50 ημέρες για όλους τους αντιδραστήρες των Κύκλων 1 & 2 Δράσης Γ



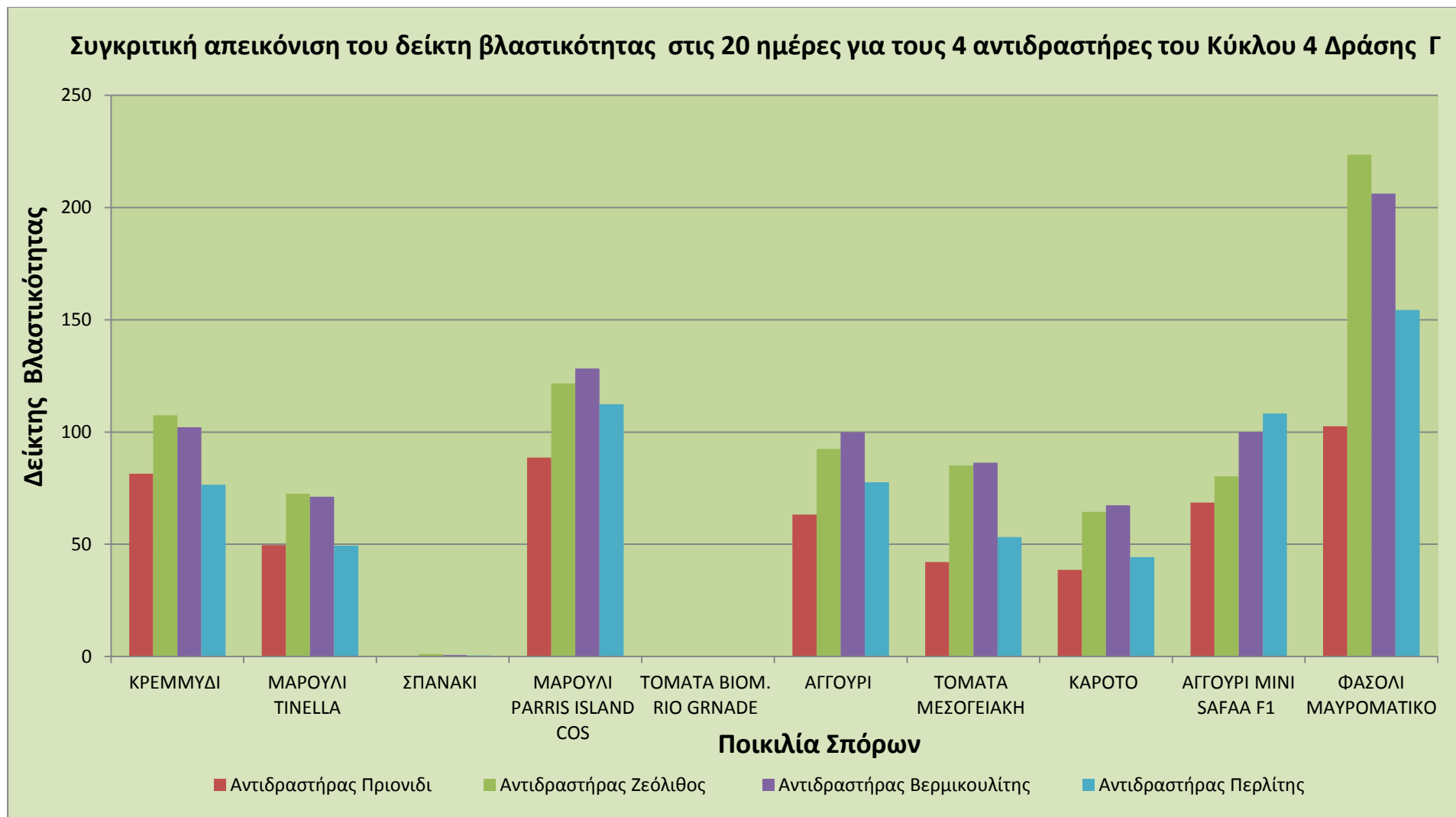
Διάγραμμα 5.133 Συγκριτική απεικόνιση του δείκτη βλαστικότητας στις 50 ημέρες για τους όλους τους αντιδραστήρες των Κύκλων 1 & 2 Δράσης Γ



Διάγραμμα 5.134 Συγκριτική απεικόνιση του δείκτη βλαστικότητας στις 20 ημέρες για τους 4 αντιδραστήρες του Κύκλου 3 Δράσης Γ

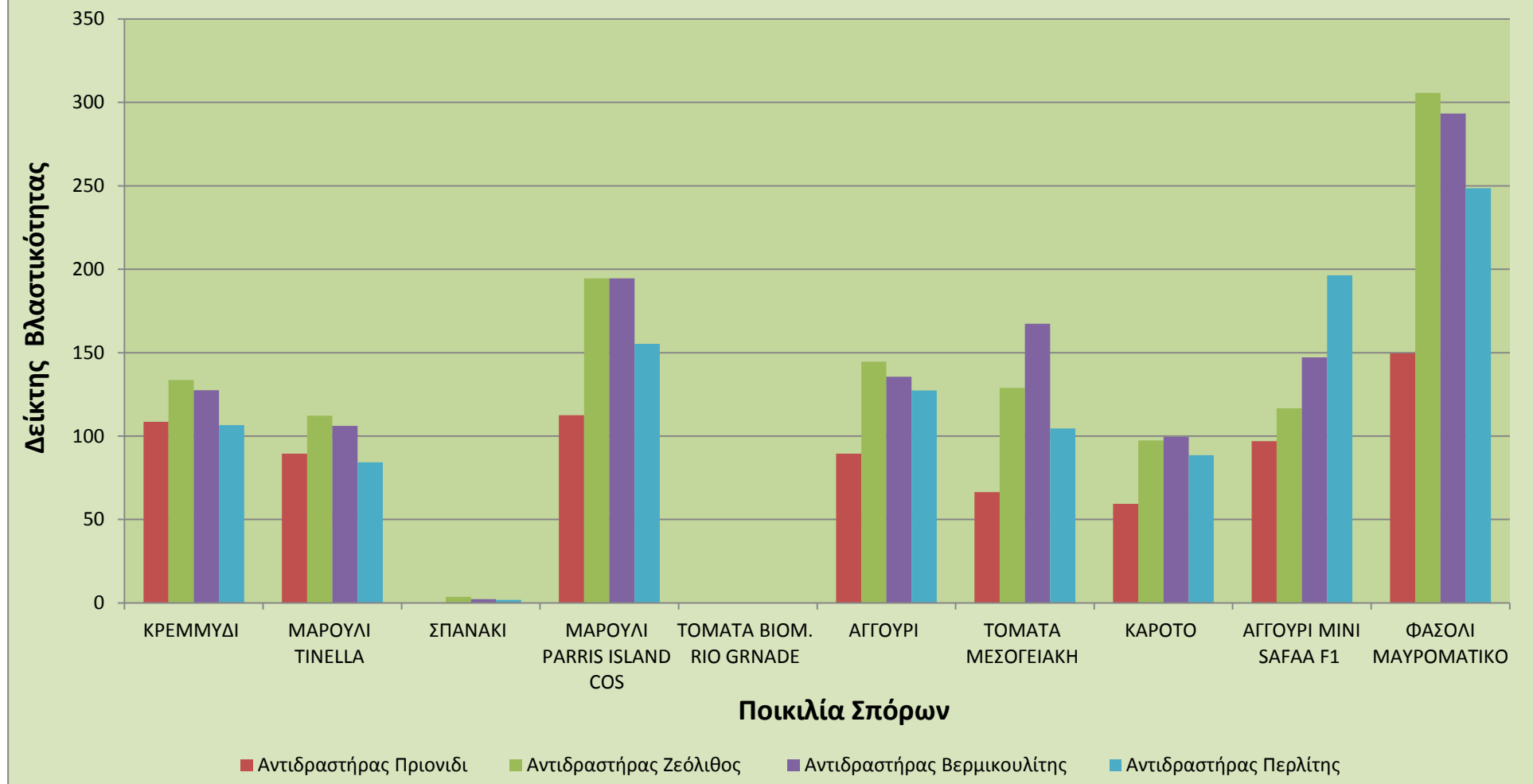


Διάγραμμα 5.135 Συγκριτική απεικόνιση του δείκτη βλαστικότητας στις 50 ημέρες για τους 4 αντιδραστήρες του Κύκλου 3 Δράσης Γ



Διάγραμμα 5.136 Συγκριτική απεικόνιση του δείκτη βλαστικότητας στις 20 ημέρες για τους 4 αντιδραστήρες του Κύκλου 4 Δράσης Γ

Συγκριτική απεικόνιση του δείκτη βλαστικότητας στις 50 ημέρες για τους 4 αντιδραστήρες του Κύκλου 4 Δράσης Γ



Διάγραμμα 5.137 Συγκριτική απεικόνιση του δείκτη βλαστικότητας στις 50 ημέρες για τους 4 αντιδραστήρες του Κύκλου 4 Δράση

Παθογόνοι μικροοργανισμοί στο παραγόμενο κόμποστ

Η παρουσία παθογόνων μικροοργανισμών στο κόμποστ αποτελεί έναν ακόμη περιοριστικό παράγοντα της εναπόθεσής του στο έδαφος και κατ' επέκταση θεωρείται ως επιπρόσθετη βιολογική παράμετρος της ποιότητας του τελικού προϊόντος. Η σημαντικότητα ελέγχου της παρουσίας παθογόνων μικροοργανισμών στο κόμποστ έγκειται στο ενδεχόμενο ρίσκο έκθεσης και μετάδοσής τους στα φυτά, τα ζώα και τον άνθρωπο κατά τη διάθεσή του στο έδαφος. Πιθανοί τρόποι μετάδοσης των παθογόνων μικροοργανισμών από τη χρήση κόμποστ περιλαμβάνουν την επιβάρυνση των φυτικών καρπών και των ζώων (κατ' επέκταση και στον άνθρωπο), καθώς και των επιφανειακών και υπογείων υδάτων μέσω διεργασιών απορροής (EC, 2010).

Κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης επιτυγχάνεται, ως ένα βαθμό, μείωση των παθογόνων μικροοργανισμών λόγω διαφόρων διεργασιών όπως η διαμόρφωση ανταγωνιστικών συνθηκών με γηγενείς μικροοργανισμούς και άλλους παθογόνους, η δράση αντιβιοτικών που παράγονται από ορισμένους μύκητες και ακτινομήκυτες, η παραγωγή τοξικών παραπροϊόντων όπως είναι η αέρια αμμωνία, η εξάντληση θρεπτικών συστατικών καθώς και η θερμική νέκρωσή τους (Hogg et al., 2002; Dumontet et al., 1999; Epstein, 1997; Haug, 1993; Pereira-Neto et al., 1987; Burge et al., 1978a). Καθώς ο βαθμός με τον οποίο οι παθογόνοι μικροοργανισμοί αδρανοποιούνται έχει προσδιοριστεί μόνο με βάση τη θερμική τους νέκρωση, η διατήρηση υψηλών θερμοκρασιών θεωρείται ως η πιο αξιόπιστη μέθοδος, αν όχι η μοναδική, η οποία μπορεί να προσδιοριστεί και να ρυθμιστεί κατά τη διάρκεια της διεργασίας της κομποστοποίησης (Vinnerås et al., 2003). Για το λόγο αυτό αποτελεί την πλέον διαδεδομένη παράμετρο ελέγχου της εξουδετέρωσης/αδρανοποίησης των παθογόνων μικροοργανισμών στο κόμποστ. Σε κάθε παθογόνο μικροοργανισμό υπάρχει μια οριακή τιμή θερμοκρασίας μεγαλύτερη της οποίας ο μικροοργανισμός δεν είναι πλέον βιώσιμος. Στους ιούς η θερμική αδρανοποίηση οφείλεται στην αλλοίωση της κυτταρικής τους δομής ενώ σε άλλους παθογόνους μικροοργανισμούς υψηλές θερμοκρασίες καταστρέφουν τα κύτταρά τους εξαιτίας της αδρανοποίησης των ενζυμικών κυττάρων (Haug, 1993). Ο βαθμός της θερμικής αδρανοποίησης των παθογόνων μικροοργανισμών εξαρτάται τόσο από τα επίπεδα της θερμοκρασίας όσο και από τη διάρκεια της έκθεσής τους σε αυτή (de Bertoldi et al., 1988). Όσο μεγαλύτερη είναι η χρονική διάρκεια παραμονής των παθογόνων σε συγκεκριμένη θερμοκρασία τόσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός εξουδετέρωσης/ αδρανοποίησής τους.

Σε όλους τους πειραματικούς κύκλους που διενεργήθηκαν, η θερμοκρασία παρέμεινε σε υψηλά επίπεδα (<50 °C) για περισσότερες από 4 ημέρες λειτουργίας, περίοδο επαρκή για τη θανάτωση πιθανών παθογόνων μικροοργανισμών. Αν σε αυτό συνυπολογιστεί και το γεγονός πως τα προς κομποστοποίηση υποστρώματα προέρχονται από οργανικά οικιακά απορρίμματα, των οποίων η διαλογή πραγματοποιήθηκε στην πηγή, και ως εκ τούτου δεν αναμένεται υψηλό φορτίο παθογόνων μικροοργανισμών σε αυτά, συμπεραίνουμε πως στο τελικό προϊόν η πιθανότητα ύπαρξης παθογόνων μικροοργανισμών σε επικίνδυνες ποσότητες είναι αμελητέα.

5.3 Ανάλυση και εφαρμογή κινητικής αντιδράσεων της κομποστοποίησης

Για τον έλεγχο της αποδοτικότητας της κομποστοποίησης είναι απαραίτητη η διερεύνηση της συμπεριφοράς της βιοαποδόμησης των οργανικών υλικών. Συνεπώς, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός του ρυθμού αντίδρασης με τον οποίο βιοαποδομείται το υπόστρωμα (Bari et al., 2000). Επομένως, στο σημείο αυτό γίνεται η αναφορά και η εφαρμογή ενός μαθηματικού μοντέλου της κινητικής της κομποστοποίησης για την περιγραφή της διεργασίας της αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας των βιοαποδομήσιμων οικιακών απορριμμάτων, όπως προκύπτει από τη χρήση του πρότυπου συστήματος κομποστοποίησης. Η προσομοίωση της κομποστοποίησης βασίζεται σε μαθηματικά πρότυπα-εξισώσεις που αφορούν στην κινητική αντιδράσεων πρώτου βαθμού της διάσπασης των πτητικών στερεών (VS). Η επιλογή της μεθοδολογικής προσέγγισης του ρυθμού με τον οποίο βιοαποδομούνται τα πτητικά στερεά, βασίζεται στη διαθεσιμότητα των πειραματικών μετρήσεων, καθώς και στο εύρος της εφαρμογής πρότυπων προσομοίωσης από άλλους ερευνητές.

5.3.1 Αναφορά στην κινητική αντιδράσεων αποδόμησης των πτητικών στερεών

Η κινητική πρώτης τάξης αποτελεί την πλέον διαδεδομένη και ευρύτερα χρησιμοποιημένη από την επιστημονική κοινότητα μεθοδολογική προσέγγιση για την περιγραφή της αερόβιας βιολογικής αποδόμησης των πτητικών στερεών (Bartista et al., 2010). Ο υπολογισμός του ρυθμού μεταβολής της μάζας των πτητικών στερεών εξαρτάται από την αρχική ποσότητά της και από το ρυθμό αποδόμησης της. Ο εν λόγω ρυθμός μεταβολής εκφράζεται από την Εξίσωση (5.1).

$$\frac{d(VS)}{dt} = -k_d(VS) \quad \text{Εξίσωση (5.1)}$$

Όπου:

VS: Βιοαποδομήσιμα πτητικά στερεά (kg)

k_d : Ρυθμός βιοαποδόμησης πρώτης τάξης της οργανικής ουσίας (d^{-1})

t: Χρόνος (d)

Ολοκληρώνοντας την Εξίσωση (5.2) και θεωρώντας $VS_t = VS_0$ όταν $t=0$, προκύπτει:

$$VS_t = VS_0 e^{-k_d t} \quad \text{Εξίσωση (5.2)}$$

Επομένως, κατά τα εξελικτικά στάδια της διεργασίας της κομποστοποίησης τα βιοαποδομήσιμα πτητικά στερεά μειώνονται εκθετικά με ρυθμό που καθορίζεται από το k_d . Η ποσοστιαία απομάκρυνση των πτητικών στερεών ($VS_{\text{loss}(t)}$) ως προς την περιεκτικότητα των αρχικών πτητικών (VS) μπορεί να εκφραστεί από την Εξίσωση (5.3):

$$VS_{\text{loss}(t)} = VS_0 (1 - e^{-k_d t}) \quad \text{Εξίσωση (5.3)}$$

Όπου:

$VS_{\text{loss}(t)}$: Το ποσοστό αποδόμησης των πτητικών στερεών τη χρονική στιγμή t, εκφρασμένο ως ποσοστό των αρχικών πτητικών (% VS)

VS_0 : Το συνολικό ποσοστό αποδόμησης των πτητικών στερεών στο αρχικό υπόστρωμα ($t=0$), εκφρασμένο ως ποσοστό των αρχικών πτητικών (% VS)

Ο ρυθμός βιοαποδόμησης k_d , αποτελεί το μέτρο της συνολικής απόδοσης της υπό εξέταση διεργασίας. Επομένως, το k_d εξαρτάται από το σχεδιασμό του συστήματος κομποστοποίησης, τον τύπο και τα χαρακτηριστικά του υποστρώματος, τις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος καθώς και από οποιαδήποτε άλλη παράμετρο η οποία δύναται να επηρεάσει τη συνολική απόδοση της κομποστοποίησης (Bartista et al., 2010). Σημαντικός αριθμός προτύπων προσομοίωσης κινητικών αντιδράσεων της κομποστοποίησης έχει δημοσιευθεί αναφορικά με την επίδραση των κρίσιμων παραμέτρων στο ρυθμό διάσπασης της βιοαποδομήσιμης οργανικής ουσίας κατά την κομποστοποίηση (Bartista et al., 2010; Stombaugh and Nokes, 1996; Haug, 1993; Cathcart et al., 1986; Whang and Meenaghan, 1980; Jeris and Regan, 1973a; Jeris and Regan, 1973b; Finger et al., 1976; Schulze, 1961). Η επίδραση των παραμέτρων αυτών στην κομποστοποίηση θεωρείται ότι διέπεται από πολλαπλασιαστική δομή σύμφωνα με την Εξίσωση (2.4) (Mason, 2007; Hamelers, 2004).

$$k_d(x_1, x_2, \dots, x_n) = k_{\max} \cdot F_1(x_1) \cdot F_2(x_2) \dots F_n(x_n) \quad \text{Εξίσωση (5.4)}$$

Όπου:

k_{\max} : Μέγιστος ρυθμός βιοαποδόμησης (d^{-1})

x : Κρίσιμη παράμετρος η οποία επιδρά στη διεργασία της κομποστοποίησης

n : Αριθμός των κρίσιμων παραμέτρων που επιδρούν στη διεργασία της κομποστοποίησης

$F(x)$: Συντελεστές διόρθωσης της επίδρασης της εκάστοτε κρίσιμης παραμέτρου στη διεργασία της κομποστοποίησης (τιμές 0-1)

Από την Εξίσωση (2.4) μπορεί να διαπιστωθεί ότι σε ιδανικές συνθήκες (όταν οι παράμετροι δεν αποτελούν περιοριστικό παράγοντα στη διεργασία της κομποστοποίησης), οι συντελεστές διόρθωσης, $F(x)$, οι οποίες περιγράφουν την επίδραση των κρίσιμων παραμέτρων στο ρυθμό βιοαποδόμησης του υποστρώματος, λαμβάνουν τιμή ίση με 1 ενώ ο ρυθμός βιοαποδόμησης k_d λαμβάνει τη μέγιστη τιμή ίση με k_{\max} . Επομένως, το k_{\max} είναι χαρακτηριστικό του συστήματος κομποστοποίησης σε βέλτιστες λειτουργικές συνθήκες και ορίζεται ως ο μέγιστος ρυθμός βιοαποδόμησης της οργανικής ουσίας. Οι εν λόγω κρίσιμες παράμετροι κατά κύριο λόγο περιλαμβάνουν την εξέλιξη της θερμοκρασίας, της υγρασίας, της περιεκτικότητας σε οξυγόνο, του πορώδους, του pH και της αναλογίας C/N κατά τα εξελικτικά στάδια της διεργασίας. Οι κρίσιμες αυτές παράμετροι και κατ' επέκταση οι διορθωτικοί συντελεστές που τις περιγράφουν, διαφέρουν ως προς το επίπεδο της σημαντικότητάς τους και επομένως στο βαθμό επίδρασης τους στις διεργασίες της αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας. Οι πλέον κρίσιμες παράμετροι οι οποίες απαντώνται στα περισσότερα πρότυπα προσομοίωσης των αντιδράσεων βιοξείδωσης της οργανικής ουσίας είναι η θερμοκρασία και η υγρασία ενώ σε μικρότερο βαθμό λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της περιεκτικότητας σε οξυγόνο και του πορώδους του υποστρώματος. Η επίδραση των μεταβολών του pH και του λόγου C/N στο ρυθμό βιοξείδωσης απαντάται σπάνια στα πρότυπα προσομοίωσης καθότι η διακύμανση των μεγεθών αυτών κατά τα εξελικτικά στάδια της διεργασίας είναι απόρροια μεταβολών άλλων παραμέτρων (Μιχαλόπουλος, 2010). Σύμφωνα με τα παραπάνω ο ρυθμός βιοαποδόμησης, k_d , προσδιορίζεται από το γινόμενο του μέγιστου ρυθμού βιοαποδόμησης, k_{\max} , και των διορθωτικών συντελεστών, $F(x)$ (Εξίσωση 5.5), εκφράζοντας τη συνδυαστική επίδραση των πλέον

κρίσιμων παραμέτρων της διεργασίας ($F(TOT)$), στο μέγιστο ρυθμό βιοξείδωσης του οργανικού υποστρώματος σε κάθε χρονική στιγμή της διεργασίας.

$$k_d = k_{max} \cdot F(T) \cdot F(MC) \cdot F(O_2) \cdot F(FAS) = k_{max} \cdot F(TOT) \quad \text{Εξίσωση (5.5)}$$

Όπου:

$F(T)$: Διορθωτικός συντελεστής για τη θερμοκρασία (τιμές 0-1)

$F(MC)$: Διορθωτικός συντελεστής για την περιεχόμενη υγρασία (τιμές 0-1)

$F(O_2)$: Διορθωτικός συντελεστής για τη συγκέντρωση του οξυγόνου (τιμές 0-1)

$F(FAS)$: Διορθωτικός συντελεστής για το πορώδες (τιμές 0-1)

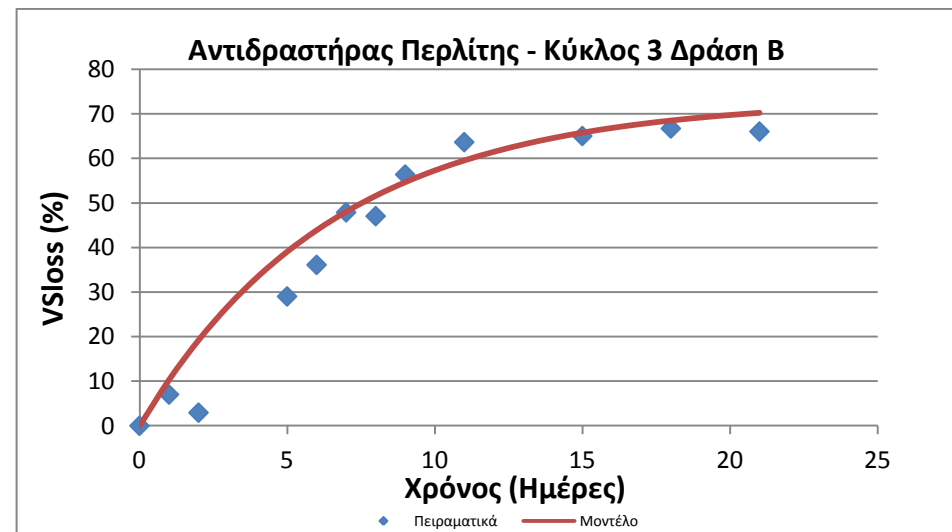
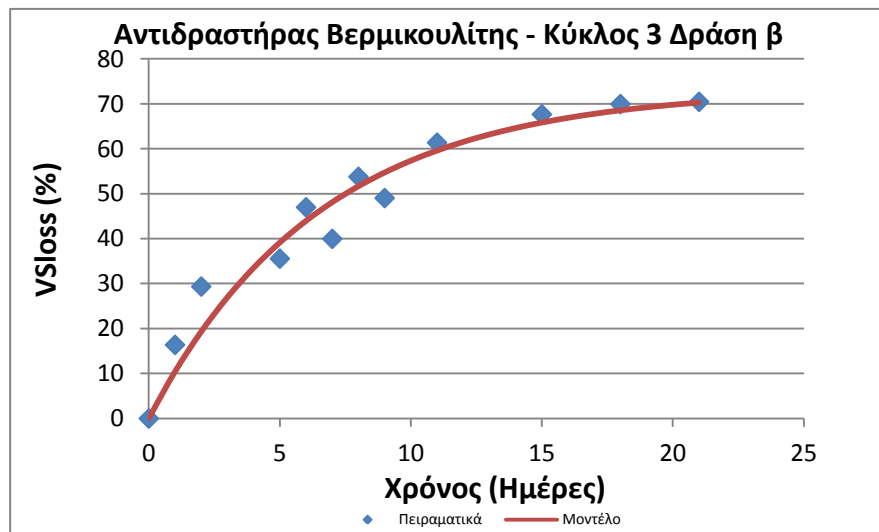
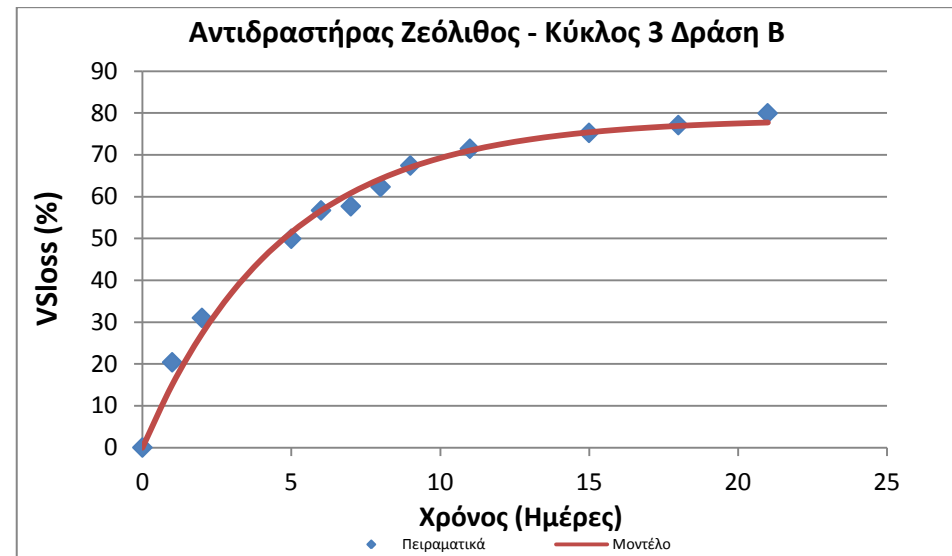
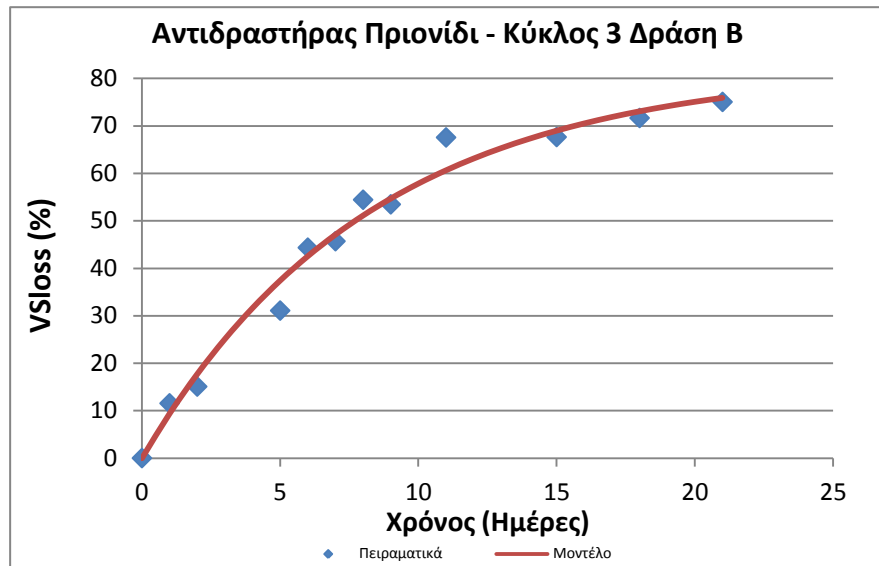
$F(TOT)$: Συνδυασμένη επίδραση των επιλεγμένων διορθωτικών συντελεστών η οποία εκφράζεται ως το γινόμενο των επιμέρους διορθωτικών συντελεστών (τιμές 0-1)

5.3.2 Μέθοδος ανάλυσης κινητικής αντιδράσεων αποδόμησης πτητικών στερεών

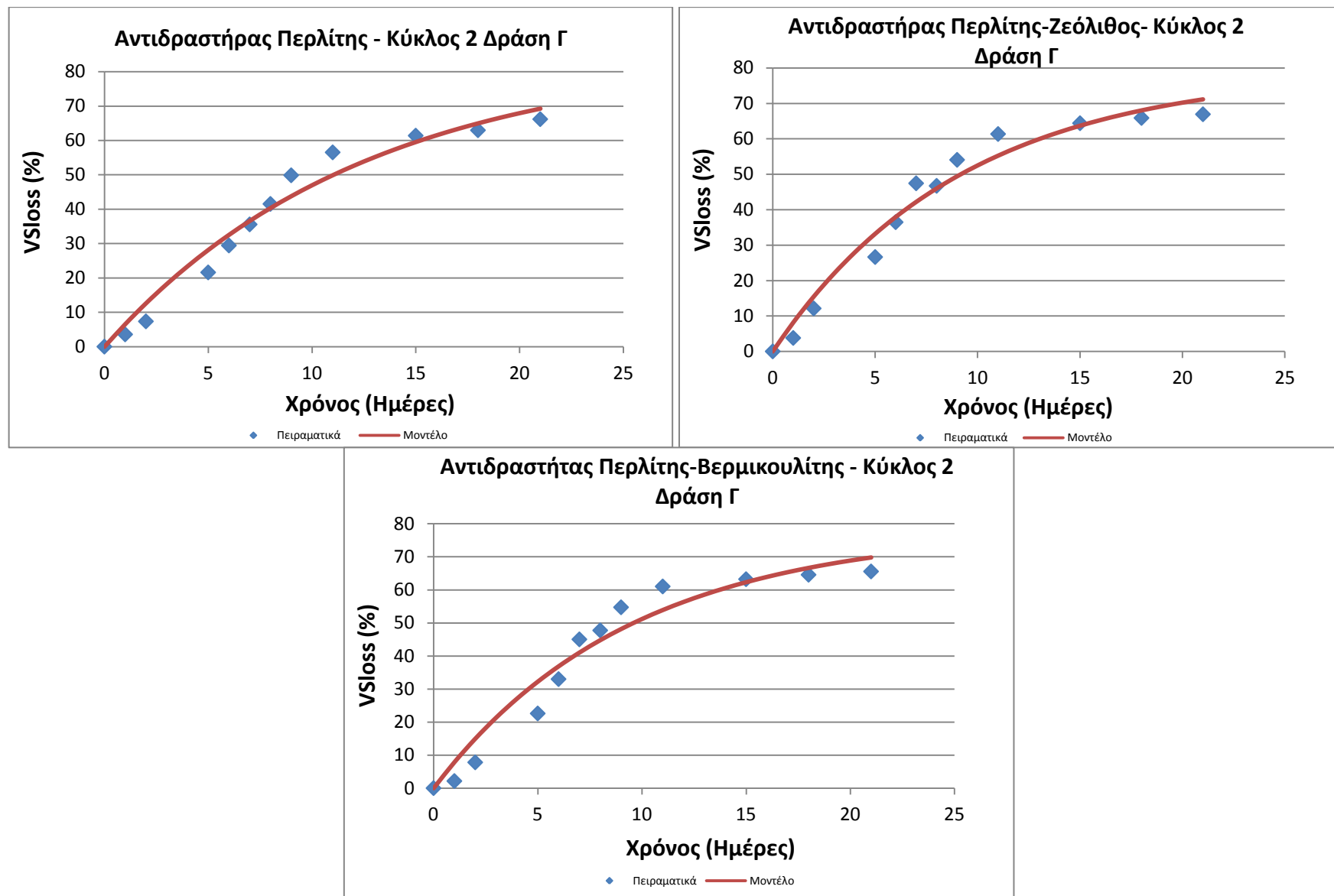
Το πρότυπο προσομοίωσης της κινητικής αντιδράσεων αποδόμησης πτητικών στερεών, που παρουσιάστηκε στην ενότητα 2.3.1, χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των τιμών των πτητικών στερεών που αποδομούνται ($VS_{loss(t)}$) (Εξίσωση 2.3) για τις χρονικές στιγμές στις οποίες προσδιορίστηκαν πειραματικά οι τιμές των πτητικών στερεών (VS) του υποστρώματος. Στη συνέχεια υπολογίστηκε η διαφορά των τιμών του VS_{loss} που προκύπτουν από το μοντέλο και τα πειραματικά δεδομένα για την ίδια χρονική στιγμή της διεργασίας σε δύο βέλτιστους πειραματικούς κύκλους κομποστοποίησης. Πρόκειται για τον Κύκλο 3 της Δράσης Β και για τον Κύκλο 2 της Δράσης Γ. Οι εκτιμήσεις του μοντέλου, δηλαδή ο μέγιστος ρυθμός αποδόμησης, k_{max} , και το συνολικό ποσοστό των αποδομήσιμων πτητικών του υποστρώματος (VS_0), υπολογίστηκαν κατόπιν της ελαχιστοποίησης του αθροίσματος των τετραγώνων της διαφοράς του VS_{loss} που προκύπτουν από το μοντέλο και τα πειραματικά δεδομένα χρησιμοποιώντας το εργαλείο "Solver" του Microsoft Excel 2007. Η επίδραση όλων των κρίσιμων διορθωτικών παραμέτρων θεωρήθηκε ότι δεν αποτελεί περιοριστικό παράγοντα στο ρυθμό της διεργασίας, γεγονός που προκύπτει από τα πειραματικά δεδομένα, καθώς το μοντέλο έτρεξε σε κύκλους στους οποίους η διεργασία εξελίχθηκε βέλτιστα. Για το λόγο αυτό οι διορθωτικοί παράγοντες δεν συμπεριελήφθησαν στην προσομοίωση της κινητικής.

5.3.3 Προσομοίωση κινητικής αντιδράσεων αποδόμησης πτητικών στερεών

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η προσομοίωση της αποδόμησης των πτητικών στερεών στα οργανικά οικιακά απορρίμματα, όπως αυτή πραγματοποιήθηκε στους δύο πειραματικούς κύκλους κομποστοποίησης με τη χρήση του πρότυπου συστήματος κομποστοποίησης. Στην παρούσα έρευνα, η ανάλυση της κινητικής των αντιδράσεων αποδόμησης των πτητικών στερεών αφορά στην κινητική εξίσωση πρώτης τάξης, βασιζόμενη στις απώλειες των πτητικών στερεών κατά την αερόβια επεξεργασία των οργανικών οικιακών αποβλήτων. Η προσαρμογή της καμπύλης (curve-fitting) του μοντέλου στα πειραματικά δεδομένα αποδόμησης των πτητικών στερεών παρουσιάζεται στα διαγράμματα 5.135-5.136 για τους δύο πειραματικούς κύκλους κομποστοποίησης.



Διάγραμμα 5.138 Προσαρμογή της προσομοίωσης της κινητικής αντιδράσεων στα πειραματικά δεδομένα για τους τέσσερις αντιδραστήρες του Κύκλου3 Δράσης Β



Διάγραμμα 5.139 Προσαρμογή της προσομοίωσης της κινητικής αντιδράσεων στα πειραματικά δεδομένα για τους τρεις αντιδραστήρες του Κύκλου2 Δράσης Γ

Ο έλεγχος της ακρίβειας της προσαρμογής του εκθετικού μοντέλου πρώτης τάξης στα πειραματικά δεδομένα προσδιορίστηκε με τη ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (*Root Mean Square Error* - RMSE) των απωλειών των πτητικών στερεών (VS_{loss}) μεταξύ των πειραματικών τιμών και αυτών του μοντέλου. Ύστερα οι τιμές αυτές κανονικοποιήθηκαν ως προς το επί της εκατό ποσοστό της συνολικής αποδόμησης των πτητικών στερεών (VS_0) σύμφωνα με τις εξισώσεις (5.6) και (5.7) (Bartista et al., 2010; Mason, 2007; Kulcu and Yaldiz, 2004).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (VS_{loss \text{ μοντέλο}, i} - VS_{loss \text{ πειραματικό}, i})^2}{n}} \quad \text{Εξίσωση (5.6)}$$

$$NRMSE = (RMSE/V S_0) * 100 \quad \text{Εξίσωση (5.7)}$$

Όπου:

NRMSE: Κανονικοποιημένη ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος

RMSE: Ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος

VS_0 : Συνολικό ποσοστό της βιοαποδομήσιμης οργανικής ουσίας στο αρχικό υπόστρωμα ($t=0$) το οποίο δύναται να οξειδωθεί (% OM)

$VS_{loss \text{ μοντέλο}}$: Ποσοστό αποδόμησης πτητικών στερεών το οποίο υπολογίζεται από το μοντέλο

$VS_{loss \text{ πειραματικό}}$: Ποσοστό αποδόμησης πτητικών στερεών το οποίο προσδιορίζεται πειραματικά

n: Συνολικός αριθμός των μετρήσεων

Οι τιμές του NRMSE που προκύπτουν για τους τέσσερις πειραματικούς κύκλους κομποστοποίησης είναι μεταξύ 2,91-5,49% και κρίνονται ικανοποιητικές συγκριτικά με αντίστοιχες τιμές από τη βιβλιογραφία. Αναλυτικότερα, σε κινητική εξίσωση πρώτης τάξης ο Mason (2008a) παρουσιάζει εύρος τιμών του NRMSE μεταξύ 0.90-5.73% και 0.53-4.43%. σε πειραματικές εφαρμογές με σταθερές και μεταβαλλόμενες συνθήκες επίδρασης της θερμοκρασίας αντίστοιχα. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι Bartista et al. (2010) σημείωσαν αποκλίσεις με εύρος 3.25-5.73% κατά την προσομοίωση της βιοαποδόμησης της οργανικής ουσίας με κινητική εξίσωση πρώτης τάξης σε συστήματα κομποστοποίησης Μηχανικής και Βιολογικής Επεξεργασίας, λαμβάνοντας υπόψη τις επιδράσεις στις μεταβολές της θερμοκρασίας, της υγρασίας, του οξυγόνου και του πορώδους κατά τα εξελικτικά στάδια της διεργασίας. Οι μεγαλύτερες αυτές αποκλίσεις ενδεχομένως αποδίδονται στην ανομοιογένεια του προς επεξεργασία υλικού. Περαιτέρω επιβεβαίωση του ελέγχου της καλής προσαρμογής του πρότυπου προσομοίωσης στην κινητική των αντιδράσεων, γίνεται και ποιοτικά με την προσαρμογή να εκτιμάται ως «καλή» σύμφωνα με την κλίμακα των πέντε βαθμίδων ταξινόμησης όπως αυτή ορίζεται από τον Mason (2007) (πίνακας 5.143). Επομένως, η ποσοστιαία απομάκρυνση της βιοαποδομήσιμης οργανικής ουσίας (BOM_{loss}) στους τέσσερις πειραματικούς κύκλους κομποστοποίησης περιγράφεται επιτυχώς από το μοντέλο κινητικής πρώτης τάξης γεγονός τα οποίο επιβεβαιώνει τα συμπεράσματα των Bartista et al. (2010), Mason (2007), García-Gómez et al. (2003), Bari (2000), Paredes et al. (2000) και Bernal et al. (1996).

Πίνακας 5.143: Ποιοτικός έλεγχος προσαρμογής των μοντέλων στα πειραματικά δεδομένα (Mason, 2007)

Κατηγορία	Περιγραφή
Άριστη	Κοντινή οπτική προσαρμογή, καλή συσχέτιση του σχήματος, η προσαρμογή αποτυπώνεται επιτυχώς στην αρχή της διεργασίας, στα μετέπειτα στάδια της διεργασίας η εξέλιξη της κατεύθυνσης του μοντέλου είναι ίδια με τα πειραματικά δεδομένα
Καλή	Περιστασιακές αποκλίσεις στην προσαρμογή, καλή συσχέτιση του σχήματος, στα μετέπειτα στάδια της διεργασίας η εξέλιξη της κατεύθυνσης του μοντέλου είναι παρόμοια με τα πειραματικά δεδομένα
Μέτρια	Αποκλίσεις στην προσαρμογή, αναγνωρίζεται η συσχέτιση του σχήματος, στα μετέπειτα στάδια της διεργασίας η εξέλιξη της κατεύθυνσης του μοντέλου είναι τυπικά διαφορετική από αυτή των πειραματικών δεδομένων
Επαρκής	Σημαντικές αποκλίσεις στην προσαρμογή, αναγνωρίζεται η συσχέτιση του σχήματος, στα μετέπειτα στάδια της διεργασίας η εξέλιξη της κατεύθυνσης του μοντέλου είναι τυπικά διαφορετική από αυτή των πειραματικών δεδομένων
Ανεπαρκής	Σημαντικές αποκλίσεις στην προσαρμογή, δεν αναγνωρίζεται η συσχέτιση του σχήματος, στα μετέπειτα στάδια της διεργασίας η εξέλιξη της κατεύθυνσης του μοντέλου είναι διαφορετική από αυτή των πειραματικών δεδομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή διερευνά τη δυνατότητα επεξεργασίας και επαναχρησιμοποίησης των βιοαποδομήσιμων οικιακών απορριμμάτων με τη χρήση πρότυπου συστήματος οικιακής κομποστοποίησης, το οποίο σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από τη Μονάδα Περιβαλλοντικής Επιστήμης και Τεχνολογίας του ΕΜΠ, για την αυτόνομη διαχείριση της ροής αυτής των αποβλήτων σε κάθε νοικοκυριό. Τα συμπεράσματα τα οποία προκύπτουν από την εργασία αφορούν στην αξιολόγηση του συγκεκριμένου συστήματος μέσω (α) της μελέτης και του ελέγχου της διεργασίας της κομποστοποίησης, (β) του προσδιορισμού των ιδιοτήτων και εν τέλει της ποιότητας του τελικού προϊόντος (φυσικοχημικές και βιολογικές ιδιότητες) και (γ) της ανάλυση της κινητικής των αντιδράσεων αποδόμησης των πτητικών στερεών.

Το σύστημα αποτελείται από βιοαντιδραστήρα κλειστού τύπου ασυνεχούς τροφοδοσίας με δυναμικότητα επεξεργασίας 60L βιοαποδομήσιμων οικιακών απορριμμάτων. Η προσθήκη του υλικού τροφοδοσίας στο εσωτερικό του αντιδραστήρα και η μηχανική ανάδευση, γίνεται χειροκίνητα. Το πρότυπο σύστημα διαθέτει ειδικά σχεδιασμένα συρτάρια για τη συλλογή του παραγόμενου κόμποστ, καθώς και ειδικό τμήμα για τη συλλογή και απομάκρυνση των στραγγισμάτων. Είναι ευέλικτο σύστημα ως προς τις ροές των βιοαποδομήσιμων οικιακών απορριμμάτων, που δύναται να επεξεργαστεί ενώ η λειτουργία του είναι πρακτική και εύκολη.

Στις πειραματικές εφαρμογές που πραγματοποιήθηκαν επιλέχθηκαν συγκεκριμένα τρόφιμα, που αποτέλεσαν τη βάση όλων των υποστρωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν, και μελετήθηκαν οι φυσικοχημικές τους ιδιότητες. Τα υλικά τροφοδοσίας των αντιδραστήρων στους διάφορους πειραματικούς κύκλους, διαμορφώθηκαν από τη σύνθεση διαφορετικών μιγμάτων των προαναφερόμενων τροφίμων. Ο στόχος ήταν να δημιουργηθούν υποστρώματα με γνωστές αρχικές ιδιότητες, ώστε να ελεγχθεί όσο το δυνατόν καλύτερα η διεργασία. Έτσι, με σταθερή βάση οικιακών αποβλήτων, δημιουργήθηκαν τρία είδη υποστρωμάτων, με αρχικούς λόγους C/N 20, 30 και 40. Παράλληλα, σε όλους τους πειραματικούς κύκλους, πραγματοποιήθηκε προσθήκη κάποιου προσθέτου (πριονίδι, ορυκτά, ώριμο κόμποστ) ή μίγμα αυτών, σε διάφορες αναλογίες, με στόχο τη μελέτη της επίδρασης των προσθέτων στη διεργασία της κομποστοποίησης, αλλά και τη βελτίωση των ιδιοτήτων του τελικού προϊόντος.

Ως προς τη λειτουργία του συστήματος κομποστοποίησης κατά την αερόβια βιολογική επεξεργασία των σχηματιζόμενων υποστρωμάτων παρατηρούνται τα εξής:

- Ο χρόνος που απαιτείται για να ολοκληρωθεί η διεργασία στο εσωτερικό του αντιδραστήρα είναι 18-20 ημέρες, καθώς οι τιμές όλων των βασικών παραμέτρων που επηρεάζουν τη διεργασία, με κύρια το λόγο C/N, μετά το πέρας 18-20 ημερών ομαλοποιούνται και έχοντας μικρές αυξομειώσεις σταθεροποιούνται, ένδειξη ότι η διεργασία έχει ολοκληρωθεί και το υλικό είναι έτοιμο προς ωρίμανση.
- Το θερμοκρασιακό προφίλ που αναπτύχθηκε στις πειραματικές εφαρμογές στον βιοαντιδραστήρα είναι τυπικό της διεργασίας της κομποστοποίησης καθώς από μια αρχική μεσόφιλη φάση ακολουθείται η θερμόφιλη και μετά την πάροδο ορισμένων ημερών το υπόστρωμα υπόκειται σε μια δεύτερη μεσόφιλη φάση. Οι διεργασίες τελούνται υπό ομαλές συνθήκες εφόσον δεν παρατηρείται παρεμπόδιση της

μικροβιακής δραστηριότητας, δεδομένου ότι η θερμοκρασία αποτελεί βασικό δείκτη της διαδοχής των μικροοργανισμών κατά τα εξελικτικά στάδια της κομποστοποίησης. Αξίζει να σημειωθεί ότι τις πρώτες ημέρες λειτουργίας του συστήματος παρατηρείται η άμεση αύξηση της θερμοκρασίας και η γρήγορη μετάβαση στο θερμοφίλο στάδιο της διεργασίας γεγονός το οποίο αποδίδεται στις ελεγχόμενες συνθήκες των βιοξειδωτικών αντιδράσεων και στον περιορισμό της επίδρασης εξωγενών παραγόντων (π.χ. θερμοκρασία περιβάλλοντος, βροχόπτωση) λόγω του κλειστού τύπου βιοαντιδραστήρα και της μόνωσης με πετροβάμβακα.

- Η υγρασία ελέγχεται και ρυθμίζεται αποτελεσματικά καθόλη τη διάρκεια της κομποστοποίησης με την περιεκτικότητα της στο υπόστρωμα να διαμορφώνεται σε ευνοϊκά για τους μικροοργανισμούς επίπεδα. Η χρήση των προσθέτων στο υπόστρωμα δημιουργεί κατάλληλο πορώδες και βοηθάει σημαντικά στον έλεγχο της υγρασίας.
- Η περιεκτικότητα του υποστρώματος σε οξυγόνο διαμορφώνεται σε όλες τις πειραματικές εφαρμογές σε επιθυμητά, για τη διατήρηση των αερόβιων συνθηκών επίπεδα, μέσω της συχνής ανάδευσης του υποστρώματος (2-3 φορές ημερησίως).. Εξίσου σημαντικό ρόλο στη διατήρηση της περιεκτικότητας του οξυγόνου σε υψηλά επίπεδα διαδραματίζουν και τα πρόσθετα που χρησιμοποιούνται (κυρίως τα ορυκτά), επιτυγχάνοντας καλύτερη διάχυση του αέρα στην οργανική μάζα, μέσω της ενίσχυσης του πορώδους.
- Ο ολικός οργανικός άνθρακας μειώνεται κατά τα εξελικτικά στάδια των πειραματικών εφαρμογών της κομποστοποίησης με το ρυθμό μείωσης να είναι μεγαλύτερος κατά τη θερμοφίλη φάση των διεργασιών. Αντίστοιχα, οι απώλειες σε πτητικά στερεά ανέρχονται σε υψηλά επίπεδα με το μεγαλύτερο ποσοστό απωλειών να λαμβάνει χώρα κατά το θερμοφίλο στάδιο της κομποστοποίησης. Τόσο ο ολικός οργανικός άνθρακας όσο και οι απώλειες σε πτητικά στερεά τείνουν να σταθεροποιηθούν προς το τέλος των διεργασιών, οφειλόμενο στις σταθερότερες οργανικές ενώσεις που επικρατούν στο υπόστρωμα.
- Η εξέλιξη του pH στις πειραματικές εφαρμογές είναι τυπική των διεργασιών της κομποστοποίησης. Τις πρώτες ημέρες το pH εμφανίζεται ελαφρώς όξινο λόγω του σχηματισμού οργανικών οξέων κατά τη διάσπαση ενώσεων οι οποίες είναι πιο εύκολα διαθέσιμες στους μικροοργανισμούς. Στη συνέχεια των διεργασιών το pH αυξάνεται σημαντικά διαμορφώνοντας αλκαλικό περιβάλλον καθώς τα οργανικά οξέα καταναλίσκονται άμεσα ενώ παράλληλα αυξάνεται η συγκέντρωση των αμμωνιακών λόγω της διάσπασης του οργανικού αζώτου. Στα μετέπειτα στάδια της κομποστοποίησης το pH μειώνεται σταδιακά προς ελαφρώς βασικές τιμές οφειλόμενο στη μείωση της συγκέντρωσης των αμμωνιακών λόγω των διεργασιών της νιτροποίησης καθώς και λόγω των απωλειών αμμωνίας.
- Η ποσοστιαία περιεκτικότητα του αζώτου στην αρχή των διεργασιών διαφοροποιείται μεταξύ των πειραματικών εφαρμογών κομποστοποίησης και εξαρτάται κυρίως από το βαθμό βιοξείδωσης του ολικού οργανικού άνθρακα και το βαθμό απωλειών αζώτου που επιτυγχάνονται κατά τη διάσπαση της οργανικής ουσίας. Προς το τελικό στάδιο της κομποστοποίησης παρατηρείται σε όλους τους πειραματικούς κύκλους μικρή αύξηση στην περιεκτικότητα του αζώτου γεγονός το οποίο μπορεί να αποδοθεί στην περαιτέρω μείωση του ολικού οργανικού άνθρακα αλλά και στη δράση ελεύθερων αζωτοδεσμευτικών βακτηρίων ανακτώντας μέρος των απωλειών του αζώτου. Η χρήση ορυκτών με ιοντοεναλλακτικές ικανότητες (π.χ.

ζεόλιθος), περιορίζει το σύνολο των απωλειών αζώτου λόγω της προσρόφησης αμμωνίας και αμμωνιακών, αλλά ενδεχομένως η ποσότητα της προσθήκης του να μην επαρκεί για την περαιτέρω μείωση των απωλειών αζώτου

- Οι αρχικοί λόγοι C/N των υποστρώματων διατηρούνται σταθεροί σε όλους τους πειραματικούς κύκλους, σε τιμές 20, 30 και 40. Από αυτά τα υποστρώματα, εκείνα στα οποία η διεργασία εξελίσσεται αρτιότερα έχουν αρχικό λόγο C/N=30. Εντούτοις, οι διεργασίες τελούνται σε αρκετά καλό βαθμό και σε υποστρώματα με αρχικό λόγο C/N κοντά στο 40, ενώ στα υποστρώματα με χαμηλό αρχικό λόγο C/N (20) οι διεργασίες τελούνται ικανοποιητικά.
- Η προσθήκη προσθέτων στο υπόστρωμα, και κυρίως ορυκτών όπως ο ζεόλιθος, ο βερμικουλίτης και ο περλίτης βελτιώνουν τις φυσικές ιδιότητες του υποστρώματος αυξάνοντας το πορώδες του και επιτρέποντας τον καλύτερο αερισμό και την ύγρανση του υποστρώματος, χωρίς να λαμβάνουν μέρος στις βιοξειδωτικές διεργασίες. Ειδικότερα στην περίπτωση του ζεόλιθου, οι ιοντοεναλλακτικές ιδιότητές του και η εκλεκτικότητά του ως προς τα αμμωνιακά ιόντα συνεισφέρει στη μείωση των απωλειών αζώτου, ενώ παράλληλα ρυθμίζονται οι συγκεντρώσεις των αμμωνιακών και κατ' επέκταση των νιτρικών στο υπόστρωμα. Δε συμβαίνει το ίδιο όταν χρησιμοποιείται ως πρόσθετο σκέτο πριονίδι, παρά μόνο σε μίγμα του με ορυκτά και σε αναλογίες 10% κ.β.

Ως προς τα φυσικοχημικά και βιολογικά χαρακτηριστικά του παραγόμενου κόμποστ το οποίο προέρχεται από τις πειραματικές εφαρμογές του συστήματος κομποστοποίησης προκύπτουν τα εξής:

- Η περιεχομένη υγρασία του τελικού προϊόντος παρουσιάζει εύρος τιμών μεταξύ 49,88-55,48 % και εμπίπτει στο προτεινόμενο εύρος τιμών όπως αυτό παρατίθεται από τη διεθνή βιβλιογραφία. Εξάιρεση αποτελούν τα προϊόντα που στο υπόστρωμά τους προστέθηκε σκέτο πριονίδι ή ορυκτό σε ποσοστό 5% κ.β. Σε αυτά τα προϊόντα η υγρασία παραμένει σε πολύ υψηλά επίπεδα, ξεπερνώντας κατά πολύ το 60%, με μέγιστη τιμή 68,15%.
- Το pH στο τελικό προϊόν εμφανίζει ελαφρώς βασικές τιμές μεταξύ 7,73-8,14 και είναι σε συμφωνία με το επιθυμητό εύρος τιμών για την ασφαλή εναπόθεσή του στο έδαφος. Εξάιρεση αποτελούν, όπως και στην υγρασία, τελικά προϊόντα που προήλθαν από υποστρώματα στα οποία προστέθηκε μόνο πριονίδι ή ορυκτό σε ποσοστό 5%κ.β. Στις περιπτώσεις αυτές το pH είναι πολύ βασικό, παρουσιάζοντας τιμές κοντά στο 9. Το γεγονός αυτό είναι ενδεικτικό της μη ορθής διεξαγωγής της διεργασίας σε αυτούς τους πειραματικούς κύκλους.
- Η αναλογία C/N παρουσιάζεται μεταξύ 9,33-11,07. Οι τιμές αυτές δύναται να διαμορφώσουν συνθήκες ισορροπίας ή μερικής ακινητοποίησης του αζώτου κατά την εναπόθεσή του στο έδαφος. Οι αντίστοιχοι λόγοι C/N, των προϊόντων στα οποία προστέθηκε μόνο πριονίδι ή ορυκτό σε ποσοστό 5%κ.β. έχουν τιμές που ξεπερνούν ακόμα και το 20, με μέγιστη την τιμή 20,21.
- Οι συγκεντρώσεις των αμμωνιακών και των νιτρικών στο παραγόμενο κόμποστ κυμαίνεται σε αποδεκτά επίπεδα και παρουσιάζονται σύμφωνα με αυτές που ορίζονται στη βιβλιογραφία.

- Η περιεκτικότητα σε μακροστοιχεία (N, K, Mg, Ca) στο κόμποστ είναι ικανοποιητική και στις περισσότερες των περιπτώσεων στο εύρος των προτεινόμενων τιμών, όπως αυτό παρατίθεται από τη διεθνή βιβλιογραφία. Η επάρκεια των μακροστοιχείων στο κόμποστ, ιδιαίτερα αυτή του αζώτου και του καλίου, αποτελούν δείκτη της υψηλής θρεπτικής αξίας του τελικού προϊόντος τα οποία σε πολλές περιπτώσεις έχουν αποτελέσει περιοριστικό παράγοντα της αξίας και της τελικής χρήσης του κόμποστ (Zhang et al., 2006).
- Η ολική συγκέντρωση των βαρέων μετάλλων είναι αμελητέα, έως μη ανιχνεύσιμη σε όλα τα παραγόμενα προϊόντα, καθώς τα υποστρώματα δημιουργούνται από οικιακά απορρίμματα των οποίων η διαλογή έγινε στην πηγή και δεν έχουν επιβαρυνθεί από βαρέα μέταλλα.
- Ο Δείκτης Βλαστικότητας παρουσιάζει τιμές πάνω από 101, για τους πρότυπους σπόρους μαρουλιού σε όλα τα παγόμενα κόμποστ, υποδηλώνοντας ότι το τελικό προϊόν παρουσιάζεται φυτοθρεπτικό και δεν δύναται να αναστείλει τη βλαστικότητα των συγκεκριμένων φυτών διότι δεν παρουσιάζονται φυτοτοξικές ενώσεις. Πολύ σημαντική αύξηση της φυτοθρεπτικής ικανότητας του κόμποστ παρατηρείται μετά το πέρας της ωρίμανσής του, γεγονός που αποδεικνύει το πόσο σημαντικό είναι αυτό το στάδιο της διεργασίας, που πραγματοποιείται εκτός του αντιδραστήρα.
- Αναφορικά με τους παθογόνους μικροοργανισμούς, οι συνθήκες λειτουργίας του συστήματος κομποστοποίησης πληρούν τις προϋποθέσεις μείωσης των παθογόνων και κατ' επέκταση της υγειονομοποίησης του κόμποστ δεδομένου των μέγιστων θερμοκρασιακών επιπέδων και της χρονικής διάρκειας αυτών στον βιοαντιδραστήρα. Την άποψη αυτή επιτείνει και το γεγονός ότι τα υποστρώματα δημιουργούνται από οικιακά οργανικά απορρίμματα, των οποίων η διαλογή πραγματοποιήθηκε στην πηγή.

Η ανάλυση της κινητικής των αντιδράσεων αποδόμησης του οργανικού υλικού αφορά στην κινητική εξίσωση πρώτης τάξης βασιζόμενη στις απώλειες της βιοαποδομήσιμης των πτητικών στερεών κατά την κομποστοποίηση των οργανικών οικιακών απορριμμάτων. Το συμπέρασμα το οποίο προκύπτει είναι τα εξής.

- Η προσαρμογή του μοντέλου κινητικής πρώτης τάξης των απωλειών των πτητικών στερεών (VS_{loss}) στα πειραματικά δεδομένα θεωρείται ικανοποιητική τόσο ποιοτικά (οπτική προσαρμογή) όσο και ποσοτικά ($2,91\% < NRMSE < 5,49\%$).

Συνοψίζοντας διαπιστώνεται ότι τα διαφορετικά μίγματα βιοαποδομήσιμων οικιακών απορριμμάτων δύναται να επεξεργαστούν αποτελεσματικά με τη χρήση του πρότυπου συστήματος κομποστοποίησης, ενώ παράλληλα το παραγόμενο προϊόν διαθέτει τις απαιτούμενες φυσικοχημικές και βιολογικές ιδιότητες για το χαρακτηρισμό του ως ώριμο και σταθεροποιημένο κόμποστ το οποίο μπορεί να διατεθεί με ασφάλεια σε γεωργικές καλλιέργειες. Επομένως, η εφαρμογή του συστήματος κομποστοποίησης σε ευρεία κλίμακα στα νοικοκυριά δύναται να συμβάλει στην ορθολογική διαχείριση των βιοαποδομήσιμων οικιακών απορριμμάτων στο σημείο παραγωγής τους εκτρέποντας το ρεύμα αυτό των αποβλήτων από τους ΧΥΤΑ. Παράλληλα η διάθεση του παραγόμενου κόμποστ μπορεί να γίνει τοπικά συνεισφέροντας στην ασφάλεια και μακροχρόνια διαθεσιμότητα σε θρεπτικά συστατικά και οργανική ουσία για τη συντήρηση ή/και την αποκατάσταση της ποιότητας των εδαφών.

Το σύνολο των αποτελεσμάτων της έρευνας συνδράμει στην υιοθέτηση εναλλακτικής προσέγγισης στη διαχείριση των οργανικών οικιακών απορριμμάτων. Αυτή η προσέγγιση στοχεύει στη βιώσιμη επεξεργασία, ανάκτηση και ανακύκλωση των αποβλήτων στο σημείο παραγωγής τους, αλλά και στο περιορισμό της αναγκαιότητας μεγάλων κεντρικών μονάδων επεξεργασίας, προσδίδοντας περιβαλλοντικά, οικονομικά και κοινωνικά οφέλη.

Βιβλιογραφία

- Adani, F., Scatigna, L. and Genevini, P., (2000). Biostabilization of mechanically separated municipal solid waste fraction, *Waste Management and Research* 18(5) 471-477.
- Addiscott, T. M., Whitmore, A. P. and Powlson, D. S., (1991). *Farming, Fertilizers and the Nitrate Problem*, CAB International, Wallingford.
- Adhikari, B. K., Barrington, S., Martinez, J. and King, S., (2009a). Effectiveness of three bulking agents for food waste composting, *Waste Management and Research*. 29(1) 197-203.
- Adhikari, B. K., Barrington, S. F. and Martinez, J., (2009b). Urban food waste generation: challenges and opportunities, *International Journal of Environment and Waste Management* 39(1/2) 4-21.
- Adriano, D., Chang, A., Pratt, P. and Sharpless, R., (1973). Effect of soil application of dairy manure on germination and emergence of some selected crops, *Journal of Environmental Quality* 2 396-399.
- Agamuthu, P., Choong, L. C., Hasan, S. and Praven, V. V., (2000). Kinetic evaluation of composting of agricultural wastes, *Environmental Technology* 21(2) 185-192.
- Al-Jabi, L. F., Halalsheh, M. M. and Badarneh, D. M., (2008). Conservation of ammonia during food waste composting, *Environmental Technology* 29(10) 1067-1073.
- Alderman Jr, D. R., (1998). *Assessing the availability of wood residues and residue markets in Virginia*, Wood Science and Forest products, MSc., Blacksburg, Virginia.
- Alexander, F., Szmidt, R. and Cruz, P., (2002). Factsheet on composting biosolids. Remade Scotland <http://www.remade.org.uk/media/12315/factsheet%20on%20composting%20biosolids%20%28june%202002%29.pdf>
- Alexander, M., (1977). *Introduction to Soil Microbiology*, John Wiley & Sons, New York.
- Alexander, R. A., (1994). Standards and guidelines for compost use, *Biocycle* 35(12) 37-41.
- Amlinger, F., Götz, B., Dreher, P., Geszti, J. and Weissteiner, C., (2003). Nitrogen in biowaste and yard waste compost: dynamics of mobilisation and availability - a review, *European Journal of Soil Biology* 39(3) 107-116.
- Andreadakis, A. D., Mamais, D., Gavalaki, E. and Kampylafka, S., (2002). Sludge utilisation in agriculture: Possibilities and prospects in Greece, *Water Science and Technology* 46(10) 231-238.
- Andrews, J. F. and Kambhu, K., (1973). *Thermophilic aerobic digestion of organic solid wastes*, USEPA, Springfield, IL, USA.
- Antonious, G. F., Turley, E. T., Sikora, F. and Snyder, J. C., (2008). Heavy metal mobility in runoff water and absorption by eggplant fruits from sludge treated soil, *Journal of Environmental Science and Health - Part B Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes* 43(6) 526-532.
- APHA, (1998). *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 20 ed., American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation, Washington, DC.
- Artioli, G., Smith, J. V., Krick, A., Pluth, J. J. and Stah, K. (1985). Zeolites: synthesis, structure, technology and application. in: B.Drazaz, S.Var and S. Pejorvic (Eds.), Elsevier, Amsterdam, p. 2
- Aslam, D. N., Horwath, W. and VanderGheynst, J. S., (2008). Comparison of several maturity indicators for estimating phytotoxicity in compost-amended soil, *Waste Management and Research* 28(11) 2070-2076.
- Bach, P. D., Shoda, M. and Kubota, H., (1984). Rate of composting of dewatered sewage sludge in continuously mixed isothermal reactor, *Journal of Fermentation Technology* 62 285-291.
- Baddi, G. A., Alburquerque, J. A., González, J., Cegarra, J. and Hafidi, M., (2004). Chemical and spectroscopic analyses of organic matter transformations during composting of olive mill wastes, *International Biodeterioration and Biodegradation* 54(1) 39-44.
- Banegas, V., Moreno, J. L., Moreno, J. I., García, C., León, G. and Hernández, T., (2007). Composting anaerobic and aerobic sewage sludges using two proportions of sawdust, *Waste Management* 27(10) 1317-1327.
- Bangar, K. C., Kapoor, K. K. and Mishra, M. M., (1988). Effect of pyrite on conservation of nitrogen during composting, *Biological Wastes* 25 227-231.
- Bannick, C. G. and Joergensen, R. G., (1993). Changes in N fractions during composting of wheat straw, *Biology and Fertility of Soils* 16 269-274.
- Baptista, M., Antunes, F., Gonçalves, M. S., Morvan, B. and Silveira, A., (2010). Composting kinetics in full-scale mechanical-biological treatment plants, *Waste Management* 30(10) 1908-1921.

- Baptista, M., Antunes, F. and Silveira, A., (2011). Diagnosis and optimization of the composting process in full-scale mechanical-biological treatment plants, *Waste Management and Research* 1–9 Article in Press.
- Bari, Q. H., Koenig, A. and Guihe, T., (2000). Kinetic analysis of forced aeration composting - I. reaction rates and temperature, *Waste Management and Research* 18(4) 303-312.
- Barnard, G. and Kristoferson, L., (1985). Agricultural residues as fuel in the third world, Earthscan, Energy Information Programme, The Beijer Institute.
- Barrena Gómez, R., Vázquez Lima, F. and Sánchez Ferrer, A., (2006). The use of respiration indices in the composting process: A review, *Waste Management and Research* 24(1) 37-47.
- Barrington, S., Choiniere, D., Trigui, M. and Knight, W., (2003). Compost convective airflow under passive aeration, *Bioresource Technology* 86 259–266.
- Bary, A., Cogger, C. and Sullivan, D., (2002). What does compost analysis tell you about your compost? www.soils1.org.
- Bazzoffi, P., Pellegrini, S., Rocchini, A., Morandi, M. and Grasselli, O., (1998). The effect of urban refuse compost and different tractors tyres on soil physical properties, soil erosion and maize yield, *Soil and Tillage Research* 48(4) 275-286.
- BCMAFF (British Columbia Ministry of Agriculture Food and Fisheries), (1998). BC Agricultural Composting Handbook. <http://www.agf.gov.bc.ca/resmgmt/publist/300Series/382500-0.pdf>.
- Beauchamp, C. J., Levesque, G., Prevost, D. and Chalifour, F. P., (2006). Isolation of free-living dinitrogen-fixing bacteria and their activity in compost containing de-inking paper sludge, *Bioresource Technology* 97 1002–1011.
- Beck-Friis, B., Smårs, S., Jönsson, H. and Kirchmann, H., (2001). Gaseous emissions of carbon dioxide, ammonia and nitrous oxide from organic household waste in a compost reactor under different temperature regimes, *Journal of Agricultural Engineering Research* 78(4) 423-430.
- Benito, M., Masaguer, A., Moliner, A., Arrigo, N. and Palma, R. S., (2003). Chemical and microbiological parameters for the characterization of the stabilizing and maturing of pruning waste compost, *Biology and Fertility of Soils* 37 184–189.
- Bernal, M. P., Lopez-Real, J. M. and Scott, K. M., (1993). Application of natural zeolites for the reduction of ammonia emissions during the composting of organic wastes in a laboratory composting simulator, *Bioresource Technology* 43(1) 35-39.
- Bernal, M. P., Navarro, A. F., Roig, A., Cegarra, J. and García, D., (1996). Carbon and nitrogen transformation during composting of sweet sorghum bagasse, *Biology and Fertility of Soils* 22 141–148.
- Bernal, M. P., Paredes, C., Sánchez-Monedero, M. A. and Cegarra, J., (1998a). Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes, *Bioresource Technology* 63 91–99.
- Bernal, M. P., Sánchez-Monedero, M. A., Paredes, C. and Roig, A., (1998b). Carbon mineralization from organic wastes at different composting stages during their incubation with soil, *Agriculture Ecosystems and Environment* 69(3) 175-189.
- Bernal, M. P., Navarro, A. F., Sánchez-Monedero, M. A., Roig, A. and Cegarra, J., (1998c). Influence of sewage sludge compost stability and maturity on carbon and nitrogen mineralization in soil, *Soil Biology and Biochemistry* 30(3) 305-313.
- Bernal, M. P., Alburquerque, J. A. and Moral, R., (2009). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review, *Bioresource Technology* 100(22) 5444-5453.
- Berner, A., (2004). Einfluss der Kompostanwendung auf die Pflanzenernährung und das Pflanzenwachstum. in: G. J. Fuchs, M. Bieri and M. Chardonnens (Eds.), *Auswirkungen von Komposten und von Gärgut auf die Umwelt, die Bodenfruchtbarkeit, sowie die Pflanzengesundheit. Zusammenfassende Übersicht der aktuellen Literatur*, Forschungsinstitut für biologischen, Landbau, pp. 59-79.
- Bernstad, A., La Cour Jansen, J. and Aspegren, H., (2010). A life cycle approach to household food waste management – a Swedish full scale case study, in: K. Lasaridi and T. Manios (Eds.), *Organic Resources in the Carbon Economy*, ORBIT conference, Heraklion Crete, Greece, pp. 117–124.
- Bharadwaj, K. K. R., (1995). Improvements in microbial compost technology: A special reference to microbiology of composting. *Wealth from waste*, EC (2001a) 'Establishing ecological criteria for the award of the Community eco-label to soil improvers and growing media' (2001/688/EC), Official Journal L 242 , 12/09/2001, pp. 0017 – 0022.

- Bhattacharya, S. C. and Shrestha, R. M., (1990). *Biocoal Technology and Economics*, RERIC, Bangkok, Thailand.
- Bhattacharya, S. C., Pham, H. L., Shrestha, R. M. and Vu, Q. V., (1993). CO₂ emissions due to fossil and traditional fuels, residues and wastes in Asia, AIT Workshop on Global Warming Issues in Asia, AIT, Bangkok, Thailand.
- Bishop, P. L. and Godfrey, C., (1983). Nitrogen transformation during sewage composting, *Biocycle* 24 34–39.
- BMLFUW, (2006). *Federal Waste Management Plan*, Vienna.
- Bollen, G. J., (1969). The selective effect of heat treatment of the microflora of a green house soil, *Netherlands Journal of Plant Pathology* 75 157–163.
- Bollen, G. J., Volker, D. and Wijnen, A. P., (1989). Inactivation of soil-borne plant pathogens during small scale composting of crop residues, *Netherlands Journal of Plant Pathology* 95 19–30.
- Bono, J. J., Chalaux, N. and Chabbert, B., (1992). Bench-scale composting of two agricultural wastes, *Bioresource Technology* 40 119-124.
- Bothe, H., Ferguson, S. J. and Newton, W. E., (2007). *Biology of the Nitrogen Cycle*, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Bouyoucos, G. J., (1962). Hydrometer method improved for making particle and size analysis of soils, *Agronomy Journal* 54 464–465.
- Brewer, L. J. and Sullivan, D. M., (2003). Maturity and stability evaluation of composted yard trimmings, *Compost Science and Utilization* 11(2) 96–112.
- Brink, N., (1995). Composting of food waste and waste paper with topsoils for nitrogen catching, *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B Soil and Plant Science* 43(4) 238-243.
- Brinton, W. F., (2000). *Compost quality standards & guidelines: An International View*, Woods End Research Laboratory, pp. 32–35.
- Bueno, P., Tapias, R., López, F. and Díaz, M. J., (2008). Optimizing composting parameters for nitrogen conservation in composting, *Bioresource Technology* 99(11) 5069-5077.
- Burge, W., Colacicco, D., Cramer, W. and Epstein, E., (1978a). Criteria for control of pathogens during sewage sludge composting, *National Conference on Design of Municipal Sludge Compost Facilities*, vol. III, Chicago, pp. 124–129.
- Burgos, P., Madejón, E. and Cabrera, F., (2006). Nitrogen mineralization and nitrate leaching of a sandy soil amended with different organic wastes, *Waste Management and Research* 24(2) 175-182.
- Busby, R. R., Torbert, H. A. and Gebhart, D. L., (2007). Carbon and nitrogen mineralization of non-composted and composted municipal solid waste in sandy soils, *Soil Biology and Biochemistry* 39(6) 1277-1283.
- Bustamante, M. A., Moral, R., Paredes, C., Vargas-García, M. C., Suárez-Estrella, F. and Moreno, J., (2008). Evolution of the pathogen content during co-composting of winery and distillery wastes, *Bioresource Technology* 99 7299–7306.
- CA (Composting Association), (2001). *Large-scale composting: a practical manual for the UK*, in: *The Composting Association (Ed.)*, Wellingborough.
- Canet, R. and Pomares, F., (1995). Changes in physical, chemical and physicochemical parameters during the composting of municipal solid wastes in two plants in Valencia, *Bioresource Technology* 51 259–264.
- Carrington, E. G., (2001). *Evaluation of Sludge Treatments for Pathogen Reduction – Final Report*, European Commission Directorate-General Environment, Luxembourg.
- Carry, C. W., Stahl, J. F., Hansen, B. E. and Friess, P. L., (1990). Sludge management and disposal practices of the county sanitation districts of Los Angeles (USA), *Water Science and Technology* 22(12) 23-32.
- Casado-Vela, J., Sellés, S., Navarro, J., Bustamante, M. A., Mataix, J., Guerrero, C. and et al., (2006). Evaluation of composted sewage sludge as nutritional source for horticultural soils, *Waste Management* 26(9) 946-952.
- Cathcart, T. P., Wheaton, F. W. and Brinsfield, R. B., (1986). Optimizing variables affecting composting of blue crab scrap, *Agricultural Wastes* 15(4) 269-287.
- CCME (Canadian Council of Ministers of the Environment), (2005). *Guidelines for Compost Quality*. http://www.ccme.ca/assets/pdf/compostgdlns_1340_e.pdf
- CCQC (California Compost Quality Council), (2001). *Compost Maturity Index*, Technical Report, California Compost Quality Council. <http://www.calrecycle.ca.gov/organics/Products/Quality/CompMaturity.pdf>.

- Chang, J. I., Tsai, J. J. and Wu, K. H., (2006). Thermophilic composting of food waste, *Bioresource Technology* 97(1) 116-122.
- Changa, C. M., Wang, P., Watson, M. E., Hoitink, H. A. J. and Michel Jr., F. C., (2003). Assessment of the reliability of a commercial maturity test kit for composted manures, *Compost Science and Utilization* 11 125–143.
- Cheremisinoff, N. P., (2003). *Handbook of Solid Waste Management and Waste Minimization Technologies*, Oxford, UK.
- Cheremisinoff, P. N., Cheremisinoff, P. P., Morresi, A. C. and Young, R. A., (1976). *Woodwastes utilization and disposal*, Technomic Publishing Company, Westport, Connecticut.
- Choi, M. H. and Park, Y. H., (1998). The influence of yeast on thermophilic composting of food waste, *Letters in Applied Microbiology* 26(3) 175–178.
- CIWMB (California Integrated Waste Management Board), (2004). *Compost Quality Standards for finished compost*. <http://www.calrecycle.ca.gov/organics/products/Quality/CQStandards.htm>.
- Clapp, C., Stark, S., Clay, D. and Larson, W., (1986). *Sewage sludge organic matter and soil properties. The Role of Organic Matter in Modern Agriculture*, Martinus Nijhoff Publications, The Hague (Netherlands), pp. 209–253.
- Clark, C. S., Buckingham, C. O. and Charbonneau, R., (1978). Laboratory scale composting: Studies, *Journal of Environmental Engineering ASCE* 104(1 EE1) 47-59.
- Cofie, O., Kone, D., Rothenberger, S., Moser, D. and Zubruegg, C., (2009). Co-composting of faecal sludge and organic solid waste for agriculture: Process dynamics, *Water Research* 43(18) 4665-4675.
- Cooperband, L. R., (2000). Composting: art and science of organic waste conversion to a valuable soil resource, *Laboratory Medicine* 31 283–289.
- Cooperband, L. R., Stone, A. G., Fryda, M. R. and Ravet, J. L., (2003). Relating compost measures of stability and maturity to plant growth, *Compost Science and Utilization* 11(2) 113-124.
- Crobe, K., (1994). Composter Links up with Food Processor, *Biocycle* 34(7) 40-43.
- Das, K. and Keener, H. M., (1997). Numerical model for the dynamic simulation of a large scale composting system, *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 40(4) 1179-1189.
- Das, N. and Singh, S. K., (2004). Useful byproducts from cellulosic wastes of agriculture and food industry – a critical appraisal, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 44 77–89.
- Davies, P., Border, D. and Urquhart, A., (2006). *Feasibility of Composting Wood and Cardboard Waste with Green Garden or Household Kitchen Waste*, WRAP, UK.
- Davis, R. D., (1989). Utilization of sewage sludge in agriculture, *Agricultural Progress* 64 72–80.
- de Baere, L., Verdonck, O. and Verstraete, W., (1986). High rate dry anaerobic composting process for the organic fraction of solid wastes, *Biotechnology and Bioengineering Symposium* 15 321–330.
- de Bertoldi, M. and Zucconi, F., (1980). Microbiologia della trasformazione dei rifiuti solidi urbani in compost e loro utilizzazione in agricoltura, *Ingegneria Ambientale* 9(3) 209-216.
- de Bertoldi, M., Vallini, G. and Pera, A., (1982). Ecologia Microbica del compostaggio, *Annals of Microbiology* 32 121-135.
- de Bertoldi, M., Vallini, G., Pera, A. and Zucconi, F., (1982). Comparison of three windrow compost systems, *Biocycle* 23(2) 45-46, 48, 50.
- de Bertoldi, M., Vallini, G. and Pera, A., (1983). The biology of composting: A review, *Waste Management and Research* 1(2) 157-176.
- de Bertoldi, M., Zucconi, F. and Civilini, M., (1988). Stabilization research -Temperature, pathogen control and product quality, *Biocycle* 29(2) 43–50.
- de Guardia, A., Petiot, C., Rogeau, D. and Druilhe, C., (2008). Influence of aeration rate on nitrogen dynamics during composting, *Waste Management* 28 575–587.
- DEPA (Danish Environmental Protection Agency), (2003). Afsætning af bioforgasset organisk affald.
- Déportes, I., Benoit-Guyod, J. L. and Zmirou, D., (1995). Hazard to man and the environment posed by the use of urban waste compost: A review, *Science of the Total Environment* 172(2-3) 197-222.
- Diacono, M. and Montemurro, F., (2010). Long-term effects of organic amendments on soil fertility. A review, *Agronomy for Sustainable Development* 30(2) 401-422.
- Diaz, L. F. and Savage, G. M., (2002). Composting of Municipal Wastes. in: G. Tchobanoglous and F. Kreith (Eds.), *Handbook of Solid Waste Management*, McGraw Hill, USA, p. 459.
- Diaz, L. F., Savage, G. M. and Golueke, C. G., (2002). Composting of Municipal Solid Wastes. in: G. Tchobanoglous and F. Kreith (Eds.), *Handbook of Solid Waste Management*, McGraw Hill USA, New York, pp. 11-70.

- Diaz, L. F. and Savage, G. M., (2007a). Factors that Affect the Process. in: L. F. Diaz, M. de Bertoldi, W. Bidlingmaier and E. Stentiford (Eds.), *Compost Science and Technology* Elsevier, Amsterdam, pp. 49-64.
- Diaz, L. F. and Savage, G. M., (2007b). Bioremediation. in: L. F. Diaz, M. de Bertoldi, B. W. and S. E. (Eds.), *Compost Science and Technology*, Elsevier, Amsterdam, pp. 159-176.
- DIN, (1993). *German Standard Methods for the examination of water, sewage and sewage sludge*, Wiley-VCH, Weinheim, Germany.
- DoE (Department of the Environment), (1996). *Code of Practice for Agricultural Use of Sewage Sludge*, HMSO, London, UK.
- Drescher, S., Müller, C., Kubrom, T., Mehari, S., Zurbrügg, C. and Kytzia, S., (2006). Decentralised composting – assessment of viability through combined material flow analysis and cost accounting, ORBIT conference, *Biological Waste Management From Local to Global*, Weimar, Germany.
- Drescher, S. and Zurbrügg, C., (2006). Decentralised composting: Lessons learned and future potentials for meeting the millennium development goals, Collaborative Working Group on Solid Waste Management in Low- and Middle-income Countries, Workshop 2006, Kolkata, India.
- Dulac, N., (2001). The organic waste flow in integrated sustainable waste management. Tools for Decision Makers: Experiences from the Urban Waste Expertise Programme (1995-2001), WASTE, Nieuwehaven.
- Dumontet, S., Dinel, H. and Baloda, S. B., (1999). Pathogen reduction in sewage sludge by composting and other biological treatments: A review, *Biological Agriculture and Horticulture* 16 409–430.
- EA (Environment Agency), (2001). *Technical Guidance on Composting Operations (Draft)*, Environment Agency UK, Bristol.
- EC (European Commission), (2000). Working Document on Sludge, DG ENV, ENV.E.3/LM, 3rd draft. <http://europa.eu.int/comm/environment/sludge/report10.htm>
- EC (European Commission), (2001). Working Document: Biological treatment of biowaste, DG ENV, ENV.A.2/LM/biowaste/2nd draft. http://www.compost.it/www/pubblicazioni_on_line/biod.pdf
- EC (European Commission), (2003). Draft discussion document for the ad hoc meeting on biowastes and sludges, DG ENV, ENV A.2/LM, Brussels Belgium.
- EC (European Commission), (2005). *Soil atlas of Europe*, Office for official publications of the European communities, Luxembourg.
- EC (European Commission), (2006). Annex report from the commission to the council and the European parliament on the implementation of community waste legislation Directive 75/442/EEC on waste, Directive 91/689/EEC on hazardous waste, Directive 75/439/EEC on waste oils, Directive 86/278/EEC on sewage sludge and Directive 94/62/EC on packaging and packaging waste Directive 1999/31/EC on the landfill of waste for the period 2001-2003, European Commission, COM(2006) 406 final.
- EC (European Commission), (2010). Environmental, economic and social impacts of the use of sewage sludge on land Final Report Part III, Revision of sewage sludge directive (86/278/EEC) - impact assessment.
- EEA (European Environment Agency), (2002). Biodegradable municipal waste management in Europe Part 1 Strategies and instruments. European Topic Center on Waste. http://www.eea.europa.eu/publications/topic_report_2001_15.
- EEA (European Environment Agency), (2003). *Europe's Environment: The Third Assessment*, Copenhagen.
- EEC Council Directive, (1991). Council directive concerning urban wastewater treatment, 91/271/EEC, Official Journal of the European Communities, pp. 40-52.
- Eggen, T. and Vethe, O., (2001). Stability indices for different composts, *Compost Science and Utilization* 9 19–26.
- Eggerth, L. L., Diaz, L. F., Chang, M. T. F. and Iseppi, L., (2007). Marketing of Composts. in: L. F. Diaz, M. de Bertoldi, W. Bidlingmaier and E. Stentiford (Eds.), *Compost Science and Technology*, vol. 8, Elsevier, Amsterdam, pp. 325-355.
- Eghball, B., Power, J. F., Gilley, J. E. and Doran, J. W., (1997). Nutrient, Carbon and mass loss during composting of beef cattle feedlot manure, *Journal of Environmental Quality* 26 189–193.
- Eklind, Y. and Kirchmann, H., (2000a). Composting and storage of organic household waste with different litter amendments. I: Carbon turnover, *Bioresource Technology* 74(2) 115-124.

- Eklind, Y. and Kirchmann, H., (2000b). Composting and storage of organic household waste with different litter amendments. II: Nitrogen turnover and losses, *Bioresource Technology* 74(2) 125-133.
- Elvira, C., Sampedro, L., Benítez, E. and Nogales, R., (1998). Vermicomposting of sludges from paper mill and dairy industries with *eisenia andrei*: A pilot-scale study, *Bioresource Technology* 63(3) 205-211.
- Engelhart, M., Kruger, M., Kopp, J. and Dichtl, N., (2000). Effects of disintegration on anaerobic degradation of sewage excess sludge in downflow stationary fixed film digesters, *Water Science and Technology* 41 171-179.
- Engeli, H., Edelmann, W., Fuchs, J. and Rottermann, K., (1993). Survival of plant pathogens and weed seeds during anaerobic digestion, *Water Science and Technology* 27(2) 69-76.
- Environment Canada, (2009). Greenhouse gas sources and sinks in Canada 1990-2007, National inventory report, Environment Canada.
- EPA (Environmental Protection Agency), (2009). Development of an Industry-Led Quality Standard for Source-Separated Biodegradable Material Derived Compost, EPA STRIVE Programme 2007-2013.
- Epstein, E., Paar, J. F., Sikora, G. B. and Wilson, G. B., (1981). The aerated method of sludge composting. in: J. Goldstein (Ed.), *Composting Theory and Practice for City, Industry and Farm*, JG Press, Emmaus, pp. 117-124.
- Epstein, E., (1997). *The science of composting*, Technomic Publishing, Lancaster, Pennsylvania, USA.
- Erhart, E. and Burian, K., (1997). Evaluating quality and suppressiveness of Austrian biowaste composts, *Compost Science and Utilization* 5(3) 15-24.
- Eriksen, G. N., Coale, F. J. and Bollero, G. A., (1999). Soil nitrogen dynamics and maize production in municipal solid waste amended soil, *Agronomy Journal* 91(6) 1009-1016.
- Esteller, M. V., Martínez-Valdés, H., Garrido, S. and Uribe, Q., (2009). Nitrate and phosphate leaching in a phaeozem soil treated with biosolids, composted biosolids and inorganic fertilizers, *Waste Management* 29(6) 1936-1944.
- EurActive, (2010). Parliament calls for EU biowaste directive. <http://www.euractiv.com/en/sustainability/parliament-calls-for-EU-biowaste-directive-news-496052>
- Eurostat, (2005). Waste generated and treated Europe (data 1995 – 2003), Luxembourg.
- Eurostat, (2008). Europe in Figures, Eurostat, Luxembourg.
- Eurostat, (2010). Europe in Figures, Eurostat, Luxembourg.
- Faithfull, N. T., (2002). *Methods in Agricultural Chemical Analysis: A Practical Handbook*, Compost quality standards and specifications, CABI Publishing, pp. 121-123.
- Fang, M. and Wong, J. W. C., (1999). Effects of lime amendment on availability of heavy metals and maturation in sewage sludge composting, *Environmental Pollution* 106 83-89.
- FAO (Food and Agriculture Organization), (1990). Energy conservation in the mechanical forest industries, United Nations Food Agricultural Organization, Rome, Italy.
- FAO (Food and Agriculture Organization), (1991). *Production yearbook*, Rome, Italy.
- FAO (Food and Agriculture Organization), (1992). *Wastewater Treatment and Use in Agriculture. Irrigation and Drainage*, Rome, Italy.
- FAO (Food and Agriculture Organization), (2001). *Production yearbook*, Rome, Italy.
- Fermor, T. R., Wood, D. A. and Lynch, J. M., (1989). Microbiological processes in compost, *International Symposium on Compost Production and Use*, San Michele All'Adige, Italy, pp. 282-300.
- Fernandes, L., Zhan, W., Patni, N. K. and Jui, P. Y., (1994). Temperature distribution and variation in passively aerated static compost piles, *Bioresource Technology* 48 257-263.
- Fernández, F. J., Sánchez-Arias, V., Rodríguez, L. and Villaseñor, J., (2010). Feasibility of composting combinations of sewage sludge, olive mill waste and winery waste in a rotary drum reactor, *Waste Management* 30 1948-1956.
- Finger, S. M., Hatch, R. T. and Regan, T. M., (1976). Aerobic microbial growth in semisolid matrices: Heat and mass transfer limitation, *Biotechnology and Bioengineering* 18(9) 1193-1218.
- Finstein, M. S. and Morris, M. L., (1975). Microbiology of municipal solid waste composting, *Advances in Applied Microbiology* 19 113-151.
- Finstein, M. S. and Miller, F. C., (1985). Principles of composting leading to maximization of decomposition rate, odor control, and cost effectiveness. in: J. K. R. Gasser (Ed.), *Composting of Agricultural and Other Wastes*, Elsevier Applied Science Publications, Barking, Essex, pp. 13-26.

- Finstein, M. S., Miller, F. C. and Strom, P. F., (1986). Waste treatment composting as a controlled system, *Biotechnology* 8 396–398.
- Fogarty, A. M. and Tuovinen, O. H., (1991). Microbiological degradation of pesticides in yard waste composting, *Microbiological Reviews* 55(2) 225-233.
- Fricke, K. and Muller, W., (1999). Stabilization of residual waste by mechanical-biological treatment and the impact on landfill, *Biological treatment of waste going to landfill*, IGW Ingenieurgesellschaft Witzenhausen Fricke & Turk GmbH, Witzenhausen.
- Fuchs, J., (2001). *Kompost im Zierpflanzenbau*, Biophyt ag, Forschungs-und Beratungsinstitut für angewandte Agronomie und Ökologie März.
- Fuentes, A., Lloréns, M., Sáez, J., Aguilar, M. I., Pérez-Marín, A. B., Ortuño, J. F. and et al., (2006). Ecotoxicity, phytotoxicity and extractability of heavy metals from different stabilised sewage sludges, *Environmental Pollution* 143(2) 355-360.
- Gajalakshmi, S. and Abbasi, S. A., (2008). Solid waste management by composting: State of the art, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 38(5) 311-400.
- García-Gómez, A., Roig, A. and Bernal, M. P., (2003). Composting of the solid fraction of olive mill wastewater with olive leaves: organic matter degradation and biological activity, *Bioresource Technology* 86 59–64.
- Garcia, C., Hernandez, T. and Costa, F., (1992). Characterization of humic acids from uncomposted and composted sewage sludge by degradative and non-degradative techniques, *Bioresource Technology* 41 53–57.
- Garcia, C., Hernandez, T., Costa, F., Ceccanti, B., Masciandaro, G. and Calcinai, M., (1993). Evaluation of the organic matter composition of raw and composted municipal wastes, *Soil Science and Plant Nutrition* 39 99–108.
- Gaur, A. C., (2000). Bulky organic manures and crop residues. in: H. L. S. Tandon (Ed.), *Fertilizers, organic manures, recyclable wastes and biofertilizers*, Fertilizer Development and Consultation Organization, New Delhi, India.
- Geoplast, (2010). Biomodulo - Biocell composting plant. <http://www.geoplast.us/>
- Germon, J. C. and Couton, Y., (1999). La dénitrification dans les sols: régulation de son fonctionnement et applications à la dépollution, *Le Courrier de l'environnement de l'INRA* 38 67–74.
- GMI (Global Methane Initiative), (2010). *Global Methane Emissions and Mitigation Opportunities*. www.globalmethane.org/documents/analysis_fs_en.pdf.
- Goldstein, N., (2009). Keeping compost, mulch in the community, *Biocycle* 50(7) 34-35.
- Golueke, C. G., (1972). "Composting" a study of process and its principles, Rodate press Emmaus, Pennsylvania.
- Golueke, C. G., (1981). Principles of biological resource recovery, *Biocycle* 22 36–40.
- Golueke, C. G., (1992). Bacteriology of composting, *Biocycle* 33 55–57.
- Gomez, A., (1998). The evaluation of compost quality, *Trends in Analytical Chemistry* 17(5) 310-314.
- Goyal, S., Dhull, S. K. and Kapoor, K. K., (2005). Chemical and biological changes during composting of different organic wastes and assessment of compost maturity, *Bioresource Technology* 96(14) 1584-1591.
- Grace Construction Products, (2011). Perlite, Grace Construction Products. www.na.graceconstruction.com/vermiculite/download/Perlite.pdf
- Grigatti, M., Ciavatta, C. and Gessa, C., (2004). Evolution of organic matter from sewage sludge and garden trimming during composting, *Bioresource Technology* 91(2) 163-169.
- Guerra-Rodríguez, E., Vázquez, M. and Díaz-Raviña, M., (2000). Co-composting of barley wastes and solid poultry manure, *Bioresource Technology* 75(3) 223-225.
- Gunning, D. F., (1994). Perlite Market Study Report, in: Crown Publications Inc. (Ed.), Gunning and McNeal Associates Ltd., pp. 2–8.
- Gutser, R., Ebertseder, T., Weber, A., Schraml, M. and Schmidhalter, U., (2005). Shortterm and residual availability of nitrogen after long-term application of organic fertilizers on arable land, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 168 439-446.
- Haeussler, S. and Kneeshaw, D., (2003). Comparing forest management to natural processes. in: Burtont et al. (Ed.), *Towards Sustainable Management of the Boreal Forest*, NRC Research Press, Ottawa, pp. 307–368.
- Hamelers, H. V. M., (2004). Modeling composting kinetics: A review of approaches, *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* 3(4) 331-342.

- Hams, S. and Becker, G., (1999). State of the Art of Source Separation, Collection and Treatment of Organic Waste in Germany, R'99 Congress, Geneva.
- Hansen, R. C., Keener, H. M. and Hoitink, H. A. J., (1989). Poultry manure composting: an exploratory study, *Transactions of the ASAE* 36 2151–2157.
- Hargreaves, J. C., Adl, M. S. and Warman, P. R., (2008). A review of the use of composted municipal solid waste in agriculture, *Agriculture Ecosystems and Environment* 123(1-3) 1-14.
- Hassen, A., Belguith, K., Jedidi, A., Cherif, A., Cherif, M. and Boudabous, A., (2001). Microbial characterization during composting of municipal solid waste, *Bioresource Technology* 80 217-225.
- Haug, R. T., (1980). *Compost Engineering, Principles and Practice I*, Ann Arbor Science Publishers Inc/The Butterworth Group, Ann Arbor, Michigan.
- Haug, R. T., (1993). *The Practical Handbook of Compost Engineering*, Lewis Publishers, Boca Raton, Fla.
- He, Y. W., Inamori, Y., Mizuochi, M., Kong, H. N., Iwami, N. and Sun, T. H., (2000). Measurements of N₂O and CH₄ from the aerated composting of food waste, *Science of the Total Environment* 254(1) 65–74.
- Hellmann, B., Zelles, L., Palojarvi, A. and Bai, Q., (1997). Emission of climate-relevant trace gases and succession of microbial communities during open-windrow composting, *Applied and Environmental Microbiology* 63 1011–1018.
- Henry, C., Sullivan, D., Rynk, R., Dorsey, K. and Cogger, C., (1999). Managing N from Biosolids, Washington State Department of Ecology. <http://faculty.washington.edu/clh/nmanual/>.
- Hergert, G. W., (2011). Sugar beet fertilization, Sugar Tech in Press.
- Hernández, T., Costa, F., Lax, A., Cegarra, J., Roig, A. and Moreno, J. I., (1988). Transformations of carbon and nitrogen in a calciorthid soil amended with a range of organic residues, *Plant and Soil* 105(2) 205-212.
- Hernández, T., Masciandaro, G., Moreno, J. I. and García, C., (2006). Changes in organic matter composition during composting of two digested sewage sludges, *Waste Management* 26(12) 1370-1376.
- Herrera, F., Castillo, J. E., Chica, A. F. and López Bellido, L., (2008). Use of municipal solid waste compost (MSWC) as a growing medium in the nursery production of tomato plants, *Bioresource Technology* 99(2) 287-296.
- Higgins, C. and Walker, L., (2001). Validation of a new model for aerobic organic solids decomposition: simulations with substrate specific kinetics, *Process Biochemistry* 36(8-9) 875–884.
- Hoekstra, N. J., Bosker, T. and Lantinga, E. A., (2002). Effects of cattle dung from farms with different feeding strategies on germination and initial root growth of cress (*Lepidium sativum* L.), *Agriculture Ecosystems and Environment* 93 189-196.
- Hogg, D., Barth, J. and Faviono, E., (2002). Comparison of Compost Standards within the EU, North America, and Australasia, The Waste and Resources Action Programme, Banbury, Oxon, UK.
- Hogg, D., Lister, D., Barth, J., Faviono, E. and Amlinger, F., (2009). Frameworks for use of compost in agriculture in Europe, Eunomia Research and Consulting.
- Hoitink, H. A. J. and Kuter, S. A., (1986). Effects of composts in growth media on soilborne pathogens. in: Y. Chen and Y. Avnimelech (Eds.), *The Role of Organic Matter in Modern Agriculture*, Martinus Nijhoff, Dordrecht, The Netherlands, pp. 289–306.
- Hoitink, H. A. J. and Boehm, M. J., (1999). Biocontrol within the context of soil microbial communities: a substrate-dependent phenomenon, *Annual Reviews of Phytopathology* 37 427–446.
- Hong, J. H. and Park, K. J., (2005). Compost biofiltration of ammonia gas from bin composting, *Bioresource Technology* 96 741-745.
- Huang, G. F., Wong, J. W. C., Wu, Q. T. and Nagar, B. B., (2004). Effect of C/N on composting of pig manure with sawdust, *Waste Management and Research* 24 805–813.
- Hwang, S. and Hanaki, K., (2000). Effects of oxygen concentration and moisture content of refuse on nitrification, denitrification and nitrous oxide production, *Bioresource Technology* 71 159–165.
- Iannotti, D. A., Pang, T., Toth, B. L., Elwell, D. L., Keener, H. M. and Hoitink, H. A. J., (1993). A quantitative respirometric method for monitoring compost stability, *Compost Science and Utilization* 1 52–65.
- Ibrahim, M., Hassan, A., Iqbal, M. and Valeem, E. E., (2008). Response of wheat growth and yield to various levels of compost and organic manure, *Pakistan Journal of Botany* 40(5) 2135-2141.
- Iglesias-Jimenez, E. and Alvarez, C. E., (1993). Apparent availability of nitrogen in composted municipal refuse, *Biology and Fertility of Soils* 16 313-318.

- Iglesias Jiménez, E. and Perez Garcia, V., (1989). Evaluation of city refuse compost maturity: A review, *Biological Wastes* 27(2) 115-142.
- Imbeah, M., (1997). Composting piggery waste: A review, *Bioresource Technology* 63 197-203.
- Ingelmo, F., Canet, R., Ibañez, M. A., Pomares, F. and García, J., (1998). Use of MSW compost, dried sewage sludge and other wastes as partial substitutes for peat and soil, *Bioresource Technology* 63(2) 123-129.
- Inglezakis, V. J., Stylianou, M. and Loizidou, M., (2010). Ion exchange and adsorption equilibrium studies on clinoptilolite, bentonite and vermiculite, *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 71 279–284.
- Insam, H. and de Bertoldi, M., (2007). Microbiology of the composting process. in: L. F. Diaz, M. de Bertoldi, W. Bidlingmaier and E. Stentiford (Eds.), *Compost Science and Technology*, Elsevier, Amsterdam, pp. 25–49.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), (2006). Guidelines for national greenhouse gas inventories. in: S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara and K. Tanabe (Eds.), IGES, Japan.
- Ipek, U., Obek, E., Akca, L., Arslan, E. I., Hasar, H., Dogru, M. and Baykara, O., (2002). Determination of degradation of radioactivity and its kinetics in aerobic composting, *Bioresource Technology* 84 283–286.
- Iranzo, M., Canizares, J. V., Roca-Perez, L., Sainz-Pardo, I., Mormeneo, S. and Boluda, R., (2004). Characteristics of rice straw and sewage sludge as composting materials in Valencia (Spain), *Bioresource Technology* 95 107–112.
- Ishaque, M. and Chahal, D. S., (1991). Crop Residues. in: D. S. Chahal (Ed.), *Food, Feed and Fuel from Biomass*, p. 15.
- IWMI (International Water Management Institution), (2003). Co-composting of faecal sludge and municipal organic waste - A Literature and State-of-Knowledge Review. http://www.eawag.ch/forschung/sandec/publikationen/ewm/dl/cocomp_review.pdf.
- Iyengar, S. R. and Bhawe, P. P., (2006). In-vessel composting of household wastes, *Waste Management and Research* 26(10) 1070-1080.
- JCS (Juniper Consultancy Services), (2005). Mechanical–Biological-Treatment: A Guide for Decision Makers/Processes, Policies and Markets. http://www.juniper.co.uk/Publications/mbt_report.html.
- Jeong, Y. K. and Kim, J. S., (2001). A new method for conservation of nitrogen in aerobic composting processes, *Bioresource Technology* 79 129–133.
- Jeris, J. S. and Regan, R. W., (1973a). Controlling environmental parameters for optimum composting I: experimental procedures and temperature, *Compost Science* 14(1) 10–15.
- Jeris, J. S. and Regan, R. W., (1973b). Controlling environmental parameters for optimum composting II: moisture, free air space and recycle, *Compost Science* 14(2) 8–15.
- Jimenez, E. I. and Garcia, V. P., (1992). Determination of maturity indices for city refuse composts, *Agriculture Ecosystems and Environment* 38 331–343.
- Jouraihy, A., Amir, S., El Gharous, M., Revel, J. C. and Hafidi, M., (2005). Chemical and spectroscopic analysis of organic matter transformation during composting of sewage sludge and green plant waste, *International Biodeterioration & Biodegradation* 56 101–108.
- Kalamdhad, A. S. and Kazmi, A. A., (2009). Rotary drum composting of different organic waste mixtures, *Waste Management and Research* 27 129–137.
- Kalamdhad, A. S., Singh, Y. K., Ali, M., Khwairakpam, M. and Kazmi, A. A., (2009). Rotary drum composting of vegetable waste and tree leaves, *Bioresource Technology* 100(24) 6442–6450.
- Kapetanios, E. G., Loizidou, M. and Valkanas, G., (1993). Compost production from Greek Domestic Refuse, *Bioresource Technology* 44 13-16.
- Kaplan, D. L. and Kaplan, A. M., (1982). Thermophilic transformations of 2,4,6-trinitrotoluene under simulated composting conditions, *Applied and Environmental Microbiology* 44 757–760.
- Keener, H. M., Marugg, C., Hansen, R. C. and Hoitink, H. A. J., (1993). Optimising the efficiency of the composting process. in: H. A. J. Hoitink and H. M. Keener (Eds.), *Science and Engineering of Composting: Design, Environmental and Microbial and Utilisation Aspects*, Renaissance Publications, Worthington, USA, pp. 59–94.
- Khanal, S. K., (2008). *Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production. Principles and Applications*, John Wiley & Sons, USA.
- Kim, S. and Dale, B. E., (2004). Global potential bioethanol production from wasted crops and crop residues, *Biomass and Bioenergy* 26 361–375.

- Kirchmann, H. and Witter, E., (1989). Ammonia volatilization during aerobic and anaerobic manure decomposition, *Plant and Soil* 115(1) 35-41.
- Kirchmann, H. and Widen, P., (1994). Separately collected organic household wastes chemical composition and composting characteristics, *Swedish Journal of Agricultural Research* 24 3–12.
- Kithome, M., Paul, J. and Bomke, A., (1999). Reducing nitrogen losses during simulated composting of poultry manure using adsorbents or chemical amendments, *Journal of Environmental Quality* 28(1) 194–201.
- Knowlton, D. and White, T., (1981). Thermal Study of types of water associated with clinoptilolite, *Clays and Clay Minerals* 29 403-411.
- Ko, H. J., Kim, K. Y., Kim, H. T., Kim, C. N. and Umeda, M., (2008). Evaluation of maturity parameters and heavy metal contents in composts made from animal manure, *Waste Management and Research* 28(5) 813-820.
- Kokkora, M. I., (2008). Biowaste and vegetable waste compost application to agriculture, School of Applied Sciences, Ph.D., Cranfield University National Soil Resource Institute, UK.
- Komilis, D. P. and Ham, R. K., (2000). Laboratory method to investigate gaseous emissions and solids decomposition during composting of municipal solid wastes, *Compost Science and Utilization* 8(3) 254-265.
- Komilis, D. P. and Tziouvaras, I. S., (2009). A statistical analysis to assess the maturity and stability of six composts, *Waste Management* 29(5) 1504-1513.
- Koné, D., Cofie, O., Zurbrügg, C., Gallizzi, K., Moser, D., Drescher, S. and Strauss, M., (2007). Helminth eggs inactivation efficiency by faecal sludge dewatering and co-composting in tropical climates, *Water Research* 41 4397–4402.
- Körner & Stegmann, R., (2002). N-dynamics during composting - overview and experimental results. in: H. Insam, N. Riddech and S. Klammer (Eds.), *Microbiology of composting*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 143-154.
- Kosobucki, P., Kruk, M. and Buszewski, B., (2008). Immobilization of selected heavy metals in sewage sludge by natural zeolites, *Bioresource Technology* 99 5972–5976.
- Kostov, O., Rankov, V., Atanacova, G. and Lynch, J. M., (1991). Decomposition of sawdust and bark treated with cellulose-decomposing microorganisms, *Biology and Fertility of Soils* 11 105–110.
- Kouloumbis, P., Rigas, F. and Mavridou, A., (2000). Environmental problems from the disposal of sewage sludge in Greece, *International Journal of Environmental Health Research* 10(1) 77-83.
- Kowalczyk, P., Sprynskyy, M., Terzyk, A. P., Lebedynets, M., Namieśnik, J. and Buszewski, B. (2006). Porous structure of natural and modified clinoptilolites, *J. Colloid Interface Sci.* 297, 77-85.
- Kristoferson, L. A. and V., B., (1991). *Renewable Energy Technologies: Their Application in Developing Countries*, IT Publications, London.
- Krogmann, U. and Woyczehowski, H., (2000). Selected characteristics of leachate, condensate and runoff released during composting of biogenic waste, *Waste Management and Research* 18(3) 235-248.
- Kuchenrither, R. D., Martin, W. J., Smith, D. G. and Williams, D. W., (1985). Design and operation of an aerated windrow composting facility, *Journal of the Water Pollution Control Federation* 57(3 I) 213-219.
- Kulcu, R. and Yaldiz, O., (2004). Determination of aeration rate and kinetics of composting some agricultural wastes, *Bioresource Technology* 93(1) 49-57.
- Kumar, M., Ou, Y. and Lin, J., (2010). Co-composting of green waste and food waste at low C/N ratio, *Waste Management and Research* 30(4) 602-609.
- Lakhdar, A., Rabhi, M., Ghnaya, T., Montemurro, F., Jedidi, N. and Abdelly, C., (2009). Effectiveness of compost use in salt-affected soil, *Journal of Hazardous Materials* 171(1-3) 29-37.
- Lal, R., (1995). The role of residue management in sustainable agricultural systems, *Journal of Sustainable Agriculture* 5 51– 78.
- Lal, R., (2005). World crop residues production and implications of its use as a biofuel, *Environment International* 31(4) 575–584.
- Lal, R., (2008). Crop residues as soil amendments and feedstock for bioethanol production, *Waste Management* 28(4) 747–758.
- Langella, A., Pansini, M., Cappelletti, P., De Gennaro, B., De'Gennaro, M., and Colella, C. (2000). NH_4^+ , Cu_2^+ , Zn_2^+ , Cd_2^+ and Pb_2^+ exchange for Na^+ in a sedimentary clinoptilolite, North Sardinia, Italy. *Microporous and Mesoporous Materials* 37(3) 337-343.

- Larson, W. E., Swan, J. B. and Pierce, F. J., (1982). Agronomic implications of using crop residues for energy, in: W. Lockertz (Ed.), *Agriculture as a producer and consumer of energy*. AAAS Selected Symposium, vol. 78, pp. 91–122.
- Lasaridi, K., Protopapa, I., Kotsou, M., Pilidis, G., Manios, T. and Kyriakou, A., (2006). Quality assessment of composts in the Greek market: the need for standards and quality assurance, *Journal of Environmental Management* 80 58–65.
- Lawrence, J. S., (1996). Effect of composts-fertilizer on crop growth. in: M. de Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmes and T. Papi (Eds.), *The Science of Composting, Part 1*, first ed. Blackie Academic and Professional, an imprint of Chapman and Hall, Wester Cleddens Road, Bishopbriggs, Glasgow G64 2NZ, pp. 423–443.
- Leth, M., Jensen, H. and Iversen, J., (2001). Influence of different nitrogen sources on composting of *Miscanthus* in open & closed systems, *Compost Science and Utilisation* 9(3) 197–205.
- Levi-Minzi, R., Riffaldi, R. and Saviozzi, A., (1986). Organic matter and nutrients in fresh and mature farmyard manure, *Agricultural Wastes* 16 225–236.
- Levy, J. S. and Taylor, B. R., (2003). Effects of pulp mill solids and three composts on early growth of tomatoes, *Bioresource Technology* 89 297–305.
- Li, G., Zhang, F., Sun, Y., Wong, J. W. C. and Fang, M., (2001). Chemical evaluation of sewage sludge composting as a mature indicator for composting process, *Water, Air, and Soil Pollution* 132(3-4) 333-345.
- Liang, C., Das, K. C. and McClendon, R. W., (2003). The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend, *Bioresource Technology* 86(2) 131-137.
- Liang, Y., Quan, X., Chen, J., Chung, J. S., Sung, J. Y., Chen, S., Xue, D. and Zhao, Y., (2000). Long-term results of ammonia removal and transformation by biofiltration, *Journal of Hazardous Materials* 80 259–269.
- Liang, Y., Leonard, J. J., Feddes, J. J. R. and McGill, W. B., (2006). Influence of carbon and buffer amendment on ammonia volatilization in composting, *Bioresource Technology* 97 748–761.
- Linzner, R. and Wassermann, G., (2006). Factors constraining and promoting the implementation of small-scale composting in West African countries, ORBIT conference, *Biological Waste Management From Local to Global*, Weimar, Germany.
- Liu, C. H. and Lo, K. V., (2001). Ammonia removal from composting leachate using zeolite. I. Characterization of the zeolite, *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering* 36 1671–1688.
- Lopez-Real, J. and Foster, M., (1985). Plant pathogens survival during composting of agricultural organic wastes. in: J. K. R. Gasser (Ed.), *Composting of Agricultural and Other Wastes*, Elsevier Applied Science, London, pp. 291–299.
- Lu, Y., Wu, X. and Guo, J., (2009). Characteristics of municipal solid waste and sewage sludge co-composting, *Waste Management* 29(3) 1152-1157.
- Luo, L., Itoh, S., Zhang, Q., Yang, S., Zhang, Q. and Yang, Z., (2010). Leaching behavior of nitrogen in a long-term experiment on rice under different N management systems, *Environmental Monitoring and Assessment* 1-10.
- MacGregor, S. T., Miller, F. C., Psarianos, K. M. and Finstein, M. S., (1981). Composting process control based on interaction between microbial heat output and temperature, *Applied and Environmental Microbiology* 41 1321–1330.
- Mahajan, K. C. and Mishra, J., (1992). Energy from Paddy Husk - An Overview, *Energy Management* 5-14.
- Mahimairaja, S., Bolan, N. S., Hedley, M. J. and Macgregor, A. N., (1994). Losses and transformation of nitrogen during composting of poultry manure with different amendments: an incubation experiment, *Bioresource Technology* 47 265-273.
- Mahimairaja, S., Bolan, N. S. and Hedley, M. J., (1995). Denitrification losses of N from fresh and composted manures, *Soil Biology and Biochemistry* 27(9) 1223–1225.
- Malamis, S. A., (2009). *Biological Wastewater Treatment with the Use of Membranes*, Civil Engineering, Ph.D, National Technical University of Athens, Athens, Greece.
- Mande, S., (2005). Biomass gasifier-based power plants: potential, problems, and research needs for decentralized rural electrification. in: B. Lal and M. R. V. P. Reddy (Eds.), *Wealth from Waste: Trends and Technologies*, New Delhi.
- Manios, T., (2004). The composting potential of different organic solid wastes: Experience from the island of Crete, *Environment International* 29(8) 1079-1089.

- Manios, V. I. and Verdonck, A., (1985). Decomposition of vine-canes in heap and evaluation of the produced compost, *Acta Horticulturae* 172 39–46.
- Marche, T., Schnitzer, M., Dinel, H., Pare, T., Champagne, P. and Schulten, H. R. F., G., (2003). Chemical changes during composting of a paper mill sludge-hardwood sawdust mixture, *Geoderma* 116 345–356.
- Margesin, R., Cimadam, J. and Schinner, F., (2006). Biological activity during composting of sewage sludge at low temperatures, *International Biodeterioration and Biodegradation* 57(2) 88-92.
- Martins, O. and Dewes, T., (1992). Loss of nitrogenous compounds during composting of animal wastes, *Bioresource Technology* 42 103-111.
- Mason, I. G., (2007). A study of power, kinetics, and modelling in the composting process, vol. Ph.D. Thesis, University of Canterbury, Christchurch.
- Mason, I. G., (2008a). An evaluation of substrate degradation patterns in the composting process. Part 1: profiles at constant temperature, *Waste Management* 28(9) 1598–1608.
- Mason, I. G., (2008b). An evaluation of substrate degradation patterns in the composting process. Part 2: temperature-corrected profiles, *Waste Management* 28(10) 1751–1765.
- Massaquoi, J. G. M., (1990). Agricultural residues as Energy Source. in: M. R. Bhagvan and S. Karekezi (Eds.), *Energy for Rural Development*.
- Mathur, S. P., (1991). *Bioconversion of Waste Materials to Industrial Products*, Elsevier Science, London.
- Mathur, S. P., (1991). Composting process. in: A. M. Martin (Ed.), *Bioconversion of waste materials to industrial products*, Elsevier, London, pp. 147–183.
- Mathur, S. P., Owen, G., Dinel, H. and Schnitzer, M., (1993). Determination of compost biomaturity. Literature review, *Biological Agriculture and Horticulture* 10 65–85.
- McConnell, D. D., Shiralipour, A. and Smith, W. H., (1993). Compost application improves soil properties, *Biocycle* 34 61–63.
- Mckeever, D. B., (1995). Resources potential of wood based wastes in the United States, 2nd Biomass Conference of the Americas, and Industry, Portland, OR. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, pp. 77-87.
- McKinley, V. L. and Vestal, J. R., (1984). Biokinetic analysis of adaptation and succession: microbial activity in composting municipal sewage sludge, *Applied and Environmental Microbiology* 47 933–941.
- McKinley, V. L., Vestal, J. R. and Eralp, A. E., (1986). Microbial activity in composting. The biocycle guide to in-vessel composting, JG Press Inc., Emmaus, Pennsylvania, pp. 171–181.
- Mena, E., Garrido, A., Hernández, T. and García, C., (2003). Bioremediation of sewage sludge by composting, *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 34(7-8) 957-971.
- Metcalf and Eddy, (2003). *Wastewater Engineering Treatment, Disposal and Reuse*, 4th edition ed., McGraw-Hill, London; NewYork.
- Miller, E. C., (1991). Biodegradation of solid wastes by composting. in: A. M. Martin (Ed.), *Biological Degradation of Wastes*, Elsevier Applied Science, London, pp. 1-30.
- Miller, F. C., (1992). Composting as a process based on the control of ecologically selective factors. in: F. Blaine-Metting (Ed.), *Soil Microbial Ecology: Applications in Agriculture Environment Management*, Marcel Dekker Inc., New York, p. 646.
- Mills, H. A. and Jones, J. B., (1996). *Plant analysis handbook II*, Micromacro Publishing Inc., Athens, USA.
- Misra, R. V., Roy, R. N. and Hiraoka, H., (2003). On-farm composting methods. Land and Water Discussion Paper 2, Food and Agriculture Organization of The United Nations, Rome.
- Mladenovic, A., Suput, J. S., Ducman, V. and Skapin, A. S., (2004). Alkali-silica reactivity of some frequently used lightweight aggregates, *Cement and Concrete Research* 34(10) 1809–1816.
- Moghtaderi, B., Sheng, C. and Wall, T. F., (2006). An overview of the Australian biomass resources and utilization technologies, *Bioresource Technology* 1(1) 93–115.
- Mohee, R., White, R. and Das, K., (1998). Simulation model for composting cellulosic (bagasse) substrates, *Compost Science and Utilization* 6(2) 82–92.
- Mor, S., De Visscher, A., Ravindra, K., Dahiya, R. P., Chandra, A. and Van Cleemput, O., (2006). Induction of enhanced methane oxidation in compost: Temperature and moisture response, *Waste Management* 26(4) 381-388.
- Morisaki, N., Phae, C. G., Nakasaki, K., Shoda, M. and Kubota, H., (1989). Nitrogen transformation during thermophilic composting, *Journal of Fermentation and Bioengineering* 67 57–61.

- Mosher, D. and Anderson, R. K., (1977). Composting sewage sludge by high-rate suction aeration techniques—the process as conducted at Bangor, ME, and some guidelines of general applicability, in: US Government Printing Office (Ed.), Washington, DC.
- Mulkey, S., Alavalapati, J., Hodges A and Wilkie, A., (2008). Opportunities for Greenhouse Gas Reduction Through Forestry and Agriculture in Florida, University of Florida, School of Natural Resources and Environment. .
- Mumpton, F. A., (1999). La roca mágica: uses of natural zeolites in agricultural and industry, Proceedings of the National Academy of Sciences USA 96 3463–3470.
- Mustin, M., (1987). *Le Compost Gestion de la Matière Organique*, Paris.
- Nahm, K. H., (2005). Factors influencing nitrogen mineralization during poultry litter composting and calculations for available nitrogen, *World's Poultry Science Journal* 61(2) 238-255.
- Nakasaki, K., Sasaki, Y., Shoda, M. and Kubota, H., (1985). Change in microbial numbers during thermophilic composting of sewage sludge with reference to CO₂ evolution rate, *Applied and Environmental Microbiology* 49 37–41.
- Nakasaki, K., Yaguchi, H., Sasaki, M. and Kubota, H., (1993). Effects of pH control on composting of garbage, *Waste Management and Research* 11 117–125.
- Navarro, A. F., Cegarra, J., Roig, A. and Garcia, D., (1993). Relationships between organic matter and carbon contents of organic wastes, *Bioresource Technology* 44 203–207.
- Nevens, F. and Reheul, D., (2003). The application of vegetable, fruit and garden waste (VFG) compost in addition to cattle slurry in a silage maize monoculture: Nitrogen availability and use, *European Journal of Agronomy* 19(2) 189-203.
- Nicolai, R. E. and Janni, K. A., (2001). Biofilter media mixture ratio of wood chips and compost treating swine odors, *Water Science and Technology* 44 261–267.
- Nikolaou, A., Remrova, M. and Jeliakov, I., (2003). A report of the project—Lot 5: Bioenergy's role in the EU Energy Market, Biomass availability in Europe.
- Nova Scotia, (2008). Environment Compost Maturity Study, Nova Scotia, <http://www.gov.ns.ca/nse/waste/docs/Compost.Maturity.Study.Report.pdf>.
- O'Leary, P. R. and Walsh, P. W., (1995). Decision Maker's Guide to Solid Waste Management, USEPA. <http://www.bvsde.paho.org/bvsars/i/fulltext/decision/decision.pdf>.
- Österreichische bundesregierung, (2001). Kompostverordnung 2001 BGB1, Österreichische bundesregierung Vienna Austria, II Nr. 292/2001.
- Pagans, E., Barrena, R., Font, X. and Sanchez, A., (2006). Ammonia emissions from the composting of different organic wastes. Dependency on process temperature, *Chemosphere* 62 1534–1542.
- Pagans, E. L., Font, X. and Sánchez, A., (2005). Biofiltration for ammonia removal from composting exhaust gases, *Chemical Engineering Journal* 113(2-3) 105-110.
- Pare, T., Dinel, H., Schnitzer, M. and Dumontet, S., (1998). Transformations of carbon and nitrogen during composting of animal manure and shredded paper, *Biology and Fertility of Soils* 26 173–178.
- Paredes, C., Bernal, M. P., Cegarra, J., Roig, A. and Navarro, A. F., (1996a). Nitrogen transformation during the composting of different organic wastes. in: O. Van Cleemput, G. Vermoesen and A. Hofman (Eds.), *Progress in Nitrogen Cycling Studies*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 121–125.
- Paredes, C., Bernal, M. P., Roig, A., Cegarra, J. and Saanchez-Monedero, M. A., (1996b). Influence of the bulking agent on the degradation of olive-mill wastewater and sludge during composting, *International Biodeterioration and Biodegradation* 38 205–210.
- Paredes, C., Roig, A., Bernal, M. P., Saanchez-Monedero, M. A. and Cegarra, J., (2000). Evolution of organic matter and nitrogen during co-composting of olive mill wastewater with solid organic wastes, *Biology and Fertility of Soils* 32 222–227.
- Paredes, C., Bernal, M. P., Roig, A. and Cegarra, J., (2001). Effects of olive mill wastewater addition in composting of agroindustrial and urban wastes, *Biodegradation* 12 225–234.
- Paredes, C., Bernal, M. P., Cegarra, J. and Roig, A., (2002). Bio-degradation of olive mill wastewater sludge by its co-composting with agricultural wastes, *Bioresource Technology* 85(1) 1-8.
- Parkinson, R., Gibbs, P., Burchett, S. and Misselbrook, T., (2004). Effect of turning regime and seasonal weather conditions on nitrogen and phosphorus losses during aerobic composting of cattle manure, *Bioresource Technology* 91(1) 171–178.

- Pascual, I., Azcona, I., Morales, F., Aguirreolea, J. and Sánchez-Díaz, M., (2009). Growth, yield and physiology of verticillium-inoculated pepper plants treated with ATAD and composted sewage sludge, *Plant and Soil* 319(1-2) 291-306.
- Pascual, I., Azcona, I., Aguirreolea, J., Morales, F., Corpas, F. J., Palma, J. M. and et al, (2010). Growth, yield, and fruit quality of pepper plants amended with two sanitized sewage sludges, *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 58(11) 6951-6959.
- Pascual, J. A., Ayuso, M., Garcia, C. and Hernandez, T., (1997). Characterization of urban wastes according to fertility and phytotoxicity parameters, *Waste Management and Research* 15 103–115.
- Pavlostathis, S. G. and Giraldo-Gomez, E., (1991). Kinetics of anaerobic treatment: A critical review, *Critical Reviews in Environmental Control* 21(5-6) 411-490.
- Peigné, J. and Girardin, P., (2004). Environmental impacts of farm-scale composting practices, *Water, Air, and Soil Pollut.* 153(1-4) 45-68.
- Pereira-Neto, J. T., Stentiford, E. I. and Mara, D. D., (1987). Low cost controlled composting of refuse and sewage sludge, *Water Science and Technology* 19 839–845.
- Perlite Canada Inc, (1993). Perlite Industrial Applications, Perlite Canada Inc.
http://www.perlitecanada.com/en/1-perlite/perlite_propriete.html
- Perlite Institute, (2000). Basic facts about perlite, Perlite Institute.
<http://www.perlite.net/redco/indexh.htm>.
- Philippoussis, A. N., (2009). Production of Mushrooms Using Agro-Industrial Residues as Substrates. in: P. S. Nigam and A. Pandey (Eds.), *Biotechnology for Agro-Industrial Residues Utilisation*, Springer, pp. 163–196.
- Pichtel, J., (2005). *Waste Management Practices: Municipal, Hazardous and Industrial*, CRC Press, Boca Raton.
- Poincelot, R. P., (1974). A scientific examination of the principles and practice of composting, *Compost Science* 15(3) 24-31.
- Poincelot, R. P., (1977). The biochemistry of composting, *Proc. National Conference on Composting of Municipal Residues and Sludges*, Information Transfer, Inc., Rockville, MD, p. 33.
- Qiao, L. and Ho, G., (1997). The effects of clay amendment on composting of digested sludge, *Water Research* 31(5) 1056-1064.
- Qu, Y., Zhu, M. and K., L., (2006). Studies on cellulosic ethanol production for sustainable supply of liquid fuel in China, *Biotechnology Journal* 1 1235–1240.
- Ranalli, G., Bottura, G., Taddei, P., Garavani, M., Marchetti, R. and Sorlini, C., (2001). Composting of solid and sludge residues from agricultural and food industries, bioindicators of monitoring and compost maturity, *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering* 36(4) 415-436.
- Rao Bhamidimarri, S. M. and Pandey, S. P., (1996). Aerobic thermophilic composting of piggery solid wastes, *Water Science and Technology* 33(8) 89–94.
- Ratkowsky, D. A., Lowry, R. K., McMeekin, T. A., Stokes, A. N. and Chandler, R. E., (1983). Model for bacterial culture and growth rate throughout the entire biokinetic temperature range, *Journal of Bacteriology* 154 1222–1226.
- Raviv, M., (2005). Production of high-quality composts for horticultural purposes: A mini-review, *HortTechnology* 15(1) 52-57.
- Reddy, K. R., Kaleel, R., Overcash, M. R. and Westerman, P. W., (1979). A nonpoint source model for land areas receiving animal wastes: Ammonia volatilization, *Transactions of the ASAE* 22 1398–1405.
- Richard, T. L., (1997). The kinetics of solid-state aerobic biodegradation, Ph.D, Cornell University.
- Richard, T. L. and Walker, L. P., (1998). Temperature kinetics of aerobic solid state biodegradation, *Proceedings of the Institute of Biological Engineering* 1 A22–A39.
- Richard, T. L. and Walker, L. P., (1999). Oxygen and temperature kinetics of aerobic solid-state biodegradation, in: W. Bidlingmaier, M. de Bertoldi, L. F. Diaz and E. K. Papadimitriou (Eds.), *ORBIT conference, Biological Treatment of Waste and the Environment*, Rhombos Verlag, Berlin, Weimar, Germany, pp. 85–91.
- Richard, T. L., Hamelers, H. V. M. B., Veeken, A. and Silva, T., (2002). Moisture relationships in composting processes, *Compost Science and Utilization* 10(4) 286-302.
- Richard, T. L. and Walker, L. P., (2006). Modeling the temperature kinetics of aerobic solid-state biodegradation, *Biotechnology Progress* 22(1) 70-77.

- Riffaldi, R., Levi-Minzi, R., Pera, A. and de Bertoldi, M., (1986). Evaluation of compost maturity by means of chemical and microbial analyses, *Waste Management and Research* 4 387–396.
- Riggle, D., (1989). Revival Time for Composting Food Industry Wastes, *Biocycle* 29(5) 35-37.
- Rivas, F. J., Beltrán, F., Carvalho, F., Acedo, B. and Gimeno, O., (2004). Stabilized leachates: Sequential coagulation-flocculation + chemical oxidation process, *Journal of Hazardous Materials* 116(1-2) 95-102.
- Roca-Pérez, L., Arévalo, J. and Boluda, R., (2005). The influence of C/N ratio moisture and pH on the aerobic microbial activity of rice straw and sewage sludge blends. in: M. P. Bernal, R. Moral, R. Clemente and C. Paredes (Eds.), *Sustainable Organic Waste Management for Environmental Protection and Food Safety*, FAO-CSIC, Murcia, pp. 247–249.
- Roca-Pérez, L., Martínez, C., Marcilla, P. and Boluda, R., (2009). Composting rice straw with sewage sludge and compost effects on the soil-plant system, *Chemosphere* 75(6) 781-787.
- Roletto, E., Barberis, R., Consignlid, M. and Jodice, R., (1985). Chemical parameters for evaluation compost maturity, *Biocycle* 46-48.
- Rosso, L., Lobry, J. R. and Flandrois, J. P., (1993). An unexpected correlation between cardinal temperatures of microbial growth highlighted by a new model, *Journal of Theoretical Biology* 162(4) 447-463.
- Ryan, P. and Openshaw, K., (1991). *Assessment of Biomass Energy Resources: A Discussion on it's Needs and Methodology*, World Bank.
- Rynk, R., van de Kamp, M., Willson, G. B., Singley, M. E., Richard, T. L., Kolega, J. L., Gouin, F. R., Laliberty Jr, L., Kay, D., Murphy, D. W., Hoitink, H. A. J. and Brinton, W. F., (1992). *On-farm composting handbook*, Natural Resource, Agriculture and Engineering Service, Cornell University, Ithaca, NY.
- Sæbø, A. and Ferrini, F., (2006). The use of compost in urban green areas - A review for practical application, *Urban Forestry and Urban Greening* 4(3-4) 159-169.
- Said-Pullicino, D., Erriquens, F. G. and Gigliotti, G., (2007). Changes in the chemical characteristics of water-extractable organic matter during composting and their influence on compost stability and maturity, *Bioresource Technology* 98 1822- 1831.
- Sanchez-Monedero, M. A., Roig, A., Parades, C. and Bernal, M. P., (2001). Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effect on pH, EC and maturity of the composting mixtures, *Bioresource Technology* 78 301–308.
- Sánchez -Monedero, M. A., Mondini, C., de Nobili, M., Leita, L. and Roig, A., (2004). Land application of biosolids. Soil response to different stabilization degree of the treated organic matter, *Waste Management* 24 325–332.
- Sastre, I., Vicente, M. and Lobo, M., (1996). Influence of the application of sewage sludge on soil microbial activity, *Bioresource Technology* 57 19–23.
- Saviozsi, A., Levi-Minzi, R. and Riffaldi, R., (1988). Maturity evaluating of organic waste, *Biocycle* 54–58.
- Scarlat, N., Martinov, M. and Dellemand, J. F., (2010). Assessment of the availability of agricultural crop residues in the European Union Potential and limitations for bioenergy use, *Waste Management and Research* 30 1889-1897.
- Schaub, S. M. and Leonard, J. J., (1996). Composting: An alternative waste management option for food processing industries, *Trends in Food Science and Technology* 7(8) 263-268.
- Schroeder, D., (1984). *Soils: Facts and Concepts*, Bern, Switzerland.
- Schulze, K. L., (1961). Relationship between moisture content and activity of finished compost, *Compost Science* 2(2) 32–34.
- Schulze, K. L., (1962). Continuous thermophilic composting, *Applied Microbiology* 10 108–122.
- Seo, J. Y., Heo, J. S., Kim, T. H., Joo, W. H. and Crohn, D. M., (2004). Effect of vermiculite addition on compost produced from korean food wastes, *Waste Management and Research* 24(10) 981-987.
- Shammas, N. K. and Wang, L. K., (2007). Biosolids composting. in: L. K. Wang, N. K. Shammas and Y. T. Hung (Eds.), *Handbook of Environmental Engineering: Biosolids Treatment Process*, vol. 6, Humana Press, pp. 645–685.
- Shammas, N. K. and Wang, L. K., (2009). Biosolids composting. in: L. K. Wang, N. C. Pereira, Y. T. Hung and N. K. Shammas (Eds.), *Handbook of Environmental Engineering: Biosolids Treatment Process*, vol. 8, Humana Press, pp. 669–714.
- Sharma, V. K., Canditelli, M., Fortuna, F. and Cornacchia, G., (1997). Processing of urban and agro-industrial residues by aerobic composting: Review, *Energy Conversion and Management* 38 453–478.

- Shaw, C. M. and Stentiford, E. I., (1996). Heat Transfer in Composting Systems. in: M. de Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmes and T. Papi (Eds.), *Proceedings of the Science of Composting*, vol. 2, Blackie Academic & Professional, Glasgow, pp. 1331–1334.
- Sibbesen, E. and Lind, A. M., (1993). Loss of nitrous oxide from animal manure in dungheaps, *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B, Soil and Plant Science* 43 16-20.
- Sikora, L. J., Tester, C. F., Taylor, J. M. and Parr, J. F., (1980). Fescue yield response to sewage sludge compost amendments, *Agronomy Journal* 72 79–84.
- Sikora, L. J. and Sowers, M. A., (1985). Effect of temperature control on the composting process, *Journal of Environmental Quality* 14 434–439.
- Skog, K. E. and Rosen, H. N., (1997). United states wood biomass for energy and chemicals: possible changes in supply, end uses, environmental impacts, *Forest Product Journal* 42(2) 63-69.
- Smith, A., Brown, K., Ogilvie, S., Rushton, K. and Bates, J., (2001). Waste management options and climate change, DG Environment, Final report, European Commission, Luxembourg.
- Smith, D. C. and Hughes, J. C., (2004). Changes in maturity indicators during the degradation of organic wastes subjected to simple procedures, *Biology and Fertility of Soils* 39 280–286.
- Smith, R. and Eilers, R. G., (1980). Numerical simulation of activated sludge composting, EPA-600/2-8C-191, Cincinnati, OH, USA.
- Smith, S. R., (2009). A critical review of the bioavailability and impacts of heavy metals in municipal solid waste composts compared to sewage sludge, *Environment International* 35 142–156.
- Sommer, S. G. and Dahl, P., (1999). Nutrient and carbon balance during the composting of deep litter, *Journal of Agricultural Engineering Research* 74(2) 145-153.
- Soumaré, M., Tack, F. M. G. and Verloo, M. G., (2003). Characterisation of malian and belgian solid waste composts with respect to fertility and suitability for land application, *Waste Management* 23(6) 517-522.
- Sprynskyy, M., (2009). Solid-liquid-solid extraction of heavy metals (Cr, Cu, Cd, Ni and Pb) in aqueous systems of zeolite-sewage sludge, *Journal of Hazardous Materials* 161 1377–1383.
- Steierer, F., Fisher-Anker, A., Francoeur, M., Wall, J. and Prins, K., (2007). Wood energy in Europe and North America: A new estimation of volumes and flows, JWEE.
<http://www.unece.org/trade/timber/docs/stats-sessions/stats-29/english/report-conclusions-2007-03.pdf>.
- Stentiford, E. I., (1996). Composting control: principles and practice. in: M. de Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmes and T. Papi (Eds.), *The Science of Composting, Part 1*, Glasgow, pp. 49-59.
- Stentiford, E. I., (2001). Composting-optimising the process and keeping the neighbours happy, in: K. Λαζαρίδη & Κ. Παυλόπουλος (Ed.), *Ολοκληρωμένη διαχείριση οργανικών αβλήτων και υπολειμμάτων*, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο Αθήνα, pp. 41-48.
- Stickelberger, D., (1975). Survey of city refuse composting. In *Organic matters as fertilizers*, Soils Bulletin, Swedish International Development Authority, FAO, Rome, pp. 185-209.
- Stombaugh, D. P. and Nokes, S. E., (1996). Development of a biologically based aerobic composting simulation model, *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 39(1) 239-250.
- Stopes, C., Lord, E. I., Philipps, L. and Woodward, L., (2002). Nitrate leaching from organic farms and conventional farms following best practice, *Soil Use and Management* 18 256–263.
- Stout, B. A., (1984). *Energy use and management in agriculture*, Breton Publishers, North Scituate.
- Strauch, D., (1991). Microbiological treatment of municipal sewage waste and refuse as a means of disinfection prior to recycling in agriculture, *Studies in Environmental Science* 42 121-136.
- Strauch, D., (1998). Pathogenic micro-organisms in sludge. Anaerobic digestion and disinfection methods to make sludge usable as a fertiliser, *European Water Management* 1(2) 12-26.
- Strehler, A. and Stutzle, W., (1987). Biomass Residues. in: D. O. Hall, R. P. Overend and R. P. Overend (Eds.), *Biomass Regenerable Energy*.
- Strom, P. F., (1985). Effect of temperature on bacterial species diversity in thermophilic solid-waste composting, *Applied and Environmental Microbiology* 50(4) 899–905.
- Stutz, J., Donahue, S., Mintzer, E. and Cotter, A., (2003). *Compost in Landscaping Applications*, Resource and Environmental Strategies, Tellus Institute.
- Stylianou, M. A., Inglezakis, V. J., Moustakas, K. G., Malamis, S. P. and Loizidou, M. D., (2007). Removal of Cu(II) in fixed bed and batch reactors using natural zeolite and exfoliated vermiculite as adsorbents, *Desalination* 215(1-3) 133-142.

- Stylianou, M. A., Inglezakis, V. J., Moustakas, K. G. and Loizidou, M. D., (2008). Improvement of the quality of sewage sludge compost by adding natural clinoptilolite, *Desalination* 224(1-3) 240-249.
- Suler, D. J. and Finstein, M. S., (1977). Effect of temperature, aeration, and moisture on CO₂ formation in bench-scale, continuously thermophilic composting of solid waste, *Applied and Environmental Microbiology* 33 345–350.
- Tam, N. F. Y. and Tiquia, S. M., (1994). Assessing toxicity of 'spent sawdust pig- litter' using seed germination technique, *Resources, Conservation and Recycling* 11 261–274.
- Tan, C. S., Drury, C. F., Reynolds, W. D., Groenevelt, P. H. and Dadfar, H., (2002). Water and nitrate loss through tiles under a clay loam soil in Ontario after 42 years of consistent fertilization and crop rotation, *Agriculture Ecosystems and Environment* 93(1-3) 121–130.
- Tester, C. F., Sikora, L. J., Taylor, J. M. and Parr, J. F., (1977). Decomposition of sewage sludge compost in soil: I. Carbon, nitrogen and phosphorus transformations, *Journal of Environmental Quality* 6 459–463.
- Thompson, W. H., (2002). *Test Methods for the Examination of Composting and Compost (TMECC)*, U.S. Government Printing Office, Washington, DC.
- Thomsen, M. H., (2005). Complex media from processing of agricultural crops for microbial fermentation, *Applied Microbiology and Biotechnology* 68 598–606.
- Tiquia, S. M., Tam, N. F. Y. and Hodgkiss, I. J., (1996a). Microbial activities during composting of spent pig-manure sawdust litter at different moisture contents, *Bioresource Technology* 55 201–206.
- Tiquia, S. M., Tam, N. F. Y. and Hodgkiss, I. J., (1996b). Effects of composting of phytotoxicity of spent pig-manure sawdust litter, *Environmental Pollution* 93(3) 249–256.
- Tiquia, S. M., Tam, N. F. Y. and Hodgkiss, I. J., (1998). Changes in chemical properties during composting of spent pig litter at different moisture contents, *Agriculture Ecosystems and Environment* 67 79–89.
- Tiquia, S. M. and Tam, N. F. Y., (2000). Fate of nitrogen during composting of chicken litter, *Environmental Pollution* 110(3) 535-541.
- Tiquia, S. M., (2002). Microbial transformation of nitrogen during composting. in: H. Insam, N. Riddech and S. Klammer (Eds.), *Microbiology of Composting and Other Biodegradation Processes*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 237–245.
- Tiquia, S. M., Richard, T. L. and Honeyman, M. S., (2002). Carbon, nutrient and mass loss during composting, *Nutrient Cycling in Agroecosystem* 62 15–24.
- Tittarelli, F., Petruzzelli, G., Pezzarossa, B., Civilini, M., Benedetti, A. and Sequi, P., (2007). Quality and Agronomic Use of Compost. in: L. F. Díaz, M. de Bertoldi, W. Bidlingmaier and E. Stentiford (Eds.), *Compost Science and Technology*, vol. 8, Elsevier, Amsterdam, pp. 119-158.
- Toffey, W. E., (1990). Large-scale sewage sludge composting: A case for maintaining a diversified program, *Water Science and Technology* 22(12) 107-116.
- Trautmann, N. and Krasny, M., (1998). Composting in the classroom. Scientific inquiry for high school students, Kendall/Hunt Publishing Co., Dubuque, IA.
- Tremier, A., de Guardia, A., Massiani, C., Paul, E. and Martel, J. L., (2005). A respirometric method for characterising the organic composition and biodegradation kinetics and the temperature influence on the biodegradation kinetics, for a mixture of sludge and bulking agent to be co-composted, *Bioresource Technology* 96 169–180.
- Trujillo, D., Font, X. and Sánchez, A., (2006). Use of fenton reaction for the treatment of leachate from composting of different wastes, *Journal of Hazardous Materials* 138(1) 201-204.
- Tuomela, M., Vikman, M., Hatakka, A. and Itävaara, M., (2000). Biodegradation of lignin in a compost environment: A review., *Bioresource Technology* 72(2) 169-183.
- Turan, G. N., (2009). Nitrogen availability in composted poultry litter using natural amendments, *Waste Management and Research* 27(1) 19-24.
- Turan, N. G. and Ergun, O. N., (2007). Ammonia uptake by natural zeolite in municipal solid waste compost, *Environmental Progress* 26(2) 149-156.
- Turan, N. G., (2008). The effects of natural zeolite on salinity level of poultry litter compost, *Bioresource Technology* 99 2097–2101.
- Turan, N. G. and Ergun, O. N., (2008). Improving the quality of municipal solid waste compost by using expanded perlite and natural zeolite, *Clean* 36 330-334.
- Turovskiy, I. S. and Mathai, P. K., (2006). *Wastewater sludge processing*, John Wiley & Sons, New York.

- UFOPLAN, (2009). Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit Förderkennzeichen, Bio-Waste - Need for EU Legislation?, Germany. <http://ec.europa.eu/environment/waste/eventspast/biowaste.htm>
- UNDP/WB (United Nations Development Programme/World Bank), (1991). Indian experience on composting as means of resource recovery, UNDP/WB Water Supply and Sanitation Program Workshop on Waste Management Policies, Singapore.
- USDA-FAS (United States Department of Agriculture - Foreign Agriculture Service), (2010). Sugar: World production supply and distribution. <http://www.fas.usda.gov/htp/sugar/2010/sugarMay2010.pdf>.
- USDA-SCS (United States Department of Agriculture-Soil Conservation Service), (1992). Agricultural Waste Management Field Handbook, Washington, DC.
- USDA-SCS (United States Department of Agriculture-Soil Conservation Service), (2008). Agricultural Waste Management Field Handbook, Washington, DC.
- USDA-US-DOE, (2005). Biomass as feedstock for a bioenergy and bioproducts industry: The technical feasibility of a billion-ton annual supply.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency), (2003). Environmental regulations and technology. Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge, EPA/625/R-92/013.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency), (2007). Municipal Solid Waste Generation, Recycling, and Disposal in the United States: Facts and Figures for 2007.
- Van Kessel, J. S., Reeves, J. B. and Meisinger, J. J., (2000). Nitrogen and carbon mineralization of potential manure components, *Journal of Environmental Quality* 29(5) 1669-1677.
- Venglovsky, J., Sasakova, N., Vargova, M., Pacajova, Z., Placha, I., Petrovsky, M. and et al., (2005). Evolution of temperature and chemical parameters during composting of the pig slurry solid fraction amended with natural zeolite, *Bioresource Technology* 96(2) 181-189.
- Verdonck, O., (1988). Composts from organic waste materials as substitutes for the usual horticultural substrates, *Biological Wastes* 26(4) 325-330.
- Verheijen, L. A., Wiersema, D. and Hulshoff, L. W., (1996). Management of Waste from Animal Product Processing, Pol J. De Wit International Agriculture Centre Wageningen, The Netherlands.
- Verville, R. and Seekins, B., (1993). New Use for Blueberry Residuals, *Biocycle* 33(4) 71.
- Viel, M., Sayack, D., Peyre, A. and Andre, L., (1987). Optimization of in-vessel co-composting through heat recovery, *Biological Wastes* 20 167-185.
- Villaseñor, J., Rodríguez, L. and Fernández, F. J., (2011). Composting domestic sewage sludge with natural zeolites in a rotary drum reactor, *Bioresource Technology* 102(2) 1447-1454.
- Vinnerås, B., Björklund, A. and Jönsson, H., (2003). Thermal composting of faecal matter as treatment and possible disinfection method - laboratory-scale and pilot-scale studies, *Bioresource Technology* 88(1) 47-54.
- VLACO, (1995). Vlamse organisatie ter bevordering van de afzet van groenten fruit tuin en groencompost,, Compost specification annex2, VLACO vzw Activiteitenverslag, Mechelen, Belgium.
- Vogfmann, H., Bours, G. and Fuchshofen, W., (1996). The influence of composts and mineral fertilizers on the heavy metal concentration and transfer in soil and plants. in: M. de Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmes and T. Papi (Eds.), *The Science of Composting, Part 1*, first ed. Blackie Academic and Professional, an imprint of Chapman and Hall, Wester Cleddens Road, Bishopbriggs, Glasgow G64 2NZ, pp. 346-354.
- Volesky, B. (2007). Biosorption and me, *Water Res.* 41, 4017-4029.
- Walter, I., Martínez, F. and Cala, V., (2006). Heavy metal speciation and phytotoxic effects of three representative sewage sludges for agricultural uses, *Environmental Pollution* 139(3) 507-514.
- Wan, J. H. C., Tam, N. F. Y. and Tiquia, S. M., (1999). Effects of Aeration Frequency on Co-Composting of Chicken Manure and Green Waste, *International Composting Symposium (ICS '99)*, Nova Scotia, Canada.
- Wang, L. K., Shammass, N. K. and Evanylo, G., (2007). Engineering and Management of Agricultural Land Application. in: L. K. Wang, N. K. Shammass and Y. T. Hung (Eds.), *Handbook of Environmental Engineering: Biosolids Treatment Process*, vol. 6, Humana Press, pp. 645-685.
- Watson, M. E., (2002). Testing Compost, Agriculture and Natural Resources, Fact Sheet, Ohio State University. <http://ohioline.osu.edu/anr-fact/0015.html>.
- Wei, Y. and Liu, Y., (2005). Effects of sewage sludge compost application on crops and cropland in a 3-year field study, *Chemosphere* 59 1257-1265.

- WERL (Wood End Research Laboratory), (2005). Interpreting Waste and Compost Tests. <http://www.woodsend.org>.
- Wesner, G. M., (1978). Sewage Biosolids Composting, Technology Transfer Seminar, Publication on Sludge Treatment and Disposal, Cincinnati, OH.
- Whang, D. S. and Meenaghan, G. F., (1980). Kinetic model of composting process, *Compost Science* May/June 44–46.
- Wichuk, K. M. and McCartney, D., (2007). A review of the effectiveness of current time-temperature regulations on pathogen inactivation during composting, *Journal of Environmental Engineering and Science* 6(5) 573-586.
- Williams, P. T., (2005). *Waste Treatment and Disposal*, 2 ed., John Wiley & Sons, London.
- Witter, E. and Lopez-Real, J. M., (1988). Nitrogen losses during the composting of sewage sludge and the effectiveness of clay soil, zeolite, and compost in adsorbing the volatilized ammonia, *Biological Wastes* 23 279–294.
- Wolkowski, R. P., (2003). Nitrogen management considerations for landspreading municipal solid waste compost, *Journal of Environmental Quality* 32 1844-1850.
- Wong, J. W. C. and Fang, M., (2000). Effects of lime addition on sewage sludge composting process, *Water Research* 34 3691–3698.
- Wong, M. H., Cheung, Y. H. and Cheung, C. L., (1983). The effects of ammonia and ethylene oxide in animal manure and sewage sludge on seed germination and root elongation of *Brassica parachinensis*, *Environmental Pollution* 30 109-123.
- Wright, T., Zoi, C., Smith, G. and Fuller, T., (2000). Report of the alternative waste management technologies and practices inquiry, Office of the Minister for the Environment New South Wales Australia,.
- WSDE (Washington State Department of Ecology), (1994). Interim Guidelines for Compost Quality, Solid Waste Services Program, USA. <http://www.p2pays.org/ref/14/13257.pdf>.
- Yamada, Y. and Kawase, Y., (2006). Aerobic composting of waste activated sludge: Kinetic analysis for microbiological reaction and oxygen consumption, *Waste Management* 26(1) 49-61.
- Zaccheo, P., Ricca, G. and Crippa, L., (2002). Organic matter characterization of composts from different feedstocks, *Compost Science and Utilization* 10(1) 29-38.
- Zavala, M. A. L., Funamizu, N. and Takakuwa, T., (2005). Biological activity in the composting reactor of the bio-toilet system, *Bioresource Technology* 96(7) 805-812.
- Zhang, H., Heung, J. C. and Huang, C. P., (2005). Optimization of fenton process for the treatment of landfill leachate, *Journal of Hazardous Materials* 125(1-3) 166-174.
- Zhang, J., Gao, D., Chen, T. B., Zheng, G. D., Chen, J., Ma, C., Guo, S. L. and Du, W., (2010). Simulation of substrate degradation in composting of sewage sludge, *Waste Management* 30(10) 1931-1938.
- Zhang, Y. H. P., (2008). Reviving the carbohydrate economy via multi-product lignocellulose biorefineries, *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology* 35 367–375.
- Zhu, N., (2007). Effect of low initial C/N ratio on aerobic composting of swine manure with rice straw, *Bioresource Technology* 98(1) 9-13.
- Zmora-Nahum, S., Hadar, Y. and Chen, Y., (2007). Physico-chemical properties of commercial composts varying in their source materials and country of origin, *Soil Biology and Biochemistry* 39 1263-1276.
- Zorpas, A. A., Constantinides, T., Vlyssides, A. G., Haralambous, I. and Loizidou, M., (2000a). Heavy metal uptake by natural zeolite and metals partitioning in sewage sludge compost, *Bioresource Technology* 72 113-119.
- Zorpas, A. A., Kapetanios, E., Zorpas, G. A., Karlis, P., Vlyssides, A., Haralambous, I. and Loizidou, M., (2000b). Compost produced from organic fraction of municipal solid waste, primary stabilized sewage sludge and natural zeolite, *Journal of Hazardous Materials* 77(1-3) 149-159.
- Zorpas, A. A., Arapoglou, D. and K., P., (2003). Waste paper and clinoptilolite as a bulking material with dewatered anaerobically stabilized primary sewage sludge (DASPSS) for compost production, *Waste Management* 23 27–35.
- Zorpas, A. A. and Loizidou, M., (2008). Sawdust and natural zeolite as a bulking agent for improving quality of a composting product from anaerobically stabilized sewage sludge, *Bioresource Technology* 99 7545–7552.
- Zucconi, F., Monaco, A., Forte, M. and de Bertoldi, M., (1985). Phytotoxins during the stabilization of organic matter. in: J. K. R. Gasser (Ed.), *Composting of Agricultural and Other Wastes*, Elsevier Applied Science Publishers, Barking, pp. 73–85.

- Zucconi, F. and de Bertoldi, M., (1987). Compost specifications for the production and characterization of compost from municipal solid waste, in: M. de Bertoldi, M. P. Ferranti, P.L'Hermite, F. Zucconi. (Eds), Compost: Production, Quality and use, Elsevier Applied Science, London, pp.30-50.
- Zucconi, F. M., Pera, A., Forte, M. and De Bertoldi, M., (1981). Evaluating toxicity of immature compost, *Biocycle* 22 54–57.
- Zurbrügg, C., Drescher, S., Patel, A. and Sharatchandra, H. C., (2004). Decentralised composting of urban waste - an overview of community and private initiatives in indian cities, *Waste Management* 24(7) 655-662.
- Zurbrügg, C., Drescher, S., Rytz, I., Sinha, A. H. M. M. and Enayetullah, I., (2005). Decentralised composting in Bangladesh, a win-win situation for all stakeholders, *Resources, Conservation and Recycling* 43(3) 281-292.
- Αγγελάκης, Α., Βουρχάκη, Κ., Διαβάτη, Η., Ευμοργοπούλου, Α., Κάρτσωνας, Ν., Μαμάης, Δ., Μποσογιάννη, Α. και Στάμου, Α., (2005). Εναλλακτικοί τρόποι διαχείρισης των παραπροϊόντων από εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος.
- Γεωργακάκης, Δ., (2008). Διαχείριση αποβλήτων: Περιβάλλον και Γεωργο - Πτηνο - Κτηνοτροφικές Εγκαταστάσεις, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργικής Μηχανικής. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- Γιαννόπουλος, Βουδριάς, Ε. και Αίβαζίδης, Α., (2005). Αναερόβια επεξεργασία αστικών στερεών αποβλήτων εξέλιξη και προοπτικές, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος.
- Γιδαράκος, Ε., (2007). Διαχείριση και Επεξεργασία Αστικών Απορριμμάτων, Σημειώσεις Μαθήματος, Εργαστήριο τοξικών και επικινδύνων αποβλήτων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- ΕΕΔΣΑ (Ελληνική Εταιρεία Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων), (2008). Νομοθετικό πλαίσιο διαχείρισης στερεών αποβλήτων στην Ε.Ε. <http://www.eedsa.gr/Contents.aspx?CatId=36>.
- Καπετάνιος, Ε., (1990). Παραγωγή και αξιολόγηση του compost από απορρίματα και δέσμευση βαρέων μετάλλων του με χρήση κλινοπιπλόλιθου, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Διδακτορική διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Κάτσου, Ε., Επεξεργασία υγρών αποβλήτων με τη χρήση μεμβρανών, Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα 2011.
- Κουλουμπής, Π. και Τσαντήλας, Χ., (2007). Εγχειρίδιο Ορθής Γεωργικής Πρακτικής για την Ενδεδειγμένη Αξιοποίηση Ιλύος των Αστικών Λυμάτων, Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων.
- Λοϊζίδου, Μ., Παπαδόπουλος, Α. και Καπετάνιος, Ε., (1992). Χαρακτηρισμός και επεξεργασία των στραγγισμάτων της χωματερής Άνω Λιοσίων, Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας, Συντονισμένο Πρόγραμμα Αξιοποίησης Απορριμμάτων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Λυμπεράτος, Γ., (2010). Παραγωγή Ενέργειας μέσω Αναερόβιας Χώνευσης Στερεών Αποβλήτων και Υπολειμμάτων, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος τμήμα Δυτικής Ελλάδας HELECO 2011: Ημερίδα προσυνεδριακή εκδήλωση «Ανακύκλωση», Τμήμα Χημικών Μηχανικών Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα. library.tee.gr/digital/m2494/m2494_liberatos.pdf.
- Μαλαμής, Δ., Σχεδιασμός κατασκευή και λειτουργία βιοαντιδραστήρα για την επεξεργασία οργανικών αποβλήτων, Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα 2011.
- Μανιός, Β. Ι., (1979). Διερεύνηση δυνατότητας παρασκευής φυτοχώματος από εκχυλισμένη ελαιοπυρήνα, vol. Διδακτορική διατριβή, Ανώτατη Γεωπονική Σχολή Αθηνών, Αθήνα.
- Μανιός, Β. Ι. και Μανιαδάκης, Κ. Μ., (2001). Προδιαγραφές ποιότητας κομπόστ, in: Κ. Λαζαρίδης and Κ. Παυλόπουλος (Eds.), Διημερίδα για την ολοκληρωμένη διαχείριση οργανικών αποβλήτων και υπολειμμάτων, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Αθήνα, pp. 119-122.
- Μάστακα, (2007). Μικροβιακή διαδοχή κατά την κομποστοποίηση ιλύος από τον βιολογικό καθαρισμό Ηρακλείου με τη μέθοδο των αναστρεφόμενων σωρών, Τμήμα Οικιακής Οικονομίας και Οικολογίας, Μεταπτυχιακή Εργασία, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα.
- Μαυρόπουλος, Α., (2008). Τεχνολογίες επεξεργασίας απορριμμάτων, Ενιαίος Σύνδεσμος Απορριμμάτων Κρήτης.
- Μιχαλόπουλος, (2010). Σχεδιασμός πρότυπου συστήματος, οικιακού τύπου, για την αξιοποίηση του βιοαποδομήσιμου κλάσματος των απορριμμάτων με αερόβιες διεργασίες, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Διδακτορική διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Ντακαράς, Ε., (2006). Επεξεργασία Βιομηχανικών Αποβλήτων, Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Πολυζόπουλος, Ν., (1976). Εδαφολογία, Αφοι Σάκκουλα, Θεσσαλονίκη - Αθήνα.

- Στάμου, Α. Ι. και Βογιατζής, Ζ. Σ., (1994). Βασικές αρχές και σχεδιασμός συστημάτων επεξεργασίας αποβλήτων, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος. Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- ΥΠΕΚΑ (Υπουργείο Περιβάλλοντος Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής), (2009). Εναλλακτική διαχείριση συσκευασιών και άλλων προϊόντων. <http://www.minenv.gr/anakyklosi/general/general.html>
- Φουντουλάκης, Μ. Σ., (2005). Τύχη και επίδραση ξενοβιοτικών ουσιών στην αναερόβια χώνευση υγρών αποβλήτων και ιλύος, Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πάτρας, Πάτρα.
- Φραγκίστα, Σ., (2010). Προσδιορισμός υδραυλικών ιδιοτήτων σε καλλιεργημένο και ακαλλιεργητο έδαφος, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής, Μεταπτυχιακή Εργασία, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα.