

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ, ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ
ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΒΙΟΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ ΓΙΑ ΤΗΝ
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ**

ΜΑΛΑΜΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ - ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΑΘΗΝΑ 2011

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

Έναυσμα για την εκπόνηση αυτής της διδακτορικής διατριβής αποτέλεσε η πρόκληση για τη βιώσιμη διαχείριση των στερεών αποβλήτων, τα οποία συνιστούν ένα διαχρονικό πρόβλημα το οποίο τα τελευταία χρόνια συντελεί σε διαρκές πεδίο συγκρούσεων και αντιπαραθέσεων σε εθνικό αλλά και σε διεθνές επίπεδο. Στο πλαίσιο αυτό η παρούσα έρευνα έρχεται να συμβάλει στον εναλλακτικό τρόπο διαχείρισης των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων βασιζόμενο στην αποτελεσματική επεξεργασία και επαναχρησιμοποίηση της ροής αυτής των αποβλήτων στον τόπο παραγωγής τους.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Αικατερίνη – Ιωάννα Χαραλάμπους για την ανάθεση του θέματος, την επίβλεψη και την καθοδήγησή της για την ολοκλήρωση της διδακτορικής διατριβής. Επίσης, ευχαριστώ τα μέλη της τριμελούς επιτροπής Καθηγητή Νικόλαο Μαρκάτο και Καθηγήτρια Αντωνία Μοροπούλου για τις υποδείξεις του όπως και τα υπόλοιπα μέλη της επταμελούς επιτροπής για τις παρατηρήσεις τους.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά το Διδάκτορα Ευάγγελο Καπετάνιο για τη στήριξη και τις χρήσιμες υποδείξεις του καθώς και το προσωπικό του εργαστηρίου Chemistry and Environmental Sciences Faculty of Science El Jadida του Πανεπιστημίου Chouaib Doukkali στο Μαρόκο για τη συνεργασία κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων. Επίσης, ευχαριστώ το Διδάκτορα Χρήστο Μιχαλόπουλο για τη σημαντική του συμβολή κατά τη συγγραφή της διατριβής όπως και το υπόλοιπο προσωπικό της Μονάδας Επιστήμης και Τεχνολογίας Περιβάλλοντος Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ.

Θερμές ευχαριστίες στην οικογένειά μου για την έμπρακτη συμβολή της καθόλη τη διάρκεια υλοποίησης του πονήματος, ενώ ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να απονείμω στη Δέσποινα Τσαρούχα για την απόλυτη κατανόηση και συμπαράστασή της στην πραγμάτωση των φιλοδοξιών μου.

Τέλος θα ήθελα να αφιερώσω τη διατριβή μου στη μνήμη των γονιών του πατέρα μου.

Περίληψη

Τα βιοαποδομήσιμα στερεά απόβλητα αντιπροσωπεύουν ένα σημαντικό μέρος της συνολικής παραγόμενης ποσότητας των στερεών αποβλήτων, 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 στερεών αποβλήτων με τις οποίες δύναται να επιτευχθεί η επεξεργασία, η ανάκτηση και η ανακύκλωσή τους συμβάλλοντας με αυτό τον τρόπο σε πληθώρα περιβαλλοντικών, οικονομικών και κοινωνικών οφελών.

Η αποκεντρωμένη κομποστοποίηση δύναται να αποτελέσει μια δυναμική προσέγγιση για την αποδοτικότερη διαχείριση των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων 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 στερεών αποβλήτων με τη χρήση συστήματος κομποστοποίησης το οποίο θα μπορεί να χρησιμοποιείται αυτόνομα σε αποκεντρωμένες περιοχές για τη διαχείριση της ροής αυτής των αποβλήτων. Για την επίτευξη αυτού του στόχου σχεδιάστηκε, κατασκευάστηκε, λειτούργησε και αξιολογήθηκε σύστημα κομποστοποίησης με το οποίο δύναται να επιτευχθεί η επεξεργασία διαφορετικών ροών και μιγμάτων των βιοαποδομήσιμων στερεών 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 κομποστοποίηση, (β) στο χαρακτηρισμό της ποιότητας του τελικού προϊόντος (κόμποστ) και (γ) στην προσομοίωση της κινητικής αντιδράσεων της κομποστοποίησης αναφορικά με τη βιοαποδόμηση της οργανικής ουσίας του υποστρώματος.

Ο σχεδιασμός και η κατασκευή του συστήματος κομποστοποίησης αφορά σε κλειστού τύπου βιοαντιδραστήρα ασυνεχούς τροφοδοσίας, με αυτοματοποιημένες διατάξεις μηχανικής ανάδευσης, αερισμού και ύγρανσης του οργανικού υποστρώματος. Η δυναμικότητα επεξεργασίας του συστήματος είναι 1.5-2.0 tη οργανικού υλικού με παράλληλη δέσμευση των εκπεμπόμενων αερίων ρύπων σε συνδυασμό με τη συλλογή και απομάκρυνση των παραγόμενων στραγγισμάτων.

Το πρώτο στάδιο της αξιολόγησης του συστήματος αποτέλεσαν οι πειραματικές εφαρμογές κομποστοποίησης στις οποίες επιλέχθηκαν ροές βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων όπως η ιλύς από μονάδες επεξεργασίας αστικών υγρών αποβλήτων, τα γεωργικά υπολείμματα και τα κτηνοτροφικά απόβλητα. Επιπλέον, σε ορισμένους πειραματικούς κύκλους πραγματοποιήθηκε η προσθήκη ορυκτών όπως ο ζεόλιθος και ο περλίτης για τη βελτίωση των συνθηκών βιοαποδόμησης της οργανικής ουσίας. Διαφορετικά μίγματα των προαναφερόμενων αποβλήτων αποτέλεσαν το υλικό τροφοδοσίας του συστήματος η σύνθεση των οποίων πραγματοποιήθηκε με βάση τη διαθεσιμότητα των αποβλήτων καθώς και τις φυσικοχημικές ιδιότητές τους, ούτως ώστε να διαμορφωθούν κατάλληλες αρχικές συνθήκες για τη διεξαγωγή των διεργασιών της κομποστοποίησης. 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, αερισμού και ύγρυνσης 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. Η υψηλή περιεκτικότητα σε άζωτο στα επιλεγμένα βιοαποδομήσιμα στερεά απόβλητα διαμόρφωσε χαμηλές αναλογίες C/N στα αρχικά υποστρώματα. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα το σχηματισμό συνθηκών περίσσειας οργανικού αζώτου μέρος του οποίου διασπάστηκε προς αμμωνιακά με συνεπακόλουθη αύξηση του pH προς αλκαλικές τιμές. Υπό αυτές τις συνθήκες και υπό την επίδραση υψηλών θερμοκρασιακών επιπέδων, παρουσιάστηκαν σημαντικές απώλειες αζώτου κυρίως μέσω της πτητικότητας της αμμωνίας. Λόγω των αποτελεσματικών διεργασιών ανάδευσης και αερισμού του οργανικού υλικού σε συνδυασμό με την παρουσία διογκωτικών μέσων (π.χ. γεωργικά υπολείμματα), τα αμμωνιακά οξειδώνονται προς νιτρικά (νιτροποίηση), επιβεβαιώνοντας την παρουσία των απαιτούμενων αερόβιων συνθηκών στο υπόστρωμα. Με την προσθήκη ορυκτών υλικών όπως ο ζεόλιθος και ο περλίτης σε ορισμένες 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, P, 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. Επίσης, το παραγόμενο κόμποστ εμφάνισε υψηλή περιεκτικότητα σε άζωτο παρά τις σημαντικές απώλειές του οι οποίες καταγράφηκαν κατά τις διεργασίες της κομποστοποίησης. 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. Οι συγκεντρώσεις των νιτρικών στο κόμποστ εμφανίστηκαν υψηλές εκτός από την περίπτωση στην οποία έγινε προσθήκη ζεόλιθου του οποίου η ιοντοεναλλακτική και προσροφητική του ικανότητα ως προς τα αμμωνιακά ιόντα 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 υψηλότερες στο παραγόμενο κόμποστ σε σύγκριση με το αρχικό υπόστρωμα λόγω της μείωσης της οργανικής ουσίας κατά τα εξελικτικά στάδια των διεργασιών βιοαποδόμησης. Εντούτοις, οι συγκεντρώσεις τους στα τελικά προϊόντα εμφανίστηκαν σημαντικά χαμηλότερες από τα ανώτατα επιτρεπτά όρια της Ε.Ε. για την ασφαλή διάθεσή τους στο έδαφος. Αναφορικά με τα βιολογικά χαρακτηριστικά, το παραγόμενο κόμποστ θεωρήθηκε φυτοθρεπτικό το οποίο αποτελεί ένδειξη της απουσίας φυτοτοξικών ενώσεων. Επιπλέον, η χαμηλή συγκέντρωση των ολικών και περιπρωματικών κολοβακτηριοειδών και η απουσία αυγών ελμίνθων τα οποία είναι δείκτες παρουσίας παθογόνων μικροοργανισμών στο κόμποστ, συγκλίνουν στο γεγονός ότι οι συνθήκες των παρατεταμένων υψηλών θερμοκρασιακών επιπέδων κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης συνετέλεσαν στην υγειονομοποίηση των τελικών προϊόντων. Τέλος, η εφαρμογή προκαταρκτικών πειραματικών καλλιεργειών αραβόσιτου και ζαχαρότευτλων σε αγρό, επιβεβαίωσαν τις διεγερτικές ιδιότητες των προϊόντων ως προς την ανάπτυξη των φυτών, σε πραγματικές συνθήκες, σε σύγκριση με τα επίπεδα βλαστικότητας τόσο του μάρτυρα όσο και στην περίπτωση προσθήκης χημικών λιπασμάτων.

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 της οργανικής ουσίας που επιτυγχάνεται. Η ανάλυση της κινητικής των αντιδράσεων βιοξείδωσης αφορά στην κινητική εξίσωση πρώτης τάξης βασιζόμενη στις απώλειες της οργανικής ουσίας κατά την κομποστοποίηση του υποστρώματος λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των κρίσιμων παραμέτρων της θερμοκρασίας, της υγρασίας και του οξυγόνου στο ρυθμό της βιολογικής αποδόμησης της οργανικής ουσίας. Η προσαρμογή του μοντέλου κινητικής πρώτης τάξης στα πειραματικά δεδομένα εμφανίστηκε ικανοποιητική τόσο ποιοτικά (οπτική προσαρμογή) όσο και ποσοτικά. Επιπλέον, ο εκτιμώμενος ρυθμός βιοαποδόμησης της οργανικής ουσίας παρουσιάστηκε υψηλός σε όλες τις πειραματικές εφαρμογές, ενώ επίσης υψηλά εμφανίστηκαν τα επίπεδα των απωλειών της βιοαποδομήσιμης οργανικής ουσίας, υποδηλώνοντας ότι οι βιοξειδωτικές διεργασίες στους πειραματικούς κύκλους κομποστοποίησης πραγματοποιήθηκαν αποτελεσματικά.

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

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.

Decentralized composting 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 decentralized treatment and reuse of biodegradable waste using a prototype composting system. To meet this aim of the thesis a composting system was designed, constructed and evaluated through which the treatment of different biodegradable waste streams and mixtures can be achieved. 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, with automated units for the mechanical agitation, ventilation and humidification of the organic substrate. The system has a capacity of 1.5tn of organic material whereas the emitted gases are trapped and the produced leachate is collected and removed.

The first stage of the system evaluation involves the development of several composting trials in which different biodegradable waste was selected such as sludge from urban wastewater treatment plants, agricultural residues and animal waste. In addition, in some experimental cycles, minerals such as zeolite and perlite were added in order to improve the biodegradation conditions of the organic matter. Different mixtures of the aforementioned waste streams were supplied to the system, the composition of which was determined by their availability and their physicochemical properties aiming to provide the necessary conditions for initiation of the composting process. 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. The high nitrogen content of the selected biodegradable waste resulted in low C/N ratios in the initial substrate. These conditions created excess of organic nitrogen part of which was mineralized to form ammonium thus increasing pH to alkaline values. Under these circumstances and under the influence of elevated temperatures, significant losses of nitrogen were recorded mainly through ammonia volatilization. Due to the efficient agitation and aeration processes of the substrate in combination with the presence of bulking agents (e.g. agricultural residues), 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. The presence of minerals modifies the physical properties of the substrate through water absorption and by increasing its porosity. 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. In addition, the compost acquired high nitrogen content despite the significant nitrogen losses recorded during the composting processes. 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) appeared higher in compost in comparison to their concentrations in the initial substrate due to the organic matter reduction during composting. However, their concentrations in the final product were significantly lower than the maximum EU permissible limits for land application. With regard to the biological characteristics, the produced compost appeared phytothreptic which was indicative of the absence of phytotoxic compounds. Furthermore, the low concentrations of total and faecal coliforms and the absence of helminth eggs which are indicators of the presence of pathogenic microorganisms in compost, converge on the fact that the conditions of prolonged elevated temperature levels during composting contributed to the sanitization of the final products. Finally, the development of preliminary field cultivations of maize and sugar beets, confirmed the stimulating effects of compost application on plant growth in relation to the reference germination levels and in comparison to the germination effect of chemical fertilizer addition.

The final stage of the composting system evaluation refers to the simulation of the bioxidation reaction kinetics of the organic matter of the substrate in order to investigate and estimate the biodegradation rate of reaction and the biodegradation level of the organic matter that is achieved. The analysis of the bioxidation reaction kinetics involves a first-order kinetic model based on the organic matter losses during composting considering the effects of the critical parameters of temperature, moisture and oxygen on the rate of organic matter biodegradation. The goodness of fit of the first-order kinetic

model to the experimental data appeared satisfactory both qualitatively (visual fitting) and quantitatively. In addition, the estimated biodegradation rates presented high values in all composting trials, whereas the estimated levels of organic matter losses were also significant, suggesting that the biooxidation processes were carried out effectively.

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 decentralized management of this waste stream and to the promotion of an alternative solid waste management approach through small and autonomous decentralized systems.

Πίνακας Περιεχομένων

Πρόλογος	iii
Περίληψη	v
Summary	ix
Πίνακας Περιεχομένων	xiii
Λίστα Πινάκων	xvii
Λίστα Διαγραμμάτων	xix
Λίστα Εικόνων	xxi
Συμβολισμοί	xxiii
1. Εισαγωγή	1
1.1. Αναγκαιότητα διαχείρισης βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων.....	1
1.2. Αποκεντρωμένη κομποστοποίηση των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων	2
1.3. Στόχος και διάρθρωση της διδακτορικής διατριβής	3
2. Βιοαποδομήσιμα Στερεά Απόβλητα	5
2.1. Νομικό πλαίσιο διαχείρισης των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων	5
2.2. Χαρακτηριστικά βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων	13
2.2.1. Υπολείμματα από βιομηχανίες επεξεργασίας τροφίμων	14
2.2.2. Κτηνοτροφικά και πτηνοτροφικά απόβλητα	18
2.2.3. Γεωργικά υπολείμματα καλλιεργειών.....	18
2.2.4. Δασοκομικά υπολείμματα και απόβλητα δασοκομικών προϊόντων.....	20
2.2.5. Ιλύς μονάδων επεξεργασίας αστικών λυμάτων	23
2.2.6. Οργανικό κλάσμα αστικών στερεών αποβλήτων	29
3. Βιολογική Επεξεργασία Βιοαποδομήσιμων Στερεών Αποβλήτων	35
3.1. Αναερόβια βιολογική επεξεργασία	35
3.2. Αερόβια βιολογική επεξεργασία (Κομποστοποίηση).....	38
3.2.1. Στάδια της ολοκληρωμένης διεργασίας της κομποστοποίησης.....	40
3.2.2. Υλικά κομποστοποίησης	41
3.2.3. Παράμετροι ελέγχου και παρακολούθησης της κομποστοποίησης	42
3.2.3.1. Θερμοκρασία.....	42
3.2.3.2. Υγρασία	46
3.2.3.3. Αερισμός – Παροχή οξυγόνου	48
3.2.3.4. pH.....	49
3.2.3.5. Φυσικές ιδιότητες του υποστρώματος.....	50
3.2.3.6. Θρεπτικά συστατικά	51
3.2.5. Παράμετροι ελέγχου της ποιότητας του τελικού προϊόντος	56
3.2.6. Συστήματα κομποστοποίησης	59

3.2.6.1.	Κλειστά συστήματα	59
3.2.6.2.	Ανοικτά συστήματα	63
4.	Μεθοδολογία	65
4.1.	Σχεδιασμός κατασκευή και δοκιμές συστήματος κομποστοποίησης	67
4.2.	Πειραματικά πρωτόκολλα	68
4.2.1.	Πειραματικό πρωτόκολλο κομποστοποίησης.....	68
4.2.1.1.	Δειγματοληψία και ανάλυση των επιμέρους βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων που συνθέτουν το υλικό τροφοδοσίας του βιοαντιδραστήρα.....	68
4.2.1.2.	Προεπεξεργασία και σύνθεση του υλικού τροφοδοσίας του βιοαντιδραστήρα.....	68
4.2.1.3.	Τροφοδοσία του βιοαντιδραστήρα.....	69
4.2.1.4.	Προγραμματισμός λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα.....	70
4.2.1.5.	Δειγματοληψία και ανάλυση του υποστρώματος,	70
4.2.1.6.	Δειγματοληψία και ανάλυση παραγόμενων στραγγισμάτων	70
4.2.1.7.	Δειγματοληψία και ανάλυση παραγόμενου κόμποστ.....	70
4.2.1.8.	Έλεγχος και συντήρηση του συστήματος κομποστοποίησης.....	71
4.2.2.	Πειραματικό πρωτόκολλο καλλιεργειών σε αγρό	71
4.3.	Μέθοδοι ανάλυσης.....	72
4.3.1.	Προσδιορισμός θερμοκρασίας	73
4.3.2.	Προσδιορισμός υγρασίας	74
4.3.3.	Προσδιορισμός οξυγόνου.....	74
4.3.4.	Προσδιορισμός pH	74
4.3.5.	Προσδιορισμός ολικού οργανικού άνθρακα.....	74
4.3.6.	Προσδιορισμός οργανικής ουσίας.....	75
4.3.7.	Προσδιορισμός ολικού αζώτου	75
4.3.8.	Προσδιορισμός αμμωνιακών και νιτρικών	76
4.3.9.	Προσδιορισμός αναλογίας C/N	77
4.3.10.	Προσδιορισμός μετάλλων και μακροστοιχείων	77
4.3.11.	Προσδιορισμός φυτοτοξικότητας	78
4.3.12.	Προσδιορισμός BOD ₅	79
4.3.13.	Μικροβιολογικές αναλύσεις.....	80
4.3.13.1.	Προσδιορισμός ολικών και περιττωματικών κολοβακτηριοειδών	81
4.3.13.2.	Προσδιορισμός ελμίνθων (Helminth)	81
4.3.13.3.	Προσδιορισμός κοκκομετρικής/μηχανικής σύστασης του εδάφους	82
5.	Σχεδιασμός και Τεχνική Περιγραφή Συστήματος Κομποστοποίησης	83
5.1.	Δομικά μέρη	83
5.2.	Τεχνική περιγραφή δομικών μερών.....	86

5.2.1	Διάταξη βιοαντιδραστήρα	86
5.2.1.1.	Θάλαμος	86
5.2.1.2.	Βάσεις στήριξης	88
5.2.1.3.	Θυρίδες τροφοδοσίας και απόληψης	89
5.2.1.4.	Σύστημα ανάδευσης	91
5.2.1.5.	Σύστημα αερισμού – απαγωγής αερίων εκπομπών	93
5.2.1.6.	Σύστημα ύγρανσης	94
5.2.1.7.	Σύστημα απομάκρυνσης στραγγισμάτων	94
5.2.1.8.	Σύστημα αυτομάτου ελέγχου και παρακολούθησης	94
5.2.2.	Διάταξη απόσπησης αερίων εκπομπών	96
5.2.3.	Διάταξη μεταφοράς αποβλήτων	97
5.3.	Δοκιμές λειτουργίας του συστήματος κομποστοποίησης	98
6.	Ανάλυση και Επεξεργασία Πειραματικών Αποτελεσμάτων	99
6.1.	Εισαγωγή	99
6.2.	Πειραματικές εφαρμογές με το σύστημα κομποστοποίησης	99
6.2.1.	Πρώτη εφαρμογή	100
6.2.1.1.	Χαρακτηρισμός πρώτης ύλης και σύνθεση του υλικού τροφοδοσίας	100
6.2.1.2.	Έλεγχος της διεργασίας της κομποστοποίησης	103
6.2.2.	Δεύτερη εφαρμογή	110
6.2.2.1.	Χαρακτηρισμός πρώτης ύλης και σύνθεση του υλικού τροφοδοσίας	110
6.2.2.2.	Έλεγχος της διεργασίας της κομποστοποίησης	111
6.2.3.	Τρίτη εφαρμογή	118
6.2.3.1.	Χαρακτηρισμός πρώτης ύλης και σύσταση υλικού τροφοδοσίας	118
6.2.3.2.	Έλεγχος της διεργασίας της κομποστοποίησης	120
6.2.4.	Τέταρτη εφαρμογή	127
6.2.4.1.	Χαρακτηρισμός πρώτης ύλης και σύσταση υλικού τροφοδοσίας	127
6.2.4.2.	Έλεγχος της διεργασίας της κομποστοποίησης	129
6.3.	Εκτίμηση της λειτουργίας του συστήματος κομποστοποίησης	135
6.3.1.	Θερμοκρασία	135
6.3.2.	Περιεχόμενη υγρασία	137
6.3.3.	Περιεκτικότητα σε οξυγόνο	139
6.3.4.	pH	140
6.3.5.	Ολικός οργανικός άνθρακας και απώλειες οργανικής ουσίας	142
6.3.6.	Ολικό άζωτο και απώλειες ολικού αζώτου	144
6.3.7.	Αμμωνιακά και νιτρικά	147
6.3.8.	Αναλογία C/N	148
6.3.9.	Στραγγίσματα	150
6.4.	Ποιότητα παραγόμενου κόμποστ	152

6.4.1.	Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά παραγόμενου κόμποστ	152
6.4.1.1.	Χρώμα και οσμή	152
6.4.1.2.	Υγρασία	154
6.4.1.3.	pH.....	154
6.4.1.4.	Οργανική ουσία.....	156
6.4.1.5.	Αναλογία C/N	156
6.4.1.6.	Αμμωνιακά και νιτρικά	159
6.4.1.7.	Μακροστοιχεία.....	161
6.4.1.8.	Βαρέα μέταλλα	165
6.4.2.	Βιολογικά χαρακτηριστικά παραγόμενου κόμποστ	169
6.4.2.1.	Φυτοτοξικότητα στο παραγόμενου κόμποστ	169
6.4.2.2.	Παθογόνοι μικροοργανισμοί στο παραγόμενο κόμποστ.....	171
6.4.2.3.	Πειραματικές καλλιέργειες.....	174
6.4.2.3.1.	Πειραματική καλλιέργεια αραβόσιτου	176
6.4.2.3.2.	Πειραματική καλλιέργεια ζαχαρότευτλων.....	177
6.5.	Ανάλυση και εφαρμογή κινητικής αντιδράσεων της κομποστοποίησης.....	179
6.5.1.	Αναφορά στην κινητική αντιδράσεων βιοξείδωσης της οργανικής ουσίας.....	179
6.5.2.	Μέθοδος ανάλυσης κινητικής αντιδράσεων βιοξείδωσης της οργανικής ουσίας.....	183
6.5.3.	Προσομοίωση κινητικής αντιδράσεων βιοξείδωσης της οργανικής ουσίας.....	183
6.5.4.	Ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων προσομοίωσης	191
7.	Συμπεράσματα	195
	Βιβλιογραφία	201
	Παραρτήματα	221
	Παράρτημα I: Ενδεικτικά φυσικοχημικά χαρακτηριστικά και παραγόμενες ποσότητες κοπριάς εκτρεφόμενων ζώων.....	222
	Παράρτημα II: Εκτίμηση των παραγόμενων γεωργικών υπολειμμάτων	224
	Παράρτημα III: Σχεδιασμός δομικών μερών συστήματος κομποστοποίησης.....	226

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 2.1: Νομοθετικό πλαίσιο της Ε.Ε. και της Ελλάδας αναφορικά με την ιεράρχηση της διαχείρισης των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων	8
Πίνακας 2.2: Ενδεικτικές πηγές βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων στις βιομηχανίες τροφίμων.....	15
Πίνακας 2.3: Ενδεικτικά χαρακτηριστικά ιλύος γαλακτοβιομηχανιών.....	16
Πίνακας 2.4: Τυπικά χαρακτηριστικά ιλύος από βιομηχανίες επεξεργασίας και μεταποίησης ζωικών πρώτων υλών.....	16
Πίνακας 2.5: Χημικά χαρακτηριστικά υπολειμμάτων βιομηχανιών μεταποίησης φυτικών πρώτων υλών ..	17
Πίνακας 2.6: Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά αποβλήτων βιομηχανιών επεξεργασίας και συντήρησης φρούτων και λαχανικών	18
Πίνακας 2.7: Ποσότητες των κυριότερων παραγόμενων υπολειμμάτων γεωργικών καλλιεργειών σε διάφορες περιοχές ανά τον κόσμο.....	19
Πίνακας 2.8: Χημικά χαρακτηριστικά γεωργικών υπολειμμάτων σε αγρούς	20
Πίνακας 2.9: Τυπικές πηγές και είδη δασοκομικών αποβλήτων	21
Πίνακας 2.10: Ενδεικτικά χαρακτηριστικά επιλεγμένων δέντρων και δασοκομικών υπολειμμάτων	23
Πίνακας 2.11: Φυσικά χαρακτηριστικά παραγόμενων ιλύων.....	25
Πίνακας 2.12: Τυπική χημική σύσταση ανεπεξέργαστης ιλύος.....	25
Πίνακας 2.13: Τυπικές συγκεντρώσεις ολικών στερεών πριν και μετά τη διεργασία της πύκνωσης διαφορετικών ειδών ιλύος	25
Πίνακας 2.14: Τυπικές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων σε ιλύ η οποία έχει υποστεί πύκνωση.....	26
Πίνακας 2.15: Τυπική απόδοση συστήματος φυγοκέντρισης για την αφυδάτωση διαφορετικών ειδών ιλύος.....	26
Πίνακας 2.16: Χαρακτηριστικά ιλύος από ΜΕΛ σε περιοχές της Δυτικής και Νότιας Ελλάδας	27
Πίνακας 2.17: Ποσότητες και χαρακτηριστικά της παραγόμενης ιλύος στην Ελλάδα σε ΜΕΛ.....	28
Πίνακας 2.18: Μέση κατά κεφαλήν παραγωγή ΑΣΑ.....	29
Πίνακας 2.19: Μέση παραγωγή ΑΣΑ με βάση το πληθυσμιακό εύρος.....	29
Πίνακας 2.20: Μέση παραγωγή ΑΣΑ με βάση την προερχόμενη πηγή	30
Πίνακας 2.21: Σύσταση ΑΣΑ ανά τον κόσμο.....	31
Πίνακας 2.22: Ιδιότητες συγκεκριμένων βιοαποδομήσιμων ροών των ΑΣΑ.....	32
Πίνακας 2.23: Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των διαφορετικών ροών των ΑΣΑ	32
Πίνακας 2.24: Στοιχειακή ανάλυση των συστατικών των ΑΣΑ.....	33
Πίνακας 3.1: Κατηγοριοποίηση συστημάτων αναερόβιας χώνευσης	37
Πίνακας 3.2: Εύρος βέλτιστων θερμοκρασιακών τιμών στο οποίο παρατηρείται μεγιστοποίηση του ρυθμού διάσπασης της οργανικής ουσίας.....	44
Πίνακας 3.3: Συνθήκες θερμοκρασίας-χρόνου κατά την κομποστοποίηση για την υγειονομία του κόμποστ προερχόμενο από ιλύ, σύμφωνα με τις εθνικές προδιαγραφές διαφόρων χωρών ..	46
Πίνακας 3.4: Βέλτιστο εύρος υγρασίας κατά τη θερμοφιλή φάση της κομποστοποίησης	47
Πίνακας 3.5: Ενδεικτικές τιμές C/N ορισμένων βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων	53
Πίνακας 3.6: Οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις του αζώτου κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης.....	54
Πίνακας 3.7: Ενδεικτικές παράμετροι ελέγχου της ποιότητας του κόμποστ.....	58
Πίνακας 4.1: Διάταξη των πειραματικών τεμαχίων για τις καλλιέργειες αραβόσιτου και ζαχαρότευτλων ..	72
Πίνακας 4.2: Σύνολο φυσικοχημικών και βιολογικών παραμέτρων οι οποίες εξετάστηκαν στα διαφορετικά δείγματα.....	73
Πίνακας 4.3: Στοιχεία λειτουργίας της συσκευής ατομικής απορρόφησης.....	78

Πίνακας 5.1: Αυτόματος έλεγχος της λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα με PLC.	95
Πίνακας 6.1: Σύνθεση του υλικού τροφοδοσίας του βιοαντιδραστήρα για τον εκάστοτε πειραματικό κύκλο κομποστοποίησης	100
Πίνακας 6.2: Φυσικοχημικές ιδιότητες υλικού τροφοδοσίας και σύσταση μίγματος του 1 ^{ου} κύκλου κομποστοποίησης	101
Πίνακας 6.3: Οριακές τιμές συγκέντρωσης βαρέων μετάλλων για τη χρήση ιλύος ως υλικό τροφοδοσίας στην κομποστοποίηση, σύμφωνα με το στρατηγικό σχεδιασμό διαχείρισης των αποβλήτων στην Αυστρία	101
Πίνακας 6.4: Χαρακτηριστικά των παραγόμενων στραγγισμάτων κατά τον 1 ^ο κύκλο κομποστοποίησης ..	109
Πίνακας 6.5: Φυσικοχημικές ιδιότητες υλικού τροφοδοσίας και σύσταση μίγματος του 2 ^{ου} κύκλου κομποστοποίησης.....	110
Πίνακας 6.6: Χαρακτηριστικά των παραγόμενων στραγγισμάτων κατά το 2 ^ο κύκλο κομποστοποίησης....	117
Πίνακας 6.7: Φυσικοχημικές ιδιότητες υλικού τροφοδοσίας και σύσταση μίγματος του 3 ^{ου} κύκλου κομποστοποίησης.....	118
Πίνακας 6.8: Χημική σύσταση του ζεόλιθου/κλινοπτιλόλιθου	120
Πίνακας 6.9: Χαρακτηριστικά των παραγόμενων στραγγισμάτων κατά τον 3 ^ο κύκλο κομποστοποίησης ..	126
Πίνακας 6.10: Χαρακτηριστικά διογκωμένου περλίτη.....	128
Πίνακας 6.11: Φυσικοχημικές ιδιότητες ιλύος για την εφαρμογή του 4 ^{ου} κύκλου κομποστοποίησης.	128
Πίνακας 6.12: Χαρακτηριστικά των παραγόμενων στραγγισμάτων κατά τον 4 ^ο κύκλο κομποστοποίησης .	134
Πίνακας 6.13: Χρονική διάρκεια των θερμοκρασιακών επιπέδων του υποστρώματος στους τέσσερις πειραματικούς κύκλους κομποστοποίησης.....	136
Πίνακας 6.14: Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του παραγόμενου κόμποστ και του αρχικού υποστρώματος για κάθε πειραματικό κύκλο.....	153
Πίνακας 6.15: Προτεινόμενη αναλογία C/N στο κόμποστ σύμφωνα με τη βιβλιογραφία	157
Πίνακας 6.16: Δυναμική του αζώτου σχετιζόμενη με το λόγο C/N του τελικού προϊόντος κατά την εναπόθεσή του σε βοσκότοπους και αρόσιμο έδαφος.....	158
Πίνακας 6.17: Κριτήρια κατηγοριοποίησης επιπέδου φυτοτοξικότητας με τη χρήση καρπών κάρδαμου και σιταριού.	170
Πίνακας 6.18: Ενδεικτικές οριακές τιμές παθογόνων μικροοργανισμών κομποστοποιημένης ιλύος.....	173
Πίνακας 6.19: Ενδεικτικές μικροβιολογικές αναλύσεις στο αρχικό υπόστρωμα και στο κόμποστ.....	173
Πίνακας 6.20: Χαρακτηριστικά κόμποστ και εδάφους για την εφαρμογή των πειραματικών καλλιεργειών	175
Πίνακας 6.21: Παράμετροι οι οποίες υπολογίστηκαν από την εφαρμογή του μοντέλου κινητικής αντίδρασης πρώτης τάξης των απωλειών βιοαποδομήσιμης οργανικής ουσίας (BOM _{loss}) διορθωμένο ως προς την επίδραση των κρίσιμων παραμέτρων της θερμοκρασίας, της υγρασίας και του οξυγόνου	184
Πίνακας 6.22: Ποιοτικός έλεγχος προσαρμογής των μοντέλων στα πειραματικά δεδομένα.....	188
Πίνακας 6.23: Παράμετροι ελέγχου ανάλυσης ευαισθησίας και εύρος διακύμανσής τους.....	192

Λίστα Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 2.1: Ποσοστό διάθεσης βιοαποδομήσιμων αστικών αποβλήτων σε ΧΥΤΑ στις χώρες της Ε.Ε. με βάση τη συνολική ποσότητα που είχαν παραχθεί το 1995.....	13
Διάγραμμα 2.2: Ποσότητες παραγόμενων γεωργικών υπολειμμάτων ανά Κράτος Μέλος της Ε.Ε.-27	20
Διάγραμμα 2.3: Ενδεικτικές ποσότητες δασοκομικών αποβλήτων οι οποίες είναι διαθέσιμες ή ανακτώνται.....	22
Διάγραμμα 2.4: Μέση κατά κεφαλήν παραγωγή ΑΣΑ στα Κράτη Μέλη της Ε.Ε.	30
Διάγραμμα 3.1: Συνθήκες θερμοκρασίας-χρόνου για την αδρανοποίηση των παθογόνων μικροοργανισμών στην ιλύ.....	45
Διάγραμμα 3.2: Επίδραση του pH και της θερμοκρασίας στην ισορροπία $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ στο υπόστρωμα	50
Διάγραμμα 6.1: Εξέλιξη της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια του 1 ^{ου} κύκλου κομποστοποίησης.....	103
Διάγραμμα 6.2: Εξέλιξη της υγρασίας κατά τη διάρκεια του 1 ^{ου} κύκλου κομποστοποίησης	104
Διάγραμμα 6.3: Εξέλιξη του οξυγόνου κατά τη διάρκεια του 1 ^{ου} κύκλου κομποστοποίησης	104
Διάγραμμα 6.4: Εξέλιξη του pH κατά τη διάρκεια του 1 ^{ου} κύκλου κομποστοποίησης.....	105
Διάγραμμα 6.5: Μεταβολή του ολικού οργανικού άνθρακα και εξέλιξη των απωλειών οργανικής ουσίας κατά τη διάρκεια του 1 ^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης.....	106
Διάγραμμα 6.6: Μεταβολή του ολικού αζώτου και εξέλιξη των απωλειών αζώτου κατά τη διάρκεια του 1 ^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης.....	106
Διάγραμμα 6.7: Μεταβολή της συγκέντρωσης των αμμωνιακών και των νιτρικών κατά τη διάρκεια του 1 ^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης.....	107
Διάγραμμα 6.8: Μεταβολή του λόγου C/N κατά τη διάρκεια του 1 ^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης.....	108
Διάγραμμα 6.9: Εξέλιξη της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια του 2 ^{ου} κύκλου κομποστοποίησης.....	111
Διάγραμμα 6.10: Εξέλιξη της υγρασίας κατά τη διάρκεια του 2 ^{ου} κύκλου κομποστοποίησης	112
Διάγραμμα 6.11: Εξέλιξη του οξυγόνου κατά τη διάρκεια του 2 ^{ου} κύκλου κομποστοποίησης.....	113
Διάγραμμα 6.12: Εξέλιξη του pH κατά τη διάρκεια του 2 ^{ου} κύκλου κομποστοποίησης.....	113
Διάγραμμα 6.13: Μεταβολή του ολικού οργανικού άνθρακα και εξέλιξη των απωλειών οργανικής ουσίας κατά τη διάρκεια του 2 ^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης.....	114
Διάγραμμα 6.14: Μεταβολή του ολικού αζώτου και εξέλιξη των απωλειών αζώτου κατά τη διάρκεια του 2 ^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης.....	115
Διάγραμμα 6.15: Μεταβολή των αμμωνιακών και των νιτρικών κατά τη διάρκεια του 2 ^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης.....	115
Διάγραμμα 6.16: Μεταβολή του λόγου C/N κατά τη διάρκεια του 2 ^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης.....	116
Διάγραμμα 6.17: Εξέλιξη της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια του 3 ^{ου} κύκλου κομποστοποίησης.....	121
Διάγραμμα 6.18: Εξέλιξη της υγρασίας κατά τη διάρκεια του 3 ^{ου} κύκλου κομποστοποίησης	121
Διάγραμμα 6.19: Εξέλιξη του οξυγόνου κατά τη διάρκεια του 3 ^{ου} κύκλου κομποστοποίησης	122
Διάγραμμα 6.20: Εξέλιξη του pH κατά τη διάρκεια του 3 ^{ου} κύκλου κομποστοποίησης.....	122
Διάγραμμα 6.21: Μεταβολή του ολικού οργανικού άνθρακα και εξέλιξη των απωλειών οργανικής ουσίας κατά τη διάρκεια του 3 ^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης.....	123
Διάγραμμα 6.22: Μεταβολή του ολικού αζώτου και εξέλιξη των απωλειών αζώτου κατά τη διάρκεια του 3 ^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης.....	124
Διάγραμμα 6.23: Μεταβολή των αμμωνιακών και των νιτρικών κατά τη διάρκεια του 3 ^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης.....	125
Διάγραμμα 6.24: Μεταβολή του λόγου C/N κατά τη διάρκεια του 3 ^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης.....	125

Διάγραμμα 6.25: Εξέλιξη της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια του 4 ^{ου} κύκλου κομποστοποίησης.....	129
Διάγραμμα 6.26: Εξέλιξη της υγρασίας κατά τη διάρκεια του 4 ^{ου} κύκλου κομποστοποίησης	130
Διάγραμμα 6.27: Εξέλιξη του οξυγόνου κατά τη διάρκεια του 4 ^{ου} κύκλου κομποστοποίησης.....	130
Διάγραμμα 6.28: Εξέλιξη του pH κατά τη διάρκεια του 4 ^{ου} κύκλου κομποστοποίησης	131
Διάγραμμα 6.29: Μεταβολή του ολικού οργανικού άνθρακα και εξέλιξη των απωλειών οργανικής ουσίας κατά τη διάρκεια του 4 ^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης.....	131
Διάγραμμα 6.30: Μεταβολή του ολικού αζώτου και εξέλιξη των απωλειών αζώτου κατά τη διάρκεια του 4 ^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης.....	132
Διάγραμμα 6.31: Μεταβολή των αμμωνιακών και των νιτρικών κατά τη διάρκεια του 4 ^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης.....	132
Διάγραμμα 6.32: Μεταβολή του λόγου C/N κατά τη διάρκεια του 4 ^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης	133
Διάγραμμα 6.33: Εξέλιξη της θερμοκρασίας στους τέσσερις πειραματικούς κύκλους κομποστοποίησης ..	135
Διάγραμμα 6.34: Εξέλιξη της υγρασίας στους τέσσερις πειραματικούς κύκλους κομποστοποίησης.....	138
Διάγραμμα 6.35: Εξέλιξη του οξυγόνου στους τέσσερις πειραματικούς κύκλους κομποστοποίησης	139
Διάγραμμα 6.36: Εξέλιξη του pH στους τέσσερις πειραματικούς κύκλους κομποστοποίησης.....	140
Διάγραμμα 6.37: Μεταβολή του ολικού οργανικού άνθρακα και εξέλιξη των απωλειών της οργανικής ουσίας στους τέσσερις πειραματικούς κύκλους κομποστοποίησης.....	142
Διάγραμμα 6.38: Μεταβολή του ολικού αζώτου και εξέλιξη των απωλειών αζώτου στους τέσσερις πειραματικούς κύκλους κομποστοποίησης	144
Διάγραμμα 6.39: Μεταβολή των αμμωνιακών και των νιτρικών στους τέσσερις πειραματικούς κύκλους κομποστοποίησης.....	147
Διάγραμμα 6.40: Μεταβολή του λόγου C/N στους τέσσερις πειραματικούς κύκλους κομποστοποίησης	149
Διάγραμμα 6.41: Συγκέντρωση βαρέων μετάλλων στο παραγόμενο κόμποστ και ανώτατες οριακές τιμές βαρέων μετάλλων σε κόμποστ προερχόμενο από ιλύ σε χώρες της Ε.Ε.....	168
Διάγραμμα 6.42: Προσδιορισμούς του δείκτη βλαστικότητας του μαρουλιού και του καρδάμου κατά τη χρήση του παραγόμενου κόμποστ.....	170
Διάγραμμα 6.43: Επίπεδο βλάστησης (ύψος) αραβόσιτου με την προσθήκη κόμποστ και χημικού λιπάσματος.....	177
Διάγραμμα 6.44: Επίπεδο βλάστησης (βιομάζα) ζαχαρότευτλων με την προσθήκη κόμποστ και χημικού λιπάσματος.....	178
Διάγραμμα 6.45: Προσαρμογή της προσομοίωσης της κινητικής αντιδράσεων στα πειραματικά δεδομένα για τους τέσσερις πειραματικούς κύκλους κομποστοποίησης.	185
Διάγραμμα 6.46: Εξέλιξη των διορθωτικών συντελεστών της θερμοκρασίας F(T), της υγρασίας F(MC) του οξυγόνου F(O ₂) και της συνδυασμένης επίδρασής τους F(TOT) στους υπό εξέταση πειραματικούς κύκλους.....	189
Διάγραμμα 6.47: Εξέλιξη του ρυθμού βιοαποδόμησης, k _d , κατά τη διάρκεια των πειραματικών κύκλων κομποστοποίησης σε σύγκριση με το μέγιστο ρυθμό βιοαποδόμησης, k _{max}	191
Διάγραμμα 6.48: Ανάλυση ευαισθησίας και συντελεστές ευαισθησίας των διαφόρων παραμέτρων του μοντέλου ως προς τη μεταβολή του μέγιστου ρυθμού βιοαποδόμησης k _{max}	193

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 2.1:	Ιεράρχηση της διαχείρισης των στερεών αποβλήτων όπως αυτή προτείνεται από την Ε.Ε.	6
Εικόνα 2.2:	Ευρωπαϊκό νομοθετικό πλαίσιο για τη διαχείριση των στερεών αποβλήτων.....	7
Εικόνα 2.3:	Στάδια επεξεργασίας αστικών υγρών αποβλήτων.....	23
Εικόνα 3.1:	Τυπικό διάγραμμα ροής της αναερόβιας βιολογικής επεξεργασίας βιοαποδομήσιμων αποβλήτων.....	36
Εικόνα 3.2:	Στάδια μετατροπής των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων σε CH ₄ και CO ₂ κατά τη διεργασία της αναερόβιας βιολογικής επεξεργασίας.....	37
Εικόνα 3.3:	Απεικόνιση της διεργασίας της κομποστοποίησης.....	38
Εικόνα 3.4:	Κύριες βιοχημικές αντιδράσεις της κομποστοποίησης.....	39
Εικόνα 3.5:	Τυπικά στάδια της ολοκληρωμένης διαχείρισης των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων με τη μέθοδο της κομποστοποίησης.....	40
Εικόνα 3.6:	Απώλειες αμμωνίας κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης.....	56
Εικόνα 3.7:	Σχηματική αναπαράσταση τυπικών κάθετων κλειστών συστημάτων κομποστοποίησης (α) χωρίς ανάδευση και (β) με ανάδευση.....	60
Εικόνα 3.8:	Τυπική διάταξη οριζόντιων κλειστών συστημάτων κομποστοποίησης, τύπου βιοκελιών.....	61
Εικόνα 3.9:	Τυπική διάταξη οριζόντιων κλειστών συστημάτων κομποστοποίησης, τύπου κιβωτίων, σε παράλληλα στοιχεία.....	61
Εικόνα 3.10:	Τυπική διάταξη οριζόντιων κλειστών συστημάτων κομποστοποίησης, τύπου τούνελ.....	61
Εικόνα 3.11:	Τυπική διάταξη οριζόντιων κλειστών συστημάτων κομποστοποίησης, τύπου καναλιών.....	62
Εικόνα 3.12:	Τυπική διάταξη οριζόντιου κλειστού συστήματος κομποστοποίησης, τύπου περιστρεφόμενου τυμπάνου.....	62
Εικόνα 3.13:	Τυπική διάταξη οριζόντιου ανοιχτού συστήματος κομποστοποίησης, τύπου αναστρεφόμενων σειραδιών.....	63
Εικόνα 3.14:	Τυπική διάταξη οριζόντιου ανοιχτού συστήματος κομποστοποίησης, τύπου αεριζόμενων στατικών σωρών.....	64
Εικόνα 4.1:	Διαγραμματική απεικόνιση μεθοδολογίας διδακτορικής διατριβής.....	66
Εικόνα 5.1:	Διάγραμμα ροής συστήματος κομποστοποίησης.....	84
Εικόνα 5.2:	Θάλαμος βιοαντιδραστήρα και παρελκόμενα εξαρτήματα (1).....	88
Εικόνα 5.3:	Θάλαμος βιοαντιδραστήρα και παρελκόμενα εξαρτήματα (2).....	89
Εικόνα 5.4:	Θυρίδα τροφοδοσίας βιοαντιδραστήρα.....	89
Εικόνα 5.5:	Θυρίδες απόληψης βιοαντιδραστήρα.....	90
Εικόνα 5.6:	Εσωτερικό μέρος του βιοαντιδραστήρα με ενσωματωμένο το σύστημα ανάδευσης.....	92
Εικόνα 5.7:	Φυγοκεντρικός ανεμιστήρας απαγωγής αερίων.....	93
Εικόνα 5.8:	Ηλεκτρολογικός πίνακας συστήματος αυτομάτου ελέγχου και παρακολούθησης.....	96
Εικόνα 5.9:	Μεταφορική Ταινία.....	97
Εικόνα 6.1:	Περιεκτικότητα σε οργανική ουσία των εδαφών στην Ευρώπη.....	176

Συμβολισμοί

Συμβολισμός	Επεξήγηση	Μονάδες
tn	Τόνοι	
kg	Κιλά	
d	Ημέρες	
ha	Εκτάρια	
yr	Χρόνος	
ΧΥΤΑ	Χώρος Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων	
ΧΥΤΥ	Χώρος Υγειονομικής Ταφής Υπολειμμάτων	
ΠΔΠ	Πρόγραμμα Δράσης για το Περιβάλλον	
Ε.Ε.	Ευρωπαϊκή Ένωση	
ΜΕΛ	Μονάδες Επεξεργασίας Λυμάτων	
ΕΚΑ	Ευρωπαϊκός Κατάλογος Αποβλήτων	
wb	Νωπή ουσία (wet base)	
dm	Ξηρή ουσία (dry matter)	
ΤΟC	Ολικός οργανικός άνθρακας	% dm, mg/l
C	Άνθρακας	% dm
N	Ολικό άζωτο	% dm
O	Οξυγόνο	% dm
H	Υδρογόνο	% dm
P	Φώσφορος	% dm
P ₂ O ₅	Πεντοξείδιο του φωσφόρου	% dm
Mg	Μαγνήσιο	% dm
MgO	Οξείδιο του μαγνησίου	% dm
Ca	Ασβέστιο	% dm
CaO	Οξείδιο του ασβεστίου	% dm
K	Κάλιο	% dm
K ₂ O	Οξείδιο του καλίου	% dm
C/N	Λόγος άνθρακα προς άζωτο	
NH ₄ ⁺	Αμμωνιακά	% dm
NO ₃ ⁻	Νιτρικά	% dm
COD	Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (Chemical Oxygen Demand)	% , mg/l
BOD ₅	Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (Biochemical Oxygen Demand)	% , mg/l
PLC	Προγραμματιζόμενος λογικός ελεγκτής (Programming Logic Controller)	
Cd	Κάδμιο	% dm
Cu	Χαλκός	% dm
Cr	Ολικό χρώμιο	% dm
Ni	Νικέλιο	% dm
Pb	Μόλυβδος	% dm
Zn	Ψευδάργυρος	% dm
As	Αρσενικό	% dm
Co	Κοβάλτιο	% dm
Fe	Σίδηρος	% dm
Hg	Υδράργυρος	% dm
Mn	Μαγγάνιο	% dm
B	Βόριο	% dm
CO ₂	Διοξείδιο του άνθρακα	
IPPC	Integrated Prevention Pollution Control	
ΕΣΔΑ	Εθνικός Σχεδιασμός Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων	

TC	Ολικά κολοβακτηριοειδή	
FC	Περιττωματικά κολοβακτηριοειδή	
TS	Ολικά στερεά (Total Solids)	% wb
VS	Πτητικά στερεά (Volatile Solids)	% dm
FS	Στερεό υπόλειμμα (Fixed Solids)	% dm
N_{loss}	Απώλειες αζώτου ως προς το αρχικό ολικό άζωτο	% N αρχικό
RPR	Λόγος υπολειμμάτων προς παραγόμενο προϊόν (Residue to Product Ratio)	
Δ.Β.	Δείκτης βλαστικότητας	
ΑΣΑ	Αστικά στερεά απόβλητα	
BOM	Βιοαποδομήσιμη οργανική ουσία	kg
k_d	Ρυθμός βιοαποδόμησης οργανικής ουσίας	d^{-1}
k_{max}	Μέγιστος ρυθμός βιοαποδόμησης οργανικής ουσίας	d^{-1}
$\Delta(k_{max})$	Ποσοστιαία διακύμανση του k_{max}	%
t	Χρόνος	d
OM	Οργανική ουσία	%
BOM_0	Βιοαποδομήσιμη οργανική ουσία στο αρχικό υπόστρωμα	% OM
BOM_{loss}	Απώλειες βιοαποδομήσιμης οργανικής ουσίας	% OM, % BOM_0
BOM_{loss} μοντέλο	Ποσοστό απομάκρυνσης βιοαποδομήσιμης οργανικής ουσίας το οποίο υπολογίζεται από το μοντέλο	% OM
BOM_{loss} πειραματικό	Ποσοστό απομάκρυνσης βιοαποδομήσιμης οργανικής ουσίας το οποίο προσδιορίζεται πειραματικά	% OM
$F(T)$	Διορθωτικός συντελεστής θερμοκρασίας	
$F(MC)$	Διορθωτικός συντελεστής υγρασίας	
$F(O_2)$	Διορθωτικός συντελεστής οξυγόνου	
$F(FAS)$	Διορθωτικός συντελεστής πορώδους	
$F(TOT)$	Συνδυασμένη επίδραση των επιλεγμένων διορθωτικών συντελεστών	
T_{min}	Ελάχιστη θερμοκρασία βιοαποδόμησης του υποστρώματος	$^{\circ}C$
T_{max}	Μέγιστη θερμοκρασία βιοαποδόμησης του υποστρώματος	$^{\circ}C$
T_{opt}	Βέλτιστη θερμοκρασία βιοαποδόμησης του υποστρώματος	$^{\circ}C$
MC	Κλασματική περιεκτικότητα υγρασίας υποστρώματος	
O_2	Ποσοστιαία περιεκτικότητα οξυγόνου στο υπόστρωμα	% v/v
K_{O_2}	Σταθερά ημικορεσμού οξυγόνου	% v/v
FAS	Κλασματική περιεκτικότητα της αέριας φάσης στο πορώδες του υποστρώματος (Free Air Space)	
NRMSE	Κανονικοποιημένη ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Normalized Root Mean Square Error)	%
RMSE	Ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Root Mean Square Error)	%

1.1. Αναγκαιότητα διαχείρισης βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων

Τα βιοαποδομήσιμα στερεά απόβλητα ορίζονται ως τα απόβλητα τα οποία μπορούν να αποδομηθούν με αερόβιες ή αναερόβιες διεργασίες (Οδηγία 1999/31/ΕΚ). Η σημαντικότητα της ολοκληρωμένης διαχείρισης των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων έγκειται στην εκτροπή 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⁽¹⁾. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι εκτιμώμενες ανθρωπογενείς ποσότητες μεθανίου, οι οποίες εκπέμπονται παγκοσμίως από τη διάθεση των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων στους ΧΥΤΑ, ανέρχονται στο 11% για το έτος 2010 (GMI, 2010). Συνεπώς, η εκτροπή 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.

Λόγω της βιομηχανοποίησης των γεωργικών πρακτικών και της εντατικοποίησης της παραγωγής αγαθών, συντελείται βαθμιαία υποβάθμιση των αγροτικών εδαφών και συνεχής ελάττωση της περιεχόμενης οργανικής ουσίας (Lakhdar et al., 2009). Η σύγχρονη γεωργία με τα μέσα που διαθέτει (χημικά λιπάσματα, αρδεύσεις, βαθιές αρόσεις κλπ) βελτιώνει προσωρινά τη δομή των εδαφών και αυξάνει την παραγωγικότητα αλλά συγχρόνως επισπεύδει τη διαδικασία της περαιτέρω υποβάθμισής τους. Επομένως, ο γεωργικός τομέας απαιτεί την ασφαλή και μακροχρόνια διαθεσιμότητα σε θρεπτικά συστατικά προκειμένου να ανακτήσει τις απώλειες αυτών οι οποίες προκύπτουν κατά τη συγκομιδή των καρπών, την απορροή θρεπτικών, την πτητικότητά τους στην ατμόσφαιρα και τη σταδιακή μείωση της οργανικής ουσίας λόγω των διεργασιών ανοργανοποίησής της (EC, 2003).

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)

⁽¹⁾ Το μεθάνιο είναι 21 φορές δραστικότερο από το CO₂ αναφορικά με την επίδρασή του στις κλιματικές αλλαγές

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 εκτροπή 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.

1.2. Αποκεντρωμένη κομποστοποίηση των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων

Η αποκεντρωμένη κομποστοποίηση έχει επισημανθεί ως μια υποσχόμενη εναλλακτική μέθοδος για τη βιώσιμη διαχείριση των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων σε όλο το σύστημα της διαχειριστικής αλυσίδας (συλλογή, μεταφορά, επεξεργασία και επαναχρησιμοποίηση), ειδικά σε μη αστικές και απομονωμένες περιοχές (Drescher et al., 2006; Linzner and Wassermann, 2006). Σε σύγκριση με τα κεντρικά συστήματα κομποστοποίησης, η αποκεντρωμένη προσέγγιση παρουσιάζει σημαντικά περιβαλλοντικά, οικονομικά και κοινωνικά οφέλη, καθώς επιτυγχάνεται η εκτροπή των οργανικών αποβλήτων από τους ΧΥΤΑ ακόμα και σε απομακρυσμένες περιοχές, ενώ η ανακύκλωσή τους γίνεται στα σημεία παραγωγής τους. Επιπλέον επιτυγχάνεται μείωση της μάζας και του όγκου των αποβλήτων που μεταφέρονται, επεξεργάζονται και διατίθενται μειώνοντας σημαντικά το συνολικό κόστος διαχείρισης ενώ παράλληλα διαμορφώνονται σε τοπικό επίπεδο θέσεις απασχόλησης καθώς και κοινωνική συναίνεση αναφορικά με την περιβαλλοντική διαχείριση των αποβλήτων (Goldstein, 2009; Drescher et al., 2006; Zurbrügg et al., 2005; Zurbrügg et al., 2004).

Στις περισσότερες ανεπτυγμένες χώρες η κομποστοποίηση παρέχει ευκαιρίες εισοδήματος λόγω του υφιστάμενου νομικού και θεσμικού πλαισίου το οποίο προωθεί την ανάκτηση, την ανακύκλωση και την επαναχρησιμοποίηση υλικών. Υπό αυτό το πολιτικό πλαίσιο, προγράμματα κεντρικής και αποκεντρωμένης κομποστοποίησης έχουν εφαρμοστεί ανάλογα με τις ανάγκες και τις δυνατότητες των κοινοτήτων. Παρά τις προσπάθειες που έχουν καταβληθεί για την αύξηση του ρυθμού ανάκτησης των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων, η υγειονομική ταφή παραμένει η ευρύτερα εφαρμοζόμενη μέθοδος διαχείρισης των αποβλήτων σε αρκετές ανεπτυγμένες χώρες, ενώ η εκτροπή και ειδικά η ανάκτηση και επαναχρησιμοποίηση του οργανικού υλικού εξακολουθούν να παραμένουν σε μη ικανοποιητικά επίπεδα (UFOPLAN, 2009; Environment Canada, 2009; Eurostat, 2008; Eurostat, 2005). Ως εκ τούτου, η περαιτέρω εφαρμογή και ανάπτυξη αποδοτικών συστημάτων κομποστοποίησης για την αποκεντρωμένη επεξεργασία των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων ενδέχεται να συμβάλουν στην αύξηση του ποσοστού αξιοποίησής τους (Adhikari et al., 2009b; Drescher and Zurbrügg, 2006).

Σε αντίθεση με τις ανεπτυγμένες χώρες, τα κεντρικά συστήματα κομποστοποίησης σε χώρες χαμηλού και μεσαίου εισοδήματος έχουν αποδειχθεί ότι δεν είναι βιώσιμα λόγω του υψηλού επενδυτικού κόστους, του κόστους μεταφοράς των αποβλήτων, την ανεπαρκή τεχνογνωσία ελέγχου των διεργασιών και της απουσίας αγοράς των τελικών

προϊόντων (Drescher et al., 2006; Drescher and Zurbrügg, 2006; Zurbrügg et al., 2004; Dulac, 2001; UNDP/WB, 1991). Στις χώρες αυτές με την εφαρμογή της αποκεντρωμένης κομποστοποίησης μπορούν να επεξεργαστούν τα παραγόμενα οργανικά απόβλητα με σχετικά χαμηλό κόστος καθιστώντας βιώσιμη τη λειτουργία τέτοιων συστημάτων αν και πρέπει να ληφθούν υπόψη παράγοντες όπως η διαμόρφωση αγοράς για το κόμποστ και η συνέργεια με τα υπάρχοντα συστήματα διαχείρισης στερεών αποβλήτων (Linzner and Wassermann, 2006; Drescher et al., 2006; Drescher and Zurbrügg, 2006). Αξίζει να επισημανθεί ότι σε περιοχές στις οποίες η απαίτηση σε οργανικά λιπάσματα είναι μεγάλη, όπως στην περίπτωση των αγροτικών περιοχών, τα αποκεντρωμένα συστήματα κομποστοποίησης ενδέχεται να ενισχύσουν την ανακύκλωση των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων στη γεωργία συντελώντας στην προώθηση των βιοκαλλιεργειών δεδομένου ότι η διεργασία της κομποστοποίησης, η παραγωγή και χρήση κόμποστ λαμβάνουν χώρα στο σημείο παραγωγής των αποβλήτων (Misra et al., 2003).

1.3. Στόχος και διάρθρωση της διδακτορικής διατριβής

Ο στόχος της διδακτορικής διατριβής είναι η διερεύνηση της αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων με τη χρήση συστήματος κομποστοποίησης το οποίο θα μπορεί να χρησιμοποιείται αυτόνομα σε αποκεντρωμένες περιοχές για τη διαχείριση της ροής αυτής των αποβλήτων και για την παραγωγή ενός τελικού οργανικού προϊόντος με προστιθέμενη αξία. Οι επιμέρους στόχοι της έρευνας περιλαμβάνουν:

- Το σχεδιασμό, την κατασκευή και τις δοκιμές ενός συστήματος κομποστοποίησης με βιοαντιδραστήρα κλειστού τύπου, κατακόρυφης ροής, ασυνεχούς τροφοδοσίας με δυναμικότητα επεξεργασίας 1.5-2.0tn οργανικού υλικού. Στο βιοαντιδραστήρα θα επιτυγχάνει η ελεγχόμενη ανάδευση, ύγρανση και αερισμός του υποστρώματος, ενώ το σύστημα θα περιλαμβάνει τη συλλογή των παραγόμενων στραγγισμάτων και την απομάκρυνση και δέσμευση των εκλυόμενων αερίων ρύπων.
- Την αξιολόγηση του συστήματος κομποστοποίησης με (α) την εφαρμογή πειραματικών κύκλων κομποστοποίησης και την παρακολούθηση και τον έλεγχο των διεργασιών της αερόβιας βιολογικής αποδόμησης διαφορετικών υποστρωμάτων (β) το χαρακτηρισμό της ποιότητας του παραγόμενου υλικού ως προς τις φυσικοχημικές και βιολογικές του ιδιότητες και (γ) την προσομοίωση της κινητικής αντιδράσεων βιοξείδωσης του υποστρώματος.

Η δομή της διδακτορικής διατριβής έχει ως εξής. Στο κεφάλαιο 1 παρουσιάζονται οι στόχοι της διδακτορικής διατριβής και η αναγκαιότητα της διαχείρισης των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων σε αποκεντρωμένα συστήματα. Στο κεφάλαιο 2, γίνεται αναφορά στο ευρωπαϊκό και εθνικό νομοθετικό πλαίσιο το οποίο διέπει τη διαχείριση των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων. Επίσης, στο ίδιο κεφάλαιο παρουσιάζονται γενικά στοιχεία αναφορικά με τα χαρακτηριστικά των διαφορετικών ροών που συνιστούν το κλάσμα αυτό των αποβλήτων. Στο κεφάλαιο 3, περιγράφονται οι διαθέσιμες βιολογικές μέθοδοι επεξεργασίας των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων με έμφαση στην κομποστοποίηση. Το κεφάλαιο 4, αφιερώνεται στη μεθοδολογική προσέγγιση η οποία ακολουθήθηκε για την επίτευξη των επιμέρους στόχων της διδακτορικής διατριβής. Στο κεφάλαιο 5, παρουσιάζεται ο σχεδιασμός του συστήματος κομποστοποίησης, αναλύονται τα δομικά μέρη από τα οποία αποτελείται

και περιγράφονται οι δοκιμές ελέγχου λειτουργίας του. Το κεφάλαιο 6, αποτελεί το πειραματικό μέρος της έρευνας κατά το οποίο μελετάται και αναλύεται η αποτελεσματικότητα του συστήματος κομποστοποίησης σε τρία διαφορετικά επίπεδα. Το πρώτο επίπεδο αφορά στον έλεγχο και στην παρακολούθηση της εξέλιξη μιας σειράς πειραματικών εφαρμογών κομποστοποίησης εντός του βιοαντιδραστήρα, με τη χρήση διαφορετικών μιγμάτων βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων. Το δεύτερο επίπεδο αφορά στην εξέταση των φυσικοχημικών και βιολογικών ιδιοτήτων του τελικού προϊόντος προκειμένου να γίνει ο χαρακτηρισμός του ως προς τα ποιοτικά του χαρακτηριστικά. Το τρίτο και τελευταίο επίπεδο αφορά στον προσδιορισμό του ρυθμού αντίδρασης με τον οποίο το υπόστρωμα βιοαποδομείται όσο και του βαθμού βιοξείδωσης της οργανικής ουσίας που επιτυγχάνεται μέσω της εφαρμογής προτύπου προσομοίωσης της κινητικής των αντιδράσεων βιοαποδόμησης της οργανικής ουσίας. Στο 7^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.

2.1. Νομικό πλαίσιο διαχείρισης των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων

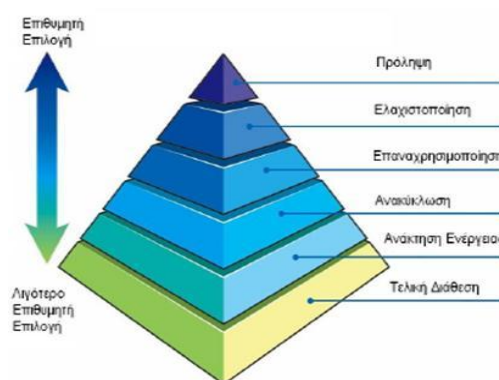
Η Ευρωπαϊκή στρατηγική αναφορικά με τις προτεραιότητες και τις δράσεις για το περιβάλλον υλοποιείται με την υιοθέτηση των «Προγραμμάτων Δράσης για το Περιβάλλον» (ΠΔΠ). Στο πλαίσιο των ΠΔΠ η Ευρωπαϊκή Ένωση (Ε.Ε.) αναπτύσσει την πολιτική της ως προς τη διαχείριση των αποβλήτων, η υλοποίηση της οποίας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

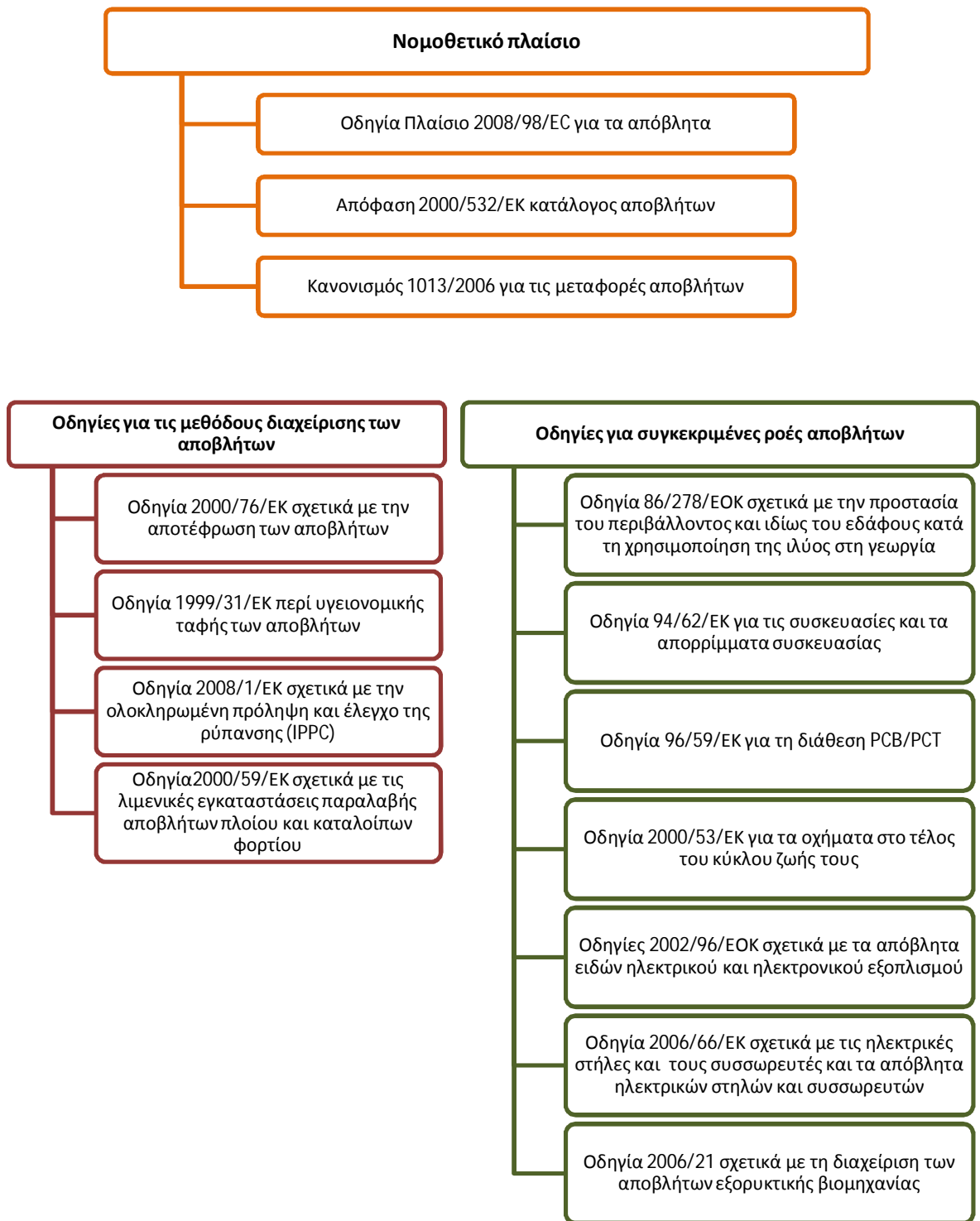
Αναφορικά με τη διαχείριση των στερεών αποβλήτων, συμπεριλαμβανομένης της ροής των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων, η πολιτική που ακολουθεί η Ε.Ε., και κατ'επέκταση τα Κράτη Μέλη, βασίζεται στην ιεράρχηση των επιλογών διαχείρισης κατά σειρά προτεραιότητας (α) την πρόληψη και μείωση της ποσότητας των 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 2.1**). 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 2.1: 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 2.1**). Η παρουσίαση βασίζεται στην κατεύθυνση που ορίζει η Ε.Ε. σύμφωνα με την ιεράρχηση των επιλογών για τη διαχείριση των στερεών αποβλήτων.



Εικόνα 2.2: Ευρωπαϊκό νομοθετικό πλαίσιο για τη διαχείριση των στερεών αποβλήτων

Πίνακας 2.1: 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⁽²⁾. 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».

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⁽³⁾, η χρήση στη γεωργία, η υγειονομική ταφή και η θερμική επεξεργασία.

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

⁽²⁾ 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.

⁽³⁾ 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*»

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.

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)⁽⁴⁾ η Ε.Ε. έχει συντάξει κείμενα εργασίας για τη βιολογική διαχείριση τους (ΕC, 2001), ενώ σε στάδιο διαβούλευσης είναι η θέσπιση νομοθετικών μέτρων για την υποχρέωση της αύξησης των ποσοστών ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησής τους στα Κράτη Μέλη (EurActive, 2010).

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⁽⁵⁾), 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⁾ 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.

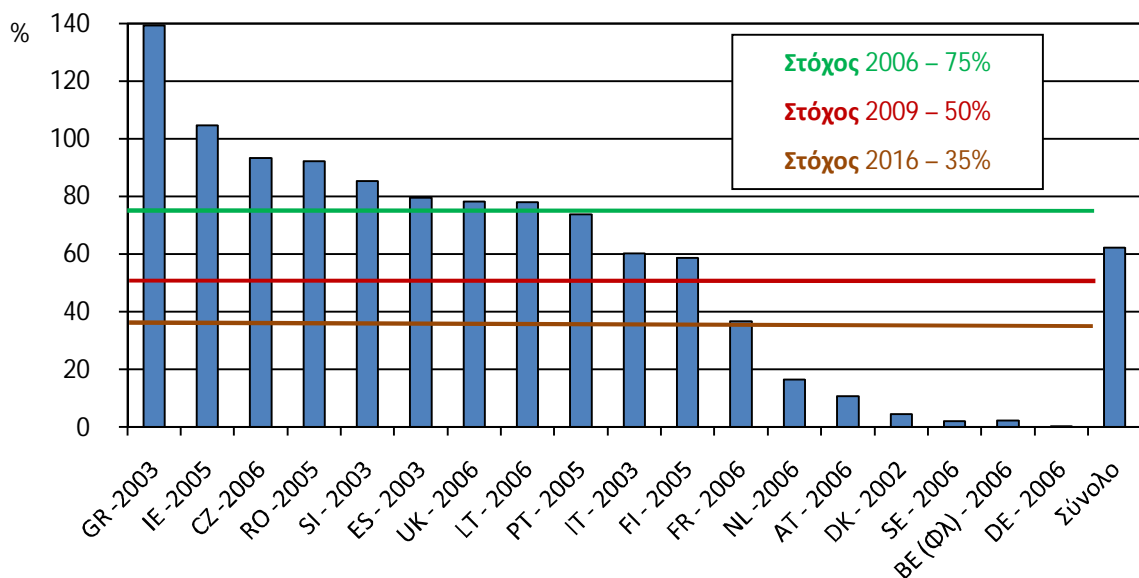
⁽⁵⁾ Εξαίρουνται τα φυτικά απόβλητα της γεωργίας και της δασοκομίας

ποσότητας των βιοαποδομήσιμων αστικών αποβλήτων⁽⁶⁾ 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.

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 2.1** 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.

⁽⁶⁾ 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 2.1: Ποσοστό διάθεσης βιοαποδομήσιμων αστικών αποβλήτων σε ΧΥΤΑ στις χώρες της Ε.Ε. με βάση τη συνολική ποσότητα που είχαν παραχθεί το 1995 (EC, 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.

2.2. Χαρακτηριστικά βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων

Σύμφωνα με το άρθρο 2 της Οδηγίας 1999/31/ΕΚ περί υγειονομικής ταφής των αποβλήτων, ως βιοαποδομήσιμα στερεά απόβλητα ορίζονται τα απόβλητα που είναι σε θέση να υποστούν αναερόβια ή αερόβια αποσύνθεση. Τα οργανικά αυτά απόβλητα δύναται να κατηγοριοποιηθούν σε έξι διακριτές κατηγορίες σύμφωνα με την πηγή και τη δραστηριότητα από την οποία προέρχονται. Οι ροές των διαφορετικών αυτών οργανικών αποβλήτων περιλαμβάνουν⁽⁷⁾:

⁽⁷⁾ Οι ροές αυτές των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων περιλαμβάνονται στον Ευρωπαϊκό Κατάλογο Αποβλήτων (ΕΚΑ) στα κεφάλαια 02, 03, 19 και 20 του καταλόγου

- τα υπολείμματα από βιομηχανίες επεξεργασίας τροφίμων
- τα κτηνοτροφικά και πτηνοτροφικά παραπροϊόντα
- τα υπολείμματα γεωργικών καλλιεργειών
- τα δασοκομικά υπολείμματα και απόβλητα δασοκομικών προϊόντων
- την ιλύ
- το οργανικό κλάσμα των αστικών στερεών αποβλήτων.

Στην παρούσα ενότητα γίνεται η περιγραφή των ιδιοτήτων και των χαρακτηριστικών των προαναφερόμενων αποβλήτων.

2.2.1. Υπολείμματα από βιομηχανίες επεξεργασίας τροφίμων

Το βιοαποδομήσιμο οργανικό κλάσμα από την επεξεργασία τροφίμων προέρχεται από βιομηχανικές μονάδες που επεξεργάζονται ή μεταποιούν τις πρώτες ύλες σε τρόφιμα κατάλληλα συσκευασμένα και τυποποιημένα προς κατανάλωση. Ως πρώτες ύλες χρησιμοποιούνται φυτικά/γεωργικά και ζωοκομικά προϊόντα, τα οποία μετατρέπονται σε μια ευρεία ποικιλία βρώσιμων τελικών προϊόντων. Οι βιομηχανίες τροφίμων είναι μονάδες, που λειτουργούν με συγκεκριμένο πρόγραμμα, ανάλογα με τις απαιτήσεις της παραγωγικής διαδικασίας. Συνεπώς, οι απαιτήσεις της παραγωγικής διαδικασίας και η ποσότητα των χρησιμοποιούμενων πρώτων υλών καθορίζουν με τη σειρά τους τη διακύμανση των ποσοτήτων και του ρυπαντικού φορτίου των αποβλήτων που προκύπτουν σε κάθε περίπτωση (Γεωργακάκης, 2008). Το φορτίο αυτό περιλαμβάνει πληθώρα παραπροϊόντων, τα οποία παράγονται κατά την επεξεργασία των πρώτων υλών και διαχωρίζονται σε δύο ευρύτερες κατηγορίες (α) σε στερεά με χαμηλή υγρασία και (β) σε ημιστερεά όπως η ιλύς. Το βιοαποδομήσιμο στερεό οργανικό κλάσμα των βιομηχανιών τροφίμων περιλαμβάνει, συνήθως, εξαντλημένα αγροτικά προϊόντα (ζωικά και φυτικά) ή υπολείμματα αγροτικών προϊόντων και παρουσιάζει παρόμοια σύσταση με τα αστικά οργανικά απορρίμματα. Οι βασικότερες βιομηχανίες τροφίμων στις οποίες παρουσιάζονται σημαντικές ποσότητες στερεών αποβλήτων με ζυμώσιμο φορτίο είναι οι εξής: (α) γαλακτοβιομηχανία, (β) βιομηχανία επεξεργασίας μεταποίησης ζωικών πρώτων υλών, (γ) αλιευτική βιομηχανία, (δ) βιομηχανία επεξεργασίας/μεταποίησης φυτικών πρώτων υλών και (ε) βιομηχανία επεξεργασίας και συντήρησης φρούτων και λαχανικών (Πίνακας 2.2).

Πίνακας 2.2: Ενδεικτικές πηγές βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων στις βιομηχανίες τροφίμων (Ντακαράς, 2006; Schaub and Leonard, 1996)

Βιομηχανία	Βιοαποδομήσιμα Οργανικά Απόβλητα
Γαλακτοβιομηχανία (ΕΚΑ ⁽¹⁾ 0205)	Τα στερεά βιοαποδομήσιμα οργανικά απόβλητα αποτελούνται κυρίως από την παραγόμενη ιλύ στις μονάδες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων.
Βιομηχανία επεξεργασίας/μεταποίησης ζωικών πρώτων υλών (ΕΚΑ 0202)	Η σύνθεση των στερεών οργανικών αποβλήτων είναι συνάρτηση του είδους των ζωοκομικών προϊόντων και της δυναμικότητας των μονάδων επεξεργασίας. Βασική ροή οργανικών αποβλήτων αποτελεί η ιλύς από τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων. Άλλες ροές είναι η κοπριά, τα εντόσθια, το αίμα, τα λιπίδια και λοιπά οργανικά υπολείμματα. Τα μη-εδώδιμα υποπροϊόντα των κτηνοσφαγείων είναι συνήθως σε ποσοστό 25-30% ανά ζώο, ενώ στα πτηνοσφαγεία κυμαίνεται σε ποσοστό 20-25% ανά πτηνό.
Αλιευτική βιομηχανία (ΕΚΑ 0202)	Η ποσότητα στερεών οργανικών αποβλήτων είναι μεταξύ 5-65% wb της αρχικής πρώτης ύλης και εξαρτάται από τις μεθόδους επεξεργασίας και μεταποίησης καθώς και από το τελικό παραγόμενο προϊόν. Στην κατηγορία αυτή των αποβλήτων περιλαμβάνονται ολόκληρα ψάρια, κόκκαλα, κεφάλια ψαριών, πτερύγια, ουρές, δέρμα και εντόσθια.
Βιομηχανία επεξεργασίας/μεταποίησης φυτικών πρώτων υλών (ΕΚΑ 0203)	Στην κατηγορία αυτή εμπίπτουν όλα τα παραπροϊόντα τα οποία προκύπτουν από τις διεργασίες θερισμού και συλλογής των αγροτικών καρπών όπως ο καθαρισμός, το αλώνισμα, το κοσκίνισμα και η σύνθλιψη. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται πληθώρα βιομηχανιών μεταξύ άλλων τα <i>ελαιοτριβεία, η βιομηχανία καφέ, οινοποιίας, μύυρας, αρτοποιίας</i> κ.α.
• <i>Ελαιοτριβεία πυρηνελαιουργεία</i>	Τα στερεά οργανικά απόβλητα των ελαιοτριβείων περιλαμβάνουν τα φύλλα ελαιοδέντρων από το στάδιο του καθαρισμού και διαλογής του ελαιόκαρπου, το πυρηνόξυλο που απομένει μετά την εκχύλιση των ελαιοπυρήνων και την ελαιόπαστα (olive cake) η οποία προκύπτει ύστερα από την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων των ελαιουργείων.
• <i>Βιομηχανία αρτοποιίας και ζαχαροπλαστικής</i>	Τα στερεά οργανικά απόβλητα περιλαμβάνουν κυρίως απώλειες από ζύμες, ελλειποβαρή προϊόντα, προϊόντα με μη κατάλληλη μορφή καθώς και μέρη προϊόντων τα οποία δεν είναι κατάλληλα για περαιτέρω προώθηση στην αγορά.
• <i>Βιομηχανία καφέ</i>	Ανάλογα τη μέθοδο επεξεργασίας των καρπών του καφέ, υγρή ή ξηρή επεξεργασία, τα στερεά οργανικά υπολείμματα είναι η πούλπα (pulp) ή το κέλυφος/φλοιός του καφέ αντίστοιχα.
• <i>Βιομηχανία οινοποιίας</i>	Τα στερεά απόβλητα των οινοποιείων προέρχονται από τον διαχωρισμό των στεμφύλων (3-7% της μάζας του σταφυλιού) και την πομάσσο το στερεό κατάλοιπο το οποίο προκύπτει από το πρεσάρισμα του ζυμωμένου χυμού των σταφυλιών στο πιεστήριο (30-40% νερό και περίπου 12 % του αρχικού βάρους του σταφυλιού).
• <i>Βιομηχανία ζυθοποιίας</i>	Το ζυμώσιμο κλάσμα των αποβλήτων ζυθοποιίας ανέρχεται στα 100 kg ανά 1000 kg κριθαριού και περιλαμβάνει τα υπολείμματα της βύνης (π.χ. ριζίδια), τη βαγάσση (bagasse), τους εξαντλημένους σπόρους κριθαριού, τη μαγιά και το υπόλειμμα ζυθογλεύκους.
Βιομηχανία επεξεργασίας και συντήρησης φρούτων και λαχανικών (ΕΚΑ 0203)	Σημαντικός όγκος στερεών αποβλήτων προκύπτει στα στάδια αποφλοιώσης, τεμαχισμού και καθαρισμού. Μεταξύ άλλων περιλαμβάνονται σαρκώματα καρπού, πούλπα, φλοιοί, σπόροι, πυρήνες. Ενδεικτικό εύρος τιμών αυτών των αποβλήτων είναι 3-5% wb της αρχικής πρώτης ύλης αλλά το ποσοστό εξαρτάται σημαντικά από το είδος της πρώτης ύλης και το επιθυμητό τελικό προϊόν. Επιπλέον στερεό απόβλητο αποτελεί και η ιλύς προερχόμενη από τις μονάδες επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων.

⁽¹⁾ Ευρωπαϊκός Κατάλογος Αποβλήτων

Στις *γαλακτοβιομηχανίες* το βασικό βιοαποδομήσιμο οργανικό μέρος των στερεών αποβλήτων που παράγεται είναι η ιλύς από τις μονάδες επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων. Η ιλύς παρουσιάζει υψηλό οργανικό φορτίο το οποίο εμπεριέχει λίπη και έλαια, ωστόσο η σύσταση και τα χαρακτηριστικά της διαφοροποιούνται σημαντικά μεταξύ των βιομηχανιών και εξαρτάται από τα είδη των παραγόμενων προϊόντων (π.χ. φρέσκο και συμπυκνωμένο γάλα, τυρί, βούτυρο). Σύμφωνα με το Διεθνή Οργανισμό Τροφίμων και Γεωργίας η παραγόμενη ιλύς είναι μεταξύ 0.1-0.5 kg ανά kg παραγόμενου COD το οποίο απομακρύνεται (Verheijen et al., 1996). Ενδεικτικές τιμές των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών της ιλύος παρατίθενται στον **Πίνακα 2.3**.

Πίνακας 2.3: Ενδεικτικά χαρακτηριστικά ιλύος γαλακτοβιομηχανιών (Ranalli et al., 2001; Elvira et al., 1998)

Παράμετρος	Τιμή
pH	7.1-7.6
TS (% wb)	17.0
FS (% dm)	3.2
TOC (% dm)	23.4-36.8
N (% dm)	6.2
C/N	5.4-5.9
P (% dm)	2.6

Τα περισσότερα στερεά απόβλητα που προκύπτουν από την πρωτογενή *μεταποίηση των ζωικών πρώτων υλών* δύναται να επεξεργαστούν περαιτέρω για την παραγωγή δευτερογενών προϊόντων. Ωστόσο η ιλύς, η οποία προκύπτει από τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας υγρών αποβλήτων των συγκεκριμένων βιομηχανιών, η κοπριά και τα εντερικά στερεά απόβλητα εμπεριέχουν σημαντικό οργανικό φορτίο και χρήζουν κατάλληλης επεξεργασίας. Στα παραπάνω απόβλητα συμπεριλαμβάνονται και σημαντικές ποσότητες αίματος, λιπιδίων και υπολειμμάτων. Τα απόβλητα αυτού του τύπου χαρακτηρίζονται από τυπικές υψηλές τιμές υγρασίας (90-95%), αζώτου και BOD ενώ επίσης παρουσιάζουν έντονες οσμές, ωστόσο είναι άμεσα βιοαποδομήσιμα (Schaub and Leonard, 1996). Ενδεικτικά χαρακτηριστικά της παραγόμενης ιλύος από βιομηχανίες επεξεργασίας και μεταποίησης ζωικών πρώτων υλών δίνεται στον **Πίνακα 2.4** για διαφορετικά είδη εκτρεφόμενων ζώων.

Πίνακας 2.4: Τυπικά χαρακτηριστικά ιλύος από βιομηχανίες επεξεργασίας και μεταποίησης ζωικών πρώτων υλών (USDA-SCS, 2008)

Παράμετρος	Πρωτοβάθμια ιλύς			Δευτεροβάθμια ιλύς
	Πουλερικά	Χοίροι	Βοοειδή	
Υγρασία (% wb)	94.2	92.5	94.5	96.0
TS (% wb)	5.8	7.5	5.5	4.0
VS (% wb)	4.8	5.9	4.4	3.4
FS (% wb)	1.0	1.6	1.1	0.6
COD (% wb)	7.8	N/A	N/A	N/A
N (% wb)	0.41	0.53	0.40	0.20
NH ₄ -N (% wb)	0.17	N/A	N/A	N/A
P (% wb)	0.12	N/A	N/A	0.04

N/A: Μη διαθέσιμα δεδομένα

Τα οργανικά κατάλοιπα από την *αλιευτική βιομηχανία* παρουσιάζουν έντονες οσμές ενώ χαρακτηρίζονται από υψηλή περιεκτικότητα σε άζωτο και υγρασία, αλκαλικό pH και χαμηλή συγκέντρωση σε ολικά στερεά. Σημαντική παράμετρος ως προς τη διαχείριση των οργανικών αυτών αποβλήτων είναι η σχετική ομοιογένεια που παρουσιάζουν ως προς τη σύστασή τους (Schaub and Leonard, 1996).

Τα οργανικά στερεά απόβλητα τα οποία προέρχονται από τις *βιομηχανίες επεξεργασίας και μεταποίησης φυτικών πρώτων υλών* παρουσιάζουν μια ευρύτατη ποικιλία παραπροϊόντων τα οποία προέρχονται από τις πολυάριθμες προς επεξεργασία και μεταποίηση φυτικές πρώτες ύλες. Τα οργανικά απόβλητα αυτής της ροής έχουν ετερογενή σύσταση και δεν είναι υδατοδιαλυτά υλικά. Τα περισσότερα παρουσιάζουν υψηλό λόγο C/N λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς τους σε ανθρακούχες ενώσεις όπως η κυτταρίνη, η ημικυτταρίνη και η λιγνίνη. Στις περισσότερες περιπτώσεις η περιεχόμενη υγρασία είναι σε χαμηλά επίπεδα εξαρτώμενη σημαντικά από το είδος της επεξεργασίας που υπόκεινται τα απόβλητα (Thomsen, 2005; Schaub and Leonard, 1996). Ενδεικτικά χαρακτηριστικά των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων των βιομηχανιών επεξεργασίας και μεταποίησης φυτικών πρώτων υλών παρατίθενται στον **Πίνακα 2.5**.

Πίνακας 2.5: Χημικά χαρακτηριστικά υπολειμμάτων βιομηχανιών μεταποίησης φυτικών πρώτων υλών (Philippoussis, 2009)

Υπόλειμμα	Κυτταρίνη (% dm)	Ημικυτταρίνη (% dm)	Λιγνίνη (% dm)	FS (% dm)	N (% dm)	C/N
Σπόροι ζυθοποιίας	16.0-18.0	26.4-30.4	27.5-28.1	4.6-5.5	4.1-4.5	11.6-12.2
Φλοιός καρύδας/κοκοφοίνικας	21.0-36.0	12.0-22.7	41.0-48.0	2.7-10.2	0.1-1.1	77.6-124.2
Πούλπα καφέ/φλοιός	23.0-29.1	15.1-17.1	13.0-26.0	4.5-6.3/ 1.0-6.0	1.4-1.9/ 0.9-1.0	53.5-59.4
Ρίζες αραβοσίτου	28.0-45.0	35.0-43.0	11.0-17.0	4.4-4.8	0.4-1.1	64.2-71.6
Φλοιός βαμβακιού	52.0-90.0	5.2-20.0	4.0-12.0	2.6-8.4	0.3-1.4	40.0-59.0
Φλοιός φουντουκιού	21.5-37.5	20.6-24.9	29.6-35.1	8.2-8.7	0.8-0.9	50.6-58.6
Φλοιός ρυζιού	28.0-43.0	17.5-20.6	21.5-22.5	16.7-21.4	0.3-0.4	100.0-136.0
Βαγάση ζαχαροκάλαμου	26.6-40.0	19.0-30.0	19.0-23.3	1.5-5.0	0.2-0.8	120.0-190.0
Κέλυφος σπόρων ηλίανθου	31.3-42.7	24.0-25.2	23.2-28.7	3.0-3.3	0.6-0.9	60.0-72.4

Τα οργανικά στερεά απόβλητα τα οποία προέρχονται από τις *βιομηχανίες επεξεργασίας και συντήρησης φρούτων και λαχανικών* παρουσιάζουν σε μεγάλο ποσοστό παρόμοια χαρακτηριστικά με αυτά της αρχικής προς επεξεργασία πρώτης ύλης λόγω της φύσης των διεργασιών σε τέτοιου τύπου βιομηχανίες. Η ροή αυτή των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων, ως επί το πλείστον, εμφανίζει υψηλά ποσοστά σε υγρασία, τυπικά από 80-90%, ενώ το pH παρουσιάζεται όξινο (Schaub and Leonard, 1996). Ενδεικτικά φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των αποβλήτων βιομηχανιών επεξεργασίας και συντήρησης φρούτων και λαχανικών παρατίθενται στον **Πίνακα 2.6**.

Πίνακας 2.6: Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά αποβλήτων βιομηχανιών επεξεργασίας και συντήρησης φρούτων και λαχανικών (% wb) (USDA-SCS, 2008)

Φρούτα/λαχανικά	Υγρασία	TS	VS	FS	N	P	K
Μπανάνα - φρέσκια	84.0	16.0	13.9	2.1	0.53	N/A	N/A
Μπρόκολο - φύλλο	86.5	13.5	N/A	N/A	0.30	N/A	N/A
Λάχανο - φύλλο	90.4	9.6	8.6	1.0	0.14	0.034	N/A
Καρότο - άνω τμήμα	84.0	16.0	13.6	2.4	0.42	0.03	N/A
Καρότο - βολβός	87.4	12.6	11.3	1.3	0.25	0.04	N/A
Καλαμπόκι - άνω τμήμα	79.8	20.2	19.0	12	0.67	N/A	N/A
Μαρούλι - άνω τμήμα	94.6	5.4	4.5	0.9	0.05	0.027	N/A
Κρεμμύδι - άνω τμήμα	8.6	91.4	84.7	6.7	1.37	0.02	N/A
Πορτοκάλι - φρέσκο	87.2	12.8	12.2	0.6	0.26	N/A	N/A
Πορτοκάλι - πούλπα	84.0	16.0	15.0	1.0	0.24	N/A	N/A
Πατάτα - άνω τμήμα ώριμο	12.8	87.2	17.5	15.7	1.22	N/A	N/A
Κολοκύθα - φρέσκια	91.3	8.7	7.9	0.8	0.12	0.037	N/A
Σπανάκι - μίσχος	93.5	6.5	N/A	N/A	0.065	N/A	N/A
Ντομάτα - φρέσκια	94.2	5.8	5.2	0.6	0.15	0.03	0.30
Ντομάτα - υπολείμμα	88.9	11.1	10.2	0.9	0.22	0.044	0.089

N/A: Μη διαθέσιμα δεδομένα

2.2.2. Κτηνοτροφικά και πτηνοτροφικά απόβλητα

Τα κτηνοτροφικά και πτηνοτροφικά οργανικά απόβλητα αποτελούν υποπροϊόν ή παράγωγο των διεργασιών εκτροφής αγροτικών ζώων και πτηνών. Σύμφωνα με τον ΕΚΑ η ροή αυτή των οργανικών αποβλήτων εμπίπτει στο κεφάλαιο 020106 του καταλόγου. Τα απόβλητα των πτηνοκτηνοτροφικών μονάδων ποικίλλουν σε σύσταση, μορφή και όγκο, ανάλογα με τις συνθήκες εκτροφής, το σιτηρέσιο, την εποχικότητα (κλιματολογικές συνθήκες), την ηλικία και το είδος των εκτρεφόμενων ζώων. Είναι γενικά απόβλητα οργανικής προέλευσης και περιέχουν κοπριές, ούρα ζώων και υπολείμματα ζωοτροφών που αναμιγνύονται με τα απόβλητα. Επομένως, τα απόβλητα αυτού του τύπου μπορεί να είναι σε υγρή, υδαρή, ημιστερεή ή στερεή κατάσταση. Η σημαντικότερη ροή στερεών βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων των πτηνοκτηνοτροφικών μονάδων είναι η κοπριά. Ενδεικτικά φυσικοχημικά χαρακτηριστικά και παραγόμενες ποσότητες της κοπριάς παρουσιάζονται στο **Παράρτημα Ι** για τα είδη των εκτρεφόμενων ζώων.

2.2.3. Γεωργικά υπολείμματα καλλιεργειών

Τα υπολείμματα γεωργικών καλλιεργειών αποτελούν το μη βρώσιμο μέρος του φυτού, το οποίο απομένει στον αγρό ύστερα από την απομάκρυνση και συλλογή του παραγόμενου καρπού. Σύμφωνα με τον ΕΚΑ η ροή αυτή των οργανικών αποβλήτων εμπίπτει στο κεφάλαιο 0201 του καταλόγου. Οι παραγόμενες ποσότητες αγροτικών υπολειμμάτων εξαρτώνται από πληθώρα παραμέτρων όπως το είδος των καλλιεργειών, την αμειψισπορά, το μίγμα των καλλιεργειών καθώς και από το μέγεθος της παραγωγής καρπών η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από τη σοδειά και την αρόσιμη έκταση. Ο συνηθέστερος τρόπος για την εκτίμηση των ποσοτήτων των παραγόμενων αγροτικών υπολειμμάτων πραγματοποιείται με τη χρήση του λόγου των υπολειμμάτων προς το παραγόμενο προϊόν (Residue to Product Ratio – RPR) για κάθε είδος καλλιέργειας. Ενδεικτικοί λόγοι παρατίθενται στο **Παράρτημα ΙΙ**.

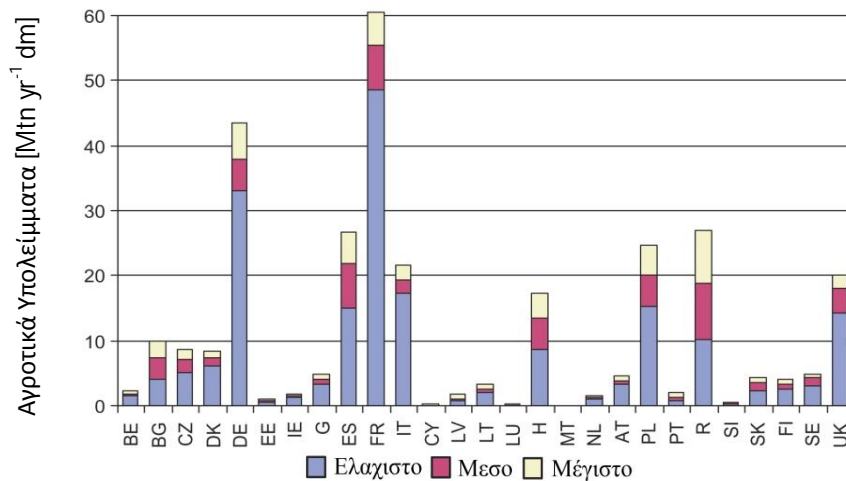
Οι ποσότητες των παραγόμενων αγροτικών υπολειμμάτων παγκοσμίως σε 27 είδη καλλιεργειών υπολογίζονται περίπου στους $4 \cdot 10^9$ tn εκ των οποίων οι $3 \cdot 10^9$ tn προέρχονται από υπολείμματα καλλιεργειών δημητριακών (**Παράρτημα II**) (Lal, 2008; Lal, 2005). Τα δημητριακά αποτελούν το 45% της παγκόσμιας παραγωγής και από αυτά προέρχονται οι μεγαλύτερες ποσότητες γεωργικών υπολειμμάτων όπως από καλλιέργειες σιταριού, κριθαριού, ρυζιού, αραβόσιτου κ.α. (FAO, 2001). Τα φύλλα και οι μίσχοι των ζαχαροκάλαμων αποτελούν την επόμενη σημαντική πηγή υπολειμμάτων ενώ εξίσου σημαντικές ποσότητες προέρχονται από καλλιέργειες βαμβακιού, ηλίανθου, φοινίκων, καρυδών, μπανανών, σταφυλιών, ξηρών καρπών και καφέ. Η εκτιμώμενη δυναμικότητα αγροτικών υπολειμμάτων παγκοσμίως παρατίθεται στον **Πίνακα 2.7**.

Πίνακας 2.7: Ποσότητες των κυριότερων παραγόμενων υπολειμμάτων γεωργικών καλλιεργειών σε διάφορες περιοχές ανά τον κόσμο

Χώρα-Ηπειρος	Ποσότητα (tn yr ⁻¹)	Υπολείμματα καλλιεργειών	Βιβλιογραφία
Κίνα	10^9	ρύζι, καλαμπόκι, σιτάρι	Zhang (2008), Qu et al. (2006)
Ινδίες	$200 \cdot 10^6$ - $480 \cdot 10^6$	ρύζι, σιτάρι, κεχρί, σόργο, όσπρια, καλλιέργειες ελαιούχων, αραβόσιτος, βαμβάκι, ζαχαροκάλαμο	Mande (2005), Das and Singh (2004)
Αυστραλία	$100 \cdot 10^6$	-	Moghtaderi et al. (2006)
Αφρική	$40 \cdot 10^6$	ρύζι, σιτάρι και ζαχαροκάλαμο	Kim and Dale (2004)
Κεντρική και Νότια Αμερική	$140 \cdot 10^6$	ρύζι, σιτάρι, καλαμπόκι και ζαχαροκάλαμο	Kim and Dale (2004)
ΗΠΑ	$933 \cdot 10^6$	καλαμπόκι, σιτάρι, ρύζι, κριθάρι, σόργο, καρύδα, ζαχαροκάλαμο, ανανάς και μπανάνας	USDA-US DOE (2005)
Ευρώπη	$120 \cdot 10^6$	σιτάρι, κριθάρι, αραβόσιτος, ηλίανθος, ελαιοκράμβη, βαμβάκι, ελιές, σταφύλια	Nikolaou et al. (2003)
EU 27	$200 \cdot 10^6$ - $305 \cdot 10^6$	σιτάρι, κριθάρι, αραβόσιτος, ηλίανθος, ελαιοκράμβη, ρύζι, βρώμη, σίκαλη	Scarlat et al. (2010)

Σύμφωνα με τους Scarlat et al. (2010) η συνολική παραγόμενη ποσότητα αγροτικών υπολειμμάτων στην Ε.Ε.-27 ετησίως εκτιμάται κατά μέσο όρο στους $258 \cdot 10^6$ tn dm με δεκαετή περίοδο διακύμανσης μεταξύ $200 \cdot 10^6$ και $305 \cdot 10^6$ tn dm ετησίως, λόγω της διακύμανσης που παρουσιάζεται στην παραγωγή καρπών. Με βάση την ίδια πηγή η εκατοστιαία συμβολή σε αγροτικά υπολείμματα των εξεταζόμενων καλλιεργειών έχει ως εξής: σιτάρι (42.2%), σίκαλη (3.6%), βρώμη (3.2%), κριθάρι (18.8%), αραβόσιτο (18.8%), ρύζι (1.3%), ηλίανθος (5.2%) και ελαιοκράμβη (6.9%). Στο **Διάγραμμα 2.2** απεικονίζεται η ελάχιστη, η μέγιστη και η μέση παραγωγή αγροτικών υπολειμμάτων ανά Κράτος Μέλος για την εξεταζόμενη χρονική περίοδο των 10 ετών. Γενικά τα γεωργικά υπολείμματα είναι ετερογενή, μη υδατοδιαλυτά οργανικά υλικά τα οποία διαφοροποιούνται σημαντικά ως προς το μέγεθος, το σχήμα, τη μορφή και την πυκνότητά τους (Philippoussis, 2009). Ο κοινός συντελεστής της βιοαποδομήσιμης αυτής ροής των οργανικών αποβλήτων είναι η βασική μακρομοριακή δομή τους η οποία αποτελείται από χημικές ενώσεις όπως η κυτταρίνη, η μικκυτταρίνη και η λιγνίνη και σε μικρότερο ποσοστό από πηκτίνη, άμυλο και άλλους πολυσακχαρίτες (Thomsen, 2005). Τα χημικά χαρακτηριστικά ορισμένων επιλεγμένων γεωργικών υπολειμμάτων παρουσιάζονται στον **Πίνακα 2.8**. Επιπλέον, σύμφωνα με τους Mills and Jones (1996), τα υπολείμματα αυτά εμπεριέχουν, σε ξηρή ουσία, περίπου 0.5–1.5% N, 0.15–0.2% P, 1% K, 1% Ca, 0.5% Mg,

0.2% S, 30 mg kg⁻¹ Mn, 100 mg kg⁻¹ Fe, 30 mg kg⁻¹ Zn, 5 mg kg⁻¹ Cu, 20 mg kg⁻¹ B και 1 mg kg⁻¹ Mo. Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι οι τιμές αυτές διαφοροποιούνται ως προς το είδος του καρπού, το τμήμα του φυτού, την εποχή, την υγρασία του εδάφους καθώς και άλλες παραμέτρους οι οποίες επηρεάζουν την ανάπτυξη των φυτών.



Διάγραμμα 2.2: Ποσότητες παραγόμενων γεωργικών υπολειμμάτων (Mtn yr⁻¹ dm) ανά Κράτος Μέλος της Ε.Ε.-27 (Scarlat et al. 2010)

Πίνακας 2.8: Χημικά χαρακτηριστικά γεωργικών υπολειμμάτων σε αγρούς (Philippoussis, 2009; Manios and Verdonck, 1985; Clark et al., 1978)

Υπόλειμμα	Κυτταρίνη (% dm)	Ημικυτταρίνη (% dm)	Λιγνίνη (% dm)	FS (% dm)	N (% dm)	C/N
Αραβόσιτος στελέχη/φλοιός	36.4-40.0	25.0-29.0	13.0-21.0	3.6-7.0	0.6-0.9	55.8-77.3
Κατάλοιπα χόρτων	25.0-40.0	13.0-38.0	6.4-17.6	2.4-3.9	1.3-2.5	28.0-42.0
Στελέχη καλαμιών/κατάλοιπα	34.4-42.6	28.4-30.6	17.1-19.7	4.3-4.9	0.3-0.5	150.0-170.0
Άχυρο ρυζιού	22.8-38.4	17.7-28.5	6.4-18.0	8.3-17.8	0.5-1.1	51.4-57.8
Βλαστοί αμπελιού	34.0-60.8	17.0-21.0	20.0-22.9	N/A	N/A	N/A
Κληματίδες αμπελιού	27.0	18.7	15.9	4.8	N/A	N/A
Άχυρο αραβόσιτου	31.5-39.5	21.2-29.0	5.6-15.0	5.6-8.0	0.4-0.8	48.8-59.6
Άχυρο σιταριού	30.5	28.4	18.0	11.0	N/A	N/A

N/A: Μη διαθέσιμα δεδομένα

2.2.4. Δασοκομικά υπολείμματα και απόβλητα δασοκομικών προϊόντων

Στην κατηγορία των δασοκομικών υπολειμμάτων και των αποβλήτων δασοκομικών προϊόντων περιλαμβάνονται τα βιοαποδομήσιμα στερεά απόβλητα τα οποία προέρχονται κυρίως από τις δραστηριότητες της υλοτομίας και της συγκομιδής των δασών καθώς και από τις διεργασίες επεξεργασίας και μεταποίησης (πρωτογενής και δευτερογενής) του ξύλου. Αυτού του τύπου τα απόβλητα εμπίπτουν στα κεφάλαια 020107 και 0301 του ΕΚΑ. Επιπλέον, δασοκομικά απόβλητα προέρχονται και από τομείς που αφορούν στην εμπορία των δασοκομικών προϊόντων, τις δραστηριότητες

κατασκευών και κατεδαφίσεων καθώς και τμήματος των αστικών στερεών αποβλήτων. Η κατηγορία αυτή των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων συγκαταλέγεται στα κεφάλαια 170201 και 200138 του ΕΚΑ. Στον **Πίνακα 2.9** συνοψίζονται οι πηγές καθώς και οι τύποι των υπολειμμάτων ξυλείας της ροή αυτής των αποβλήτων (Davies et al., 2006).

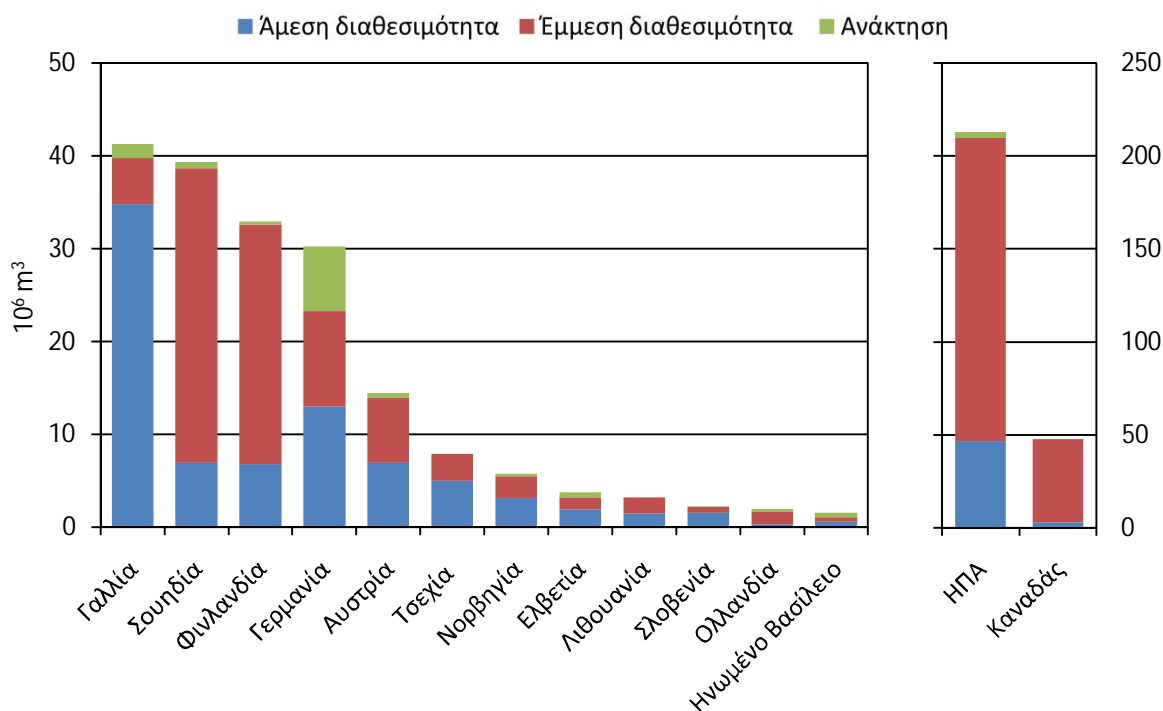
Πίνακας 2.9: Τυπικές πηγές και είδη δασοκομικών αποβλήτων (Skog and Rosen, 1997; Mckeever, 1995)

Τομέας	Πηγή	Υπολείμματα
Υλοτομία δάσους	Εργασίες υλοτομίας, συγκομιδής	Φλοιός, κλαδιά, φύλλα, απορριφθέντα δέντρα, ρίζες
Πρωτογενής μεταποίηση	Πριονιστήρια	Φλοιός, πελεκίσματα, πριονίδι, ξυλόπλακες, ξέσματα, φλούδες ξύλου
Δευτερογενής μεταποίηση	Κατασκευή δαπέδων, επίπλων, κουφωμάτων, παλετών και συσκευασιών	Κατεστραμμένα προϊόντα, πελεκίσματα, υλικά/προϊόντα για απόρριψη, σκόνη τριβείων, πριονίδι, σκόνη από κοσκίνισμα και άλεση, ξέσματα, αποκόμματα καπλαμά/απορριμμάτων
Εμπορία	Διανομείς, εισαγωγείς, έμποροι προϊόντων ξυλείας, έμποροι υπολειμμάτων ξύλου, δραστηριότητες ανάκτησης ξύλου	Πιθανά δευτερογενή κατάλοιπα μεταποίησης και απορριφθέντα/κατεστραμμένα προϊόντα
Κατασκευές και κατεδαφίσεις	Κατασκευή, κατεδάφιση, ανακαίνιση, αποδόμηση	Επιστρωμένα υλικά, επένδυση, πόρτες και κουφώματα, φράχτες, δάπεδα, ξυλεία πλαισίων, παλέτες και συσκευασίες (ολόκληρες ή σπασμένες), πάσσαλοι, στύλοι, πλαίσια παραθύρων
Αστικά στερεά απόβλητα	Οικιακά, εμπορικά και βιομηχανικά προϊόντα καθώς και προϊόντα από ιδρύματα της σχολεία, νοσοκομεία και κυβερνητικά κτίρια	Προϊόντα στο τέλος του κύκλου ζωής που προέρχονται από οικιστικές, εμπορικές και βιομηχανικές δραστηριότητες καθώς και από ιδρύματα, συμπεριλαμβανομένων ανθεκτικών και μη ανθεκτικών προϊόντων, δοχεία και συσκευασίες, έπιπλα, παιχνίδια, χαρτί και χαρτόνι, απορρίμματα ξυλείας και πίνακες, απορρίμματα κήπων και πάρκων (φύλλα, αποκόμματα χλόης, θάμνων και δέντρων)

Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Τροφίμων και Γεωργίας, λιγότερο από τα δύο τρίτα του δέντρου διατίθεται προς μεταποίηση ενώ μόλις το 28% του αρχικού δέντρου αξιοποιείται ως τελικό προϊόν (FAO, 1990). Επίσης, κατά την πρωτογενή μεταποίηση περίπου το 50% του αρχικού όγκου του υλοτομημένου δέντρου μετατρέπεται σε τελικά προϊόντα ενώ το υπόλοιπο 50% είναι υπολείμματα ξυλείας (Alderman, 1998). Εντούτοις, τα τελευταία χρόνια η βιομηχανία δασοκομίας μεταποίησης και εμπορίας δασοκομικών προϊόντων, στις αναπτυσσόμενες κυρίως χώρες, επικεντρώνεται στην εκτροπή των υπολειμμάτων ξυλείας από την τελική διάθεση. Ο στόχος αυτός υλοποιείται με την αύξηση της ανάκτησης υλικών, την ενσωμάτωση των υπολειμμάτων στην παραγωγική διαδικασία και τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και παραγωγής αποβλήτων με την εφαρμογή εναλλακτικών τεχνολογιών οι οποίες είναι οικονομικά βιώσιμες και περιβαλλοντικά φιλικές (Haeussler and Kneeshaw, 2003).

Η παραγωγή υπολειμμάτων ξυλείας στη βιομηχανία διαφοροποιείται από δέντρο σε δέντρο και εξαρτάται από παράγοντες όπως οι ιδιότητες του ξύλου καθώς και ο τύπος, η λειτουργία και η συντήρηση μεταποίησης του υλικού. Εκτός από τα υπολείμματα ακατέργαστου ξύλου τα οποία παράγονται κατά την υλοτομία και την πρωτογενή

μεταποίηση των δασών, υπολείμματα ξύλου παρουσιάζονται και κατά τη δευτερογενή μεταποίηση (π.χ. μεταποίηση επίπλων), τις δραστηριότητες κατασκευών και κατεδαφίσεων καθώς και από τα αστικά στερεά απόβλητα προερχόμενα από οικιστικές, εμπορικές και άλλες περιοχές. Οι πηγές αυτές των αποβλήτων αποτελούνται από ακατέργαστο ξύλο, βαμμένο ξύλο ή σύνθετα ξυλώδη προϊόντα (Davies et al., 2006). Αναφορικά με τις παραγόμενες ποσότητες δασοκομικών αποβλήτων, στο **Διάγραμμα 2.3** οι Steierer et al. (2007) παρουσιάζουν για επιλεγμένες χώρες ενδεικτικές τιμές της άμεσης διαθεσιμότητας δασοκομικών αποβλήτων από το δάσος, της έμμεσης διαθεσιμότητας που αφορά στη μεταποίηση και μη μεταποίηση υπολειμμάτων ξύλου καθώς και στις ποσότητες ανάκτησης ξυλινών προϊόντων, τα οποία έχουν εξυπηρετήσει το σκοπό κατασκευής τους για τουλάχιστον ένα κύκλο ζωής.



Διάγραμμα 2.3: Ενδεικτικές ποσότητες (m³) δασοκομικών αποβλήτων οι οποίες είναι διαθέσιμες ή ανακτώνται (Steeirer et al., 2007)

Η πλειονότητα των υπολειμμάτων ξυλείας είναι ακατέργαστο ξύλο και κατ' επέκταση τα χαρακτηριστικά της ροής αυτής των οργανικών αποβλήτων εξαρτώνται από το είδος του προς επεξεργασία ξύλου. Το ξύλο αποτελείται κυρίως από σύνθετες χημικές ενώσεις όπως η κυτταρίνη, λιγνίνη και η ημικυτταρίνη ενώ εμπεριέχονται σε μικρότερες ποσότητες πολυσακχαρίτες και ανόργανες ενώσεις (στερεό υπόλειμμα) (Haeussler and Kneeshaw, 2003). Η σχετική περιεκτικότητα των ενώσεων αυτών διαφοροποιείται ανάλογα με το είδος του δέντρου και τις συνθήκες ανάπτυξής του. Στον **Πίνακα 2.10** παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές της περιεκτικότητας ορισμένων χημικών στοιχείων για επιλεγμένα είδη δέντρων και υπολειμμάτων.

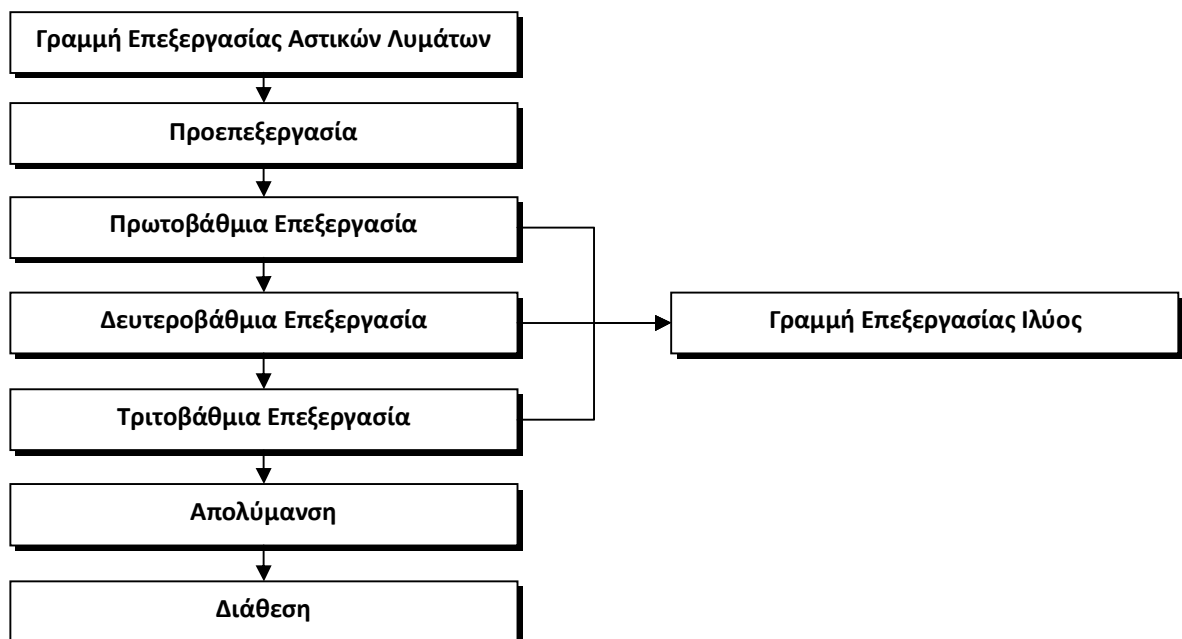
Πίνακας 2.10: Ενδεικτικά χαρακτηριστικά επιλεγμένων δέντρων και δασοκομικών υπολειμμάτων (Philippoussis, 2009; Cheremisinoff et al., 1976)

Είδος	C (% dm)	O (% dm)	H (% dm)	N (% dm)	FS (% dm)	Κυτταρίνη (% dm)	Ημικυτταρίνη (% dm)	Λιγνίνη (% dm)	C/N
Κορμός έλατου (Abiew)	53.0	39.2	6.2	N/A	0.4-1.5	43.0	27.0	28.6	N/A
Πεύκο (Pinus)	50.2	43.4	6.1	0.2	0.4-1.1	44.0	26.0	27.8	251
Πικέα (Picea)	50.0	43.5	6.0	0.2	0.3	N/A	N/A	N/A	250
Πλάτανος (Acer)	50.6	41.7	6.0	0.3	1.4	N/A	N/A	N/A	169
Βελανιδιά (Quercus)	49.2	44.2	5.8	0.4	0.4	N/A	N/A	N/A	123
Οξιά (Fagus)	48.9	44.5	5.9	0.2	0.5	N/A	N/A	N/A	245
Σημύδα (Alnus)	N/A	N/A	N/A	N/A	0.3	40.0	39.0	19.5	N/A
Ροκανίδι/Πριονίδι Μαλακό ξύλο	N/A	N/A	N/A	0.1	0.4-0.5	38-50	11-25	23-30	310-520
Ροκανίδι/Πριονίδι Σκληρό ξύλο	N/A	N/A	N/A	0.1-0.2	0.2-0.3	43-45	24-26	1.7-2.0	150-450

N/A: Μη διαθέσιμα δεδομένα

2.2.5. Ιλύς μονάδων επεξεργασίας αστικών λυμάτων

Η ιλύς αστικών υγρών αποβλήτων αποτελεί παραπροϊόν των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα κυρίως σε Μονάδες Επεξεργασίας Λυμάτων (ΜΕΛ). Πιο συγκεκριμένα η ιλύς στις συμβατικές μονάδες επεξεργασίας αστικών λυμάτων, παράγεται από την πρωτοβάθμια (φυσική ή χημική καθίζηση), τη δευτεροβάθμια (βιολογική επεξεργασία) και πιθανότατα την τριτοβάθμια επεξεργασία όπως παρουσιάζεται στην **Εικόνα 2.3**. Η ιλύς των μονάδων επεξεργασίας λυμάτων εμπίπτουν στην κατηγορία 190805 του ΕΚΑ.



Εικόνα 2.3: Στάδια επεξεργασίας αστικών υγρών αποβλήτων (Στάμου και Βογιατζής, 1994)

Η παραγόμενη ιλύς μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ανάλογα με τα στάδια των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στη μονάδα επεξεργασίας λυμάτων σε πρωτοβάθμια, δευτεροβάθμια και τριτοβάθμια ιλύ. Η πρωτοβάθμια ιλύς παράγεται κατά την πρωτοβάθμια επεξεργασία των αστικών υγρών αποβλήτων και περιλαμβάνει τη φυσική και/ή χημική επεξεργασία των λυμάτων στοχεύοντας στη μείωση της αιωρούμενης ύλης και του οργανικού φορτίου. Οι φυσικές μέθοδοι επεξεργασίας περιλαμβάνουν την καθίζηση ή την επίπλευση. Κατά την καθίζηση τα στερεά καθιζάνουν σε συνθήκες ηρεμίας υπό την επίδραση της βαρύτητας, ενώ κατά την επίπλευση τα στερεά παρασύρονται στην επιφάνεια από φυσαλίδες αέρα που διοχετεύονται στα λύματα με κατάλληλη διάταξη. Η χημική επεξεργασία περιλαμβάνει την προσθήκη κροκιδωτικών ουσιών (π.χ. $Al_2(SO_4)_3$, $FeCl_3$) στα λύματα, προκειμένου να διαμορφωθούν ευνοϊκές συνθήκες συσσωμάτωσης των αιωρούμενων και κολλοειδών στερεών βελτιώνοντας την απόδοση της φυσικής καθίζησης (Malamis, 2009). Με τις μεθόδους αυτές επιτυγχάνεται απομάκρυνση περίπου 40-60% των αιωρούμενων στερεών παράγοντας παράλληλα πρωτοβάθμια ιλύ με συγκέντρωση στερεών μεταξύ 1.5-5.0% ανάλογα με το είδος και τη συχνότητα απομάκρυνσης της ιλύος (FAO, 1992). Σύμφωνα με τους Turovskiy and Mathai (2006) ως εμπειρικός κανόνας ισχύει ότι η παραγόμενη ποσότητα πρωτοβάθμιας ιλύος είναι περίπου ίση με $0.05 \text{ kg capita}^{-1} \text{ d}^{-1}$.

Η δευτεροβάθμια ιλύς προκύπτει από την βιολογική οξείδωση του οργανικού φορτίου από τους μικροοργανισμούς που αναπτύσσονται κατά τη βιολογική επεξεργασία των λυμάτων με μεθόδους οι οποίες μπορούν να διαχωριστούν σε δύο ευρύτερες κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τις μεθόδους κατά τις οποίες οι μικροοργανισμοί αναπτύσσονται υπό αιώρηση στα λύματα (σύστημα ενεργού ιλύος, οξειδωτικών τάφρων, βιοαντιδραστήρες μεμβρανών) ενώ στη δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνονται αυτές στις οποίες οι μικροοργανισμοί είναι προσκολλημένοι σε κάποια επιφάνεια (βιολογικά φίλτρα, βιολογικοί δίσκοι) (Στάμου και Βογιατζής, 1994; Turovskiy and Mathai, 2006). Στην περίπτωση των μεθόδων της πρώτης κατηγορίας η παραγόμενη δευτεροβάθμια ιλύς αποτελείται κυρίως από βιομάζα με περιεκτικότητα σε στερεά ίση με 1%, ενώ η ιλύς στη δεύτερη κατηγορία έχει περιεκτικότητα σε στερεά ίση με 4-5%. Με το συνδυασμό πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας επεξεργασίας επιτυγχάνεται συνήθως ελάττωση του ρυπαντικού φορτίου των αστικών λυμάτων σε ποσοστό μεταξύ 80-90%. Αξίζει να αναφερθεί ότι σε αρκετές περιπτώσεις παρουσιάζεται σε μονάδες επεξεργασίας λυμάτων η ανάμιξη πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας ιλύος.

Η τριτοβάθμια ιλύς παράγεται από τη διεργασία της διήθησης της δευτεροβάθμιας εκροής των λυμάτων δια μέσου φίλτρων και μεμβρανών υπερδιήθησης – μικροδιήθησης, ενώ οι ποσότητες είναι σημαντικά μικρότερες από την πρωτοβάθμια και δευτεροβάθμια ιλύ.

Τα χαρακτηριστικά της ιλύος διαφοροποιούνται σημαντικά και εξαρτώνται από την πηγή προέλευσης, το χρόνο ωρίμανσης καθώς και το είδος της επεξεργασίας (Πίνακα 2.11). Τυπικές τιμές της χημικής σύνθεσης ανεπεξέργαστης πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας ιλύος παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.12. Οι ιλύες προερχόμενες από τα παραπάνω στάδια επεξεργασίας των λυμάτων υπόκεινται σε πύκνωση και αφυδάτωση για τη μείωση της περιεχόμενης υγρασίας και του όγκου της ιλύος προκειμένου η διαχείρισή της να είναι ευνοϊκότερη (Στάμου και Βογιατζής, 1994).

Πίνακας 2.11: Φυσικά χαρακτηριστικά παραγόμενων ιλύων (Metcalf and Eddy, 2003)

Τύπος ιλύος	Περιγραφή
Πρωτοβάθμια	Η ιλύς προερχόμενη από δεξαμενές πρωτοβάθμιας καθίζησης έχει συνήθως γκρίζο χρωματισμό και γλοιώδης-βλεννώδης υφή ενώ στις περισσότερες των περιπτώσεων παρουσιάζει έντονες δυσάρεστες οσμές.
	Η ιλύς προερχόμενη από χημική κατακρήμνιση έχει συνήθως μαύρο χρωματισμό ενώ παρουσιάζει δυσάρεστες οσμές λιγότερο έντονες από ότι η ιλύς πρωτοβάθμιας καθίζησης. Η υφή της ιλύος είναι σε κάποιο βαθμό γλοιώδης-βλεννώδης η παρουσία όμως ορισμένων χημικών διαμορφώνουν μια πηκτοειδής υφή.
Δευτεροβάθμια	Η ενεργός ιλύς παρουσιάζει γενικά καφετί χρωματισμό και μη-έντονη χωμάτινη οσμή. Σκούρα απόχρωση υποδεικνύει ότι η ιλύς τείνει να οδηγηθεί σε σηπτικές συνθήκες ενώ σε πιο ανοιχτόχρωμες αποχρώσεις από τις συνήθεις υποδεικνύει συνθήκες μειωμένης παροχής αέρα με τάση καθίζησης των στερεών.
	Η ιλύς προερχόμενη από συστήματα προσκολλημένης βιομάζας παρουσιάζει παρόμοια χαρακτηριστικά με την ενεργό ιλύ.

Πίνακας 2.12: Τυπική χημική σύσταση ανεπεξέργαστης ιλύος (Metcalf and Eddy, 2003)

Παράμετρος	Ανεπεξέργαστη Πρωτοβάθμια ιλύς		Ανεπεξέργαστη Δευτεροβάθμια ιλύς
	Εύρος	Τυπικά	Εύρος
TS (% wb)	5-9	6	0.8-1.2
VS (% dm)	60-80	65	59-88
Πρωτεΐνες (% dm)	20-30	25	32-41
N (% dm)	1.5-4.0	2.5	2.4-5.0
C/N ^(α)	-	11	-
P - P ₂ O ₅ (% dm)	0.8-2.8	1.6	2.8-11.0
K - K ₂ O (% dm)	0-1	0.4	0.5-0.7
pH	5.0-8.0	6.0	6.5-8.0

^(α) Αγγελάκης et al., 2005)

Η πύκνωση της ιλύος επιτυγχάνεται με καθίζηση, η επίπλευση καθώς και με τη χρήση μηχανικών μέσων όπως η φυγοκέντρωση, η χρήση φιλτροταινίας βαρύτητας και περιστρεφόμενων κυλινδρικών τυμπάνων. Στον **Πίνακα 2.13** παρουσιάζονται τυπικές τιμές της περιεκτικότητας της ιλύος σε στερεά με τη χρήση φιλτροταινίας βαρύτητας ενώ στον **Πίνακα 2.14** δίνονται τυπικές συγκεντρώσεις πυκνωμένης ιλύος σε βαρέα μέταλλα .

Πίνακας 2.13: Τυπικές συγκεντρώσεις ολικών στερεών πριν και μετά τη διεργασία της πύκνωσης διαφορετικών ειδών ιλύος (Metcalf and Eddy, 2003)

Είδος ιλύος	TS (% wb)	
	Πριν την πύκνωση	Μετά την πύκνωση
Πρωτοβάθμια ιλύς	2.0-6.0	5.0-10.0
Δευτεροβάθμια ιλύς		
• Ενεργός ιλύς	0.5-1.5	2.0-3.0
• Ιλύς από συστήματα προσκολλημένης βιομάζας	1.0-4.0	3.0-6.0
Μίγμα Πρωτοβάθμιας Δευτεροβάθμιας ιλύος		
• Πρωτοβάθμια ιλύς και Ενεργός ιλύς	0.5-4.0	4.0-7.0
• Πρωτοβάθμια ιλύς & ιλύς από συστήματα	2.0-6.0	5.0-9.0

Πίνακας 2.14: Τυπικές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων σε ιλύ η οποία έχει υποστεί πύκνωση (Metcalf and Eddy, 2003)

Παράμετρος	Εύρος	Τυπική τιμή
As (mg kg ⁻¹ dm)	1.1-230	10
Cd (mg kg ⁻¹ dm)	1-3410	10
Cr (mg kg ⁻¹ dm)	10-99000	500
Co (mg kg ⁻¹ dm)	11.3-2490	30
Cu (mg kg ⁻¹ dm)	84-17000	800
Pb (mg kg ⁻¹ dm)	13-26000	500
Mn (mg kg ⁻¹ dm)	32-9870	260
Hg (mg kg ⁻¹ dm)	0.6-56	6
Ni (mg kg ⁻¹ dm)	2-5300	80
Zn (mg kg ⁻¹ dm)	101-49000	1700

Η αφυδάτωση αποσκοπεί στην αύξηση της συγκέντρωσης των στερεών της ιλύος σε υψηλά επίπεδα με την απομάκρυνση της υγρασίας. Η ιλύς ύστερα από τη διεργασία της αφυδάτωσης εμφανίζεται σε στερεή κατάσταση και με μειωμένο όγκο καθιστώντας ευκολότερη και οικονομικότερη την περαιτέρω επεξεργασία και διάθεσή της. Η αφυδάτωση επιτυγχάνεται με φυσική εξάτμιση και αποστράγγιση του νερού της ιλύος (κλίνες και λίμνες ξήρανσης) ή με τη χρήση μηχανικών μέσων (φυγοκέντριση και φιλτρόπρεσες). Η επιλογή της μεθόδου αφυδάτωσης καθορίζεται από παραμέτρους όπως το είδος τη ιλύος, τα χαρακτηριστικά του αφυδατωμένου προϊόντος και το διαθέσιμο χώρο. Στον **Πίνακα 2.15** παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές μείωσης της υγρασίας με φυγοκέντριση και φιλτρόπρεσα αντίστοιχα για τα διάφορα είδη ιλύος.

Πίνακας 2.15: Τυπική απόδοση συστήματος φυγοκέντρισης για την αφυδάτωση διαφορετικών ειδών ιλύος (Metcalf and Eddy, 2003)

Είδος ιλύος	TS (% wb)	
	Φυγοκέντριση	Φιλτρόπρεσα
Πρωτοβάθμια ιλύς	25-35	26-32
Δευτεροβάθμια ιλύς		
• Ενεργός ιλύς	5-20	12-20
• Ιλύς από συστήματα προσκολλημένης βιομάζας	10-20	15-23
Μίγμα Πρωτοβάθμιας Δευτεροβάθμιας ιλύος		
• Πρωτοβάθμια ιλύς και Ενεργός ιλύς	12-20	18-28
• Πρωτοβάθμια ιλύς και ιλύς από συστήματα	20-25	23-30

Για την περαιτέρω μείωση της υγρασίας καθώς και για τη σταθεροποίηση και υγειοποίησή της, η ιλύ υπόκειται σε μεθόδους επεξεργασίας όπως η ξήρανση, η αναερόβια και αερόβια βιολογική επεξεργασία, η επεξεργασία με ασβέστη καθώς και με άλλες μεθόδους όπως η καύση.

Σε γενικά πλαίσια, η παραγόμενη ιλύς στην Ελλάδα υπόκειται σε διεργασίες πάχυνσης και αφύγρυνσης (αφυδάτωση ή/και ξήρανση) ενώ η αερόβια επεξεργασία εφαρμόζεται κυρίως σε μεγάλες συμβατικές μονάδες ενεργού ιλύος (Κουλουμπής και Τσαντήλας, 2007). Ενδεικτικά φυσικοχημικά και βιολογικά χαρακτηριστικά της παραγόμενης ιλύος σε Μονάδες Επεξεργασίας Λυμάτων (ΜΕΛ) στη Ελλάδα παρουσιάζονται στους **Πίνακες 2.16** και **2.17**.

Αναφορικά με τη θρεπτική αξία της ιλύος μπορεί να διαπιστωθεί ότι περιέχει μεγάλες ποσότητες σε θρεπτικά συστατικά όπως το άζωτο και ο φώσφορος τα οποία θεωρούνται τα δύο βασικότερα στοιχεία για την ανάπτυξη των φυτών. Αντίθετα, η περιεκτικότητα σε κάλιο κυμαίνεται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα. Παρότι η ιλύς δύναται να εμπεριέχει σημαντικά θρεπτικά στοιχεία, ενδέχεται να είναι επιβαρυνμένη με ένα μεγάλο εύρος ρυπαντικών ενώσεων όπως τα βαρέα μέταλλα (π.χ. Ψευδάργυρος) και οι παθογόνοι μικροοργανισμοί.

Πίνακας 2.16: Χαρακτηριστικά ιλύος από ΜΕΛ σε περιοχές της Δυτικής και Νότιας Ελλάδας (τυπική απόκλιση) (Kouloumbis et al., 2000).

ΜΕΛ	VS (% dm)	N (% dm)	P (% dm)	K (% dm)	Na (% dm)	Cd (mg kg ⁻¹ dm)	Cu (mg kg ⁻¹ dm)	Zn (mg kg ⁻¹ dm)
Αλιβέρι	62.9 (3.1)	4.8 (0.1)	2.6 (0.3)	0.15 (0.02)	0.12 (0.03)	2.2 (0.1)	239 (2.1)	2791 (424)
Άρτα	49.2 (1.1)	3.2 (0.2)	2.3 (0.1)	0.25 (0.04)	0.06 (0.01)	2.8 (0.4)	269 (17.8)	2183 (149)
Άσπρα Σπίτια	63.4 (8.6)	5.2 (0.9)	2.7 (0.3)	0.20 (0.06)	0.14 (0.04)	3.4 (1.4)	288 (41.1)	2359 (1036)
Χαλκίδα	65.7 (3.0)	3.7 (0.4)	2.1 (0.1)	0.16 (0.02)	0.51 (0.02)	2.8 (0.0)	368 (34.6)	2256 (80)
Κόρινθος	64.3 (5.9)	3.8 (0.2)	1.4 (0.3)	0.43 (0.33)	0.31 (0.15)	2.5 (0.1)	435 (69.7)	2207 (122)
Αιτωλικό	58.5 (0.0)	4.0 (0.0)	1.4 (0.2)	0.19 (0.01)	0.31 (0.23)	-	-	-
Ιωάννινα	54.5 (2.4)	3.1 (0.3)	2.0 (0.5)	0.11 (0.03)	0.05 (0.03)	3.8 (0.6)	283 (40.9)	2122 (262)
Καλαμάτα	70.7 (4.4)	5.4 (0.6)	2.2 (0.4)	0.56 (0.27)	0.45 (0.27)	2.4 (0.9)	171 (27.5)	1888 (214)
Κλειτορία	47.6 (6.3)	3.7 (0.4)	1.0 (0.1)	0.46 (0.03)	0.06 (0.05)	-	-	-
Μεσολόγγι	54.9 (7.3)	3.5 (0.8)	1.8 (0.8)	0.15 (0.01)	0.21 (0.05)	2.4 (0.4)	337 (81.5)	2521 (0)
Μεταμόρφωση Αθήνα	39.0 (7.4)	2.2 (0.5)	1.9 (0.3)	0.14 (0.02)	0.13 (0.02)	1.8 (0.1)	232 (37.5)	-
Σπάρτη	76.3 (2.1)	6.7 (0.3)	2.2 (0.5)	0.61 (0.24)	0.08 (0.02)	1.7 (0.2)	157 (17.4)	1150 (109)

Πίνακας 2.17: Ποσότητες και χαρακτηριστικά της παραγόμενης ιλύος στην Ελλάδα σε ΜΕΛ (Andreadakis et al., 2002)

		Χαλκίδα	Χανιά	Χίος	Ιωάννινα	Ηράκλειο	Καλαμάτα	Καρδίτσα	Καστοριά	Καβάλα	Κως	Λαμία	Αθήνα – Μεταμόρφωση	Αθήνα – Ψυτάλλεια	Ρέθυμνο	Ρόδος	Θεσσαλονίκη	Βέροια
Χαρακτηριστικά ΜΕΛ																		
Δυναμικότητα (x 1000 p.e.)		73	80	40	105	164	60	36	42.6	80	20	67	700	3500	60	120	160	70
Οργανικό Φορτίο		X	M	X	M	M	X	X	X	X	X	X	M	-	X	M	M	M
Επεξεργασία Ιλύος		Αν	ΑνΧ	ΑΣ	ΑνΧ	ΑΣ	ΑΣ	ΑΣ	ΑΣ	ΑΣ	ΑΣ	ΑΣ	ΑνΧ	ΑνΧ	ΑΣ	ΑΣ	ΑνΧ	ΑΣ
Φυσικοχημικά																		
N	% dm	5.2	5.7	11	10.6	5.2	7.2	4.9	5.9	12.6	8.1	10.6	2.4	N/A	8.7	10.2	9.9	10
P	% dm	3.5	2	8.8	7.8	1.7	4.5	0.9	2.3	7.9	2.1	2.9	1.5	N/A	4.3	5.4	2	4.3
TS	%	18.5	22.6	15.8	18.8	18.4	18.1	49.9	45.5	14	34.1	18.9	N/A	N/A	15.7	17.5	23.9	16.7
VS	% dm	54.4	55.5	69.9	51	68.9	59.8	37.2	50.9	74.7	30	58.6	N/A	N/A	57	64.3	45.4	57.1
Μικροβιολογικά																		
FC	FC/g wb	11830	542	536	1180	5443	5756	854	11997	8697	538	935	N/A	N/A	1182	117	5492	1181
Βαρέα Μέταλλα																		
Ni	mg kg ⁻¹ dm	89	35	77	65	53	34	108	55	20	30	72	160	228	41	91	40	59
Zn	mg kg ⁻¹ dm	2595	2307	618	2380	1323	1857	1970	3448	1078	633	1332	1200	4140	1990	1111	1049	1908
Cr	mg kg ⁻¹ dm	97	36	69	31	29	34	69	55	21	67	98	390	981	33	95	28	60
Cd	mg kg ⁻¹ dm	2.2	2.3	2.3	4.1	3.2	3	2.4	2.5	1.9	3.2	2.9	0.8	1.6	2.4	3.8	2.8	2.8
Cu	mg kg ⁻¹ dm	203	223	216	149	237	117	193	211	76	333	236	580	327	146	313	126	103
Pb	mg kg ⁻¹ dm	214	196	124	223	159	116	159	114	83	169	125	450	264	105	267	111	55

X: Χαμηλό <0.20 kg BOD kg⁻¹ SS d⁻¹,
M: Μέτριο 0.20 – 0.60 kg BOD kg⁻¹ SS d⁻¹,
ΑνΧ: Αναερόβια Χώνευση,
ΑΣ: Αερόβια Σταθεροποίηση,
N/A: Μη διαθέσιμα δεδομένα

2.2.6. 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 2.18 και στο Διάγραμμα 2.4 ενώ ο ρυθμός παραγωγής ΑΣΑ ανά κλάδο και πληθυσμιακό εύρος απεικονίζονται στους Πίνακες 2.19 και 2.20.

Πίνακας 2.18: 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»

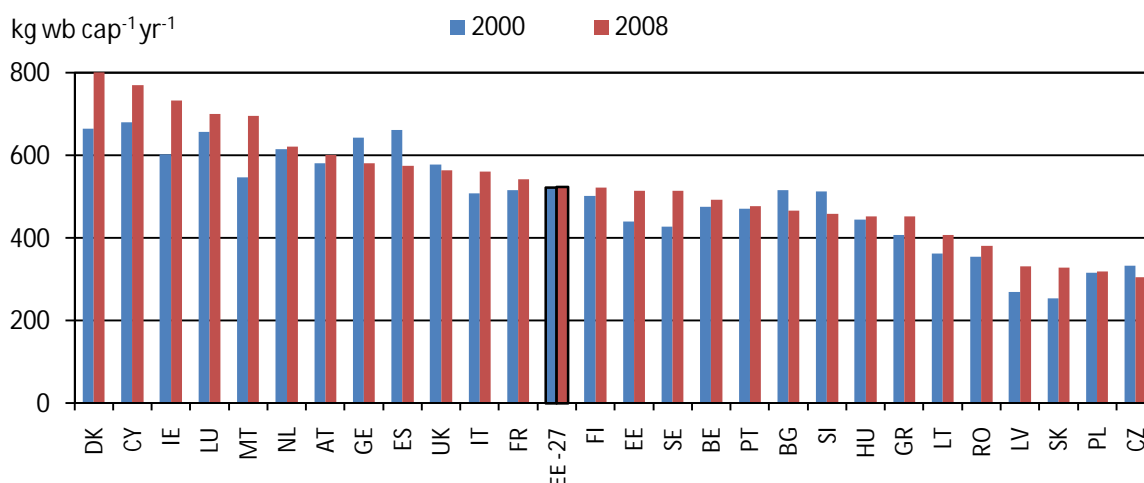
⁽³⁾ Σύμφωνα με τα δεδομένα από Αυστραλία και Νέα Ζηλανδία

Πίνακας 2.19: 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 2.20: 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 2.4: 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 πρόοδου της εκάστοτε χώρας (Cheremisnoff, 2003). Στον Πίνακα 2.21 παρουσιάζεται η μέση εκατοστιαία ποιοτική σύσταση των παραγόμενων αστικών αποβλήτων σε παγκόσμιο επίπεδο. Στο βιοαποδομήσιμο κλάσμα των ΑΣΑ εμπίπτουν τα υπολείμματα τροφίμων και ξύλου, τα πράσινα κηπευτικά απορρίμματα⁽⁸⁾ καθώς και διάφορα άλλα απόβλητα με βιοαποδομήσιμο περιεχόμενο τα οποία εμπεριέχονται στα συλλεγόμενα ΑΣΑ (EEA, 2002). Επομένως, μπορεί να διαπιστωθεί από τον Πίνακα 2.21 ότι ένα σημαντικό μέρος 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, στους Πίνακες 2.22 και 2.23 παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές των φυσικοχημικών ιδιοτήτων των ΑΣΑ συμπεριλαμβανομένων των βιοαποδομήσιμων οργανικών ροών. Επιπλέον, στον Πίνακα 2.24 παρατίθεται η στοιχειακή ανάλυση των οργανικών και ανόργανων αποβλήτων των ΑΣΑ που προέρχονται από οικιακά απόβλητα.

⁽⁸⁾ Περιλαμβάνουν υπολείμματα κλάδευσης κήπων και δημόσιων χώρων πρασίνου συμπεριλαμβανομένου και υπολειμμάτων χλοοκοπής, φυλλώματα κ.α.

Πίνακας 2.21: Σύσταση ΑΣΑ ανά τον κόσμο (% wb) (IPCC, 2006)

Περιοχή	Τροφικά Υπολείμματα	Χαρτί	Ξύλο	Υφασμα	Ελαστικά / Δέρμα	Πλαστικό	Μέταλλο	Γυαλί	Λοιπά
Ασία									
Ανατολική Ασία	26.2	18.8	3.5	3.5	1.0	14.3	2.7	3.1	7.4
Νοτιο-Κεντρική Ασία	40.3	11.3	7.9	2.5	0.8	6.4	3.8	3.5	21.9
Νοτιο-Ανατολική Ασία	43.5	12.9	9.9	2.7	0.9	7.2	3.3	4.0	16.3
Δυτική Ασία και Μέση Ανατολή	41.1	18.0	9.8	2.9	0.6	6.3	1.3	2.2	5.4
Αφρική									
Ανατολική Αφρική	53.9	7.7	7.0	1.7	1.1	5.5	1.8	2.3	11.6
Κεντρική Αφρική	43.4	16.8	6.5	2.5	-	4.5	3.5	2.0	1.5
Βόρεια Αφρική	51.1	16.5	2	2.5	-	4.5	3.5	2.0	1.5
Νότια Αφρική	23	25	15	-	-	-	-	-	-
Δυτική Αφρική	40.4	9.8	4.4	1.0	-	3.0	1.0	-	-
Ευρώπη									
Ανατολική Ευρώπη	30.1	21.8	7.5	4.7	1.4	6.2	3.6	10.0	14.6
Βόρεια Ευρώπη	23.8	30.6	10.0	2.0	-	13.0	7.0	8.0	-
Νότια Ευρώπη	36.9	17.0	10.6	-	-	-	-	-	-
Δυτική Ευρώπη	24.2	27.5	11.0	-	-	-	-	-	-
Ελλάδα ⁽¹⁾	47.0	20.0	-	-	-	8.5	4.5	4.5	15.5
Ελλάδα ⁽²⁾	40	29		2		14	3	3	9
Αμερική									
Καραϊβική	46.9	17.0	2.4	5.1	1.9	9.9	5.0	5.7	3.5
Κεντρική Αμερική	43.8	13.7	13.5	2.6	1.8	6.7	2.6	3.7	12.3
Νότια Αμερική	44.9	17.1	4.7	2.6	0.7	10.8	2.9	3.3	13.0
Βόρεια Αμερική	33.9	23.2	6.2	3.9	1.4	8.5	4.6	6.5	9.8
ΗΠΑ ⁽³⁾	25.3	32.7	5.6		7.6	12.1	8.2	5.3	3.2
Ωκεανία									
Αυστραλία και Νέα Ζηλανδία	36.0	30.0	24.0	-	-	-	-	-	-
Λοιπές	67.5	6.0	2.5	-	-	-	-	-	-

⁽¹⁾ ΚΥΑ 50910/2727/2003 (ΦΕΚ Β 1909/22.12.2003) «Μέτρα και Όροι για τη Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων. Εθνικός και Περιφερειακός Σχεδιασμός Διαχείρισης»

⁽²⁾ ΥΠΕΚΑ (2009)

⁽³⁾ USEPA (2007)

Πίνακας 2.22: Ιδιότητες συγκεκριμένων βιοαποδομήσιμων ρών 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 2.23: Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των διαφορετικών ρών των ΑΣΑ (Williams, 2005; Pichtel, 2005)

Είδος Αποβλήτου	Υγρασία (% wb)	VS (% wb)	FS (% wb)	Πυκνότητα (kg wb m ⁻³)
Τροφικά Υπολείμματα				290
Λαχανικά	78.29	17.10	1.06	
Μαγειρεμένο κρέας	38.74	56.34	3.11	
Τηγανητά λίπη	0.00	97.64	2.36	
Πράσινα Απορρίμματα				
Γρασίδι	75.24	18.64	1.62	
Φύλλα	9.97	66.92	3.82	
Κορμοί	50.00	42.25	0.50	
Αειθαλής θάμνος	69.00	25.18	0.81	
Λουλούδια	53.94	35.64	2.34	
Ξύλο και φλοιός	20.00	67.89	0.80	
Χαρτί και προϊόντα χαρτιού				70
Ανάμικτο χαρτί	10.24	75.94	5.38	
Εφημερίδες	5.97	81.12	1.43	
Χαρτόνι συσκευασίας	4.71	84.20	2.64	
Υφασμα	10.00	66	6.5	60
Πλαστικά	0.20	96	2	60
Γυαλί	2.00	-	96-99	200
Μέταλλα	2.50	-	94-99	200
Αστικά Στερεά Απόβλητα	10-40	30-60	10-30	60-120 μη συμπιεσμένα 300-900 συμπιεσμένα

Πίνακας 2.24: 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 Απορίμματα					
	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	-	-	
Ύφασμα	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

3. Βιολογική Επεξεργασία Βιοαποδομήσιμων Στερεών Αποβλήτων

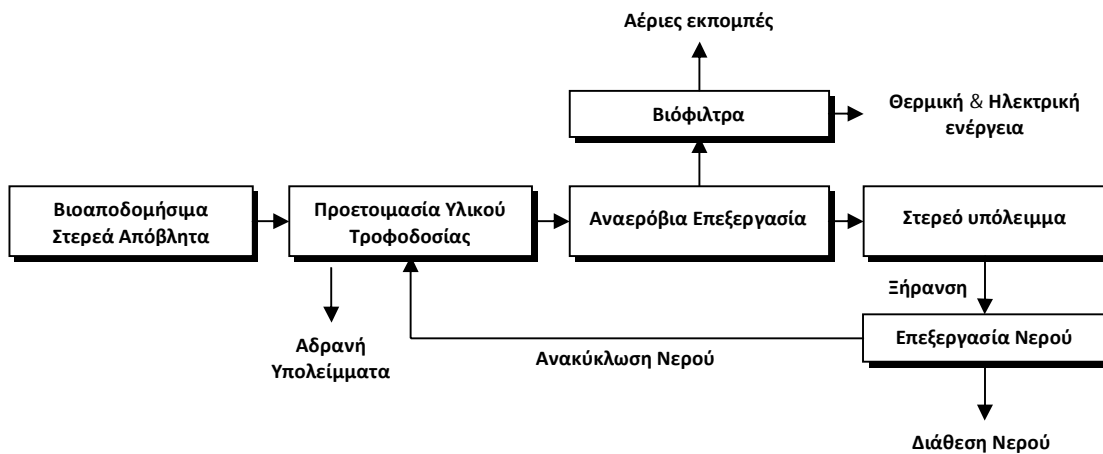
Ως επεξεργασία των στερεών αποβλήτων ορίζονται οι φυσικές, θερμικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες, συμπεριλαμβανομένης της διαλογής, που μεταβάλλουν τα χαρακτηριστικά των αποβλήτων, προκειμένου να περιοριστούν ο όγκος ή οι επικίνδυνες ιδιότητές τους, να διευκολυνθεί η διακίνησή τους ή να βελτιωθεί η ανάκτηση χρήσιμων υλών. Για την ορθή διαχείριση των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων, απαιτείται η διαμόρφωση ολοκληρωμένων συστημάτων ώστε η διαχείριση να επιτυγχάνεται με τρόπο περιβαλλοντικά αποτελεσματικό, οικονομικά εφικτό και κοινωνικά αποδεκτό. Πρέπει να επισημανθεί, ότι δεν υπάρχει μια βέλτιστη τεχνολογία για τη διαχείριση του συνόλου των παραγόμενων βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων, καθώς κάθε μία από αυτές παρουσιάζει μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα τα οποία πρέπει να λαμβάνονται υπόψη από τους αρμόδιους φορείς όταν κληθούν να λάβουν αποφάσεις σχετικά με τη διαχείριση του ρεύματος αυτού των αποβλήτων. Βασικές παράμετροι ως προς το σχεδιασμό ολοκληρωμένων συστημάτων διαχείρισης των αποβλήτων αποτελεί η ποιοτική και ποσοτική τους σύσταση καθώς και ο βαθμός ανάπτυξης της αγοράς για την αξιοποίηση των παραγόμενων προϊόντων. Οι παράμετροι αυτοί επηρεάζουν σημαντικά την αποτελεσματικότητα της τεχνολογίας που θα επιλεγεί, τόσο από οικονομικής (βιωσιμότητα της μονάδας, απαιτούμενο κόστος επεξεργασίας ή και διάθεσης) όσο και από τεχνικής και περιβαλλοντικής άποψης (βαθμός αξιοποίησης δευτερογενών προϊόντων, τελική εκτροπή από ΧΥΤΑ. κ.ά.).

Οι μέθοδοι βιολογικής επεξεργασίας των στερεών αποβλήτων δύναται να εφαρμοστούν σε απόβλητα που επιδέχονται τέτοιου είδους επεξεργασία, ήτοι σε βιοαποδομήσιμα ή οργανικά απόβλητα για τα οποία γίνεται εκτενής αναφορά στην ενότητα 2.2. Οι μέθοδοι βιολογικής επεξεργασίας βασίζονται στην ελεγχόμενη ανάπτυξη και δράση μικροοργανισμών οι οποίοι βιοαποδομούν το οργανικό κλάσμα των αποβλήτων σε απλούστερες ενώσεις. Σκοπός της βιολογικής επεξεργασίας είναι ο έλεγχος και η εξασφάλιση των κατάλληλων συνθηκών οι οποίες ευνοούν το μέγιστο δυνατό ρυθμό αναπαραγωγής των μικροοργανισμών και διάσπασης των αποβλήτων. Οι πιο ευρέως εφαρμοζόμενες μέθοδοι βιολογικής επεξεργασίας των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων είναι (α) η αναερόβια βιολογική επεξεργασία και (β) η αερόβια βιολογική επεξεργασία (κομποστοποίηση).

3.1. Αναερόβια βιολογική επεξεργασία

Κατά την αναερόβια βιολογική επεξεργασία πραγματοποιείται ελεγχόμενη αποδόμηση των οργανικών ουσιών με τη βοήθεια μικροοργανισμών απουσία οξυγόνου για την παραγωγή μερικώς σταθεροποιημένου οργανικού υλικού (ιλύς) και βιοαερίου υψηλής περιεκτικότητας σε μεθάνιο (CH_4). Το στερεό τελικό προϊόν της διεργασίας εμπεριέχει ανθεκτικές οργανικές ενώσεις οι οποίες δεν επιδέχονται περαιτέρω αποδόμηση από τους αναερόβιους μικροοργανισμούς και δύναται να αξιοποιηθεί ως οργανικό παραπροϊόν ύστερα από κατάλληλη επεξεργασία (π.χ. ξήρανση, αερόβια επεξεργασία) εφόσον ικανοποιεί τις απαραίτητες ποιοτικές προδιαγραφές (Μαυρόπουλος, 2008).

Το παραγόμενο βιοαέριο αποτελείται κυρίως από μεθάνιο (50-75%), διοξείδιο του άνθρακα (25-50%) αλλά και από άλλα αέρια (π.χ. άζωτο, υδρογόνο, χαμηλού μοριακού βάρους υδρογονάνθρακες, υδρόθειο κ.α) σε μικρότερη ποσοστιαία σύνθεση (Γιαννόπουλος et al., 2005). Η ποσότητα και η ποιότητα του βιοαερίου διαφοροποιείται ανάλογα με το σχεδιασμό της μονάδας, το χρόνο παραμονής και τη θερμοκρασία λειτουργίας καθώς και από τη σύνθεση του προς επεξεργασία οργανικού υλικού. Το βιοαέριο χρησιμοποιείται για την παραγωγή είτε ηλεκτρικού ρεύματος είτε θερμότητας ύστερα από κατάλληλη προεπεξεργασία/καθαρισμό από τις προσμίξεις. Ενδεικτικά σε ένα σύστημα αναερόβιας χώνευσης η επεξεργασία ενός τόνου απορρίμματος παράγει περίπου 150m³ βιοαέριο το οποίο περιόπου ισοδυναμεί με 306 kWh ηλεκτρικής ενέργειας ή 350 kWh θερμικής ενέργειας⁽⁹⁾ (Λυμπεράτος, 2010). Στην **Εικόνα 3.1** παρουσιάζεται ένα τυπικό διάγραμμα ροής της αναερόβιας επεξεργασίας το οποίο περιλαμβάνει τέσσερα κύρια στάδια (α) την προεπεξεργασία του οργανικού ρεύματος των αποβλήτων, (β) την αναερόβια επεξεργασία στον βιοαντιδραστήρα, (γ) την ανάκτηση του βιοαερίου και (δ) την επεξεργασία των υπολειμμάτων της ζύμωσης.

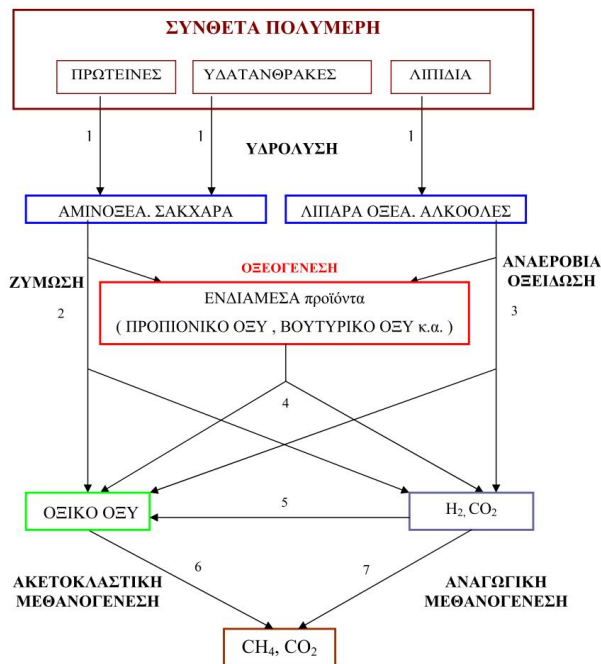


Εικόνα 3.1: Τυπικό διάγραμμα ροής της αναερόβιας βιολογικής επεξεργασίας βιοαποδομήσιμων αποβλήτων (Wright et al., 2000)

Ειδικότερα, η αναερόβια βιοαποδόμηση του σύνθετου οργανικού υλικού για την παραγωγή βιοαερίου αποτελεί, σύμφωνα με τους Pavlostathis and Giraldo-Gomez (1991), μια διεργασία πολλαπλών σταδίων με οριζόντιες και παράλληλες αντιδράσεις το σύνολο των οποίων αναπαρίσταται στην **Εικόνα 3.2**.

Αρχικά, οι σύνθετες πολυμερικές ενώσεις των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων όπως είναι οι υδατάνθρακες, οι πρωτεΐνες και τα λίπη υδρολύονται από εξωκυτταρικά ένζυμα σε διαλυτά προϊόντα μικρότερου μεγέθους τα οποία είναι διαθέσιμα προς κατανάλωση από τους μικροοργανισμούς. Οι διαλυτές αυτές ενώσεις ζυμώνονται ή οξειδώνονται αναερόβια σε πτητικά λιπαρά οξέα, αλκοόλες, διοξείδιο του άνθρακα, υδρογόνο και αμμωνία. Τα πτητικά λιπαρά οξέα μετατρέπονται σε οξικό οξύ, υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα ενώ στο τέλος η διεργασία της μεθανογένεσης (παραγωγή μεθανίου) λαμβάνει χώρα κατά την αναγωγή του διοξειδίου του άνθρακα από το υδρογόνο ή/και του οξικού οξέως.

⁽⁹⁾ Ενδεικτικά 1 m³ βιοαερίου εμπεριέχει περίπου 21MJ ενέργεια το οποίο ισοδυναμεί με 2.04kWh ηλεκτρικής ενέργειας και 2.33kWh θερμικής ενέργειας



1. Υδρόλυση του σύνθετου οργανικού υλικού
2. Ζύμωση των αμινοξέων και των σακχάρων
3. Αναερόβια οξείδωση των μεγάλου μήκους λιπαρών οξέων και αλκοολών
4. Αναερόβια οξείδωση των ενδιάμεσων προϊόντων
5. Παραγωγή οξικού οξέος από διοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο
6. Μετατροπή του οξικού οξέος σε μεθάνιο
7. Παραγωγή μεθανίου με αναγωγή του διοξειδίου του άνθρακα από το υδρογόνο

Εικόνα 3.2: Στάδια μετατροπής των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων σε CH₄ και CO₂ κατά τη διεργασία της αναερόβιας βιολογικής επεξεργασίας (Khanal, 2008; Φουντουλάκης, 2005)

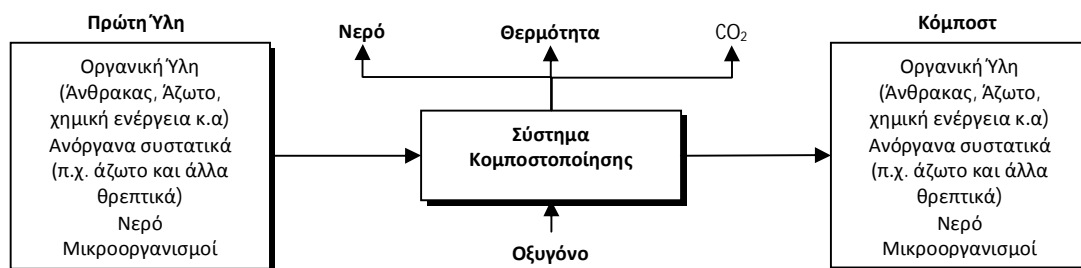
Τα συστήματα αναερόβιας χώνευσης είναι από τη φύση τους κλειστά συστήματα αποτελούμενα από οριζόντιους ή/και κατακόρυφους αντιδραστήρες, συνδεδεμένοι μεταξύ τους με δίκτυο αγωγών. Οι αντιδραστήρες αυτοί αναδεύονται με διάφορους τρόπους. Ο χρόνος παραμονής στα συστήματα αναερόβιας επεξεργασίας διαρκεί περίπου 2-3 εβδομάδες και εξαρτάται από το είδος του τροφοδοτικού υλικού και την τεχνολογία η οποία χρησιμοποιείται. Τα συστήματα αναερόβιας επεξεργασίας τα οποία απαντώνται διεθνώς για την επεξεργασία των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις κυρίως κατηγορίες οι οποίες παράλληλα προσδιορίζουν και τον τύπο της εφαρμοζόμενης τεχνολογίας. Επομένως, οι κατηγορίες των συστημάτων αναερόβιας επεξεργασίας κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με (α) τη συγκέντρωση στερεών, (β) τη θερμοκρασία, (γ) το σύστημα ανάμειξης και (δ) τον αριθμό των φάσεων/αντιδραστήρων όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.1. Ο συνδυασμός αυτών των χαρακτηριστικών μπορεί να περιγράψει την πλειονότητα των εμπορικά διαθέσιμων συστημάτων αναερόβιας επεξεργασίας αν και κάποια από τα συστήματα παραμένουν ενδιάμεσα αυτών των κατηγοριοποιήσεων.

Πίνακας 3.1: Κατηγοριοποίηση συστημάτων αναερόβιας χώνευσης

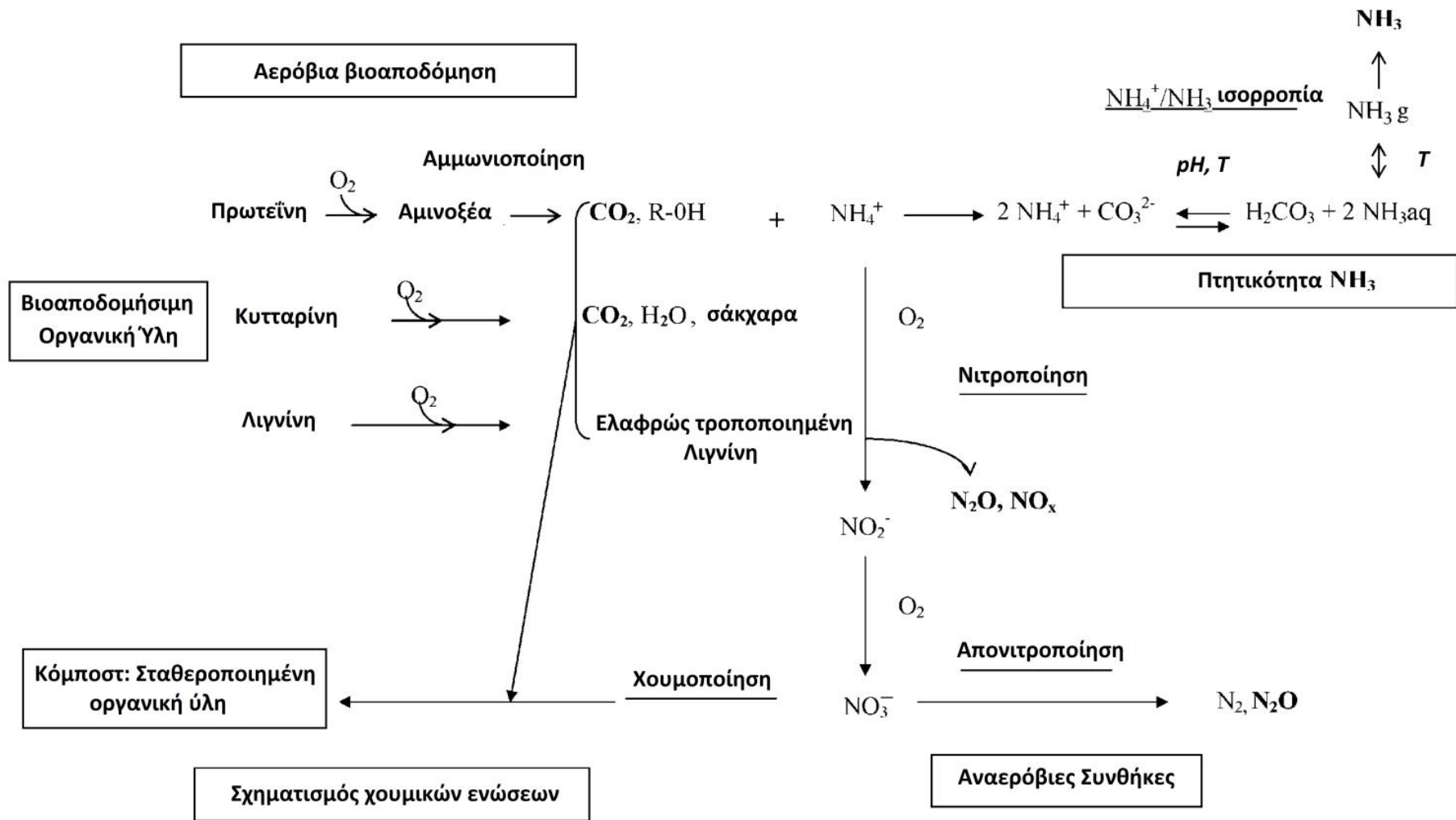
Θερμοκρασία	Συγκέντρωση στερεών	Σύστημα ανάμειξης	Αριθμός σταδίων
Μεσόφιλο (~35°C)	Χαμηλά στερεά (<10% TS)	Μηχανική ανάδευση	Ενός σταδίου (ένας αντιδραστήρας)
Θερμόφιλο (~55°C)	Μεσαία στερεά (<10-25% TS)	Ανάδευση μέσω των αερίων	Πολλαπλών σταδίων
	Υψηλά στερεά (<25% TS)	Στρωτής ροή	
		Διακοπτόμενης τροφοδοσίας	

3.2. Αερόβια βιολογική επεξεργασία (Κομποστοποίηση)

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 3.3** παρουσιάζεται σχηματικά η διεργασία της κομποστοποίησης. Η κομποστοποίηση αποτελεί μια βιολογική διεργασία βασιζόμενη στις δραστηριότητες συγκεκριμένων βακτηρίων και μυκήτων (Bhargadwaj, 1995). Κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης οι αερόβιοι μικροοργανισμοί καταναλώνουν οξυγόνο για την οξειδωση 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 (**Εικόνα 3.4**) (Pare et al., 1998). Ο ρυθμός και η έκταση αυτών των μετατροπών εξαρτώνται από παραμέτρους σχετιζόμενες με τις ιδιότητες του υποστρώματος καθώς και με τις συνθήκες ελέγχου της διεργασίας της κομποστοποίησης (Marche et al., 2003).



Εικόνα 3.3: Απεικόνιση της διεργασίας της κομποστοποίησης (Shaw and Stentiford, 1996; Rynk et al., 1992)



Εικόνα 3.4: Κύριες βιοχημικές αντιδράσεις της κομποστοποίησης (Peigné and Girardin, 2004)

3.2.1. 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 3.5**. 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 ρών των αστικών στερεών αποβλήτων (υπολείμματα τροφών, πράσινα υπολείμματα κλπ) (USEPA, 1995).

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 3.5: 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.

3.2.2. Υλικά κομποστοποίησης

Τα οργανικά απόβλητα τα οποία δύναται να διαχειριστούν με τη μέθοδο την κομποστοποίησης αφορούν κατά κύριο λόγο σε ποσότητες των ακολούθων τύπων οργανικού υλικού.

- Ιλύς προερχόμενη από αστικά υγρά απόβλητα.
Οι εν λόγω ποσότητες έχουν υποστεί φυσική επεξεργασία (αφαίρεση μέρους της υγρασίας) σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων.
- Κτηνοτροφικά απόβλητα
Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται υπολείμματα κτηνοτροφικών – πτηνοτροφικών εγκαταστάσεων (π.χ. κοπριά οικόσιτων ζώων)
- Γεωργικά υπολείμματα
Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται οργανικά απόβλητα από αγροτικές δραστηριότητες (π.χ. υπολείμματα φυτικών καλλιεργειών)
- Υπολείμματα και απόβλητα δασοκομίας
Τα οργανικά αυτά απόβλητα περιλαμβάνουν υπολείμματα ή απόβλητα τα οποία προκύπτουν από τις δραστηριότητες της υλοτομίας και συγκομιδής των δασών καθώς και από τις διεργασίες επεξεργασίας και μεταποίησης (πρωτογενής και δευτερογενής) του ξύλου
- Οργανικό κλάσμα των αστικών στερεών αποβλήτων
Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνεται το οργανικό φορτίο των συλλεγόμενων αστικών στερεών απορριμμάτων όπως είναι τα υπολείμματα τροφίμων και ξύλου, τα πράσινα κηπευτικά απορρίμματα (υπολείμματα κλάδευσης κήπων και δημόσιων χώρων “πρασίνου” συμπεριλαμβανομένου και υπολειμμάτων χλοοκοπής, φυλλώματα κ.α.). Το οργανικό αυτό ρεύμα των αποβλήτων προέρχεται είτε από τα σύμμικτα αστικά απορρίμματα σε εγκαταστάσεις μηχανικού διαχωρισμού είτε από την εφαρμογή προγραμμάτων διαλογής στην πηγή.
- Υπολείμματα βιομηχανίας και βιοτεχνίας τροφίμων
Στη ροή αυτή των αποβλήτων περιλαμβάνονται τα οργανικά που προέρχονται από υπολείμματα βιομηχανιών επεξεργασίας τροφίμων (π.χ. γαλακτοβιομηχανία, βιομηχανία επεξεργασίας μεταποίησης ζωικών πρώτων υλών, βιομηχανία επεξεργασίας μεταποίησης φυτικών πρώτων υλών, βιομηχανία επεξεργασίας και συντήρησης φρούτων και λαχανικών). Στην κατηγορία αυτή των εγκαταστάσεων δεν ανήκουν τα βιομηχανικά στερεά απόβλητα τα οποία χαρακτηρίζονται ως επικίνδυνα ή/και τοξικά.

Αναφορικά με τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες των παραπάνω αποβλήτων γίνεται εκτενής περιγραφή στην ενότητα 2.2. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων η αερόβια βιολογική επεξεργασία των προαναφερόμενων οργανικών αποβλήτων πραγματοποιείται με μίγμα οργανικών υλικών δύο ή περισσότερων εκ των ανωτέρω τύπων. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, οι κοινές πρακτικές ανάμιξης του τροφοδοτικού υλικού περιλαμβάνουν (α) την προσθήκη ώριμου κόμποστ, (β) τη χρήση οργανικών ή ανόργανων πρόσθετων, (γ) την προσθήκη διογκωτικών υλικών⁽¹⁰⁾ και (δ) το συνδυασμό των προηγούμενων (Haug, 1993). Η ανάμιξη διαφορετικών υλικών αποσκοπεί στην επίτευξη βέλτιστων φυσικοχημικών ιδιοτήτων (pH, θρεπτικά συστατικά, πορώδες, υγρασία κ.α.) του τροφοδοτούμενου υποστρώματος με σκοπό την ομαλή διεξαγωγή των διεργασιών της αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας του οργανικού υλικού. Περαιτέρω ρύθμιση της διεργασίας της κομποστοποίησης γίνεται με τον έλεγχο και την παρακολούθηση των βασικών παραμέτρων που επηρεάζουν την κομποστοποίηση οι οποίες περιγράφονται ακολούθως.

3.2.3. 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

3.2.3.1. 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.

⁽¹⁰⁾ Συνίστανται συνήθως από υπολείμματα φυτικών καλλιεργειών, από υπολείμματα και απόβλητα δασοκομίας καθώς και από υπολείμματα της βιομηχανίας και βιοτεχνίας τροφίμων

Η πρώτη φάση χαρακτηρίζεται από μια αρχική, σύντομη διάρκεια, 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, προσβάλουν απλές χημικές ενώσεις όπως μονοσακχαρίτες, δυσακχαρίτες κ.α. με συνεπακόλουθη αύξηση της θερμοκρασίας (<40-45C°) (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 40-45C° (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 (<40-45C°) 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.).

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 3.2).

Πίνακας 3.2: Εύρος βέλτιστων θερμοκρασιακών τιμών (°C) στο οποίο παρατηρείται μεγιστοποίηση του ρυθμού διάσπασης της οργανικής ουσίας

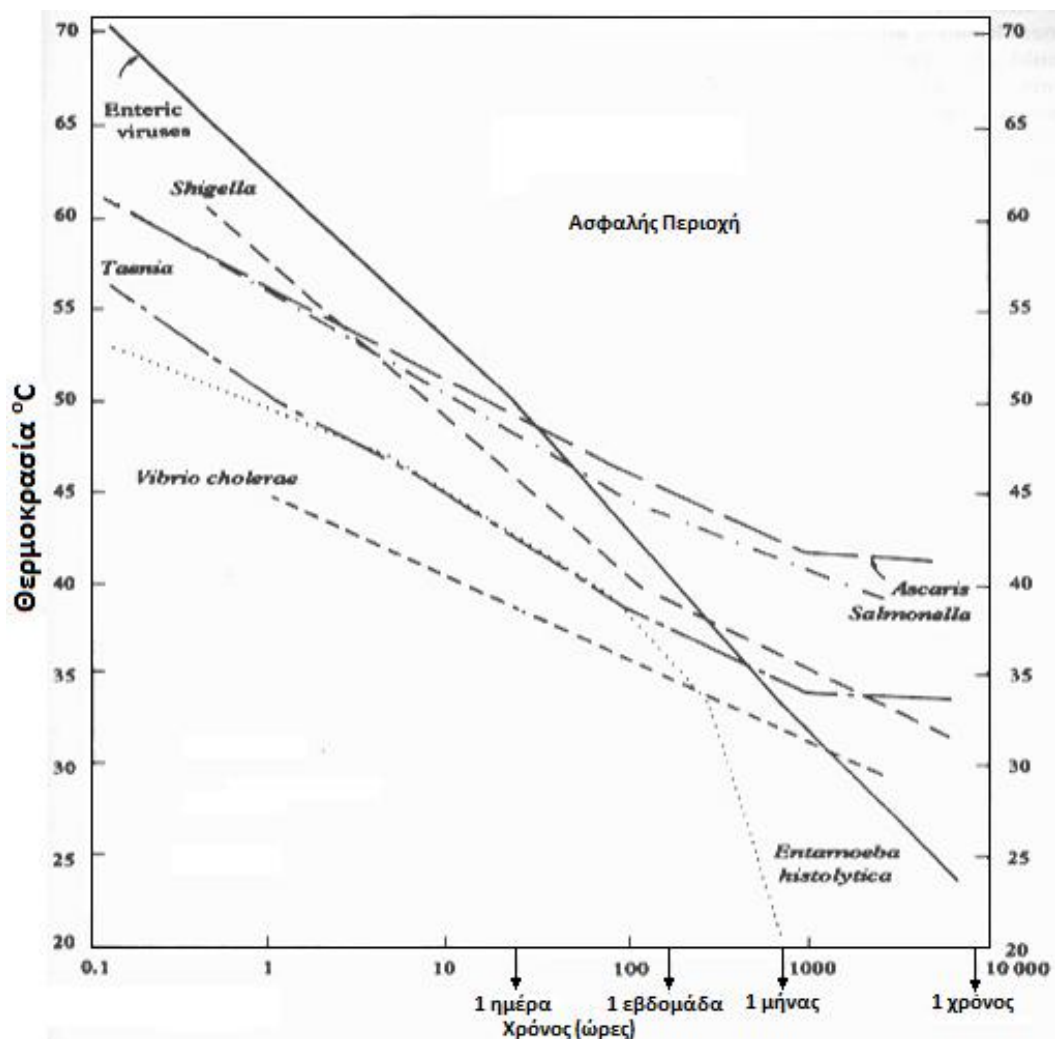
Εύρος θερμοκρασίας	Σχόλιο	Βιβλιογραφία
52 - 60°C	Μεγιστοποίηση της αποσύνθεσης	Bach et al. (1984), McKinley and Vestal (1984), MacGregor et al. (1981)
≤55°C	-	McKinley and Vestal (1984).
50 - 55°C	Η μικροβιακή δραστηριότητα παρεμποδίζεται σε υψηλότερα θερμοκρασιακά επίπεδα	Diaz and Savage (2007a)
45 - 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 Epstein (1997) και Miller (1992), όταν η μέγιστη θερμοκρασία στο υπόστρωμα είναι στους 60 έως 70°C, πολλοί θερμοφίλοι 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 3.1** 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.

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 3.3**. Αξίζει να αναφερθεί ότι σύμφωνα με το 3^ο κείμενο για την Αναθεώρηση της Οδηγίας 86/278/ΕΟΚ, κατά τη θερμόφιλη αερόβια σταθεροποίηση της ιλύος 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 ιλύος για τη μείωση των παθογόνων μικροοργανισμών συνίσταται η θερμοκρασία κατά την κομποστοποίηση να είναι τουλάχιστον 55°C για 4 συνεχείς ημέρες (Carrington, 2001).



Διάγραμμα 3.1: Συνθήκες θερμοκρασίας-χρόνου για την αδρανοποίηση των παθογόνων μικροοργανισμών στην ιλύ (Strauch, 1998; 1991).

Πίνακας 3.3: 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).

3.2.3.2. 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 3.4). 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 3.4: Βέλτιστο εύρος υγρασίας κατά τη θερμοφίλη φάση της κομποστοποίησης

Υγρασία (% wb)	Βιβλιογραφία
50-60	Gajalakshmi and Abbasi (2008), Shammas 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 ύγρυνσης 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).

3.2.3.3. 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 (Díaz 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.

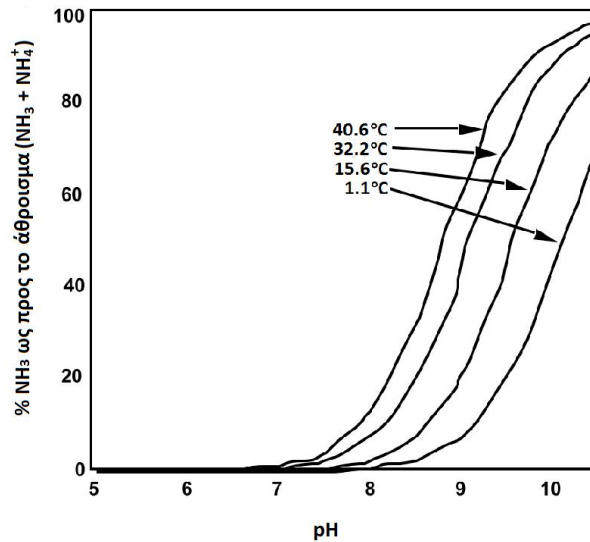
Στα πρώτα στάδια της κομποστοποίησης όπου πραγματοποιείται η αφομοίωση των άμεσα διαθέσιμων οργανικών ενώσεων, με συνεπακόλουθη αύξηση της θερμοκρασίας, ο ρυθμός κατανάλωσης του οξυγόνου είναι μέγιστος ενώ στη συνέχεια με την εξάντληση των οργανικών αυτών ενώσεων του υποστρώματος η απαίτηση οξυγόνου 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.

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 Poincelet (1977) προτείνει ως ελάχιστη τιμή ίση με 5% v/v.

3.2.3.4. 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; Poincelet, 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; Gaug, 2000; Hoitink and Kuter, 1986), ενώ ο Bhargadwaj (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 3.2**.



Διάγραμμα 3.2: Επίδραση του pH και της θερμοκρασίας στην ισορροπία $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ στο υπόστρωμα (Henry et al., 1999)

3.2.3.5. 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 (EA, 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 βιοξειδωσης 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).

3.2.3.6. 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 οξειδωση 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 3.2**) (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 3.5** 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 3.5: 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 βιοαποδόμησής 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 οξείδωσης που κυμαίνεται από +5 (για τα NO₃⁻) έως -3 (για την NH₃) (Bothe et al., 2007). Αυτές οι οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις (Πίνακας 3.6, Εικόνα 3.4) 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⁽¹¹⁾ (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 3.6: Οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις του αζώτου κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης (Henry et al., 1999)

Αντιδράσεις	Διεργασία	Αντίδραση
$R - NH_2 + H_2O + H^+ \rightarrow R - OH + NH_4^+$	Αμμωνιοποίηση	1
$NH_4^+ (κόμποστ) \leftrightarrow NH_3 (κόμποστ) + H^+ \leftrightarrow NH_3 (αέριο)$ $\leftrightarrow NH_3 (ατμόσφαιρα)$	Πτητικότητα NH ₃	2
$NH_4^+ + 1.5O_2(διαλυτό) \rightarrow NO_2^- + H_2O + 2H^+$	Νιτροποίηση (α)	3α
$NO_2^- + 0.5O_2(διαλυτό) \rightarrow NO_3^-$	Νιτροποίηση (β)	3β
$NO_3^- + 2e \rightarrow NO_2^- + 6e \rightarrow NH_4^+$	Ακινητοποίηση (α)	4α
$NH_4^+ + R - OH \rightarrow R - NH_2 + H_2O + H^+$	Ακινητοποίηση (β)	4β
$NO_3^- + 1.25HCHO \rightarrow 0.5N_2 + 0.75H_2O + 1.25CO_2 + OH$	Απονιτροποίηση σε N ₂	5α
$NO_3^- + HCHO \rightarrow 0.5N_2O + 0.5H_2O + CO_2 + OH$	Απονιτροποίηση σε N ₂ O	5β

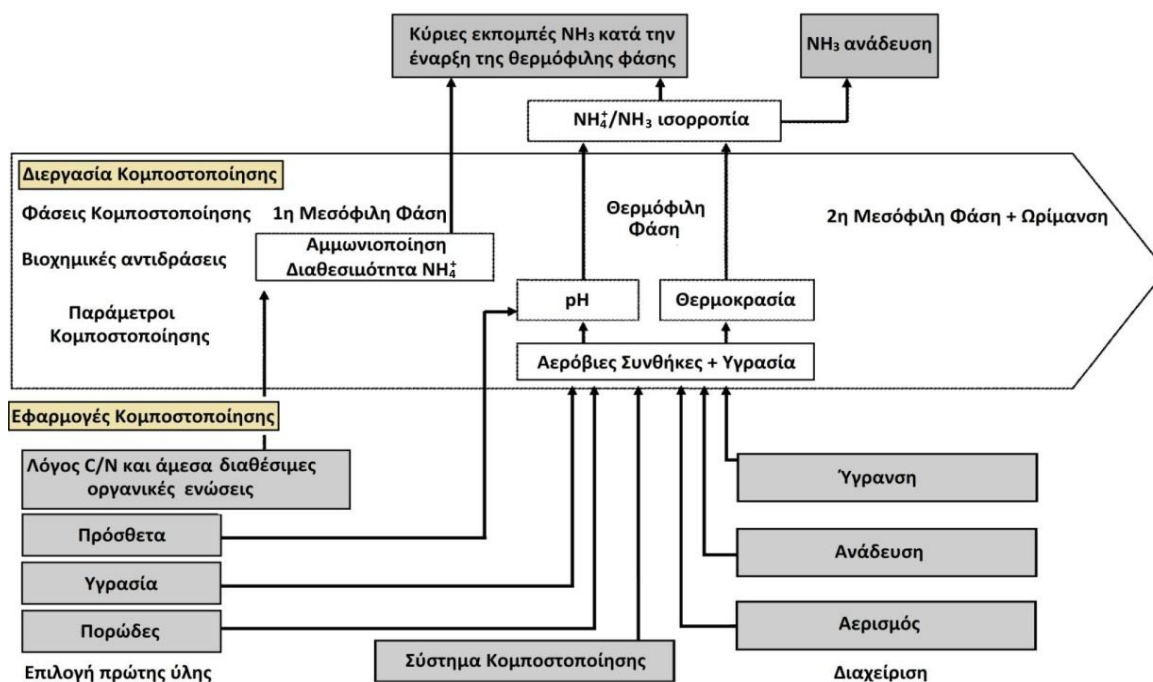
R=οργανική ένωση

⁽¹¹⁾ Όταν συντρέχουν συνθήκες υψηλής θερμοκρασία και αλκαλικού pH η πτητικότητα της αμμωνίας είναι εντονότερη (Verdonck 1988)

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 συντελούνται μέγιστα θερμοκρασιακά επίπεδα και διαμόρφωση αλκαλικού περιβάλλοντος ($pH > 7.5$). 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 ($< 40C^{\circ}$) τότε λαμβάνει χώρα η νιτροποίηση, η ένταση και ο ρυθμός της 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 3.6** 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 3.6: 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).

3.2.5. 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 3.7**.

Πίνακας 3.7: 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 βασιζόμενο 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).

3.2.6. Συστήματα κομποστοποίησης

Τα συστήματα κομποστοποίησης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ευρύτερα σε ανοικτά και κλειστά συστήματα. Στα ανοικτά 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).

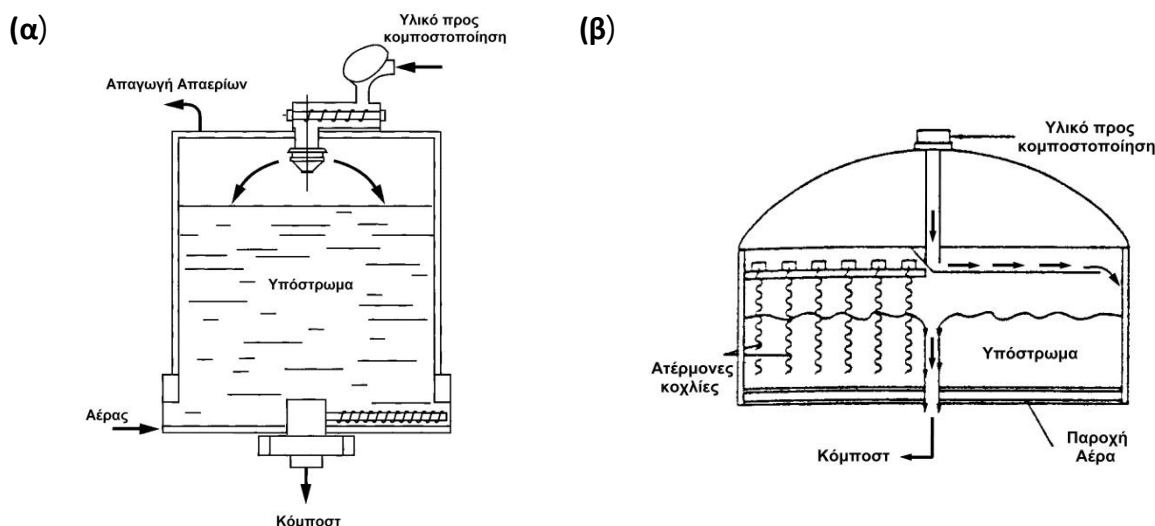
3.2.6.1. Κλειστά συστήματα

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 3.7(α)**.

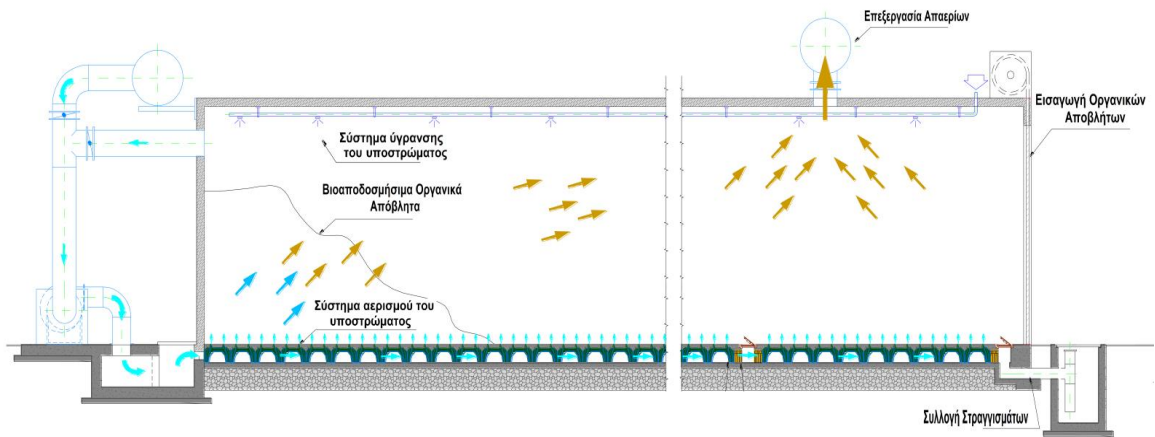
Τα συνεχή κάθετα συστήματα με ανάδευση περιλαμβάνουν εσωτερικό αναδευτήρα που φέρει περιστρεφόμενη γέφυρα με ατέρμονες κοχλίες στο μισό της μήκος. Το προς κομποστοποίηση υλικό εισάγεται στο κέντρο περιστροφής της γέφυρας και με τη βοήθεια του ατέρμονα κοχλία μετατοπίζεται προς την περίμετρο. Περιοδικά 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 3.7(β))**



Εικόνα 3.7: Σχηματική αναπαράσταση τυπικών κάθετων κλειστών συστημάτων κομποστοποίησης (α) χωρίς ανάδευση και (β) με ανάδευση (Díaz et al., 2002)

Οριζόντια κλειστά συστήματα

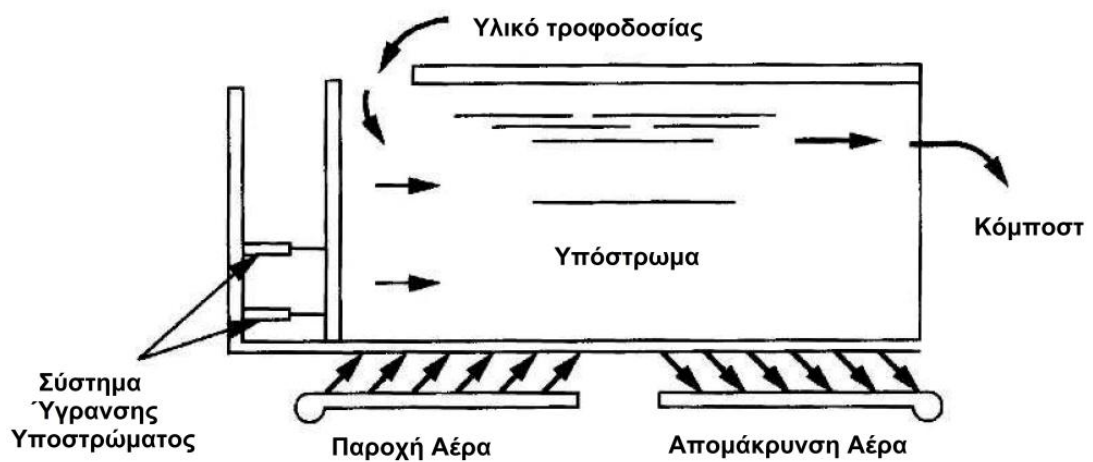
Τα κλειστά συστήματα κομποστοποίησης οριζόντιου τύπου μπορούν διακριθούν σε (α) εγκιβωτισμένα συστήματα όπως τα βιοκελιά (cells ή biocells), τα τούνελ (tunnels ή biotunnels), και τα κιβώτια (containers), (β) κανάλια (channels ή trenches) και (γ) περιστρεφόμενους κυλίνδρους (rotating drum). Τα βιοκελιά, 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 ύγρανσης 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 απόσπηση 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 3.8) 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 (Díaz 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 3.9), ώστε να εξυπηρετήσουν τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής με δυναμικότητα επεξεργασίας περίπου 3000-5000 τόνων οργανικού φορτίου ανά έτος για 6-8 παράλληλα στοιχεία (Díaz 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 3.10).



Εικόνα 3.8: Τυπική διάταξη οριζόντιων κλειστών συστημάτων κομποστοποίησης, τύπου βιοκελίων (Geoplast, 2010)

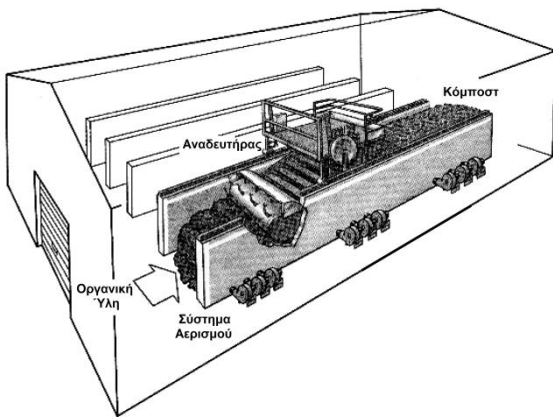


Εικόνα 3.9: Τυπική διάταξη οριζόντιων κλειστών συστημάτων κομποστοποίησης, τύπου κιβωτίων, σε παράλληλα στοιχεία



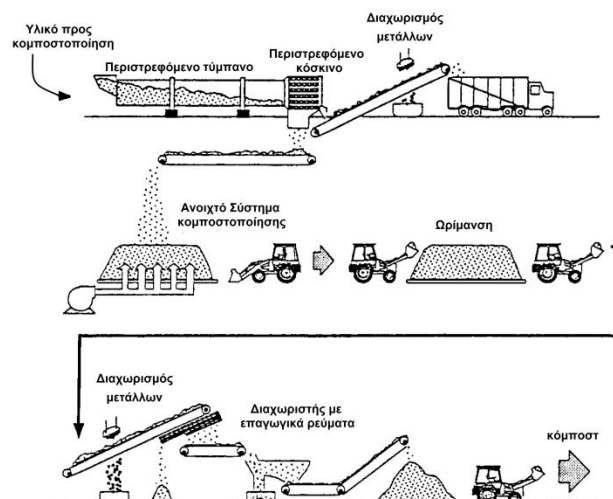
Εικόνα 3.10: Τυπική διάταξη οριζόντιων κλειστών συστημάτων κομποστοποίησης, τύπου τούνελ (Diaz et al., 2002)

Στα οριζόντια συστήματα κομποστοποίησης τύπου καναλιών, το οργανικό υλικό εισέρχεται σε στεγασμένο κτίριο το οποίο είναι διαμορφωμένο με παράλληλα κανάλια διαχωρισμένα με τείχος (Εικόνα 3.11). 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 3.11: 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 3.12). 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 3.12: Τυπική διάταξη οριζόντιου κλειστού συστήματος κομποστοποίησης, τύπου περιστρεφόμενου τυμπάνου (Diaz et al., 2002)

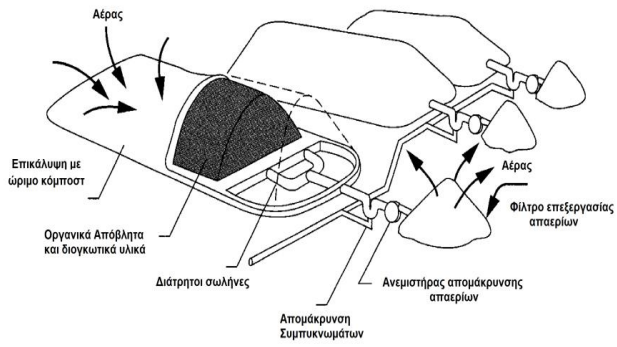
Συνήθως οι αντιδραστήρες αυτού του τύπου είναι εξοπλισμένοι με προεξοχές στο εσωτερικό του κυλίνδρου ώστε κατά την περιστροφική κίνηση του αντιδραστήρα το υπόστρωμα να τεμαχίζεται και να αναδύεται βοηθώντας στην ομογενοποίηση και στην κατάτμηση του υλικού. Λόγω του μικρού χρόνου παραμονής του υποστρώματος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

3.2.6.2. 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 3.13**. 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 3.14**), 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).

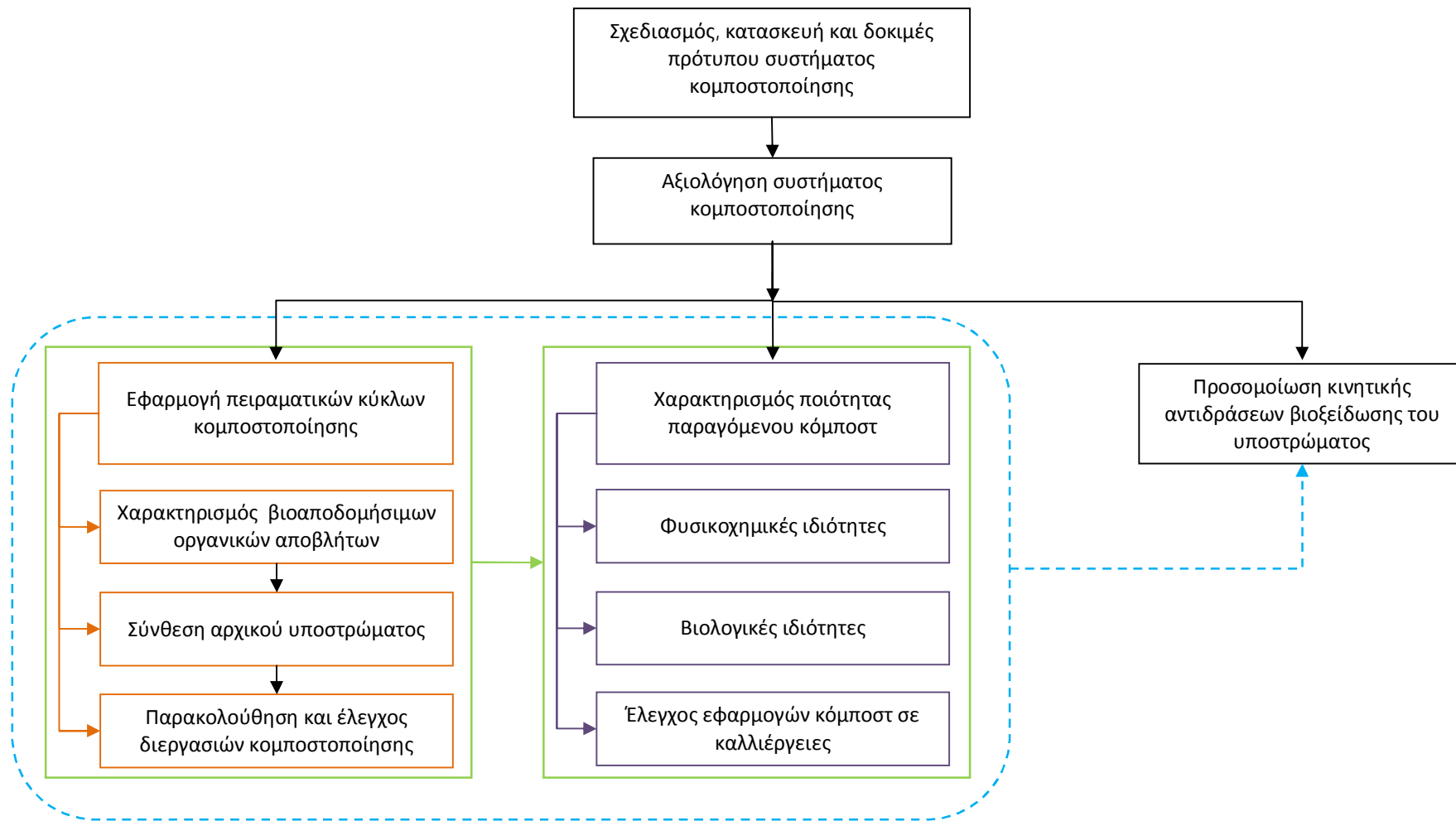


Εικόνα 3.13: Τυπική διάταξη οριζόντιου ανοικτού συστήματος κομποστοποίησης, τύπου αναστρεφόμενων σειραδιών (Diaz et al., 2002)



Εικόνα 3.14: Τυπική διάταξη οριζόντιου ανοιχτού συστήματος κομποστοποίησης, τύπου αεριζόμενων στατικών σωρών (Diaz et al., 2007, 2002)

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή ερευνάται η δυνατότητα αποκεντρωμένης επεξεργασίας και επαναχρησιμοποίησης διαφορετικών ροών βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων με τη χρήση συστήματος κομποστοποίησης. Η μεθοδολογία η οποία ακολουθήθηκε για την υλοποίηση αυτής της έρευνας φαίνεται στην **Εικόνα 4.1**. Το πρώτο μέρος της διδακτορικής διατριβής αφορά στο σχεδιασμό στην κατασκευή και τη δοκιμή ενός συστήματος κομποστοποίησης κλειστού τύπου, κατακόρυφης ροής, ασυνεχούς τροφοδοσίας με δυναμικότητα επεξεργασίας 1.5-2.0tn οργανικού υλικού. Για το σχεδιασμό και την κατασκευή του συστήματος λήφθηκαν υπόψη παράμετροι όπως η δυνατότητα επεξεργασίας μιας ευρείας κλίμακας βιοαποδομήσιμων οργανικών αποβλήτων, η αποτελεσματική και ελεγχόμενη εφαρμογή ανάδευσης, ύγρυνσης και αερισμού του υποστρώματος, η συλλογή των παραγόμενων στραγγισμάτων και η απομάκρυνση και δέσμευση των αερίων εκπομπών. Προκειμένου να εξεταστεί η προκαταρκτική λειτουργία του συστήματος καθώς και των επιμέρους δομικών τμημάτων του, πραγματοποιήθηκε διεξοδικός έλεγχος με την ολοκλήρωση δοκιμών άνευ και μετά φορτίου. Το δεύτερο μέρος της μεθοδολογίας αφορά στην αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας και της λειτουργικότητας του συστήματος κομποστοποίησης ως προς την επεξεργασία διαφορετικών ροών βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων. 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 των διαθέσιμων ροών οργανικών αποβλήτων που δύναται να επεξεργαστούν βιολογικά και 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. Στις σημαντικότερες ροές βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων, αναφορικά με τις παραγόμενες ποσότητες, περιλαμβάνονται οι ιλύες από ΜΕΛ, τα γεωργικά και κτηνοτροφικά απόβλητα καθώς και τα οικιακά οργανικά απορρίμματα. Η τελευταία ροή οργανικών αποβλήτων κρίθηκε σκόπιμο να μην εξεταστεί λόγω της δυσκολίας ως προς τη συλλογή και την προεπεξεργασία της εξαιτίας της ανομοιογένειας που παρουσιάζει στη σύστασή της. 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 επίδρασής του σε προκαθορισμένες γεωργικές καλλιέργειες. Σε τελικό στάδιο εφαρμόζεται η προσομοίωση της κινητικής των αντιδράσεων βιοξείδωσης της οργανικής ουσίας του υποστρώματος προκειμένου να διερευνηθεί και να προσδιορισθεί ο ρυθμός αντίδρασης με τον οποίο το υπόστρωμα βιοαποδομείται όπως και ο βαθμός βιοαποδόμησης της οργανικής ουσίας που επιτυγχάνεται.



Εικόνα 4.1: Διαγραμματική απεικόνιση μεθοδολογίας διδακτορικής διατριβής

4.1. Σχεδιασμός, κατασκευή και δοκιμές συστήματος κομποστοποίησης

Αναφορικά με το σχεδιασμό και την κατασκευή του συστήματος κομποστοποίησης λήφθηκαν υπόψη ορισμένες παράμετροι για την τελική διαμόρφωσή του, οι σημαντικότερες από τις οποίες είναι οι εξής:

- Η διαμόρφωση ενός αποκεντρωμένου συστήματος κομποστοποίησης πιλοτικής εφαρμογής (μικρής κλίμακας) το οποίο δύναται να επεξεργαστεί επί τόπου (in-situ) τις διαφορετικές ροές βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων.
- Η δυνατότητα διαχείρισης και επεξεργασίας με τρόπο αποδοτικό και αποτελεσματικό μιας ευρείας ποικιλίας βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων και μιγμάτων τους.
- Ο πλήρης έλεγχος και αυτοματισμός των διεργασιών του αερισμού, της ανάδευσης και της ύγρυνσης του υποστρώματος ώστε να εξασφαλίζονται οι απαιτούμενες συνθήκες της θερμοκρασίας, της υγρασίας και της περιεκτικότητας σε οξυγόνο στην οργανική μάζα καθόλη τη διάρκεια των διεργασιών της κομποστοποίησης στον βιοαντιδραστήρα.
- Η ελαχιστοποίηση των εκπεμπόμενων οσμών με τον έλεγχο και την παρακολούθηση της διεργασίας καθόλη τη διάρκειά της καθώς και με τη δέσμευση των αερίων εκπομπών σε κατάλληλη συζευγμένη μονάδα απόσμησης.
- Η συλλογή και απομάκρυνση των παραγόμενων στραγγισμάτων κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης.
- Η επιτάχυνση των διεργασιών της βιοαποδόμησης της οργανικής ουσίας και της διαμόρφωσης ενός τελικού προϊόντος με προστιθέμενη αξία.
- Η διαμόρφωση κατάλληλου συστήματος ανάδευσης του υποστρώματος έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ομοιογενής ανάδευση, ύγρυνση και αερισμός του και να αποτρέπεται η διαμόρφωση συσσωματώσεων στο οργανικό κλάσμα. Με αυτό τον τρόπο διασφαλίζονται οι απαιτούμενες αερόβιες συνθήκες για τις διεργασίες και εξασφαλίζεται η αποδοτική και αποτελεσματική κομποστοποίηση.
- Η διαμόρφωση των απαιτούμενων συνθηκών ώστε η λειτουργία του συστήματος κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης να είναι απλή στο χρήστη.
- Η επιλογή κατάλληλων δομικών υλικών για την κατασκευή του συστήματος κομποστοποίησης τα οποία είναι ανθεκτικά στις έντονες περιβαλλοντικές συνθήκες (π.χ. διάβρωση) και στις μηχανολογικές καταπονίσεις.

Μετά την κατασκευή του συστήματος πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος της λειτουργίας του με την ολοκλήρωση δοκιμών άνευ φορτίου προκειμένου να διαπιστωθεί η εύρυθμη λειτουργία των επιμέρους τμημάτων του. Έπειτα από διεξοδικούς ελέγχους το σύστημα μεταφέρθηκε και εγκαταστάθηκε στην περιοχή Zemamra στο Μαρόκο η οποία βρίσκεται σε απόσταση 70km από την πόλη El Jadida. Σε συνέχεια των ελέγχων λειτουργίας, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές μετά φορτίου με μερική πλήρωση του βιοαντιδραστήρα με ροές βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων (ιλύς από λύματα, γεωργικά υπολείμματα και κτηνοτροφικά απόβλητα). Στις δοκιμές αυτές εξετάστηκε η λειτουργικότητα του μηχανολογικού και ηλεκτρολογικού εξοπλισμού και ρυθμίστηκε η καλή και αποδοτική λειτουργία της εγκατάστασης συνολικά.

4.2. Πειραματικά πρωτόκολλα

Στην ενότητα αυτή γίνεται περιγραφή των πειραματικών πρωτοκόλλων αναφορικά με (α) τη διεργασία της κομποστοποίησης σε σύστημα αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων και (β) τη χρήση του παραγόμενου κόμποστ σε καθορισμένες γεωργικές καλλιέργειες.

4.2.1. Πειραματικό πρωτόκολλο κομποστοποίησης

Το πειραματικό πρωτόκολλο της κομποστοποίησης περιλαμβάνει τις διεργασίες και τις απαιτούμενες αναλύσεις οι οποίες πραγματοποιήθηκαν για τον έλεγχο της αποτελεσματικότητας της αερόβιας βιοαποδόμησης στερεών αποβλήτων με τη χρήση του συστήματος κομποστοποίησης. Οι διεργασίες αυτές αφορούν στην ανάπτυξη τεσσάρων πειραματικών εφαρμογών κατά τις οποίες έγινε ο έλεγχος και η παρακολούθηση της αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας των αποβλήτων καθώς και η αξιολόγηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών των παραγόμενων προϊόντων με βάση τις φυσικοχημικές και βιολογικές τους ιδιότητες. Οι διεργασίες οι οποίες πραγματοποιήθηκαν είναι κοινές για κάθε πειραματικό κύκλο κομποστοποίησης και περιγράφονται παρακάτω.

4.2.1.1. Δειγματοληψία και ανάλυση των επιμέρους βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων που συνθέτουν το υλικό τροφοδοσίας του βιοαντιδραστήρα

Τα οργανικά απόβλητα που επιλέχθηκαν ως υλικά προς κομποστοποίηση αποτελούν ροές στερεών αποβλήτων οι οποίες αντιπροσωπεύουν ένα μεγάλο ποσοστό του συνόλου των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων και τα οποία χρήζουν κατάλληλης επεξεργασίας. Στις ροές αυτών των αποβλήτων περιλαμβάνονται η ιλύς που προέρχεται από ΜΕΛ, η κοπριά οικόσιτων ζώων καθώς και τα γεωργικά υπολείμματα καλλιεργειών. Τα αστικά οργανικά απόβλητα κρίθηκαν σκόπιμο να μην μελετηθούν λόγω της έντονης ανομοιομορφίας και ανομοιογένειας που παρουσιάζουν ως προς τη σύνθεσή τους.

Για τα επιλεγμένα οργανικά απόβλητα πραγματοποιείται σύνθετη δειγματοληψία για την εκάστοτε ροή κατά την οποία εφαρμόζεται 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 4.2**) όπως περιγράφεται στην ενότητα 4.3.

4.2.1.2. Προεπεξεργασία και σύνθεση του υλικού τροφοδοσίας του βιοαντιδραστήρα

Το πρώτο στάδιο της προετοιμασίας του οργανικού υλικού τροφοδοσίας, μετά τη συλλογή του, περιλαμβάνει την απομάκρυνση μη βιοαποδομήσιμων υλικών όπως και κάθε άλλου είδους ρυπαντή που δύναται να επηρεάσει αρνητικά τη διεργασία της κομποστοποίησης και κατ' επέκταση τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος

(π.χ. πλαστικά, αδρανή υλικά). Στη συνέχεια τα διογκωτικά οργανικά υλικά (π.χ. γεωργικά υπολείμματα) υπόκεινται σε μείωση του μεγέθους τους (50-75mm) με τη χρήση κατάλληλου τεμαχιστή στοχεύοντας στην τροποποίηση των φυσικών ιδιοτήτων του υποστρώματος και στη διευκόλυνση της ανάδουσής του κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης. Εκτός του οργανικού υλικού, ορυκτά όπως ο ζεόλιθος και ο περλίτης 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. Επιπλέον, η χρήση του περλίτη 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.

4.2.1.3. Τροφοδοσία του βιοαντιδραστήρα

Η πλήρωση του βιοαντιδραστήρα με την εκάστοτε σύνθεση του υλικού τροφοδοσίας γίνεται στη θυρίδα τροφοδοσίας του βιοαντιδραστήρα μέσω μεταφορικής ταινίας. Η φόρτωση του υλικού στη μεταφορική ταινία πραγματοποιείται χειρωνακτικά, με ομαλά βήματα φόρτωσης, ώστε να εξασφαλίζεται η σταθερή τροφοδοσία του βιοαντιδραστήρα. Η ομοιογενοποίηση των οργανικών αποβλήτων εξασφαλίζεται με τη συνδυαστική και επάλληλη προσθήκη των διαφορετικών βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων και την παράλληλη μηχανική ανάδουσή τους στο εσωτερικό του βιοαντιδραστήρα.

4.2.1.4. Προγραμματισμός λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα

Ο έλεγχος και ο αυτοματισμός των συνθηκών ανάδευσης, ύγρανσης και αερισμού του υποστρώματος επιτυγχάνεται μέσω της λειτουργίας Προγραμματιζόμενου Λογικού Ελεγκτή (Programming Logic Controller - PLC), ενώ οι ρυθμίσεις των προαναφερόμενων λειτουργιών γίνονται με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού.

4.2.1.5. 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 ανάδυσή 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 4.3.

4.2.1.6. Δειγματοληψία και ανάλυση παραγόμενων στραγγισμάτων

Η συλλογή των στραγγισμάτων πραγματοποιείται από τα στόμια εκφόρτωσης του βιοαντιδραστήρα στα οποία έχουν τοποθετηθεί σωληνώσεις διαμέτρου ½ ιντσών για την αποστράγγιση του βιοαντιδραστήρα κατά τη λειτουργία του, όποτε αυτό απαιτηθεί. Στη διάρκεια των πειραματικών κύκλων κομποστοποίησης λαμβάνονταν δείγματα των παραγόμενων στραγγισμάτων σε τακτά χρονικά διαστήματα. Ο προσδιορισμός των εξεταζόμενων παραμέτρων (Πίνακας 4.2) περιγράφεται στην ενότητα 4.3.

4.2.1.7. Δειγματοληψία και ανάλυση παραγόμενου κόμποστ

Η εκκένωση του βιοαντιδραστήρα πραγματοποιείται από τα τρία στόμια εκφόρτωσης του υποστρώματος. Για την υποστήριξη της εκφόρτωσης λειτουργεί, σε σύντομες ενδιάμεσες παύσεις, το σύστημα ανάδευσης του υποστρώματος. 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 είτε στις πειραματικές καλλιέργειες είτε ως υλικό πλήρωσης του βιόφιλτρου για την απόσμιση των αερίων εκπομπών κατά τη λειτουργία του βιοαντιδραστήρα. Με τη χρήση κατάλληλου εξοπλισμού έγινε η συλλογή έξι αντιπροσωπευτικών δειγμάτων κατά μήκος και κατά ύψος του σχηματιζόμενου σειριαδίου. 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 4.2) όπως περιγράφεται στην ενότητα 4.3.

4.2.1.8. Έλεγχος και συντήρηση του συστήματος κομποστοποίησης.

Καθόλη τη διάρκεια των πειραματικών κύκλων κομποστοποίησης γίνεται έλεγχος της ομαλής λειτουργίας του ηλεκτομηχανολογικού εξοπλισμού, των επιμέρους στοιχείων του βιοαντιδραστήρα και συνολικά της εγκατάστασης. Σε καθημερινή βάση εξετάζεται η λειτουργία του ηλεκτρομειωτήρα, του ανεμιστήρα, του συστήματος ύγρανσης, του δικτύου απομάκρυνσης των στραγγισμάτων, του δικτύου αεραγωγών αερίων ρύπων, του ηλεκτρολογικού πίνακα και του πίνακα αυτομάτου ελέγχου. Η τακτική συντήρηση όλου του ηλεκτομηχανολογικού εξοπλισμού της εγκατάστασης γίνεται σύμφωνα με της υποδείξεις των κατασκευαστών οι οποίες μεταξύ άλλων περιλαμβάνουν τη λίπανση, τον καθαρισμό του φίλτρου του συστήματος αερισμού και τον καθαρισμό της κεφαλής των σωληνώσεων απομάκρυνσης των στραγγισμάτων. Στο τέλος κάθε πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης και ύστερα από την εκφόρτωση και εκκένωση του βιοαντιδραστήρα γίνεται πλήρης έλεγχος και συντήρησή του καθώς και του υπόλοιπου εξοπλισμού και υποδομών ώστε να είναι έτοιμη η εγκατάσταση για την υλοποίηση του επομένου πειραματικού κύκλου.

4.2.2. Πειραματικό πρωτόκολλο καλλιεργειών σε αγρό

Για την αξιολόγηση του παραγόμενου κόμποστ πραγματοποιούνται προκαταρκτικά πειράματα σε καλλιέργειες για τη διαπίστωση της επίδρασης του υλικού σε πραγματικές συνθήκες. Τα πειραματικά φυτά τα οποία επιλέχθηκαν είναι ο αραβόσιτος (*Zea mays L.*) και τα ζαχαρότευτλα (*Beta vulgaris L.*). Η επιλογή των προαναφερόμενων φυτών βασίζεται στις απαιτήσεις τους για καλά φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά των μέσων ανάπτυξης καθώς επίσης και στο γεγονός ότι οι καρποί τους αποτελούν αγαθό ευρείας κατανάλωσης σε διεθνές επίπεδο. Επομένως, η χρήση αραβόσιτου και ζαχαρότευτλων θεωρείται καλός δείκτης για την αξιολόγηση του κόμποστ. Ο αγρός στον οποίο εφαρμόζονται οι πειραματικές καλλιέργειες βρίσκεται στην ευρύτερη περιοχή της Δουκκάλα στο Μαρόκο η οποία χαρακτηρίζεται από πρακτικές εντατικής καλλιέργειας με σταδιακή υποβάθμιση της οργανικής ουσίας και κατ' επέκταση μείωση της γονιμότητας του εδάφους.

Για την ανάπτυξη των πειραματικών καλλιεργειών χρησιμοποιήθηκε μίγμα του παραγόμενου κόμποστ σε διαφορετικές δοσολογίες των 2.5, 5.0 και 7.5 t_n ha⁻¹. Επιπλέον για λόγους σύγκρισης αναπτύσσονται καλλιέργειες κατά τις οποίες γίνεται χρήση μόνο χημικού λιπάσματος (NPK 16-15-26, 0.5 t_n ha⁻¹ και NPK 20-15-10, 0.5t_n ha⁻¹ για τις καλλιέργειες ζαχαρότευτλων και αραβόσιτου αντίστοιχα). Ως μάρτυρες (τυφλό πείραμα) χρησιμοποιούνται πειραματικά τεμάχια στα οποία δεν γίνεται καμία προσθήκη υλικού (κόμποστ ή λίπασμα). Η πειραματική διάταξη των καλλιεργειών παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.1 χρησιμοποιώντας το σχέδιο των τυχαιοποιημένων πλήρων ομάδων (randomized blocks) με 4 επαναλήψεις για κάθε μία από τις αναπτυσσόμενες καλλιέργειες. Η συνολική αγροτική έκταση κάθε πειραματικής καλλιέργειας είναι περίπου 780m² και κάθε πειραματικό τεμάχιο καλύπτει επιφάνεια ίση με 30m² (6m x 5m) ενώ η μεταξύ τους απόσταση είναι περίπου ίση με 1m.

Πίνακας 4.1: Διάταξη των πειραματικών τεμαχίων για τις καλλιέργειες αραβόσιτου και ζαχαρότευτλων

Διάταξη 4	T5	T2	T1	T3	T4	5m 1m	T1: 0 tn ha ⁻¹ (μάρτυρας) T2: Κόμποστ 2.5 tn ha ⁻¹ T3: Κόμποστ 5.0 tn ha ⁻¹ T4: Κόμποστ 7.5 tn ha ⁻¹ T5: Χημικό λίπασμα 0.5 tn ha ⁻¹
Διάταξη 3	T4	T1	T3	T2	T5		
Διάταξη 2	T3	T4	T1	T5	T2		
Διάταξη 1	T1	T2	T3	T4	T5	6m	NPK:16-15-26 (ζαχαρότευτλα) NPK:20-15-10 (αραβόσιτο)

Οι αγροτικές εργασίες που λαμβάνουν μέρος για την ανάπτυξη των καλλιεργειών είναι οι εξής:

- Η προετοιμασία του εδάφους, το όργωμα σε απαιτούμενο βάθος ($\approx 50\text{cm}$) και η διάθεση καθορισμένης ποσότητας κόμποστ και λιπάσματος για κάθε πειραματικό τεμάχιο όπως προκύπτει από την πειραματική διάταξη
- Η σπορά των καρπών στο κατάλληλα διαμορφωμένο έδαφος με μηχανή σποράς
- Η στάγδην άρδευση των καλλιεργειών σύμφωνα με τις απαιτήσεις των φυτών
- Ο ψεκασμός των καλλιεργειών με κατάλληλα εντομοκτόνα, φυτοκτόνα και μυκητοκτόνα (Diafuran, Karate, Goltix, Betanal, Merwet και Score) για την προστασία των φυτών.

Για την αξιολόγηση της επίδρασης της χρήσης κόμποστ πραγματοποιούνται μετρήσεις αναφορικά με την ανάπτυξη των φυτών. Οι μετρήσεις αυτές περιλαμβάνουν τον προσδιορισμό του ύψους των στελεχών του αραβόσιτου την 32^η, 47^η, 61^η και 77^η ημέρα ύστερα από τη σπορά και τον προσδιορισμό της βιομάζας των επιμέρους τμημάτων των στελεχών των ζαχαρότευτλων (φύλλα και βολβό) την 48^η και 82^η ημέρα ύστερα από τη σπορά. Το ύψος των βλαστών του αραβόσιτου προκύπτει από τη μέση τιμή του ύψους όλων των βλάστων τις ημέρες στις οποίες έγινε η καταμέτρηση. Οι μέτρησεις της βιομάζας των ζαχαρότευτλων την 48^η ημέρα προκύπτει από τη συγκομιδή/απορίζωση ορισμένων φυτών από κάθε πειραματικό τεμάχιο και τη ζύγιση των επιμέρους τμημάτων τους ενώ την 82^η ημέρα γίνεται η συγκομιδή και ζύγιση των υπόλοιπων φυτών.

4.3. Μέθοδοι ανάλυσης

Οι μέθοδοι ανάλυσης περιλαμβάνουν μια σειρά φυσικών, χημικών και βιολογικών παραμέτρων οι οποίες εξετάστηκαν σε δείγματα που συλλέχθηκαν από (α) τις ροές των εξεταζόμενων βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων (β) το μίγμα των οργανικών αποβλήτων το οποίο συνέθετε το υλικό τροφοδοσίας του βιοαντιδραστήρα (γ) το τελικό προϊόν (κόμποστ) (δ) τα παραγόμενα στραγγίσματα κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης και (ε) το έδαφος στο οποίο πραγματοποιήθηκαν οι πειραματικές καλλιέργειες. Το σύνολο των παραμέτρων που εξετάστηκαν για κάθε ένα από τα προαναφερόμενα δείγματα παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.2**. Όλες οι αναλύσεις επαναλήφθηκαν τουλάχιστον τρεις φορές για κάθε εξεταζόμενη παράμετρο και λαμβάνεται η μέση τιμή αυτών των μετρήσεων.

Πίνακας 4.2: Σύνολο φυσικοχημικών και βιολογικών παραμέτρων οι οποίες εξετάστηκαν στα διαφορετικά δείγματα

Παράμετρος	Υλικό τροφοδοσίας		Υπόστρωμα		Τελικό προϊόν		Στραγγίσματα		Έδαφος	
			✓		✓				✓	
Θερμοκρασία			✓	°C	✓	°C				
Υγρασία	✓	% wb	✓	% wb	✓	% wb				
Ξηρή Ουσία	✓	% wb	✓	% wb	✓	% wb				
Οξυγόνο			✓	% v/v	✓	% v/v				
pH	✓		✓		✓				✓	
TOC	✓	% dm	✓	% dm	✓	% dm			✓	% dm
OM			✓	% dm	✓	% dm			✓	% dm
N	✓	% dm	✓	% dm	✓	% dm				
N _{org}		% N	✓	% N	✓	% N				
NH ₄ ⁺			✓	mg kg ⁻¹	✓	mg kg ⁻¹	✓	mg l ⁻¹		
NO ₃ ⁻			✓	mg kg ⁻¹	✓	mg kg ⁻¹	✓	mg l ⁻¹		
C/N	✓		✓		✓					
P - P ₂ O ₅	✓	% dm			✓	% dm				
K - K ₂ O	✓	% dm			✓	% dm				
Ca - CaO	✓	% dm			✓	% dm				
Mg - MgO	✓	% dm			✓	% dm				
Cd	✓	mg kg ⁻¹			✓	mg kg ⁻¹	✓	mg l ⁻¹		
Ολικό Cr	✓	mg kg ⁻¹			✓	mg kg ⁻¹	✓	mg l ⁻¹		
Cu	✓	mg kg ⁻¹			✓	mg kg ⁻¹	✓	mg l ⁻¹		
Ni	✓	mg kg ⁻¹			✓	mg kg ⁻¹	✓	mg l ⁻¹		
Pb	✓	mg kg ⁻¹			✓	mg kg ⁻¹	✓	mg l ⁻¹		
Zn	✓	mg kg ⁻¹			✓	mg kg ⁻¹	✓	mg l ⁻¹		
BOD ₅							✓	mg l ⁻¹		
Φυτοτοξικότητα					✓	% Δ.Β.				
Μικροβιολογικά			✓		✓					
TC			✓	MPN g ⁻¹ dm	✓	MPN g ⁻¹ dm				
FC			✓	MPN g ⁻¹ dm	✓	MPN g ⁻¹ dm				
Αυγά Ελμίνθων			✓	Αυγά(10g) ⁻¹	✓	Αυγά(10g) ⁻¹				
Μηχανική σύσταση									✓	%

4.3.1. Προσδιορισμός θερμοκρασίας

Ο προσδιορισμός της θερμοκρασίας του υποστρώματος πραγματοποιήθηκε με τη χρήση κατάλληλων καταγραφικών (Data loggers model 100 2K) και την τοποθέτησή τους κατά μήκος του κύριου άξονα περιστροφής του συστήματος ανάδευσης του βιοαντιδραστήρα. Τα καταγραφικά θερμοκρασίας αφαιρούνταν στο τέλος κάθε πειραματικού κύκλου και ύστερα από την εκκένωσή του υποστρώματος όπου και λαμβάνονται τα δεδομένα. Εκτός των παραπάνω μετρήσεων προκειμένου να υπάρχει σαφής εικόνα της πορείας των διεργασιών της κομποστοποίησης πραγματοποιούνται επιπλέον μετρήσεις της θερμοκρασίας του υποστρώματος μία φορά την ημέρα καθόλη τη διάρκεια των πειραμάτων με τη χρήση φορητού θερμομέτρου το οποίο βυθίζεται στο ίδιο πάντοτε σημείο στο εσωτερικό του υποστρώματος. Επιπλέον, μετρήσεις της θερμοκρασίας πραγματοποιούνται και στο τέλος της διάρκειας ωρίμανσης του κόμποστ σε διαφορετικά

σημεία κατά μήκος των σχηματιζόμενων σειραδιών. Η θερμοκρασία προκύπτει από τη μέση τιμή των μετρήσεων.

4.3.2. Προσδιορισμός υγρασίας

Σε γυάλινες κάψες λαμβάνεται δείγμα και ζυγίζεται (~50g). Τα δείγματα τοποθετούνται σε φούρνο σε θερμοκρασία 105°C για 12h. Η υγρασία υπολογίζεται από τη διαφορά μάζας πριν και μετά τη ξήρανση ενώ η ποσοστιαία υγρασία του δείγματος υπολογίζεται από την Εξίσωση (4.1).

$$\text{Υγρασία} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100 \quad \text{Εξίσωση (4.1)}$$

Όπου:

Υγρασία: Περιεκτικότητα σε υγρασία (% wb)

m_1 : Αρχική μάζα δείγματος πριν από την ξήρανση (g)

m_2 : Τελική μάζα δείγματος μετά από ξήρανση στους 105°C για 12h (g)

4.3.3. Προσδιορισμός οξυγόνου

Η μέτρηση 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.

4.3.4. Προσδιορισμός pH

Το pH-μετρο (Mettler Toledo MPC 227 pH/Conductivity Meter) βαθμονομείται χρησιμοποιώντας ρυθμιστικά διαλύματα με pH 4, 7, 10. Για τη μέτρηση του pH σε στερεό δείγμα, 25g δείγματος αναδεύονται με 50ml αποσταγμένου νερού (1:2 w:v) για 30 λεπτά και ύστερα διηθείται διαμέσου φίλτρων Whatman 0.45μm. Στο διήθημα προσδιορίζεται το pH με τη χρήση pH-μέτρου. Για τη μέτρηση του pH στα στραγγίσματα, βυθίζεται το ηλεκτρόδιο στο δείγμα και καταγράφεται η ένδειξη στην κλίμακα του pHμέτρου. Σε όλα τα δείγματα το ηλεκτρόδιο ξεπλένεται με αποσταγμένο νερό και επαναλαμβάνεται η μέτρηση.

4.3.5. Προσδιορισμός ολικού οργανικού άνθρακα

Η μέτρηση του οργανικού άνθρακα πραγματοποιείται με τη χρήση αναλυτή ολικού οργανικού άνθρακα (TOC-V) ενσωματωμένο με μονάδα στερεών δειγμάτων (Solid Sample Module - 5000A) της Shimadzu. Τα στερεά δείγματα ξηραίνονται στους 105°C για 12h, ομογενοποιούνται με λειοτρίβηση, ζυγίζονται 100mg και χωρίζονται ισόποσα σε ειδικά σκαφίδια-κάψες. Τα σκαφίδια επικαλύπτονται με κεραμικές ίνες για τη μείωση των αποκλίσεων πτητικών δειγμάτων και εισέρχονται στο φούρνο για την οξειδωσή τους σε θερμοκρασία 900C°. Τα προϊόντα της καύσης οδηγούνται στην κεντρική μονάδα TOC-V όπου και υπολογίζεται η μάζα του ολικού οργανικού άνθρακα. Η ποσοστιαία περιεκτικότητα του ολικού άνθρακα προσδιορίζεται από την Εξίσωση (4.2).

$$TOC = \frac{m_{TOC}}{m_{\text{Δείγματος}}} \cdot 100$$

Εξίσωση (4.2)

Όπου

TOC: Περιεκτικότητα ολικού οργανικού άνθρακα (% dm)

m_{TOC} : Μάζα του οργανικού άνθρακα (mg)

$m_{\text{Δείγματος}}$: Αρχική μάζα του δείγματος (mg)

4.3.6. Προσδιορισμός οργανικής ουσίας

Η ποσοστιαία περιεκτικότητα της οργανικής ουσίας (OM%) στο δείγμα υπολογίζεται από την Εξίσωση (4.3) σύμφωνα με τους Navarro et al. (1993)

$$OM = TOC \cdot 1.91$$

Εξίσωση (4.3)

Επιπλέον, ο προσδιορισμός των απωλειών της βιοαποδομήσιμης οργανικής ουσίας (BOM) ως ποσοστό της αρχικής οργανικής ουσίας κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης, προκύπτει από την Εξίσωση (4.4) υπό τη θεώρηση ότι η μάζα του στερεού υπολείμματος δεν μεταβάλλεται κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης (Kalamdhad and Kazmi, 2009; Liang et al., 2006; Changa et al., 2003; Paredes et al., 2001; Paredes et al., 1996a; Paredes et al., 1996b; Viel et al., 1987)

$$BOM_{\text{loss}} = 100 - 100 \frac{[X_1 (100 - X_2)]}{[X_2 (100 - X_1)]}$$

Εξίσωση (4.4)

Όπου:

BOM_{loss} : Απώλειες οργανικής ουσίας ως ποσοστό της αρχικής οργανικής ουσίας (% OM)

X_1 : Αρχική περιεκτικότητα σε στερεό υπόλειμμα (% dm)

X_2 : Τελική περιεκτικότητα σε στερεό υπόλειμμα (% dm)

Η περιεκτικότητα των δειγμάτων σε στερεό υπόλειμμα υπολογίζεται από τη διαφορά της περιεκτικότητας της οργανικής από τη ξηρή ουσία του δείγματος (Adani et al., 2000).

4.3.7. Προσδιορισμός ολικού αζώτου

Ο προσδιορισμός του ολικού αζώτου πραγματοποιείται με τη μέθοδο Kjeldahl όπως αυτή περιγράφεται από τα «German Standard Methods for the examination of water, sewage, and sludge» (DIN, 1993). Η διαδικασία περιλαμβάνει τη χώνευση του δείγματος σε σωλήνα Kjeldahl σε όξινο διάλυμα με την προσθήκη πυκνού H_2SO_4 υπό την παρουσία καταλυτών $CuSO_4$ και Se και κράματος Devarda για την αναγωγή του νιτρικού αζώτου. Το δείγμα τοποθετείται σε ειδική συσκευή απόσταξης (Vapodest Distillation System) με τη διοχέτευση περίσσειας $NaOH$ και απιονισμένου νερό για την αύξηση της αλκαλικότητας και την έκλυση αμμωνίας. Η αμμωνία διαχωρίζεται με απόσταξη σε ρεύμα ατμών, συλλέγοντας το απόσταγμα σε δείκτη που εμπεριέχει βορικό οξύ (2% w/v H_3BO_3). Ο προσδιορισμός του ολικού αζώτου επιτυγχάνεται ογκομετρικά με τιτροδότηση πρότυπου διαλύματος 0.001M HCl με προπαρασκευασμένο δείκτη (ερυθρό του μεθυλίου και μπλε του μεθυλενίου) μέχρι την αλλαγή του χρώματος στο διάλυμα από ιώδες σε πράσινο σύμφωνα με την Εξίσωση (4.5).

$$N = \frac{1.4007 \cdot T_{\text{HCl}} \cdot (V - V_T)}{M} \quad \text{Εξίσωση (4.5)}$$

Όπου:

- N: Περιεκτικότητα σε ολικό άζωτο (% dm)
 T_{HCl} : Συγκέντρωση τιτλοδότη HCl ίση με 0.001M
V: Όγκος διαλύματος HCl για την τιτλοδότηση του δείγματος (ml)
 V_T : Όγκος διαλύματος HCl για την τιτλοδότηση του τυφλού (ml)
 $m_{\text{Δείγματος}}$: Αρχική μάζα δείγματος (g)

Ο προσδιορισμός της περιεκτικότητας σε οργανικό άζωτο (N_{org}) προκύπτει από τη διαφορά του ολικού αζώτου με το ανόργανο άζωτο. Ως ανόργανο άζωτο θεωρείται το άθροισμα των αμμωνιακών και των νιτρικών δεδομένου ότι οι συγκεντρώσεις των υπόλοιπων ανόργανων μορφών του αζώτου, όπως τα νιτρώδη, είναι αμελητέα (Paredes et al., 2002; Beck-Friis et al., 2001).

Ο προσδιορισμός των απωλειών αζώτου ως ποσοστό της αρχικής περιεκτικότητας σε ολικό άζωτο κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης, προκύπτει από την Εξίσωση (4.6) υπό τη θεώρηση ότι η μάζα του στερεού υπολείμματος δεν μεταβάλλεται κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης (Bernal et al., 2009; Bueno et al., 2008).

$$N_{\text{loss}} = 100 - 100 \frac{(X_1 \cdot N_2)}{(X_2 \cdot N_1)} \quad \text{Εξίσωση (4.6)}$$

Όπου:

- N_{loss} : Απώλειες αζώτου ως προς το αρχικό ολικό άζωτο (% N_1)
 X_1 : Αρχική περιεκτικότητα σε στερεό υπόλειμμα (% dm)
 X_2 : Τελική περιεκτικότητα σε στερεό υπόλειμμα (% dm)
 N_1 : Αρχική περιεκτικότητα σε ολικό άζωτο (% dm)
 N_2 : Τελική περιεκτικότητα σε ολικό άζωτο (% dm)

Η περιεκτικότητα των δειγμάτων σε στερεό υπόλειμμα υπολογίζεται από τη διαφορά της περιεκτικότητας της οργανικής από τη ξηρή ουσία του δείγματος (Adani et al., 2000).

4.3.8. Προσδιορισμός αμμωνιακών και νιτρικών

Το στερεό δείγμα τοποθετείται σε κωνική φιάλη και προστίθεται 2M KCl, γίνεται ανάδευση για 1h, φυγοκέντριση και τέλος διήθηση. Στη συνέχεια σε ειδική σωλήνα Kjeldahl προστίθεται μέρος από το διήθημα και MgO. Γίνεται απόσταξη σε ρεύμα ατμών, συλλέγοντας το απόσταγμα σε δείκτη που περιέχει 2% w/v H_3BO_3 ενώ ο προσδιορισμός των αμμωνιακών στο διάλυμα επιτυγχάνεται με τιτλοδότηση πρότυπου διαλύματος 0.001M HCl με προπαρασκευασμένο δείκτη (ερυθρό του μεθυλίου και μπλε του μεθυλενίου) μέχρι την αλλαγή του χρώματος στο διάλυμα από ιώδες σε πράσινο σύμφωνα με την Εξίσωση (4.5). Για τον προσδιορισμό νιτρικών σε στερεό δείγμα, στον προηγούμενο σωλήνα απόσταξης, εφόσον έχει αποστάξει το αμμωνιακά ιόντα, προστίθεται NH_2SO_3 και στη συνέχεια κράμα Devarda. Γίνεται απόσταξη σε ρεύμα ατμών, συλλέγοντας το απόσταγμα σε 2% w/v H_3BO_3 που περιέχει τον δείκτη. Ακολουθεί τιτλοδότηση πρότυπου διαλύματος 0.001M HCl με προπαρασκευασμένο δείκτη (ερυθρό του μεθυλίου και μπλε του μεθυλενίου) μέχρι την αλλαγή του χρώματος στο διάλυμα από ιώδες σε πράσινο σύμφωνα με την Εξίσωση (4.5).

Η ανάλυση των αμμωνιακών ιόντων στα στραγγίσματα γίνεται φωτομετρικά σύμφωνα με την οδηγία «Spectroquant Ammonium Test» της MERCK με κωδικό 1.14752.0001 ή 1.14752.0002 και 1.00683.0001 στηριζόμενη στις μεθόδους EPA 350.1, APHA 4500-NH₃D και ISO 7150/1. Η διαδικασία προσδιορισμού περιγράφεται ακολούθως. Το δείγμα διηθείται με χρήση μεμβράνης Whatman 0.45 μm. Το διήθημα συλλέγεται και αραιώνεται κατάλληλα ώστε το τελικό δείγμα να είναι στο εύρος τιμών μέτρησης της μεθόδου. Σε καθαρό φιαλίδιο γίνεται η προσθήκη 5.0ml κατάλληλα αραιωμένου δείγματος και 0.60ml αντιδραστηρίου NH₄-1. Το φιαλίδιο πωματίζεται και ανακινείται. Στη συνέχεια προστίθεται μια δόση αντιδραστηρίου NH₄-2 και το φιαλίδιο πωματίζεται και ανακινείται εκ νέου. Το διάλυμα αφήνεται σε ηρεμία για 5min και έπειτα γίνεται προσθήκη 4 σταγόνων αντιδραστηρίου NH₄-3, και το φιαλίδιο πωματίζεται και ανακινείται. Το διάλυμα αφήνεται σε ηρεμία για επιπλέον 5min και έπειτα γίνεται η πλήρωση της κυψελίδας μέτρησης. Ο προσδιορισμός των αμμωνιακών ιόντων πραγματοποιείται με την τοποθέτηση της κυψελίδας στο φωτόμετρο τύπου NOVA 60.

Η ανάλυση των νιτρικών ιόντων στα στραγγίσματα γίνεται φωτομετρικά σύμφωνα με την οδηγία «Spectroquant Nitrate Test» της MERCK με κωδικό 1.09713.0001 ή 1.09713.0002 στηριζόμενη στη μέθοδο ISO 7890/1. Η διαδικασία προσδιορισμού περιγράφεται ακολούθως. Το δείγμα διηθείται με χρήση μεμβράνης Whatman 0.45μm. Το διήθημα συλλέγεται και αραιώνεται κατάλληλα ώστε το τελικό δείγμα να είναι στο εύρος τιμών μέτρησης της μεθόδου. Σε καθαρό φιαλίδιο γίνεται η προσθήκη 4.0ml αντιδραστηρίου NO₃-1, 0.5ml κατάλληλα αραιωμένου δείγματος, 0.5ml αντιδραστηρίου NO₃-2 και ύστερα το φιαλίδιο πωματίζεται και ανακινείται. Το διάλυμα αφήνεται σε ηρεμία για 10min και έπειτα γίνεται η πλήρωση της κυψελίδας μέτρησης. Ο προσδιορισμός των νιτρικών ιόντων γίνεται με την τοποθέτηση της κυψελίδας στο φωτόμετρο τύπου NOVA 60.

4.3.9. Προσδιορισμός αναλογίας C/N

Ο προσδιορισμός της αναλογίας του άνθρακα προς το άζωτο (C/N) προκύπτει από το λόγο της ποσοστιαίας περιεκτικότητας του δείγματος σε ολικό οργανικό άνθρακα (TOC) προς την ποσοστιαία περιεκτικότητα του δείγματος σε ολικό άζωτο (N) όπως φαίνεται στην Εξίσωση (4.7).

$$C/N = \frac{TOC}{N} \quad \text{Εξίσωση (4.7)}$$

4.3.10. Προσδιορισμός μετάλλων και μακροστοιχείων

Για τον προσδιορισμό των μετάλλων Cd, Cr, Cu, Ni, Pb και Zn και των μακροστοιχείων K, Ca και Mg σε στερεό δείγμα, αρχικά πραγματοποιείται χώνευση σε ποσότητα ξηρού δείγματος (105°C για 12h) σε συσκευή Digesdahl Digestion (HACH model 23130) και στη συνέχεια προσδιορίζονται σε φασματοφωτόμετρο ατομικής απορρόφησης τύπου Varian AA240 FS. Αναλυτικότερα η διαδικασία προσδιορισμού των παραπάνω στοιχείων περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

- Λαμβάνεται δείγμα λειοτριβημένου ξηρού δείγματος 0.50g, και προστίθενται 4ml πυκνού H₂SO₄ καθαρότητας 97%

- Το δείγμα χωνεύεται σε ειδική συσκευή χώνευσης σε θερμοκρασία 440°C
- Στα πέντε (5) πρώτα λεπτά λειτουργίας γίνεται προσθήκη 16.7ml H₂O₂ 30% v/v
- Από τη στιγμή που θα πέσει η τελευταία σταγόνα H₂O₂ συνεχίζεται η θέρμανση για ένα (1) λεπτό και ύστερα απομακρύνεται το δείγμα από τη συσκευή χώνευσης
- Το δείγμα αφήνεται προς ψύξη και στη συνέχεια διηθείται υπό κενό με τη χρήση φίλτρων GF/C 1.2μm. Το διήθημα φέρεται με απιονισμένο νερό, για πλήρη απομάκρυνση του διαλύματος, σε όγκο 15ml όπου και προσδιορίζονται τα στοιχεία σε φασματοφωτόμετρο ατομικής απορρόφησης με όρια ανίχνευσης που δίδονται στον Πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3: Στοιχεία λειτουργίας της συσκευής ατομικής απορρόφησης

Στοιχείο	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	K	Ca	Mg
Όρια ανίχνευσης (mg l ⁻¹)	0.002	0.02	0.01	0.02	0.05	0.005	0.005	0.003	0.0005

Η ανάλυση του ολικού φωσφόρου στο στερεό δείγμα πραγματοποιείται φωτομετρικά χρησιμοποιώντας το Spectroquant Phosphorus Cell Test No 1.14848.0001 ή 1.14848.0002. Η μέθοδος είναι ανάλογη της EPA 365.2+3, της APHA 4500-P E και της ISO 6878/1. Ζυγίζεται 1 g ξηραμένου δείγματος. Προσθέτονται 10 ml HNO₃ + 2 ml H₂SO₄ και θερμαίνεται στους 120°C μέχρι ξηρού. Το δείγμα αφήνεται να φθάσει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και έπειτα προστίθενται ακόμη 5 ml HNO₃ μέχρι το στερεό να διαλυθεί και το διάλυμα να γίνει διαυγές. Το δείγμα αφήνεται εκ νέου να φθάσει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και αραιώνεται στα 80 ml. Στη συνέχεια διηθείται με μεμβράνη Whatman 0.45 mm και αραιώνεται στα 100 ml. Πραγματοποιείται κατάλληλη αραιώση ώστε η τελική συγκέντρωση ολικού φωσφόρου του δείγματος να είναι μέσα στα επιθυμητά όρια. Σε ένα φιαλίδιο ανάπτυξης χρώματος μεταγγίζονται 5 ml του δείγματος. Το φιαλίδιο ανακινείται. Έπειτα προσθέτονται 5 σταγόνες αντιδραστήριου P2-K και ανακινείται. Τέλος προστίθεται μια 1 Δόση αντιδραστήριου P3-K και ανακινείται έντονα μέχρι το περιεχόμενο να διαλυθεί. Η μέτρηση πραγματοποιείται έπειτα από 5 λεπτά στο φωτόμετρο τύπου NOVA60.

Πρέπει να σημειωθεί ότι για λόγους σύγκρισης τα μακροστοιχεία P, K, Ca και Mg εκφράζονται ως προς τα οξείδια P₂O₅, K₂O, CaO και MgO αντίστοιχα.

Η διαδικασία προσδιορισμού των μετάλλων (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb και Zn) στα στραγγίσματα περιλαμβάνει τη διήθηση δείγματος με φίλτρα GF/C 1.2μm την κατάλληλη αραιώση του και στη συνέχεια τη μέτρηση στο φασματοφωτόμετρο ατομικής απορρόφησης.

4.3.11. Προσδιορισμός φυτοτοξικότητας του κόμποστ

Η εκτίμηση της φυτοτοξικότητας του παραγόμενου κόμποστ προσδιορίζεται με το δείκτη βλαστικότητας των καρπών. Η πειραματική διαδικασία περιγράφεται ακολούθως. Σε 10g νωπού κόμποστ προστίθενται 100ml H₂O (1:10 w/v) και αναδεύεται για 30min. Το διάλυμα υπόκειται σε φυγοκέντρωση στα 3000rpm για 10min και το υπερκείμενο υγρό διηθείται υπό κενό με φίλτρα Whatman 41 (20 – 25 μm). Σε τρυβλία προστίθεται 10ml εκχυλίσματος του κόμποστ ενώ στην περίπτωση του τυφλού προστίθεται 10ml απιονισμένο νερό. Επιπλέον, στα τρυβλία τοποθετείται διηθητικό χαρτί (Whatman no.1) πάνω στο οποίο κατανέμονται 20 σπόροι συγκεκριμένου καρπού, σε κατάλληλη διάταξη ώστε να ισαπέχουν μεταξύ τους. Τα τρυβλία τοποθετούνται σε ειδικό θάλαμο σε

θερμοκρασία $20 \pm 5^\circ\text{C}$ απουσία φωτός για 5 ημέρες. Στο τέλος της πέμπτης ημέρας γίνεται καταμέτρηση του αριθμού των σπόρων οι οποίοι έχουν βλαστήσει καθώς και καταμέτρηση του μήκους των βλαστών. Ο Δείκτης Βλαστικότητα (Δ.Β.) υπολογίζεται ως ποσοστό σύμφωνα με την Εξίσωση (4.8).

$$\Delta. B. = \%G * \frac{L_e}{L_c} \quad \text{Εξίσωση (4.8)}$$

Όπου:

Δ.Β.: Δείκτης βλαστικότητα (%)

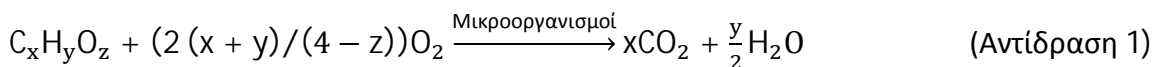
G: Ποσοστό των σπόρων που έχουν βλαστήσει στο δείγμα συγκριτικά με το τυφλό (%)

L_e : Μήκος βλαστού στο τυφλό (cm)

L_c : Μήκος βλαστού στο δείγμα (cm)

4.3.12. Προσδιορισμός BOD₅

Ως βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD) ορίζεται η ποσότητα οξυγόνου που καταναλώνεται από μικροοργανισμούς για τη βιολογική αποδόμηση των οργανικών ενώσεων που περιέχονται στα απόβλητα απουσία φωτός και σε θερμοκρασία 20°C . Συνήθως, η βιοχημική οξείδωση είναι βραδεία και σε χρόνο 20 ημερών έχει οξειδωθεί το 95-99% της οργανικής ουσίας των λυμάτων. Δεδομένου ότι ο χρόνος αυτός είναι πολύ μεγάλος, μετράται το BOD των πρώτων 5 ημερών (BOD₅) όπου συνήθως διασπάται το 70-80% των οργανικών ενώσεων που περιέχουν μόνο C, H, O (Αντίδραση 1).



Τα δείγματα των στραγγισμάτων που προκύπτουν από τη διεργασία της κομποστοποίησης συλλέγονται σε γυάλινες φιάλες με εσφυρισμένο πώμα, που πληρώνονται μέχρι υπερχείλισης και πωματίζονται με προσοχή ώστε να μη διαμορφώνονται φυσαλίδες αέρα. Μεταφέρονται με προσοχή, ώστε να μην είναι εκτεθειμένα στο φως και τη θερμότητα. Η ανάλυση γίνεται εντός δύο ωρών εναλλακτικά τα δείγματα διατηρούνται στο ψυγείο σε θερμοκρασία 4°C για 24h. Ο προσδιορισμός του BOD βασίζεται στη μέθοδο 5210B των πρότυπων μεθόδων ανάλυσης (APHA, 1998) όπως αυτή καταγράφεται παρακάτω.

Τα αντιδραστήρια που χρειάζονται για τον προσδιορισμό του BOD είναι τα εξής:

- Ρυθμιστικό διάλυμα φωσφορικών αλάτων (pH = 7.2) (α.1)
Ζυγίζονται 8.5g KH_2PO_4 , 21.75g K_2HPO_4 ή 28.499g $K_2HPO_4 \cdot 3H_2O$, 17.7g Na_2HPO_4 ή 33.4g $Na_2HPO_4 \cdot 7H_2O$ ή 20.7g $Na_2HPO_4 \cdot 2H_2O$ και 1.7g NH_4Cl και έπειτα διαλύονται σε απιονισμένο νερό και στη συνέχεια αραιώνονται στο 1l.
- Διάλυμα θεικού μαγνησίου $Mg SO_4$ (α.2)
Ζυγίζονται 22.5g $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ και διαλύονται σε απιονισμένο νερό και το διάλυμα αραιώνεται στο 1l.
- Διάλυμα χλωριούχου ασβεστίου $CaCl_2$ (α.3)
Ζυγίζονται 27.5g $CaCl_2$ και διαλύονται σε απιονισμένο νερό και το διάλυμα αραιώνεται στο 1l.
- Διάλυμα χλωριούχου σιδήρου $FeCl_3$ (α.4)

Ζυγίζονται 0.25g $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ και διαλύονται σε απιονισμένο νερό και το διάλυμα αραιώνεται στο 1l.

- Διάλυμα θειουρίας (α.5)
Ζυγίζονται 2g θειουρίας και διαλύονται σε απιονισμένο νερό και το διάλυμα αραιώνεται στο 1l. Η θειουρία προστίθεται προκειμένου να αναχαιτισθεί η νιτροποίηση
- Αραιωτικό διάλυμα (α.6)
1ml από καθένα από τα πέντε παραπάνω διαλύματα (α.1 – α.5), συνολικά 5ml, διαλύονται σε απιονισμένο νερό και αραιώνονται στο 1l.
- Διάλυμα μικροοργανισμών (α.7)
1ml φρέσκιας ιλύς διαλύεται σε απιονισμένο νερό και αραιώνεται στα 50ml.

Η πορεία προσδιορισμού του BOD περιγράφεται ακολούθως. Το διαλυμένο οξυγόνο του αραιωτικού διαλύματος (α.6) πρέπει να είναι 7-9 mg l^{-1} ($\text{DO}_{\text{αραιωτ.}} = 7-9 \text{ mg l}^{-1}$). Για το λόγο αυτό οξυγονώνεται το αραιωτικό διάλυμα με την εμφύσηση αέρα για 15-20 min. Για την παρασκευή τυφλού δείγματος εισάγεται σε φιάλη επώασης BOD 300ml αραιωτικού διαλύματος (α.6), και μετράται το διαλυμένο οξυγόνο ($\text{DO}_{\text{Α-Τυφλό}}$). Για την παρασκευή τυφλού δείγματος με μικροοργανισμούς τοποθετούνται σε φιάλη επώασης BOD 300ml αραιωτικού διαλύματος (α.6) και 1.5ml διαλύματος μικροοργανισμών (α.7). Έπειτα πραγματοποιούνται οι απαιτούμενες αραιώσεις στο δείγμα ανάλογα με το αναμενόμενο εύρος τιμών BOD. Σε φιάλες επώασης BOD εισάγονται 300ml από την κάθε αραιώση που απαιτείται και 1.5ml διαλύματος μικροοργανισμών και μετράται το διαλυμένο οξυγόνο ($\text{DO}_{\text{Α-Δείγμα}}$). Τοποθετούνται οι φιάλες επώασης σε σκοτεινό επωαστικό κλίβανο, σταθερής θερμοκρασίας $20 \pm 1^\circ\text{C}$, για 5 ημέρες. Μετά την πάροδο των 5 ημερών μετράται εκ νέου το διαλυμένο οξυγόνο για τα δείγματα ($\text{DO}_{\text{Τ-Δείγμα}}$) και το τυφλό ($\text{DO}_{\text{Τ-Τυφλό}}$). Το BOD_5 των δειγμάτων υπολογίζεται με βάση την Εξίσωση (4.9).

$$\text{BOD}_5 = [(\text{DO}_{\text{Α-Δείγμα}} - \text{DO}_{\text{Τ-Δείγμα}}) - (\text{DO}_{\text{Α-Τυφλό}} - \text{DO}_{\text{Τ-Τυφλό}})] \cdot \text{Αραίωση} \quad \text{Εξίσωση (4.9)}$$

Όπου:

BOD_5 : Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο των πέντε πρώτων ημερών (mg l^{-1})

$\text{DO}_{\text{Α-Τυφλό}}$: Αρχικό διαλυμένο οξυγόνο στο τυφλό (mg l^{-1})

$\text{DO}_{\text{Α-Δείγμα}}$: Αρχικό διαλυμένο οξυγόνο στο δείγμα (mg l^{-1})

$\text{DO}_{\text{Τ-Τυφλό}}$: Τελικό διαλυμένο οξυγόνο στο τυφλό (mg l^{-1})

$\text{DO}_{\text{Τ-Δείγμα}}$: Τελικό διαλυμένο οξυγόνο στο δείγμα (mg l^{-1})

4.3.13. Μικροβιολογικές αναλύσεις

Στις μικροβιολογικές αναλύσεις περιλαμβάνεται η ανίχνευση ολικών και περιττωματικών κολοβακτηριοειδών και αυγών ελμίνθων (*Helminth Ova*). Τα ολικά και τα περιττωματικά κολοβακτηριοειδή αποτελούν συχνά δείκτη πιθανής παρουσίας βακτηριακών παθογόνων μικροοργανισμών (USEPA, 2003), ο προσδιορισμός των οποίων γίνεται σύμφωνα με την τεχνική «Most Probable Number» (MPN) (Thompson, 2002). Ο προσδιορισμός των ελμίνθων πραγματοποιείται με την ανίχνευση της παρουσίας και της βιωσιμότητας των *Ascaris Ova* καθώς θεωρούνται ως το ανθεκτικότερο στο είδος των παρασιτικών μικροοργανισμών (USEPA, 2003).

4.3.13.1. Προσδιορισμός ολικών και περιττωματικών κολοβακτηριοειδών

Για τον προσδιορισμό των ολικών κολοβακτηριοειδών ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία. Τοποθετούνται 20g δείγματος σε αποστειρωμένο σάκο stomacher και προστίθεται Buffered Peptone Water (BPW) μέχρι τα 200g για τη διαμόρφωση ομογενοποιημένου διαλύματος 1:10. Το διάλυμα αναδεύεται για 2min στα 260rpm και στη συνέχεια ετοιμάζονται τρία διαλύματα με διαδοχικές αραιώσεις 1:10 σε αποστειρωμένο BPW. Αυτό επιτυγχάνεται με την προσθήκη 1ml ομογενοποιημένου διαλύματος 1:10 και 9ml BPW αναδεύοντας για 5-10sec. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται άλλες δύο φορές.

Σε 9 φιαλίδια (τρεις επαναλήψεις για κάθε αραιώση) με ανεστραμμένο σωληνίσκο Durham τοποθετούνται 9ml αποστειρωμένου θρεπτικού μέσου Lauryl-Tryptose broth (LT)

- Προσθήκη 1ml ομογενοποιημένου διαλύματος 1:10 σε τρία φιαλίδια που περιέχουν 9ml αποστειρωμένο LT
- Προσθήκη 1ml ομογενοποιημένου διαλύματος 1:100 σε τρία φιαλίδια που περιέχουν 9ml αποστειρωμένο LT
- Προσθήκη 1ml ομογενοποιημένου διαλύματος 1:1000 σε τρία φιαλίδια που περιέχουν 9ml αποστειρωμένο LT

Τα LT φιαλίδια πωματίζονται και τοποθετούνται σε επωαστικό κλίβανο για 24-48h σε θερμοκρασία $37\pm 2^{\circ}\text{C}$. Παρατηρούνται τα φιαλίδια με τον ανεστραμμένο σωληνίσκο Durham για την παρουσία φυσαλίδων αέρα. Ο σχηματισμός φυσαλίδων υποδεικνύει τη ζύμωση λακτόζης και κατ' επέκταση την παρουσία κολοβακτηριοειδών. Έπειτα γίνεται καταγραφή του αριθμού των LT φιαλιδίων στα οποία παρουσιάζεται σχηματισμός αερίου (θετικά και αρνητικά). Τα ολικά κολοβακτηριοειδή προσδιορίζονται από το υπολογιστικό μοντέλο που δίδεται από το Test Methods for the Examination of Compost and Composting (Thompson, 2002) βάσει του οποίου υπολογίζεται το MPN των ολικών κολοβακτηριοειδών σύμφωνα με τα θετικά και αρνητικά αποτελέσματα των αραιώσεων.

Για τον προσδιορισμό των περιττωματικών κολοβακτηριοειδών ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία. Σε φιαλίδια τοποθετούνται 9ml αποστειρωμένο μέσο EC-MUG (*E. coli* και 4-methylumbelliferone- β -D-Glucuronide). Από κάθε LT φιαλίδιο το οποίο είναι θετικό στην παρουσία ολικών κολοβακτηριοειδών μεταφέρονται 20 μl – 40 μl στα φιαλίδια EC-MUG. Τα EC-MUG φιαλίδια πωματίζονται και τοποθετούνται σε επωαστικό κλίβανο για 18-24h σε θερμοκρασία $44.5\pm 0.2^{\circ}\text{C}$. Ο σχηματισμός φυσαλίδων στα EC-MUG φιαλίδια υποδεικνύει την παρουσία περιττωματικών κολοβακτηριοειδών. Το MPN των περιττωματικών κολοβακτηριοειδών υπολογίζεται όπως και στην περίπτωση των ολικών κολοβακτηριοειδών.

4.3.13.2. Προσδιορισμός ελμίνθων (Helminth)

Ο προσδιορισμός της παρουσίας και της βιωσιμότητας των ελμίνθων (Helminth) πραγματοποιείται με την ανίχνευση της παρουσίας και της βιωσιμότητας των *Ascaris Ova* σύμφωνα με τη μεθοδολογία που προτείνεται από την USEPA με τίτλο «Test method for detecting, enumerating and determining the viability of *Ascaris Ova* in sludge» (USEPA, 2003) όπως παρουσιάζεται παρακάτω. Το στερεό δείγμα αναμιγνύεται με ρυθμιστικό διάλυμα τασιενεργών ουσιών. Το μίγμα κοσκινίζεται σε επιθυμητό μέγεθος

και αφήνεται να καθιζάνει. Το υπερκείμενο διάλυμα διαχωρίζεται ενώ το ίζημα υπόκειται σε φυγοκέντριση αφού έχει προστεθεί ποσότητα θειικού μαγνησίου ώστε να διευκολυνθεί ο διαχωρισμός. Στη συνέχεια το ίζημα κοσκινίζεται για δεύτερη φορά ώστε να απομακρυνθούν τα μικρότερου μεγέθους σωματίδια. Το συμπύκνωμα επωάζεται στους 26°C μέχρι τα ωάρια *Ascaris* να γονιμοποιηθούν πλήρως. Κατόπιν, το συμπύκνωμα εξετάζεται μικροσκοπικά για την παρουσία ωαρίων *Ascaris* σε ένα θάλαμο καταμέτρησης Sedgwick-Rafter.

4.3.13.3. Προσδιορισμός κοκκομετρικής/μηχανικής σύστασης του εδάφους

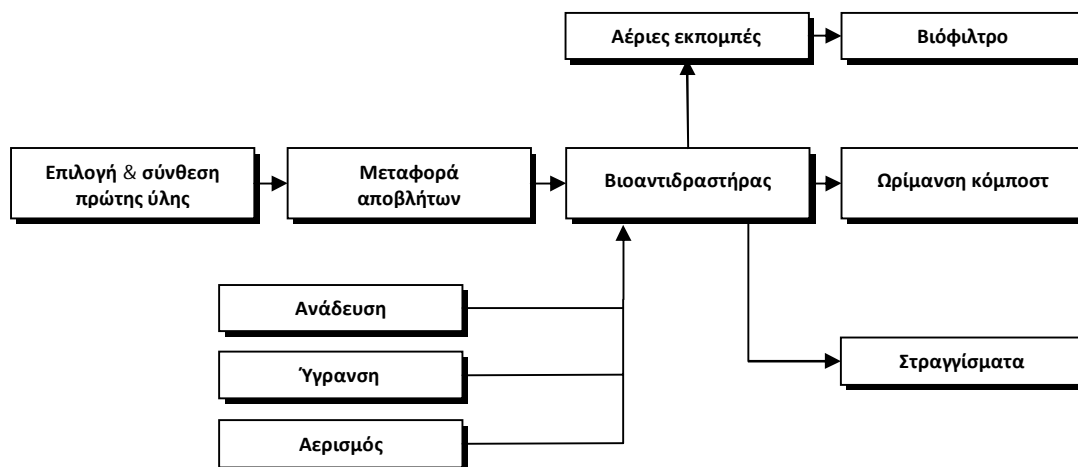
Η εργαστηριακή μέθοδος προσδιορισμού της κοκκομετρικής/μηχανικής σύστασης του εδάφους βασίζεται στη μηχανική ανάλυση κατά Βουγιούκο (Βουγιούκος, 1962). Εδαφικό δείγμα, γνωστού ξηρού βάρους διασπείρεται σε μία στήλη ύδατος και η πυκνότητα του αιωρήματος μετράται σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα με τη χρήση πυκνομέτρου. Εν συνεχεία, υπολογίζεται η εκατοστιαία αναλογία άμμου, ιλύος και αργίλου στο έδαφος.

Ο σχεδιασμός του συστήματος κομποστοποίησης έγινε ώστε να εξυπηρετήσει μία ευρεία κλίμακα βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων όπως γεωργικά υπολείμματα, λύ επεξεργασίας λυμάτων, τροφικά υπολείμματα βιομηχανικών μονάδων και κτηνοτροφικά απόβλητα όπως η κοπριά. Τα προαναφερόμενα στερεά απόβλητα προκαλούν πολύπλευρες οχλήσεις στο περιβάλλον (π.χ. επιφανειακά και υπόγεια ύδατα, οσμές). Η ορθή, περιβαλλοντικά, επεξεργασία τους και η παράλληλη αξιοποίησή του παραγόμενου κόμποστ ως εδαφοβελτιωτικό υλικό για την αύξηση της γονιμότητας και της παραγωγικότητας των εδαφών, αποτελεί μια εναλλακτική βιώσιμη μέθοδο διαχείρισής τους. Κατά το σχεδιασμό επιλέχτηκε οριζόντιος βιοαντιδραστήρας ασυνεχούς τροφοδοσίας (batch feeding system) με κατακόρυφη τροφοδοσία και απόληψη του τελικού προϊόντος. Η ανάδευση του υποστρώματος του βιοντιδραστήρα επιλέχτηκε να γίνεται μέσω οριζόντιου άξονα που φέρει κατάλληλα πτερύγια ενώ η κίνησή του γίνεται μέσω ηλεκτροκινητήρα. Ο έλεγχος του οξυγόνου του υποστρώματος επιλέχτηκε να γίνεται μέσω φυγοκεντρικού ανεμιστήρα και η ύγρανσή του μέσω κατάλληλης αντλίας. Τα αέρια απόβλητα του βιοαντιδραστήρα οδηγούνται σε βιόφιλτρο προς απόσπηση (το οποίο φέρει κλίνη κόμποστ) ενώ τα υγρά απόβλητα (προκύπτουν σε μικρές ποσότητες) συλλέγονται σε κατάλληλα διαμορφωμένη δεξαμενή. Ο έλεγχος των παραμέτρων της ανάδευσης, της ύγρανσης και του αερισμού του υποστρώματος επιλέχθηκε να γίνεται μέσω λειτουργίας συστήματος αυτομάτου ελέγχου (Προγραμματιζόμενο Λογικό Ελεγκτή - PLC). Έγιναν υπολογισμοί διαστασιολόγησης και επιλογή υλικών κατασκευής. Οι διατάξεις που ενσωματώθηκαν στον βιοαντιδραστήρα υπολογίσθηκαν και ακολούθως έγινε η προμήθεια τους από την αγορά. Για τα κατασκευαστικά σχέδια χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Rhinoceros. Η κατασκευή έγινε σε συνεργασία με το μηχανουργείο ΜΑΝΩΛΑΣ ΕΠΕ, με έδρα τον Πειραιά. Μετά την κατασκευή έγιναν δοκιμές στο συνεργείο ώστε να ελεγχθεί η ποιότητα του συστήματος και στη συνέχεια μεταφέρθηκε στην περιοχή Zemamra στο Μαρόκο η οποία βρίσκεται σε απόσταση 70km από την πόλη El Jadida, όπου εγκαταστάθηκε, δοκιμάστηκε και τέθηκε σε πλήρη λειτουργία. Ακολούθως περιγράφονται τα δομικά μέρη που συνθέτουν το σύστημα κομποστοποίησης.

5.1. Δομικά μέρη

Ο σχεδιασμός του συστήματος κομποστοποίησης αφορά σε ένα εγκιβωτισμένο σύστημα ασυνεχούς τροφοδοσίας κατακόρυφης ροής υλικού με αυτοματοποιημένες διατάξεις μηχανικής ανάδευσης, αερισμού και ύγρανσης του οργανικού υποστρώματος. Στην ενότητα αυτή γίνεται η αναλυτική περιγραφή της λειτουργίας του συστήματος καθώς και των επιμέρους δομικών μερών του τα οποία, στο σύνολό τους, είναι σχεδιασμένα με τέτοιο τρόπο ώστε, να διασφαλίζεται η αποδοτική και αποτελεσματική διαχείριση μιας ευρείας ποικιλίας βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων. Επιπλέον, ως προς καθεαυτή τη βιολογική επεξεργασία, επιδιώκεται η ολοκληρωμένη διαχείριση των οργανικών αποβλήτων με τον πλήρη έλεγχο και αυτοματισμό των λειτουργικών διεργασιών της κομποστοποίησης (αερισμό, ανάδευση και ύγρανση του υποστρώματος), την ελαχιστοποίηση και την επεξεργασία των εκπεμπόμενων αερίων, τη συλλογή και απομάκρυνση των παραγόμενων στραγγισμάτων και τη διαμόρφωση των απαιτούμενων συνθηκών για την κατά το δυνατό ταχύτερη επεξεργασία των αποβλήτων και την

παραγωγή αξιοποιήσιμου τελικού προϊόντος. Στην **Εικόνα 5.1** παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του συστήματος κομποστοποίησης.



Εικόνα 5.1: Διάγραμμα ροής συστήματος κομποστοποίησης

Το σύστημα, ως πλήρης εγκατάσταση βιολογικής επεξεργασίας μικρής κλίμακας, περιλαμβάνει τις ακόλουθες διατάξεις:

- **Διάταξη βιοαντιδραστήρα.**

Στο εσωτερικό του βιοαντιδραστήρα λαμβάνουν χώρα τα επάλληλα στάδια της αερόβιας βιολογικής αποδόμησης του εισερχόμενου ρεύματος οργανικών αποβλήτων. Ειδικότερα, τα επιμέρους τμήματα που συνθέτουν τη διάταξη του βιοαντιδραστήρα αφορούν στα ακόλουθα:

- Θάλαμος

Εντός του κυλινδρικού θαλάμου συσσωρεύεται η μάζα των οργανικών αποβλήτων και πραγματοποιούνται οι διεργασίες της αερόβιας βιοαποδόμησης. Στο εσωτερικό του, λαμβάνουν χώρα όλες οι επιμέρους λειτουργίες ρύθμισης συγκεκριμένων παραμέτρων που επηρεάζουν το ρυθμό των βιολογικών διεργασιών (π.χ. αερισμός, ύγρανση).

- Βάσεις στήριξης

Δεδομένου ότι, ο άξονας του κυλινδρικού θαλάμου είναι διατεταγμένος παράλληλα με το οριζόντιο επίπεδο, η βάση στήριξης συγκροτείται από δύο όμοια υποστρώματα που συγκρατούν το θάλαμο από τα ακραία τμήματά του.

- Θυρίδες τροφοδοσίας και απόληψης

Από την κυκλικού σχήματος θυρίδα τροφοδοσίας εισέρχεται το μίγμα των εισερχόμενων οργανικών αποβλήτων, στο εσωτερικό του θαλάμου. Η θυρίδα τροφοδοσίας είναι τοποθετημένη στο άνω κεντρικό τμήμα του θαλάμου και περιμετρικά, φέρει διάταξη χοάνης για την υποδοχή της μάζας των αποβλήτων. Η μεταφορά των αποβλήτων προς τη θυρίδα τροφοδοσίας γίνεται με χρήση μεταφορικής ταινίας. Οι τρεις (3) θυρίδες απόληψης του παραγόμενου προϊόντος βρίσκονται στο κατώτερο τμήμα του θαλάμου. Έχουν κυκλική διατομή και οι δύο εξ αυτών βρίσκονται στα ακραία τμήματα του θαλάμου, από την εσωτερική πλευρά των βάσεων στήριξης. Η τρίτη θυρίδα βρίσκεται στο κεντρικό τμήμα του θαλάμου, διατεταγμένη αντιδιαμετρικά της θυρίδας τροφοδοσίας.

- Σύστημα μηχανικής ανάδευσης
 Η ανάδευση του υποστρώματος πραγματοποιείται μέσω περιστρεφόμενου άξονα που καθ' όλο το ωφέλιμο μήκος του φέρει στελέχη τα οποία είναι κατάλληλα διαμορφωμένα για το σκοπό αυτό. Ο άξονας ανάδευσης συνδέεται με διάταξη μειωτήρα στροφών και η ταχύτητα περιστροφής του ρυθμίζεται από ηλεκτροκινητήρα. Η βασική λειτουργία του συστήματος ανάδευσης πλαισιώνεται από μια σειρά υποστηρικτικών εξαρτημάτων που αφορούν σε ασφαλιστικά συναρμογής και έδρανα κύλισης για σταθερότητα της διάταξης έναντι αξονικών και ακτινικών φορτίων αντίστοιχα και ελαστικούς δακτυλίους για τη διασφάλιση της στεγάνωσης κατά τη λειτουργία του βιοαντιδραστήρα.
- Σύστημα αερισμού – απαγωγής αερίων εκπομπών
 Οι λειτουργίες αερισμού του υποστρώματος και απαγωγής των αερίων εκπομπών που προκύπτουν ως προϊόντα των αντιδράσεων βιοξείδωσης, πραγματοποιούνται συνδυασμένα με χρήση φυγοκεντρικού ανεμιστήρα. Κατά τη λειτουργία του ανεμιστήρα, οι αέριες εκπομπές απάγονται μέσω ειδικά διαμορφωμένης οπής από τη μια πλευρά του κυλινδρικού θαλάμου. Ταυτόχρονα, λόγω των συνθηκών υποπίεσης που αναπτύσσονται στο εσωτερικό του βιοαντιδραστήρα, ποσότητες ατμοσφαιρικού αέρα αναρροφούνται από την απέναντι πλευρά του θαλάμου αφού πρώτα περάσουν από κατάλληλα διαμορφωμένο φίλτρο.
- Σύστημα ύγρυνσης
 Η ύγρυνση του υποστρώματος πραγματοποιείται με χρήση εκνεφωτών που είναι διατεταγμένοι κατά μήκος σωλήνωσης που διαπερνά αξονικά το κυλινδρικό βιοαντιδραστήρα. Οι ποσότητες του παρεχόμενου ύδατος ρυθμίζονται μέσω ειδικής βαλβίδας ελεγχόμενης ροής (βαλβίδα ύγρυνσης).
- Σύστημα απομάκρυνσης στραγγισμάτων
 Η απομάκρυνση των στραγγισμάτων επιτυγχάνεται μέσω κατασκευαστικών διαμορφώσεων (προσθήκη βανών) στις θυρίδες απόληψης, στο κατώτερο τμήμα του βιοαντιδραστήρα.
- Σύστημα αυτομάτου ελέγχου και παρακολούθησης
 Η ρύθμιση, ο έλεγχος και η παρακολούθηση ορισμένων κρίσιμων παραμέτρων των διεργασιών της αερόβιας βιοαποδόμησης, πραγματοποιούνται με τη χρήση Προγραμματιζόμενου Λογικού Ελεγκτή (PLC). Οι λειτουργίες ελέγχου αποσκοπούν στον έλεγχο της ανάδευσης, της ύγρυνσης και του αερισμού του υποστρώματος ώστε να επιτευχθεί η ρύθμιση της θερμοκρασίας και της περιεκτικότητας σε υγρασία και οξυγόνου του υποστρώματος για την επιτάχυνση της διεργασίας.
- **Διάταξη απόσμησης αερίων εκπομπών.**
 Οι αέριες εκπομπές των αντιδράσεων βιοξείδωσης οδηγούνται μέσω εύκαμπτου αεραγωγού σε διάταξη βιόφιλτρου για τη δέσμευση των χημικών ενώσεων. Το μέσο απόσμησης είναι ποσότητες ώριμου κόμποστ, οι οποίες συσσωρεύονται στο εσωτερικό κλειστού τοιχίου τετραγωνικού σχήματος.
- **Διάταξη μεταφοράς βιοαποδομήσιμων οργανικών αποβλήτων.**
 Η τροφοδοσία του βιοαντιδραστήρα με τις απαιτούμενες ποσότητες οργανικών αποβλήτων πραγματοποιείται με τη χρήση μεταφορικής ταινίας. Η ταινία μεταφέρει τα βιοαποδομήσιμα οργανικά απόβλητα με ανοδική κλίση προς τη χοάνη της θυρίδας τροφοδοσίας.

Η αναλυτική τεχνική περιγραφή των επιμέρους διατάξεων του συστήματος παρατίθεται στη συνέχεια και περιλαμβάνει διαστασιολόγηση των βασικών συνθετικών εξαρτημάτων, καθώς επίσης και επιλογή των υλικών κατασκευής.

5.2 Τεχνική περιγραφή δομικών μερών

5.2.1 Διάταξη βιοαντιδραστήρα

Η τεχνική περιγραφή του βιοαντιδραστήρα επιμερίζεται στην περιγραφή των δομικών μερών που το συγκροτούν (**Παράρτημα III**).

5.2.1.1. Θάλαμος

Ο θάλαμος του βιοαντιδραστήρα είναι οριζόντιος στατικός κύλινδρος εσωτερικής διαμέτρου 1300mm και εσωτερικού μήκους 3000mm. Είναι κατασκευασμένος από χάλυβα τύπου St 37.2, με ενιαίο πάχος 12mm σε όλο το μήκος της παράπλευρης κυλινδρικής του επιφάνειας. Οι δύο κυκλικές βάσεις του θαλάμου έχουν πάχος επίσης 12mm, στο κεντρικό τμήμα των οποίων φέρουν διαμπερή οπή διαμέτρου 110mm μέσω της οποίας διέρχεται το αξονικό στέλεχος του αναδευτήρα.

Η βάση του βιοαντιδραστήρα που βρίσκεται προς την πλευρά των ηλεκτροκινητήρων (περιστροφής αναδευτήρα και ανεμιστήρα), είναι περιμετρικά συγκολλημένη στο σώμα του κυλίνδρου. Σε επίπεδο λίγο υψηλότερα από αυτό του άξονα ανάδευσης και επί της επιφάνειας της βάσης, προεξέχει χαλύβδινη επιφάνεια πάχους 20mm στην οποία επικάθεται η διάταξη του ανεμιστήρα απαγωγής των αερίων εκπομπών της αερόβιας βιοαποδόμησης. Η χαλύβδινη επιφάνεια ανάρτησης της διάταξης του ανεμιστήρα, είναι πακτωμένη επί της βάσης μέσω κοχλιών.

Η βάση που βρίσκεται κατάντη των ηλεκτροκινητήρων είναι αφαιρούμενη για τη δυνατότητα πρόσβασης στο εσωτερικό του βιοαντιδραστήρα, αλλά και για να είναι εφικτή η αφαίρεση του αναδευτήρα, εφόσον αυτό απαιτηθεί για λόγους συντήρησης της διάταξης. Η βάση αυτή, πακτώνεται στο σώμα του κυλίνδρου μέσω τριάντα δύο (32) κοχλιών που διατάσσονται περιμετρικά συγκολλητικής στεφάνης επί της εσωτερικής παράπλευρης επιφάνειας του κυλίνδρου. Η στεφάνη έχει πλάτος 80mm και πάχος 20mm. Στο ανώτερο τμήμα της βάσης, έχει διανοιχτεί κυκλική διαμπερή οπή διαμέτρου $\cong 6''$ (150mm) επί της οποίας προσαρμόζεται κυκλική φλάντζα ίσης εσωτερικής διαμέτρου και βάνα τύπου 'butterfly'. Το κέντρο αυτής της οπής βρίσκεται σε κατακόρυφη απόσταση 100mm από το ανώτερο σημείο της εσωτερικής παράπλευρης επιφάνειας. Μέσω αυτής της οπής πραγματοποιείται αναρρόφηση αέρα από το περιβάλλον προς το εσωτερικό του βιοαντιδραστήρα. Ο προσαγόμενος ατμοσφαιρικός αέρας, μέσω εύκαμπτου κυκλικού αγωγού που καταλήγει σε στόμιο προσαρμοσμένο στην οπή της βάσης, εισέρχεται εντός του θαλάμου σε παροχή που ρυθμίζεται από την ταχύτητα περιστροφής του ανεμιστήρα αναρρόφησης των αερίων εκπομπών. Η διαδικασία αναρρόφησης γίνεται από το βιοαντιδραστήρα, προς το εξωτερικό περιβάλλον. Ο καθαρισμός του εισερχόμενου αέρα γίνεται μέσω ειδικού φίλτρου που είναι προσαρμοσμένο στο στόμιο αναρρόφησης ατμοσφαιρικού αέρα, ανάντη της οπής αερισμού. Ανάλογη διάταξη, τόσο ως προς τα εξαρτήματα, όσο και ως προς τις διαστάσεις, υπάρχει και στην αμφίπλευρη βάση του θαλάμου με μόνη διαφορά το ότι,

κατάντη της οπής είναι προσαρμοσμένη διάταξη φυγοκεντρικού ανεμιστήρα για την απαγωγή των αερίων εκπομπών που παράγονται κατά τις αντιδράσεις βιοξείδωσης.

Σε ότι αφορά στις οπές συναρμογής του αξονικού στελέχους του αναδευτήρα, σε κάθε μια από αυτές προσαρμόζεται διάταξη στηπιοθλίπτη για τη στεγανοποίηση του βιοαντιδραστήρα έναντι εκροής υγρών κατά τη διαδικασία ανάδευσης. Κάθε στηπιοθλίπτης, έχει εξωτερική διάμετρο 290mm και στο κεντρικό του τμήμα φέρει κυκλικό άνοιγμα διαμέτρου 110mm μέσω του οποίου διέρχεται ο άξονας του αναδευτήρα. Το πλάτος του σταθερού δακτυλίου του στηπιοθλίπτη είναι 80mm, ενώ το υλικό κατασκευής είναι επίσης χάλυβας τύπου St 37.2.

Ός προς τις κατασκευαστικές διαμορφώσεις επί της κυλινδρικής επιφάνειας του θαλάμου, περιλαμβάνονται οπές μέσω των οποίων πραγματοποιείται, τόσο η τροφοδοσία του αποβλήτου, όσο και η απόληψη του παραγόμενου προϊόντος. Συγκεκριμένα, για την κάλυψη των εργασιών τροφοδοσίας και απόληξης του υλικού, προς και από το βιοαντιδραστήρα αντίστοιχα, στο κεντρικό τμήμα της παράπλευρης επιφάνειας του θαλάμου και αντιδιαμετρικά, διανοίγονται:

- Μια (1) κυκλική διαμπερής οπή διαμέτρου $\cong 12''$ (300mm) στο άνω κεντρικό τμήμα της παράπλευρης επιφάνειας του θαλάμου για την τροφοδοσία του βιοαντιδραστήρα.
- Τρεις (3) κυκλικές διαμπερείς οπές διαμέτρου $\cong 10''$ (250mm), αντιδιαμετρικά ως προς τη θυρίδα τροφοδοσίας και ειδικότερα, μία στο κάτω κεντρικό τμήμα της παράπλευρης επιφάνειας του θαλάμου και άλλες δύο όμοιες εκατέρωθεν αυτής, για την απόληξη του παραγόμενου κόμποστ.

Επιπλέον, επί της κυλινδρικής επιφάνειας του θαλάμου έχουν διανοιχτεί οπές που σχετίζονται με την τέλεση των εργασιών ύγρανσης και αποστράγγισης του υποστρώματος κατά τα επάλληλα στάδια της βιολογικής επεξεργασίας. Η διέλευση των αγωγών ύγρανσης, επιτυγχάνεται μέσω διάνοιξης κυκλικής οπής $\cong 1''$ (25mm), επί του ανώτερου τμήματος της βάσεως στην οποία έχει εγκατασταθεί ο Προγραμματιζόμενος Λογικός Ελεγκτής (PLC) και η διάταξη του ανεμιστήρα απαγωγής των αερίων εκπομπών. Επίσης, η εκροή των στραγγισμάτων που προκύπτουν κατά τις διεργασίες αερόβιας βιοαποδόμησης, επιτυγχάνεται μέσω διάνοιξης κυκλικών διαμπερών οπών, μία για κάθε θυρίδα απόληξης κόμποστ.

Τέλος, εξωτερικά του θαλάμου και σε απόσταση 800mm από την κάθε βάση του κυλίνδρου, συγκολλήθηκαν περιμετρικά δύο ενισχυτικές στεφάνες από χάλυβα τύπου St.37.2, διαστάσεων 60mm πλάτος και 15mm πάχος. Οι ενισχυτικές στεφάνες αποσκοπούν στην αποφυγή στατικών και δυναμικών καμπτικών καταπονήσεων, ακτινικής διεύθυνσης, που ενδέχεται να προκληθούν από τη φέρουσα μάζα του συσσωρευμένου υλικού και από τη διαδικασία ανάδευσης.

Η εξωτερική επιφάνεια του κυλινδρικού θαλάμου όπως και όλα τα περιφερειακά εξαρτήματα φέρουν αντιδιαβρωτική προστασία η οποία περιλαμβάνει αμμοβολή και δύο στρώματα βαφής. Η εσωτερική επιφάνεια του θαλάμου φέρει αντιδιαβρωτική προστασία με 'grimer'. Ο ωφέλιμος όγκος του βιοαντιδραστήρα είναι 3.979m^3 (3979 l) και ο βαθμός αρχικής πλήρωσής του 60% του ωφέλιμου όγκου (2.387m^3 ή 2387 l). Στην **Εικόνα 5.2** που ακολουθεί, φαίνεται η εξωτερική επιφάνεια του θαλάμου με αναρτημένα σε αυτή τα εξαρτήματα του ανεμιστήρα, των θυρίδων τροφοδοσίας και

απόληψης, του πλαισίου του ηλεκτροκινητήρα και την προέκταση του άξονα ανάδευσης. Επιπλέον, διακρίνονται οι δύο βάσεις στήριξης του θαλάμου.



Εικόνα 5.2: Θάλαμος βιοαντιδραστήρα και παρελκόμενα εξαρτήματα (1)

5.2.1.2. Βάσεις στήριξης

Η διάταξη του κυλίνδρου αναρτάται σε μέσο ύψος περίπου 800mm από την επιφάνεια του δαπέδου της εγκατάστασης, επικαθήμενη σε δύο ομοειδείς διαμορφωμένες βάσεις στήριξης. Η λειτουργικότητα των βάσεων αφορά στη στήριξη και ευστάθεια του βιοαντιδραστήρα αλλά και στη σταθερότητα της εγκατάστασης κατά την λειτουργία του μηχανισμού ανάδευσης. Οι δύο βάσεις στήριξης έχουν σχήμα ανεστραμμένου 'Π' και ενιαίο πάχους 20mm σε κάθε τμήμα τους. Είναι συγκολλημένες επί της εξωτερικής παράπλευρης επιφάνειας του κυλινδρικού θαλάμου σε μικρή απόσταση από τις δύο άκρες του και σε απόσταση 750mm μεταξύ τους. Η επιφάνεια συγκόλλησης έχει 'προφίλ' κυκλικού τόξου έτσι ώστε να εφάπτεται πλήρως με την εξωτερική παράπλευρη επιφάνεια του θαλάμου. Μεταξύ των δύο αυτών επιφανειών, παρεμβάλλεται ενισχυτικό χαλύβδινο φύλλο με το ίδιο 'προφίλ' ως αρμός συγκόλλησης. Το φύλλο αυτό, διαστάσεων 120mm μήκος και 20mm πάχος, αποτελεί τη διεπιφάνεια συγκόλλησης μεταξύ βάσης στήριξης και κυλινδρικού θαλάμου.

Οι δύο βάσεις, είναι από χάλυβα τύπου St 37.2 και έχουν κατασκευαστεί από τη συγκόλληση χαλύβδινων μορφοδοκών τύπου 'Τ'. Το 'πέλμα' κάθε βάσης στήριξης έχει σχήμα ορθογωνίου παραλληλογράμμου μήκους 1100mm και πλάτους 300mm. Κάθε 'πέλμα' είναι πακτωμένο στο έδαφος με οκτώ (8) κοχλίες ικανής διαμέτρου.

Η βάση στήριξης που βρίσκεται προς την πλευρά των ηλεκτροκινητήρων, φέρει χαλύβδινη πλάκα ορθογωνικού σχήματος και διαστάσεων μήκους 700mm και πλάτους 350mm, στην οποία επικάθεται ο ηλεκτροκινητήρας του συστήματος ανάδευσης. Η συγκεκριμένη πλάκα αποτελεί τη βάση πλαισίου που έχει κατασκευαστεί επίσης από τμήματα χαλύβδινων μορφοδοκών τύπου 'Τ'. Το πλαίσιο αυτό, στο κατώτερο τμήμα του και στο ύψος της χαλύβδινης πλάκας, είναι συγκολλημένο στη μια από τις δύο βάσεις στήριξης, ενώ στο πάνω τμήμα του, συγκολλάται στην αντίστοιχη βάση του θαλάμου.

Στο ύψος αυτό, υπάρχει δεύτερη χαλύβδινη πλάκα στην οποία επικάθεται η διάταξη του εδράνου κύλισης του άξονα ανάδευσης. Στη διάταξη του πλαισίου αυτού, περιλαμβάνεται και διάμηκες χαλύβδινο έλασμα, τετραγωνικής διατομής διάστασης 80mm και ύψους 120mm, εντός του οποίου τοποθετείται ο μειωτήρας στροφών του ηλεκτροκινητήρα ανάδευσης. Στην **Εικόνα 5.3**, απεικονίζεται η μια από τις δύο βάσεις στήριξης. Διακρίνεται το διάμηκες χαλύβδινο έλασμα εντός του οποίου περιέχεται ο μειωτήρας στροφών. Επίσης, απεικονίζονται η διάταξη του ανεμιστήρα με τον εύκαμπτο αεραγωγό απαγωγής των αερίων εκπομπών, η διάταξη του εδράνου κύλισης του άξονα ανάδευσης και διακρίνεται τμήμα του ηλεκτροκινητήρα, στη βάση στήριξης του βιοαντιδραστήρα.



Εικόνα 5.3: Θάλαμος βιοαντιδραστήρα και παρελκόμενα εξαρτήματα (2)

5.2.1.3. Θυρίδες τροφοδοσίας και απόληψης

Μέσω των θυρίδων τροφοδοσίας και απόληψης, επιτυγχάνεται η είσοδος του υπό επεξεργασία αποβλήτου στο βιοαντιδραστήρα και η έξοδος του παραγόμενου κόμποστ. Τα βιοαποδομήσιμα στερεά απόβλητα οδηγούνται στη θυρίδα τροφοδοσίας του βιοαντιδραστήρα μέσω μεταφορικής ταινίας. Η θυρίδα τροφοδοσίας βρίσκεται στο άνω κεντρικό τμήμα της παράπλευρης κυλινδρικής επιφάνειας του θαλάμου, στην περιοχή της αντίστοιχης οπής. Έχει σχήμα χοάνης για την αποτελεσματική διοχέτευση του αποβλήτου στο εσωτερικό του θαλάμου και αποτελείται από τα ακόλουθα επιμέρους εξαρτήματα:

- Τμήμα κυκλικού σωλήνα από χάλυβα τύπου St 37.2, πάχους 12mm και διατομής $\cong 12''$ (300mm), όπου η κάτω περιφέρειά του συγκολλάται στο θάλαμο, γύρω από την οπή τροφοδοσίας. Στο άνω άκρο του συγκολλάται δακτυλιοειδής φλάντζα 'τόρνου', εσωτερικής διαμέτρου $\cong 12''$ (300mm), επίσης από χάλυβα τύπου St 37.2. Στη φλάντζα αυτή προσαρμόζεται βάνα τύπου 'butterfly' ίδιας διατομής και αντοχής σε πίεση μέχρι 16bar.
- Κωνική χοάνη από χάλυβα τύπου St 37.2 ελάχιστης εσωτερικής διαμέτρου $\cong 12''$ (300mm) και πάχους 12mm. Στο κάτω άκρο της χοάνης είναι συγκολλημένη δακτυλιοειδής φλάντζα 'τόρνου' ίδιας διαμέτρου $\cong 12''$ (εσωτερικής), ιδίου πάχους (12mm) και υλικού. Η διάταξη της κωνικής χοάνης

Εικόνα 5.4 : Θυρίδα τροφοδοσίας βιοαντιδραστήρα



συνδέεται με το τμήμα του κυκλικού σωλήνα μέσω 14 κοχλιών, έτσι ώστε να παρέχεται κατά περίπτωση, η δυνατότητα αφαίρεσης της χοάνης. Στην **Εικόνα 5.4** απεικονίζεται η θυρίδα τροφοδοσίας με το σύνολο των εξαρτημάτων που την απαρτίζουν.

Για τη απόληψη του κόμποστ, στο κάτω τμήμα του θαλάμου αντιδιαμετρικά της θυρίδας τροφοδοσίας, κατασκευάσθηκαν τρεις θυρίδες απόληψης, μία στο κεντρικό τμήμα της παράπλευρης κυλινδρικής επιφάνειας και άλλες δύο όμοιες αριστερά και δεξιά από αυτή. Η κεντρική θυρίδα απόληψης βρίσκεται ακριβώς κάτω από το κέντρο του άξονα ανάδευσης, ενώ οι άλλες δύο θυρίδες βρίσκονται αμφίπλευρα από αυτή και σε απόσταση 1000mm η κάθε μία. Ειδικότερα, η μια από αυτές (προς την πλευρά των ηλεκτροκινητήρων) φέρει κλίση περίπου 30° σε σχέση με την κατακόρυφο. Κάθε θυρίδα απόληψης αποτελείται από τα ακόλουθα εξαρτήματα:

- Τμήμα κυκλικού σωλήνα από χάλυβα τύπου St 37.2, πάχους 12mm και διατομής $\cong 10''$ (250mm). Το πάνω μέρος της περιφέρειάς του συγκολλάται στο θάλαμο, γύρω από την αντίστοιχη οπή απόληψης. Στο κάτω άκρο του συγκολλάται δακτυλιοειδής φλάντζα 'τόρνου', ίδιου πάχους και εσωτερικής διαμέτρου $\cong 10''$ (250mm), επίσης από χάλυβα τύπου St 37.2. Στη φλάντζα αυτή προσαρμόζεται βάνα τύπου 'butterfly' ίδιας διατομής και αντοχής μέχρι 16 bar σε πίεση.
- Φλάντζα 'τόρνου', εσωτερικής διαμέτρου $\cong 10''$ (250mm), επίσης από χάλυβα τύπου St 37.2. Η διάταξη της φλάντζας συνδέεται με το τμήμα του κυκλικού σωλήνα μέσω 14 κοχλιών, έτσι ώστε να παρέχεται η δυνατότητα αφαίρεσης της κατά περίπτωση.

Για τη στεγάνωση των θυρίδων απόληψης χρησιμοποιήθηκε ελαστικός δακτύλιος, εσωτερικής διαμέτρου $\cong 10''$ (250mm) και πάχους $\frac{1}{2}''$ (12.7mm). Επιπλέον, για την απομάκρυνση των παραγόμενων στραγγισμάτων, σε κάθε θυρίδα απόληψης προσαρμόστηκαν δύο βάνες διαμέτρου $\frac{1}{2}''$ (12.7mm). Στην **Εικόνα 5.5** παρουσιάζονται δύο από τις τρεις θυρίδες απόληψης με το σύνολο των εξαρτημάτων που τις συγκροτούν.



Εικόνα 5.5: Θυρίδες απόληψης βιοαντιδραστήρα

5.2.1.4. Σύστημα ανάδευσης

Η ανάδευση του υποστρώματος επιτυγχάνεται μέσω αντίστοιχης διάταξης που είναι τοποθετημένη κατά μήκος του νοητού άξονα του κυλινδρικού βιοαντιδραστήρα. Το σύστημα ανάδευσης αποτελείται από τα παρακάτω συνθετικά μέρη (**Παράρτημα III**):

- Άξονα περιστροφής
- Στελέχη ανάδευσης
- Ελαστικοί δακτύλιοι
- Ασφαλιστικό πώμα
- Έδρανα κύλισης (ρουλμάν) και
- Ηλεκτροκινητήρα με διάταξη μειωτήρα στροφών

Στη συνέχεια, γίνεται αναλυτικότερη περιγραφή για κάθε ένα από τα εξαρτήματα της διάταξης ανάδευσης.

Άξονας περιστροφής

Ο άξονας περιστροφής αποτελείται από κυλινδρική κοιλοδοκό ενιαίας διαμέτρου, συνολικού μήκους 2900mm. Στα δύο άκρα του φέρει ισάριθμες προεκτάσεις μορφοδοκών. Η προέκταση προς την πλευρά του ηλεκτροκινητήρα, έχει μορφοδοκό μήκους 490mm, ενώ η προέκταση προς την πλευρά της αφαιρούμενης κυκλικής βάσης του θαλάμου, έχει μήκος 380mm. Το συνολικό μήκος του άξονα περιστροφής (κοιλοδοκός και προεκτάσεις μορφοδοκών) είναι 3770mm. Ο άξονας που αφορά στο μήκος της κοιλοδοκού, είναι κατασκευασμένος από χάλυβα τύπου St 37.2, εξωτερικής διαμέτρου 220mm και πάχους 22mm. Τα τμήματα των μορφοδοκών είναι κατασκευασμένα, επίσης από χάλυβα τύπου St 37.2, διαμέτρου 110mm.

Στελέχη ανάδευσης

Κάθε στέλεχος ανάδευσης αποτελείται από μορφοδοκό, κατασκευασμένη από χάλυβα τύπου St 37.2, η οποία συγκολλάται στην εξωτερική παράπλευρη επιφάνεια του άξονα ανάδευσης, κατά μήκος της κοιλοδοκού. Η διατομή του στελέχους έχει σχήμα ορθογωνίου τριγώνου διαστάσεων 80mm ύψος και 20mm μήκος, έτσι ώστε, κάθε στέλεχος να έχει μορφή 'λεπίδας'. Το ελεύθερο άκρο κάθε στελέχους έχει καμφθεί έτσι ώστε να καμπυλώνεται, ενώ το συνολικό μήκος του είναι 490mm. Η διαμόρφωση των στελεχών ως λεπίδες (τριγωνική διατομή), εκτός από την ανάδευση, παρέχει και δυνατότητες τεμαχισμού συσσωματώσεων που ενδέχεται να δημιουργηθούν κατά τα εξελικτικά στάδια των βιολογικών διεργασιών. Επιπλέον, ευνοεί την ομοιόμορφη έκθεση της σωρού στις συνθήκες αερισμού και ύγρανσης του υποστρώματος. Συνολικά, στην κοιλοδοκό είναι συγκολλημένα 24 στελέχη ανάδευσης.

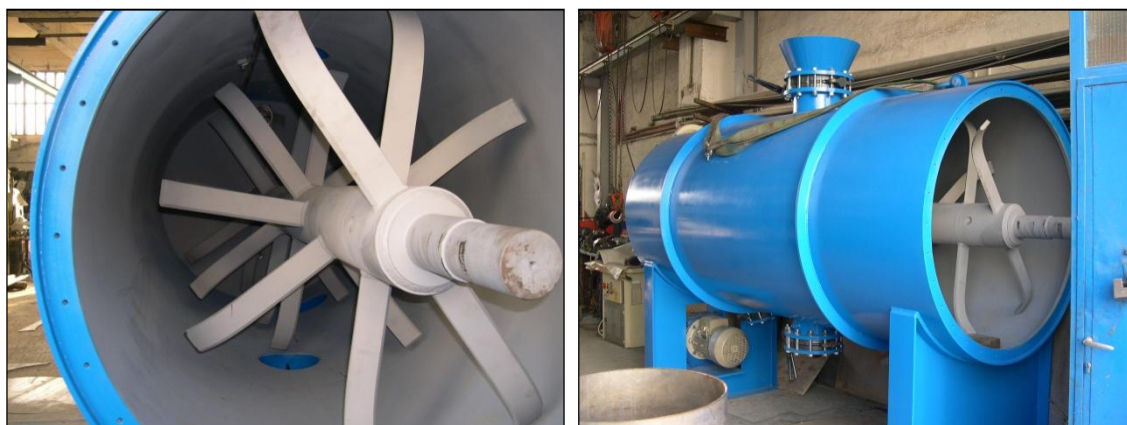
Ως προς τη διάταξη επί της κοιλοδοκού και σε ακτινική διεύθυνση, τα στελέχη ανάδευσης, ανά δύο έχουν κατοπτρική διάταξη, δηλαδή, η περιστροφή κάθε στελέχους κατά 180° σχηματίζει το κατοπτρικό του στέλεχος. Για κάθε ζεύγος αντιδιαμετρικά διατεταγμένων στελεχών, η όψη τους κατά μήκος του άξονα δίνει την εντύπωση σχήματος 'S', η οποία στο σύνολό της περιλαμβάνει 12 ζεύγη κατοπτρικών στελεχών.

Ως προς τη διάταξή τους κατά μήκος της κοιλοδοκού, τα ζεύγη κατοπτρικών στελεχών είναι διατεταγμένα σε ίσες αποστάσεις. Ειδικότερα, κάθε ζεύγος στελεχών απέχει από το επόμενο ζεύγος απόσταση 250mm. Επιπλέον, κάθε ζεύγος σε σχέση με το επόμενο

σχηματίζει γωνία 45° έτσι ώστε, η νοητή καμπύλη που συνδέει τα άκρα των στελεχών ανάδευσης να σχηματίζει έλικα σταθερής ακτίνας.

Η διάταξη των στελεχών ανάδευσης, τόσο αντιδιαμετρικά, όσο και κατά μήκος της κοιλοδοκού, αποσκοπεί στην επίτευξη κατά το δυνατόν ομοιογενούς ανάδευσης. Συνολικά, κατά την περιστροφή της διάταξης, τα στελέχη ανάδευσης σαρώνουν κυλινδρική επιφάνεια μήκους 2985mm και διαμέτρου 1200mm. Ο εν λόγω νοητός κύλινδρος σαρώσεως είναι ομοαξονικός του βιοαντιδραστήρα και περιέχεται σε αυτόν.

Στην **Εικόνα 5.6** απεικονίζεται το εσωτερικό του βιοαντιδραστήρα και ειδικότερα, η διάταξη των στελεχών ανάδευσης επί του τμήματος άξονα που αφορά στην κοιλοδοκό. Επίσης, διακρίνεται η προεξοχή του άξονα (μορφοδοκός) προς την πλευρά της αφαιρούμενης βάσης του θαλάμου.



Εικόνα 5.6: Εσωτερικό μέρος του βιοαντιδραστήρα με ενσωματωμένο το σύστημα ανάδευσης

Ελαστικοί δακτύλιοι

Οι ελαστικοί δακτύλιοι προσαρμόζονται στις προεκτάσεις του άξονα περιστροφής και συγκεκριμένα, στις περιοχές διασύνδεσης με τους δύο στηπιοθλίπτες. Οι δακτύλιοι είναι κατασκευασμένοι από ελαστομερές EDPM και η χρήση τους αφορά στην εξασφάλιση στεγάνωσης κατά την περιστροφή του αναδευτήρα, στην περιοχή της οπής κάθε κυκλικής βάσης του κυλινδρικού θαλάμου.

Ασφαλιστικό πώμα

Η χρήση του ασφαλιστικού πώματος αφορά στη συναρμογή της αφαιρούμενης κυκλικής βάσης του θαλάμου και της αντίστοιχης προέκτασης του άξονα ανάδευσης. Το ασφαλιστικό πώμα αποτελεί την ελεύθερη έδραση του άξονα προς την πλευρά της αφαιρούμενης κυκλικής βάσης. Έχει διάμετρο 280mm, πάχος 60mm και φέρει δακτυλιοειδή διαμόρφωση για τη διασφάλιση ακτινικής και αξονικής σταθερότητας κατά την περιστροφή του αναδευτήρα.

Έδρανα κύλισης

Τα έδρανα κύλισης είναι τυποποιημένων διαστάσεων και τοποθετούνται στη διεπιφάνεια μεταξύ των προεκτάσεων του άξονα ανάδευσης και των αντίστοιχων οπών, στο κέντρο των κυκλικών βάσεων του θαλάμου. Αποτελούν τις σταθερές εδράσεις του αναδευτήρα και η επιλογή τους αφορά στη διασφάλιση σταθερότητας κατά την περιστροφή.

Ηλεκτροκινητήρας

Ο μηχανισμός ανάδευσης ολοκληρώνεται με τη διάταξη του ηλεκτροκινητήρα ο οποίος εξασφαλίζει την περιστροφή του άξονα και κατ' επέκταση την ανάδευση του υποστρώματος. Έχει ισχύ 15hp και κινείται συνδεδεμένος με το άκρο του άξονα με τυποποιημένο μειωτήρα στροφών. Η περιστροφή του άξονα ανάδευσης είναι 20rpm.

5.2.1.5. Σύστημα αερισμού – απαγωγής αερίων εκπομπών

Ο αερισμός του υποστρώματος αποτελεί βασική παράμετρο των διεργασιών της κομποστοποίησης, καθώς πρόκειται για διεργασίες αερόβιας βιοξείδωσης των οργανικών αποβλήτων. Η ενδεχόμενη απουσία οξυγόνου έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη αναερόβιων συνθηκών οι οποίες, στην προκειμένη περίπτωση είναι ανεπιθύμητες. Παράλληλα, η παροχή αέρα, εκτός από τη διασφάλιση του απαραίτητου οξυγόνου, συμβάλλει σημαντικά και στη ρύθμιση της υγρασίας και της θερμοκρασίας του υποστρώματος καθώς οι ποσότητες των απαγόμενων αερίων εκπομπών, κατά την έξοδό τους από το βιοαντιδραστήρα, αφενός συμπαρασύρουν ποσότητες υγρασίας, αφετέρου, απάγουν θερμικό φορτίο από το χώρο των διεργασιών. Ο αερισμός του υποστρώματος επιτυγχάνεται με τη λειτουργία φυγοκεντρικού ανεμιστήρα απαγωγής αερίων εκπομπών. Ο αέρας εισέρχεται στο βιοαντιδραστήρα δια μέσω φίλτρου αέρος (κατακράτηση αιωρούμενων σωματίδια κ.λπ.) με συχνότητα ίδια με αυτή της απαγωγής των αερίων εκπομπών. Η αναρρόφηση του ατμοσφαιρικού αέρα πραγματοποιείται σε συνθήκες υποπίεσης δια μέσω της αντίστοιχης οπής που βρίσκεται στην αφαιρούμενη κυκλική βάση του θαλάμου. Οι συνθήκες υποπίεσης δημιουργούνται κατά τη λειτουργία του φυγοκεντρικού ανεμιστήρα μέσω του οποίου αναρροφούνται οι αέριες εκπομπές από το εσωτερικό του βιοαντιδραστήρα προς τη διάταξη του βιόφιλτρου για απόσπηση. Παράλληλα με την απόσπηση, το υπόστρωμα εμπλουτίζεται με οξυγόνο για την αποτελεσματικότερη εκτέλεση των επάλληλων σταδίων των αντιδράσεων αερόβιας βιοαποδόμησης της οργανικής ουσίας.

Για την ικανοποίηση των παραπάνω, εγκαθίσταται φυγοκεντρικός ανεμιστήρας ο οποίος αναρροφά τις αέριες εκπομπές από το εσωτερικό του βιοαντιδραστήρα και τα εμφυσά, διαχέοντάς τα μέσω αεραγωγού, στο χώρο του βιόφιλτρου. Ο ανεμιστήρας είναι εγκατεστημένος στο άνω μέρος του θαλάμου του βιοαντιδραστήρα (στην ίδια περιοχή με το PLC) και συγκεκριμένα στα κατάντη της κυκλικής οπής της σταθερής βάσης του θαλάμου. Συνδέεται ως προς τα ανάντη της πτερωτής του με στόμιο που είναι ενσωματωμένο στο θάλαμο του βιοαντιδραστήρα από το οποίο εξέρχεται ο απαγόμενος αέρας και ως προς τα κατάντη, με εύκαμπτο αεραγωγό ο οποίος συνδέει το στόμιο εξόδου του ανεμιστήρα με το στόμιο εισόδου των αερίων εκπομπών στο κατώτερο τμήμα του βιόφιλτρου. Στην **Εικόνα 5.7** που ακολουθεί απεικονίζεται η διάταξη του φυγοκεντρικού ανεμιστήρα. Διακρίνεται η βάση στήριξης του ηλεκτροκινητήρα του ανεμιστήρα και τμήμα του εύκαμπτου αγωγού απαγωγής των αερίων εκπομπών.

Εικόνα 5.7: Φυγοκεντρικός ανεμιστήρας απαγωγής αερίων εκπομπών



5.2.1.6. Σύστημα ύγρυνσης

Για τη διασφάλιση της απαραίτητης υγρασίας του υποστρώματος, εγκαθίσταται Προγραμματιζόμενος Λογικός Ελεγκτής (PLC) μέσω του οποίου παρέχεται νερό ελεγχόμενης ροής και σε προγραμματισμένα χρονικά διαστήματα, προερχόμενο από δεξαμενή ύδατος μέγιστης χωρητικότητας 1m^3 . Η δεξαμενή αυτή τροφοδοτείται με νερό από εμβαπτιζόμενη αντλία που βρίσκεται σε κεντρικό ταμιευτήρα ύδατος χωρητικότητας $>100\text{m}^3$.

Το νερό διανέμεται στο εσωτερικό του θαλάμου μέσω σωλήνωσης διαμέτρου 1'' (25.4mm), η οποία απολήγει στην αφαιρούμενη βάση του θαλάμου. Η εν λόγω σωλήνωση, διατρέχει κατά μήκος του άξονα ανάδευσης, όλο το μήκος του βιοαντιδραστήρα. Κατά μήκος της παράπλευρης επιφάνειάς της, φέρει οπές διαμέτρου 3mm σε ελικοειδή διάταξη σχηματίζοντας γωνία 30° μεταξύ δύο διαδοχικών οπών και σε απόσταση μεταξύ τους 250mm. Οι εν λόγω οπές αποτελούν τους εκνεφωτές ύδατος για την ύγρυνση του υποστρώματος, όταν αυτό απαιτηθεί.

5.2.1.7. Σύστημα απομάκρυνσης στραγγισμάτων

Η απομάκρυνση των στραγγισμάτων πραγματοποιείται μέσω ζεύγους βανών διαμέτρου $\frac{1}{2}$ '' (12.7mm) που είναι προσαρμοσμένες σε κάθε μια από τις τρεις θυρίδες απόληψης.

5.2.1.8. Σύστημα αυτομάτου ελέγχου και παρακολούθησης

Ο έλεγχος, η παρακολούθηση και η ρύθμιση των παραμέτρων που διέπουν την ταχύτητα των διεργασιών αερόβιας βιολογικής αποδόμησης πραγματοποιούνται κυρίως μέσω της λειτουργίας συστήματος αυτομάτου ελέγχου με χρήση Προγραμματιζόμενου Λογικού Ελεγκτή (Programmable Logic Controller: PLC). Αναλυτικότερα, το σύστημα αυτοματισμού PLC προβαίνει σε έλεγχο, παρακολούθηση και ρύθμιση των ακόλουθων παραμέτρων:

- Ταχύτητα περιστροφής του άξονα ανάδευσης, η οποία ρυθμίζεται μέσω του ηλεκτροκινητήρα και εν συνεχεία, με συγχρονισμό του μειωτήρα στροφών.
- Απαγωγή των αερίων εκπομπών και παράλληλη αναρρόφηση ατμοσφαιρικού αέρα, που ρυθμίζεται μέσω ελέγχου της ισχύος του ανεμιστήρα, ή εναλλακτικά, μέσω ελέγχου της ταχύτητας περιστροφής της πτερωτής.
- Προσθήκη νερού μέσω του εκνεφωτή η ρύθμιση της οποίας γίνεται με τον έλεγχο της βαλβίδας ύγρυνσης και τον έλεγχο λειτουργίας του ηλεκτροκινητήρα καθώς, προκειμένου να επιτευχθεί ομοιογενής ύγρυνση, οι εκνεφωτές ενεργοποιούνται ταυτόχρονα με τη λειτουργία ανάδευσης.

Επομένως, ο προγραμματισμός της λειτουργίας του PLC αφορά στις λειτουργικές παραμέτρους ανάδευσης, αερισμού και ύγρυνσης του υποστρώματος του βιοαντιδραστήρα. Με τον προγραμματισμό γίνεται ο αυτόματος έλεγχος των προαναφερόμενων παραμέτρων ώστε η διακύμανση της θερμοκρασίας και της περιεκτικότητας σε υγρασία και οξυγόνο του υποστρώματος να είναι σε βέλτιστο εύρος τιμών προκειμένου να εξασφαλιστεί αφενός μικρότερος χρόνος παραμονής του υποστρώματος στο βιοαντιδραστήρα και αφετέρου ομαλότερη εξέλιξη της διεργασίας με τελικό στόχο την καλύτερη ποιότητα του κόμποστ και την ταχύτερη παραγωγή του. Οι

προδιαγραφές λειτουργίας του PLC αναφορικά με τον προγραμματισμό της συχνότητας και της διάρκειας ανάδευσης, ύγρυνσης και αερισμού του υποστρώματος συνοψίζονται στον Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1: Αυτόματος έλεγχος της λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα με PLC.

Παράμετρος	Προγραμματισμός Συχνότητας και Διάρκειας
Ανάδευση	<p>Ο σύστημα ανάδευσης/ηλεκτροκινητήρας μπορεί να λειτουργήσει X φορές/ημέρα με διάρκεια Y λεπτά/ώρα.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Η μέγιστη τιμή που εφαρμόστηκε ήταν $X_{max} = 12$ φορές/ημέρα με διάρκεια $Y_{max} = 15$ λεπτά/ώρα. Εφαρμόστηκε όταν η υγρασία του υποστρώματος ξεπερνούσε το 60% και όταν η περιεκτικότητα του οξυγόνου στο υπόστρωμα του βιοαντιδραστήρα ήταν μικρότερη του 10% v/v. • Η ελάχιστη τιμή που εφαρμόστηκε ήταν $X_{min} = 0$ φορές/ημέρα με διάρκεια $Y_{min} = 0$ λεπτά/ώρα. Εφαρμόστηκε όταν η υγρασία του υποστρώματος ήταν μικρότερη του 38% ή όταν η περιεκτικότητα του οξυγόνου στο υπόστρωμα του βιοαντιδραστήρα ήταν μεγαλύτερη του 20% v/v. • Οι τιμές που εφαρμόστηκαν για την ανάδευση του υποστρώματος ήταν ενδιάμεσες της μέγιστης και της ελάχιστης και για τον προγραμματισμό λαμβάνονταν κάθε φορά υπόψη οι μετρήσεις της περιεκτικότητας του υποστρώματος σε υγρασία και οξυγόνο.
Αερισμός	<p>Το σύστημα αερισμού/ανεμιστήρας μπορεί να λειτουργήσει X φορές/ημέρα με διάρκεια Y λεπτά/ώρα.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Η μέγιστη τιμή που εφαρμόστηκε ήταν $X_{max} = 24$ φορές/ημέρα με διάρκεια $Y_{max} = 10$ λεπτά/ώρα. Εφαρμόστηκε όταν η περιεκτικότητα του οξυγόνου στο υπόστρωμα του βιοαντιδραστήρα υποστρώματος ήταν μικρότερο του 10%. • Η ελάχιστη τιμή που εφαρμόστηκε ήταν $X_{min} = 0$ φορές/ημέρα με διάρκεια $Y_{min} = 0$ λεπτά/ώρα. Εφαρμόστηκε όταν η περιεκτικότητα του οξυγόνου στο υπόστρωμα του βιοαντιδραστήρα υποστρώματος ήταν μεγαλύτερη του 20%. • Οι τιμές που εφαρμόστηκαν για τον αερισμό του υποστρώματος ήταν ενδιάμεσες της μέγιστης και της ελάχιστης και για τον προγραμματισμό λαμβάνονταν κάθε φορά υπόψη οι μετρήσεις της περιεκτικότητας του υποστρώματος σε οξυγόνο.
Ύγρυνση	<p>Το σύστημα ύγρυνση/εκνεφωτής μπορεί να λειτουργήσει X φορές/ημέρα με διάρκεια Y λεπτά/ώρα.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Η μέγιστη τιμή που εφαρμόστηκε ήταν $X_{max} = 2$ φορές/ημέρα με διάρκεια $Y_{max} = 15$ λεπτά/ώρα. Εφαρμόστηκε όταν η υγρασία του υποστρώματος ήταν μικρότερη του 38% • Η ελάχιστη τιμή που εφαρμόστηκε ήταν $X_{min} = 0$ φορές/ημέρα με διάρκεια $Y_{min} = 0$ λεπτά/ώρα. Εφαρμόστηκε όταν η υγρασία του υποστρώματος ξεπερνούσε το 60%. • Οι τιμές που εφαρμόστηκαν για την ύγρυνση του υποστρώματος ήταν ενδιάμεσες της μέγιστης και της ελάχιστης και για τον προγραμματισμό λαμβάνονταν κάθε φορά υπόψη οι μετρήσεις της περιεκτικότητας του υποστρώματος σε υγρασία.

Το σύνολο των διακοπών και του PLC βρίσκεται σε ηλεκτρολογικό πίνακα που είναι προσαρμοσμένος στο πλαίσιο στήριξης του ηλεκτροκινητήρα. Ο πίνακας αυτός αποτελείται από τα ακόλουθα στοιχεία:

- Μονάδα PLC με εξωτερική οθόνη αφής.
- Διακόπτη (ρελέ) για την ενεργοποίηση του ηλεκτροκινητήρα.
- Διακόπτη (ρελέ) για την ενεργοποίηση του ανεμιστήρα.
- Διακόπτη (ρελέ) για την ενεργοποίηση της βαλβίδας ύγρρασης.
- Μετατροπέα (inverter) για τη ρύθμιση των στροφών της πτερωτής του ανεμιστήρα.

Εικόνα 5.8: Ηλεκτρολογικός πίνακας συστήματος αυτομάτου ελέγχου και παρακολούθησης



Το PLC είναι διασυνδεδεμένο με κατάλληλο λογισμικό το οποίο σχεδιάστηκε για τη συγκεκριμένη περίπτωση ώστε να επιτυγχάνεται ο αυτόματος έλεγχος των προαναφερόμενων παραμέτρων λειτουργίας. Στην **Εικόνα 5.8** απεικονίζεται η διάταξη του ηλεκτρολογικού πίνακα.

5.2.2. Διάταξη απόσμησης αερίων εκπομπών

Στο βιόφιλτρο καταλήγουν οι αέριοι ρύποι που εκλύονται κατά τη βιοξείδωση της οργανικής ουσίας προερχόμενοι από το σύστημα απαγωγής των αερίων εκπομπών του βιοαντιδραστήρα τα οποία περιέχουν, εκτός από διοξείδιο του άνθρακα και αμμωνία, πτητικές οργανικές ενώσεις υπεύθυνες για την έκλυση δυσάρεστων οσμών (Nicolai and Janni, 2001). Επομένως, η χρήση συστήματος απόσμησης των αερίων εκπομπών κρίνεται απαραίτητη. Η διάταξη του συστήματος αποτελείται από τα ακόλουθα συνθετικά μέρη (**Παράρτημα III**):

- Τετραγωνικό τοιχίο οπλισμένου σκυροδέματος πάχους 200mm και διαστάσεων 2500mm μήκος, 2500mm πλάτος και 1700mm ύψος. Η βάση είναι κατασκευασμένη από οπλισμένο σκυρόδεμα ίδιου πάχους με το τοιχίο, το οποίο έχει κλίση υπό γωνία 5° με το οριζόντιο επίπεδο. Η βάση και οι εσωτερικές επιφάνειες του τοιχίου επικαλύπτονται με τρεις διαδοχικές στρώσεις πιασώδους υλικού για να εξασφαλιστεί η στεγάνωσή τους. Επίσης από το χαμηλότερο σημείο του δαπέδου του βιόφιλτρου, ξεκινά σωλήνωση, διάμετρος $\cong 1''$ (30mm), για την απομάκρυνση των συμπυκνωμάτων που παρασέρνονται κατά την απορρόφηση των αερίων εκπομπών.
- Διάτρητο ψευδοδάπεδο είναι από ατσάλι τύπου AISI πάχους 20mm. Το ψευδοδάπεδο είναι εγκιβωτισμένο στο εσωτερικό του τοιχίου, σε ύψος 600mm από τη βάση. Το ψευδοδάπεδο, σε όλη την επιφάνειά του, φέρει οπές διαμέτρου 20mm, διατεταγμένες τετραγωνικά και σε απόσταση 100mm μεταξύ τους.
- Γεωύφασμα πάχους 40mm, με το οποίο επενδύεται τόσο το πάνω μέρος της επιφάνειας του ψευδοδαπέδου όσο και οι εσωτερικές επιφάνειες του τοιχίου που βρίσκονται από πάνω.

- Κλίνη ώριμου κόμποστ ως μέσο απόσπησης. Ορισμένη ποσότητα ώριμου κόμποστ τοποθετείται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να πληρώσει το χώρο που βρίσκεται εντός του τοιχίου και είναι υπερκείμενος του γεωυφάσματος.
- Αεραγωγός διασύνδεσης φυγοκεντρικού ανεμιστήρα και βιόφιλτρου. Κατά τις διεργασίες αερόβιας βιοαποδόμησης, οι αέριες εκπομπές απαγόνται περιοδικά με χρήση φυγοκεντρικού ανεμιστήρα και διαμέσου εύκαμπτου αεραγωγού διαχέονται στο προσροφητικό μέσο απόσπησης (ώριμο κόμποστ) από το κάτω μέρος του βιόφιλτρου όπου και δεσμεύονται. Ο αεραγωγός, καταλήγει στο βιόφιλτρο διαπερνώντας τη μια πλευρά του τοιχίου και σε ύψος 455mm από τη βάση αυτού. Οι αέριες εκπομπές αφού διαπεράσουν διαδοχικά το ψευδοδάπεδο και το γεωύφασμα, διαχέονται στο σώμα της κλίνης του ώριμου κόμποστ και εξέρχονται από την άνω επιφάνεια της κλίνης του βιόφιλτρου.

5.2.3. Διάταξη μεταφοράς αποβλήτων

Η τροφοδοσία του βιοαντιδραστήρα με την ποσότητα, ή τις ποσότητες του μίγματος των υπό επεξεργασία αποβλήτων πραγματοποιείται με χρήση μεταφορικής ταινίας. Η ταινία μεταφέρει τα βιοαποδομήσιμα οργανικά απόβλητα με ανοδική κλίση προς τη χοάνη της θυρίδας τροφοδοσίας και εισέρχονται στο εσωτερικό του βιοαντιδραστήρα. Η διάταξη της μεταφορικής ταινίας έχει τα ακόλουθα τεχνικά χαρακτηριστικά:

- Μήκος ταινίας 4500mm.
- Πλάτος ταινίας 250mm.
- Ισχύς ηλεκτροκινητήρα μεταφορικής ταινίας 1hp.
- Ράουλο κίνησης που βρίσκεται στο ανώτερο ακραίο τμήμα της ταινίας. Το ράουλο κίνησης έχει πλάτος ίσο με αυτό της ταινίας και διάμετρο 120mm.
- Ράουλο τάνυσης που βρίσκεται στο κατώτερο ακραίο τμήμα της ταινίας, ίδιων εξωτερικών διαστάσεων με το ράουλο κίνησης.
- Ο μάντας της μεταφορικής ταινίας φέρει πριματοειδείς υποδοχές μήκους ίσου με το πλάτος της ταινίας, ύψους 10mm και πάχους 8mm.
- Μεταλλικό πλαίσιο – οδηγός για τη στήριξη του μάντα καθ' όλη τη διάρκεια της ωφέλιμης διαδρομής του.
- Δικτύωμα στήριξης της μεταφορικής ταινίας με απόληξη κατάλληλα διαμορφωμένη, έτσι ώστε να οδηγεί τις ποσότητες του αποβλήτου εντός της χοάνης στη θυρίδα τροφοδοσίας του βιοαντιδραστήρα. Το δικτύωμα έχει ανοδική κλίση ρυθμιζόμενης γωνίας, ενώ στο κατώτερο τμήμα του φέρει τροχίσκους για ευχέρεια κατά τη μεταφορά της διάταξης.

Εικόνα 5.9: Μεταφορική ταινία



Ως προς τα συνθετικά υλικά της διάταξης, η μεταφορική ταινία είναι κατασκευασμένη από trenaillon K17-60 πράσινου χρώματος, ενώ όλα τα μεταλλικά μέρη είναι από χάλυβα τύπου St 37.2. Στην **Εικόνα 5.9** απεικονίζεται τμήμα της μεταφορικής ταινίας, προς την πλευρά του ράουλου τάνυσης.

5.3. Δοκιμές λειτουργίας του συστήματος κομποστοποίησης

Μετά την εγκατάσταση του βιοαντιδραστήρα και την περαίωση όλων των εργασιών του συνόλου της εγκατάστασης έγιναν δοκιμές λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα άνευ και μετά φορτίου προκειμένου να γίνει ο απαραίτητος έλεγχος και οι ρυθμίσεις τόσο των επί μέρους διατάξεων και των στοιχείων αυτών όσο και για να ρυθμιστεί η καλή και αποδοτική λειτουργία του βιοντιδραστήρα και της εγκατάστασης συνολικά. Εκτός του βιοαντιδραστήρα ο έλεγχος και οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν και στον υπόλοιπο εξοπλισμό της εγκατάστασης για την αποδοτική της λειτουργία όπως αναμένονταν από το σχεδιασμό της. Οι δοκιμές άνευ φορτίου έγιναν με την περαίωση των εργασιών και διήρκεσαν συνολικά 16 ώρες. Οι δοκιμές μετά φορτίου διήρκεσαν συνολικά 120 ώρες κατά τις οποίες χρησιμοποιήθηκαν 500 kg ιλύος επεξεργασίας λυμάτων, 800 kg φύλλων ζαχαρότευτλων και 200kg κοπριάς. Μετά την επιτυχή ολοκλήρωση των παραπάνω δοκιμών έγιναν διαδοχικά οι τέσσερις πειραματικές λειτουργίες της εγκατάστασης οι οποίες περιγράφονται στο επόμενο κεφάλαιο.

6.1. Εισαγωγή

Η αξιολόγηση του συστήματος κομποστοποίησης που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε, πραγματοποιήθηκε σε τρία επίπεδα. Το πρώτο επίπεδο αφορά στον έλεγχο και στην παρακολούθηση της λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα κατά την εφαρμογή μιας σειράς πειραματικών κύκλων κομποστοποίησης προκειμένου να διερευνηθεί η αερόβια βιοαποδόμηση συγκεκριμένων ρών βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων με τη χρήση του συστήματος κομποστοποίησης. 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 ελέγχου της αποτελεσματικότητας του συστήματος κομποστοποίησης αφορά στην εξέταση της ποιότητας του τελικού προϊόντος βασιζόμενη, στον προσδιορισμό των φυσικών, χημικών και βιολογικών του ιδιοτήτων ύστερα από την ωρίμανσή του. Σε τελικό στάδιο προσομοιώνεται η βιοαποδόμηση της οργανικής ουσίας των υποστρωμάτων που επιλέχθηκαν για την εφαρμογή των πειραματικών κύκλων κομποστοποίησης προκειμένου να εξαχθούν περαιτέρω συμπεράσματα αναφορικά με την αποδοτικότητα της διεργασίας και κατ' επέκταση τη λειτουργικότητα του συστήματος.

6.2. Πειραματικές εφαρμογές με το σύστημα κομποστοποίησης

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα κατά την εφαρμογή τεσσάρων πειραματικών κύκλων 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. Στις πειραματικές εφαρμογές κομποστοποίησης επιλέχθηκαν ροές βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων όπως η ιλύς από μονάδες επεξεργασίας αστικών υγρών αποβλήτων, τα γεωργικά υπολείμματα και τα κτηνοτροφικά απόβλητα ενώ σε ορισμένους πειραματικούς κύκλους πραγματοποιήθηκε η προσθήκη ορυκτών όπως ο ζεόλιθος και ο περλίτης για τη βελτίωση των συνθηκών βιοαποδόμησης της οργανικής ουσίας. Διαφορετικά μίγματα των προαναφερόμενων αποβλήτων αποτέλεσαν το υλικό τροφοδοσίας του συστήματος η σύνθεση των οποίων πραγματοποιήθηκε 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. Στον **Πίνακα 6.1** παρουσιάζεται η σύσταση των οργανικών αποβλήτων για τον εκάστοτε πειραματικό κύκλο κομποστοποίησης. 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, ο ολικός οργανικός άνθρακας, το ολικό άζωτο και οι ανόργανες μορφές του (NH_4^+ και NO_3^-) καθώς και η αναλογία C/N (Díaz and Savage, 2007a, 2007b). Επιπλέον, ελέγχεται το οργανικό και ανόργανο φορτίο των παραγόμενων στραγγισμάτων σε τακτά χρονικά διαστήματα κατά την εξέλιξη της κομποστοποίησης.

Πίνακας 6.1: Σύνθεση του υλικού τροφοδοσίας του βιοαντιδραστήρα (kg wb) για τον εκάστοτε πειραματικό κύκλο κομποστοποίησης

Υλικά Πείραμα	Ιλύς	Γεωργικά Υπολείμματα	Κοπριά	Πρόσθετα
1 ^{ος} Κύκλος	Πρωτοβάθμια [700kg]	Φύλλα Ζαχαρότευτλων [650kg]	-	-
2 ^{ος} Κύκλος	Πρωτοβάθμια [520kg]	Φύλλα Ζαχαρότευτλων [490kg] Άχυρο [50kg]	Αιγοπροβάτων [250kg]	-
3 ^{ος} Κύκλος	Πρωτοβάθμια [700kg]	Φύλλα Ζαχαρότευτλων [450kg]	Βοοειδών [180kg]	Ζεόλιθος [50kg]
4 ^{ος} Κύκλος	Δευτεροβάθμια [1500kg]	-	-	Περλίτης [500L (≈25kg)]

6.2.1. Πρώτη εφαρμογή

6.2.1.1. Χαρακτηρισμός πρώτης ύλης και σύνθεση του υλικού τροφοδοσίας

Ο προσδιορισμός των φυσικοχημικών ιδιοτήτων των βιοαποδομήσιμων στερεών 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 6.2 παρουσιάζονται τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά της ιλύος αστικών υγρών αποβλήτων και των φύλλων ζαχαρότευτλων τα οποία αποτέλεσαν το υλικό πλήρωσης του αντιδραστήρα για την εφαρμογή του 1^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 6.2 παρατηρείται ότι η ιλύς έχει υψηλή περιεχόμενη υγρασία η οποία ανέρχεται στο 72.20% wb. Αντιθέτως, τα φύλλα των ζαχαρότευτλων παρουσιάζουν πολύ χαμηλότερα επίπεδα υγρασία (48.35%) ενώ η ανάμιξη των δύο αυτών οργανικών ροών δύναται να εξισορροπήσει το επίπεδο του νερού στο αρχικό υπόστρωμα. Το pH τόσο της ιλύος όσο και των φύλλων των ζαχαρότευτλων κυμαίνεται σε ουδέτερες τιμές το οποίο είναι και επιθυμητό για την ανάπτυξη των διεργασιών της κομποστοποίησης. Αναφορικά με τον ολικό οργανικό άνθρακα τα φύλλα των ζαχαρότευτλων έχουν υψηλό ποσοστό (59.94% dm) σε αντίθεση με αυτό της ιλύος (28.60% dm). Η περιεκτικότητα της ιλύος σε ολικό άζωτο είναι ίση με 2.95% dm, με τη σχέση άνθρακα προς άζωτο (C/N) να διαμορφώνεται στο 5.74. Στην περίπτωση των γεωργικών υπολειμμάτων των ζαχαρότευτλων, η περιεκτικότητα σε άνθρακα είναι αρκετά υψηλή. Επίσης υψηλή είναι και η περιεκτικότητα σε άζωτο με τον λόγο C/N να διαμορφώνεται στο 19.21, τιμή η οποία θεωρείται σχετικά χαμηλή για το αρχικό οργανικό υπόστρωμα. Αναφορικά με τα μακροστοιχεία η ιλύς παρουσιάζει χαμηλή περιεκτικότητα σε κάλιο ενώ αντίστοιχα τα υπολείμματα των ζαχαρότευτλων εμπεριέχουν μικρή ποσότητα σε φώσφορο. Επομένως, ενδεχόμενη ανάμιξη των υλικών αυτών δύναται να διαμορφώσει οργανικό υπόστρωμα με επάρκεια στα απαιτούμενα μακροστοιχεία.

Πίνακας 6.2: Φυσικοχημικές ιδιότητες υλικού τροφοδοσίας και σύσταση μίγματος του 1^{ου} κύκλου κομποστοποίησης.

Παράμετρος	Ιλύς	Φύλλα Ζαχαρότευτλων	Μίγμα
Φυσικοχημικές ιδιότητες			
Υγρασία (% wb)	72.20 (2.14)	48.35 (2.40)	65.80 (1.80)
Ξηρή ουσία (% wb)	27.80 (2.14)	51.65 (2.40)	34.20 (1.80)
pH	6.80 (0.04)	7.10 (0.05)	6.85 (0.06)
TOC (% dm)	28.60 (0.72)	59.94 (2.60)	48.04 (2.40)
N (% dm)	2.95 (0.22)	3.12 (0.08)	2.87 (0.14)
C/N	5.74 (0.08)	19.21 (0.16)	16.74 (0.23)
P (P ₂ O ₅ % dm)	1.30 (0.12)	0.24 (0.07)	0.61 (0.13)
K (K ₂ O % dm)	0.69 (0.08)	3.52 (0.25)	2.58 (0.23)
Ca (CaO % dm)	4.87 (1.16)	3.39 (0.83)	3.73 (0.90)
Mg (MgO % dm)	2.34 (0.35)	1.38 (0.03)	1.82 (0.13)
Cd (mg kg ⁻¹ dm)	0.97 (0.05)	0.11 (0.04)	0.41 (0.09)
Cr (mg kg ⁻¹ dm)	18.41 (1.37)	0.83 (0.08)	7.38 (0.65)
Cu (mg kg ⁻¹ dm)	141.47 (6.55)	7.92 (1.27)	57.40 (6.82)
Ni (mg kg ⁻¹ dm)	24.31 (3.21)	0.90 (0.01)	9.27 (0.51)
Pb (mg kg ⁻¹ dm)	81.09 (7.85)	0.50 (0.09)	30.21 (4.33)
Zn (mg kg ⁻¹ dm)	237.89 (13.66)	48.92 (10.99)	116.26 (18.45)
Σύνθεση Υποστρώματος			
Νωπή ουσία (kg)	700	650	1350
Αναλογία (% wb)	51.85	48.15	100
Ξηρή ουσία (kg)	194.60	335.62	461.70
Αναλογία (% dm)	36.69	63.31	100
Υγρασία (kg)	505.40	314.28	888.30

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 (Díaz and Savage, 2007a). Όσον αφορά στην περιεκτικότητα των πρώτων υλών σε βαρέα μέταλλα και ειδικότερα της ιλύος, διαπιστώνεται ότι οι τιμές βρίσκονται σε χαμηλά επίπεδα και σε συμφωνία με τα ανώτερα όρια που θέτει η Αυστρία για την αερόβια επεξεργασία της ιλύος ως υλικό τροφοδοσίας (Πίνακας 6.3).

Πίνακας 6.3: Οριακές τιμές συγκέντρωσης βαρέων μετάλλων για τη χρήση ιλύος ως υλικό τροφοδοσίας στην κομποστοποίηση, σύμφωνα με το στρατηγικό σχεδιασμό διαχείρισης των αποβλήτων στην Αυστρία (BMLFUW, 2006)

Βαρέα Μέταλλα	Ανώτατα όρια για γεωργική χρήση (mg kg ⁻¹ dm)	Ανώτατα όρια για όλες τις χρήσεις εκτός της γεωργικής (mg kg ⁻¹ dm)
Cd	2	3
Cr	70	300
Cu	300	500
Ni	60	100
Pb	100	200
Zn	1200	2000

Σε αστικά παντοροϊκά αποχετευτικά συστήματα τα οποία εκτός από λύματα δύναται να μεταφέρουν όμβρια καθώς και βιομηχανικά υγρά απόβλητα η παραγόμενη ιλύς ενδέχεται να παρουσιάζει μεταξύ άλλων και υψηλές συγκεντρώσεις ιχνοστοιχείων και

βαρέων μετάλλων. Στην προκειμένη περίπτωση η συλλεγόμενη ιλύς προέρχεται από ΜΕΛ η οποία δεν επεξεργάζεται βιομηχανικά υγρά απόβλητα και κατ' επέκταση η συγκέντρωση βαρέων μετάλλων είναι περιορισμένη.

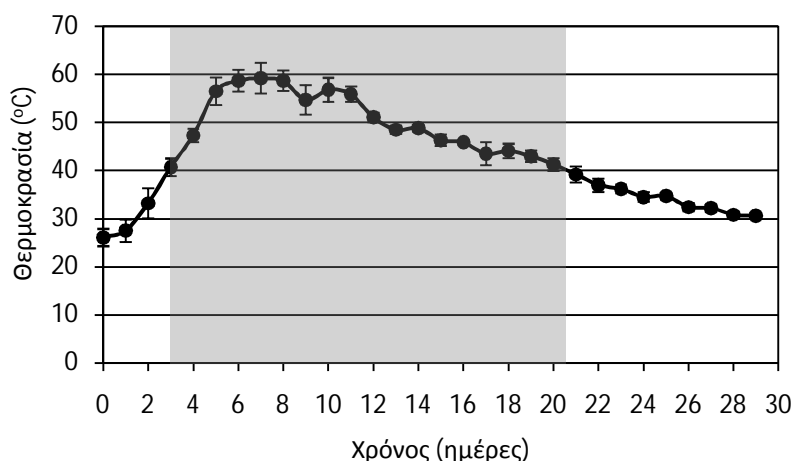
Το υλικό τροφοδοσίας του 1^{ου} κύκλου κομποστοποίησης αποτελείται από ιλύ (500 kg wb), προερχόμενη από ΜΕΛ η οποία εξυπηρετεί μικρές κοινότητες και δήμους γύρω από την αστική περιοχή της El Jadida στο Μαρόκο, καθώς και από φύλλα ζαχαρότευτλων (750 kg wb) τα οποία προέρχονται από γεωργικές δραστηριότητες των γύρω περιοχών. Η σύσταση και τα χαρακτηριστικά του μίγματος τροφοδοσίας (1350 kg wb) το οποίο προκύπτει από τις προαναφερόμενες ροές βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων παρουσιάζονται στον **Πίνακα 6.2**. Η αρχική υγρασία του μίγματος το οποίο προκύπτει είναι ίση με 65.80% ποσοστό το οποίο θεωρείται ικανοποιητικό για την έναρξη της διεργασίας της κομποστοποίησης. Επίσης ο οργανικός άνθρακας ανέρχεται στο 48.04% dm, το άζωτο στο 2.87% dm και ο λόγος C/N στο 16.74. Η αναλογία C/N στο μίγμα είναι σχετικά χαμηλή συγκριτικά με αυτή που προτείνεται βιβλιογραφικά αλλά δεδομένου της φύσης των διαθέσιμων βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων η περαιτέρω αύξηση της αναλογίας C/N δεν είναι εφικτή.

Η ιλύς αποτέλεσε το βασικό οργανικό απόβλητο και των τεσσάρων πειραματικών κύκλων κομποστοποίησης που εφαρμόστηκαν επειδή θεωρείται μια από τις κυριότερες ροές οργανικών αποβλήτων η οποία συναντάται σε μικρές ΜΕΛ σε απομονωμένες περιοχές και η οποία χρήζει κατάλληλης επεξεργασίας για την ασφαλή διάθεσή της στο περιβάλλον. Επομένως, η διαχείριση της ιλύος με τη μέθοδο της κομποστοποίησης συμβάλλει τόσο στην επεξεργασία της όσο και στην ανακύκλωση χρήσιμων συστατικών στο έδαφος (π.χ. οργανική ουσία). Σύμφωνα με βιβλιογραφικά στοιχεία η αποκλειστική χρήση ιλύος, χωρίς πρόσθετα, δύναται να δημιουργήσει σειρά λειτουργικών προβλημάτων στα συστήματα κομποστοποίησης με αποτέλεσμα τη διατάραξη της ελεγχόμενης και ομαλής διεξαγωγής των βιολογικών διεργασιών που απαιτούνται για την αερόβια βιοαποδόμηση της οργανικής ουσίας (Κουλουμπής και Τσαντήλας, 2007). Η ιλύς χαρακτηρίζεται ως άμορφο υλικό με υψηλή περιεκτικότητα σε νερό και χαμηλή δομική συνοχή με αποτέλεσμα τον κορεσμό των ελεύθερων πόρων του υποστρώματος και την παρεμπόδιση της διάχυσης του οξυγόνου στην οργανική μάζα (Tremier et al., 2005; Iranzo et al., 2004; Sanchez-Monedero et al., 2001). Επομένως, η χρήση πρόσθετων υλικών τα οποία κατέχουν συμπληρωματικές της ιλύος ιδιότητες κρίνεται απαραίτητη όπως επισημαίνεται από τους Diaz and Savage (2007a) και Epstein et al. (1981).

Τα γεωργικά υπολείμματα όπως τα φύλλα ζαχαρότευτλων, θεωρούνται σημαντική ροή αποβλήτων στην υπό εξέταση περιοχή διότι τα ζαχαρότευτλα αποτελούν βασικό γεωργικό προϊόν. Επιπλέον, αυτού του είδους τα βιοαποδομήσιμα οργανικά απόβλητα καθίστανται εξαιρετα διογκωτικά υλικά για τη ανάμιξή τους με την ιλύ, ο κατάλληλος συνδυασμός των οποίων δύναται να διαμορφώσει καλύτερες συνθήκες για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών που απαιτούνται για την αερόβια βιολογική επεξεργασία τους (Eklind and Kirchmann, 2000a). Συνεπώς, η ανάμιξη ιλύος με υπολείμματα καλλιεργειών ζαχαρότευτλων κρίνεται ορθή καθώς βελτιώνει τις φυσικές (υγρασίας, πορώδες, αερισμός) και χημικές ιδιότητες (λόγος C/N, περιεκτικότητα σε θρεπτικά) του υποστρώματος ώστε να ενισχύσει τη μικροβιολογική δραστηριότητα.

6.2.1.2. Έλεγχος της διεργασίας της κομποστοποίησης

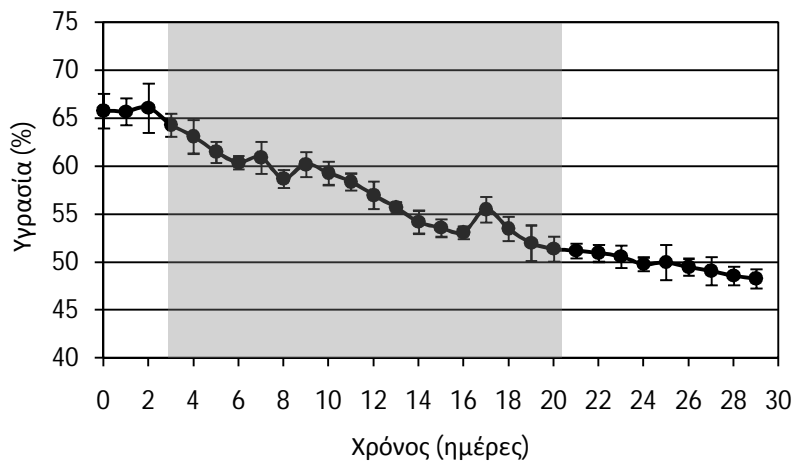
Οι μεταβολές στη θερμοκρασία του υποστρώματος αποτελούν ένδειξη της μικροβιακής δραστηριότητας της κομποστοποίησης και της σταθερότητας του τελικού οργανικού προϊόντος. Στο **Διάγραμμα 6.1** παρουσιάζεται η εξέλιξη της θερμοκρασίας στον 1^ο πειραματικό κύκλο. Το υπόστρωμα διέπεται από μια αρχική μεσόφιλη φάση (<40 °C) κατά την οποία οι μικροοργανισμοί διασπούν γρήγορα τις διαλυτές και εύκολα αποδομήσιμες οργανικές ενώσεις οι οποίες εμπεριέχονται πρωτίστως στην ιλύ (Manios, 2004).



Διάγραμμα 6.1: Εξέλιξη της θερμοκρασίας (°C) κατά τη διάρκεια του 1^{ου} κύκλου κομποστοποίησης με τη σκιαγραφημένη περιοχή να αφορά στη θερμοφιλική φάση της διεργασίας.

Η μικροβιακή αυτή δραστηριότητα έχει ως φυσικό επακόλουθο την απελευθέρωση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας υπό μορφή θερμότητας η οποία σταδιακά συσσωρεύεται λόγω του κλειστού τύπου βιοαντιδραστήρα καθώς και της αυτομονωτικής ιδιότητας του υποστρώματος με αποτέλεσμα την άμεση αύξηση της θερμοκρασίας. Την 3^η ημέρα λειτουργίας τους συστήματος σημειώνεται άνοδος της θερμοκρασίας σε επίπεδα μεγαλύτερα των 40°C. Σε αυτές τις συνθήκες οι μεσόφιλοι μικροοργανισμοί γίνονται λιγότερο ανταγωνιστικοί και αντικαθίστανται διαδοχικά από θερμοφίλους. Κατά τη θερμοφιλική φάση ο ρυθμός διάσπασης της οργανικής ουσίας είναι ταχύτερος διαμορφώνοντας υψηλές θερμοκρασίες οι οποίες κυμαίνονται από 55 έως 60°C για συνολική διάρκεια 7 ημερών (5^η έως 11^η ημέρα) με τη μέγιστη θερμοκρασία να επιτυγχάνεται την 7^η ημέρα λειτουργίας (59.2°C). Μετέπειτα παρατηρείται σταδιακή μείωση της θερμοκρασίας ενώ την 21^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.

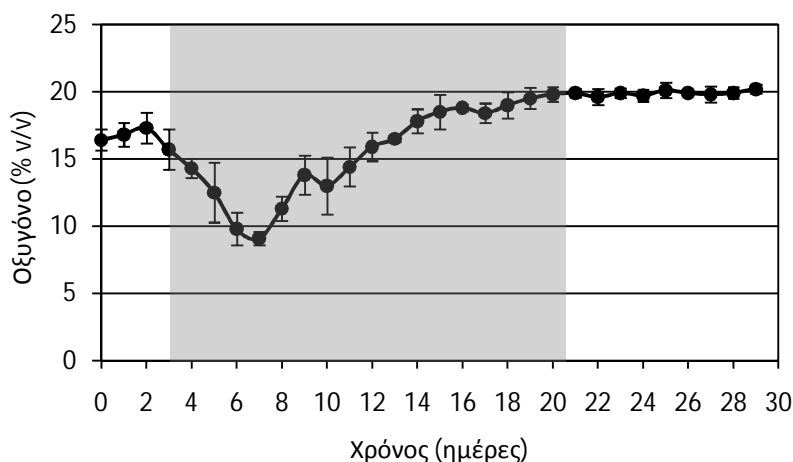
Η εξασφάλιση επαρκούς υγρασίας στο υπόστρωμα αποτελεί βασική παράμετρο για τη διεξαγωγή της διεργασίας της κομποστοποίησης προκειμένου να αποφευχθεί τόσο η πρόωρη αφυδάτωση του οργανικού υλικού, σε περίπτωση χαμηλής περιεχόμενης υγρασίας, όσο και η διαμόρφωση αναερόβιων συνθηκών σε περίπτωση περίσσειας ποσότητας νερού (Tiquia et al., 2002, 1996a; de Bertoldi et al., 1983). Το **Διάγραμμα 6.2** παρουσιάζει την εξέλιξη της περιεχόμενης υγρασίας του υποστρώματος κατά τη διάρκεια του 1^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης.



Διάγραμμα 6.2: Εξέλιξη της υγρασίας (% wb) κατά τη διάρκεια του 1^{ου} κύκλου κομποστοποίησης με τη σκιαγραφημένη περιοχή να αφορά στη θερμοφιλή φάση της διεργασίας.

Η αρχική υγρασία του υποστρώματος είναι 65.80% η οποία σε συνδυασμό με την επαρκή ανάδευση και παροχή οξυγόνου στο υπόστρωμα 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 αλλά και εξαιτίας της απομάκρυνσης μέρους των παραγόμενων στραγγισμάτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι η στιγμιαία αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας η οποία καταγράφεται κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης οφείλεται στη ύγρανση του υποστρώματος με την προσθήκη νερού προκειμένου να διατηρηθεί η υγρασία σε επιθυμητά επίπεδα κατά τη θερμοφιλή φάση της διεργασίας. Στα μετέπειτα στάδια (2^η μεσόφιλη) η ύγρανση του υποστρώματος διακόπτεται με αποτέλεσμα τη σταδιακή μείωση της περιεχόμενης υγρασίας σε επίπεδα μικρότερα του 50%.

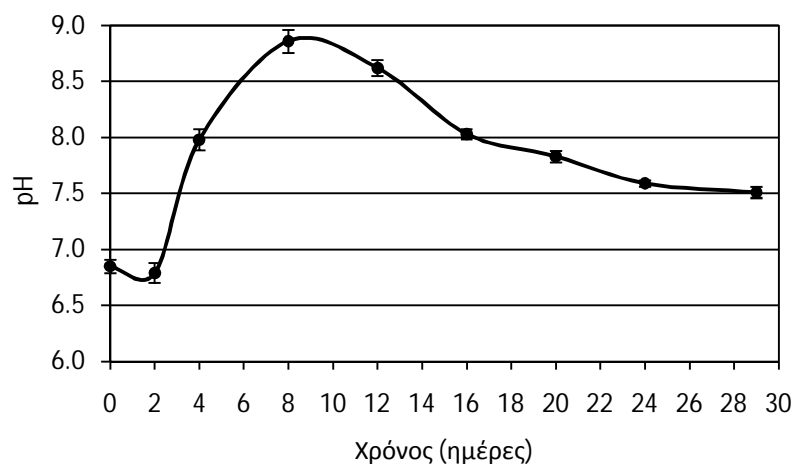
Το **Διάγραμμα 6.3** παρουσιάζει την εξέλιξη του περιεχόμενου οξυγόνου στο υπόστρωμα κατά τη διάρκεια του 1^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης. Η περιεκτικότητα του οξυγόνου στο υπόστρωμα διατηρήθηκε σε επίπεδα υψηλότερα από 10% v/v για τη μεγαλύτερη διάρκεια της διεργασίας της κομποστοποίησης. Αυτό είναι ενδεικτικό της ικανής ανάδευσης και του επαρκούς αερισμού του υποστρώματος για τη ενίσχυση των αερόβιων συνθηκών στον βιοαντιδραστήρα.



Διάγραμμα 6.3: Εξέλιξη του οξυγόνου (% v/v) κατά τη διάρκεια του 1^{ου} κύκλου κομποστοποίησης με τη σκιαγραφημένη περιοχή να αφορά στη θερμοφιλή φάση της διεργασίας.

Οι ελάχιστες τιμές οξυγόνου παρατηρήθηκαν κατά τη θερμοφιλή φάση διότι η κατανάλωσή του είναι μεγαλύτερη για τη βιοξείδωση της διαθέσιμης οργανικής ουσίας. Στα τελικά στάδια της διεργασίας το επίπεδο του οξυγόνου διαμορφώνεται σε υψηλά επίπεδα ($\approx 20\%$ v/v) χαρακτηριστικό του χαμηλού ρυθμού βιοαποδόμησης της οργανικής μάζας.

Το **Διάγραμμα 6.4** παρουσιάζει την εξέλιξη του pH κατά τη διάρκεια του 1^{ου} κύκλου κομποστοποίησης. 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.

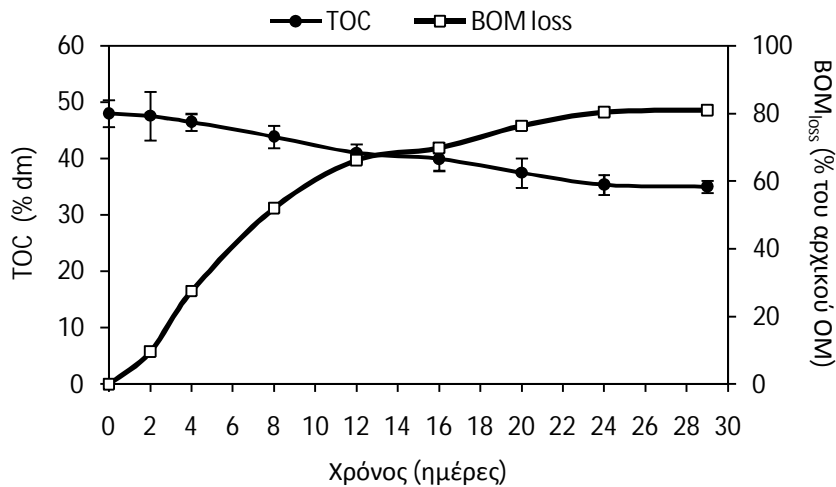


Διάγραμμα 6.4: Εξέλιξη του pH κατά τη διάρκεια του 1^{ου} κύκλου κομποστοποίησης

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 8^η ημέρα λειτουργίας ίσο με 8.86. Λόγω της πτητικότητας της αμμωνίας, της εκχύλισης αμμωνιακών στα στραγγίσματα και της παράλληλης οξείδωσής τους σε νιτρικά (νιτροποίηση), η συγκέντρωση των αμμωνιακών μειώνεται με παράλληλη μείωση του pH. Στο τέλος της διεργασίας της κομποστοποίησης το pH τείνει προς ουδέτερες τιμές το οποίο αποτελεί ένδειξη σταθεροποίησης του υποστρώματος.

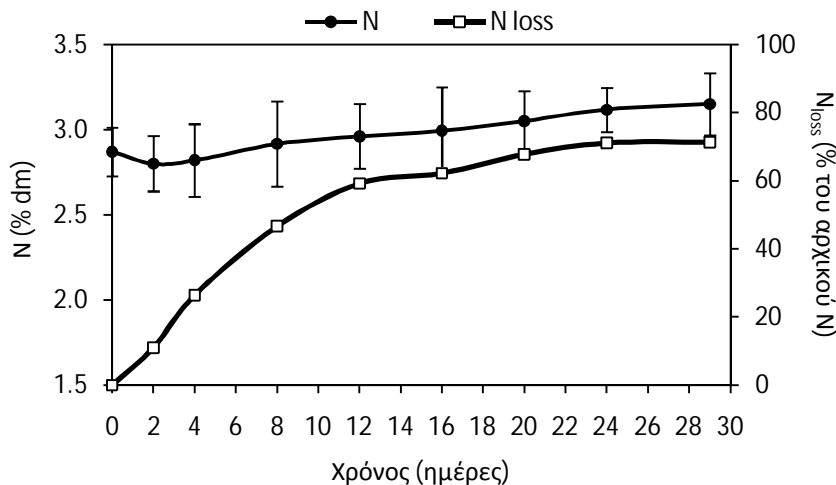
Στο **Διάγραμμα 6.5** παρουσιάζεται η εξέλιξη του οργανικού άνθρακα και οι απώλειες της οργανικής ουσίας στον 1^ο πειραματικό κύκλο κομποστοποίησης. Ο ολικός οργανικός άνθρακας παρουσιάζει μείωση καθόλη τη διάρκεια της κομποστοποίησης εξαιτίας των βιοξειδωτικών διεργασιών και της μετατροπής του σε CO₂. Η εντονότερη κατανάλωση του οργανικού άνθρακα επιτυγχάνεται κατά τη θερμοφιλή φάση της διεργασίας όπου και παρατηρείται η εντονότερη μικροβιακή δραστηριότητα λόγω των άμεσα διαθέσιμων οργανικών ενώσεων. Η αρχική περιεκτικότητα οργανικού άνθρακα στο υπόστρωμα είναι 48.04% dm ενώ στο τέλος του λειτουργικού χρόνου στον βιοαντιδραστήρα καταγράφεται στο 35.04% dm όπου και τείνει να σταθεροποιηθεί. Η βιοαποδόμηση της οργανικής ουσίας του υποστρώματος εκφράζεται από το σύνολο των απωλειών της κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης (BOM_{loss}). Στον 1^ο κύκλο κομποστοποίησης η οργανική ουσία παρουσιάζει σημαντική μείωση, της τάξης του 81.0% της αρχικής οργανικής

ουσίας, με το μεγαλύτερο μέρος των απωλειών να επιτυγχάνεται κατά τη θερμόφιλη φάση της διεργασίας.



Διάγραμμα 6.5: Μεταβολή του ολικού οργανικού άνθρακα και εξέλιξη των απωλειών οργανικής ουσίας κατά τη διάρκεια του 1^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης

Το **Διάγραμμα 6.6** παρουσιάζει τη μεταβολή του ολικού αζώτου στο υπόστρωμα καθώς και την εξέλιξη των απωλειών του κατά τη διάρκεια του 1^{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. Στην αρχή της διεργασίας παρατηρείται μικρή μείωση της ποσοστιαίας περιεκτικότητας του αζώτου στο υπόστρωμα ενδεχομένως εξαιτίας των απωλειών που εμφανίζονται κατά την αποδόμηση του οργανικού αζώτου.



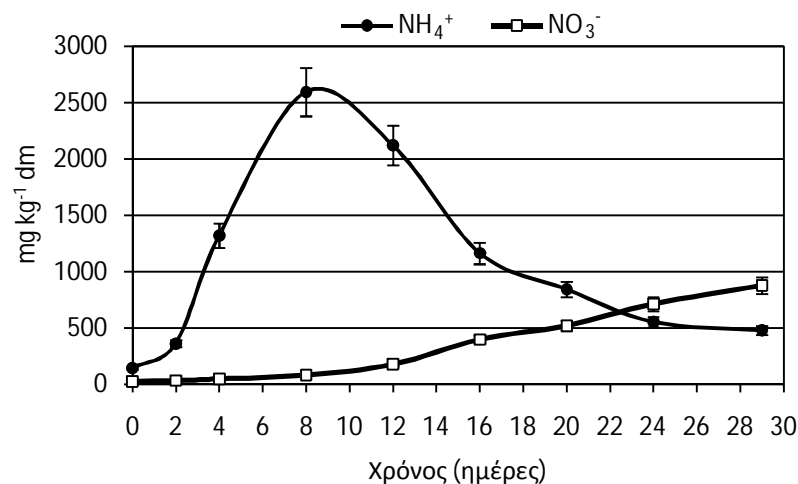
Διάγραμμα 6.6: Μεταβολή του ολικού αζώτου και εξέλιξη των απωλειών αζώτου κατά τη διάρκεια του 1^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης

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).

Παρότι η ποσοστιαία περιεκτικότητα του αζώτου κατά τη διάρκεια του 1^{ου} πειραματικού κύκλου αυξάνεται, σε απόλυτη τιμή το άζωτο μειώνεται λόγω της σημαντικής κατανάλωσης της οργανικής ουσίας. Στο τέλος της διεργασίας στον βιοαντιδραστήρα οι απώλειες αζώτου ανέρχονται στο 71.4% του αρχικού αζώτου (**Διάγραμμα 6.6**). Το μεγαλύτερο μέρος των απωλειών αζώτου παρατηρείται κατά τη θερμοφιλή φάση της κομποστοποίησης λόγω της πτητικότητας της αμμωνίας η οποία σχηματίζεται κατά το μεταβολισμό του διαθέσιμου οργανικού αζώτου σε αμμωνιακά. Επιπλέον απώλειες αζώτου κατά τα αρχικά στάδια της κομποστοποίησης ενδέχεται να παρουσιάζονται μέσω εκχύλισης και απομάκρυνσης μέρους των παραγόμενων στραγγισμάτων.

Στο **Διάγραμμα 6.7** παρουσιάζεται η εξέλιξη των αμμωνιακών και των νιτρικών κατά τη διεργασία του 1^{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 143 mg kg⁻¹ αρχικά σε 1321 mg kg⁻¹ την 4^η ημέρα).

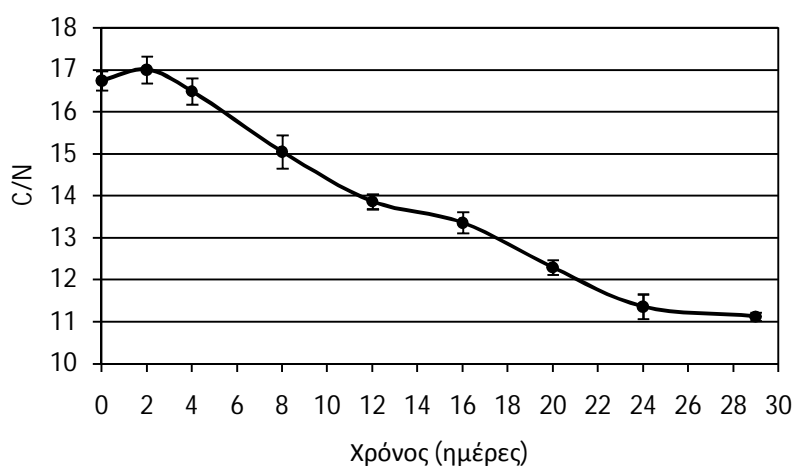


Διάγραμμα 6.7: Μεταβολή της συγκέντρωσης των αμμωνιακών και των νιτρικών κατά τη διάρκεια του 1^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης

Η μέγιστη συγκέντρωση αμμωνιακών (2594 mg kg⁻¹) παρουσιάζεται κατά τη θερμοφιλή φάση (8^η ημέρα) όπου παρατηρείται και η μέγιστη τιμή του pH (8.86). Μετέπειτα 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 6.7** 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 26.84 mg kg⁻¹ στην αρχή της διεργασίας σε 82.31 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 12^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 στον βιοαντιδραστήρα (29^η ημέρα) ανέρχεται στα 876 mg kg⁻¹.

Στο **Διάγραμμα 6.8** απεικονίζεται η μεταβολή του λόγου C/N κατά τη διεργασία του 1^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης. Ο αρχικός λόγος C/N του υποστρώματος όπως αυτός διαμορφώθηκε από την ανάμιξη υλός με τα υπολείμματα των ζαχαρότευτλων, είναι σχετικά χαμηλός και ίσος με 16.74, λόγω της υψηλής περιεκτικότητας των υλικών τροφοδοσίας σε άζωτο (**Πίνακας 6.2**). Ο λόγος C/N παρουσιάζει φθίνουσα πορεία καθόλη τη διάρκεια της κομποστοποίησης η οποία είναι ανάλογη της μείωσης της περιεκτικότητας του οργανικού άνθρακα του υποστρώματος όπως παρουσιάστηκε στο **Διάγραμμα 6.5**. Προς το τέλος της διεργασίας η αναλογία C/N τείνει να σταθεροποιηθεί, σε τιμές μικρότερες του 12, λόγω του χαμηλού ρυθμού βιοξείδωσης της εναπομένουσας βιοαποδομήσιμης οργανικής ουσίας.



Διάγραμμα 6.8: Μεταβολή του λόγου C/N κατά τη διάρκεια του 1^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης

Στον **Πίνακα 6.4** παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των παραγόμενων στραγγισμάτων κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης. Το pH στα στραγγίσματα αυξάνεται κατά τα αρχικά στάδια της διεργασίας και λαμβάνει μέγιστη τιμή την 7^η ημέρα ίση με 8.7 ενώ στα μετέπειτα στάδια μειώνεται σταδιακά προς ουδέτερες τιμές (7.5 την 23^η ημέρα). Η συγκέντρωση του BOD₅ την 3^η ημέρα, παρουσιάστηκε υψηλή και ίση με 51.0 g l⁻¹. Κατά την εξέλιξη της διεργασίας τα οργανικά ενδιάμεσα προϊόντα υπόκεινται σε πλήρη βιοξείδωση με παραγωγή CO₂, ενώ οι ενώσεις οι οποίες είναι μη βιοαποδομήσιμες ή λιγότερο διαθέσιμες προς αποδόμησης, συσσωρεύονται. Επομένως, η μικροβιακή δραστηριότητα φθίνει βαθμιαία και το απαιτούμενο οξυγόνο από τους μικροοργανισμούς μειώνεται κατά την εξέλιξη της διεργασίας. Για αυτό το λόγο το οργανικό φορτίο κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης παρουσιάζει φθίνουσα πορεία και προς το τέλος της διεργασίας η συγκέντρωση του BOD₅ μειώνεται κατά 82.4% της αρχικής τιμής. Τα στραγγίσματα στο αρχικό στάδιο του πειραματικού κύκλου παρουσίαζαν απαλό μαύρο χρώμα το οποίο σταδιακά και κατά την εξέλιξη της

κομποστοποίησης αποκτούσε μια πιο σκούρα απόχρωση. Η αλλαγή αυτή του χρώματος είναι ενδεικτική της παρουσίας χουμικών και φουλβικών ενώσεων καθώς και άλλων σύνθετων ουσιών που χαρακτηρίζονται από μεγάλο μοριακό βάρος, σκούρο χρωματισμό και υδρόφιλες οργανικές ιδιότητες. Η συγκέντρωση των αμμωνιακών και των νιτρικών στα στραγγίσματα ακολουθούν την ίδια εξέλιξη με αυτή του υποστρώματος όπως φαίνεται από τα πειραματικά αποτελέσματα. Η συγκέντρωση των αμμωνιακών ιόντων εμφανίζει απότομη αύξηση κατά τις πρώτες ημέρες της κομποστοποίησης με τη μέγιστη τιμή να λαμβάνεται την 7^η ημέρα ίση με 1985 mg l⁻¹. Μετέπειτα η συγκέντρωση μειώνεται αισθητά και προς το τέλος της διεργασίας (23^η ημέρα) λαμβάνει τιμή ίση με 451 mg l⁻¹. Η συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων στα στραγγίσματα παρουσίασε σημαντική αύξηση κυρίως μετά το θερμοφίλο στάδιο της διεργασίας. Ενδεικτικό του μεγέθους της νιτροποίησης αποτελεί η αύξηση της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων περίπου κατά 12 φορές την 23^η ημέρα μετά την έναρξη της λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα. Τέλος, οι συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων στα στραγγίσματα κατά τη διεργασία του 1^{ου} πειραματικού κύκλου παρουσιάζονται σε πολύ χαμηλά επίπεδα ενώ σε ορισμένα μέταλλα (Cd, Cr και Pb) οι συγκεντρώσεις είναι κάτω από το όριο ανίχνευσης.

Πίνακας 6.4: Χαρακτηριστικά των παραγόμενων στραγγισμάτων κατά τον 1^ο κύκλο κομποστοποίησης

Παράμετρος/Χρόνος	3 ^η ημέρα	7 ^η ημέρα	15 ^η ημέρα	23 ^η ημέρα
pH	7.8 (0.03)	8.7 (0.07)	7.9 (0.05)	7.5 (0.04)
BOD ₅ (mg l ⁻¹)	50984 (6597)	31015 (4256)	17972 (1773)	8958 (948.42)
NH ₄ ⁺ (mg l ⁻¹)	823.47 (32.94)	1985.06 (119.10)	895.10 (44.76)	450.84 (18.03)
NO ₃ ⁻ (mg l ⁻¹)	34.05 (1.70)	55.74 (2.79)	338.73 (13.55)	687.51 (48.13)
Cd (mg l ⁻¹)	<0.002	0.008 (0.0)	<0.002	<0.002
Cr (mg l ⁻¹)	<0.020	<0.020	0.080 (0.02)	<0.020
Cu (mg l ⁻¹)	0.140 (0.03)	0.140 (0.03)	0.150 (0.04)	0.150 (0.04)
Ni (mg l ⁻¹)	0.028 (0.0)	0.023 (0.0)	0.022 (0.0)	<0.020
Pb (mg l ⁻¹)	<0.050	<0.050	<0.050	<0.050
Zn (mg l ⁻¹)	0.213 (0.02)	0.199 (0.02)	0.236 (0.03)	0.260 (0.03)

6.2.2. Δεύτερη εφαρμογή

6.2.2.1. Χαρακτηρισμός πρώτης ύλης και σύνθεση του υλικού τροφοδοσίας

Στο 2^ο πειραματικό κύκλο κομποστοποίησης χρησιμοποιήθηκε ιλύς από ΜΕΛ καθώς και οργανικά απόβλητα που προέρχονται από γεωργικές και κτηνοτροφικές δραστηριότητες. Αναφορικά με τα γεωργικά και κτηνοτροφικά απόβλητα επιλέχθηκαν φύλλα ζαχαρότευτλων, άχυρο και μη σταθεροποιημένη κοπριά αιγοπροβάτων. Στον Πίνακα 6.5 παρουσιάζονται οι φυσικοχημικές ιδιότητες για κάθε μία από τις προαναφερόμενες ροές οργανικών αποβλήτων.

Πίνακας 6.5: Φυσικοχημικές ιδιότητες υλικού τροφοδοσίας και σύσταση μίγματος του 2^{ου} κύκλου κομποστοποίησης.

Παράμετροι	Ιλύς	Κοπριά Αιγοπροβάτων	Φύλλα Ζαχαρότευτλων	Άχυρο	Μίγμα
Φυσικοχημικές ιδιότητες					
Υγρασία (% wb)	67.84 (2.01)	15.63 (3.40)	46.26 (2.00)	9.73 (2.93)	51.5 (1.62)
Ξηρή Ουσία (%wb)	32.16 (2.01)	84.37 (3.40)	53.74 (2.00)	90.27 (2.93)	48.5 (1.62)
pH	6.30 (0.22)	8.50 (0.06)	7.20 (0.05)	7.10 (0.05)	6.90 (0.02)
TOC (% dm)	29.6 (0.75)	47.71 (2.00)	58.60 (2.30)	59.08 (1.95)	47.46 (2.37)
N (% dm)	2.13 (0.16)	2.12 (0.06)	3.23 (0.10)	0.94 (0.01)	2.42 (0.12)
C/N	13.87 (0.31)	22.50 (0.57)	18.14 (0.41)	62.85 (1.26)	19.61 (0.11)
P (P ₂ O ₅ % dm)	1.39 (0.13)	0.93 (0.17)	0.25 (0.07)	0.17 (0.02)	0.74 (0.14)
K (K ₂ O % dm)	0.97 (0.11)	4.27 (0.40)	3.47 (0.25)	1.99 (0.14)	3.11 (0.28)
Ca (CaO % dm)	4.52 (1.08)	6.81 (1.63)	3.44 (0.83)	1.11 (0.05)	4.37 (0.99)
Mg (MgO % dm)	2.21 (0.33)	1.74 (0.15)	1.58 (0.03)	0.57 (0.03)	1.82 (0.13)
Cd (mg kg ⁻¹ dm)	0.82 (0.04)	0.59 (0.11)	0.16 (0.05)	0.13 (0.03)	0.44 (0.09)
Cr (mg kg ⁻¹ dm)	25.21 (1.87)	10.46 (1.12)	0.57 (0.08)	0.60 (0.07)	9.70 (1.09)
Cu (mg kg ⁻¹ dm)	135.27 (6.26)	17.32 (1.79)	12.25 (1.97)	6.64 (0.41)	42.80 (4.66)
Ni (mg kg ⁻¹ dm)	26.91 (3.56)	11.15 (0.80)	0.94 (0.01)	1.00 (0.01)	10.70 (0.63)
Pb (mg kg ⁻¹ dm)	63.38 (6.13)	2.81 (0.38)	0.30 (0.05)	0.33 (0.06)	16.32 (2.30)
Zn (mg kg ⁻¹ dm)	251.82 (14.46)	34.86 (4.92)	31.93 (7.17)	23.91 (2.37)	85.26 (12.79)
Σύνθεση υποστρώματος					
Νωπή ουσία (kg)	520	250	490	50	1310
Αναλογία (% wb)	39.69	19.08	37.40	3.82	100
Ξηρή ουσία (kg)	167.23	210.93	263.33	45.14	635.35
Αναλογία (% dm)	24.36	30.72	38.35	6.57	100
Υγρασία (kg)	352.77	39.08	226.67	4.87	674.65

Σύμφωνα με τον Πίνακα 6.5 παρατηρείται ότι η ιλύς παρουσιάζει υψηλή περιεκτικότητα σε νερό (67.84%), σε αντιδιαστολή με τα γεωργικά και κτηνοτροφικά απόβλητα στα οποία το ποσοστό περιεχόμενης υγρασίας είναι ίσο με 46.26, 15.63 και 9.73% για τα φύλλα ζαχαρότευτλων, την αεροξηραμένη κοπριά και το άχυρο αντίστοιχα. Το εύρος τιμών pH του υλικού τροφοδοσίας είναι μεταξύ 6.3 και 8.5 το οποίο θεωρείται ικανοποιητικό λαμβάνοντας υπόψη ότι οι αερόβιοι μικροοργανισμοί δραστηριοποιούνται εντονότερα σε pH 6.0-8.5 (Gajalakshmi and Abbasi, 2008). Αναφορικά με τον περιεχόμενο οργανικό άνθρακα τα γεωργικά και κτηνοτροφικά απόβλητα παρουσιάζουν υψηλές τιμές μεταξύ 47.71-59.08% dm, ενώ στην ιλύ είναι μόλις 29.60% dm. Το άχυρο σε σύγκριση με τα υπόλοιπα υλικά τροφοδοσίας παρουσιάζει χαμηλή περιεκτικότητα αζώτου αναλογικά με αυτή του άνθρακα με αποτέλεσμα να διαμορφώνεται υψηλός λόγος C/N ίσος με 62.58. Στα υπόλοιπα στερεά

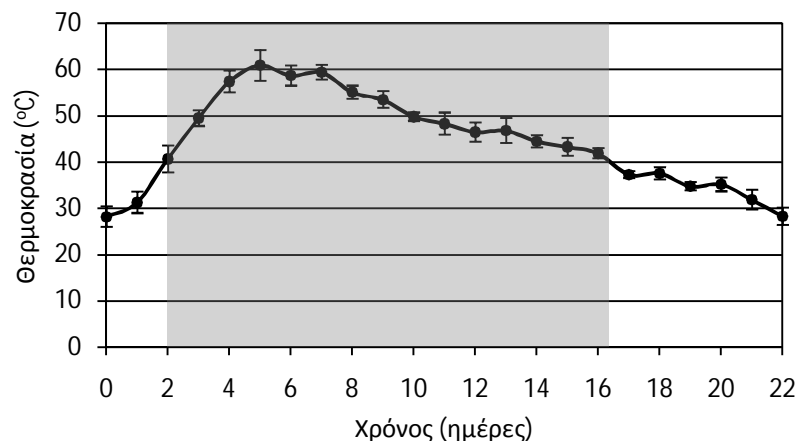
οργανικά απόβλητα ο λόγος C/N κυμαίνεται μεταξύ 13.87-22.50. Τέλος η συγκέντρωση βαρέων μετάλλων τόσο στα επιλεγμένα γεωργικά και κτηνοτροφικά οργανικά απόβλητα όσο και στην ιλύ είναι σε επιτρεπτά επίπεδα για τη διεξαγωγή της διεργασίας της κομποστοποίησης (Πίνακας 6.3). Η σύνθεση του μίγματος των οργανικών αποβλήτων δύναται να εξισορροπήσει τα επίπεδα υγρασίας και να προσδώσει τα απαιτούμενα θρεπτικά συστατικά στο αρχικό υπόστρωμα για την ελεγχόμενη ανάπτυξη των βιολογικών διεργασιών της κομποστοποίησης.

Η ιλύς η οποία αποτέλεσε το βασικό υλικό τροφοδοσίας του βιοαντιδραστήρα (520 kg wb) συλλέχθηκε από ΜΕΛ η οποία εξυπηρετεί μικρές κοινότητες και δήμους γύρω από την αστική περιοχή της El Jadida στο Μαρόκο ενώ τα φύλλα ζαχαρότευτλων (490 kg wb), το άχυρο (50 kg wb) και η κοπριά (250 kg wb) προέρχονται από παρακείμενες γεωργικές και κτηνοτροφικές δραστηριότητες. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα επιλεγμένα γεωργικά υπολείμματα αποτελούν εξαιρετο δομικό μέσο για την ανάμιξή τους με την ιλύ διαμορφώνοντας καλύτερες συνθήκες αναφορικά με τις φυσικές ιδιότητες του υποστρώματος ευνοώντας τις συνθήκες αερισμού και ανάδευσης στον βιοαντιδραστήρα (Κουλουμπής και Τσαντήλας, 2007). Επιπλέον η χρήση μη σταθεροποιημένης κοπριάς προσδίδει την απαιτούμενη μικροβιακή βιομάζα για την ενίσχυση των βιοξειδωτικών διεργασιών κατά την έναρξη της διεργασίας (Zmora-Nahum et al., 2007; Imbeah, 1997).

Δεδομένου των χαρακτηριστικών των προαναφερόμενων αποβλήτων, διαμορφώνεται η σύσταση του μίγματος τροφοδοσίας του δεύτερου κύκλου κομποστοποίησης με την ανάμιξη των διαφορετικών ροών αποβλήτων (Πίνακας 6.5). Η αρχική υγρασία του μίγματος ανέρχεται στο 51.50% ποσοστό το οποίο θεωρείται οριακό για την έναρξη της διεργασίας της κομποστοποίησης. Για το λόγο αυτό γίνεται προσθήκη νερού 190kg, διαμορφώνοντας την υγρασία του οργανικού μίγματος στο 59.30% και τη συνολική μάζα στα 1500kg. Επιπλέον, ο οργανικός άνθρακας του υποστρώματος ανέρχεται στο 47.46% dm, το άζωτο στο 2.42% dm και η σχέση C/N στο 19.61.

6.2.2.2. Έλεγχος της διεργασίας της κομποστοποίησης

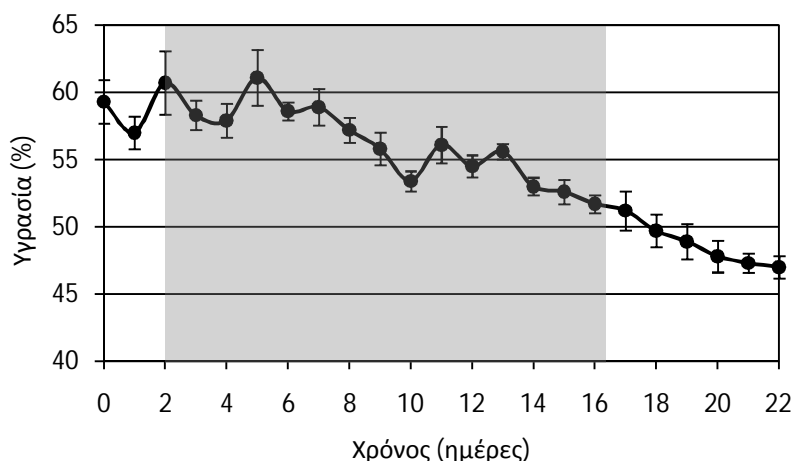
Στο **Διάγραμμα 6.9** παρουσιάζεται η εξέλιξη της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια του 2^{ου} πειραματικού κύκλου. Η έντονη μικροβιακή δραστηριότητα αρχίζει από τις πρώτες ημέρες της διεργασίας διαμορφώνοντας μια πρώτη μεσόφιλη φάση την οποία διαδέχεται τη 2^η ημέρα η θερμοφίλη.



Διάγραμμα 6.9: Εξέλιξη της θερμοκρασίας (°C) κατά τη διάρκεια του 2^{ου} κύκλου κομποστοποίησης με τη σκιαγραφημένη περιοχή να αφορά στη θερμοφίλη φάση της διεργασίας.

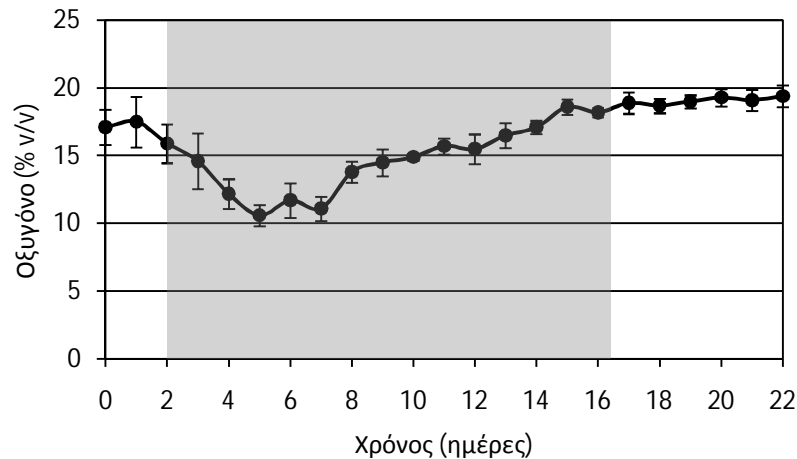
Εξαιτίας της διάσπασης των διαλυτών και άμεσα διαθέσιμων βιοαποδομήσιμων οργανικών ενώσεων οι οποίες εμπεριέχονται πρωτίστως στην ιλύ και την κοπριά, μεγάλες ποσότητες ενέργειας σε μορφή θερμότητας εκλύονται και συσσωρεύονται στο υπόστρωμα με αποτέλεσμα η θερμοκρασία να αυξηθεί σημαντικά σε σύντομο χρονικό διάστημα με μέγιστη τιμή αυτή των 60.9°C την 5^η ημέρα λειτουργίας του συστήματος. Οι υψηλές θερμοκρασίες (>50°C) διατηρούνται στο βιοαντιδραστήρα για οκτώ συνεχείς ημέρες (3^η έως 10^η ημέρα) ενώ η μείωση των επιπέδων της και η διαμόρφωση μιας δεύτερης μεσόφιλης φάσης (17^η ημέρα) πραγματοποιείται μόνο εφόσον έχει βιοαποδομηθεί σημαντικό μέρος του οργανικού κλάσματος του υποστρώματος ικανό να ενισχύσει και να συντηρήσει την έντονη μικροβιακή δραστηριότητα.

Στο **Διάγραμμα 6.10** απεικονίζεται η μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας κατά τη διεξαγωγή του 2^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης. Η περιεκτικότητα σε υγρασία του αρχικού μίγματος ανέρχεται στο 59.3% λόγω της προσθήκης νερού κατά την τροφοδοσία του αρχικού μίγματος στο βιοαντιδραστήρα. Όπως παρατηρείται η περιεχόμενη υγρασία του υποστρώματος διατηρήθηκε μεταξύ 50-60% καθόλη τη διάρκεια της θερμοφίλης φάσης της διεργασίας. Για την επίτευξη αυτών των συνθηκών πραγματοποιήθηκε σταδιακή παροχή νερού στο σύστημα προκειμένου να αντισταθμιστούν οι απώλειες υγρασίας οι οποίες προκύπτουν από την εξάτμιση νερού λόγω των παρατεταμένων υψηλών θερμοκρασιών αλλά και λόγω της απομάκρυνσης μέρους των παραγόμενων στραγγισμάτων. Κατά την έναρξη της 2^{ης} μεσόφιλης φάσης (17^η ημέρα) η παροχή νερού διακόπτεται προκειμένου να μειωθεί η περιεχόμενη υγρασία εξασφαλίζοντας τόσο τη μείωση του όγκου και της μάζας του τελικού προϊόντος όσο και της μικροβιακής δραστηριότητας.



Διάγραμμα 6.10: Εξέλιξη της υγρασίας (% wb) κατά τη διάρκεια του 2^{ου} κύκλου κομποστοποίησης με τη σκιαγραφημένη περιοχή να αφορά στη θερμοφίλη φάση της διεργασίας.

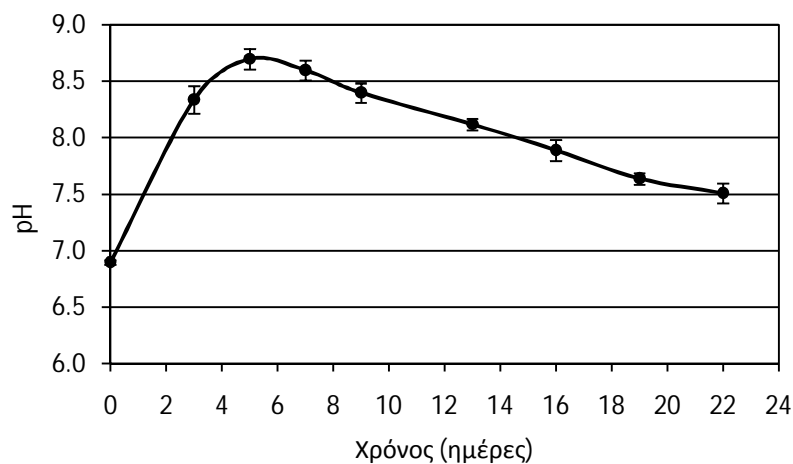
Οι άμεσα βιοαποδομήσιμες ενώσεις του υποστρώματος μεταβολίζονται στα αρχικά στάδια της διεργασίας. Επομένως, η εκπομπή θερμότητας και η απαίτηση οξυγόνου από τους μικροοργανισμούς είναι μεγαλύτερες στα πρώτα στάδια της κομποστοποίησης ενώ στη συνέχεια μειώνονται σταδιακά. Κατά το 2^ο πειραματικό κύκλο η περιεκτικότητα του οξυγόνου διατηρήθηκε σε επίπεδα ικανοποιητικά και μεγαλύτερα από 10% v/v καθόλη τη διάρκεια της διεργασίας (**Διάγραμμα 6.11**).



Διάγραμμα 6.11: Εξέλιξη του οξυγόνου (% v/v) κατά τη διάρκεια του 2^{ου} κύκλου κομποστοποίησης με τη σκιαγραφημένη περιοχή να αφορά στη θερμοφιλή φάση της διεργασίας.

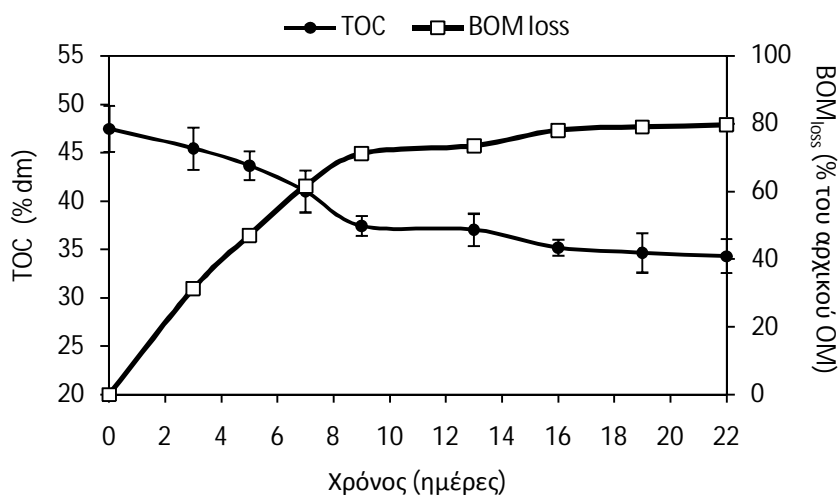
Όπως και στην περίπτωση του 1^{ου} πειραματικού κύκλου οι μικρότερες τιμές οξυγόνου παρουσιάζονται κατά τη θερμοφιλή φάση όπου ο ρυθμός βιοαποδόμησης της οργανικής ουσίας και κατ' επέκταση η απαίτηση σε οξυγόνο είναι μεγαλύτερη. Με το πέρας της έντονης μικροβιακής δραστηριότητας και σε συνδυασμό με την αποδοτική ανάδευση και τον επαρκή αερισμό στο σύστημα, η περιεκτικότητα του οξυγόνου στο υπόστρωμα αυξάνεται. Οι υψηλές τιμές οξυγόνου (>19% v/v) προς το τέλος της διεργασίας είναι ενδεικτικές του αργού ρυθμού διάσπασης και της σταθεροποίησης της οργανικής ουσίας.

Η εξέλιξη του pH κατά τη διάρκεια του 2^{ου} κύκλου παρουσιάζεται στο **Διάγραμμα 6.12**. Το pH αυξάνεται στα πρώτα στάδια της διεργασίας φτάνοντας σε ένα μέγιστο την 5^η ημέρα ίσο με 8.70 εξαιτίας της αυξημένης συγκέντρωσης αμμωνιακών στο υπόστρωμα μέσω της δράσης πρωτεολυτικών βακτηριών τα οποία διασπούν τις διαθέσιμες αζωτούχες οργανικές ενώσεις. Μετέπειτα λόγω της πτητικότητας της αμμωνίας, της εκχύλισης αμμωνιακών στα στραγγίσματα και της εξέλιξης της διεργασίας της νιτροποίησης, η συγκέντρωση των αμμωνιακών μειώνεται με συνεπακόλουθη μείωση του pH. Προς το τέλος της διεργασίας το pH προσεγγίζει ουδέτερες τιμές, ένδειξη της τάσης σταθεροποίησης του υποστρώματος (7.51 την 22^η ημέρα).



Διάγραμμα 6.12: Εξέλιξη του pH κατά τη διάρκεια του 2^{ου} κύκλου κομποστοποίησης

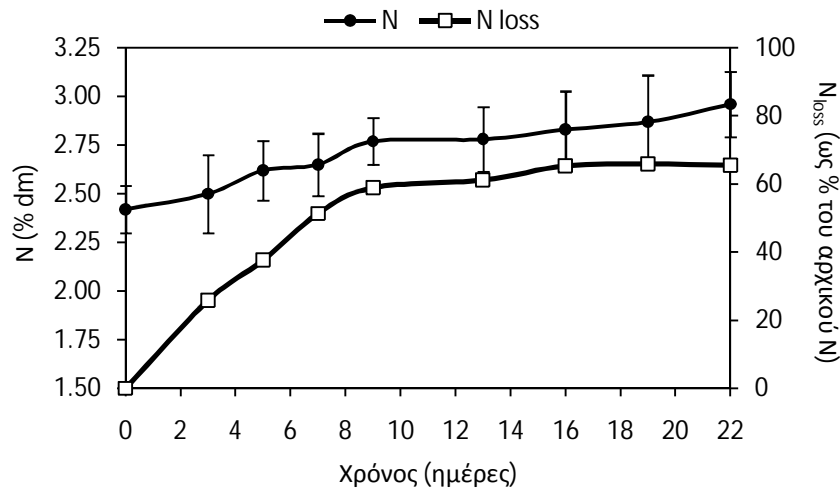
Η διάσπαση της οργανικής ουσίας του υποστρώματος και η μετατροπή της σε ανόργανα συστατικά κατά την παραμονή του υλικού τροφοδοσίας στον βιοαντιδραστήρα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του ολικού οργανικού άνθρακα στο 2^ο πειραματικό κύκλο κομποστοποίησης όπως απεικονίζεται στο **Διάγραμμα 6.13**.



Διάγραμμα 6.13: Μεταβολή του ολικού οργανικού άνθρακα και εξέλιξη των απωλειών οργανικής ουσίας κατά τη διάρκεια του 2^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης

Τις πρώτες ημέρες της διεργασίας καταγράφεται σημαντική μείωση του ολικού άνθρακα από 47.46% αρχικά σε 37.42% την 9^η ημέρα λειτουργίας, 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). Επιπλέον, παρατηρούνται σημαντικές απώλειες στην οργανική ουσία κατά τη διάρκεια του πειραματικού κύκλου, της τάξης του 79.6% της αρχικής οργανικής ουσίας, με το μεγαλύτερο μέρος των απωλειών να πραγματοποιείται κατά την πρώτη μεσόφιλη και κυρίως κατά τη θερμοφιλή φάση.

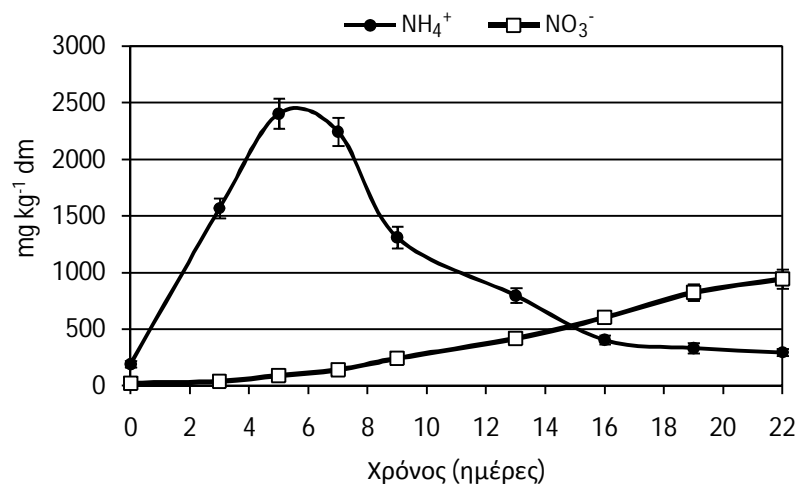
Στο **Διάγραμμα 6.14** απεικονίζεται η μεταβολή του ολικού αζώτου κατά τη διεργασία του 2^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης. Η αύξηση του ολικού περιεχόμενου αζώτου αποδίδεται στην αυξημένη κατανάλωση του οργανικού άνθρακα και τη συνεπακόλουθη μείωση της συνολικής μάζας του υποστρώματος καθόλη 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 2.42% dm αρχικά σε 2.96% dm στο τέλος της διεργασίας. Παρότι η περιεκτικότητα του αζώτου παρουσιάζει αύξηση, σε απόλυτη τιμή το ολικό άζωτο μειώνεται λόγω των σημαντικών απωλειών της οργανικής ουσίας όπως απεικονίζεται στο **Διάγραμμα 6.14**.



Διάγραμμα 6.14: Μεταβολή του ολικού αζώτου και εξέλιξη των απωλειών αζώτου κατά τη διάρκεια του 2^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης

Οι μεγαλύτερες απώλειες του ολικού αζώτου παρουσιάζονται κυρίως στη θερμοφιλή φάση της διεργασίας (2^η έως 16^η ημέρα) λόγω της πτητικότητας της σχηματιζόμενης αμμωνίας, ενώ ενδέχεται να παρουσιαστούν απώλειες σε μικρότερη κλίμακα μέσω της εκχύλισης ενώσεων αζώτου στα στραγγίσματα. Το σύνολο των απωλειών αζώτου, όπως αυτές διαμορφώνονται κατά το 2^ο πειραματικό κύκλο κομποστοποίησης, ανέρχονται στο 65.5% του αρχικού αζώτου.

Στο **Διάγραμμα 6.15** παρουσιάζεται η εξέλιξη των αμμωνιακών και των νιτρικών κατά τη διάρκεια του 2^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης. 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 5^η ημέρα, ίση με 2403.60 mg kg⁻¹.

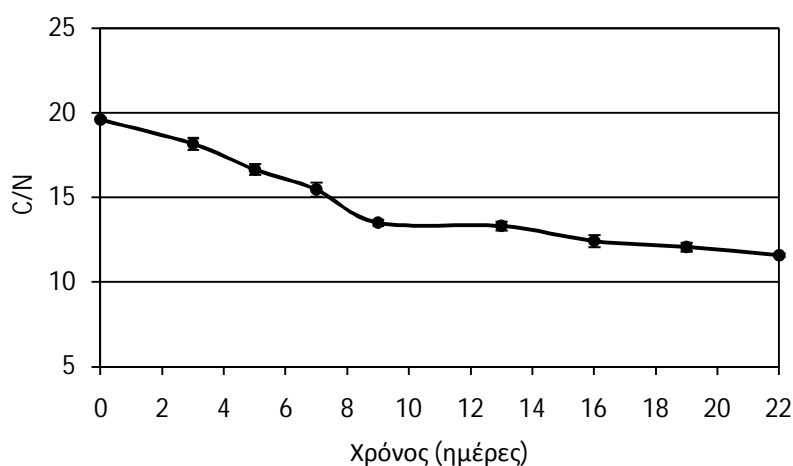


Διάγραμμα 6.15: Μεταβολή των αμμωνιακών και των νιτρικών κατά τη διάρκεια του 2^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης

Για την ίδια περίοδο η συγκέντρωση των νιτρικών σημειώνει μικρή αύξηση (21.16 mg kg⁻¹ αρχικά σε 91.62 mg kg⁻¹ την 5^η ημέρα) λόγω της μετατροπής μέρους των αμμωνιακών σε νιτρικά μέσω της διεργασίας της ετερότροφης νιτροποίησης. Από την 5^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 υποστρώμα υποδεικνύοντας ότι παρουσιάζονται σημαντικές απώλειες αζώτου κυρίως λόγω της πτητικότητας της αμμωνίας καθώς και λόγω εκχύλισης των θρεπτικών ενώσεων μέσω των στραγγισμάτων (Bernal et al., 2009).

Το **Διάγραμμα 6.16** απεικονίζει την εξέλιξη του λόγου C/N κατά τη διεργασία του 2^{ου} κύκλου κομποστοποίησης. Όπως παρατηρείται ο αρχικός λόγος C/N του υποστρώματος διαμορφώνεται από την ανάμιξη των υλικών τροφοδοσίας σε 19.61.



Διάγραμμα 6.16: Μεταβολή του λόγου C/N κατά τη διάρκεια του 2^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης

Παρά την εμφάνιση σχετικά χαμηλού αρχικού λόγου οι μικροοργανισμοί βιοαποδομούν την οργανική ουσία διαμορφώνοντας συνθήκες ταχείας κομποστοποίησης με υψηλές θερμοκρασίες και με παράλληλη σημαντική μείωση του περιεχόμενου άνθρακα για τις πρώτες εννιά ημέρες λειτουργίας του συστήματος με την αναλογία C/N να λαμβάνει τιμή ίση με 13.5 (9^η ημέρα). 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 12 την 22^η και τελευταία ημέρα λειτουργίας.

Οι ιδιότητες των παραγόμενων στραγγισμάτων κατά το 2^ο πειραματικό κύκλο κομποστοποίησης συνοψίζονται στον **Πίνακα 6.6**. Τις πρώτες ημέρες της διεργασίας το pH στα στραγγίσματα κυμαίνεται σε αλκαλικό περιβάλλον λαμβάνοντας μέγιστη τιμή ίση με 8.9 την 6^η ημέρα λειτουργίας. Στα μετέπειτα στάδια το pH μειώνεται σταδιακά προς ουδέτερες τιμές (7.6 τη 18^η ημέρα) λόγω της μείωσης των αμμωνιακών ιόντων και της παράλληλης μετατροπής τους σε νιτρικά. Η αρχική συγκέντρωση του BOD₅ στα στραγγισμάτων παρουσιάζεται αρκετά υψηλή και ίση με 60.6 g l⁻¹ (3^η ημέρα). Μέσω των διαδοχικών βιοξειδωτικών διεργασιών το οργανικό φορτίο μειώνεται σημειώνοντας βραδύτερη μικροβιακή δραστηριότητα και κατ' επέκταση μικρότερη απαίτηση σε οξυγόνου. Προς το τέλος της διεργασίας η συγκέντρωση του BOD₅ είναι ίση με 13.8 g l⁻¹ (18^η ημέρα) διαμορφώνοντας μείωση ίση με 77.2% της αρχικής τιμής. Η συγκέντρωση των αμμωνιακών και των νιτρικών στα στραγγίσματα ακολουθούν την ίδια εξέλιξη με αυτή του υποστρώματος υποδεικνύοντας ότι υπήρξε σωστός έλεγχος και παρακολούθηση της διεργασίας καθότι οι συνθήκες ευνοούν τη διεξαγωγή της

νιτροποίησης. Η συγκέντρωση των αμμωνιακών ιόντων εμφανίζει σημαντική αύξηση κατά τις πρώτες ημέρες της κομποστοποίησης με μέγιστη τιμή ίση με 1885 mg l⁻¹ την 6^η ημέρα λειτουργίας. Μετέπειτα η συγκέντρωση των αμμωνιακών μειώνεται αισθητά και προς το τέλος της διεργασίας (18^η ημέρα) λαμβάνει τιμή ίση με 443 mg l⁻¹. Η συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων στα στραγγίσματα παρουσίασε σημαντική αύξηση κυρίως μετά το θερμόφιλο στάδιο της διεργασίας. Ενδεικτικό του μεγέθους της νιτροποίησης αποτελεί η αύξηση της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων περίπου κατά 14 φορές τη 18^η ημέρα μετά την έναρξη της λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα. Η συγκέντρωση βαρέων μετάλλων στα στραγγίσματα είναι περιορισμένη ενώ σε αρκετές περιπτώσεις οι συγκεντρώσεις των μετάλλων είναι μικρότερες του ορίου ανίχνευσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα στραγγίσματα παρουσιάζουν αρχικά απαλό μαύρο χρωματισμό ενώ κατά την εξέλιξη της κομποστοποίησης το χρώμα αποκτά σταδιακά πιο σκούρα απόχρωση ενδεικτικό της παρουσίας χουμικών και φουλβικών ενώσεων.

Πίνακας 6.6: Χαρακτηριστικά των παραγόμενων στραγγισμάτων κατά το 2^ο κύκλο κομποστοποίησης

Παράμετρος/Χρόνος	3 ^η ημέρα	6 ^η ημέρα	11 ^η ημέρα	18 ^η ημέρα
pH	8.0 (0.09)	8.9 (0.10)	8.1 (0.07)	7.6 (0.05)
BOD ₅ (mg l ⁻¹)	60582 (7364)	40393 (4656)	25956 (3155)	13802 (1353)
NH ₄ ⁺ (mg l ⁻¹)	1303.87 (91.27)	1885.41 (184.84)	709.26 (44.69)	613.79 (26.39)
NO ₃ ⁻ (mg l ⁻¹)	31.73 (0.95)	67.36	251.12 (9.54)	442.51 (22.11)
Cd (mg l ⁻¹)	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
Cr (mg l ⁻¹)	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
Cu (mg l ⁻¹)	0.118 (0.02)	0.099 (0.02)	0.082 (0.02)	0.107 (0.02)
Ni (mg l ⁻¹)	0.034 (0.01)	0.026 (0.0)	0.023 (0.0)	0.028 (0.0)
Pb (mg l ⁻¹)	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Zn (mg l ⁻¹)	0.273 (0.04)	0.268 (0.04)	0.290 (0.04)	0.326 (0.05)

6.2.3. Τρίτη εφαρμογή

6.2.3.1. Χαρακτηρισμός πρώτης ύλης και σύσταση υλικού τροφοδοσίας

Οι ροές βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων οι οποίες αποτέλεσαν το υλικό τροφοδοσίας του 3^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης περιλαμβάνουν ιλύ προερχόμενη από ΜΕΛ, φύλλα ζαχαρότευτλων και μη σταθεροποιημένη κοπριά βοοειδών. Στον Πίνακα 6.7 παρουσιάζονται τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των προαναφερόμενων οργανικών αποβλήτων.

Πίνακας 6.7: Φυσικοχημικές ιδιότητες υλικού τροφοδοσίας και σύσταση μίγματος του 3^{ου} κύκλου κομποστοποίησης.

Παράμετροι	Ιλύς	Κοπριά Βοοειδών	Φύλλα ζαχαρότευτλων	Ζεόλιθος	Μίγμα
Φυσικοχημικές ιδιότητες					
Υγρασία (% wb)	68.70 (2.04)	7.44 (3.24)	47.90 (1.54)	-	53.24 (1.63)
Ξηρή Ουσία (% wb)	31.30 (2.04)	92.56 (3.24)	52.10 (1.54)	-	46.76 (1.63)
pH	6.50 (0.03)	9.20 (0.04)	7.10 (0.10)	-	6.87 (0.01)
TOC (% dm)	28.15 (0.71)	45.43 (1.12)	56.60 (2.21)	-	40.38 (2.82)
N (% dm)	2.82 (0.21)	3.37 (0.15)	3.48 (0.36)	-	2.65 (0.21)
C/N	10.00 (0.06)	13.48 (0.52)	16.26 (0.89)	-	15.24 (0.61)
P (P ₂ O ₅ % dm)	1.07 (0.10)	0.56 (0.10)	0.26 (0.07)	-	0.56 (0.09)
K (K ₂ O % dm)	0.85 (0.10)	3.75 (0.35)	3.59 (0.25)	-	2.38 (0.20)
Ca (CaO % dm)	4.25 (1.01)	6.92 (1.62)	3.62 (0.83)	-	4.41 (0.95)
Mg (MgO % dm)	2.09 (0.31)	1.26 (0.11)	1.55 (0.03)	-	1.52 (0.12)
Cd (mg kg ⁻¹ dm)	1.17 (0.06)	0.79 (0.15)	0.10 (0.03)	-	0.58 (0.10)
Cr (mg kg ⁻¹ dm)	21.63 (1.61)	13.84 (1.20)	0.81 (0.08)	-	10.69 (0.86)
Cu (mg kg ⁻¹ dm)	175.31 (8.12)	24.66 (2.55)	13.41 (2.16)	-	67.40 (6.55)
Ni (mg kg ⁻¹ dm)	31.46 (4.16)	16.09 (1.12)	1.32 (0.01)	-	15.20 (0.96)
Pb (mg kg ⁻¹ dm)	91.67 (8.87)	2.18 (0.29)	0.38 (0.06)	-	29.84 (3.71)
Zn (mg kg ⁻¹ dm)	225.55 (12.95)	45.47 (6.41)	36.58 (8.22)	-	98.43 (13.03)
Σύνθεση υποστρώματος					
Ποσότητες (kg)	700	180	450	50	1380
Αναλογία (% wb)	50.72	13.04	32.61	3.62	100
Ξηρή ουσία (kg)	219.10	166.61	234.45	50.00	645.29
Αναλογία (% dm)	32.69	24.86	34.98	7.46	100
Υγρασία (kg)	480.9	13.39	215.55	0	734.71

Η ιλύς χαρακτηρίζεται από υψηλή περιεχόμενη υγρασία, ίση με 68.70%, ενώ στα υπόλοιπα επιλεγμένα οργανικά απόβλητα τα επίπεδα της υγρασίας παρουσιάζονται χαμηλότερα και ίσα με 47.90 και 7.44% για τα φύλλα των ζαχαρότευτλων και την αεροξηραμένη κοπριά βοοειδών αντίστοιχα. Το pH της ιλύος και των υπολειμμάτων ζαχαρότευτλων κυμαίνεται σε σχετικά ουδέτερες τιμές ενώ η κοπριά χαρακτηρίζεται από υψηλό pH (pH=9.2). Αναφορικά με την περιεκτικότητα σε ολικό οργανικό άνθρακα τα φύλλα ζαχαρότευτλων έχουν την υψηλότερη τιμή με 56.60% dm, ενώ ακολουθούν η κοπριά και η ιλύς με 45.43 και 28.15% dm αντίστοιχα. Σε όλα τα υλικά τροφοδοσίας η περιεκτικότητα σε άζωτο είναι υψηλή αναλογικά με τον περιεχόμενο άνθρακα, διαμορφώνοντας χαμηλούς λόγους C/N ίσους με 10.00, 13.48 και 16.26 για την ιλύ, την κοπριά και τα φύλλα ζαχαρότευτλων αντίστοιχα. Δεδομένου των ποσοτήτων και των αναλογιών άνθρακα αζώτου αλλά και των υπόλοιπων μακροστοιχείων, τα βιοαποδομήσιμα στερεά απόβλητα εμπεριέχουν επαρκή θρεπτικά στοιχεία και δεν

αποτελούν περιοριστικό παράγοντα για τη διεξαγωγή της κομποστοποίησης (Diaz and Savage, 2007a). Επιπλέον, η συγκέντρωση των βαρέων μετάλλων είναι περιορισμένη σε όλες τις εξεταζόμενες ροές οργανικών αποβλήτων και σε συμφωνία με τα ανώτερα επιτρεπτά όρια για την αερόβια βιολογική επεξεργασία τους (Πίνακας 6.3).

Όπως αναφέρθηκε το υλικό τροφοδοσίας του 3^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης αποτελείται από ιλύ προερχόμενη από ΜΕΛ (700 kg wb) που εξυπηρετεί μικρές κοινότητες και δήμους γύρω από την αστική περιοχή της El Jadida στο Μαρόκο, καθώς και από γεωργικά και κτηνοτροφικά απόβλητα, όπως φύλλα ζαχαρότευτλων (450 kg wb) και μη σταθεροποιημένη κοπριά βοοειδών (180 kg wb), τα οποία προέρχονται από γεωργικές και κτηνοτροφικές δραστηριότητες των γύρω περιοχών. Σημαντική διαφοροποίηση του 3^{ου} πειραματικού κύκλου ως προς τη σύσταση του μίγματος τροφοδοσίας στο βιοαντιδραστήρα αποτελεί η προσθήκη φυσικού ζεόλιθου – κλινοπτιλόλιθου (50 kg wb). Η σύνθεση των υλικών και τα χαρακτηριστικά του μίγματος τροφοδοσίας του 3^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης (1380 kg wb) παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.7. Όπως προκύπτει από τη σύσταση του μίγματος των οργανικών αποβλήτων η περιεχόμενη υγρασία είναι σχετικά χαμηλή και ίση με 53.24%. Για το λόγο αυτό γίνεται προσθήκη νερού, 170kg, διαμορφώνοντας την υγρασία στο αρχικό υπόστρωμα στο 60.20% ενώ το συνολικό βάρος ανέρχεται στα 1550kg. Επιπλέον, ο περιεχόμενος οργανικός άνθρακας του υποστρώματος διαμορφώνεται στο 40.38% dm, το άζωτο στο 2.65% dm και ο λόγος C/N στο 15.24.

Η ιλύς αποτελεί το βασικό προς επεξεργασία οργανικό υπόστρωμα, όπως και στους προηγούμενους πειραματικούς κύκλους. Η χρήση των υπολειμμάτων ζαχαρότευτλων αποσκοπεί στη δομική ενίσχυση του μίγματος διαμορφώνοντας καλύτερες συνθήκες για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών που απαιτούνται για την αερόβια βιολογική επεξεργασία των αποβλήτων ενώ η προσθήκη μη σταθεροποιημένης κοπριάς έγκειται στον εμπλουτισμό της μικροβιακής βιομάζας του υποστρώματος.

Η χρήση ζεόλιθου ως πρόσθετο υλικό κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης δύναται να παρέχει πολλαπλά οφέλη. Οι ζεόλιθοι είναι κρυσταλλικά αργιλοπυριτικά ορυκτά που εμφανίζονται ως τρισδιάστατα πλέγματα SiO₄ και AlO₄ τετράεδρων διαθέτοντας μια ανοιχτή δομή που αποτελείται από κοιλότητες, με μοριακές διαστάσεις μεταξύ 3 και 10 Å. Λόγω των ευνοϊκών προσροφητικών και ιοντοεναλλακτικών τους ιδιοτήτων χρησιμοποιούνται σε διάφορες βιομηχανικές και περιβαλλοντικές εφαρμογές. Η πορώδης μικρο-δομή των ζεόλιθων, καθιστά εφικτή την προσρόφηση διαφόρων στοιχείων καθώς η διάμετρος των καναλιών εισροής, τους επιτρέπει να ενεργούν ως μοριακό κόσκινο (Mumpton, 1999). Σύμφωνα με τους Sprynskyy (2009), Kosobucki et al. (2008), Turan (2008), Zorpas and Loizidou (2008) και Venglovsky et al. (2005) η χρήση ζεόλιθου κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης ενδέχεται να δεσμεύσει αποτελεσματικά κυρίως τοξικά μεταλλοκατιόντα (π.χ. βαρέα μέταλλα) αποτρέποντας την παρουσία αυτών στο υδάτινο μέρος του υποστρώματος απ' όπου προσλαμβάνονται ευκολότερα από τους μικροοργανισμούς. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται η τοξικότητα του υποστρώματος που πολλές φορές παρουσιάζεται σε ροές βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων οι οποίες χρησιμοποιούνται ως υλικό τροφοδοσίας στην κομποστοποίηση (π.χ. ιλύ από ΜΕΛ). Επιπλέον σύμφωνα με τους Villaseñor et al. (2011), Al-Jabi et al. (2008), Turan και Ergun (2007), Liu and Lo (2001), Bernal et al. (1993) και Witter and Lopez-Real (1988) ο ζεόλιθος δύναται να λειτουργήσει ως προσροφητικό μέσο της αμμωνίας και των αμμωνιακών ιόντων του οργανικού υποστρώματος κατά τη διεργασία

της κομποστοποίησης, μειώνοντας το σύνολο των απωλειών αζώτου. Τέλος, η χρήση του ζεόλιθου ενδέχεται να επιδράσει και στα φυσικά χαρακτηριστικά του υποστρώματος με την απορρόφηση νερού που εμπεριέχεται στο υπόστρωμα (Stylianou et al., 2008; Zorpas et al., 2000a; Knowlton and White, 1981) καθώς και με τις διογκωτικές του ιδιότητες ενισχύοντας το πορώδες του οργανικού μίγματος και βελτιώνοντας τις διεργασίες της κομποστοποίησης και κατ' επέκταση τη βιοαποδόμηση της οργανικής ουσίας (Turan and Ergun, 2008; Zorpas et al., 2000b).

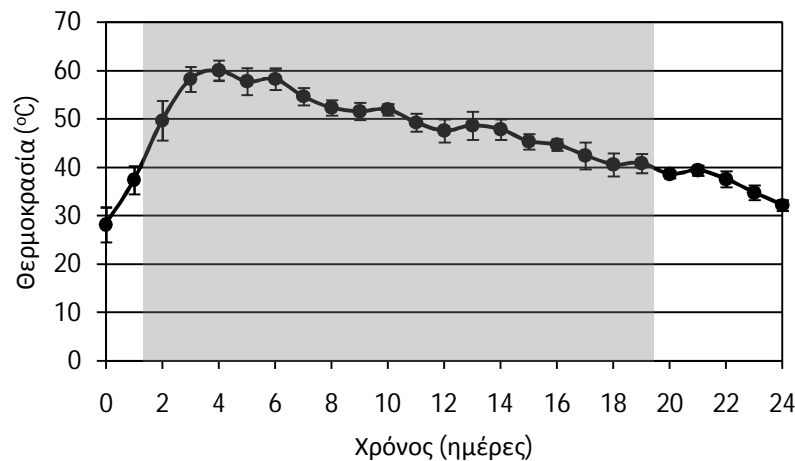
Ο ζεόλιθος - κλινοπτιλόλιθος που χρησιμοποιήθηκε στον 3^ο πειραματικό κύκλο κομποστοποίησης είναι ελληνικός φυσικός ζεόλιθος της εταιρείας S & B Industrial Minerals S.A. με εύρος κοκκομετρίας μεταξύ 3-5mm. Τα χαρακτηριστικά του ζεόλιθου αναφέρονται αναλυτικότερα στον **Πίνακα 6.8** απ' όπου προκύπτει ότι έχει δυνατότητα εναλλαγής των ιόντων (Na, K, Ca κλπ). Η θεωρητική ιοντοεναλλακτική ικανότητα του ζεόλιθου είναι 2.3 meq/g και εμφανίζει μεγάλη εκλεκτικότητα στα αμμωνιακά ιόντα και σε ορισμένα κατιόντα μετάλλων (Langella et al., 2000). Η ποσότητα που χρησιμοποιήθηκε, 50kg, αντιστοιχεί περίπου στο 7.5% επί της ξηρής ουσίας του υποστρώματος.

Πίνακας 6.8: Χημική σύσταση του ζεόλιθου/κλινοπτιλόλιθου (Stylianou et al., 2007)

Οξείδια	(% w/w)
SiO ₂	60.715
Al ₂ O ₃	12.035
Na ₂ O	6.975
K ₂ O	0.490
CaO	1.505
MgO	0.129
FeO	1.398
H ₂ O	14.455

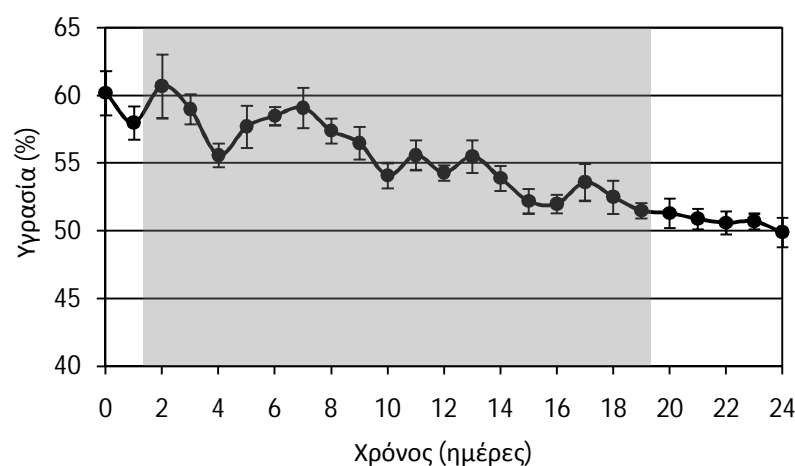
6.2.3.2. Έλεγχος της διεργασίας της κομποστοποίησης

Η παραγωγή θερμότητας κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης αποτελεί παραπροϊόν της μικροβιακής διάσπασης του οργανικού κλάσματος. Η θερμοκρασία αποτελεί καθοριστική παράμετρο στις βιολογικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο υπόστρωμα και παίζει έναν εκλεκτικό ρόλο στην ανάπτυξη και τη διαδοχή των μικροοργανισμών (Mustin, 1987). Στο **Διάγραμμα 6.17** παρουσιάζεται η εξέλιξη της θερμοκρασίας του υποστρώματος κατά τη διεργασία του 3^{ου} κύκλου κομποστοποίησης. Το υπόστρωμα περνάει από το πρώτο μεσόφιλο στο θερμόφιλο στάδιο μετά την πρώτη ημέρα λειτουργίας του συστήματος. Η μικροβιακή δραστηριότητα είναι άμεση από τις πρώτες ημέρες της κομποστοποίησης εκλύοντας σημαντικά ποσά ενέργειας τα οποία συσσωρεύονται καταγράφοντας τη μέγιστη τιμή θερμοκρασίας την 4^η ημέρα ίση με 60.1°C. Υψηλές θερμοκρασίες, μεγαλύτερες των 50°C, διατηρούνται στον βιοαντιδραστήρα για εννέα συναπτές ημέρες (2^η έως 10^η ημέρα). Η μείωση της θερμοκρασίας και η μετάβαση σε μια δεύτερη μεσόφιλη φάση πραγματοποιείται την 20^η ημέρα λειτουργίας. Στο τελευταίο στάδιο της διεργασίας συνεχίζεται η φθίνουσα πορεία της θερμοκρασίας προσεγγίζοντας τα θερμοκρασιακά επίπεδα του περιβάλλοντος, ενδεικτικό του χαμηλού ρυθμού βιοξείδωσης της οργανικής ουσίας.



Διάγραμμα 6.17: Εξέλιξη της θερμοκρασίας (°C) κατά τη διάρκεια του 3^{ου} κύκλου κομποστοποίησης με τη σκιαγραφημένη περιοχή να αφορά στη θερμοφιλή φάση της διεργασίας.

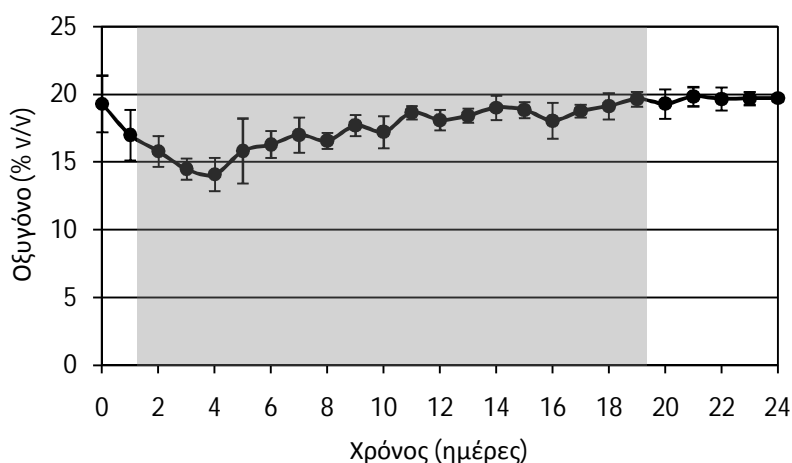
Στο **Διάγραμμα 6.18** απεικονίζεται η μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας του υποστρώματος κατά τη διάρκεια του 3^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης. Το επίπεδο της αρχικής υγρασίας στο υπόστρωμα κατά την έναρξη της διεργασίας είναι στο 60.2% το οποίο διαμορφώθηκε ύστερα από την προσθήκη κατάλληλης ποσότητας νερού στο αρχικό μίγμα των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων. Η παρουσία εύκολα διαθέσιμης οργανικής ουσίας σε συνδυασμό με την επαρκή ανάδευση και παροχή οξυγόνου στο βιοαντιδραστήρα διαμορφώνουν ευνοϊκές συνθήκες για την άμεση αύξηση της θερμοκρασίας και τη συνεπακόλουθη μείωση της περιεχόμενης υγρασίας κυρίως λόγω εξάτμισης αλλά και λόγω της απομάκρυνσης μέρους των στραγγισμάτων κατά τα πρώτα στάδια της διεργασίας. Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών η παροχή νερού στο σύστημα κρίθηκε απαραίτητη κατά τη θερμοφιλή φάση της κομποστοποίησης διατηρώντας με τον τρόπο αυτό την περιεχόμενη υγρασία σε επίπεδα από 50 έως 60%. Προς το τέλος της διεργασίας (2^η μεσόφιλη φάση) η ύγρανση του υποστρώματος διακόπτεται με αποτέλεσμα τη φθίνουσα τάση της υγρασίας με στόχο τη μείωση τόσο του όγκου και της μάζας του υποστρώματος όσο και της μικροβιακής δραστηριότητας.



Διάγραμμα 6.18: Εξέλιξη της υγρασίας (% wb) κατά τη διάρκεια του 3^{ου} κύκλου κομποστοποίησης με τη σκιαγραφημένη περιοχή να αφορά στη θερμοφιλή φάση της διεργασίας.

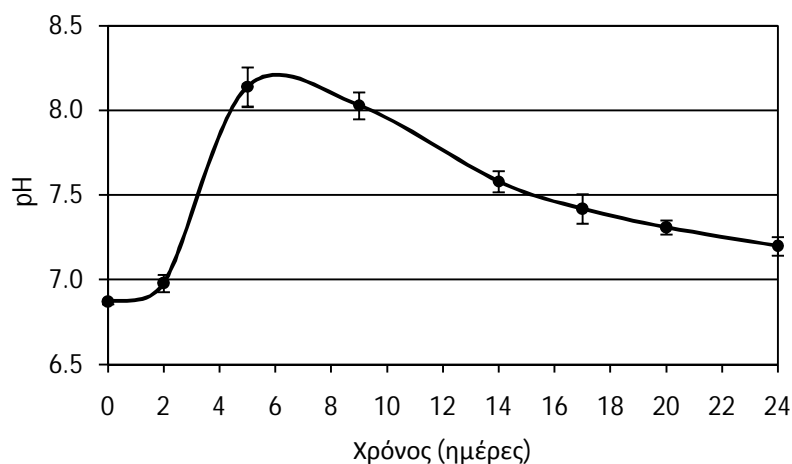
Όπως έχει προαναφερθεί η παραγωγή ενέργειας υπό μορφή θερμότητας και η απαίτηση οξυγόνου είναι μέγιστες στα πρώτα στάδια της διεργασίας της κομποστοποίησης. Λαμβάνοντας υπόψη τα **Διαγράμματα 6.17** και **6.19** επιβεβαιώνεται το γεγονός ότι κατά

τη θερμόφιλη φάση η ανάγκη σε παροχή οξυγόνου είναι μεγαλύτερη προκειμένου να διατηρηθούν οι αερόβιες συνθήκες καθώς και για να ρυθμιστεί η θερμοκρασία σε επίπεδα βιώσιμα για τους αερόβιους μικροοργανισμούς. Η περιεκτικότητα του ατμοσφαιρικού οξυγόνου στο υπόστρωμα λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες του 14.0% v/v καθόλη τη διάρκεια του 3^{ου} κύκλου κομποστοποίησης (**Διάγραμμα 6.19**). Όπως είναι αναμενόμενο η μεγαλύτερη κατανάλωση οξυγόνου επιτυγχάνεται τη 2^η έως τη 10^η ημέρα λειτουργίας του συστήματος κομποστοποίησης όπου παρουσιάζεται η εντονότερη μικροβιακή δραστηριότητα και ο υψηλότερος ρυθμός κατανάλωσης οξυγόνου για τις βιοξειδωτικές λειτουργίες διάσπασης του οργανικού υλικού. Η υψηλή περιεκτικότητα σε οξυγόνο υποδηλώνει τη διαμόρφωση κατάλληλων φυσικών συνθηκών στο υπόστρωμα οι οποίες συντελούν στην αποτελεσματικότερη διάχυση του αέρα στην οργανική μάζα. Προς το τέλος της διεργασίας η περιεκτικότητα σε οξυγόνο είναι υψηλή (>19% v/v), ενδεικτικό του χαμηλότερου ρυθμού βιοαποδόμησης της οργανικής ουσίας και της διαμόρφωσης πιο σταθερών συνθηκών στο υπόστρωμα καθώς οι άμεσα διαθέσιμες οργανικές ενώσεις έχουν αφομοιωθεί.



Διάγραμμα 6.19: Εξέλιξη του οξυγόνου (% v/v) κατά τη διάρκεια του 3^{ου} κύκλου κομποστοποίησης με τη σκιαγραφημένη περιοχή να αφορά στη θερμόφιλη φάση της διεργασίας.

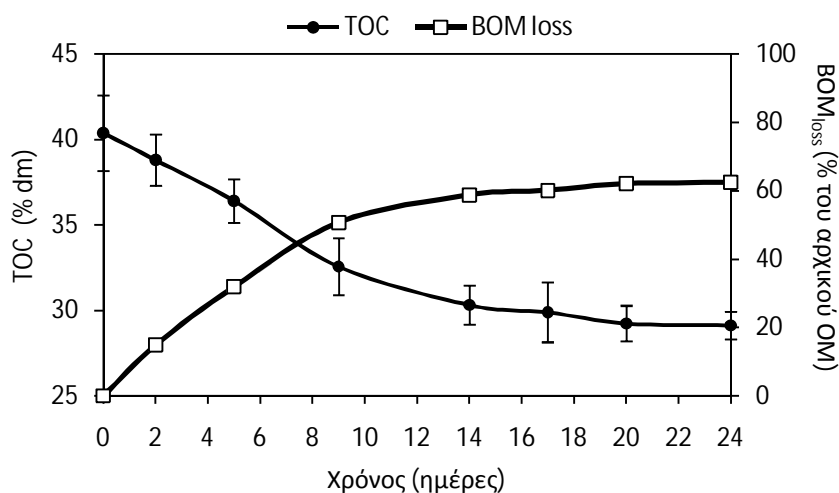
Το pH στο αρχικό υπόστρωμα είναι 6.87 και διατηρείται σε ελαφρώς όξινο περιβάλλον τις πρώτες ημέρες λόγω του σχηματισμού οργανικών οξέων κατά τη βιοαποδόμηση της άμεσα διαθέσιμης οργανικής ουσίας (π.χ. σάκχαρα) όπως φαίνεται στο **Διάγραμμα 6.20**.



Διάγραμμα 6.20: Εξέλιξη του pH κατά τη διάρκεια του 3^{ου} κύκλου κομποστοποίησης

Στη συνέχεια παρουσιάζεται αύξηση του pH λόγω της κατανάλωσης των οξέων αλλά και εξαιτίας του σχηματισμού αμμωνιακών που προκύπτουν από τη διάσπαση των οργανικών αζωτούχων ενώσεων που περιέχονται στο υπόστρωμα (π.χ. πρωτεΐνες, πεπτίδια, ουρία) (Peigné and Girardin, 2004). Το pH φτάνει στη μέγιστη τιμή του την 5^η ημέρα λειτουργίας ίση με 8.14. Στη συνέχεια με τη μείωση των αμμωνιακών και της θερμοκρασίας και τη δράση των νιτροποιητικών βακτηρίων, το pH παρουσιάζει φθίνουσα πορεία προσεγγίζοντας ουδέτερες τιμές (7.2 την 24^η ημέρα).

Στο **Διάγραμμα 6.21** απεικονίζεται η εξέλιξη του ολικού οργανικού άνθρακα στο υπόστρωμα κατά τη διάρκεια του 3^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης. Διαπιστώνεται η σταθερή μείωση στην περιεκτικότητα του οργανικού άνθρακα η οποία είναι εντονότερη τις δύο πρώτες εβδομάδες της διεργασίας όπου και καταγράφονται οι υψηλότερες θερμοκρασίες και κατ' επέκταση η εντονότερη μικροβιακή δραστηριότητα. Επομένως, ο οργανικός άνθρακας στο υπόστρωμα με αρχική τιμή ίση με 40.38% dm μειώνεται στο 29.12% dm τη 24^η ημέρα λόγω των έντονων βιοξειδωτικών αντιδράσεων κατά τη θερμοφιλή φάση της διεργασίας.

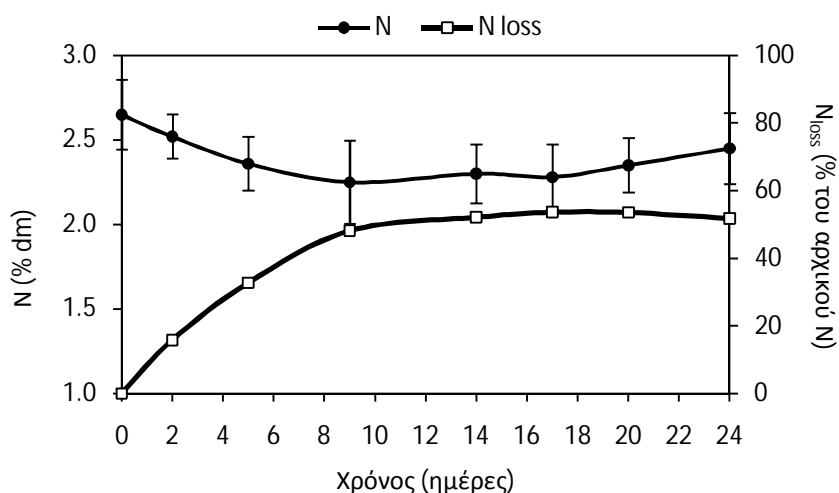


Διάγραμμα 6.21: Μεταβολή του ολικού οργανικού άνθρακα και εξέλιξη των απωλειών οργανικής ουσίας κατά τη διάρκεια του 3^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης

Τις υπόλοιπες ημέρες παραμονής του υποστρώματος στο βιοαντιδραστήρα ο οργανικός άνθρακας αφομοιώνεται με μικρότερο ρυθμό από τους μικροοργανισμούς ενδεικτικό της μείωσης των άμεσα διαθέσιμων οργανικών ενώσεων, με τον οργανικό άνθρακα να λαμβάνει τιμή ίση με 29.12% dm την 24^η ημέρα λειτουργίας. Η έντονη μικροβιακή δραστηριότητα κατά τη θερμοφιλή φάση της κομποστοποίησης αποτυπώνεται και από την απώλεια της οργανικής ουσίας του υποστρώματος (BOM_{loss}), όπως φαίνεται στο **Διάγραμμα 6.21**. Κατά τη διάρκεια της φάσης αυτής σημειώνεται περίπου το 75.6% των συνολικών απωλειών της οργανικής ουσίας. Αντίστοιχα το σύνολο των απωλειών της οργανικής ουσίας στο τέλος της διεργασίας στον βιοαντιδραστήρα, ανέρχονται στο 62.4% της αρχικής οργανικής ουσίας.

Στο **Διάγραμμα 6.22** παρουσιάζεται η εξέλιξη της περιεκτικότητας του ολικού αζώτου κατά τη διεργασία του 3^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης. Η αρχική περιεκτικότητα του αζώτου στο υπόστρωμα ύστερα από την ανάμιξη των διαφορετικών οργανικών αποβλήτων και την προσθήκη ζεόλιθου, διαμορφώνεται στο 2.65% dm. Τις εννέα πρώτες ημέρες της διεργασίας παρατηρείται ότι το ολικό άζωτο μειώνεται λόγω των απωλειών αζώτου κατά τη διάσπαση των αζωτούχων ενώσεων που εμπεριέχονται

στην οργανική ουσία. Οι απώλειες αυτές αποτελούν το 92.9% των συνολικών απωλειών του αζώτου ενώ αντίστοιχα το σύνολο των απωλειών του αζώτου στο τέλος της διεργασίας στον βιοαντιδραστήρα ανέρχονται στο 51.8% του αρχικού αζώτου.

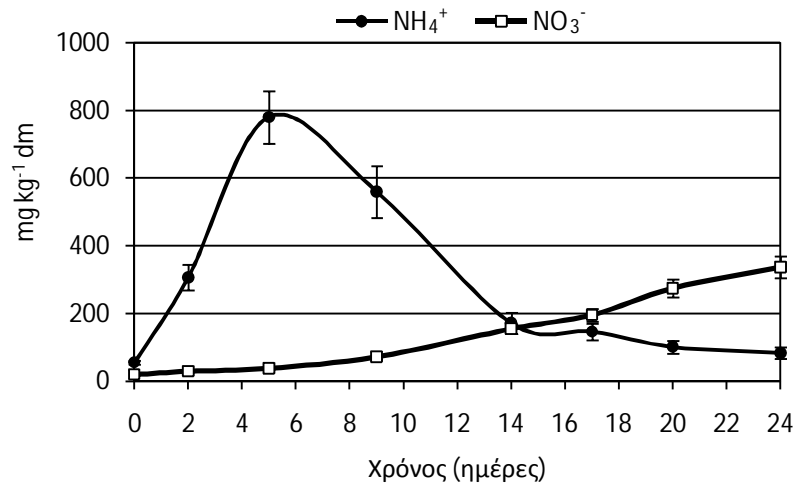


Διάγραμμα 6.22: Μεταβολή του ολικού αζώτου και εξέλιξη των απωλειών αζώτου κατά τη διάρκεια του 3^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης

Επομένως, το μεγαλύτερο μέρος των απωλειών του αζώτου φαίνεται να παρουσιάζεται κατά τα αρχικά στάδια της κομποστοποίησης οφειλόμενο τόσο στη χαμηλή αρχική αναλογία C/N (15.2) η οποία διαμορφώνει περίσσεια αζώτου έναντι του διαθέσιμου άνθρακα στο υπόστρωμα, όσο και στις συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών και αλκαλικού pH. Προς το τέλος της διεργασίας η περιεκτικότητα του αζώτου εμφανίζει μικρή αύξηση λαμβάνοντας τιμή ίση με 2.38% dm την 24^η ημέρα λειτουργίας του συστήματος. Η αύξηση αυτή ενδεχομένως να οφείλεται τόσο στη δράση αζωτοδεσμευτικών βακτηρίων, δεσμεύοντας μέρος των απωλειών του αζώτου, όσο και στην αποδέσμευση μέρους των αμμωνιακών από το ζεόλιθο και τη μετατροπή τους σε νιτρικά⁽¹²⁾.

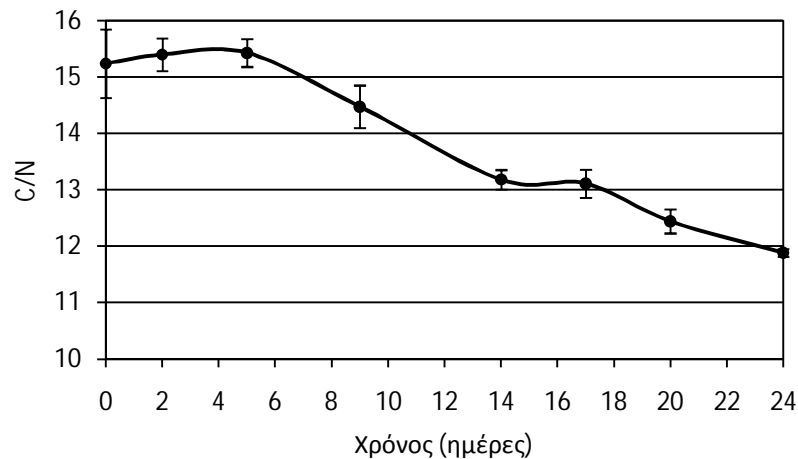
Η συγκέντρωση των αμμωνιακών αυξάνεται τις πρώτες ημέρες της διεργασίας (**Διάγραμμα 6.23**), με μέγιστη τιμή στα 780.42 mg kg⁻¹ την 5^η ημέρα ενώ αντίστοιχα η συγκέντρωση των νιτρικών περιορίζεται αποκλειστικά στη δράση των ετερότροφων νιτροποιητικών μικροοργανισμών (38.74 mg kg⁻¹ την 5^η ημέρα) λόγω των συνθηκών υψηλής θερμοκρασίας και αλκαλικού pH που αποτρέπουν τη διεργασία της αυτότροφης νιτροποίησης. Από την 5^η ημέρα και έπειτα παρουσιάζεται μείωση στη συγκέντρωση των αμμωνιακών η οποία οφείλεται στην πτητικότητα της αμμωνίας, την εκχύλιση των αμμωνιακών στα στραγγίσματα, στην προσρόφηση αμμωνιακών στο ζεόλιθο καθώς και στις διεργασίες της νιτροποίησης και την επακόλουθη παραγωγή νιτρικών. Προς το τέλος της διεργασίας οι τιμές των αμμωνιακών εμφανίζονται μικρότερες των 100mg kg⁻¹ ενώ αυτές των νιτρικών προσεγγίζουν τα 340 mg kg⁻¹. Η αύξηση των νιτρικών οφείλεται στη διεργασία της νιτροποίησης των αμμωνιακών που εμπεριέχονται στο οργανικό υπόστρωμα ενώ προς το τέλος η περαιτέρω αύξηση των νιτρικών ενδέχεται να πραγματοποιείται λόγω της αποδέσμευσης/εκρόφησης μέρους των αμμωνιακών από τον ζεόλιθο και τη συνεπακόλουθη οξείδωσή τους.

⁽¹²⁾ Στις αναλύσεις του υποστρώματος έγινε κοσκίνιση και απομάκρυνση του ζεόλιθου καθότι το εύρος κοκκομετρίας του ορυκτού είναι μεταξύ 3-5mm και ο διαχωρισμός του είναι εφικτός. Επομένως στον προσδιορισμό του αζώτου και των ανόργανων μορφών του στο υπόστρωμα δεν περιλαμβάνεται η ποσότητα η οποία δεσμεύεται από τον ζεόλιθο.



Διάγραμμα 6.23: Μεταβολή των αμμωνιακών και των νιτρικών (mg kg⁻¹ dm) κατά τη διάρκεια του 3^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης

Στο **Διάγραμμα 6.24** παρουσιάζεται η εξέλιξη της αναλογίας C/N του υποστρώματος στον 3^ο πειραματικό κύκλο η οποία κατά την ανάμιξη των διαφορετικών οργανικών υποστρωμάτων λαμβάνει τιμή ίση με 15.24. Η διαμόρφωση σχετικά χαμηλής αρχικής αναλογίας οφείλεται στην υψηλή περιεκτικότητα σε ολικό άζωτο των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων τα οποία επιλέχθηκαν για τη σύνθεση του οργανικού μίγματος. Ο λόγος C/N παραμένει σταθερός για τις πέντε πρώτες ημέρες της διεργασίας αντικατοπτρίζοντας τις ταυτόχρονες απώλειες άνθρακα και αζώτου στο υπόστρωμα. Από την 5^η ημέρα λειτουργίας και έπειτα η αναλογία C/N μειώνεται λόγω της σημαντικής μείωσης του οργανικού άνθρακα ενώ στο τέλος της διεργασίας (24^η ημέρα) η σχέση C/N διαμορφώνεται στο 11.9 κυρίως λόγω της ανάκτησης μέρους του αζώτου μέσω της δράσης των αζωτοβακτηρίων και της αποδέσμευσης αμμωνιακών από το ζεόλιθο.



Διάγραμμα 6.24: Μεταβολή του λόγου C/N κατά τη διάρκεια του 3^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης

Οι ιδιότητες των παραγόμενων στραγγισμάτων κατά τον 3^ο πειραματικό κύκλο κομποστοποίησης συνοψίζονται στον **Πίνακα 6.9**. Το pH αυξάνεται ελαφρώς τις πρώτες ημέρες της διεργασίας από 7.8 την 3^η ημέρα σε 8.0 την 7^η ημέρα ενώ μετέπειτα παρατηρείται σταδιακή μείωσή του προς ουδέτερες τιμές (7.2 την 20^η ημέρα). Η αρχική τιμή του BOD₅ στα στραγγίσματα είναι υψηλή και ίση με 56.9 g l⁻¹ ενώ κατά τα εξελικτικά στάδια της διεργασίας της κομποστοποίησης το BOD₅ παρουσιάζει σημαντική μείωση

καταγράφοντας τιμή ίση με 11.6 g l^{-1} την 20^η ημέρα λειτουργίας, με το BOD_5 να μειώνεται κατά 79.7% σε σχέση με το αρχικό. Η φθίνουσα πορεία του BOD_5 οφείλεται στη μετατροπή των βιοαποδομήσιμων οργανικών ενώσεων σε CO_2 κατά την αερόβια επεξεργασία του υποστρώματος με αποτέλεσμα το οργανικό φορτίο των στραγγισμάτων να μειώνεται με την πάροδο του χρόνου. Η συγκέντρωση των αμμωνιακών και των νιτρικών στα στραγγίσματα ακολουθεί την ίδια πορεία με αυτή του υποστρώματος. Πιο αναλυτικά τα αμμωνιακά εμφανίζουν σημαντική αύξηση κατά τα πρώτα στάδια της κομποστοποίησης με τη συγκέντρωση την 3^η ημέρα στα 50.47 mg l^{-1} να αυξάνεται την 7^η ημέρα στα 412.35 mg l^{-1} , ενώ μετέπειτα σημειώνεται σημαντική μείωση καταλήγοντας στα 92.57 mg l^{-1} την 20^η ημέρα λειτουργίας του συστήματος. Η συγκέντρωση των νιτρικών στα στραγγίσματα αυξάνεται με την εξέλιξη της διεργασίας της κομποστοποίησης παρουσιάζοντας εντονότερο ρυθμό αύξησης μετά την 7^η ημέρα λειτουργίας με μέγιστη τιμή αυτή των 259.90 mg l^{-1} την 20^η ημέρα. Τα επίπεδα των βαρέων μετάλλων στα στραγγίσματα είναι χαμηλά για όλα τα εξεταζόμενα μέταλλα καθόλη τη διάρκεια της διεργασίας και σε πολλές περιπτώσεις είναι χαμηλότερα από τα όρια ανίχνευσης. Τέλος το χρώμα των στραγγισμάτων όπως και στους προγενέστερους πειραματικούς κύκλους παρουσιάζεται αρχικά απαλό μαύρο ενώ κατά τα εξελικτικά στάδια της διεργασίας το χρώμα αποκτά πιο σκούρα απόχρωση.

Πίνακας 6.9: Χαρακτηριστικά των παραγόμενων στραγγισμάτων κατά τον 3^ο κύκλο κομποστοποίησης

Παράμετρος/Χρόνος	3 ^η ημέρα	7 ^η ημέρα	14 ^η ημέρα	20 ^η ημέρα
pH	7.8 (0.03)	8.0 (0.08)	7.6 (0.06)	7.2 (0.04)
BOD_5 (mg l^{-1})	56905 (7234)	35793 (4351)	21805 (2582)	11554 (1356)
NH_4^+ (mg l^{-1})	50.47 (4.04)	412.35 (16.49)	164.70 (6.59)	92.57 (3.70)
NO_3^- (mg l^{-1})	24.72 (1.61)	63.49 (2.92)	140.58 (9.56)	259.90 (20.79)
Cd (mg l^{-1})	0.002 (0.0)	<0.002	<0.002	<0.002
Cr (mg l^{-1})	0.02 (0.0)	<0.02	<0.02	<0.02
Cu (mg l^{-1})	0.199 (0.06)	0.208 (0.06)	0.197 (0.06)	0.202 (0.06)
Ni (mg l^{-1})	0.045 (0.01)	0.033 (0.01)	0.031 (0.01)	0.037 (0.01)
Pb (mg l^{-1})	0.058 (0.0)	<0.05	<0.05	0.051 (0.0)
Zn (mg l^{-1})	0.298 (0.04)	0.302 (0.04)	0.323 (0.04)	0.357 (0.05)

6.2.4. Τέταρτη εφαρμογή

6.2.4.1. Χαρακτηρισμός πρώτης ύλης και σύσταση υλικού τροφοδοσίας

Στον 4^ο πειραματικό κύκλο κομποστοποίησης εξετάστηκε η δυνατότητα αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας υλός σε συνδυασμό με τη χρήση διογκωμένου περλίτη ως πρόσθετο. Η υλός, όπως και στους προηγούμενους πειραματικούς κύκλους, προέρχεται από ΜΕΛ η οποία εξυπηρετεί μικρούς δήμους και κοινότητες στην ευρύτερη περιοχή της πόλης El Jadida στο Μαρόκο. Στον 4^ο πειραματικό κύκλο η υλός αποτέλεσε τη μοναδική ροή οργανικών αποβλήτων με την οποία τροφοδοτήθηκε ο βιοαντιδραστήρας. Προκειμένου να αποφευχθεί ενδεχόμενη δυσλειτουργία του συστήματος κρίθηκε απαραίτητη η προσθήκη ανόργανων υλικών, όπως ο περλίτης, για την ενίσχυση των φυσικών χαρακτηριστικών της υλός.

Ο περλίτης είναι ένα ηφαιστειογενές υαλώδες αργιλοπυριτικό ορυκτό. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του περλίτη, το οποίο τον διαχωρίζει από τα υπόλοιπα υαλώδη ηφαιστειακά ορυκτά, είναι η δυνατότητα διόγκωσής του με θερμική επεξεργασία (900-1100°C) κατά την οποία διαστέλλεται κατά 15-20 φορές του αρχικού του όγκου (Gunning, 1994) με αποτέλεσμα η τελική του πυκνότητα (30-150 kg m⁻³) να είναι πολύ χαμηλή. Η διόγκωση του περλίτη οφείλεται στην παρουσία νερού, 2-5% του ακατέργαστου ορυκτού (Mladenovic et al., 2004), το οποίο καθώς εξατμίζεται διαμορφώνει πολλαπλά εσωτερικά κύτταρα και κοιλότητες αυξάνοντας σημαντικά την ενεργή καλυπτόμενη επιφάνειά του. Η ιδιαίτερη αυτή δομή του διογκωμένου περλίτη τον καθιστά ως υλικό με φυσικές ιδιότητες που παρέχουν ποικιλία χρήσεων. Ορισμένες από τις χαρακτηριστικότερες ιδιότητές του περιλαμβάνουν τη δέσμευση/συγκράτηση μορίων νερού, τη διάχυση και κυκλοφορία του αέρα, τη χαμηλή πυκνότητα και τη συμπαγή δομική του σύσταση καθώς και τη χημική του ουδετερότητα (Perlite Institute, 2000). Ο περλίτης χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο ως κατασκευαστικό/δομικό υλικό ενώ σημαντική εφαρμογή εμφανίζεται να έχει στη γεωργία καθώς και στην βιομηχανία (πχ. ως πληρωτικό και μονωτικό υλικό) (Perlite Canada Inc, 1993). Έχει τη δυνατότητα προσρόφησης ουσιών χωρίς να τις επιμολύνει και για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές όπως είναι ο καθαρισμός οίνων, φρουτοποτών και σιροπιού. Επιπλέον, χρησιμοποιείται ως υλικό το οποίο υποβοηθάει τη διήθηση χωρίς να επιβαρύνει την ποιότητα του παραγόμενου διηθήματος (Malamis, 2009). Τα σωματίδια συσσωρεύονται στους κόκκους του περλίτη και δεν επιβαρύνουν το μέσο διήθησης. Το pH του κυμαίνεται από 6.5-8.0 και επομένως δεν παρεμποδίζει τη δράση των μικροοργανισμών. Αναφορικά με την γεωργική του χρήση ο περλίτης αξιοποιείται κυρίως σε κηπευτικές αλλά και σε αγροτικές εφαρμογές σε μίγματα με χώμα, τύρφη, κόμποστ ή άλλα υλικά διαμορφώνοντας κατάλληλο υπόστρωμα για την ανάπτυξη φυλλωδών και ανθοφόρων καλλωπιστικών και μη φυτών (Grace Construction Products, 2011). Επιπλέον, λόγω των προαναφερόμενων ιδιοτήτων του περλίτη, έχει γίνει εκτενής μελέτη της επίδρασής του σε καλλιέργειες με την ανάμιξή του με κόμποστ (Pascual et al., 2010; Pascual et al., 2009; Herrera et al., 2008; Zmora-Nahum et al., 2007; Amlinger et al., 2003). Παρ' όλα αυτά η χρήση του περλίτη ως πρόσθετο υλικό στη διεργασία της κομποστοποίησης είναι περιορισμένη στη διεθνή βιβλιογραφία και περιγράφεται μόνο από τους Turan and Ergun (2008).

Το πλεονέκτημα της χρήσης και της ανάμιξης διογκωμένου περλίτη με την ιλύ έγκειται στο γεγονός ότι τροποποιεί τις φυσικές ιδιότητες του υποστρώματος (π.χ. πορώδες) αυξάνοντας τον όγκο των διάκενων μεταξύ των σωματιδίων του οργανικού υλικού ενισχύοντας με αυτό τον τρόπο την κομποστοποίηση ενώ παράλληλα δεν εμπλέκεται στις βιοχημικές αντιδράσεις της διεργασίας λόγω των αδρανών χημικών του ιδιοτήτων. Στον **Πίνακα 6.10** παρουσιάζονται τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του διογκωμένου περλίτη, όπως αυτά καταγράφονται από την εταιρεία Περγίτες Αιγαίου Α.Ε. από όπου και προμηθεύτηκε, ενώ στον **Πίνακα 6.11** παρουσιάζονται οι ιδιότητες της ιλύος η οποία χρησιμοποιήθηκε για τη διεργασία του 4^{ου} πειραματικού κύκλου.

Πίνακας 6.10: Χαρακτηριστικά διογκωμένου περλίτη

Ιδιότητα		Χημική σύσταση	(% w/w)
Χρώμα	Λευκό	SiO ₂	73.20
Δείκτης διάθλασης	1.5	Al ₂ O ₃	13.50
Υγρασία (%)	0.5	K ₂ O	3.90
pH	6.5 - 8.0	Na ₂ O	3.35
Πυκνότητα (kg m ⁻³)	50	Fe ₂ O ₃	1.20
Κοκκομετρία (mm)	3-5	CaO	0.65
Σημείο εξευμενισμού (°C)	871-1093	MgO	0.30
Σημείο τήξης (°C)	1260-1343	Καθαρό Σύνολο	96.10
Ειδική θερμότητα (J (kg·K) ⁻¹)	387	Κρυσταλλικό Νερό	3.90
Θερμική αγωγιμότητα στους 75°F (24°C) (W m ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.04-0.06	Σύνολο	100

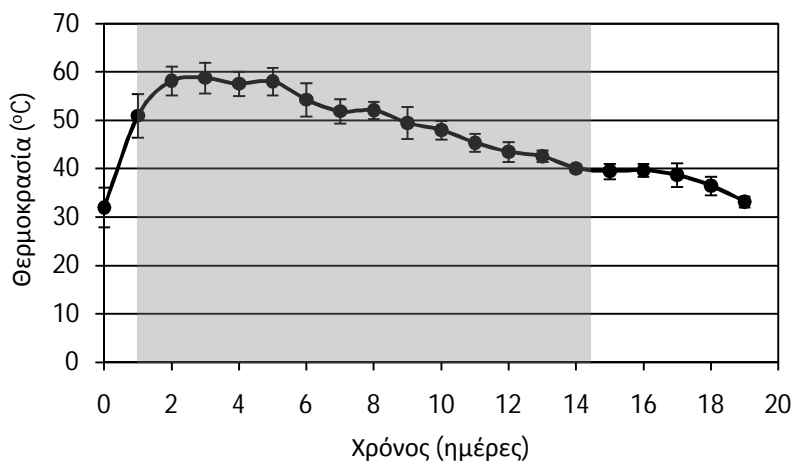
Σύμφωνα με τον **Πίνακα 6.11** η ιλύς έχει υψηλή περιεχόμενη υγρασία ίση με 78.55%. Ο ολικός οργανικός άνθρακας καταγράφηκε ίσος με 45.6% αλλά λόγω της υψηλής περιεκτικότητας της ιλύος σε άζωτο (5.81%) ο λόγος C/N διαμορφώνεται στο 7.85. Η παρουσία άνθρακα και αζώτου καθώς και των υπόλοιπων μακροστοιχείων όπως ο φώσφορος, το κάλιο, το ασβέστιο και το μαγνήσιο θεωρείται επαρκής για την ανάπτυξη της μικροβιακής δραστηριότητας και κατ'επέκταση για την επιτέλεση της διεργασίας της κομποστοποίησης (Diaz and Savage, 2007a). Επιπλέον, οι συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων στην ιλύ ικανοποιούν τα ανώτερα επιτρεπτά όρια για την αερόβια επεξεργασία της (**Πίνακας 6.3**). Η 4^η πειραματική εφαρμογή περιλαμβάνει την προσθήκη 500l (~25kg) διογκωμένου περλίτη και 1500kg ιλύος. Η σύνθεση του μίγματος ιλύος και περλίτη δεν τροποποιεί σημαντικά τα αρχικά χαρακτηριστικά της ιλύος διότι η κατά βάρος περιεκτικότητα του περλίτη είναι πολύ μικρότερη (1.64% wb) σε σχέση με αυτή της ιλύος. Επιπλέον, το προστιθέμενο ορυκτό δεν επηρεάζει τη χημική σύσταση του οργανικού υλικού δεδομένου ότι είναι χημικά αδρανές.

Πίνακας 6.11: Φυσικοχημικές ιδιότητες ιλύος για την εφαρμογή του 4^{ου} κύκλου κομποστοποίησης.

Παράμετρος	Ιλύς
Υγρασία (% wb)	78.55 (1.86)
Ξηρή Ουσία (% wb)	21.45 (1.86)
pH	6.36 (0.11)
TOC (% dm)	45.6 (2.32)
N (% dm)	5.81 (0.39)
C/N	7.85 (0.24)
P (P ₂ O ₅ % dm)	3.68 (0.34)
K (K ₂ O % dm)	0.46 (0.05)
Ca (CaO % dm)	4.13 (0.98)
Mg (MgO % dm)	0.82 (0.12)
Cd (mg kg ⁻¹ dm)	0.48 (0.03)
Cr (mg kg ⁻¹ dm)	12.94 (0.94)
Cu (mg kg ⁻¹ dm)	98.40 (4.50)
Ni (mg kg ⁻¹ dm)	9.77 (1.46)
Pb (mg kg ⁻¹ dm)	21.92 (2.26)
Zn (mg kg ⁻¹ dm)	593.72 (31.75)

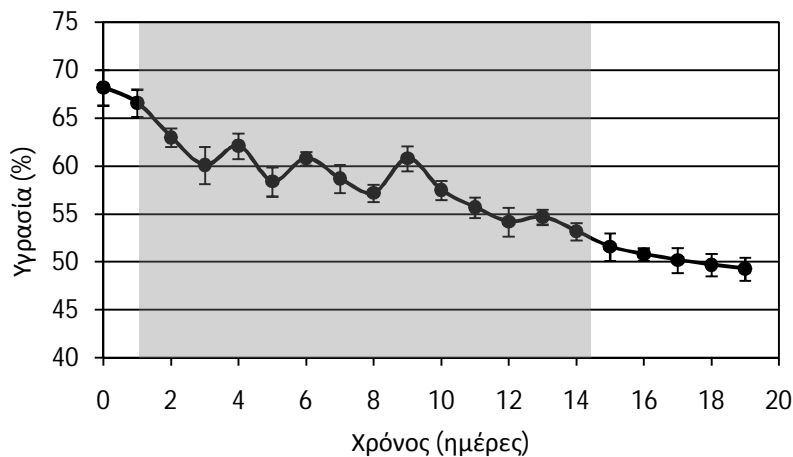
6.2.4.2. Έλεγχος της διεργασίας της κομποστοποίησης

Κατά τη διεργασία του 4^{ου} πειραματικού κύκλου το υπόστρωμα περνάει άμεσα από την πρώτη μεσόφιλη στη θερμοφιλή φάση την πρώτη κιόλας ημέρα λειτουργίας του συστήματος όπως φαίνεται στο **Διάγραμμα 6.25**. Εξαιτίας της αφομοίωσης και της κατανάλωσης της άμεσα διαθέσιμης οργανικής ουσίας που εμπεριέχεται στην ιλύ (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 με μέγιστη αυτή των 58,8°C την 3^η ημέρα. Η διατήρηση θερμοκρασιών άνω των 50°C στον βιοαντιδραστήρα καταγράφηκαν για 8 συναπτές ημέρες (1^η έως 8^η ημέρα). Από την 8^η ημέρα και έπειτα καταγράφεται σταδιακή μείωση της θερμοκρασίας με τη μετάβαση του υποστρώματος σε μια δεύτερη μεσόφιλη φάση τη 15^η ημέρα λειτουργίας του συστήματος κομποστοποίησης. 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.



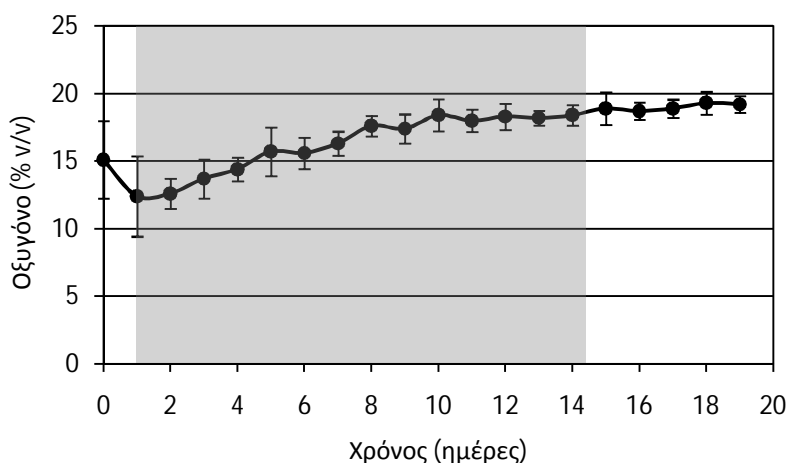
Διάγραμμα 6.25: Εξέλιξη της θερμοκρασίας (°C) κατά τη διάρκεια του 4^{ου} κύκλου κομποστοποίησης με τη σκιαγραφημένη περιοχή να αφορά στη θερμοφιλή φάση της διεργασίας.

Όπως αναφέρθηκε η προσθήκη περλίτη γίνεται προκειμένου να διαμορφωθούν καλύτερες φυσικές συνθήκες στο μίγμα για την ενίσχυση της διεργασίας της κομποστοποίησης. Η ιλύς κατέχοντας υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία δύναται να ευνοήσει τη διαμόρφωση ανεπιθύμητων αναερόβιων συνθηκών. Στο **Διάγραμμα 6.26** παρατηρείται ότι η ανάμιξη του περλίτη με την ιλύ ρυθμίζει την αρχική υγρασία του υποστρώματος σε τιμή ίση με 68,20% λόγω των απορροφητικών ιδιοτήτων του ορυκτού. Η άμεση κινητοποίηση των μικροοργανισμών με τη συνεπακόλουθη έκλυση θερμότητας κατά τις πρώτες κιόλας μέρες της διεργασίας έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση της περιεχόμενης υγρασίας σε επίπεδα μικρότερα του 65,0%. Στο θερμοφιλό στάδιο της κομποστοποίησης διαμορφώνονται ελεγχόμενες συνθήκες, ως προς την περιεκτικότητα της υγρασίας στο υπόστρωμα, σε εύρος τιμών μεταξύ 55% έως 60% με την προσθήκη νερού στον βιοαντιδραστήρα. Προς το τέλος της διεργασίας, το υπόστρωμα μεταβαίνει σε μια δεύτερη μεσόφιλη φάση κατά την οποία η παροχή νερού διακόπτεται προκειμένου να μειωθεί η ποσοστιαία περιεκτικότητα της υγρασίας και κατ' επέκταση ο όγκος, η μάζα και η μικροβιακή δραστηριότητα του υποστρώματος.



Διάγραμμα 6.26: Εξέλιξη της υγρασίας (% wb) κατά τη διάρκεια του 4^{ου} κύκλου κομποστοποίησης με τη σκιαγραφημένη περιοχή να αφορά στη θερμοφιλή φάση της διεργασίας.

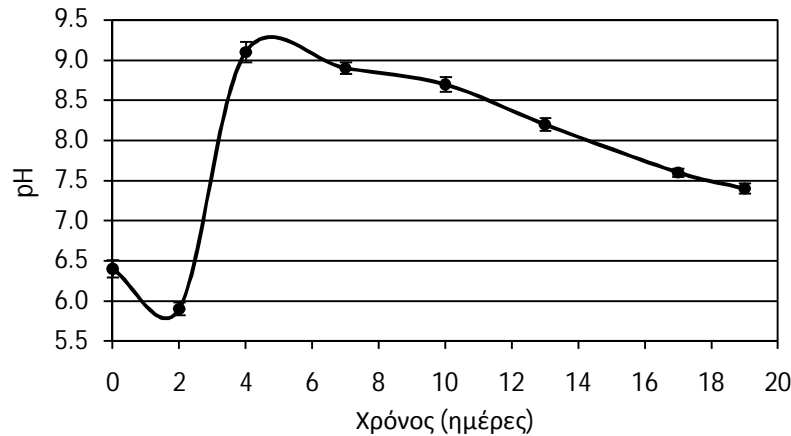
Η έντονη μικροβιακή δραστηριότητα που χαρακτηρίζεται από την άμεση διαμόρφωση θερμοφίλων συνθηκών, αποτυπώνεται και στην εξέλιξη του περιεχόμενου οξυγόνου στο υπόστρωμα όπως φαίνεται στο **Διάγραμμα 6.27**. Η δραστική κατανάλωση οξυγόνου από τους μικροοργανισμούς για τη διάσπαση της οργανικής ουσίας είναι εμφανής κατά τις πρώτες ημέρες της διεργασίας με την περιεκτικότητα του οξυγόνου να λαμβάνει ελάχιστη τιμή ίση με 12.0% v/v τη 2^η ημέρα λειτουργίας του συστήματος. Με το πέρας της θερμοφίλης φάσης της κομποστοποίησης το οξυγόνο διαμορφώνεται σε υψηλά επίπεδα ενδεικτικό των επαρκών συνθηκών ανάδευσης, αερισμού και ύγρανσης του υποστρώματος. Επιπλέον, οι υψηλές τιμές της περιεκτικότητας του οξυγόνου προς το τέλος της διεργασίας (>18% v/v) επιβεβαιώνουν το χαμηλό ρυθμό βιοαποδόμησης της οργανικής μάζας και της σταθεροποίησης του υποστρώματος. Σύμφωνα με την εξέλιξη της περιεκτικότητας του οξυγόνου στο υπόστρωμα μπορεί διαπιστωθεί ότι η προσθήκη περλίτη συντέλεσε αποτελεσματικά στη δομική ενίσχυση της άμορφης ιλύος παρέχοντας το απαιτούμενο πορώδες για τη διάχυση του οξυγόνου στην οργανική μάζα και την εξασφάλιση αερόβιων συνθηκών βιοαποδόμησης.



Διάγραμμα 6.27: Εξέλιξη του οξυγόνου (% v/v) κατά τη διάρκεια του 4^{ου} κύκλου κομποστοποίησης με τη σκιαγραφημένη περιοχή να αφορά στη θερμοφιλή φάση της διεργασίας.

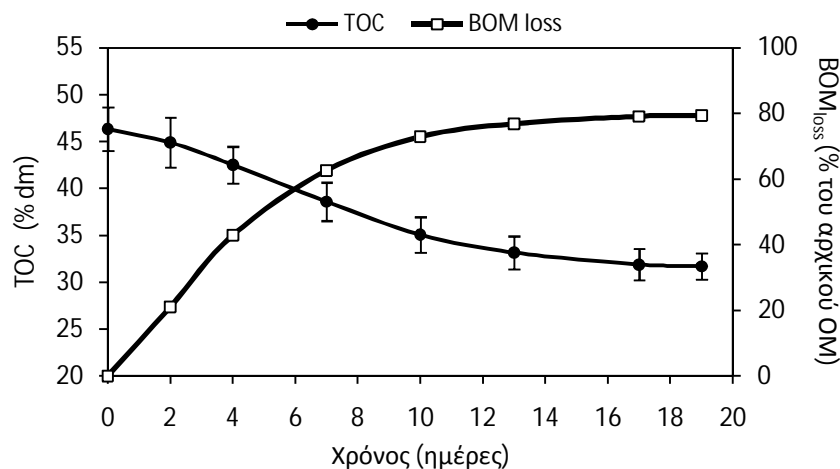
Το pH του υποστρώματος στην αρχή της διεργασίας διαμορφώνεται στο 6.4 ενώ στη συνέχεια διατηρείται σε όξινο περιβάλλον (5.9) λόγω του σχηματισμού οργανικών οξέων (**Διάγραμμα 6.28**). Μετέπειτα η κατανάλωση των οργανικών οξέων και η παράλληλη

διάσπαση αζωτούχων ενώσεων της οργανικής ουσίας προς αμμωνιακά αυξάνει το pH λαμβάνοντας τη μέγιστη τιμή 9.1 την 4^η ημέρα λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα. Από την 4^η ημέρα και ύστερα το pH μειώνεται σταδιακά προς ουδέτερες τιμές λόγω των απωλειών σε αμμωνιακά αλλά και της παράλληλης εξέλιξη των διεργασιών της νιτροποίησης.



Διάγραμμα 6.28: Εξέλιξη του pH κατά τη διάρκεια του 4^{ου} κύκλου κομποστοποίησης

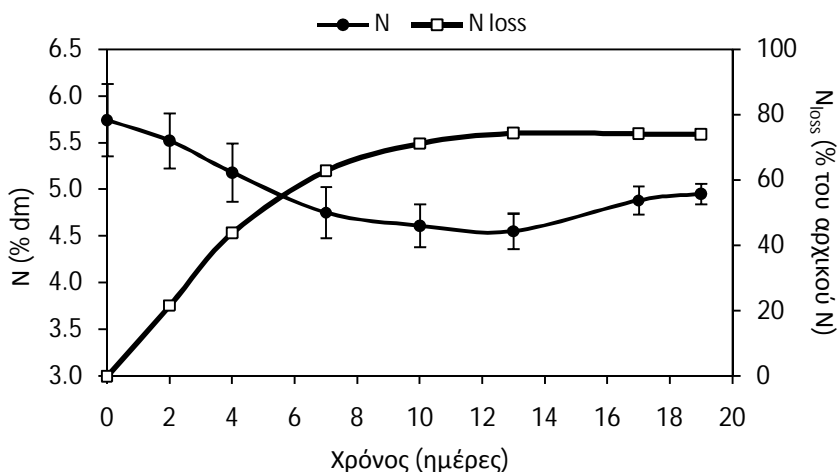
Η μεταβολή του ολικού οργανικού άνθρακα κατά τη διεργασία του 4^{ου} πειραματικού κύκλου απεικονίζεται στο **Διάγραμμα 6.29**. Η αρχική περιεκτικότητα του υποστρώματος σε οργανικό άνθρακα ανέρχεται στα 46.32% dm και παρουσιάζει σημαντική μείωση κατά το θερμοφίλο στάδιο της διεργασίας με τιμή ίση με 33.14% dm τη 13^η ημέρα.



Διάγραμμα 6.29: Μεταβολή του ολικού οργανικού άνθρακα και εξέλιξη των απωλειών οργανικής ουσίας κατά τη διάρκεια του 4^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης

Η έντονη μικροβιακή δράση και η βιοξειδωση της οργανικής μάζας σε CO₂ αποτυπώνεται από τις απώλειες της βιοαποδομήσιμης οργανικής ουσίας (BOM_{loss}) οι οποίες καταγράφονται στο 76.8% της αρχικής οργανικής ουσίας τη 13^η ημέρα λειτουργίας και οι οποίες αντιστοιχούν στο 96.8% των συνολικών απωλειών (**Διάγραμμα 6.29**). Προς το τέλος της διεργασίας ο ρυθμός κατανάλωσης του οργανικού άνθρακα και κατ' επέκταση οι απώλειες σε οργανική ουσία μειώνονται λόγω του περιορισμού του άμεσα διαθέσιμου προς κατανάλωση υποστρώματος. Επομένως, στο τέλος της διεργασίας στον βιοαντιδραστήρα, ο ολικός οργανικός άνθρακας του υποστρώματος διαμορφώνεται στο 31.7% dm, ενώ οι απώλειες της οργανικής ουσίας ανέρχονται στο 79.4% της αρχικής οργανικής ουσίας.

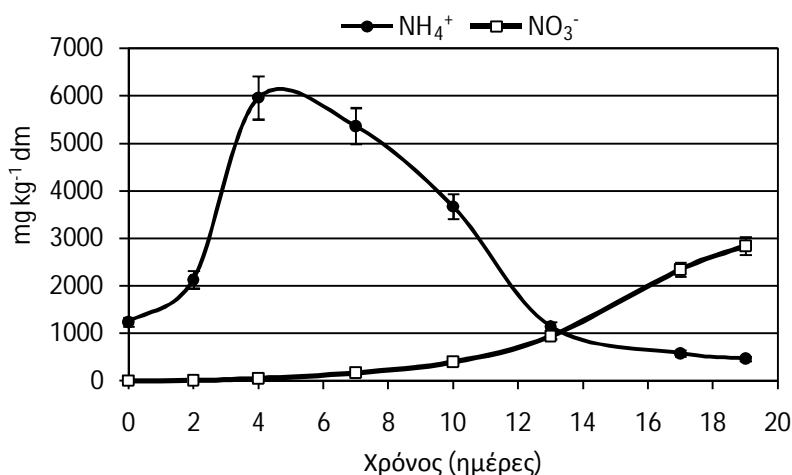
Λόγω της φύσης του υποστρώματος η αρχική περιεκτικότητα αζώτου παρουσιάζεται υψηλή και ίση με 5.74% dm (**Διάγραμμα 6.30**). Στα πρώτα στάδια της διεργασίας υπό την παρουσία υψηλών θερμοκρασιών (>55°C) και pH (≈9) εκδηλώνεται μείωση της περιεκτικότητας του αζώτου στο υπόστρωμα λόγω των σημαντικών απωλειών αζώτου ($N_{\text{loss}} = 61.7\%$ του αρχικού ολικού αζώτου την 7^η ημέρα) που προκύπτουν κυρίως από τη δραστική πτητικότητα της αμμωνίας.



Διάγραμμα 6.30: Μεταβολή του ολικού αζώτου και εξέλιξη των απωλειών αζώτου κατά τη διάρκεια του 4^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης

Στα μετέπειτα στάδια της κομποστοποίησης και καθώς το υπόστρωμα μεταβαίνει στη δεύτερη μεσόφιλη φάση, εμφανίζεται σταδιακή αύξηση του περιεχόμενου αζώτου οφειλόμενη τόσο στην απώλεια ολικού άνθρακα (**Διάγραμμα 6.29**) 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).

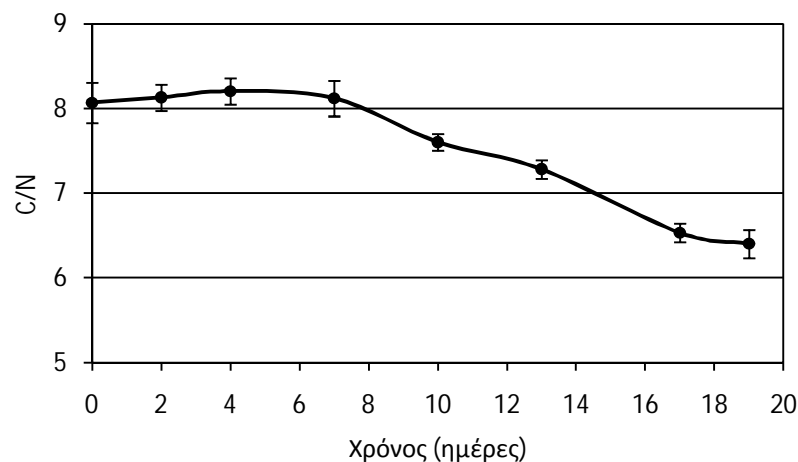
Η έντονη μικροβιακή δραστηριότητα που παρουσιάζεται τις πρώτες ημέρες της διεργασίας είναι συνεπακόλουθο των άμεσα διαθέσιμων οργανικών ενώσεων που εμπεριέχονται στην ιλύ μεγάλο μέρος των οποίων αποτελείται από αζωτούχες ενώσεις. Η αποδόμηση των ενώσεων αυτών οδηγεί σε υπέρμετρη αύξηση των αμμωνιακών στο υπόστρωμα σημειώνοντας μέγιστη τιμή την 4^η ημέρα λειτουργίας ίση με 5964 mg kg⁻¹ (**Διάγραμμα 6.31**).



Διάγραμμα 6.31: Μεταβολή των αμμωνιακών και των νιτρικών (mg kg⁻¹ dm) κατά τη διάρκεια του 4^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης

Λόγω της υψηλής συγκέντρωσης των αμμωνιακών σε συνδυασμό με την επικράτηση υψηλών θερμοκρασιών και τη διαμόρφωση αλκαλικού περιβάλλοντος, η παραγωγή νιτρικών περιορίζεται αισθητά τις δέκα πρώτες ημέρες και η μικρή αύξηση στη συγκέντρωσή τους οφείλεται εξ' ολοκλήρου στη δράση ετερότροφων νιτροποιητικών βακτηρίων. Από τη 10^η ημέρα και έπειτα, η συγκέντρωση των αμμωνιακών μειώνεται λόγω των σημαντικών απωλειών αζώτου (πτητικότητα αμμωνίας, εκχύλιση αμμωνιακών στα στραγγίσματα) και της διαδοχής τους σε νιτρικά μέσω των διεργασιών της αυτότροφης νιτροποίησης. Προς το τέλος της διεργασίας η συγκέντρωση των αμμωνιακών προσεγγίζει τα 450 mg kg⁻¹ ενώ στα νιτρικά είναι μεγαλύτερη των 2500 mg kg⁻¹.

Η αποκλειστική χρήση ιλύος ως οργανικό υπόστρωμα σε συνδυασμό με περλίτη οδηγεί στη διαμόρφωση αρκετά χαμηλής αρχικής αναλογίας C/N ίση με 8.07 λόγω της υψηλής περιεκτικότητας της ιλύος σε άζωτο (**Πίνακας 6.11**). Τις πρώτες ημέρες της διεργασίας όπου επικρατούν υψηλές θερμοκρασίες και αλκαλικό pH διαμορφώνονται κατάλληλες συνθήκες για την απώλεια αζώτου κυρίως υπό τη μορφή αμμωνίας προερχόμενη από τη διάσπαση των άμεσα διαθέσιμων αζωτούχων ενώσεων. Οι απώλειες αζώτου (**Διάγραμμα 6.30**) ισοσκελίζουν τις απώλειες άνθρακα (**Διάγραμμα 6.29**) με αποτέλεσμα ο λόγος C/N να κυμαίνεται στα ίδια περίπου επίπεδα για τις επτά πρώτες ημέρες τις διεργασίας. Στα μετέπειτα στάδια παρουσιάζεται σταδιακή μείωση του λόγου C/N λόγω της συνεχούς κατανάλωσης οργανικού άνθρακα και του περιορισμού του ρυθμού απωλειών του ολικού αζώτου.



Διάγραμμα 6.32: Μεταβολή του λόγου C/N κατά τη διάρκεια του 4^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης

Οι ιδιότητες των παραγόμενων στραγγισμάτων κατά τον 4^ο πειραματικό κύκλο κομποστοποίησης συνοψίζονται στον **Πίνακα 6.12**. Το pH αυξάνεται τις πρώτες ημέρες της διεργασίας από 8.0 την 3^η ημέρα σε 8.9 την 8^η ημέρα ενώ μετέπειτα παρατηρείται σταδιακή μείωσή του προς ουδέτερες τιμές (7.8 τη 17^η ημέρα). Το BOD₅ εμφανίζεται αρχικά υψηλό και ίσο με 72.71 g l⁻¹ ενώ κατά τα εξελικτικά στάδια της κομποστοποίησης το BOD₅ παρουσιάζει σημαντική μείωση, ιδιαίτερα μετά την 8^η ημέρα, καταγράφοντας τιμή ίση με 16.8 g l⁻¹ τη 17^η ημέρα λειτουργίας. Η συγκέντρωση των αμμωνιακών και των νιτρικών στα στραγγίσματα ακολουθεί παρόμοια πορεία με αυτή του υποστρώματος. Τα αμμωνιακά εμφανίζουν σημαντική αύξηση κατά τα πρώτα στάδια της κομποστοποίησης με τη συγκέντρωση την 3^η ημέρα στα 3802 mg l⁻¹ να αυξάνεται στα 4920 mg l⁻¹ την 8^η ημέρα, ενώ μετέπειτα σημειώνεται σημαντική μείωση καταλήγοντας στα 708 mg l⁻¹ τη

17^η ημέρα λειτουργίας του συστήματος. Η συγκέντρωση των νιτρικών αυξάνεται με την εξέλιξη της διεργασίας της κομποστοποίησης παρουσιάζοντας εντονότερο ρυθμό αύξησης μετά την 8^η ημέρα λειτουργίας με μέγιστη τιμή αυτή των 1473 mg l⁻¹ την 20^η ημέρα. Η συγκέντρωση των βαρέων μετάλλων στα στραγγίσματα καταγράφεται σε πολύ χαμηλά επίπεδα με μέγιστη αυτή του ψευδάργυρου η οποία κυμαίνεται από 1.72 mg l⁻¹ την 3^η ημέρα σε 2.13 mg l⁻¹ τη 17^η ημέρα.

Πίνακας 6.12: Χαρακτηριστικά των παραγόμενων στραγγισμάτων κατά τον 4^ο κύκλο κομποστοποίησης

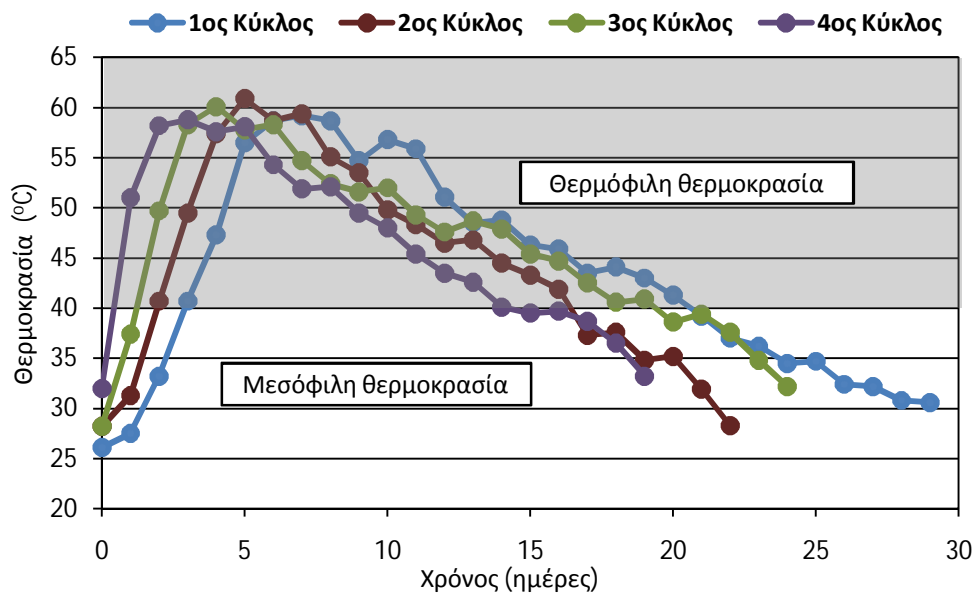
Παράμετρος/Χρόνος	3 ^η ημέρα	8 ^η ημέρα	13 ^η ημέρα	17 ^η ημέρα
pH	8.0 (0.06)	8.9 (0.08)	8.7 (0.09)	7.8 (0.05)
BOD ₅ (mg l ⁻¹)	72705 (8838)	63949 (7473)	37108 (4717)	16757 (2103)
NH ₄ ⁺ (mg l ⁻¹)	3802.32 (152.09)	4920.12 (196.80)	3213.42 (128.54)	708.25 (28.33)
NO ₃ ⁻ (mg l ⁻¹)	22.47 (1.12)	162.19 (8.11)	381.65 (19.08)	1473.64 (73.68)
Cd (mg l ⁻¹)	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
Cr (mg l ⁻¹)	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
Cu (mg l ⁻¹)	0.243 (0.06)	0.208 (0.05)	0.166 (0.04)	0.214 (0.05)
Ni (mg l ⁻¹)	0.029 (0.01)	0.023 (0.0)	<0.02	0.024 (0.0)
Pb (mg l ⁻¹)	0.059 (0.01)	0.056 (0.01)	0.051 (0.0)	<0.05
Zn (mg l ⁻¹)	1.72 (0.20)	1.71 (0.16)	1.91 (0.20)	2.13 (0.29)

6.3. Εκτίμηση της λειτουργίας του συστήματος κομποστοποίησης

Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται η αποτελεσματικότητα του συστήματος κομποστοποίησης για την επεξεργασία των επιλεγμένων βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων 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 οξυγόνου, 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.

6.3.1. 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 τέσσερις 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 θερμοφιλή φάση και μετά την πάροδο ορισμένων ημερών, αφότου οι άμεσα διαθέσιμες οργανικές ενώσεις έχουν καταναλωθεί, το υπόστρωμα μεταβαίνει σε μια δεύτερη μεσόφιλη φάση (Διάγραμμα 6.33).



Διάγραμμα 6.33: Εξέλιξη της θερμοκρασίας (°C) στους τέσσερις πειραματικούς κύκλους κομποστοποίησης

Τις πρώτες ημέρες της διεργασίας παρατηρήθηκε άμεση αύξηση της θερμοκρασίας άνω των 40°C σε όλους τους πειραματικούς κύκλους. Αναλυτικότερα, η μετάβαση στη θερμοφιλή περιοχή πραγματοποιήθηκε την 1^η ημέρα λειτουργίας για τον 4^ο κύκλο, τη 2^η ημέρα για το 2^ο και 3^ο κύκλο ενώ για τον 1^ο κύκλο, θερμοκρασίες άνω των 40°C επικράτησαν την 3^η ημέρα. Παρόμοια συμπεριφορά επισημαίνεται από τους Mena et al.(2003) με θερμοφιλείς θερμοκρασίες να διαμορφώνονται στο υπόστρωμα από τη 2^η

κιάλας ημέρα της κομποστοποίησης υλός με ροκανίδι. Επιπλέον, υψηλά θερμοκρασιακά επίπεδα στην αρχή της διεργασίας σημειώνονται και από τους Villaseñor et al. (2011) και Roca-Pérez et al. (2009) κατά την κομποστοποίηση υλός με γεωργικά υπολείμματα. 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 στην λύ (Manios, 2004). 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 κλειστού τύπου βιοαντιδραστήρα υπό απόλυτα ελεγχόμενες συνθήκες διατηρώντας τη θερμοκρασία σε επιθυμητά επίπεδα. 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. Στον **Πίνακα 6.13** παρουσιάζεται η διάρκεια των ημερών κατά τις οποίες επικράτησαν θερμοκρασίες μεγαλύτερες και ίσες των 40, 50 και 55°C καθώς και η μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύχθηκε στο υπόστρωμα για κάθε πειραματικό κύκλο κατά το χρόνο παραμονής του στον βιοαντιδραστήρα.

Πίνακας 6.13: Χρονική διάρκεια των θερμοκρασιακών επιπέδων του υποστρώματος στους τέσσερις πειραματικούς κύκλους κομποστοποίησης

	>40[°C] [ημέρες]	>50[°C] [ημέρες]	>55[°C] [ημέρες]	Μέγιστη Θερμοκρασία [°C]	Χρόνος Παραμονής [ημέρες]
1 ^{ος} κύκλος	18	8	7	59.2	29
2 ^{ος} κύκλος	15	7	5	60.9	22
3 ^{ος} κύκλος	18	8	5	60.1	24
4 ^{ος} κύκλος	14	8	5	58.8	19

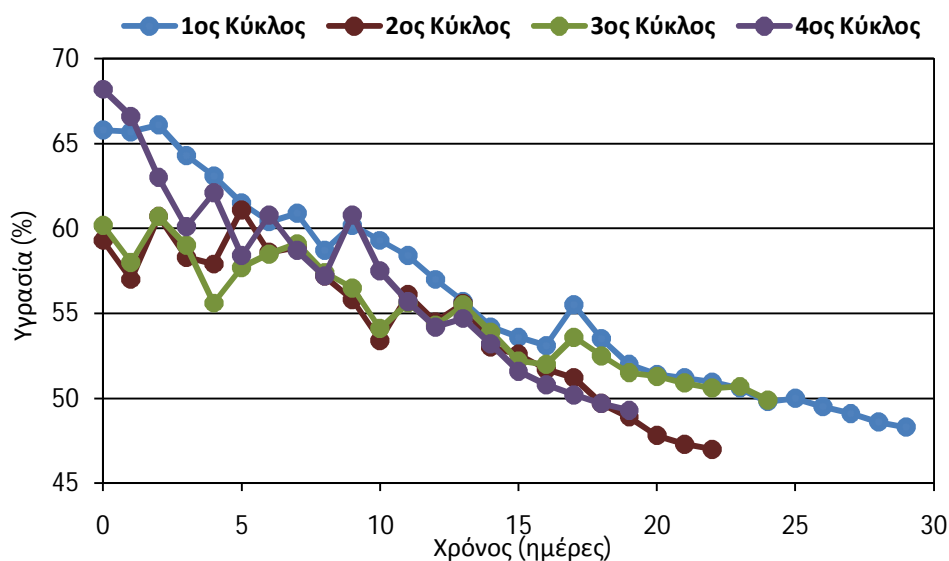
Με βάση τον **Πίνακα 6.13** διαπιστώνεται ότι οι θερμοκρασίες που αναπτύχθηκαν στους τέσσερις πειραματικούς κύκλους κομποστοποίησης είναι στο εύρος των βέλτιστων θερμοκρασιακών τιμών για τη μεγαλύτερη διάρκεια του χρόνου παραμονής του υποστρώματος στον βιοαντιδραστήρα. Το εύρος αυτό των τιμών, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, ορίζεται μεταξύ 43-65°C (**Πίνακας 3.2**). 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 πέντε συνεχής ημέρες στον 2^ο, 3^ο και 4^ο κύκλο κομποστοποίησης ενώ στον 1^ο κύκλο η αντίστοιχη χρονική διάρκεια είναι επτά ημέρες. Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία και τις εθνικές προδιαγραφές (ενότητα 3.2.3.1), η διάρκεια αυτών των θερμοκρασιακών επιπέδων δύναται να αδρανοποιήσει τους παθογόνους μικροοργανισμούς

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 την 21^η, 17^η, 20^η, και 15^η ημέρα της διεργασίας για τον 1^ο, 2^ο, 3^ο και 4^ο κύκλο κομποστοποίησης αντίστοιχα. Σύμφωνα με τους Mena et al. (2003), Fernades 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) καθότι οι λιγνολυτικοί μικροοργανισμοί που ευθύνονται για αυτή τη διεργασία ευδοκούν σε χαμηλές θερμοκρασίες (Choi and Park, 1998; Karlan and Karlan, 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 στους τέσσερις πειραματικούς κύκλους αποτελεί σημαντικό δείκτη της αποτελεσματικότητας του συστήματος κομποστοποίησης καθότι 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.

6.3.2. Περιεχόμενη υγρασία

Στους τέσσερις πειραματικού κύκλους κομποστοποίησης η αρχική περιεκτικότητα σε νερό είναι ίση με 65.80, 59.30, 60.20 και 68.20% για τον 1^ο, 2^ο, 3^ο και 4^ο πειραματικό κύκλο κομποστοποίησης αντίστοιχα (**Διάγραμμα 6.34**). Η διακύμανση της αρχικής υγρασίας των υποστρωμάτων οφείλεται στη διαφορετική σύσταση και τις διαφορετικές αναλογίες των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων που επιλέχτηκαν για κάθε πειραματικό κύκλο κομποστοποίησης στοχεύοντας στη διαμόρφωση μιγμάτων των οποίων η υγρασία να κυμαίνεται σε εύρος τιμών μεταξύ 50-70% όπως αυτό προτείνεται από τη διεθνή βιβλιογραφία (ενότητα 3.2.3.2). Στις περιπτώσεις του 2^{ου} και 3^{ου} πειραματικού κύκλου η αρχική υγρασία του υποστρώματος διαμορφώθηκε με την προσθήκη κατάλληλης ποσότητας νερού κατά την τροφοδοσία του μίγματος στον βιοαντιδραστήρα καθότι κατά τη σύνθεση των οργανικών μιγμάτων διαπιστώθηκε η απαίτηση για τη ρύθμισή της σε ευνοϊκότερα για τη διεργασία επίπεδα. Αντίστοιχα, στον 4^ο πειραματικό κύκλο η ρύθμιση της υψηλής υγρασίας της ιλύος έγινε με την προσθήκη περλίτη και την απορρόφηση μέρους αυτής στα εσωτερικά κοιλώματα του ορυκτού.



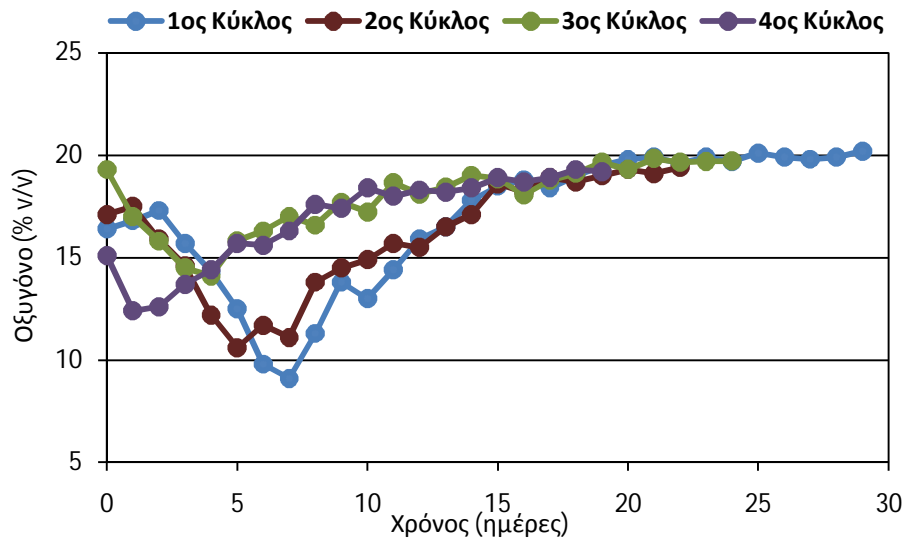
Διάγραμμα 6.34: Εξέλιξη της υγρασίας (% wb) στους τέσσερις πειραματικούς κύκλους κομποστοποίησης

Για τους τέσσερις πειραματικούς κύκλους κομποστοποίησης η περιεχόμενη υγρασία κατά τη θερμοφιλή φάση των διεργασιών κυμαίνεται από 51.6 – 64.3% (3^η – 20^η ημέρα) στον 1^ο κύκλο, 49.8-60.7% (2^η -16^η ημέρα) στο 2^ο κύκλο, 45.1 – 60.7% (2^η – 19^η ημέρα) στον 3^ο κύκλο και 53.2-66.7% (1^η -14^η ημέρα) στον 4^ο κύκλο. Το εύρος των τιμών που καταγράφονται είναι σε συμφωνία με το βιβλιογραφικά απαιτούμενο (40-70%) κατά τη θερμοφιλή φάση της κομποστοποίησης (Πίνακας 3.4) και δεν παρουσιάζονται φαινόμενα χαμηλής περιεκτικότητας της υγρασίας τα οποία δύναται να αναστείλουν τις μικροβιακές δράσεις εξαιτίας πρόωρης αφυδάτωσης αλλά ούτε και φαινόμενα υψηλής υγρασίας τα οποία ενδέχεται να διαμορφώσουν αναερόβιες συνθήκες. Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται κατά το θερμοφιλό στάδιο παρουσιάζονται σημαντικές απώλειες υγρασίας 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). Υψηλή μείωση του ποσοστού υγρασίας στο υπόστρωμα εξαιτίας της εξάτμισης του νερού, έως 27%, παρουσιάζουν και άλλοι ερευνητές κατά την αερόβια βιολογική επεξεργασία ιλύος με πριονίδι (Μάστακα, 2007). Προκειμένου να διατηρηθεί η υγρασία σε επιθυμητά επίπεδα κατά το θερμοφιλό στάδιο της κομποστοποίησης στον βιοαντιδραστήρα, πραγματοποιήθηκε ύγρανση του υποστρώματος με την προσθήκη νερού εξασφαλίζοντας ιδανικές συνθήκες αναφορικά με την περιεχόμενη υγρασία του υποστρώματος. Η προσθήκη νερού παρουσιάζεται ως στιγμιαία αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας η οποία καταγράφηκε κατά τη διάρκεια όλων των κύκλων κομποστοποίησης. Στη δεύτερη μεσόφιλη φάση η παροχή νερού στο υπόστρωμα διακόπτεται επιτυγχάνοντας σταδιακή μείωση της περιεχόμενης υγρασίας του υποστρώματος σε επίπεδα μικρότερα του 50% σε όλους τους πειραματικούς κύκλους, διασφαλίζοντας με τον τρόπο αυτό τη μείωση τόσο του όγκου και της μάζας του οργανικού υλικού όσο και της μικροβιακής δραστηριότητας όπως επισημαίνεται από τους Kalamdhad and Kazmi (2009), Gomez et al. (2006) και Haug (1993). Αξίζει να σημειωθεί ότι ο ρυθμός μείωσης της υγρασίας κατά τη μεσόφιλη φάση του 3^{ου} πειραματικού κύκλου παρουσιάζεται μικρότερος συγκριτικά με τους υπόλοιπους, ενδεχομένως λόγω της παρουσίας ζεόλιθου. Σύμφωνα με τους Villaseñor et al. (2011) η παρουσία του ζεόλιθου κατά το δεύτερο μεσόφιλο στάδιο και κατά την ωρίμανση του τελικού προϊόντος, διατηρεί τα επίπεδα της υγρασίας στο υπόστρωμα λόγω της

εκρόφησης ποσοτήτων νερού στην οργανική μάζα. Η απορροφούμενη ποσότητα νερού στο ζεόλιθο λαμβάνει χώρα κατά τη θερμοφιλή φάση της διεργασίας όπου σημαντική ποσότητα νερού εξατμίζεται ως αποτέλεσμα της εκπεμπόμενης μικροβιακής θερμότητας.

6.3.3. Περιεκτικότητα σε οξυγόνο

Αναφορικά με την περιεκτικότητα του οξυγόνου στο υπόστρωμα κατά τις διεργασίες των τεσσάρων πειραματικών κύκλων, οι ελάχιστες τιμές που καταγράφηκαν είναι 9.1%, 10.6%, 14.1% και 12.4% v/v για τον 1^ο, 2^ο, 3^ο και 4^ο κύκλο κομποστοποίησης αντίστοιχα (Διάγραμμα 6.35). Οι τιμές αυτές σημειώθηκαν κατά τη θερμοφιλή φάση των διεργασιών όπου η μικροβιακή δραστηριότητα είναι εντονότερη και κατ' επέκταση η απαίτηση σε οξυγόνο για τη βιοξείδωση της οργανικής ουσίας είναι μεγαλύτερη όπως παρατηρείται και από τους Villaseñor et al. (2011), Fernández et al. (2010) και de Guardia et al. (2008).



Διάγραμμα 6.35: Εξέλιξη του οξυγόνου (% v/v) στους τέσσερις πειραματικούς κύκλους κομποστοποίησης

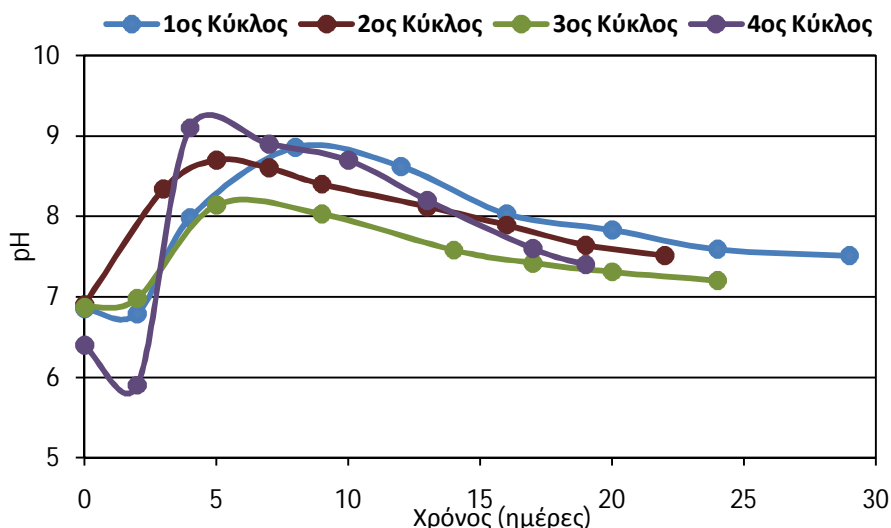
Οι ελάχιστες αυτές τιμές είναι σε συμφωνία με τη βιβλιογραφικά αναφερόμενη τιμή για την εξασφάλιση των αερόβιων συνθηκών στο υπόστρωμα (>10% v/v) (ενότητα 3.2.3.3). Η επίτευξη επιθυμητών επιπέδων αναφορικά με την περιεκτικότητα του οξυγόνου διαμορφώθηκε με τον έλεγχο της συχνότητας και του ρυθμού αερισμού και ανάδευσης του υποστρώματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι παρατεταμένος αερισμός ή ανάδευση του υποστρώματος κατά τη θερμοφιλή φάση της κομποστοποίησης αυξάνει το περιεχόμενο οξυγόνο αλλά ενδέχεται να οδηγήσει σε μείωση της θερμοκρασίας (Gajalakshmi and Abbasi, 2008). Οι συνθήκες αυτές δεν παρατηρήθηκαν κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων υποδηλώνοντας ότι οι ρυθμίσεις της ανάδευσης και του αερισμού του υποστρώματος ήταν ευνοϊκές εξασφαλίζοντας υψηλά θερμοκρασιακά επίπεδα και παράλληλα την απαιτούμενη περιεκτικότητα σε οξυγόνο.

Κατά την περίοδο της δεύτερης μεσόφιλης φάσης η περιεκτικότητα του οξυγόνου σε όλους τους κύκλους κομποστοποίησης εμφανίζει ανοδική τάση λόγω της μείωσης του ρυθμού βιοξείδωσης της οργανικής ουσίας, ενώ προς το τέλος της διεργασίας η περιεκτικότητα του οξυγόνου διαμορφώνεται σε επίπεδα μεγαλύτερα του 18% v/v ενδεικτικό του χαμηλού ρυθμού βιοαποδόμησης του υποστρώματος και της

σταθεροποίησης του οργανικού υλικού. Στην περίπτωση του 3^{ου} πειραματικού κύκλου, όπου έγινε προσθήκη ζεόλιθου, το υπόστρωμα παρουσιάζει την υψηλότερη περιεκτικότητα σε οξυγόνο, καθόλη τη διάρκεια της διεργασίας, το οποίο υποδηλώνει την επίδραση του ζεόλιθου στις φυσικές ιδιότητες του υποστρώματος διαμορφώνοντας καλύτερες συνθήκες για τη διάχυση του αέρα στην οργανική μάζα μέσω της ενίσχυσης του πορώδους και της δομικής συνοχής του οργανικού μίγματος. Το γεγονός αυτό συμφωνεί με τα ευρήματα των Bueno et al. (2008), Turan and Ergun (2008) και Zogras et al. (2000b). Επιπλέον, στην 4^η πειραματική εφαρμογή όπου έγινε αποκλειστική χρήση ιλύος ως οργανικό υπόστρωμα, παρατηρείται ότι ο αερισμός του υποστρώματος πραγματοποιείται εξίσου αποτελεσματικά. Αυτό οφείλεται στη χρήση διογκωμένου περλίτη ο οποίος διαμορφώνει τις φυσικές ιδιότητες της άμορφης ιλύος ώστε να παρέχεται το απαιτούμενο οξυγόνο στην οργανική μάζα για την εξέλιξη των αερόβιων βιοξειδωτικών αντιδράσεων. Πρέπει να επισημανθεί ότι στον 4^ο κύκλο, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες πειραματικές εφαρμογές, δεν έγινε χρήση οργανικών διογκωτικών υλικών όπως είναι τα φύλλα ζαχαρότευλων και το άχυρο, υποδηλώνοντας ότι η χρήση αποκλειστικά περλίτη για την κομποστοποίηση της ιλύος, δύναται να διαμορφώσει τις απαιτούμενες φυσικές συνθήκες στο υπόστρωμα για τη διάχυση του αέρα στην οργανική μάζα.

6.3.4. pH

Στο αρχικό υπόστρωμα το pH λαμβάνει τιμές ίσες με 6.85, 6.90, 6.87 και 6.40 για τον 1^ο, 2^ο, 3^ο και 4^ο πειραματικό κύκλο. Στην πρώτη, τρίτη και τέταρτη εφαρμογή είναι εμφανής ο σχηματισμός οργανικών οξέων τις πρώτες ημέρες λειτουργίας του συστήματος διατηρώντας το pH σε ελαφρώς όξινο περιβάλλον (**Διάγραμμα 6.36**) 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).



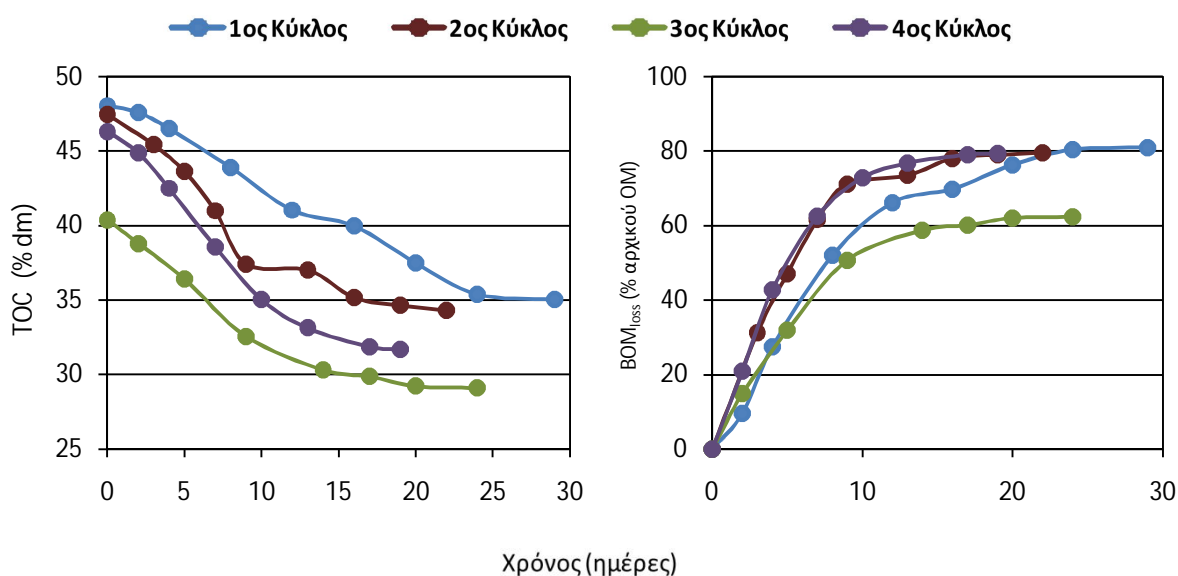
Διάγραμμα 6.36: Εξέλιξη του pH στους τέσσερις πειραματικούς κύκλους κομποστοποίησης

Στην περίπτωση της 2^{ης} πειραματικής εφαρμογής δεν αποτυπώνεται η αρχική παρουσία όξινων οργανικών ενώσεων διότι την περίοδο σχηματισμού τους δεν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις του pH οι οποίες δικαιολογούν την εμφάνισή τους. Κατά

τη θερμόφιλη 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). Λόγω των χαμηλών αρχικών λόγων C/N στα υποστρώματα, διαμορφώνεται περίσσεια αζώτου η οποία συντελεί στη σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης των αμμωνιακών με αποτέλεσμα την αύξηση του pH κατά τη θερμόφιλη φάση. Ενδεικτικό παράδειγμα των έντονων διεργασιών της αμμωνιοποίησης αποτελεί ο 4^{ος} πειραματικός κύκλος κομποστοποίησης (αρχική αναλογία C/N ίση με 8.07) όπου το pH λαμβάνει μέγιστη τιμή ίση με 9.1. Στους υπόλοιπους κύκλους οι μέγιστες τιμές pH επιτυγχάνονται επίσης κατά τη θερμόφιλη φάση και είναι ίσες με 8.86, 8.70 και 8.14 για τον 1^ο, 2^ο και 3^ο κύκλο αντίστοιχα. Αξίζει να σημειωθεί ότι στον 3^ο πειραματικό κύκλο στον οποίο έγινε προσθήκη φυσικού ζεόλιθου 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 (Peigné and Girardin, 2004; Witter and Lopez-Real, 1988). Οι μέγιστες τιμές pH στον 1^ο, 2^ο και 4^ο κύκλο κομποστοποίησης ξεπερνούν τα ανώτερα προτεινόμενα όρια όπως αυτά παρουσιάζονται από τη διεθνή βιβλιογραφία τα οποία ορίζονται μεταξύ 5.5-8.5 (ενότητα 3.2.3.4). Παρ' όλα αυτά, δεν διαπιστώνεται τυχόν 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 (**Διάγραμμα 3.1, Εικόνα 3.4**) 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.

6.3.5. Ολικός οργανικός άνθρακας και απώλειες οργανικής ουσίας

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 θερμοφιλή φάση της κομποστοποίησης ο οποίος οφείλεται στην κατανάλωση και αφομοίωση των άμεσα διαθέσιμων και διαλυτών οργανικών ενώσεων (Διάγραμμα 6.37).



Διάγραμμα 6.37: Μεταβολή του ολικού οργανικού άνθρακα και εξέλιξη των απωλειών της οργανικής ουσίας στους τέσσερις πειραματικούς κύκλους κομποστοποίησης

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 Epstein (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 χουμοποίηση.

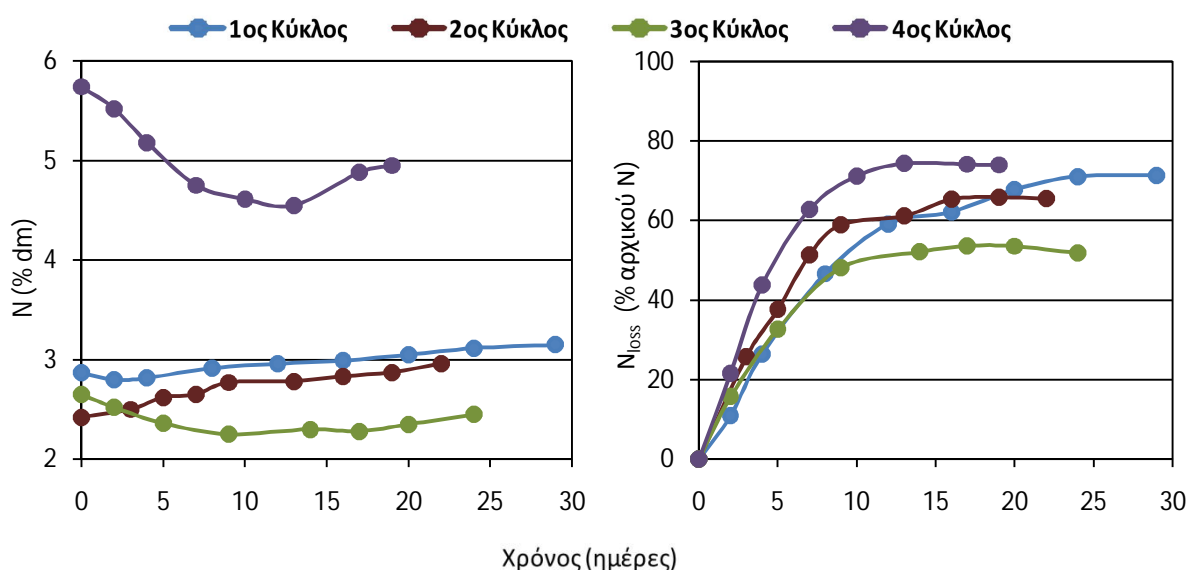
Η συνολική μείωση του ολικού οργανικού άνθρακα που σημειώθηκε καθόλη τη διάρκεια των διεργασιών είναι 13.00, 13.16, 11.26 και 14.62% dm για τον 1^ο, 2^ο, 3^ο και 4^ο πειραματικό κύκλο αντίστοιχα (**Διάγραμμα 6.37**) και εμφανίζονται υψηλότερα από ότι παρουσιάζουν οι Li et al. (2001) κατά την κομποστοποίηση (α) ιλύος + πριονίδι και (β) ιλύος + κοπριάς + πριονίδι (μείωση 3-5% dm) ενώ σε παρόμοια επίπεδα εμφανίζεται η μείωση του οργανικού άνθρακα σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα των Grigatti et al. (2004) κατά την κομποστοποίηση ιλύος με πράσινα κηπευτικά υπολείμματα (μείωση 8-12% dm). Στον 3^ο πειραματικό κύκλο η κατανάλωση του οργανικού άνθρακα παρουσιάζεται μικρότερη συγκριτικά με τους υπόλοιπους κύκλους γεγονός το οποίο μπορεί να αποδοθεί στη χαμηλότερη αρχική περιεκτικότητα του ολικού οργανικού άνθρακα (Fernández et al., 2010).

Σημαντικές εμφανίζονται οι απώλειες της βιοαποδομήσιμης οργανικής ουσίας κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης με τη χρήση του συστήματος κομποστοποίησης, οι οποίες ανέρχονται στο 81.0, 79.6, 62.4 και 79.4% της αρχικής οργανικής ουσίας για τον 1^ο, 2^ο, 3^ο και 4^ο πειραματικό κύκλο αντίστοιχα (**Διάγραμμα 6.37**). Το μεγαλύτερο μέρος των απωλειών εμφανίζεται κατά το θερμόφιλο στάδιο της διεργασίας, όπως επισημαίνεται από τους Lu et al. (2009), Zhu (2007) και Baddi et al. (2004), με ποσοστό περίπου 60.3, 58.8, 75.6 και 70.4% των συνολικών απωλειών στον 1^ο, 2^ο, 3^ο και 4^ο πειραματικό κύκλο αντίστοιχα. Ο ρυθμός απωλειών της οργανικής ουσίας στα μετέπειτα στάδια εμφανίζεται σημαντικά βραδύτερος καθότι έχουν παραμείνει στην οργανική μάζα οι πλέον σταθερές ενώσεις που υπόκεινται δυσκολότερα στις μικροβιακές μεταβολικές διεργασίες (Tuomela et al., 2000). Αναφορικά με τις συνολικές απώλειες της οργανικής ουσίας οι Jouraiphy et al. (2005) σημειώνουν απώλειες 60% επί της αρχικής οργανικής ουσίας κατά την κομποστοποίηση ιλύος με πράσινα κηπευτικά απορρίμματα σε σύστημα σειραδιών. Οι Bernal et al. (1998b) σε τέσσερις πειραματικούς κύκλους σε στατική σωρό παρατήρησαν απώλειες 58.2-73.2% επί της αρχικής οργανικής ουσίας κατά την κομποστοποίηση ιλύος σε συνδυασμό με διαφορετικές ροές βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων (γεωργικά υπολείμματα, απόβλητα ελαιουργίας). Επιπλέον οι Kalamdhad and Kazmi (2009) χρησιμοποιώντας ποικιλία οργανικών αποβλήτων (οικιακά οργανικά απόβλητα, υπολειμμάτων χλοοκοπής, κοπριά, πριονίδι) σε κλειστό σύστημα κομποστοποίησης σημείωσαν ποσοστό απωλειών μεταξύ 39-54% της αρχικής οργανικής ουσίας. Υψηλό ποσοστό απωλειών, το οποίο ανέρχεται στο 92.6% της αρχικής οργανικής ουσίας, παραθέτει ο Zhu (2007) κατά την ελεγχόμενη αερόβια βιοαποδόμηση κτηνοτροφικών αποβλήτων με γεωργικά υπολείμματα σε κλειστό σύστημα κομποστοποίησης. Οι Villaseñor et al. (2011) κατά τη συγκομποστοποίηση ιλύος και γεωργικών υπολειμμάτων (άχυρο) με την προσθήκη διαφορετικών ποσοτήτων ζεόλιθου παρατήρησαν απώλειες της οργανικής ουσίας μέχρι 70%. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην προαναφερόμενη έρευνα παρατηρήθηκαν μεγαλύτερες απώλειες με τη χρήση ζεόλιθου από ότι χωρίς την προσθήκη του. Αντιθέτως στην περίπτωση του 3^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης οι απώλειες της οργανικής ουσίας εμφανίζονται μικρότερες συγκριτικά με τους υπόλοιπους κύκλους γεγονός το οποίο μπορεί να αποδοθεί στη χαμηλότερη περιεκτικότητα του υποστρώματος σε οργανική ουσία.

Γενικά, παρατηρείται σημαντική διαφοροποίηση ως προς το ποσοστό των συνολικών απωλειών της οργανικής ουσίας κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης, όπως παρουσιάζεται από τη διεθνή βιβλιογραφία. Η διαφοροποίηση αυτή οφείλεται σε πληθώρα παραμέτρων που επηρεάζουν το ρυθμό και το μέγεθος των απωλειών της οργανικής ουσίας στις οποίες μεταξύ άλλων είναι το είδος και οι συνθήκες που επικρατούν στο σύστημα κομποστοποίησης, τα χαρακτηριστικά των διογκωτικών μέσων καθώς και οι εποχικές περιβαλλοντικές συνθήκες (Bernal et al., 2009; Parkinson et al., 2004). Σύμφωνα με τα παραπάνω προκύπτει ότι οι διεργασίες που τελούνται στο βιοαντιδραστήρα ευνοούν τη σημαντική μείωση της περιεχόμενης οργανικής ουσίας υποδεικνύοντας την αποδοτική λειτουργία του συστήματος κομποστοποίησης.

6.3.6. Ολικό άζωτο και απώλειες ολικού αζώτου

Η άμεση μείωση του οργανικού άνθρακα κατά τη βιοξείδωση της οργανικής ουσίας και η συνεπακόλουθη μείωση της ξηρής μάζας του υποστρώματος τις πρώτες ημέρες της διεργασίας, συντελούν στην αύξηση της περιεκτικότητας 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 (Διάγραμμα 6.38).



Διάγραμμα 6.38: Μεταβολή του ολικού αζώτου και εξέλιξη των απωλειών αζώτου στους τέσσερις πειραματικούς κύκλους 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). Στην περίπτωση του 4^{ου} πειραματικού κύκλου, παρότι οι απώλειες της οργανικής ουσίας είναι εξίσου υψηλές με τις υπόλοιπες εφαρμογές, σημειώνεται μείωση στην περιεκτικότητα του αζώτου τις πρώτες ημέρες της διεργασίας λόγω των υψηλών απωλειών αζώτου κατά τη θερμοφιλή φάση. Οι μεγαλύτερες απώλειες αζώτου που παρατηρούνται στον 4^ο πειραματικό κύκλο, ενδεχομένως να οφείλονται στη χαμηλή αρχική αναλογία C/N (8.07) και τη διαμόρφωση συνθηκών περίσσειας αζώτου η οποία εντείνει την αύξηση της συγκέντρωσης των

αμμωνιακών 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 στην περιεκτικότητα 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 (**Διάγραμμα 6.38**). 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), σε συνδυασμό με τη χαμηλή αναλογία C/N 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). Δεδομένου των συνθηκών που επικρατούν στο υπόστρωμα, οι συνολικές απώλειες αζώτου στο τέλος της διεργασίας στον βιοαντιδραστήρα ανέρχεται στο 71.4, 65.5, 51.8 και 74.0% του αρχικού αζώτου για τον 1^ο, 2^ο, 3^ο και 4^ο πειραματικό κύκλο αντίστοιχα. 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. 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 ενώ οι de Guardia et al. (2008) και Witter and Lopez-Real (1988) παρατήρησαν απώλειες 47.2 και 68.0% του αρχικού ολικού αζώτου αντίστοιχα κατά την κομποστοποίηση ιλύος από ΜΕΛ. Στην περίπτωση του 3^{ου} πειραματικού κύκλου της παρούσας έρευνας παρουσιάζονται μειωμένες απώλειες αζώτου συγκριτικά με τους υπόλοιπους κύκλους περίπου της τάξης του 15-20%. Αυτό οφείλεται στη δέσμευση της αμμωνίας και των αμμωνιακών λόγω των προσροφητικών και ιοντοεναλλακτικών ιδιοτήτων του ζεόλιθου (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. Παρότι η χρήση του ζεόλιθου παρουσιάζει μείωση των απωλειών αζώτου, οι συνολικές απώλειες παραμένουν υψηλές συγκριτικά με άλλες έρευνες στις οποίες έχει γίνει χρήση ζεόλιθου. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από την υψηλή περιεκτικότητα σε άζωτο

του υποστρώματος και κατ' επέκταση την παρουσία σημαντικών ποσοτήτων αμμωνιακών ιόντων των οποίων η συγκέντρωση ξεπερνά την ιοντοεναλλακτική δυναμικότητα του ζεόλιθου διαμορφώνοντας αλκαλικό pH με μέγιστη τιμή ίση με 8.14 το οποίο με τη σειρά του μετατοπίζει το σημείο ισορροπίας $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$ διαμορφώνοντας συνθήκες ευνοϊκότερες για την πτητικότητα της αμμωνίας.

Αέριες απώλειες αζώτου καταγράφονται κυρίως ως αμμωνία (Eklind and Kirchmann, 2000b) αλλά ενδέχεται να εμφανιστούν και ως N_2 (Mahimairaja et al., 1994), NO_x (Martins and Dewes, 1992) και N_2O (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 N_2 και N_2O 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⁽¹³⁾ 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). 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).

Εκτός από τις αέριες απώλειες αζώτου οι οποίες παρουσιάζονται κατά τη διάρκεια των πειραματικών κύκλων κομποστοποίησης, ενδέχεται να παρουσιάζονται και απώλειες λόγω της απορροής NO_3^- και NH_4^+ μέσω των στραγγισμάτων. Οι Reigné and Girardin (2004) ισχυρίζονται ότι οι απώλειες αζώτου λόγω εκχύλισης κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης, θεωρούνται αμελητέες συγκριτικά με το σύνολο των αερίων απωλειών. Η άποψη αυτή επιβεβαιώνεται από τους Sommer and Dahl (1999) και Eghball et al. (1997) οι όποιοι κατέγραψαν απώλειες αζώτου στα στραγγίσματα ίσες με 0.5% του αρχικού αζώτου του υποστρώματος κατά την κομποστοποίηση κοπριάς οικόσιτων ζώων (αρχικές συνθήκες: 60% υγρασία και 12-20 C/N). Αντίθετα αποτελέσματα παρουσιάζουν οι Martins and Dewes (1992) όπου το σύνολο των απωλειών προσεγγίζει το 20% του αρχικού αζώτου το μεγαλύτερο μέρος των οποίων εμφανίζεται κατά τις πρώτες ημέρες της διεργασίας. Στην περίπτωση των πειραματικών κύκλων με τη χρήση του συστήματος κομποστοποίησης οι συγκεντρώσεις των NO_3^- και NH_4^+ στα παραγόμενα στραγγίσματα είναι σε υψηλά επίπεδα. Εντούτοις, τα στραγγίσματα εμφανίζονται κυρίως στις πρώτες ημέρες της διεργασίας και οι ποσότητες τους είναι περιορισμένες ενδεχομένως λόγω της συχνότητας και του ρυθμού αερισμού του υποστρώματος (de Guardia et al., 2008; Reigné and Girardin, 2004). Επομένως, οι απώλειες αμμωνιακών και ιδιαίτερα των νιτρικών (τα οποία εμφανίζονται σε μεταγενέστερο στάδιο της διεργασίας) σε σχέση με την περιεκτικότητα του αζώτου στη μάζα του υποστρώματος, θεωρούνται μικρές, γεγονός το οποίο επιβεβαιώνεται και από τον Brink (1995).

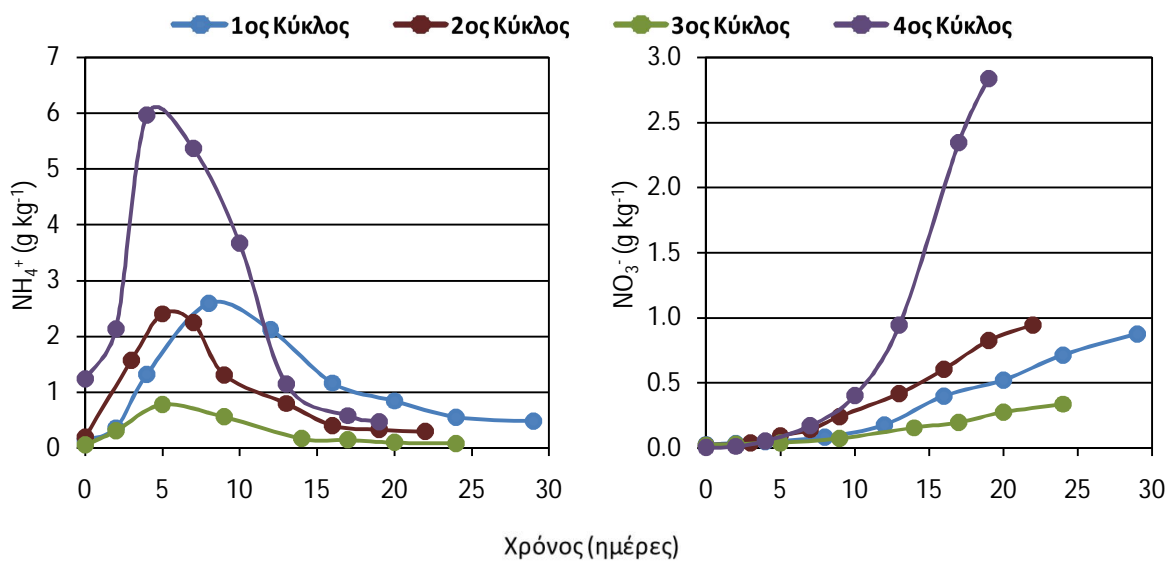
Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι προς τα τελικά στάδια των διεργασιών ο ρυθμός των συνολικών απωλειών του αζώτου παρουσιάζεται σημαντικά περιορισμένος

⁽¹³⁾ Με εξαίρεση τις πρώτες ημέρες των διεργασιών

υποδηλώνοντας ότι στο υπόστρωμα σχηματίζονται σταθερότερες μορφές αζώτου οι οποίες υπόκεινται σε λιγότερο βαθμό σε διεργασίες πτητικότητας, απονιτροποίησης και εκχύλισης (Bernal et al., 2009).

6.3.7. Αμμωνιακά και νιτρικά

Στην περίπτωση των τεσσάρων πειραματικών κύκλων η αρχική αναλογία C/N του υποστρώματος είναι χαμηλή, λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε άζωτο, εντείνοντας τη διεργασία της διάσπασης του οργανικού αζώτου με αποτέλεσμα την άμεση αύξηση της συγκέντρωσης των αμμωνιακών διαμορφώνοντας τη μέγιστη τιμή τους κατά τη θερμοφιλή φάση της διεργασίας ίση με 2594, 2403, 780 και 5964 mg kg⁻¹ dm στον 1^ο, 2^ο, 3^ο και 4^ο πειραματικό κύκλο αντίστοιχα (Διάγραμμα 6.39).



Διάγραμμα 6.39: Μεταβολή των αμμωνιακών και των νιτρικών (g kg⁻¹) στους τέσσερις πειραματικούς κύκλους κομποστοποίηση

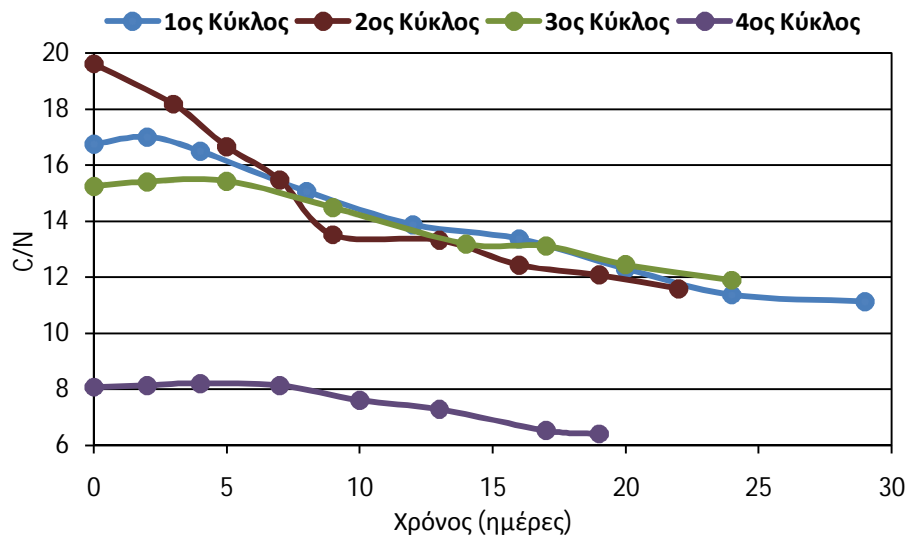
Η υψηλή συγκέντρωση των αμμωνιακών στον 4^ο κύκλο οφείλεται στη χαμηλή αναλογία C/N στο αρχικό υπόστρωμα η οποία διαμορφώνει συνθήκες περίσσειας οργανικού αζώτου για τους μικροοργανισμούς. Αντίθετα, στον 3^ο πειραματικό κύκλο η ιοντοεναλλακτική ικανότητα του ζεόλιθου και η εκλεκτικότητά του ως προς τα αμμωνιακά ιόντα έχει ως αποτέλεσμα την παρουσία χαμηλότερων συγκεντρώσεων αμμωνιακών στο υπόστρωμα συγκριτικά με τους υπόλοιπους πειραματικούς κύκλους κομποστοποίησης στους οποίους δεν πραγματοποιήθηκε προσθήκη του συγκεκριμένου ορυκτού. 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 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 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).

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 (**Διάγραμμα 6.38**) 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.

6.3.8. 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 είναι 16.74, 19.61, 15.24 και 8.07 για τον 1^ο, 2^ο, 3^ο και 4^ο κύκλο κομποστοποίησης αντίστοιχα (**Διάγραμμα 6.38**). Η διαμόρφωση χαμηλής αρχικής αναλογίας οφείλεται στη φύση του υλικού τροφοδοσίας καθότι τα περισσότερα από τα οργανικά απόβλητα που επιλέχθηκαν περιέχουν υψηλό ποσοστό σε άζωτο (**Πίνακες 6.2, 6.5, 6.7 και 6.11**).



Διάγραμμα 6.40: Μεταβολή του λόγου C/N στους τέσσερις πειραματικούς κύκλους κομποστοποίησης

Χαμηλός αρχικός λόγος C/N στα οργανικά προς επεξεργασία μίγματα έχει παρατηρηθεί και σε άλλες ερευνητικές εργασίες στις οποίες χρησιμοποιείται υλός από ΜΕΛ ως βασικό συστατικό (Roca-Pérez et al., 2009; Gajalakshmi and Abbasi, 2008). Παρά τη χαμηλή αρχική αναλογία C/N η οποία αποκλίνει από το βέλτιστο εύρος τιμών όπως αυτό συνίσταται από τη διεθνή βιβλιογραφία (C/N=25-35), παρατηρείται σε όλους τους πειραματικούς κύκλους άμεση και έντονη μικροβιακή δράση. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι Roca-Pérez et al. (2005) και Iranzo et. al. (2004) διαπίστωσαν ότι το αρχικό υπόστρωμα με τη μικρότερη αναλογία C/N παρουσίασε τη μεγαλύτερη μικροβιακή δραστηριότητα κατά την κομποστοποίηση υλός (C/N=15-24). Επιπλέον, οι Turan (2009) και Paredes et al. (2001) παρατηρούν ότι η διεργασία της κομποστοποίησης τελείται ικανοποιητικά για αρχικούς λόγους C/N μεταξύ 13.5-21.1. 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). Αυτό διαπιστώνεται εντονότερα στο 2^ο κύκλο κομποστοποίησης καθότι εμφανίζει το μεγαλύτερο αρχικό λόγο C/N στο υπόστρωμα. Στις περιπτώσεις των υπόλοιπων κύκλων και ιδιαίτερα στην 4^η εφαρμογή, παρατηρείται τις πρώτες ημέρες μια σταθεροποίηση της αναλογίας C/N η οποία μπορεί να αιτιολογηθεί από τον αυξημένο ρυθμό διάσπασης του οργανικού αζώτου προς ανόργανες μορφές (αμμωνιοποίηση), λόγω της παρουσίας περίσσειας αζώτου στο υπόστρωμα (Van Kessel et al., 2000). Οι συνθήκες αυτές ευνοούν τις αυξημένες απώλειες σε άζωτο οι οποίες με τη σειρά τους εξισορροπούν τη μείωση του οργανικού άνθρακα. Παρόμοια συμπεριφορά έχει διαπιστωθεί από τους Roca-Pérez et al. (2009), Tiquia and Tam (2000) και Morisaki et al. (1989) όπου ο λόγος C/N αυξάνεται κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης υλός (με χαμηλό αρχικό λόγο C/N) εξαιτίας της δραστηρικής πτητικότητας της αμμωνίας. Την ίδια ερμηνεία παρουσιάζουν και οι Goyal et al. (2005) με την αναλογία C/N να αυξάνεται τις πρώτες ημέρες της κομποστοποίησης κοπριάς πουλερικών, λόγω της υψηλής αρχικής περιεκτικότητας της πρώτης ύλης σε άζωτο. 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 στον βιοαντιδραστήρα διαμορφώνονται στο 11.12, 11.59., 11.89 και 6.40 στον 1^ο, 2^ο, 3^ο και 4^ο πειραματικό κύκλο αντίστοιχα.

6.3.9. Στραγγίσματα

Κατά τη διάρκεια των πειραματικών κύκλων κομποστοποίησης παρουσιάζεται περιορισμένη παραγωγή στραγγισμάτων η οποία εμφανίζεται κυρίως τις πρώτες ημέρες της διεργασίας. Τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων στραγγισμάτων παρουσιάζουν παρόμοιες ιδιότητες με την οργανική μάζα τη χρονική στιγμή κατά την οποία γίνεται η συλλογή τους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι φυσικοχημικές συνθήκες κατά την κομποστοποίηση είναι παρόμοιες τόσο στην υγρή όσο και στη στερεή φάση. Επομένως, το pH στα στραγγίσματα παρουσιάζει την ίδια εξέλιξη με αυτή του υποστρώματος με τις τιμές να αυξάνονται κατά τα αρχικά στάδια ενώ μετέπειτα τείνουν προς ουδέτερες τιμές. Η συγκέντρωση του BOD₅ στο αρχικό δείγμα στραγγισμάτων παρουσιάστηκε αρκετά υψηλό και με εύρος τιμών 51.0–72.7 g l⁻¹. Υψηλές τιμές BOD₅ μέχρι και 71 g l⁻¹ έχουν αναφερθεί και από τους Trujillo et al. (2006) σε στραγγίσματα που προκύπτουν από την αερόβια βιολογική επεξεργασία ιλύος από ΜΕΛ. Αξίζει να σημειωθεί ότι το αρχικό οργανικό φορτίο παρουσιάζεται αρκετά υψηλό συγκριτικά τόσο με τα στραγγίσματα που παράγονται στους ΧΥΤΑ, 0.5-1.0 g l⁻¹ (Zhang et al., 2005; Rivas et al., 2004), όσο και με τα στραγγίσματα που παράγονται κατά την κομποστοποίηση αστικών οργανικών αποβλήτων (3.0-3.5 g l⁻¹) (Iyengar and Bhave, 2006). Κατά την εξέλιξη της διεργασίας στους πειραματικούς κύκλους κομποστοποίησης τα οργανικά ενδιάμεσα προϊόντα υπόκεινται σε πλήρη βιοξείδωση σε CO₂, ενώ οι ενώσεις οι οποίες είναι μη βιοαποδομήσιμες ή λιγότερο επιδεκτικές σε συνθήκες αποδόμησης, συσσωρεύονται. Επομένως, η μικροβιακή δραστηριότητα και το απαιτούμενο οξυγόνο μειώνεται βαθμιαία κατά τα εξελικτικά στάδια της διεργασίας με το BOD₅ να παρουσιάζει φθίνουσα τάση και προς το τέλος της διεργασίας η συγκέντρωση του στα στραγγίσματα κυμαίνεται μεταξύ 9.0 και 16.8 g l⁻¹. Η συνολική αυτή μείωση της συγκέντρωσης του BOD₅ αντιστοιχεί στο 82.4, 77.2, 79.7 και 77.0% της αρχικής του τιμής για τον 1^ο, 2^ο, 3^ο και 4^ο πειραματικό κύκλο αντίστοιχα.

Η συγκέντρωση των αμμωνιακών και των νιτρικών στα στραγγίσματα ακολουθούν την ίδια εξέλιξη με αυτή του υποστρώματος υποδεικνύοντας ότι υπήρξε σωστός έλεγχος και παρακολούθηση των διεργασιών καθότι οι συνθήκες ευνοούν τη διεξαγωγή της νιτροποίησης. Η συγκέντρωση των αμμωνιακών ιόντων στα παραγόμενα στραγγίσματα, εμφανίζει απότομη αύξηση κατά τις πρώτες ημέρες της κομποστοποίησης με μέγιστες τιμές 236-3004 mg l⁻¹ ενώ μετέπειτα οι συγκεντρώσεις μειώνονται αισθητά και προς το τέλος των διεργασιών κυμαίνονται μεταξύ 32.6 - 290.8 mg l⁻¹. Οι συγκεντρώσεις των νιτρικών ιόντων στα στραγγίσματα παρουσιάζουν σημαντική αύξηση κυρίως μετά το θερμόφιλο στάδιο της διεργασίας όπου και ευνοείται η διεργασία της νιτροποίησης στο υπόστρωμα. Προς το τέλος της κομποστοποίησης οι συγκεντρώσεις των νιτρικών ιόντων λαμβάνουν τιμές μεταξύ 260 - 3043 mg l⁻¹. Πρέπει να επισημανθεί ότι στην περίπτωση του 3^{ου} πειραματικού κύκλου κομποστοποίησης όπου έγινε η προσθήκη φυσικού ζεόλιθου παρατηρούνται οι μικρότερες συγκεντρώσεις στα αμμωνιακά και τα νιτρικά ιόντα στα στραγγίσματα. Αυτό οφείλεται στη δέσμευση των αμμωνιακών τόσο στο

υπόστρωμα όσο και στα στραγγίσματα με αποτέλεσμα τον περιορισμό της διεργασίας της νιτροποίησης (Liu and Lo, 2001).

Οι συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb και Zn) στα στραγγίσματα είναι χαμηλές τόσο στα αρχικά στάδια όσο και προς το τέλος των διεργασιών. Αναλυτικότερα, το Cd παρουσιάζει τιμές μικρότερες των 0.002 mg l^{-1} σε όλους τους πειραματικούς κύκλους ενώ σύμφωνα με τους Déportes et al. (1995) κατά την κομποστοποίηση υλός η συγκέντρωση Cd στα στραγγίσματα κυμαίνεται από $0.014\text{-}0.100 \text{ mg l}^{-1}$ και κατά τη συγκομποστοποίηση υλός με αστικά οργανικά απορρίμματα η συγκέντρωση στα στραγγίσματα σημειώνεται ίση με 0.170 mg l^{-1} . Οι συγκεντρώσεις του Cr, Ni και του Pb στα παραγόμενα στραγγίσματα, εμφανίζονται μικρότερες των 0.08 mg l^{-1} , 0.045 mg l^{-1} και 0.059 mg l^{-1} αντίστοιχα ενώ με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία κατά τη συγκομποστοποίηση υλός και αστικών απορριμμάτων η συγκέντρωση του Cr στα στραγγίσματα είναι ίση με 0.100 mg l^{-1} , του Ni ίση με 0.300 mg l^{-1} και του Pb μεταξύ $0.010\text{-}0.300 \text{ mg l}^{-1}$ (Déportes et al., 1995). Όσον αφορά το Zn η συγκέντρωσή του στα στραγγίσματα των τεσσάρων πειραματικών κύκλων κυμαίνεται μεταξύ $0.199\text{-}2.130 \text{ mg l}^{-1}$ ενώ σύμφωνα με τους Krogmann and Woyczechowski (2000) το εύρος τιμών του Zn κατά την κομποστοποίηση διαφορετικών οργανικών αποβλήτων είναι $0.011\text{-}2.400 \text{ mg l}^{-1}$. Τέλος, η συγκέντρωση του Cu στα παραγόμενα στραγγίσματα είναι μεταξύ $0.082\text{-}0.243 \text{ mg l}^{-1}$ και παρουσιάζει παρόμοιο εύρος τιμών με τα στραγγίσματα που προέρχονται από ΧΥΤΑ (Λοϊζίδου et al., 1992).

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα στραγγίσματα στο αρχικό στάδιο των πειραματικών κύκλων παρουσίαζαν απαλό μαύρο χρώμα το οποίο σταδιακά και κατά την εξέλιξη της κομποστοποίησης αποκτούν μια πιο σκούρα απόχρωση. Η αλλαγή αυτή του χρώματος είναι ενδεικτική της παρουσίας χουμικών και φουλβικών ενώσεων καθώς και άλλων σύνθετων ουσιών που χαρακτηρίζονται από μεγάλο μοριακό βάρος, σκούρο χρωματισμό και υδρόφιλες οργανικές ιδιότητες (Λοϊζίδου et al., 1992).

Παρότι οι συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων είναι χαμηλές διαπιστώνεται ότι τα στραγγίσματα είναι επιβαρυνμένα με υψηλό οργανικό και ανόργανο φορτίο και χρήζουν κατάλληλης επεξεργασίας πριν την τελική τους απόθεση (EEC Council Directive, 1991). Παρότι οι παραγόμενες ποσότητες των στραγγισμάτων είναι περιορισμένες και παρουσιάζονται κυρίως κατά τα πρώτα στάδια της λειτουργίας της διεργασίας, κρίνεται αναγκαία η επεξεργασία αυτών πριν την τελική τους απόρριψη ώστε να αποφευχθούν ενδεχόμενες επιπτώσεις στο περιβάλλον. Η ανακύκλωσή τους στον βιοαντιδραστήρα για τη ρύθμιση της υγρασίας του υποστρώματος κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης έχει προταθεί από τους Schaub and Leonard, 1996. Στην παρούσα έρευνα δεν έγινε επαναφορά των στραγγισμάτων στον βιοαντιδραστήρα αλλά μελλοντικά θα μπορούσε να μελετηθεί εφόσον παρατηρήθηκε η απαίτηση προσθήκης νερού κατά την ανάπτυξη των διεργασιών.

6.4. Ποιότητα παραγόμενου κόμποστ

Στην ενότητα αυτή γίνεται η ανάλυση και η αξιολόγηση της ποιότητας του παραγόμενου κόμποστ που προέκυψε από τους πειραματικούς κύκλους με τη χρήση του συστήματος κομποστοποίησης (ενότητα 6.2) και ύστερα από την ωρίμανση του υλικού κατά την τοποθέτησή του σε κατάλληλη διάταξη τύπου «σειραδιών» 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).

6.4.1. 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 για το κόμποστ αλλά και για το αρχικό υπόστρωμα από το οποίο προέκυψε, παρατίθενται στον **Πίνακα 6.14** για τις τέσσερις πειραματικές εφαρμογές. Εκτός των ποσοτικών παραμέτρων περιλαμβάνονται και ποιοτικές παράμετροι αξιολόγησης του τελικού προϊόντος όπως η οσμή και το χρώμα.

6.4.1.1. 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 (Díaz et al., 2002). Τα αρχικά οργανικά μίγματα που αποτέλεσαν το υλικό τροφοδοσίας των πειραματικών κύκλων, παρουσίαζαν έντονη δυσοσμία και επικρατέστερες αποχρώσεις αυτές του μαύρου και του κίτρινου οι οποίες είναι χαρακτηριστικές της ιλύος και των γεωργικών υπολειμμάτων αντίστοιχα (Roca-Pérez et al., 2009). 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 συνέθεταν το οργανικό μίγμα, ενώ στις περιπτώσεις του 3^{ου} και 4^{ου} κόμποστ είναι ορατός ο ζεόλιθος και ο περλίτης αντίστοιχα που χρησιμοποιήθηκαν ως πρόσθετα υλικά.

Πίνακας 6.14: Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του παραγόμενου κόμποστ και του αρχικού υποστρώματος (μίγματος) για κάθε πειραματικό κύκλο

Παράμετρος	1 ^{ος} Κύκλος		2 ^{ος} Κύκλος		3 ^{ος} Κύκλος		4 ^{ος} Κύκλος	
	Υπόστρωμα	Κόμποστ 1	Υπόστρωμα	Κόμποστ 2	Υπόστρωμα	Κόμποστ 3	Υπόστρωμα	Κόμποστ 4
Αγρονομικοί Παράμετροι								
Υγρασία (% wb)	65.80 (1.80)	36.10 (1.90)	59.30 (1.62)	36.20 (2.15)	60.20 (1.63)	44.30(2.33)	68.20 (1.86)	39.50 (2.08)
Ξηρή Ουσία (% wb)	34.20 (1.80)	63.90 (1.90)	40.70 (1.62)	63.80 (2.15)	39.80 (1.63)	55.70 (2.33)	31.80 (1.86)	60.50 (2.08)
pH	6.85 (0.06)	7.31 (0.05)	6.90 (0.02)	7.28 (0.03)	6.87 (0.01)	7.03 (0.07)	6.40 (0.11)	7.30 (0.01)
TOC (% dm)	48.04 (2.40)	33.81 (1.60)	47.46 (2.37)	33.84 (1.74)	40.38 (2.82)	23.80 (0.89)	46.32 (2.32)	31.29 (1.79)
OM (% dm)	91.28 (4.56)	65.93 (3.04)	90.17 (4.51)	64.30 (3.30)	76.72 (5.35)	54.99 (1.69)	88.00 (4.4)	59.45 (3.41)
C/N	16.74 (0.23)	10.63 (0.38)	19.61 (0.11)	11.87 (0.09)	15.24 (0.61)	10.84 (0.41)	8.07 (0.24)	6.11 (0.41)
NO ₃ ⁻ (mg kg ⁻¹ dm)	26.8 (2.1)	1286 (110)	21.2 (1.6)	998 (75)	20.1 (1.9)	388 (37)	4.3 (0.3)	3257 (213)
NH ₄ ⁺ (mg kg ⁻¹ dm)	143.4 (11.8)	302.6 (25.40)	193.4 (28.0)	207.73 (11.54)	56.1 (5.6)	38.65 (3.87)	1235 (94)	304.10 (18.58)
NH ₄ ⁺ /NO ₃ ⁻	5.34 (0.11)	0.24 (0.01)	9.14 (0.43)	0.21 (0.02)	2.80 (0.30)	0.01 (0.0)	287.26 (23.34)	0.09 (0.0)
N _{org} (% N dm) ^(α)	99.40 (0.43)	95.00 (0.78)	99.11 (0.69)	95.77 (0.87)	99.71 (0.24)	98.40 (1.20)	97.84 (0.32)	93.04 (1.18)
N (% dm)	2.87 (0.14)	3.18 (0.14)	2.42 (0.12)	2.85 (0.15)	2.65 (0.21)	2.67 (0.10)	5.74 (0.39)	5.12 (0.27)
P (P ₂ O ₅ % dm)	0.61 (0.13)	0.76 (0.01)	0.74 (0.14)	0.93 (0.1)	0.56 (0.09)	0.79 (0.01)	3.68 (0.49)	4.23 (0.06)
K (K ₂ O % dm)	2.58 (0.23)	3.01 (0.26)	3.11 (0.28)	3.95 (0.52)	2.38 (0.20)	3.21 (0.37)	0.46 (0.06)	0.54 (0.01)
Ca (CaO % dm)	3.73 (0.90)	4.71 (0.87)	4.37 (0.99)	5.48 (1.35)	4.41 (0.95)	5.75 (1.41)	4.13 (0.86)	4.71 (1.13)
Mg (MgO % dm)	1.82 (0.13)	2.13 (0.32)	1.82 (0.13)	2.09 (0.31)	1.52 (0.12)	2.02 (0.28)	0.82 (0.05)	0.93 (0.14)
Βαρέα Μέταλλα								
Cd (mg kg ⁻¹ dm)	0.41 (0.09)	0.47 (0.08)	0.44 (0.09)	0.60 (0.1)	0.58 (0.10)	0.73 (0.12)	0.48 (0.01)	0.55 (0.09)
Cr (mg kg ⁻¹ dm)	7.38 (0.65)	8.15 (1.60)	9.70 (1.09)	11.19 (1.6)	10.69 (0.86)	13.52 (1.60)	12.94 (1.03)	13.01 (1.60)
Cu (mg kg ⁻¹ dm)	57.40 (6.82)	64.23 (6.05)	42.80 (4.66)	54.17 (5.74)	67.40 (6.55)	82.47 (9.06)	98.40 (7.34)	110.94 (8.74)
Ni (mg kg ⁻¹ dm)	9.27 (0.51)	10.85 (0.42)	10.70 (0.63)	11.97 (0.50)	15.20 (0.96)	17.38 (0.76)	9.77 (0.59)	10.06 (0.49)
Pb (mg kg ⁻¹ dm)	30.21 (4.33)	34.04 (3.78)	16.32 (2.30)	20.03 (0.79)	29.84 (3.71)	38.16 (1.61)	21.92 (2.67)	25.83 (0.77)
Zn (mg kg ⁻¹ dm)	116.26 (18.45)	132.84 (8.44)	85.26 (12.79)	109.24 (5.06)	98.43 (13.03)	118.23 (2.85)	593.72 (40.21)	730.19 (44.08)

^(α) Ο προσδιορισμός του οργανικού αζώτου προκύπτει από τη διαφορά του ολικού και του ανόργανου αζώτου. Ως ανόργανο άζωτο θεωρείται το άθροισμα των αμμωνιακών και των νιτρικών δεδομένου ότι η συγκέντρωση των υπόλοιπων ανόργανων μορφών, όπως τα νιτρώδη, είναι αμελητέα. (Paredes et al., 2002; Beck-Friis et al., 2001)

6.4.1.2. 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; Kapetanios 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 Kapetanios 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 %.

Όπως παρατηρείται από τη διεθνή βιβλιογραφία καθώς και από ενδεικτικές προδιαγραφές για την περιεχομένη υγρασία του τελικού προϊόντος υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση όσον αφορά στη βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρασία του τελικού κόμποστ με πιο σύνηθες το εύρος τιμών μεταξύ 35 έως 45%. Το παραγόμενο κόμποστ κατά τη διεργασία των τεσσάρων πειραματικών κύκλων κομποστοποίησης εμπίπτει στο προτεινόμενο εύρος, παρουσιάζοντας τιμές ίσες με 36.10, 36.20, 44.30 και 39.50% για το 1^ο, 2^ο, 3^ο και 4^ο κόμποστ αντίστοιχα (**Πίνακα 6.14**). Η μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε υγρασία παρουσιάζεται στο κόμποστ του 3^{ου} πειραματικού κύκλου και ενδέχεται να οφείλεται στην παρουσία ζεόλιθου εξαιτίας της εκρόφησης ποσοτήτων νερού κατά την ωρίμανση του υποστρώματος, ποσότητα η οποία απορροφήθηκε κατά τη θερμόφιλη φάση της διεργασίας της κομποστοποίησης (Villaseñor et al., 2011).

6.4.1.3. 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 έδαφος 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 των τεσσάρων πειραματικών κύκλων κομποστοποίησης το τελικό προϊόν εμφανίζεται να έχει ουδέτερες τιμές. Αναλυτικότερα το pH λαμβάνει τιμές ίσες με 7.31, 7.28, 7.03 και 7.30 για το 1^ο, 2^ο, 3^ο και 4^ο κόμποστ (Πίνακα 6.14). Παρόμοια αποτελέσματα παρουσιάζονται από τους Roca-Pérez et al. (2009) κατά την κομποστοποίηση ιλύος με γεωργικά υπολείμματα σε σύστημα αεριζόμενων στατικών σωρών με το pH στο αρχικό υπόστρωμα να κυμαίνεται σε ουδέτερο προς αλκαλικό περιβάλλον ενώ το τελικό προϊόν εμφανίζει pH ίσο με 7.07 και 7.09. Επιπλέον, ο Manios (2004) σημειώνει τελικό pH ίσο με 7.50 ύστερα από την αερόβια επεξεργασία ιλύος με φύλλα ελιάς σε σύστημα αναστρεφόμενων σειραδιών, ενώ οι Li et al. (2001) κατά την κομποστοποίηση ιλύος με πριονίδι και κοπριά παρατηρούν ότι το τελικό pH λαμβάνει τιμή ίση με 6.85 με αρχικό pH υποστρώματος ίσο με 8.18. Ουδέτερες τιμές pH για παρόμοιο υλικό τροφοδοσίας παρουσιάζεται και από άλλους ερευνητές όπως οι Wong and Fang (2000) και Zorpas et al. (2000b) ενώ αρκετές είναι οι περιπτώσεις στις οποίες το ώριμο κόμποστ εμφανίζει αλκαλικό pH (Cofie et al., 2009; Guerra-Rodríguez et al., 2000; Levi-Minzi et al., 1986; Bangar et al., 1988).

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.

6.4.1.4. **Οργανική ουσία**

Η περιεκτικότητα του κόμποστ σε οργανική ουσία είναι σημαντική παράμετρος αξιολόγησης της ποιότητάς του διότι αποτελεί βασικό δομικό στοιχείο των οργανισμών και του εδάφους. Η οργανική ουσία αποτελεί πηγή τροφής για την πανίδα του εδάφους, συμβάλλει στη βιοποικιλότητά του ενεργώντας ως δεξαμενή θρεπτικών ουσιών όπως το άζωτο, ο φώσφορος κ.α. ενώ ταυτόχρονα αποτελεί τον κύριο συντελεστή της γονιμότητάς και της παραγωγικότητας του εδάφους (EC, 2005). Η οργανική ουσία βελτιώνει τόσο τα φυσικά (π.χ. πορώδες, υδατοϊκανότητα, δομή, μηχανική σύσταση) όσο και τα χημικά (π.χ. ικανότητα ιοντοεναλλαγής, ρύθμιση της διαθεσιμότητας θρεπτικών συστατικών) χαρακτηριστικά των εδαφών (Schroeder, 1984). Στην περίπτωση των αγροτικών εδαφών η οργανική ουσία κατακρατεί τα χημικά λιπάσματα που προστίθενται με τη διαμόρφωση χημικών δεσμών μεταξύ των σύμπλοκων οργανικών ενώσεων της οργανικής ουσίας (π.χ. χηλικές ενώσεις) και των ανόργανων ιόντων των χημικών λιπασμάτων (Πολυζόπουλος, 1976). Επομένως, η οργανική ουσία προστατεύει τα εδάφη από την απώλεια θρεπτικών στοιχείων λόγω έκπλυσής τους ενώ παράλληλα τα θρεπτικά συστατικά αποδίδονται σταδιακά και ισόρροπα στο εδαφικό διάλυμα μέσω του οποίου τρέφεται το ριζικό σύστημα και αναπτύσσονται τα φυτά. Συνεπώς ο εμπλουτισμός του εδάφους με κόμποστ με υψηλή οργανική ουσία δύναται να συνεισφέρει ουσιαστικά στη βελτίωση των φυσικοχημικών ιδιοτήτων των εδαφών.

Στην περίπτωση των πειραματικών εφαρμογών η οργανική ουσία λαμβάνει τιμές ίσες με 65.93, 64.30, 54.99 και 59.45% dm για το 1^ο, 2^ο, 3^ο και 4^ο κόμποστ αντίστοιχα (**Πίνακα 6.14**) και εμφανίζεται σε υψηλά επίπεδα συγκριτικά με τις βιβλιογραφικά αναφερόμενες τιμές. Αναλυτικότερα, οι Mor et al. (2006) παρουσιάζουν εύρος τιμών της οργανικής ουσίας μεταξύ 39.1-52.1% σε κόμποστ από τροφικά υπολείμματα ενώ οι Ingelmo et al. (1998) ίσο με 57.1% σε κόμποστ προερχόμενο από αστικά στερεά απόβλητα. Ενδεικτικό εύρος τιμών της οργανικής ουσίας σε κόμποστ από πράσινα κηπευτικά απόβλητα και οικιακά απορρίμματα κυμαίνεται από 15-25% και 35-75% αντίστοιχα (DEPA, 2003). Σύμφωνα με την Ε.Ε., για την απονομή κοινοτικού οικολογικού σήματος σε βελτιωτικά εδάφους, ορίζεται ως κατώτατο όριο της οργανικής ουσίας σε κόμποστ ίσο με 20% (Απόφαση 2006/799/ΕΚ). Το ίδιο όριο τίθεται στις προδιαγραφές διαφόρων ευρωπαϊκών χωρών όπως η Αυστρία, το Βέλγιο και η Ιρλανδία (EPA, 2009; Österreichische bundesregierung, 2001; VLACO, 1995) ενώ στην περίπτωση της Πολωνίας το κατώτερο όριο είναι αυστηρότερο και ίσο με 40% (Hogg et al., 2009). Επιπλέον σύμφωνα με τις προδιαγραφές της Αυστραλίας η οργανική ουσία συνιστάται μεταξύ 55-75% ενώ σύμφωνα με τους Stutz et al. (2003) το αντίστοιχο εύρος τίθεται μεταξύ 40-70%. Τέλος, οι Diaz et al. (2002) ορίζουν ενδεικτικές εμπορικές προδιαγραφές ποιότητας του τελικού προϊόντος με ελάχιστη περιεκτικότητα οργανικής ουσίας ίση με 50% και 40% για κόμποστ κλάσης Α και Β αντίστοιχα. Σύμφωνα με τα παραπάνω το κόμποστ το οποίο προκύπτει από τις πειραματικές εφαρμογές παρουσιάζει υψηλή περιεκτικότητα σε οργανική ουσία και δύναται να βελτιώσει τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του εδάφους κατά την εναπόθεσή του.

6.4.1.5. **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 Ολοκλήρωμένης 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 6.15 παρουσιάζονται προτεινόμενοι λόγοι C/N στο τελικό προϊόν από διάφορους ερευνητές.

Πίνακας 6.15: 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)

Στους τέσσερις πειραματικούς κύκλους κομποστοποίησης η αναλογία C/N στο τελικό προϊόν είναι ίση με 10.63, 11.87, 10.84 και 6.11 για το κόμποστ που προκύπτει από την 1^η, 2^η, 3^η και 4^η εφαρμογή αντίστοιχα (Πίνακα 6.14). Συναφές εύρος τιμών C/N έχει παρατηρηθεί και από άλλους ερευνητές για παρόμοιο υλικό τροφοδοσίας. Αναλυτικότερα, ο Μανιός (2004), βρήκε τελικό λόγο C/N ίσο με 10.50 κατά τη συγκομποστοποίηση ιλύος με φυτικά υπολείμματα (33% και 66% v/v) ενώ σε κόμποστ με χρήση ιλύος και φύλλα ελιάς (40% και 60% v/v) παρατηρήθηκε λόγος C/N ίσος με 11.75. Οι Wei και Liu (2005) μελέτησαν τη συγκομποστοποίηση ιλύος με υπολείμματα ξυλείας, όπου και προέκυψαν λόγοι ίσοι με 10.1, 9.7 και 9.4 για τρεις διαφορετικούς πειραματικούς κύκλους ενώ οι Jouraiphry et al. (2005) σημείωσαν τελικό λόγο ίσο με 12.0 κατά την αερόβια βιολογική επεξεργασία ιλύος με πράσινα απόβλητα (αναλογία 2:1 v/v).

Τέλος οι Levy and Taylor (2003) στο τελικό κόμποστ από συγκομποστοποίηση ιλύος με αστικά απορρίμματα υπολόγισαν λόγο C/N ίσο με 6.7.

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, το κόμποστ προερχόμενο από τον 1^ο, 2^ο και 3^ο κύκλο με εύρος αναλογίας C/N ίσο με 10.63 - 11.87 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 6.16**.

Πίνακας 6.16: 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)

Στην περίπτωση του παραγόμενου κόμποστ από τον 4^ο κύκλο, όπου χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά ιλύς ως οργανικό υπόστρωμα, η αναλογία C/N παρουσιάζεται χαμηλή και ίση με 6.11 και η χρήση του δύναται να διαμορφώσει τοξικές συνθήκες στους μικροοργανισμούς λόγω της περίσσειας αζώτου ενώ παράλληλα υπάρχει το ενδεχόμενο

ρύπανσης τόσο των επιφανειακών όσο και των υπόγειων υδατικών οικοσυστημάτων μέσω των διεργασιών επιφανειακής απορροής και διήθησης του ανόργανου αζώτου (Antonious et al., 2008; Amlinger et al., 2003; Brink, 1995; Iglesias-Jimenez and Alvarez, 1993).

6.4.1.6. 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 εξετέλεσθησαν 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.

Οι συγκεντρώσεις των αμμωνιακών στο παραγόμενο κόμποστ είναι ίσες με 302.6, 207.7, 38.65 και 304.1 mg kg⁻¹ dm για τον 1^ο, 2^ο, 3^ο και 4^ο κύκλο αντίστοιχα (Πίνακα 6.14). Ίδιας τάξης μεγέθους συγκεντρώσεις αμμωνιακών σημειώνονται και από τους Bernal et al. (1998a) κατά τη συγκομποστοποίηση λύου με διαφορετικές ροές οργανικών αποβλήτων. 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 mg kg⁻¹ dm, ενώ κατά τους Bary et al., (2002) το όριο είναι ίσο με 500 mg kg⁻¹ 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 mg kg⁻¹ dm, ως ώριμο για εύρος τιμών μεταξύ 75-500 mg kg⁻¹ dm και ως μη ώριμο για τιμές μεγαλύτερες του 500 mg kg⁻¹ dm (TMEEC, 2002; CCQC, 2001). Επομένως, παρατηρείται ότι οι συγκεντρώσεις των αμμωνιακών στο παραγόμενο κόμποστ κατά τις διεργασίες των τεσσάρων πειραματικών κύκλων είναι συνεπείς με τις προαναφερόμενες οριακές τιμές όπως αυτές αναφέρονται στη βιβλιογραφία. Πρέπει να σημειωθεί ότι η μικρότερη συγκέντρωση αμμωνιακών παρουσιάζεται στην περίπτωση του 3^{ου} κόμποστ. Η διαφορά αυτή οφείλεται στην προσθήκη ζεόλιθου 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.

Οι συγκεντρώσεις των νιτρικών στο παραγόμενο κόμποστ είναι ίσες με 1286, 998, 388 και 3257 mg kg⁻¹ dm για τον 1^ο, 2^ο, 3^ο και 4^ο πειραματικό κύκλο αντίστοιχα (Πίνακα 6.14). 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 αυτή του 3^{ου} κύκλου αποκλίνουν σημαντικά από το ανώτατο ενδεικτικό όριο τιμών. Συνεπώς, η παρουσία των νιτρικών κατά την εναπόθεση του κόμποστ στο έδαφος δύναται να επιβαρύνει το περιβάλλον μέσω της εκχύλισης θρεπτικών συστατικών (π.χ. επιφανειακή απορροή και διήθηση των νιτρικών που αποτελεί τον κυρίαρχο παράγοντα διαμόρφωσης ευτροφικών συνθηκών στα υδάτινα οικοσυστήματα) (Luo et al., 2010). Πρέπει να σημειωθεί ότι ο βαθμός διαθεσιμότητας του αζώτου του κόμποστ στα φυτά όσο και των απωλειών του στο περιβάλλον εξαρτάται από τη δυναμική του αζώτου η οποία περιγράφεται από τις διεργασίες της ανοργανοποίησης και ακινητοποίησής του κατά την εναπόθεση του κόμποστ στο έδαφος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το μεγαλύτερο μέρος του άζωτο του παραγόμενου κόμποστ βρίσκεται σε οργανική μορφή όπως επισημαίνεται και από τους Esteller et al. (2009) και Tittarelli et al. (2007). Αναλυτικότερα η περιεκτικότητα του οργανικού αζώτου στο κόμποστ ως προς το συνολικό άζωτο είναι ίση με 95.00, 95.77, 98.40 και 93.04% dm για το 1^ο, 2^ο, 3^ο και 4^ο κόμποστ αντίστοιχα (Πίνακα 6.14). Επομένως, 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).

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 $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ίση με 0.24, 0.21, 0.01 και 0.09 για την 1^η, 2^η, 3^η και 4^η εφαρμογή αντίστοιχα. Οι αναλογίες $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ των προϊόντων του 3^{ου} και 4^{ου} κύκλου εμπίπτουν στο εύρος τιμών που ορίζεται για το ώριμο κόμποστ ενώ οι αναλογίες του 1^{ου} και 2^{ου} κόμποστ είναι ελαφρώς μεγαλύτερες από το αυστηρό όριο που θέτουν οι Bernal et al. (1998a) για καλής ποιότητας κόμποστ. Αξίζει να σημειωθεί ότι σύμφωνα με τους Jouraiphy et al. (2005), το παραγόμενο κόμποστ, από ιλύ και δασοκομικά υπολείμματα, με αναλογία C/N ίση με 12 και $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ίση με 0.24 μπορεί να θεωρηθεί ως ώριμο. Παρόμοιες σχέσεις με αυτές που παρουσιάζουν οι Jouraiphy et al. (2005) παρατηρούνται στο κόμποστ του 1^{ου} και 2^{ου} κύκλου. Υψηλότερες αναλογίες $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ από αυτές που ορίζουν οι Bernal et al. (1998a) παρουσιάζουν και οι Fernández et al. (2010) κατά την κομποστοποίηση ιλύος με γεωργικά υπολείμματα σε κλειστού τύπου κομποστοποιητή με τη σχέση $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ να λαμβάνει τιμές ίσες 0.39 και 1.55.

6.4.1.7. 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 καθότι 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 αλλά χρησιμοποιείται 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 ή φώσφορο) παρουσιάζουν μειωμένη θρεπτική αξία με αποτέλεσμα είτε να χρειάζονται μεγάλες ποσότητες χρήσης αυτού είτε να γίνεται η συμπλήρωση των αναγκαίων ποσοτήτων από χημικά λιπάσματα. 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 συναρτήσεων του χρόνου. Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα αναφορικά με την περιεκτικότητα του παραγόμενου κόμποστ σε άζωτο, φώσφορο, κάλιο, μαγνήσιο και ασβέστιο (Πίνακα 6.14) καθώς και σχετική βιβλιογραφία με ενδεικτικές τιμές των μακροστοιχείων αυτών στο κόμποστ. Πρέπει να τονισθεί ότι η περιεκτικότητα σε μακροστοιχεία στο τελικό προϊόν παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις εξαρτώμενη κυρίως από την επεξεργαζόμενη οργανική πρώτη ύλη 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. 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. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως το παραγόμενο κόμποστ που προέκυψε από τη χρήση του συστήματος κομποστοποίησης εμφανίζει περιεκτικότητα σε οργανικό άζωτο με εύρος τιμών 93.0-98.4 % του ολικού αζώτου, τιμές οι οποίες εμπίπτουν στις βιβλιογραφικά απαιτούμενες. Το περιεχόμενο ολικό άζωτο του κόμποστ που προέκυψε από τους τέσσερις πειραματικούς κύκλους καταγράφεται στο 3.18, 2.85, 2.67 και 5.12% dm για το 1^ο, 2^ο, 3^ο και 4^ο κόμποστ αντίστοιχα (Πίνακα 6.14). Τη μέγιστη τιμή παρουσιάζει το τέταρτο κόμποστ καθότι ως οργανικό υλικό τροφοδοσίας χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά ιλύς (σε συνδυασμό με περλίτη) η οποία είναι πλούσια σε αζωτούχες ενώσεις. 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 Vogtmann 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%. Σύμφωνα με τους Αγγελάκης et al. (2005) και Grigatti et al. (2004) η κομποστοποιημένη ιλύς περιέχει άζωτο με τιμές που κυμαίνονται από 1.0-2.4% και 1.0-1.6% αντίστοιχα ενώ ο Μανίος (2004) μέτρησε το ολικό άζωτο ίσο με 2.9% dm σε κόμποστ προερχόμενο από ιλύ και «πράσινα» απορρίμματα. 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 Σύστημα 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). Από τα παραπάνω συμπεραίνεται μια γενική συμφωνία ως προς την κατώτερη ενδεικτική τιμή ολικού αζώτου στο κόμποστ, η οποία όμως δεν ισχύει για την ανώτερη τιμή. 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. Σύμφωνα με τις οριακές τιμές η περιεκτικότητα του αζώτου στην περίπτωση του τέταρτου κόμποστ δύναται να παρουσιάσει περίσσεια αζώτου κατά την εναπόθεσή του στο έδαφος. Πρέπει όμως να ληφθεί υπόψη ότι το περιεχόμενο αζώτου 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⁽¹⁴⁾, 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.

Φώσφορος

Ο φώσφορος αποτελεί το δεύτερο μακροστοιχείο κατά σειρά σπουδαιότητας μετά το άζωτο, αναφορικά με την ανάπτυξη των φυτικών οργανισμών. Η σημαντικότητα του έγκειται στο γεγονός ότι ο φώσφορος παρουσιάζεται σε όλα τα ζώντα κύτταρα και χρησιμοποιείται από τα φυτά για τη σύνθεση των νουκλεϊκών οξέων (DNA και RNA). Επιπλέον, η περιεκτικότητα τόσο του φωσφόρου όσο και του αζώτου αποτελούν βασικό ρυθμιστικό παράγοντα όσον αφορά στη λήψη αποφάσεων αναφορικά με την απαίτηση σε συμπληρωματικά λιπάσματα στα αρόσιμα εδάφη. Όπως φαίνεται στον **Πίνακα 6.14** η περιεκτικότητα του φωσφόρου στο παραγόμενο κόμποστ είναι ίση με 0.76, 0.93, 0.79 και 4.23% P₂O₅ για το 1^ο, 2^ο, 3^ο και 4^ο κόμποστ αντίστοιχα. Για παρόμοιο υλικό τροφοδοσίας με αυτό των πειραματικών κύκλων οι Roca-Pérez et al. (2009), Manios (2004) και οι Kuchenrither et al. (1985) βρήκαν τιμές ίσες με 0.68, 2.60 και 2.80% P₂O₅ αντίστοιχα, ενώ οι Grigatti et al. (2004) σε κόμποστ προερχόμενο από λύ και δεντροκομικά υπολείμματα παρατήρησαν περιεκτικότητα σε φώσφορο μεταξύ 1.30-1.39% P₂O₅. Σύμφωνα με τους Tittarelli et al. (2007) το εύρος τιμών του φωσφόρου στο κόμποστ κυμαίνεται μεταξύ 1.4-4.6% P₂O₅, ενώ ο Gomez (1998) σε αναλύσεις διαφορετικού κόμποστ από αστικά οργανικά απορρίμματα από διαλογή στην πηγή βρήκε ότι κατά μέσο όρο εμπεριέχουν 0.62% P₂O₅. Τυπικός δείκτης περιεχόμενου φωσφόρου σε κόμποστ από κοπριά σύμφωνα με το Υπουργείο Γεωργίας του Καναδά είναι μεταξύ 1.83- 2.30% P₂O₅ ενώ βάσει των Βελγικών προδιαγραφών η περιεκτικότητα του φωσφόρου πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση του 0.5% P₂O₅ dm (BCMAFF, 1998; VLACO, 1995). Τέλος ενδεικτικές τιμές δίνονται και από τον Faithfull, (2002) με σύνηθες

⁽¹⁴⁾ 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

εύρος τιμών φωσφόρου στο κόμποστ μεταξύ 0.35-1.40% P_2O_5 dm και ως ελάχιστη αποδεκτή τιμή ίση με 0.5% P_2O_5 dm. Επομένως, παρατηρείται ότι η περιεκτικότητα του φωσφόρου στο παραγόμενο κόμποστ είναι κατά κύριο λόγο στο εύρος των βιβλιογραφικά ενδεικτικών ορίων με το τέταρτο κόμποστ να εμφανίζεται σαφέστατα πιο εμπλουτισμένο σε φώσφορο όπως και στην περίπτωση του αζώτου.

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. Στην περίπτωση των τεσσάρων παραγόμενων κόμποστ οι τιμές του περιεχόμενου καλίου είναι ίσες με 3.01, 3.95, 3.21 και 0.54% K_2O dm για το 1^ο, 2^ο, 3^ο και 4^ο κόμποστ αντίστοιχα όπως φαίνεται στον **Πίνακα 6.14**. Ο Manios, (2004) και οι Kuchenrither et al. (1985) σημείωσαν περιεκτικότητα καλίου ίση με 0.59 και 0.48% K_2O dm αντίστοιχα σε κόμποστ λύος ενώ για το ίδιο υλικό υποστρώματος οι Roca-Pérez et al. (2009) και Grigatti et al. (2004) κατέγραψαν τιμές ίσες με 1.15 και 0.83-0.90% K_2O dm αντίστοιχα. Η περιεκτικότητα καλίου σε κόμποστ από αστικά οργανικά απορρίμματα σύμφωνα με τους Hargreaves et al. (2008) λαμβάνουν τιμές μεταξύ 0.12-1.80% K_2O dm ενώ ο Gomez (1998) βρήκε κατά μέσο όρο τιμή ίση με 0.90% K_2O dm σε δείγμα ογδόντα δύο (82) κόμποστ αστικών απορριμμάτων. Σύμφωνα με το τμήμα οικολογίας της πολιτείας της Ουάσινγκτον των ΗΠΑ, κόμποστ οχτώ διαφορετικών περιοχών προερχόμενο από λύ, παρουσίασε εύρος τιμών από 0.01-0.30% K_2O dm με μέση τιμή ίση με 0.17 % K_2O dm (WSDE, 1994), ενώ τυπικές τιμές καλίου κατά τον Alexander (1994) κυμαίνονται από 0.24-0.60% K_2O dm. Επίσης, ενδεικτικές τιμές στην περιεκτικότητα καλίου παρουσιάζει και ο Faithfull (2002) με εύρος τιμών από 0.45-1.80% K_2O dm, ενώ ορίζει ως ελάχιστο ποσοστό ίσο με 0.30% K_2O dm. Τέλος, ως κατώτερο επιτρεπτό όριο προτείνεται ίσο με 1.20% K_2O dm και 0.75% K_2O 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 τους τρεις πρώτους πειραματικούς κύκλους κομποστοποίησης είναι εμπλουτισμένο σε κάλιο λόγω της υψηλής περιεκτικότητας του στην κοπριά και στα φύλλα ζαχαρότευτλων τα οποία χρησιμοποιήθηκαν ως πρώτες ύλες μαζί με την λύ στις συγκεκριμένες πειραματικές εφαρμογές. Αντιθέτως, στον 4^ο πειραματικό κύκλο στον οποίο ως οργανικό υπόστρωμα χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά λύς, το κόμποστ παρουσιάζει χαμηλότερη περιεκτικότητα σε κάλιο και ενδεχομένως να χρειαστεί η χρήση χημικών λιπασμάτων κατά τη διάθεσή του στο έδαφος, λαμβάνοντας υπόψη το είδος της καλλιέργειας και την περιεκτικότητα σε κάλιο στο συγκεκριμένο έδαφος.

Μαγνήσιο

Το μαγνήσιο απαιτείται από τους φυτικούς μικροοργανισμούς σε μικρότερες ποσότητες απ' ότι 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 τους τέσσερις πειραματικούς κύκλους εμφανίζεται ίσο με 2.13, 2.09, 2.02 και 0.93% MgO dm για το 1^ο, 2^ο, 3^ο και 4^ο κόμποστ αντίστοιχα (**Πίνακα 6.14**). Για κομποστοποιημένη λύ οι Manios

(2004) και Kuchenrither et al. (1985) σημειώνουν τιμές ίσες με 1.05 και 0.55% MgO dm αντίστοιχα, ενώ για παρόμοιο υπόστρωμα οι Roca-Pérez et al. (2009) και Grigatti et al. (2004) κατέγραψαν τιμές ίσες με 1.20 και 1.96-2.56% MgO dm αντίστοιχα. Από δεδομένα του τμήματος οικολογίας της πολιτείας της Ουάσινγκτον, κόμποστ προερχόμενο από ιλύ πέντε διαφορετικών περιοχών, παρουσίασε τιμές από 0.08-0.57% MgO dm και μέση τιμή ίση με 0.40% MgO dm (WSDE, 1994). Επιπλέον, 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 στις περισσότερες περιπτώσεις στο ενδεικτικό εύρος τιμών όπως αυτό παρατίθεται από τη βιβλιογραφία. Η χαμηλότερη τιμή στο μαγνήσιο λαμβάνεται στο τέταρτο κόμποστ λόγω της φύσης του προς επεξεργασία υποστρώματος.

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 είναι ίση με 4.71, 5.48, 5.75 και 4.71% CaO dm για το 1^ο, 2^ο, 3^ο και 4^ο κόμποστ αντίστοιχα (Πίνακα 6.14). Αναφορικά με την ποσοστιαία περιεκτικότητα του ασβεστίου σε κομποστοποιημένη ιλύ, το τμήμα οικολογίας της πολιτείας της Ουάσινγκτον μέτρησε εύρος τιμών 1.45-3.89% CaO dm (μέση τιμή 2.52% CaO dm), ο Μανίος (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.

6.4.1.8. Βαρέα μέταλλα

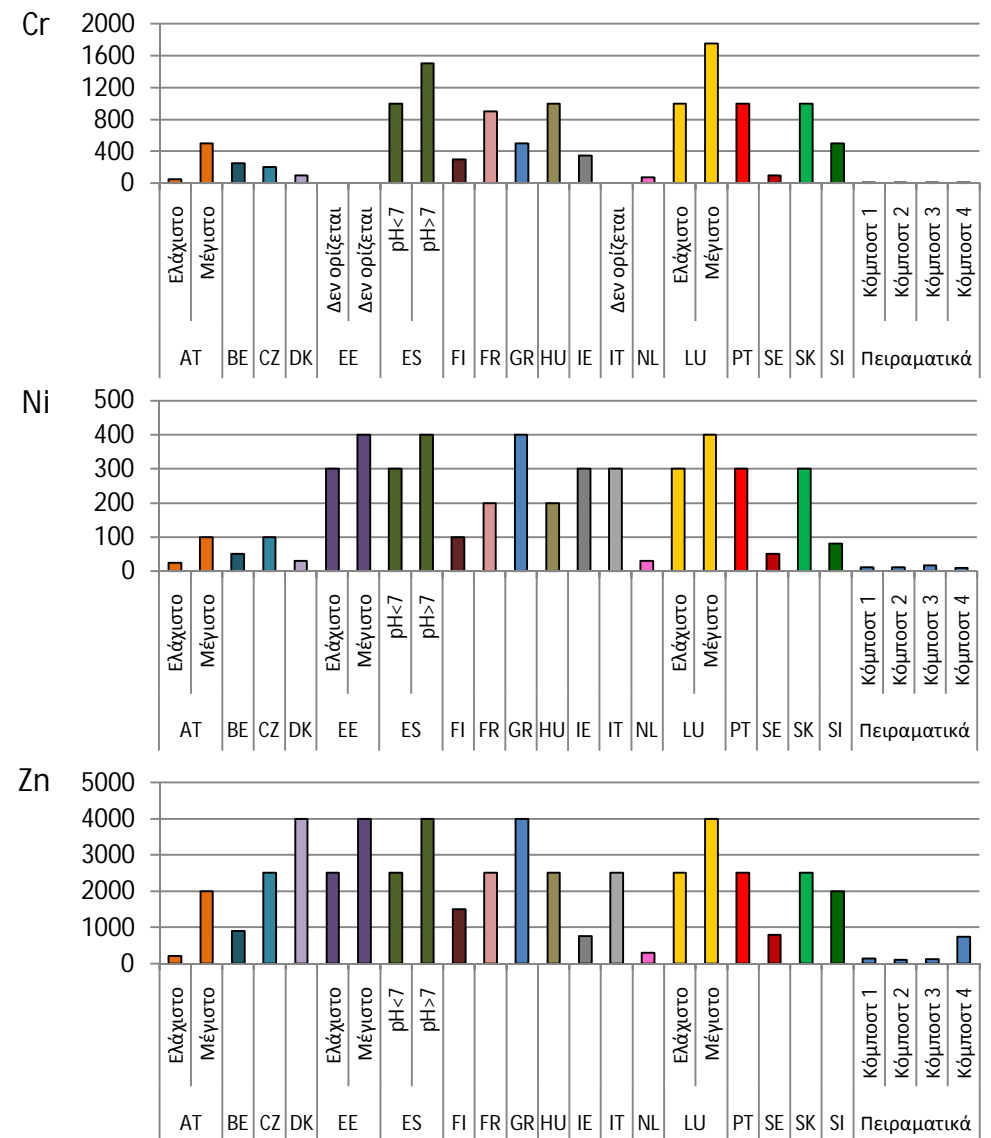
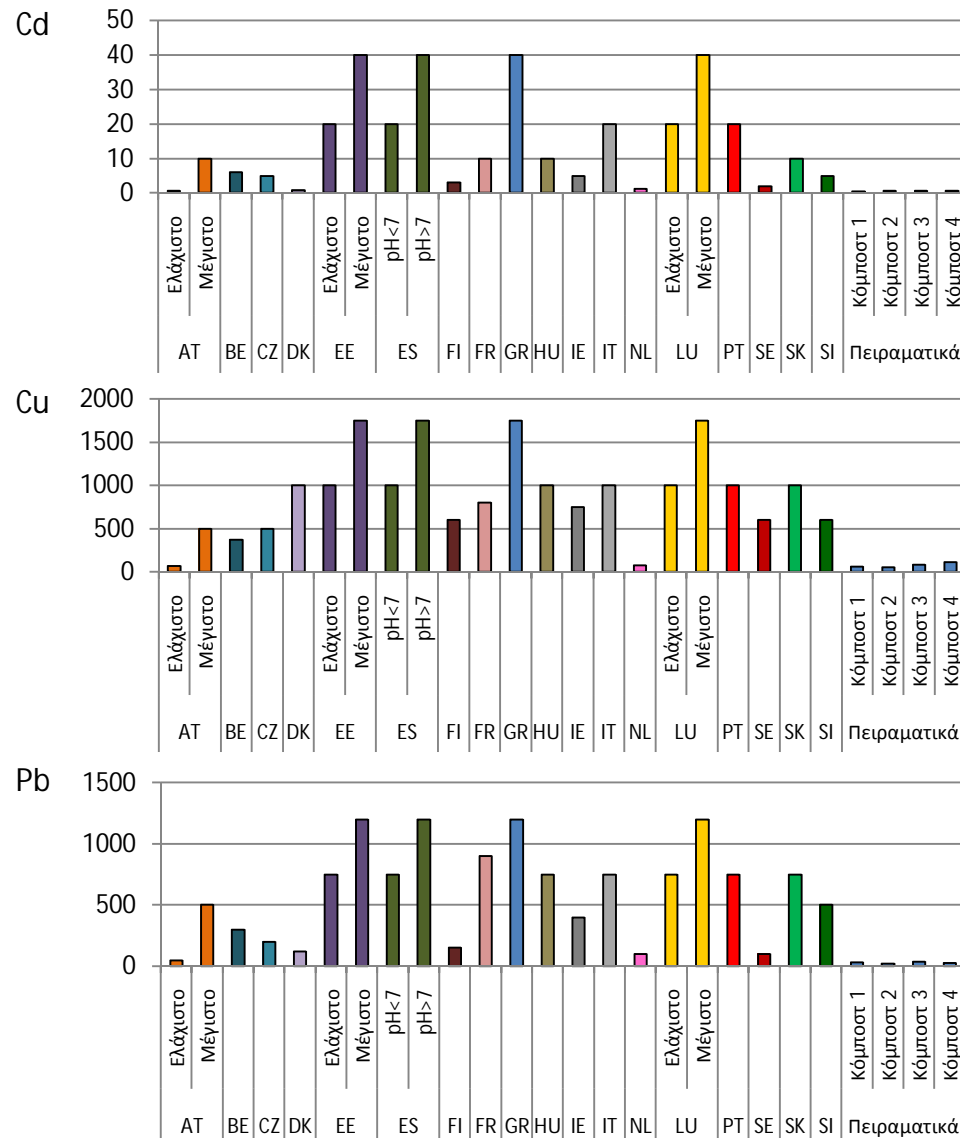
Εκτός από τα προαναφερόμενα μακροστοιχεία υπάρχουν και στοιχεία, γνωστά ως ιχνοστοιχεία, η παρουσία των οποίων είναι αναγκαία σε μικρές ποσότητες για την ανάπτυξη των φυτών. Τα ιχνοστοιχεία σε μεγαλύτερες από τις επιτρεπτές ποσότητες δύναται να είναι τοξικά στα φυτά, στα ζώα ή ακόμα και στον άνθρωπο μέσω της τροφικής αλυσίδας (Wang et al., 2007). Στην κατηγορία αυτή των ιχνοστοιχείων εμπίπτουν και τα βαρέα μέταλλα τα οποία αποτελούν μια ομάδα χημικών στοιχείων με μεγάλο μοριακό βάρος (πυκνότητα άνω των 5g cm⁻³). Η σημαντικότητα των βαρέων

μετάλλων έχει λάβει μεγάλες διαστάσεις καθότι η βιομηχανική δραστηριότητα και η χρήση προϊόντων που εμπεριέχουν τα στοιχεία αυτά έχει αυξηθεί σημαντικά. Η παρουσία υψηλών συγκεντρώσεων βαρέων μετάλλων στο έδαφος ενδέχεται να διαμορφώσει κατάλληλες συνθήκες για τη διείσδυσή τους δια μέσω του ριζικού συστήματος των φυτών στο βρώσιμο καρπό τους και κατ' επέκταση να βιοσυσσωρευτούν στους ζωικούς και ανθρώπινους ιστούς προκαλώντας μεταξύ άλλων δηλητηριάσεις, καρκινογένεση καθώς και μεταλλάξεις (Smith, 2009). Τα βασικότερα βαρέα μέταλλα τα οποία απαντώνται συχνότερα και σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις στο κόμποστ συγκριτικά με αυτές του εδάφους, είναι το κάδμιο (Cd), ο χαλκός (Cu), το χρώμιο (Cr), το νικέλιο (Ni), ο μόλυβδος (Pb) και ο ψευδάργυρος (Zn) (CA, 2001). Καθώς τα βαρέα μέταλλα ενδέχεται να επηρεάσουν την ανάπτυξη των φυτών, τα χαρακτηριστικά του εδάφους και τους μικροοργανισμούς, την υγεία των ζώων και των ανθρώπων, το επίπεδο συγκέντρωσής τους στο κόμποστ θεωρείται ως μία βασική παράμετρος για το χαρακτηρισμό της ποιότητάς του. Για το κόμποστ που προέρχεται από ιλύ η Ε.Ε. ορίζει ανώτατα επιτρεπτά όρια βαρέων μετάλλων για την ασφαλή διάθεσή του στο έδαφος με τη θέσπιση της Οδηγία 86/278/ΕΟΚ. Κρίθηκε επομένως σκόπιμο η αξιολόγηση της ποιότητας του παραγόμενου κόμποστ αναφορικά με τα βαρέα μέταλλα, να γίνει σύμφωνα με την υφιστάμενη Ευρωπαϊκή νομοθεσία καθώς και με βάση τα όρια που έχουν θέσει στις εθνικές νομοθεσίες τα Κράτη Μέλη. Στο **Διαγράμματα** 6.41 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων Cd, Cu, Cr, Ni, Pb και Zn για τα τέσσερα παραγόμενα κόμποστ σε σχέση με τα υφιστάμενα όρια της Οδηγίας 86/278/ΕΟΚ και των Κρατών Μελών της Ε.Ε. όπως αυτά έχουν διαμορφωθεί μέχρι σήμερα. Πρέπει να αναφερθεί ότι η Ελληνική νομοθεσία εναρμονίζεται με τις διατάξεις της οδηγίας με την ΚΥΑ 80568/4225/1991 λαμβάνοντας τις ίδιες οριακές τιμές για τη χρήση κομποστοποιημένης ιλύος στο έδαφος.

Η ολική συγκέντρωση Cd στα τέσσερα κόμποστ κυμαίνεται από 0.47-0.73 mg kg⁻¹ dm και εμφανίζεται πολύ μικρότερη από το εύρος τιμών που θέτει η Οδηγία 86/278/ΕΟΚ (20-40 mg kg⁻¹ dm) και σε συμφωνία με όλα τα όρια των Κρατών Μελών. Η συγκέντρωση του ολικού Cr στα τέσσερα κόμποστ παρουσιάζει εύρος τιμών μεταξύ 8.15-13.52 mg kg⁻¹ dm και παρατηρείται ότι δεν ξεπερνάει τις οριακές τιμές που έχουν οριστεί από τα Κράτη Μέλη. Αξίζει να σημειωθεί ότι στις διατάξεις της Οδηγίας 86/278/ΕΟΚ δεν λαμβάνεται υπόψη η συγκέντρωση του Cr ενώ σύμφωνα με τις ποιοτικές προδιαγραφές της πρότασης για αναθεώρηση της υφιστάμενη Οδηγίας της Ε.Ε., προτείνεται τιμή για το ολικό Cr ίση με 1000 mg kg⁻¹ dm (EC, 2000). Αναφορικά με την ολική συγκέντρωση του Cu στο παραγόμενο κόμποστ των τεσσάρων πειραματικών κύκλων, το εύρος τιμών που σημειώθηκε είναι μεταξύ 54.17-110.94 mg kg⁻¹ dm και εμπίπτει στα αποδεκτά όρια της Ευρωπαϊκής νομοθεσίας (1000-1750 mg kg⁻¹ dm) ενώ στα τελικά προϊόντα του 3^{ου} και 4^{ου} κύκλου η συγκέντρωση του Cu είναι μεγαλύτερη από το ελάχιστο όριο της Αυστρίας (ελάχιστο 70 mg kg⁻¹ dm, μέγιστο 500 mg kg⁻¹ dm) και τα αυστηρά όρια της Ολλανδίας (75 mg kg⁻¹ dm). Το Ni εμφανίζει εύρος ολικής συγκέντρωσης στο παραγόμενο κόμποστ μεταξύ 10.06-17.38 mg kg⁻¹ dm επίπεδα χαμηλότερα από την ισχύουσα Ευρωπαϊκή νομοθεσία (300-400 mg kg⁻¹ dm) καθώς και από τα διεθνή όρια των Κρατών Μελών. Επιπλέον ο Pb εμφανίζεται, όπως και τα υπόλοιπα βαρέα μέταλλα, σε χαμηλά επίπεδα μεταξύ 20.03-38.16 mg kg⁻¹ dm, και είναι σε συμφωνία με τα επιτρεπτά όρια της κοινοτικής Οδηγίας (750-1200 mg kg⁻¹ dm) καθώς και με τις αυστηρότερες τιμές των Κρατών Μελών (Αυστρία: 45 mg kg⁻¹ dm, Ολλανδία 100 mg kg⁻¹ dm). Τέλος, η συγκέντρωση του Zn στο 4^ο κόμποστ εμφανίζεται υψηλή και ίση με 730.19 mg kg⁻¹ dm

λόγω της υψηλής συγκέντρωσης του συγκεκριμένου μετάλλου στο αρχικό υπόστρωμα (ιλύς), ενώ για τα υπόλοιπα τελικά προϊόντα κυμαίνεται σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις μεταξύ 109.24-132.84 mg kg⁻¹ dm. Το επιτρεπτό εύρος τιμών του Zn σύμφωνα με την Οδηγία 86/278/ΕΟΚ είναι 2500-4000 mg kg⁻¹ dm, ενώ τα αυστηρότερα όρια τίθενται από την Αυστρία (200-2000 mg kg⁻¹ dm), την Ολλανδία (300 mg kg⁻¹ dm) και την Ιρλανδία (750 mg kg⁻¹ dm).

Με βάση τα αποτελέσματα παρατηρείται ότι η ολική συγκέντρωση των βαρέων μετάλλων στο παραγόμενο κόμποστ είναι πολύ χαμηλή και σε συμφωνία με το εύρος των ορίων που έχει θέσει η Ε.Ε. καθώς και με τις περισσότερες οριακές τιμές που τίθενται από τα Κράτη Μέλη στις εθνικές νομοθεσίες. Η απουσία υψηλών συγκεντρώσεων στο τελικό κόμποστ μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι η χρησιμοποιούμενη ιλύς προέρχεται από ΜΕΛ οι οποίες διαχειρίζονται αποκλειστικά λύματα και δεν δέχονται βιομηχανικές ροές αποβλήτων προς επεξεργασία. Πέραν από τις βιομηχανικές δραστηριότητες οι συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων είναι συνυφασμένες και με τις καταναλωτικές συνήθειες του πληθυσμού και τα πολιτιστικά δεδομένα της εκάστοτε κοινωνίας. Οι περιοχές από τις οποίες συλλέχθηκαν τα οργανικά προς επεξεργασία απόβλητα προέρχονται από αγροτικές περιοχές απομακρυσμένες από τα μεγάλα αστικά κέντρα και κατ' επέκταση η χρήση προϊόντων επιβαρυσμένων σε βαρέα μέταλλα είναι μικρότερης κλίμακας. Αξίζει να σημειωθεί ότι συγκρίνοντας τις συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων στο αρχικό υπόστρωμα και στο τελικό κόμποστ (**Πίνακας 6.14**) παρατηρείται αύξηση στη συγκέντρωση των μετάλλων στο τελικό προϊόν σε όλους τους κύκλους γεγονός που οφείλεται στη μείωση της οργανικής ουσίας κατά τις βιοξειδωτικές διεργασίες της κομποστοποίησης (Villaseñor et al. Villaseñor et al., 2011; Smith, 2009).



Διάγραμμα 6.41: Συγκέντρωση βαρέων μετάλλων στο παραγόμενο κόμποστ και ανώτατες οριακές τιμές βαρέων μετάλλων (mg kg⁻¹ dm) σε κόμποστ προερχόμενο από ιλύ σε χώρες της Ε.Ε. (EC, 2006)

6.4.2. 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, η συγκέντρωση παθογόνων μικροοργανισμών καθώς και η εφαρμογή πειραματικών καλλιεργειών σε πραγματικές συνθήκες.

6.4.2.1. Φυτοτοξικότητα στο παραγόμενου κόμποστ

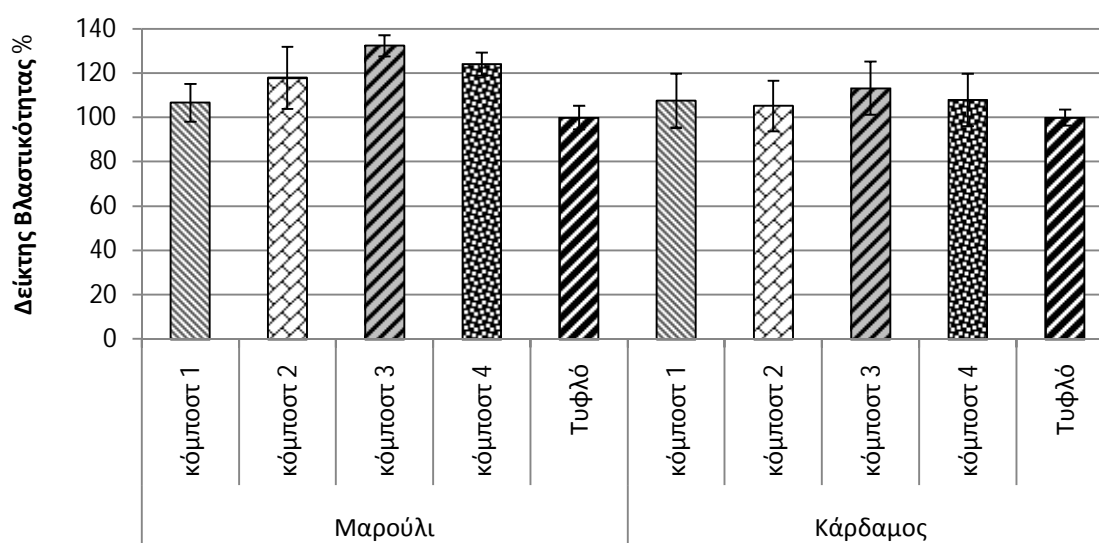
Από τις επικρατέστερες βιολογικές μεθόδους αξιολόγησης του τελικού προϊόντος η συνηθέστερη και πιο συχνά αναφερόμενη στη διεθνή βιβλιογραφία είναι ο προσδιορισμός του επιπέδου της φυτοτοξικότητας του κόμποστ με τη χρήση του Δείκτη Βλαστικότητας (Δ.Β.) όπως αυτή πρώτα αναπτύχθηκε, μελετήθηκε και αναλύθηκε 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. 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 Κο 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). Τέλος, τα επίπεδα της φυτοτοξικότητας των προϊόντων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σύμφωνα με συγκεκριμένο εύρος τιμών του Δ.Β. για καρπούς κάρδαμου και σιταριού όπως αποτυπώνεται στον **Πίνακα 6.17**.

Πίνακας 6.17: Κριτήρια κατηγοριοποίησης επιπέδου φυτοτοξικότητας με τη χρήση καρπών κάρδαμου και σιταριού (WERL, 2005).

Δείκτης Βλαστικότητας [%]	Επίπεδο Φυτοτοξικότητας
>90	Μη ανασταλτικό (Non-inhibitory)
75-90	Μερικώς ανασταλτικό (Moderately inhibitory)
50-75	Πολύ ανασταλτικό (Very inhibitory)
<50	Υπερβολικά ανασταλτικό (Extremely inhibitory)

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).

Πειράματα φυτοτοξικότητας διεξήχθησαν για κάθε ένα από τα τέσσερα παραγόμενα κόμποστ με τη χρήση καρπού μαρουλιού (*Lactuca sativa*) και κάρδαμου (*Lepidium sativum*). Η επιλογή των συγκεκριμένων καρπών βασίστηκε στην ευρεία εφαρμογή τους αναφορικά με τη χρήση τους για τον προσδιορισμό του Δ.Β. στο κόμποστ (Haug, 1993), στο μικρό μέγεθος των καρπών καθώς και στο γεγονός ότι αναπτύσσονται γρήγορα και είναι ευαίσθητοι σε ενδεχόμενη παρουσία φυτοτοξινών (CCME, 2005). Στο **Διάγραμμα 6.42** παρουσιάζονται οι Δ.Β. του παραγόμενου κόμποστ των τεσσάρων πειραματικών κύκλων όπως αυτοί υπολογίστηκαν για τα δύο διαφορετικά είδη καρπών.



Διάγραμμα 6.42: Προσδιορισμούς του δείκτη βλαστικότητας του μαρουλιού και του καρδάμου κατά τη χρήση του παραγόμενου κόμποστ

Οι Δ.Β. κατά τη χρήση καρπών μαρουλιού καταγράφηκαν ίσοι με 106.8, 118.0, 132.5, 124.2% για το κόμποστ που παράχθηκε στον 1^ο, 2^ο, 3^ο και 4^ο κύκλο κομποστοποίησης αντίστοιχα. Οι Jouraiphy et al. (2005) χρησιμοποιώντας καρπούς μαρουλιού υπολόγισαν το Δ.Β. ίσο με 98% σε κόμποστ προερχόμενο από λύ και πράσινα απόβλητα ενώ οι Komilis and Tziouvaras (2009) βρήκαν Δ.Β. ίσο με 165 και 112% για τον ίδιο καρπό σε κόμποστ αστικών οργανικών απορριμμάτων και κοπριάς βοοειδών αντίστοιχα. Στην περίπτωση του καρδάμου οι Δ.Β. στο παραγόμενο κόμποστ εμφανίζουν τιμές ίσες με 107.7, 105.3, 113.3 και 108.0% για το 1^ο, 2^ο, 3^ο και 4^ο κόμποστ αντίστοιχα. Για τον ίδιο καρπό και για κόμποστ προερχόμενο από τη συγκομποστοποίηση λύος με πριονίδι σε διαφορετικές αναλογίες, οι Banegas et al. (2007) παρατήρησαν εύρος τιμών του Δ.Β. μεταξύ 100 και 130% ενώ οι Walter et al. (2006), Mena et al. (2003) και Fang and Wong (1999) σημείωσαν τιμές περίπου ίσες με 100%. Οι Komilis and Tziouvaras (2009) χρησιμοποιώντας εκχυλίσματα κόμποστ προερχόμενο από αστικά οργανικά απορρίμματα και κοπριά βοοειδών σε κάρδαμο σημείωσαν Δ.Β. ίσο με 123 και 86% αντίστοιχα. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της φυτοτοξικότητας τόσο του μαρουλιού όσο και του κάρδαμου, υποδεικνύεται ότι τα τελικά προϊόντα είναι φυτοθρεπτικά και δεν εμπεριέχουν τοξικές ενώσεις οι οποίες δύναται να αναστείλουν την ανάπτυξη των φυτικών μικροοργανισμών. Επομένως, κατά τη διεργασία της βιοξείδωσης της οργανικής ουσίας στους τέσσερις πειραματικούς κύκλους φαίνεται ότι επιτυγχάνεται η απομάκρυνση ενδεχόμενων φυτοτοξικών ενώσεων όπως τα αμμωνιακά και τα χαμηλού μοριακού βάρους οργανικά οξέα ενώ η συγκέντρωση των βαρέων μετάλλων δεν είναι αποτρεπτική για την ανάπτυξη των εξεταζόμενων καρπών (Mena et al., 2003; Pascual et al., 1997). Αξίζει να σημειωθεί ότι οι Fuentes et al. (2006) εξετάζοντας την φυτοτοξικότητα διαφορετικών τύπων λύος οι οποίες δεν έχουν υποστεί αερόβια βιολογική επεξεργασία, διαπίστωσαν ότι οι καρποί μαρουλιού και κριθαριού παρουσιάζουν σημαντικά χαμηλότερο Δ.Β. συγκριτικά με το τυφλό δείγμα.

6.4.2.2. 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. Ειδικότερα, το προς κομποστοποίηση υλικό, το οποίο περιλαμβάνει λύ από αστικά υγρά απόβλητα, εκτός της ύπαρξης πληθώρας θρεπτικών συστατικών και οργανικής ουσίας, εμπεριέχει και σημαντικό αριθμό παθογόνων μικροοργανισμών που δύναται να επιβαρύνουν την υγεία των φυτών, των ζώων και των ανθρώπων. Η λύς και το παραγόμενο από αυτή κόμποστ, ενδέχεται να περιλαμβάνουν ευρύ φάσμα παθογόνων μικροοργανισμών (ιών, βακτηρίων, πρωτόζωων κ.α.) η λίστα των οποίων αναφέρεται αναλυτικά από τους Wichuk and McCartney (2007), Carrington, (2001) και Déportes et al. (1995). 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 του 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.

Ο προσδιορισμός των ποιοτικών προδιαγραφών στο τελικό προϊόν αναφορικά με την υγειονομοποίησή του βασίζεται σε δύο κατεξοχήν μεθόδους και εξαρτάται τόσο από το οργανικό προς κομποστοποίηση υλικό όσο και από την τεχνική κομποστοποίησης που εφαρμόζεται (ανοιχτά ή κλειστά συστήματα) (Bustamante et al., 2008). Η πρώτη μέθοδος αφορά στη λήψη έμμεσων μέτρων αναφορικά με τις συνθήκες λειτουργίας της διεργασίας της κομποστοποίησης με πιο σύνηθες τη θέσπιση κριτηρίων θερμοκρασιακών επιπέδων και ελάχιστης χρονικής διάρκειας των επιπέδων αυτών. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο οι συνθήκες λειτουργίας του συστήματος κομποστοποίησης πληρούν τις προϋποθέσεις μείωσης του παθογόνων και στους τέσσερις πειραματικούς κύκλους όπως περιγράφηκε στην ενότητα 6.2. Η δεύτερη μέθοδος υγειονομικών προδιαγραφών του κόμποστ αφορά στη λήψη άμεσων μέτρων με τον καθορισμό ανώτατων επιτρεπτών ορίων συγκέντρωσης συγκεκριμένων παθογόνων μικροοργανισμών που λειτουργούν ως δείκτες υγειονομοποίησης του προϊόντος. Παρότι στην ισχύουσα Εθνική (ΚΥΑ 80568/4225/91) και Ευρωπαϊκή Νομοθεσία (Οδηγία 86/278/ΕΕ) δεν τίθενται περιορισμοί αναφορικά με τις συγκεντρώσεις παθογόνων μικροοργανισμών για την εδαφική εφαρμογή κόμποστ από ιλύ, ορισμένες χώρες έχουν θεσπίσει ανάλογα εθνικά επιτρεπτά όρια συγκέντρωσης συγκεκριμένων παθογόνων μικροοργανισμών (**Πίνακας 6.18**). Παθογόνοι μικροοργανισμοί όπως είναι τα ολικά και τα περιττωματικά κολοβακτηριοειδή καθώς και τα αυγά ελμίνθων μετρήθηκαν στο αρχικό υπόστρωμα καθώς και στο τελικό προϊόν των τεσσάρων πειραματικών εφαρμογών κομποστοποίησης όπως παρουσιάζεται στον **Πίνακα 6.19**. Οι συγκεκριμένοι παθογόνοι μικροοργανισμοί αποτελούν δείκτες μικροβιακής ρύπανσης η ανίχνευση των οποίων δείχνει την παρουσία ομάδων μικροοργανισμών στο δείγμα.

Πίνακας 6.18: Ενδεικτικές οριακές τιμές παθογόνων μικροοργανισμών κομποστοποιημένης ιλύος (Κουλουμπής και Τσαντήλας, 2007; CCME, 2005; USEPA, 2003)

Χώρα	Παθογόνοι	Όρια συγκέντρωσης
Γαλλία	Salmonella	8 MPN (10 g) ⁻¹ dm
	Εντεροϊοί	3 MPN (10 g) ⁻¹ dm
	Αυγά ελμίνθων	3 (10 g) ⁻¹ dm
Ιταλία	Salmonella	1000 MPN g ⁻¹ dm
Λουξεμβούργο	Εντεροβακτήρια	100 g ⁻¹ dm
	Αυγά σκωλήκων με μολυσμένη πιθανότητα	Απουσία
Πολωνία	Salmonella	Απουσία
	Παράσιτα	10 kg ⁻¹ dm
ΗΠΑ		
-Κόμποστ κλάσης Α	Salmonella	8 MPN (4 g) ⁻¹ dm
	Περιττωματικά Κολοβακτηριοειδή	<1000 MPN g ⁻¹ dm
	Εντερικοί ιοί	<1PFU (4 g) ⁻¹ dm
	Αυγά Ελμίνθων	<1 (4 g) ⁻¹ dm
-Κόμποστ κλάσης Β	Περιττωματικά Κολοβακτηριοειδή	<2.000.000 MPN g ⁻¹ dm
Καναδάς	Περιττωματικά Κολοβακτηριοειδή	<1000 MPN g ⁻¹ dm

Πίνακας 6.19: Ενδεικτικές μικροβιολογικές αναλύσεις στο αρχικό υπόστρωμα και στο κόμποστ

Κύκλος	Ολικά Κολοβακτηριοειδή (dm)		Περιττωματικά Κολοβακτηριοειδή (dm)		Αυγά Ελμίνθων (dm)	
	Υπόστρωμα	Κόμποστ	Υπόστρωμα	Κόμποστ	Υπόστρωμα	Κόμποστ
	10 ⁸ MPN g ⁻¹	10 ⁴ MPN g ⁻¹	10 ⁷ MPN g ⁻¹	10 ² MPN g ⁻¹	Αυγά(10g) ⁻¹	Αυγά(10g) ⁻¹
1 ^{ος}	1.39 (0.01)	3.96 (0.23)	2.55 (0.04)	6.13 (0.12)	23.00 (0.3)	ΔΑ
2 ^{ος}	2.32 (0.05)	2.65 (0.15)	1.23 (0.03)	8.95 (0.15)	26.27 (0.3)	ΔΑ
3 ^{ος}	2.95 (0.02)	4.67 (0.19)	1.95 (0.02)	6.84 (0.07)	24.60 (0.4)	ΔΑ
4 ^{ος}	3.21 (0.14)	9.43 (0.32)	2.09 (0.03)	17.38 (0.26)	69.00 (1.2)	ΔΑ

ΔΑ: Δεν ανιχνεύτηκε

Οι συνθήκες οι οποίες επικρατούν κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης του οργανικού μίγματος στις τέσσερις πειραματικές εφαρμογές έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση της συγκέντρωσης των εξεταζόμενων παθογόνων μικροοργανισμών. Αναλυτικότερα, τα ποσοστά μείωσης των κολοβακτηριοειδών λαμβάνουν τιμές μεγαλύτερες από 99% ενώ τα αυγά ελμίνθων, τα οποία παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω της ανθεκτικότητάς τους, δεν ανιχνεύονται στο τελικό προϊόν παρότι στο αρχικό οργανικό υπόστρωμα παρουσιάζονται σε σχετικά υψηλό αριθμό. Παρόμοια ποσοστά μείωσης των κολοβακτηριοειδών παρουσιάζονται από τους Kalamdhad and Kazmi (2009) και Jougaithy et al. (2005) κατά την κομποστοποίηση διαφορετικών οργανικών υποστρωμάτων. Οι Cofie et al. (2009) και Koné et al. (2007) αναφέρουν την αδρανοποίηση των ελμίνθων (<1 Αυγά g⁻¹ dm) κατά την κομποστοποίηση ιλύος λόγω των συνθηκών θερμοκρασίας/χρόνου στο υπόστρωμα (>45°C για 5 ημέρες) καθώς και λόγω της μείωσης της περιεχόμενης υγρασίας στο τελικό υλικό, συνθήκες οι οποίες παρατηρήθηκαν και στην παρούσα έρευνα. Επιπλέον, οι συγκεντρώσεις των περιττωματικών κολοβακτηριοειδών στο τελικό προϊόν είναι σε συμφωνία με τα όρια που τίθενται από τη USEPA και τον Καναδά ενώ επίσης οι συγκεντρώσεις των ελμίνθων τηρούν τις Γαλλικές και Πολωνικές προδιαγραφές καθώς και αυτές της USEPA. Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, το παραγόμενο κόμποστ δύναται να διατεθεί στο έδαφος

χωρίς να συντρέχει κίνδυνος αναφορικά με την παρουσία παθογόνων μικροοργανισμών. Εντούτοις, πρέπει να τονισθεί ότι κατά τους Wichuk and McCartney (2007) ο ορθολογικός χαρακτηρισμός της υγειονομοποίησης του τελικού προϊόντος πρέπει να βασίζεται σε μια εκτενή σειρά ομάδων παθογόνων μικροοργανισμών ενώ παράλληλα να ελέγχονται αν τα κριτήρια θερμοκρασίας χρόνου επαρκούν και κατά πόσο στο τελικό υπόστρωμα υφίσταται αναβίωση των παθογόνων. Καθότι η εκτενής μικροβιακή εξέταση του τελικού προϊόντος δεν περιλαμβάνεται στα πλαίσια της εξέτασης της παρούσας διδακτορικής διατριβής, σημαντικό ερευνητικό ενδιαφέρον θα αποτελούσε ο έλεγχος τόσο της παρουσίας των σημαντικότερων παθογόνων μικροοργανισμών που εμφανίζονται στο κόμποστ όσο και η επίδραση διαφορετικών συνθηκών θερμοκρασίας-χρόνου σε αυτούς ώστε να εξασφαλιστούν επιθυμητά επίπεδα υγειονομοποίησης στο παραγόμενο κόμποστ.

6.4.2.3. Πειραματικές καλλιέργειες

Η περαιτέρω αξιολόγηση του παραγόμενου κόμποστ αφορά στην πραγματοποίηση προκαταρκτικών πειραμάτων σε καλλιέργειες για τη διαπίστωση της επίδρασής του σε πραγματικές συνθήκες. Ως πειραματικά φυτά χρησιμοποιήθηκαν το αραβόσιτο (*Zea mays L.*) και τα ζαχαρότευτλα (*Beta vulgaris L.*). Η επιλογή αυτών των φυτών στηρίχτηκε στις απαιτήσεις τους για καλά φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά των μέσων ανάπτυξης καθώς επίσης και στο γεγονός ότι οι καρποί τους αποτελούν αγαθό ευρείας κατανάλωσης σε διεθνές επίπεδο (USDA-FAS, 2010).

Για τον προσδιορισμό της επίδρασης του κόμποστ στις προεπιλεγμένες φυτικές καλλιέργειες έγινε χρήση κόμποστ διαφορετικών δοσολογιών ενώ παράλληλα σε προκαθορισμένα πειραματικά τεμάχια του αγρού έγινε προσθήκη μόνο χημικού λιπάσματος. Ως μάρτυρας ελέγχου των διεργασιών αποτέλεσαν τα πειραματικά τεμάχια στα οποία δεν έγινε καμία προσθήκη υλικού. Το κόμποστ που χρησιμοποιήθηκε στις καλλιέργειες προέκυψε από την ανάμιξη των παραγόμενων προϊόντων κατά την εφαρμογή των τεσσάρων πειραματικών κύκλων κομποστοποίησης. Οι λόγοι για τους οποίους εφαρμόστηκε αυτή η πρακτική είναι οι εξής:

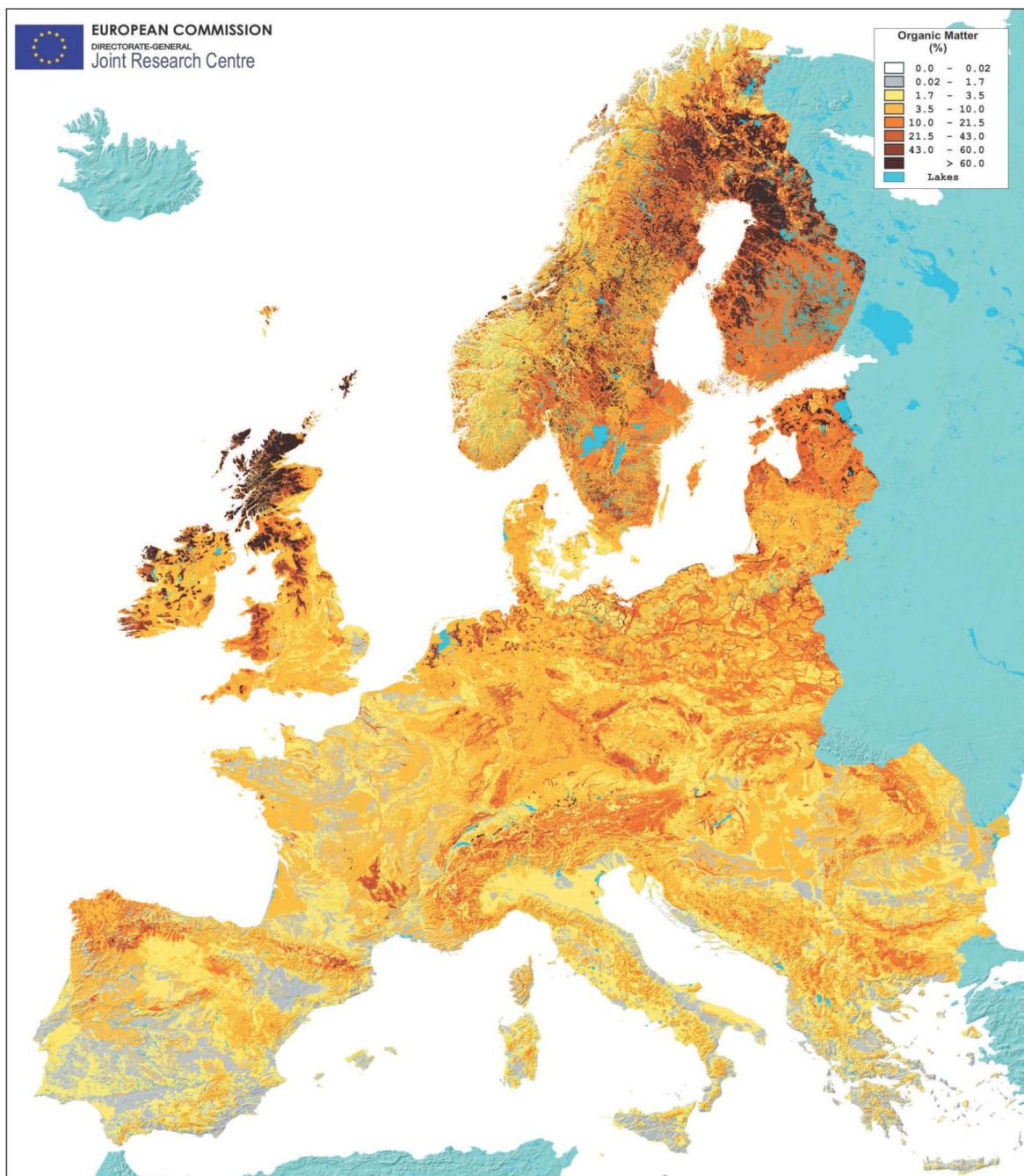
- Σύμφωνα με τις φυσικοχημικές και βιολογικές ιδιότητες του κόμποστ σε κανένα από τα δείγματα δεν διαπιστώθηκε ότι συντρέχουν σημαντικοί περιοριστικοί λόγοι για τη διάθεσή τους στο έδαφος.
- Υπό πραγματικές συνθήκες το παραγόμενο κόμποστ από κάθε κύκλο διεργασιών αναμιγνύεται με τους επόμενους ή τους προγενέστερους προκείμενου να καλυφθεί η ζήτηση σε οργανικά πρόσθετα.

Τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του αναμεμιγμένου κόμποστ και του εδάφους τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη των πειραματικών καλλιεργειών παρουσιάζονται στο **Πίνακα 6.20**.

Πίνακας 6.20: Χαρακτηριστικά κόμποστ και εδάφους για την εφαρμογή των πειραματικών καλλιεργειών

Παράμετρος	Κόμποστ	Έδαφος
Υγρασία (% wb)	40.00 (2.19)	
Ξηρή Ουσία (% wb)	60.00 (2.19)	
pH	7.20 (0.04)	7.85 (0.02)
TOC (% dm)	29.64 (1.47)	0.96 (0.06)
OM (% dm)	56.32 (2.81)	1.82 (0.13)
C/N	8.35	
NO ₃ ⁻ (mg kg ⁻¹ dm)	1547.85 (108.60)	
NH ₄ ⁺ (mg kg ⁻¹ dm)	183.49 (11.33)	
NH ₄ ⁺ /NO ₃ ⁻	0.12	
N _{org} (% N dm)	95.74 (1.12)	
N (% dm)	3.55 (0.17)	
P (P ₂ O ₅ % dm)	1.68 (0.13)	
K (K ₂ O % dm)	1.98 (0.15)	
Ca (CaO % dm)	2.57 (0.21)	
Mg (MgO % dm)	5.31 (0.31)	
Cd (mg kg ⁻¹ dm)	0.63 (0.07)	
Cr (mg kg ⁻¹ dm)	12.57 (1.60)	
Cu (mg kg ⁻¹ dm)	82.53 (7.85)	
Ni (mg kg ⁻¹ dm)	13.14 (0.59)	
Pb (mg kg ⁻¹ dm)	28.01 (1.06)	
Zn (mg kg ⁻¹ dm)	319.22 (17.33)	
Μηχανική Σύσταση (%)		
Άργιλος		35.0-37.0
Ιλύς		13.5-14.0
Άμμος		49-50

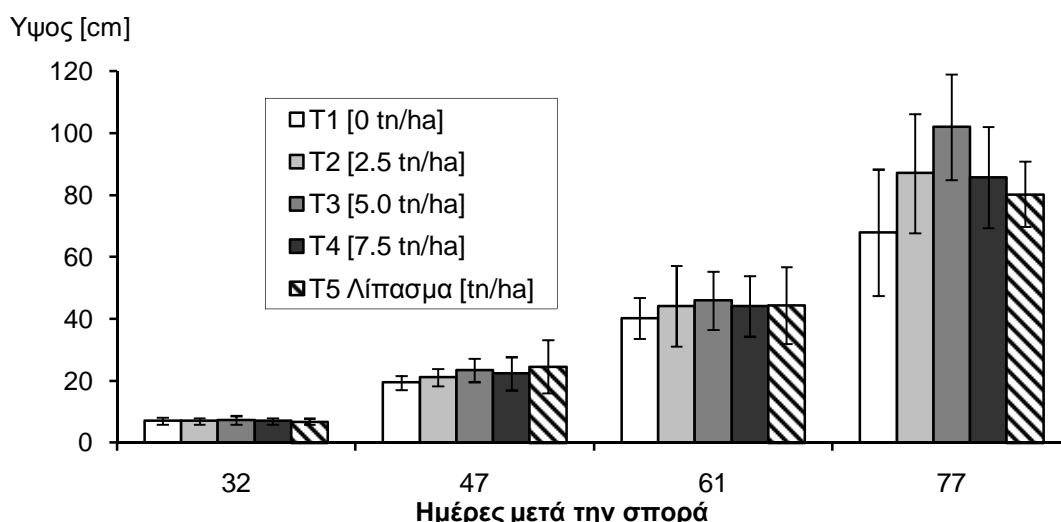
Σύμφωνα με το τρίγωνο κλάσεων κοκκομετρικής σύστασης το έδαφος χαρακτηρίζεται ως αμμοαργιλοπηλώδες μέσης σύστασης το οποίο είναι κατάλληλο για καλλιέργεια (Πολυζόπουλος, 1976). Το έδαφος παρουσιάζει ποσοστό σε οργανική ουσία, 1.82%, το οποίο θεωρείται ικανοποιητικό για την εξεταζόμενη περιοχή για την ανάπτυξη των φυτών. Επιπλέον, τα εδάφη αυτά εμφανίζουν σταδιακή υποβάθμιση της οργανικής ουσίας και της γονιμότητάς τους λόγω του ξηρού κλίματος σε συνδυασμό με τις πρακτικές εντατικής καλλιέργειας που εφαρμόζονται στην ευρύτερη περιοχή της Doukkala στο Μαρόκο. Σε περιοχές με παρόμοιες κλιματικές συνθήκες, τα εδάφη τα οποία εμφανίζουν περιεκτικότητα σε οργανική ουσία μικρότερη από 1.7%, βρίσκονται σε αρχικό στάδιο ερημοποίησης ενώ ως προτεινόμενο εύρος οργανικής ουσίας σε διαχρονικά αγροτικά εδάφη ορίζεται μεταξύ 2.5-3% (Casado-Vela et al., 2006). Αξίζει να σημειωθεί ότι το 74% των εδαφών της Ευρώπης περιέχουν οργανική ουσία μικρότερη από 3.4% (EC, 2003) ενώ στις Μεσογειακές χώρες και ειδικότερα στην Ελλάδα μεγάλο μέρος των εδαφών κυμαίνεται σε επίπεδα μικρότερα του 1.7% (Εικόνα 6.2). Παρακάτω περιγράφονται τα αποτελέσματα των προκαταρκτικών πειραματικών καλλιεργειών αραβόσιτου και ζαχαρότευλων.



Εικόνα 6.1: Περιεκτικότητα σε οργανική ουσία (%) των εδαφών στην Ευρώπη (EC, 2005).

6.4.2.3.1. Πειραματική καλλιέργεια αραβόσιτου

Στο **Διάγραμμα 6.43** παρουσιάζεται το μετρούμενο ύψος των βλαστών του αραβόσιτου σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές μετά τη σπορά (32^η, 47^η, 61^η και 77^η ημέρα). Οι μετρήσεις περιλαμβάνουν το ύψος των φυτών κατά τη χρήση διαφορετικής δοσολογίας κόμποστ (T2=2.5 t_{ha}⁻¹, T3=5.0 t_{ha}⁻¹ και T4=7.5 t_{ha}⁻¹) ενώ παράλληλα μετρήθηκε και το επίπεδο βλάστησης με τη χρήση χημικού λιπάσματος (T5= 0.5 t_{ha}⁻¹ NPK:20-15-10). Ως μάρτυρες επιλέχθηκαν τα πειραματικά τεμάχια στα οποία δεν έγινε καμία προσθήκη κόμποστ ή λιπάσματος (T1=0 t_{ha}⁻¹).

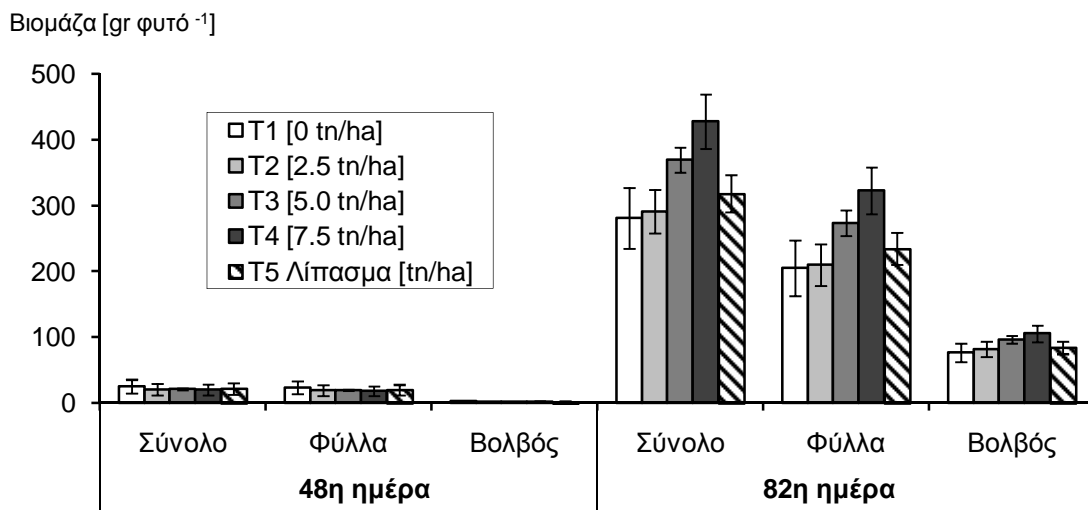


Διάγραμμα 6.43: Επίπεδο βλάστησης (ύψος) αραβόσιτου με την προσθήκη κόμποστ και χημικού λιπάσματος

Την 32^η ημέρα από τη σπορά δεν παρατηρείται σχεδόν καμία διαφοροποίηση μεταξύ των πέντε εφαρμογών με το ύψος των βλαστών να κυμαίνεται από 6.9 έως 7.4 cm. Επιπλέον, την 47^η και 61^η ημέρα δεν παρουσιάζονται ουσιαστικές διαφορές στη βλαστικότητα των καρπών ανά επέμβαση, με το ύψος να κυμαίνεται από 19.5-24.7 cm και 40.3-45.9 cm αντίστοιχα. Σημαντική διαφοροποίηση εμφανίζεται την 77^η ημέρα μετά τη σπορά με τη σειρά ανάπτυξης να καταγράφεται ως εξής: T3=5.0 tn ha⁻¹ > T2=2.5 tn ha⁻¹ > T4=7.5 tn ha⁻¹ > T5=Λίπασμα > T1=0 tn ha⁻¹. Αναλυτικότερα η ποσοστιαία διαφορά του T2 συγκριτικά με το T1 και T5 είναι ίση με 22.0 και 7.7% αντίστοιχα, για το T3 συγκριτικά με το T1 και T5 είναι ίση με 33.3 και 21.1% αντίστοιχα και για το T4 συγκριτικά με το T1 και T5 είναι ίση με 20.7 και 6.2% αντίστοιχα. Εξίσου σημαντική αύξηση στην ανάπτυξη σε καλλιέργειες αραβόσιτου με χρήση κόμποστ παρατήρησαν οι Ibrahim et al. (2008) σε σύγκριση με ανόργανα λιπάσματα. Διαπιστώνεται επομένως ότι η χρήση του παραγόμενου κόμποστ διεγείρει την ανάπτυξη των φυτών συγκριτικά τόσο με το τυφλό όσο και με τη χρήση χημικού λιπάσματος για όλες τις εξεταζόμενες δοσολογίες κόμποστ. Επιπλέον η δοσολογία κόμποστ ίση με 5 tn ha⁻¹ φαίνεται να επιφέρει θετικότερα αποτελέσματα για την ανάπτυξη αραβόσιτου από ότι η χρήση 7.5 tn ha⁻¹ υποδεικνύοντας ότι η υπέρμετρη διάθεση κόμποστ στις καλλιέργειες ενδέχεται να επιδράσει αρνητικά στην ανάπτυξη των φυτών.

6.4.2.3.2. Πειραματική καλλιέργεια ζαχαρότευτλων

Η δεύτερη πειραματική καλλιέργεια περιλαμβάνει την ανάπτυξη ζαχαρότευτλων σε πειραματικά τεμάχια στα οποία έγινε προσθήκη κόμποστ και χημικού λιπάσματος. Η αξιολόγηση της επίδρασης του κόμποστ στην ανάπτυξη των φυτών πραγματοποιήθηκε με τη μέτρηση της βιομάζας την 48^η και 82^η ημέρα ύστερα από τη σπορά. Τα αποτελέσματα της διάθεσης κόμποστ διαφορετικής δοσολογίας (T2=2.5 tn ha⁻¹, T3=5.0 tn ha⁻¹ και T4=7.5 tn ha⁻¹) της χρήσης λιπάσματος (T5=0.5 tn ha⁻¹ NPK:16-15-26) και του μάρτυρα (T1=0 tn ha⁻¹) παρουσιάζονται στο **Διάγραμμα 6.44**. Η μέτρηση της βιομάζας των φυτών περιλαμβάνει την καταμέτρηση της μάζας των επιμέρους τμημάτων του φυτού (φύλλα και βολβός) καθώς και τη συνολική μάζα των στελεχών του φυτού (άθροισμα της μάζας των φύλλων και του βολβού).



Διάγραμμα 6.44: Επίπεδο βλάστησης (βιομάζα) ζαχαρότευτλων με την προσθήκη κόμποστ και χημικού λιπάσματος

Σύμφωνα με το **Διάγραμμα 6.44**, την 48^η ημέρα από τη σπορά των ζαχαρότευτλων δεν παρατηρείται σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ των επεμβάσεων στα επιμέρους τμήματα των φυτών. Αναλυτικότερα, η βιομάζα κυμαίνεται μεταξύ 17.92-23.10 g φυτό⁻¹ και 1.57-2.03 g φυτό⁻¹ για τα φύλλα και το βολβό των ζαχαρότευτλων αντίστοιχα, ενώ η συνολική βιομάζα λαμβάνει τιμές μεταξύ 19.56-25.14 g φυτό⁻¹ για τις διαφορετικές επεμβάσεις. Επομένως, η προσθήκη κόμποστ δεν επιδρά σημαντικά στην ανάπτυξη των τεύτλων μέχρι την 48^η ημέρα από την φύτευση των βλαστών. Αντίθετα, την 82^η ημέρα από τη σπορά είναι εμφανής η θετική επιρροή του κόμποστ συγκριτικά με το τυφλό δείγμα. Αναλυτικότερα, στις δοσολογίες κόμποστ T2=2.5 tn ha⁻¹, T3=5.0 tn ha⁻¹ και T4=7.5 tn ha⁻¹ παρατηρείται ποσοστιαία αύξηση στη βιομάζα κατά 3.5, 31.5 και 52.0% αντίστοιχα σε σχέση με το τυφλό δείγμα. Επιπλέον, στα πειραματικά τεμάχια T3=5.0 tn ha⁻¹ και T4=7.5 tn ha⁻¹ η συνολική βιομάζα των φυτών ανέρχεται στα 369.75 και 428.25 g φυτό⁻¹ αντίστοιχα η οποία είναι κατά 16.0 και 34.4% αντίστοιχα μεγαλύτερη από τη βιομάζα των φυτών στην οποία έγινε χρήση χημικού λιπάσματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι με την αύξηση στη δοσολογία κόμποστ εμφανίζεται και αύξηση στη συνολική βιομάζα των φυτών καθώς και στα επιμέρους στελέχη τους ενώ η σειρά ανάπτυξης καταγράφεται ως εξής T4=7.5 tn ha⁻¹ > T3=5.0 tn ha⁻¹ > T5=Λίπασμα > T2=2.5 tn ha⁻¹ > T1=0 tn ha⁻¹. Επομένως, στην περίπτωση των ζαχαρότευτλων η χρήση του παραγόμενου κόμποστ διεγείρει την ανάπτυξη των ζαχαρότευτλων με τη δοσολογία κόμποστ των 7.5 tn ha⁻¹ να παρουσιάζει τα θετικότερα αποτελέσματα. Ενδεχομένως η αύξηση της βιομάζας με την αύξηση της δοσολογίας να σχετίζεται με τη μεγαλύτερη διαθεσιμότητα σε άζωτο καθότι το στοιχείο αυτό συνδέεται άμεσα με την παραγωγικότητα των τεύτλων (Hergert, 2011).

6.5. 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 τόσο του ρυθμού αντίδρασης με τον οποίο το υπόστρωμα βιοαποδομείται όσο και του βαθμού βιοξείδωσης της οργανικής ουσίας που επιτυγχάνεται (Bari et al., 2000). Επομένως, στο παρόν κεφάλαιο γίνεται η αναφορά και η εφαρμογή ενός μαθηματικού μοντέλου της κινητικής της κομποστοποίησης για την περιγραφή της διεργασίας της αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων όπως προκύπτει από τη χρήση του συστήματος κομποστοποίησης. Η προσομοίωση της κομποστοποίησης βασίζεται σε μαθηματικά πρότυπα-εξισώσεις που αφορούν στην κινητική αντιδράσεων πρώτου βαθμού της βιοξείδωσης του οργανικού υποστρώματος και στην περιγραφή της επίδρασης των περιβαλλοντικών παραμέτρων (κρίσιμων παραμέτρων) στο ρυθμό της κομποστοποίησης. Η επιλογή της μεθοδολογικής προσέγγισης του ρυθμού με τον οποίο η οργανική ουσία του υποστρώματος μετασχηματίζεται στο τελικό προϊόν, βασίζεται στη διαθεσιμότητα των πειραματικών αναλύσεων καθώς και στο εύρος της εφαρμογής πρότυπων προσομοίωσης από άλλους ερευνητές.

6.5.1. Αναφορά στην κινητική αντιδράσεων βιοξείδωσης της οργανικής ουσίας

Η κινητική πρώτης τάξης αποτελεί την πλέον διαδεδομένη και ευρύτερα χρησιμοποιημένη από την επιστημονική κοινότητα μεθοδολογική προσέγγιση για την περιγραφή της αερόβιας βιολογικής αποδόμησης του οργανικού υλικού (Bartista et al., 2010). Ο υπολογισμός του ρυθμού μεταβολής της μάζας της βιοαποδομήσιμης ουσίας εξαρτάται από την αρχική ποσότητά της και από το ρυθμό βιοξείδωσής της. Ο εν λόγω ρυθμός μεταβολής εκφράζεται από την Εξίσωση (6.1).

$$\frac{d(\text{BOM})}{dt} = -k_d(\text{BOM}) \quad \text{Εξίσωση (6.1)}$$

Όπου:

BOM: Βιοαποδομήσιμη οργανική ουσία (kg)

k_d : Ρυθμός βιοαποδόμησης πρώτης τάξης της οργανικής ουσίας (d^{-1})

t: Χρόνος (d)

Ολοκληρώνοντας την Εξίσωση (6.2) και θεωρώντας $\text{BOM}_t = \text{BOM}_0$ όταν $t=0$, προκύπτει:

$$\text{BOM}_t = \text{BOM}_0 e^{-k_d t} \quad \text{Εξίσωση (6.2)}$$

Επομένως, κατά τα εξελικτικά στάδια της διεργασίας της κομποστοποίησης η βιοαποδομήσιμη οργανική ουσία μειώνεται εκθετικά με ρυθμό που καθορίζεται από το k_d ⁽¹⁵⁾. Η ποσοστιαία απομάκρυνση της βιοαποδομήσιμης οργανικής ουσίας ($\text{BOM}_{\text{loss}(t)}$) ως προς την περιεκτικότητα της αρχικής οργανικής ουσίας (OM) μπορεί να εκφραστεί από την Εξίσωση (6.3):

⁽¹⁵⁾ Θεωρητικά για k_d σταθερό, ο ρυθμός μεταβολής της μάζας της βιοαποδομήσιμης οργανικής ουσίας υπολογίζεται από τη Εξίσωση (6.2). Στην πράξη όμως το k_d μεταβάλλεται χρονικά καθότι ο ρυθμός βιοαποδόμησης εξαρτάται από πληθώρα παραμέτρων (π.χ. θερμοκρασία, υγρασία)

$$BOM_{loss(t)} = BOM_0(1 - e^{-k_d t}) \quad \text{Εξίσωση (6.3)}$$

Όπου:

$BOM_{loss(t)}$: Το ποσοστό απομάκρυνσης της βιοαποδομήσιμης οργανικής ουσίας τη χρονική στιγμή t , εκφρασμένο ως ποσοστό της αρχικής οργανικής ουσίας (% OM)

BOM_0 : Το συνολικό ποσοστό βιοαποδομήσιμης οργανικής ουσίας στο αρχικό υπόστρωμα ($t=0$) το οποίο δύναται να οξειδωθεί, εκφρασμένο ως ποσοστό της αρχικής οργανικής ουσίας (% OM)

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 (6.4) (Mason, 2007; Hamelers, 2004).

$$k_d(x_1, x_2, \dots, x_n) = k_{max} \cdot F_1(x_1) \cdot F_2(x_2) \dots F_n(x_n) \quad \text{Εξίσωση (6.4)}$$

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 (6.4) 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 όπως αυτές περιγράφηκαν αναλυτικότερα στην ενότητα 3.2.3. 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

οποιές 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 6.5), 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.

$$k_d = k_{max} \cdot F(T) \cdot F(MC) \cdot F(O_2) \cdot F(FAS) = k_{max} \cdot F(TOT) \quad \text{Εξίσωση (6.5)}$$

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)

Λαμβάνοντας υπόψη τις εξισώσεις (6.3) και (6.5) ο προσδιορισμός του μέγιστου ρυθμού βιοαποδόμησης, k_{max} , και της βιοαποδομήσιμης οργανικής ουσίας στο αρχικό υπόστρωμα (BOM_0) δίνεται από την ακόλουθη σχέση (Εξίσωση 6.6):

$$BOM_{loss(t)} = BOM_0 (1 - e^{-k_{max} \cdot F(T) \cdot F(MC) \cdot F(O_2) \cdot F(FAS) \cdot t}) \quad \text{Εξίσωση (6.6)}$$

Στη συνέχεια περιγράφεται η κατάρτιση εξισώσεων για τον προσδιορισμό των διορθωτικών συντελεστών για κάθε κρίσιμη παράμετρο της διεργασίας, όπως αυτές προκύπτουν από τη βιβλιογραφία βάσει εμπειρικών σχέσεων.

Διορθωτικός συντελεστής της θερμοκρασίας $F(T)$

Έχει διατυπωθεί πληθώρα εξισώσεων για την περιγραφή της επίδρασης της θερμοκρασίας στο ρυθμό της διεργασίας της κομποστοποίησης. Η εξίσωση η οποία εμφανίζει τη μεγαλύτερη αποδοχή από την ερευνητική κοινότητα και η οποία τυχάνει να περιγράφει αποτελεσματικότερα τα πειραματικά δεδομένα, προτείνεται από τον Richard (1997) και τους Richard and Walker (1999, 2006). Η εξίσωση είναι βασισμένη στο μοντέλο που παρουσίασαν οι Rosso et al. (1993) και στην έρευνα που εφάρμοσε ο Richard (1997) προσομοιώνοντας το μοντέλο σε πειραματικά δεδομένα για τη διεργασία της κομποστοποίησης. Ο διορθωτικός συντελεστής της θερμοκρασίας διατυπώνεται από την πολυωνυμική Εξίσωση (6.7).

$$F(T) = \frac{(T - T_{max})(T - T_{min})^2}{(T_{opt} - T_{min}) [(T_{opt} - T_{min})(T - T_{opt}) - (T_{opt} - T_{max})(T_{opt} + T_{min} - 2T)]} \quad \text{Εξίσωση (6.7)}$$

Όπου:

T: Θερμοκρασία υποστρώματος (°C)

T_{min}: Ελάχιστη θερμοκρασία για την οποία γίνεται βιοξείδωση του υποστρώματος (°C)

T_{opt}: Βέλτιστη θερμοκρασία για την οποία γίνεται βιοξείδωση του υποστρώματος (°C)

T_{max}: Μέγιστη θερμοκρασία για την οποία γίνεται βιοξείδωση του υποστρώματος (°C)

Οι παράμετροι T_{min}, T_{max} και T_{opt} της Εξίσωσης (6.7) προσδιορίζονται εμπειρικά ανάλογα με το είδος των βιοαποδομήσιμων οργανικών αποβλήτων. Σύμφωνα με τους Richard (1997) και Richard and Walker (2006, 1999) οι παράμετροι T_{min}, T_{max} και T_{opt} ορίζονται ίσες με 5.0, 71.6 και 58.6°C αντίστοιχα για ιλύ και τροφικά υπολείμματα αναμεμιγμένα με πριονίδι, διαμορφώνοντας την Εξίσωση (6.8).

$$F(T) = \frac{(T-71.6)(T-5)^2}{(58.6-5)[(58.6-5)(T-58.6)-(58.6-71.6)(58.6+5-2T)]} \quad \text{Εξίσωση (6.8)}$$

Διορθωτικός συντελεστής της υγρασίας F(MC)

Η επίδραση της περιεχόμενης υγρασίας στο ρυθμό βιοαποδόμησης στη διεργασία της κομποστοποίησης δίνεται από την Εξίσωση (6.9) όπως αυτή παρουσιάζεται από τον Haug (1993)

$$F(MC) = \frac{1}{e^{(-17.684*MC+7.0622)}+1} \quad \text{Εξίσωση (6.9)}$$

Όπου MC η κλασματική περιεκτικότητα υγρασίας του υποστρώματος (τιμές 0-1)

Διορθωτικός συντελεστής του οξυγόνου F(O₂)

Ο διορθωτικός συντελεστής της περιεκτικότητας του οξυγόνου στο ρυθμό βιοαποδόμησης του υποστρώματος κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης δίνεται από την Εξίσωση (6.10) τύπου Monod (Zhang et al., 2010; Haug, 1993).

$$F(O_2) = \frac{O_2}{O_2+k_{O_2}} \quad \text{Εξίσωση (6.10)}$$

Όπου:

O₂: Ποσοστιαία περιεκτικότητα οξυγόνου (% v/v) στο υπόστρωμα

K_{O₂}: Σταθερά ημικορεσμού η οποία εκφράζει την ελάχιστη κατ' όγκο ποσοστιαία περιεκτικότητα του υποστρώματος σε οξυγόνο ούτως ώστε να υφίσταται διάχυση του οξυγόνου από την αέρια στην υγρή φάση. Σύμφωνα με τον Haug (1993) ορίζεται ίση με 2% v/v

Διορθωτικός συντελεστής του πορώδους F(FAS)

Η επίδραση του πορώδους του υποστρώματος στο ρυθμό βιοαποδόμησης δίνεται από την Εξίσωση (6.11) όπως αυτή διατυπώθηκε από τον Haug (1993).

$$F(FAS) = \frac{1}{e^{(-23.675*FAS+3.4945)}+1} \quad \text{Εξίσωση (6.11)}$$

Όπου FAS η κλασματική περιεκτικότητα της αέριας φάσης στο πορώδες του υποστρώματος.

Το FAS προκύπτει από τις Εξίσωση (6.12) όπως παρουσιάζεται από τους Richard et al. (2002).

$$FAS = 1 - \rho_b \left[(1 - MC) \left(\frac{OM_f}{\rho_{OM}} + \frac{1-OM_f}{\rho_{ash}} \right) \right] \quad \text{Εξίσωση (6.12)}$$

Όπου

MC: η κλασματική περιεκτικότητα υγρασίας του υποστρώματος (τιμές 0-1)

OM_f: η κλασματική περιεκτικότητα του υποστρώματος σε οργανική ουσία (τιμές 0-1)

ρ_b: η φαινομενική πυκνότητα (kg m⁻³)

ρ_w: η πυκνότητα του νερού (kg m⁻³)

ρ_{ash}: η πυκνότητα του στερεού υπολείμματος (kg m⁻³)

ρ_{OM}: η πυκνότητα της οργανικής ουσίας (kg m⁻³)

6.5.2. Μέθοδος ανάλυσης κινητικής αντιδράσεων βιοξείδωσης της οργανικής ουσίας

Το πρότυπο προσομοίωσης της κινητικής αντιδράσεων βιοξείδωσης της οργανικής ουσίας που παρουσιάστηκε στην ενότητα 6.5.1 χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των τιμών της οργανικής ουσίας που καταναλώνεται (BOM_{loss(t)}) (Εξίσωση 6.6) για τις χρονικές στιγμές στις οποίες προσδιορίστηκαν πειραματικά οι τιμές της περιεχόμενης οργανικής ουσίας (OM) του υποστρώματος. Στη συνέχεια υπολογίστηκε η διαφορά των τιμών του BOM_{loss} που προκύπτουν από το μοντέλο και τα πειραματικά δεδομένα για την ίδια χρονική στιγμή της διεργασίας στους τέσσερις κύκλους κομποστοποίησης. Οι εκτιμήσεις του μοντέλου, δηλαδή ο μέγιστος ρυθμός βιοαποδόμησης, k_{max} , και το συνολικό ποσοστό της βιοαποδομήσιμης οργανικής ουσίας του υποστρώματος (BOM₀), υπολογίστηκαν κατόπιν της ελαχιστοποίησης του αθροίσματος των τετραγώνων της διαφοράς του BOM_{loss} που προκύπτουν από το μοντέλο και τα πειραματικά δεδομένα χρησιμοποιώντας το εργαλείο "Solver" του Microsoft Excel 2007. Η επίδραση των κρίσιμων παραμέτρων της θερμοκρασίας, της υγρασίας και του οξυγόνου στο ρυθμό της βιολογικής αποδόμησης της οργανικής ουσίας, περιγράφονται από τους διορθωτικούς συντελεστές F(T), F(MC) και F(O₂) (Εξισώσεις 6.8, 6.9 και 6.10) και ενσωματώνονται στο πρότυπο προσομοίωσης με τις Εξισώσεις (6.5) και (6.6). Επομένως, ο εκτιμώμενος μέγιστος ρυθμός βιοαποδόμησης, k_{max} , για κάθε πειραματικό κύκλο κομποστοποίησης διορθώνεται ως προς την επίδραση των παραπάνω παραμέτρων. Αναφορικά με τον διορθωτικό συντελεστή του πορώδους, θεωρήθηκε ότι η επίδρασή του στο ρυθμό της διεργασίας δεν αποτελεί περιοριστικό παράγοντα γεγονός που προκύπτει από πειραματικά δεδομένα του Zhang (2010) κατά την κομποστοποίηση ιλύος και των Baptista et al. (2010) κατά την κομποστοποίηση αστικών στερεών αποβλήτων σε MBE. Για το λόγο αυτό το F(FAS) (Εξίσωση 6.11), δεν συμπεριλήφθηκε στην προσομοίωση της κινητικής βιοξείδωσης της οργανικής ουσίας.

6.5.3. Προσομοίωση κινητικής αντιδράσεων βιοξείδωσης της οργανικής ουσίας

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η προσομοίωση της βιοαποδόμησης των οργανικών αποβλήτων όπως αυτή πραγματοποιήθηκε στους τέσσερις πειραματικούς κύκλους κομποστοποίησης με τη χρήση του συστήματος κομποστοποίησης. Στην παρούσα έρευνα, η ανάλυση της κινητικής των αντιδράσεων βιοξείδωσης του οργανικού υλικού

αφορά στην κινητική εξίσωση πρώτης τάξης βασιζόμενη στις απώλειες της βιοαποδομήσιμης οργανικής ουσίας κατά την αερόβια επεξεργασία των οργανικών αποβλήτων, η οποία τυγχάνει ευρείας εφαρμογής, δεδομένου ότι η μάζα του στερεού υπολείμματος του υποστρώματος παραμένει σταθερή κατά τα εξελικτικά στάδια της διεργασίας (Bartista et al., 2010; Higgins and Walker, 2001; Agamuthu et al., 2000; Mohee et al., 1998; Das and Keener, 1997; Haug, 1993; Keener et al., 1993; Smith and Eilers, 1980). Επιπλέον, στην ανάλυση της κινητικής αντίδρασης πρώτης τάξης, λήφθηκαν υπόψη οι περιορισμοί της μεταβολής της θερμοκρασίας, της υγρασίας και του οξυγόνου, οι οποίες επιδρούν στο ρυθμό της βιολογικής αποδόμησης του υποστρώματος κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης.

Η προσαρμογή της καμπύλης (curve-fitting) του μοντέλου στα πειραματικά δεδομένα βιοξείδωσης της οργανικής ουσίας παρουσιάζεται στο **Διάγραμμα 6.45** για κάθε πειραματικό κύκλο κομποστοποίησης τόσο για το χρόνο παραμονής του υποστρώματος στον βιοαντιδραστήρα όσο και για τη διάρκεια ωρίμανσης του σε σειράδια (30 ημέρες). Στον **Πίνακα 6.22** συνοψίζονται οι παράμετροι οι οποίες υπολογίστηκαν κατά την εφαρμογή του πρότυπου προσομοίωσης.

Πίνακας 6.21: Παράμετροι οι οποίες υπολογίστηκαν από την εφαρμογή του μοντέλου κινητικής αντίδρασης πρώτης τάξης των απωλειών βιοαποδομήσιμης οργανικής ουσίας (BOM_{loss}) διορθωμένο ως προς την επίδραση των κρίσιμων παραμέτρων της θερμοκρασίας, της υγρασίας και του οξυγόνου.

Πειραματικός κύκλος	BOM_0 (% OM) ^(α)	BOM_{loss} (% OM) ^(β)	BOM_{loss} (% BOM_0) ^(γ)	k_{max} (d^{-1}) ^(δ)	NRMSE (%) ^(ε)
1 ^{ος}	86.6	82.3	95.0	0.173	1.54
2 ^{ος}	84.1	81.3	96.7	0.236	2.10
3 ^{ος}	67.3	65.1	96.8	0.184	2.42
4 ^{ος}	87.4	83.0	94.9	0.210	2.75

^(α) Το συνολικό ποσοστό οργανικής ουσίας στο αρχικό υπόστρωμα το οποίο δύναται να οξειδωθεί

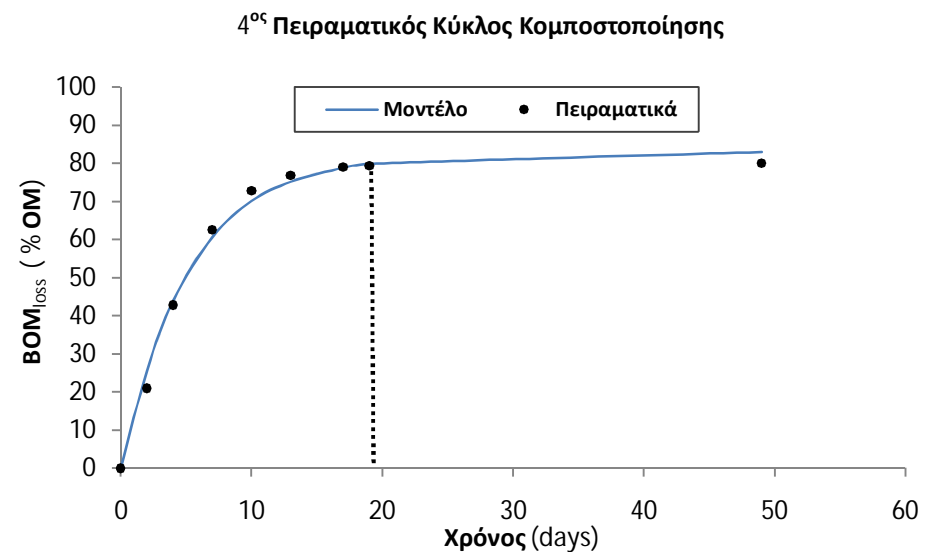
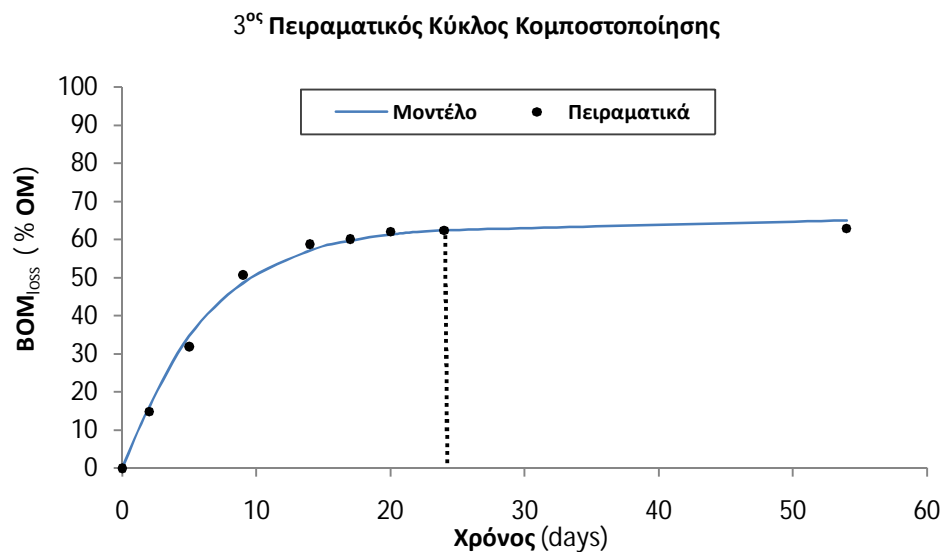
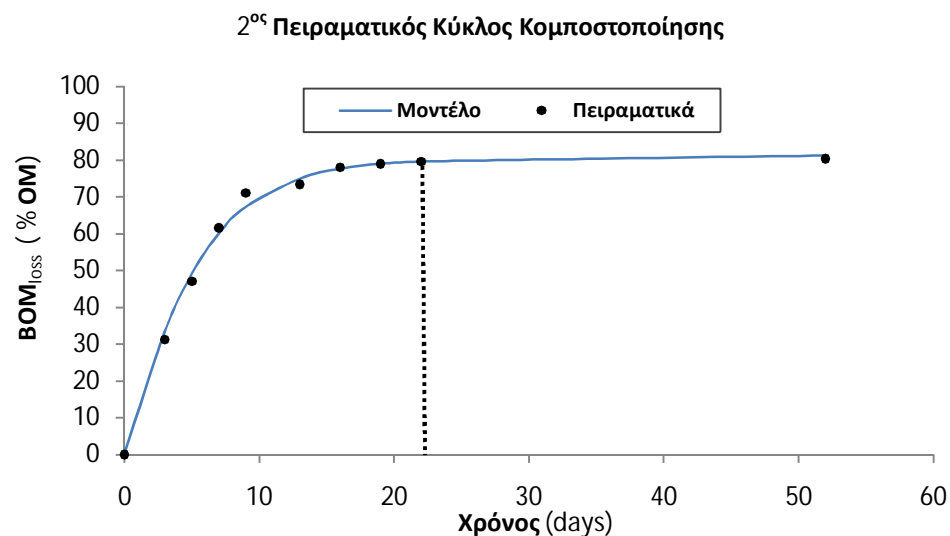
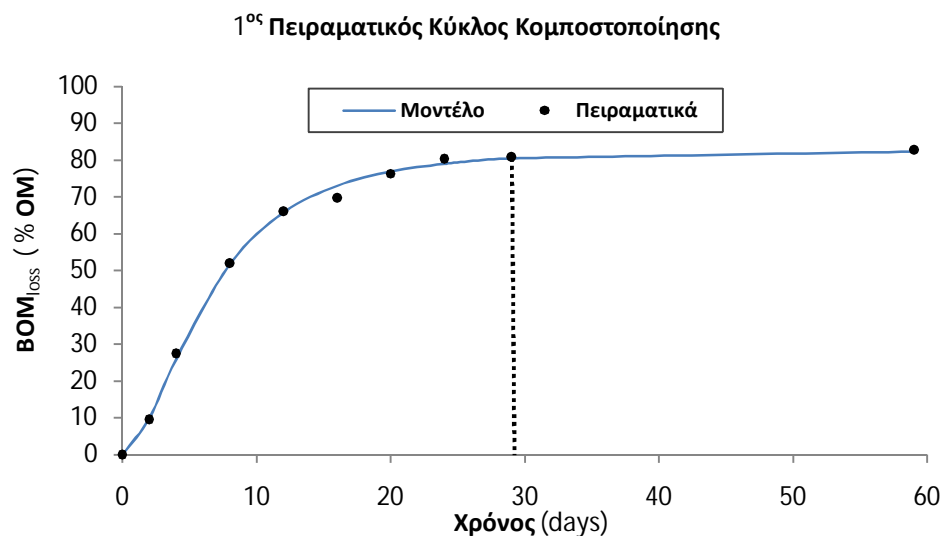
^(β) Η ποσοστιαία απομάκρυνση της οργανικής ουσίας ως προς την αρχική οργανική ουσία του υποστρώματος

^(γ) Η ποσοστιαία απομάκρυνση της οργανικής ουσίας ως προς το συνολικό ποσοστό της βιοαποδομήσιμης οργανικής ουσίας

^(δ) Ο μέγιστος ρυθμός βιοαποδόμησης της οργανικής ουσίας

^(ε) Η κανονικοποιημένη ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος

Η ποσοστιαία απώλεια της βιοαποδομήσιμης οργανικής ουσίας (BOM_{loss}) μετά την ωρίμανση του τελικού προϊόντος υπολογίζεται ίση με 82.3, 81.3, 65.1 και 83.0% της αρχικής οργανικής ουσίας του υποστρώματος για την 1^η, 2^η, 3^η και 4^η πειραματική εφαρμογή αντίστοιχα. Οι υψηλές τιμές του BOM_{loss} υποδηλώνουν ότι ο έλεγχος των διεργασιών της κομποστοποίησης ήταν επαρκής δεδομένου ότι αντίστοιχες τιμές συστημάτων κομποστοποίησης σε μονάδες Μηχανικής και Βιολογικής Επεξεργασίας υπολογίζονται μεταξύ 29-68% της αρχικής οργανικής ουσίας (Bartista et al., 2010; Adani et al., 2000; Fricke and Muller, 1999).



Διάγραμμα 6.45: Προσαρμογή της προσομοίωσης της κινητικής αντιδράσεων στα πειραματικά δεδομένα για τους τέσσερις πειραματικούς κύκλους κομποστοποίησης αναφορικά με το ποσοστό βιοξείδωσης της βιοαποδομήσιμης οργανικής ουσίας του υποστρώματος (BOM_{loss}) ως προς την αρχική οργανική ουσία. Η διακεκομμένη γραμμή σηματοδοτεί την απομάκρυνση του υποστρώματος από το βιοαντιδραστήρα και την τοποθέτησή του σε σειράδια για την περαιτέρω ωρίμανση του υλικού.

Επιπλέον, σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το πρότυπο προσομοίωσης της κινητικής αντιδράσεων, το συνολικό ποσοστό της βιοαποδομήσιμης οργανικής ουσίας (BOM_0), υπολογίζεται ίσο με 86.6, 84.1, 67.3 και 87.4% της αρχικής οργανικής ουσίας του υποστρώματος για τον 1^ο, 2^ο, 3^ο και 4^ο πειραματικό κύκλο αντίστοιχα. Το BOM_0 των πειραματικών κύκλων εμφανίζεται υψηλότερο συγκριτικά με το εύρος τιμών που προκύπτουν με την εφαρμογή κινητικών εξισώσεων πρώτης τάξης κατά την κομποστοποίηση ιλύος, κοπριάς οικόσιτων ζώων, απόβλητων ελαιουργίας σε συνδυασμό με διαφορετικά λιγνοκυτταρινούχα απόβλητα ως δομικά υλικά ($BOM_0=55.0-77.1\%$ OM) (García-Gómez et al., 2003; Bernal et al., 1996; Paredes et al., 1996b, 2000). Αξίζει να αναφερθεί ότι στις συγκεκριμένες περιπτώσεις δεν λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς η επίδραση των κρίσιμων παραμέτρων (π.χ. θερμοκρασία, υγρασία και οξυγόνο) κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης. Στην περίπτωση που λαμβάνεται υπόψη η επίδραση σταθερής θερμοκρασίας (55°C) οι Komilis and Ham (2000) υπολογίζουν το BOM_0 μεταξύ 45.0-47.0% και 60.9-76.1% σε κηπευτικά απορρίμματα και αστικά στερεά απόβλητα αντίστοιχα.

Στους πειραματικούς κύκλους κομποστοποίησης το ποσοστό απωλειών της βιοαποδομήσιμης οργανικής ουσίας (BOM_{loss}) ως προς το σύνολο της διαθέσιμης βιοαποδομήσιμης οργανικής ουσίας (BOM_0) υπολογίζεται μεταξύ 94.9-96.8% υποδηλώνοντας ότι το μεγαλύτερο μέρος του BOM_0 έχει απομακρυνθεί σε όλους τους πειραματικούς κύκλους στο τέλος της διεργασίας. Επιπλέον παρατηρείται ότι το BOM_0 στον 3^ο κύκλο εμφανίζει τη μικρότερη τιμή γεγονός το οποίο οφείλεται στη μεγαλύτερη περιεκτικότητα του υποστρώματος σε αδρανή στοιχεία (περιεκτικότητα σε στερεό υπόλειμμα). Εντούτοις, το ποσοστό απωλειών του BOM_0 είναι υψηλότερο συγκριτικά με τους άλλους κύκλους και ίσο με 96.8% του BOM_0 επισημαίνοντας ότι οι βιοξειδωτικές διεργασίες τόσο στον τρίτο όσο και στους υπόλοιπους πειραματικούς κύκλους τελούνται σε πολύ υψηλό βαθμό. Αντίστοιχα υψηλά ποσοστά απωλειών οργανικής ουσίας, της τάξης του 85% του BOM_0 , παρατηρούνται και από τους Baptista et al. (2011) στην εφαρμογή του ίδιου πρότυπου προσομοίωσης κατά την κομποστοποίηση σε μονάδες Μηχανικής και Βιολογικής Επεξεργασίας. Τα ποσοστά μείωσης του BOM_0 στις πειραματικές εφαρμογές, προβλέπονται για χρονικό διάστημα μεταξύ 49-59 ημερών το οποίο αποτελεί ένδειξη της ευκολίας με την οποία βιοαποδομείται το υπόστρωμα. Τα χρονικά αυτά διαστήματα είναι σε συμφωνία με το εύρος των χρονικών περιόδων που παρουσιάζονται από τον Mason (2007) (30-63 ημέρες) για την προβλεπόμενη μείωση του BOM_0 κατά 95% σε διαφορετικά οργανικά ρεύματα αποβλήτων, ενσωματώνοντας την επίδραση σταθερών ή μεταβαλλόμενων συνθηκών της θερμοκρασίας στα πρότυπα προσομοίωσης της κινητικής αντιδράσεων.

Ο μέγιστος ρυθμός βιοαποδόμησης, k_{max} , χαρακτηρίζει το σύστημα κομποστοποίησης σε βέλτιστες λειτουργικές συνθήκες και υπολογίστηκε ίσο με 0.173, 0.236, 0.184 και 0.210 d^{-1} για την 1^η, 2^η, 3^η και 4^η πειραματική εφαρμογή αντίστοιχα (Πίνακας 6.22). Παρατηρείται ότι η απόκλιση των τιμών του k_{max} κυμαίνεται σε σχετικά μικρό εύρος και η διαφοροποίηση των τιμών οφείλεται στη διαφορετική σύσταση του αρχικού υποστρώματος. Ως προς τις βιβλιογραφικά αναφερόμενες τιμές του k_{max} , οι Paredes et al. (2000, 2001) παρουσιάζουν εύρος τιμών μεταξύ 0.0226 - 0.0749 d^{-1} (12.20%<RMS<32.34%) κατά την κομποστοποίηση ιλύος με αγροβιομηχανικά απόβλητα χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση των περιβαλλοντικών μεταβλητών. Στις περιπτώσεις όπου ενσωματώνεται η επίδραση σταθερών συνθηκών της θερμοκρασίας

το k_{max} λαμβάνει τιμές (α) μεταξύ 0.11-0.14 d^{-1} και 0.10-0.11 d^{-1} σε υποστρώματα κηπευτικών και τροφικών υπολειμμάτων αντίστοιχα (Komilis and Ham, 2000), (β) μεταξύ 0.07-0.17 d^{-1} στην περίπτωση γεωργικών υπολειμμάτων (Bono et al., 1992) και (γ) ίση με 0.41 d^{-1} κατά τη συγκομποστοποίηση λύος με γεωργικά υπολείμματα (Bach et al., 1984). Επιπλέον, ο Mason (2008b) αναφέρει εύρος τιμών k_{max} , σε θερμοκρασία 40°C, μεταξύ 0.07-0.63 d^{-1} για την επεξεργασία της λύος με και χωρίς πριονίδι.

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 της οργανικής ουσίας (BOM_{loss}) μεταξύ των πειραματικών τιμών και αυτών του μοντέλου. Ύστερα οι τιμές αυτές κανονικοποιήθηκαν ως προς το επί της εκατό ποσοστό της συνολικής βιοαποδομήσιμης οργανικής ουσίας (BOM_0) σύμφωνα με τις εξισώσεις (6.13) και (6.14) (Baptista et al., 2010; Mason, 2007; Kulcu and Yaldiz, 2004).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (BOM_{loss \text{ μοντέλο}, i} - BOM_{loss \text{ πειραματικό}, i})^2}{n}} \quad \text{Εξίσωση (6.13)}$$

$$NRMSE = (RMSE/BOM_0) * 100 \quad \text{Εξίσωση (6.14)}$$

Όπου:

NRMSE: Κανονικοποιημένη ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος

RMSE: Ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος

BOM_0 : Συνολικό ποσοστό της βιοαποδομήσιμης οργανικής ουσίας στο αρχικό υπόστρωμα ($t=0$) το οποίο δύναται να οξειδωθεί (% OM)

$BOM_{loss \text{ μοντέλο}}$: Ποσοστό απομάκρυνσης της βιοαποδομήσιμης οργανικής ουσίας το οποίο υπολογίζεται από το μοντέλο

$BOM_{loss \text{ πειραματικό}}$: Ποσοστό απομάκρυνσης της βιοαποδομήσιμης οργανικής ουσίας το οποίο προσδιορίζεται πειραματικά

n: Συνολικός αριθμός των μετρήσεων

Οι τιμές του NRMSE που προκύπτουν για τους τέσσερις πειραματικούς κύκλους κομποστοποίησης είναι μεταξύ 1.54-2.75% (Πίνακας 6.22) 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 Baptista 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) (Πίνακα 6.23). Επομένως, η ποσοστιαία απομάκρυνση της βιοαποδομήσιμης οργανικής ουσίας (BOM_{loss}) στους τέσσερις πειραματικούς κύκλους κομποστοποίησης περιγράφεται επιτυχώς από το μοντέλο

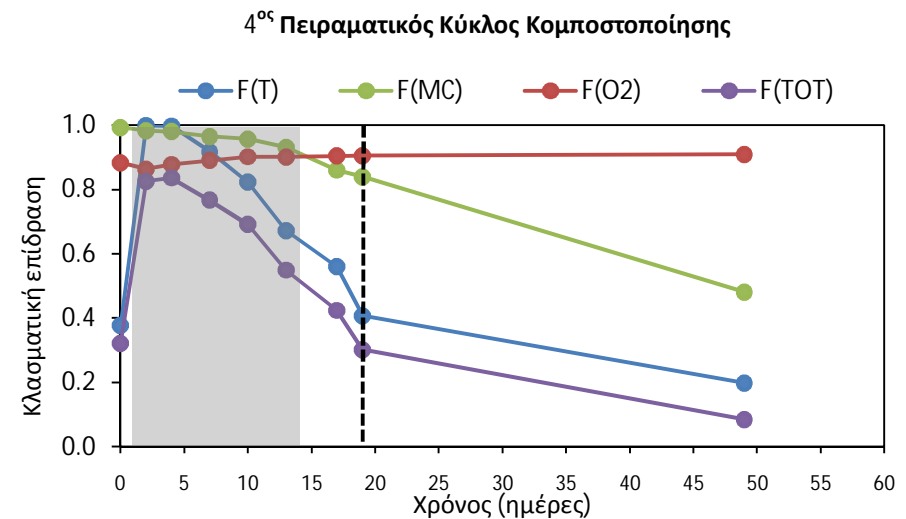
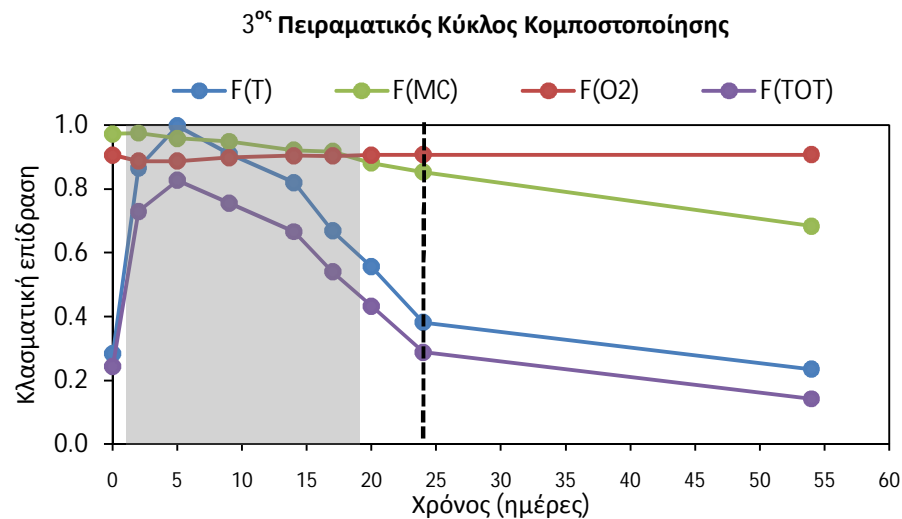
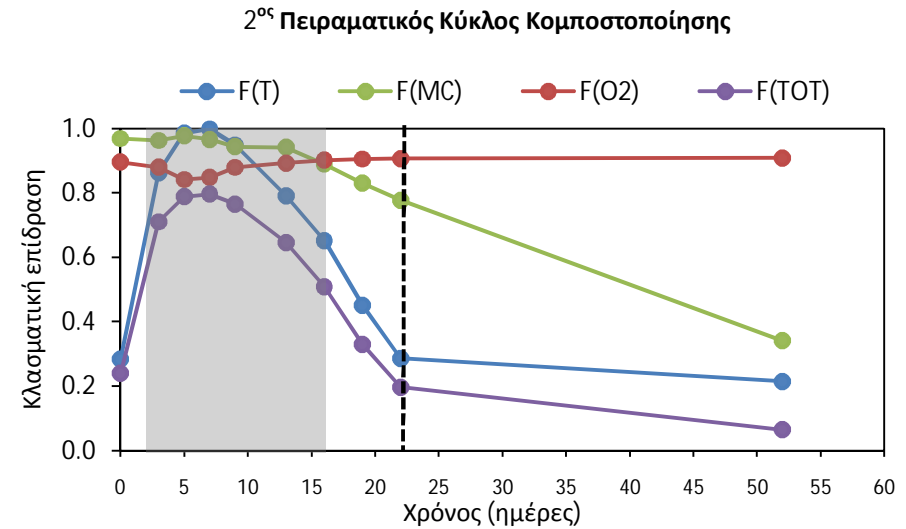
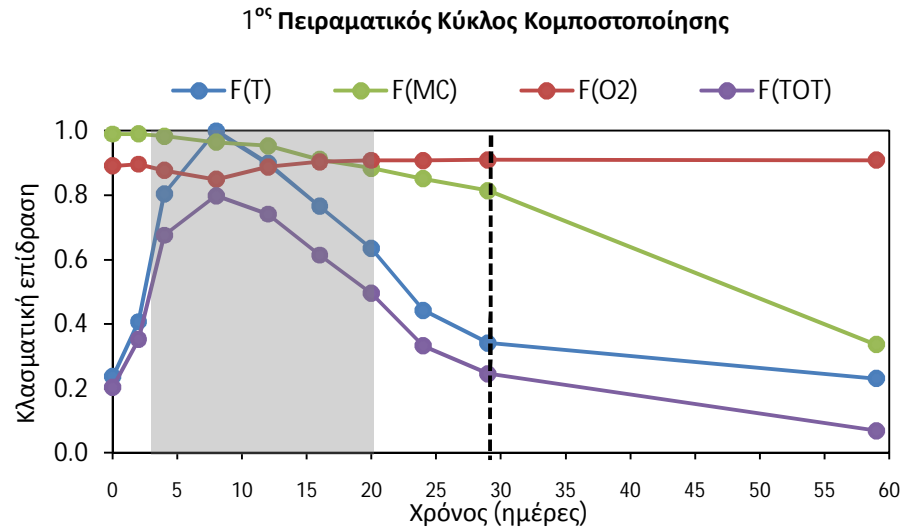
κινητικής πρώτης τάξης γεγονός τα οποίο επιβεβαιώνει τα συμπεράσματα των Baptista et al. (2010), Mason (2007), García-Gómez et al. (2003), Bari (2000), Paredes et al. (2000) και Bernal et al. (1996).

Πίνακας 6.22: 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 κατεύθυνση 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

Για την περαιτέρω αξιολόγηση της λειτουργίας του συστήματος κομποστοποίησης, παρουσιάζεται η επίδραση των κρίσιμων παραμέτρων της θερμοκρασίας, της υγρασίας, και του οξυγόνου στον περιορισμό της διεργασίας της κομποστοποίησης όπως αυτή προκύπτει από την εφαρμογή του μοντέλου προσομοίωσης σε κάθε πειραματικό κύκλο και για κάθε χρονική στιγμή.

Στο **Διάγραμμα 6.46** παρουσιάζεται η εξέλιξη των διορθωτικών συντελεστών της θερμοκρασίας $F(T)$, της υγρασίας $F(MC)$, και του οξυγόνου $F(O_2)$ όπως αυτοί υπολογίστηκαν βάσει των πειραματικών δεδομένων για κάθε πειραματικό κύκλο και σύμφωνα με τις εμπειρικές εξισώσεις (6.8) έως (6.10). Στην έναρξη των πειραματικών εφαρμογών παρατηρείται ο περιορισμός στη διεργασία της κομποστοποίησης λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών το οποίο είναι αναμενόμενο καθότι τα διαφορετικά υποστρώματα εισέρχονται στον βιοαντιδραστήρα σε θερμοκρασία παρόμοια με αυτή του περιβάλλοντος ($0.24 < F(T) < 0.38$). Στη συνέχεια αποτυπώνεται η αύξηση της θερμοκρασίας σε σύντομο χρονικό διάστημα λόγω της διάσπασης των διαλυτών και άμεσα διαθέσιμων βιοαποδομήσιμων οργανικών ενώσεων του υποστρώματος διαμορφώνοντας τη θερμοκρασία σε ευνοϊκότερα για τη διεργασία επίπεδα. Στο ίδιο στάδιο της κομποστοποίησης η υγρασία και το οξυγόνο δεν αποτελούν παράγοντες περιορισμού των διεργασιών λόγω της αρχικής ρύθμισης της περιεκτικότητας σε νερό του υποστρώματος καθώς και λόγω των συνθηκών ανάδευσης και αερισμού του οργανικού υλικού ($F(O_2) > 0.88$ και $F(MC) > 0.96$). Κατά τη θερμόφιλη φάση τα θερμοκρασιακά επίπεδα κυμαίνονται σε βέλτιστο εύρος τιμών με το διορθωτικό συντελεστή της θερμοκρασίας, $F(T)$, να λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του ($F(T)=1$ για $58.6^{\circ}C$). Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν παρατηρείται περιορισμός ως προς τις ανώτατες θερμοκρασίες κατά τις πειραματικές εφαρμογές υποδηλώνοντας ότι τα υψηλά θερμοκρασιακά επίπεδα δεν περιορίζουν τη μικροβιακή δράση. Σε αντίθετη περίπτωση ο διορθωτικός συντελεστής της θερμοκρασίας περιορίζει σημαντικά την εξέλιξη της διεργασίας όπως καταγράφουν χαρακτηριστικά οι Baptista et al. (2011) κατά την κομποστοποίηση σε μονάδες MBE.

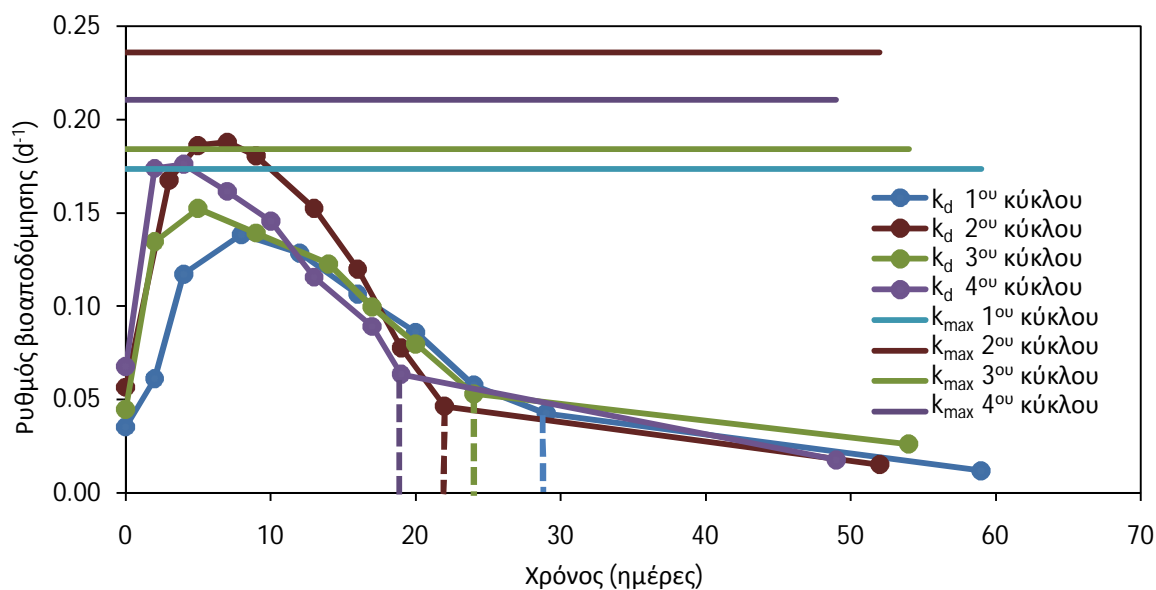


Διάγραμμα 6.46: Εξέλιξη των διορθωτικών συντελεστών της θερμοκρασίας $F(T)$, της υγρασίας $F(MC)$ του οξυγόνου $F(O_2)$ και της συνδυασμένης επίδρασής τους $F(TOT)$ οι οποίοι περιγράφουν την επίδραση των κρίσιμων παραμέτρων στη διεργασία της κομποστοποίησης στους υπό εξέταση πειραματικούς κύκλους. Κάθε παράμετρος λαμβάνει τιμές από 0 έως 1 όπου τιμές ίσες με 1 δεν περιορίζουν τη διεργασία ενώ τιμές ίσες με 0 παρουσιάζουν το μέγιστο περιορισμό. Οι περιοχές των διαγραμμάτων που επισημαίνονται με γκριζό χρώμα αφορούν στη θερμοφιλή φάση ($>40^{\circ}C$) των διεργασιών ενώ η διακεκομμένη γραμμή σηματοδοτεί την απομάκρυνση του υποστρώματος από το βιοαντιδραστήρα και την τοποθέτηση του σε σειράδια για την περαιτέρω ωρίμανση του υλικού.

Στη συνέχεια των διεργασιών όταν τα υποστρώματα μεταβαίνουν σταδιακά από το 2^ο μεσόφιλο στάδιο προς το στάδιο ωρίμανσης του οργανικού υλικού, το οποίο λαμβάνει χώρα εκτός του βιοαντιδραστήρα, παρατηρείται ότι με εξαίρεση το οξυγόνο, η υγρασία και κυρίως η θερμοκρασία αποτελούν περιοριστικούς παράγοντες των διεργασιών. Οι συνθήκες αυτές είναι αναμενόμενες καθότι η αφομοίωση των άμεσα διαθέσιμων οργανικών ενώσεων ευθυνόμενων για την αύξηση και τη διατήρηση των υψηλών θερμοκρασιών έχει ολοκληρωθεί, ενώ στο στάδιο αυτό συντελείται η αποδόμηση συμπαγών οργανικών ενώσεων με βραδύ ρυθμό με την παραγόμενη θερμότητα να μην αναπληρώνει τις απώλειες. Ως προς την υγρασία, στο στάδιο αυτό της διεργασίας διακόπτεται η προσθήκη νερού στο υπόστρωμα προκειμένου να μειωθεί η περιεχόμενη υγρασία ώστε να επιτευχθεί μείωση τόσο του όγκου και της μάζας του οργανικού υλικού όσο και της μικροβιακής δραστηριότητας.

Επιπλέον, στο **Διάγραμμα 6.46** παρουσιάζεται και η συνδυασμένη επίδραση των κρίσιμων παραμέτρων, $F(TOT)$, στον περιορισμό των διεργασιών της κομποστοποίησης η οποία προκύπτει από το γινόμενο των τριών διορθωτικών συντελεστών $F(T)$, $F(MC)$, και $F(O_2)$ (Εξίσωση 6.5). Με το $F(TOT)$ γίνεται η εκτίμηση της συνολικής λειτουργίας του συστήματος σε κάθε κύκλο κομποστοποίησης αναφορικά με τη διατήρηση των βέλτιστων συνθηκών λειτουργίας κατά τη διάρκεια των διεργασιών της αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας. Σύμφωνα με το **Διάγραμμα 6.46** προκύπτει ότι η συνολική επίδραση των κρίσιμων παραμέτρων στους διαφορετικούς πειραματικούς κύκλους εμφανίζει κοινά χαρακτηριστικά υποδεικνύοντας ότι οι λειτουργικές συνθήκες στις πειραματικές εφαρμογές είναι παρόμοιες γεγονός το οποίο είναι αναμενόμενο δεδομένου ότι οι ρυθμίσεις του προγραμματισμού της λειτουργίας του PLC το οποίο αφορά στις λειτουργικές παραμέτρους ανάδευσης, αερισμού και ύγρανσης του υποστρώματος του βιοαντιδραστήρα είναι ίδιες στις τέσσερις εφαρμογές (**Πίνακας 5.1**). Επίσης, τα υψηλά επίπεδα του $F(TOT)$ (>0.5) τα οποία διαμορφώνονται για τη μεγαλύτερη διάρκεια του χρόνου παραμονής του υποστρώματος στον βιοαντιδραστήρα, επισημαίνουν ότι οι λειτουργικές συνθήκες διατηρούνται σε ευνοϊκά επίπεδα και ότι το σύστημα λειτουργεί αποδοτικά ως προς τη επίτευξη των βέλτιστων περιβαλλοντικών συνθηκών για την εξέλιξη των διεργασιών της κομποστοποίησης (Bartista et al., 2011). Η διατήρηση των συνθηκών αυτών αποτυπώνεται και από το υψηλή ποσοστιαία απώλεια της οργανικής ουσίας (BOM_{loss}) η οποία υπολογίστηκε σε κάθε πειραματικό κύκλο όπως περιγράφηκε παραπάνω.

Εκτός των προαναφερόμενων παραμέτρων, είναι χρήσιμο να γίνει ανάλυση της διακύμανσης του ρυθμού βιοαποδόμησης, k_d , κατά τα εξελικτικά στάδια των πειραματικών εφαρμογών της κομποστοποίησης (**Διάγραμμα 6.47**). Η σπουδαιότητα της ανάλυσης αυτής έγκειται στο γεγονός ότι παρέχονται περαιτέρω πληροφορίες αναφορικά με την αποτελεσματικότητα του συστήματος κομποστοποίησης καθότι το k_d αποτελεί το μέτρο της συνολικής απόδοσης της εκάστοτε υπό εξέταση διεργασίας για κάθε χρονική στιγμή δεδομένου ότι προκύπτει από το γινόμενο του k_{max} και του $F(TOT)$ (Εξίσωση 6.5). Συνεπώς, 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).



Διάγραμμα 6.47: Εξέλιξη του ρυθμού βιοαποδόμησης, k_d , κατά τη διάρκεια των πειραματικών κύκλων κομποστοποίησης σε σύγκριση με το μέγιστο ρυθμό βιοαποδόμησης, k_{max} , όπως αυτός προκύπτει για κάθε εφαρμογή. Οι διακεκομμένες γραμμές σηματοδοτούν την απομάκρυνση του υποστρώματος από το βιοαντιδραστήρα και την τοποθέτηση του σε σειράδια για την περαιτέρω ωρίμανση του υλικού

Σύμφωνα με το **Διάγραμμα 6.47** παρατηρείται ότι το k_d λαμβάνει μέγιστες τιμές κατά τη θερμοφιλή φάση σε όλες τις πειραματικές εφαρμογές διότι σε αυτό το στάδιο της διεργασίας οι διορθωτικοί συντελεστές των κρίσιμων παράμετροι δεν αποτελούν σημαντικό περιοριστικό παράγοντα των διεργασιών (**Διάγραμμα 6.46**). Επιπλέον, διαπιστώνεται ότι το εύρος τιμών του k_d κατά τη διάρκεια του θερμοφιλού σταδίου κυμαίνονται από 0.086-0.138 d^{-1} , 0.120-0.188 d^{-1} , 0.100-0.152 d^{-1} , 0.116-0.176 d^{-1} για τον 1^ο, 2^ο, 3^ο και 4^ο πειραματικό κύκλο αντίστοιχα, τιμές οι οποίες είναι σε επίπεδα κοντά στο k_{max} όπως αυτό παρουσιάστηκε στον **Πίνακα 6.22** για κάθε πειραματικό κύκλο. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει την υψηλή απόδοση του συστήματος στο σύνολό του. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι η διαφοροποίηση του k_d μεταξύ των πειραματικών κύκλων οφείλεται κατά κύριο λόγο στις διαφορετικές τιμές που λαμβάνει το k_{max} λόγω της διαφορετικής σύστασης του υποστρώματος σε κάθε κύκλο δεδομένου ότι το $F(TOT)$ εμφανίζει παρόμοια εξέλιξη σε όλες τις πειραματικές εφαρμογές. Στην περίπτωση του 1^{ου} κύκλου το k_d εξελίσσεται σε χαμηλότερα επίπεδα συγκριτικά με τις υπόλοιπες εφαρμογές καθότι το k_{max} λαμβάνει τις μικρότερες τιμές το οποίο ενδεχομένως να οφείλεται στις μεγαλύτερες ποσότητες φύλλων ζαχαρότευτλων που χρησιμοποιήθηκαν ως υλικό τροφοδοσίας των οποίων οι περιεχόμενες λιγνοκυτταρινούχες ενώσεις είναι λιγότερο επιδεκτικές στις μεταβολικές διεργασίες των μικροοργανισμών.

6.5.4. Ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων προσομοίωσης

Οι προβλέψεις των μέγιστων ρυθμών βιοαποδόμησης, k_{max} , για κάθε πειραματικό κύκλο κομποστοποίησης, επηρεάζονται από θεωρημένες τιμές ορισμένων παραμέτρων του προτύπου προσομοίωσης της κινητικής αντιδράσεων βιοξείδωσης της οργανικής ουσίας όπως αυτές παρουσιάστηκαν στην ενότητα 6.5.1. Οι παράμετροι αυτές εμπεριέχουν το στοιχείο της αβεβαιότητας σε μικρό ή μεγάλο βαθμό. Επομένως, κρίνεται σημαντικός τόσο ο έλεγχος των παραμέτρων που επιδρούν περισσότερο στον υπολογισμό του k_{max} , όσο και η εύρεση του μεγέθους της επιρροής στην πρόβλεψή του κατά τη διακύμανση

της εκάστοτε παραμέτρου. Η ανάλυση ευαισθησίας αποτελεί τη μέθοδο προσδιορισμού της επίδρασης των παραμέτρων του μοντέλου κατά την εκτίμηση του k_{max} με τον υπολογισμό των συντελεστών ευαισθησίας (sensitivity ratio). Ο συντελεστής ευαισθησίας προσδιορίζεται από την Εξίσωση (6.15) ως το πηλίκο της ποσοστιαίας διακύμανσης του k_{max} , $\% \Delta(k_{max})$, κατά την εφαρμογή ποσοστιαίας διακύμανσης σε μια από τις παραμέτρους του μοντέλου, $\% \Delta(\text{παραμέτρος})$.

$$\text{Συντελεστής ευαισθησίας} = \frac{\% \Delta(k_{max})}{\% \Delta(\text{παραμέτρος})} \quad \text{Εξίσωση (6.15)}$$

Για την επίτευξη των προαναφερόμενων στόχων πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας με την παραδοχή ότι οι παράμετροι οι οποίες δύναται να επηρεάσουν την εκτίμηση του k_{max} είναι αυτές που παρουσιάζονται στον **Πίνακα 6.24**.

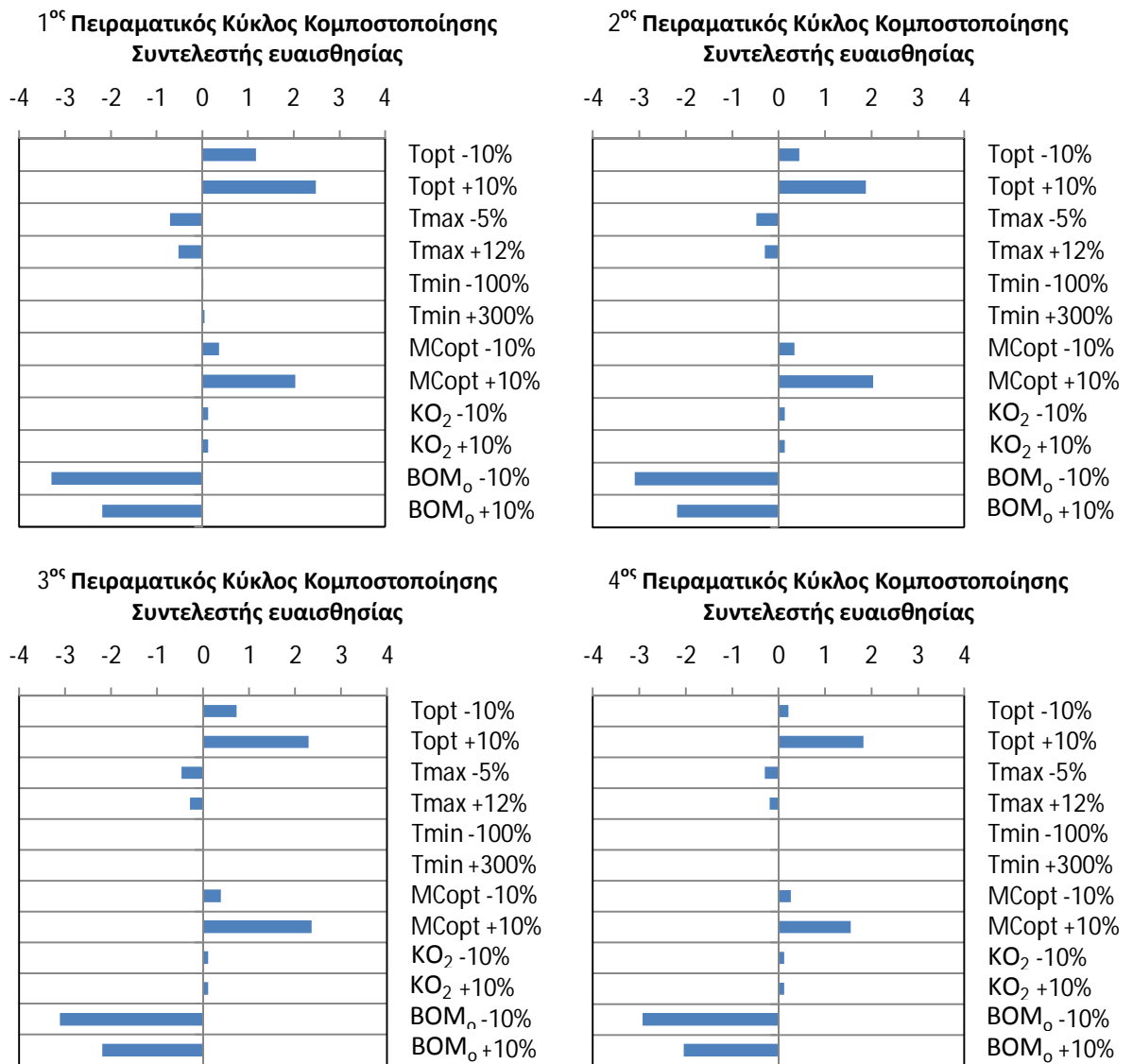
Πίνακας 6.23: Παράμετροι ελέγχου ανάλυσης ευαισθησίας και εύρος διακύμανσής τους

Παράμετρος	Εξισώσεις	Σχόλια ^(α)
T_{min} T_{max} T_{opt}	Εξισώσεις (6.7) και (6.8)	Παράμετροι του διορθωτικού συντελεστή της θερμοκρασίας η διακύμανση των οποίων επιλέγεται T_{min} : -100% και 300%, T_{max} : -5 και +12%, T_{opt} : $\pm 10\%$
MC_{opt}	Εξίσωση (6.9)	Παράμετρος του διορθωτικού συντελεστή της υγρασίας η διακύμανση της οποίας επιλέγεται $\pm 10\%$ της βέλτιστης περιεκτικότητάς της στο υπόστρωμα
kO_2	Εξίσωση (6.10)	Παράμετρος του διορθωτικού συντελεστή του οξυγόνου η διακύμανση της οποίας επιλέγεται $kO_2 \pm 10\%$ (σταθερά ημικορεσμού)
BOM_0	Εξίσωση (6.6)	Διακύμανση της συνολικής βιοαποδομήσιμης οργανικής ουσίας του υποστρώματος BOM_0 : $\pm 10\%$

^(α) Η επιλογή του εύρους διακυμάνσεων των παραμέτρων του μοντέλου επιλέχθηκαν έτσι ώστε να εμπίπτει σε εύρος τιμών ± 4 των συντελεστών ευαισθησίας.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης για κάθε πειραματικό κύκλο κομποστοποίησης παρουσιάζονται στο **Διάγραμμα 6.48** σύμφωνα με το οποίο παρατηρείται ότι:

- Η επίδραση των διακυμάνσεων των παραμέτρων στην πρόβλεψη του μέγιστου ρυθμού βιοαποδόμησης k_{max} , είναι παρόμοια για τις τέσσερις πειραματικές εφαρμογές.
- Οι συντελεστές ευαισθησίας των παραμέτρων T_{min} , T_{max} και kO_2 παρουσιάζονται μικρότεροι συγκριτικά με τις υπόλοιπες παραμέτρους υποδεικνύοντας ότι έχουν μικρή επίδραση στον υπολογισμό του k_{max} .
- Τη μεγαλύτερη επιρροή στην εκτίμηση του k_{max} (μεγαλύτεροι συντελεστές ευαισθησίας) παρουσιάζουν οι παράμετροι BOM_0 , T_{opt} και MC_{opt} .
- Οι συντελεστές ευαισθησίας, οι οποίοι αποτελούν μέτρο του μεγέθους της διακύμανσης του k_{max} προερχόμενη από τη διακύμανση των παραμέτρων του μοντέλου, λαμβάνουν συχνά τιμές μεταξύ 2 και 3.5 το οποίο υποδηλώνει ότι μερική ποσοστιαία διακύμανση των παραμέτρων αυτών του μοντέλου δύναται να μεταβάλει κατά 2 έως 3.5 φορές την εκτιμώμενη τιμή του k_{max} .



Διάγραμμα 6.48: Ανάλυση ευαισθησίας και συντελεστές ευαισθησίας των διαφόρων παραμέτρων του μοντέλου ως προς τη μεταβολή του μέγιστου ρυθμού βιοαποδόμησης k_{max}

Σημαντικές ομοιότητες τόσο στην επίδραση των προαναφερόμενων παραμέτρων στο k_{max} όσο και στη μεταβολή του k_{max} παρατηρείται από τους Baptista et al. (2010) κατά την εφαρμογή του ίδιου κινητικού μοντέλου σε τρία διαφορετικά σύστημα κομποστοποίησης Μηχανικής και Βιολογικής Επεξεργασίας. Η σημαντικότερη διαφοροποίηση σημειώνεται στην επίδραση του T_{opt} και T_{max} με την τελευταία παράμετρο να επηρεάζει περισσότερο την εκτίμηση του ρυθμού βιοαποδόμησης γεγονός το οποίο αποδίδεται στις επίτευξη υψηλότερων θερμοκρασιακών επιπέδων κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης.

7. Συμπεράσματα

Η παρούσα διδακτορική διατριβή διερευνά τη δυνατότητα επεξεργασίας και επαναχρησιμοποίησης των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων με τη λειτουργία συστήματος κομποστοποίησης το οποίο σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε για την αυτόνομη διαχείριση της ροής αυτής των αποβλήτων σε αποκεντρωμένες περιοχές. Τα συμπεράσματα τα οποία προκύπτουν από την εργασία αφορούν στην αξιολόγηση του συστήματος αυτού αναφορικά με (α) τον έλεγχο και την παρακολούθηση των διεργασιών της κομποστοποίησης, (β) την ποιότητα του τελικού προϊόντος (φυσικοχημικές και βιολογικές ιδιότητες) και (γ) την ανάλυση της κινητικής των αντιδράσεων βιοξείδωσης της οργανικής ουσίας.

Το σύστημα αποτελείται από βιοαντιδραστήρα κλειστού τύπου ασυνεχούς τροφοδοσίας με δυναμικότητα επεξεργασίας 1.5 – 2.0 tn βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων, το οποίο διαθέτει αυτοματοποιημένες διατάξεις μηχανικής ανάδευσης, αερισμού και ύγρανσης του οργανικού υποστρώματος. Κατέχει κατάλληλες διατάξεις τόσο για τη δέσμευση των εκπεμπόμενων αερίων ρύπων όσο και για τη συλλογή και απομάκρυνση των παραγόμενων στραγγισμάτων. Είναι ευέλικτο σύστημα ως προς τις ροές των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων που δύναται να επεξεργαστεί ενώ η λειτουργία του είναι πρακτική και εύκολη.

Στις πειραματικές εφαρμογές κομποστοποίησης επιλέχθηκαν ροές βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων όπως η ιλύς από μονάδες επεξεργασίας λυμάτων, τα γεωργικά υπολείμματα και τα κτηνοτροφικά απόβλητα τα οποία αποτελούν σημαντικό μέρος των παραγόμενων βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων. Το υλικό τροφοδοσίας του συστήματος κομποστοποίησης διαμορφώθηκε από τη σύνθεση διαφορετικών μιγμάτων των προαναφερόμενων αποβλήτων. Με βάση τις αρχικές συνθήκες των υποστρωμάτων προέκυψε ότι τα μίγματα παρουσιάζουν χαμηλή αναλογία C/N λόγω της υψηλής περιεκτικότητας των αποβλήτων σε άζωτο ενώ σημαντικά περιορισμένη είναι η συγκέντρωσή τους σε βαρέα μέταλλα. Ως προς τη λειτουργία του συστήματος κομποστοποίησης κατά την αερόβια βιολογική επεξεργασία των σχηματιζόμενων υποστρωμάτων παρατηρούνται τα εξής:

- 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 θερμόφιλο 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.
- 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. Ειδικότερα, κατά τη θερμόφιλη φάση

όπου σημειώνεται και η μεγαλύτερη μείωση της υγρασίας στο υπόστρωμα, λόγω των συνθηκών εξάτμισης, απαιτείται η προσθήκη νερού για τη διατήρηση της υγρασίας σε επιθυμητό εύρος τιμών.

- Η περιεκτικότητα του υποστρώματος σε οξυγόνο διαμορφώνεται σε όλες τις πειραματικές εφαρμογές σε επιθυμητά για τη διατήρηση των αερόβιων συνθηκών επίπεδα, με τον έλεγχο και τη ρύθμιση της συχνότητας και του ρυθμού του αερισμού και της ανάδευσης του υποστρώματος. Οι ελάχιστες τιμές του οξυγόνου παρουσιάζονται κατά τη θερμοφιλή φάση όπου η δραστηριότητα των μικροοργανισμών είναι εντονότερη και κατ' επέκταση η απαίτηση σε οξυγόνο για τη βιοξείδωση της οργανικής ουσίας είναι μεγαλύτερη. Στις περιπτώσεις των πειραματικών εφαρμογών όπου γίνεται η προσθήκη ζεόλιθου και περλίτη, επέρχεται τροποποίηση των φυσικών χαρακτηριστικών του υποστρώματος διαμορφώνοντας καλύτερες συνθήκες για τη διάχυση του αέρα στην οργανική μάζα μέσω της ενίσχυσης του πορώδους, διατηρώντας την περιεκτικότητα του οξυγόνου σε υψηλά επίπεδα καθόλη τη διάρκεια των διεργασιών.
- Ο ολικός οργανικός άνθρακας μειώνεται κατά τα εξελικτικά στάδια των πειραματικών εφαρμογών της κομποστοποίησης με το ρυθμό μείωσης να είναι μεγαλύτερος κατά τη θερμοφιλή φάση των διεργασιών. Αντίστοιχα, οι απώλειες σε οργανική ουσία ανέρχονται σε υψηλά επίπεδα με το μεγαλύτερο ποσοστό απωλειών να λαμβάνει χώρα κατά το θερμοφιλό στάδιο της κομποστοποίησης. Τόσο ο ολικός οργανικός άνθρακας όσο και οι απώλειες σε οργανική ουσία 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. Στην περίπτωση του τρίτου πειραματικού κύκλου όπου γίνεται η προσθήκη ζεόλιθου παρατηρείται ότι η μέγιστη τιμή pH είναι μικρότερη συγκριτικά με αυτή των υπόλοιπων πειραματικών κύκλων καθώς ο ζεόλιθος προσροφά μέρος των σχηματιζόμενων αμμωνιακών του υποστρώματος. Στα μετέπειτα στάδια της κομποστοποίησης το pH μειώνεται σταδιακή προς ουδέτερες 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. Σημαντικές είναι οι απώλειες αζώτου που παρουσιάζονται σε όλους τους πειραματικούς κύκλους κομποστοποίησης με το μεγαλύτερο μέρος αυτών να εμφανίζεται κατά το θερμοφιλό στάδιο των διεργασιών. Οι απώλειες αζώτου

εμφανίζονται κατά κύριο λόγο ως αέριες απώλειες λόγω της πτητικότητας της αμμωνίας καθώς συντρέχουν ευνοϊκές συνθήκες για την απελευθέρωση αέριας αμμωνίας όπως η παρουσία άμεσα διαθέσιμων αζωτούχων ενώσεων, η χαμηλή αναλογία C/N, το αλκαλικό pH και οι υψηλές θερμοκρασίες οι οποίες μετατοπίζουν το σημείο ισορροπίας $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$. Η χρήση ορυκτού ζεόλιθου σε μια από τις πειραματικές εφαρμογές, 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. Επιπλέον, στα τελικά στάδια και των τεσσάρων 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.

- Λόγω της υψηλής περιεκτικότητας της πλειονότητας των επιλεγμένων βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων σε άζωτο, διαμορφώνονται χαμηλοί λόγοι C/N στο αρχικό μίγμα των υποστρωμάτων εντείνοντας τη διάσπαση του οργανικού αζώτου με συνεπακόλουθη αύξηση της συγκέντρωσης των αμμωνιακών στα πρώτα στάδια των διεργασιών της κομποστοποίησης. Ο εμπλουτισμός του υποστρώματος σε οξυγόνο μέσω των αποδοτικών συνθηκών αερισμού και ανάδευσής του σε συνδυασμό με τα ευνοϊκά επίπεδα του pH και της θερμοκρασίας κατά τη 2^η μεσόφιλη φάση, ενισχύουν τη διεργασία της νιτροποίησης και τη σταδιακή αύξηση της συγκέντρωσης νιτρικών. Η συνεχής αυτή αύξηση των νιτρικών αποτελούν δείκτη της επικράτησης αερόβιων συνθηκών και κατ' επέκταση της αποδοτικότητας και της λειτουργικότητας του συστήματος κομποστοποίησης.
- Οι αρχικοί λόγοι C/N των υποστρωμάτων διαμορφώνονται σε χαμηλότερα από τα ιδανικά επίπεδα για την έναρξη των διεργασιών της κομποστοποίησης λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε αζωτούχες ενώσεις των επιλεγμένων βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων που συνθέτουν το οργανικό μίγμα. Εντούτοις, οι διεργασίες τελούνται ικανοποιητικά και ο λόγος C/N παρουσιάζει γενικά σταδιακή μείωση κατά τα εξελικτικά στάδια όλων διεργασιών διότι οι απώλειες του άνθρακα υπερτερούν αυτών του αζώτου.
- Τα στραγγίσματα που συλλέγονται κατά την εξέλιξη των πειραματικών εφαρμογών παρουσιάζουν παρόμοιες ιδιότητες με το υπόστρωμα, τη χρονική στιγμή κατά την οποία γίνεται η συλλογή τους. Το BOD₅ εμφανίζεται αρχικά σε υψηλά επίπεδα αλλά κατά τα εξελικτικά στάδια των διεργασιών το απαιτούμενο οξυγόνο μειώνεται βαθμιαία υποδηλώνοντας ότι τα οργανικά ενδιάμεσα προϊόντα υπόκεινται σε πλήρη βιοξείδωση σε CO₂, ενώ οι ενώσεις οι οποίες είναι μη βιοαποδομήσιμες ή λιγότερο ευάλωτες σε συνθήκες αποδόμησης, συσσωρεύονται. Οι παραγόμενες ποσότητες των στραγγισμάτων είναι περιορισμένες και παρουσιάζονται κυρίως κατά τα πρώτα στάδια της λειτουργίας του συστήματος κομποστοποίησης. Εντούτοις, το οργανικό και ανόργανο φορτίο των στραγγισμάτων παρουσιάζεται υψηλό και χρήζει κατάλληλης επεξεργασίας.
- Η προσθήκη ορυκτών πρόσθετων όπως ο ζεόλιθος 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.

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 36.1-44.3% και εμπίπτει στο προτεινόμενο εύρος τιμών όπως αυτό παρατίθεται από τη διεθνή βιβλιογραφία
- Το pH στο τελικό προϊόν εμφανίζει ουδέτερες τιμές μεταξύ 7.03-7.31 και είναι σε συμφωνία με το επιθυμητό εύρος τιμών για την ασφαλή εναπόθεσή του στο έδαφος.
- Το παραγόμενο κόμποστ είναι πλούσιο σε οργανική ουσία (54.99- 65.93% dm) και ενδέχεται να βελτιώσει τόσο τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του εδάφους όσο και τη γονιμότητα και την παραγωγικότητά του κατά την εναπόθεσή του.
- Η αναλογία C/N παρουσιάζεται μεταξύ 10.63 - 11.87 για το κόμποστ το οποίο προέρχεται από τους τρεις πρώτους κύκλους κομποστοποίησης, τιμές οι οποίες δύναται να διαμορφώσουν συνθήκες ισορροπίας ή μερικής ακινητοποίησης του αζώτου κατά την εναπόθεσή του στο έδαφος. Στην περίπτωση του τέταρτου κόμποστ η αναλογία C/N εμφανίζεται χαμηλή και ίση με 6.11 η οποία ενδεχομένως να προκαλέσει ανοργανοποίηση της περίσσειας του οργανικού αζώτου συντελώντας στη ρύπανση τόσο των επιφανειακών όσο και των υπόγειων υδατικών οικοσυστημάτων μέσω των διεργασιών επιφανειακής απορροής και διήθησης του ανόργανου αζώτου.
- Οι συγκεντρώσεις των αμμωνιακών στο παραγόμενο κόμποστ είναι μεταξύ 38.65 - 304.10 mg kg⁻¹ dm και κυμαίνεται σε αποδεκτά επίπεδα ενώ οι συγκέντρωσεις των νιτρικών παρουσιάζονται υψηλότερες (388.12 -3257.00 mg kg⁻¹ dm) από αυτές που ορίζονται στη βιβλιογραφία εκτός από την περίπτωση όπου και γίνεται η προσθήκη ζεόλιθου. Η παρουσία των νιτρικών κατά την εναπόθεση του κόμποστ στο έδαφος δύναται να επιβαρύνει το περιβάλλον μέσω της εκχύλισης θρεπτικών συστατικών. Εντούτοις, το οργανικό άζωτο στο κόμποστ αποτελεί το 93.0-98.4% του ολικού αζώτου και κατ' επέκταση ο βαθμός της διαθεσιμότητας των ανόργανων μορφών του αζώτου εξαρτάται από το ρυθμό ανοργανοποίησής του κατά την εναπόθεση του κόμποστ στο έδαφος. Επιπλέον, η αναλογία NH₄⁺/NO₃⁻ ως δείκτης αξιολόγησης του κόμποστ υπολογίζεται μεταξύ 0.09-0.24 και εμπίπτει στο εύρος τιμών που ορίζεται για ώριμο κόμποστ.
- Η περιεκτικότητα σε μακροστοιχεία (N, P, 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 φωσφόρου, 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 αυξάνεται στο παραγόμενο κόμποστ συγκριτικά με το αρχικό υπόστρωμα εξαιτίας των βιοξειδωτικών διεργασιών και της συνεπακόλουθης μείωσης της μάζας του οργανικού υλικού. Εντούτοις, οι συγκεντρώσεις εμφανίζονται σε χαμηλά επίπεδα και σε συμφωνία τόσο με το εύρος των ανώτατων ορίων που θέτει η Ε.Ε. για την τελική του διάθεση όσο και με τις περισσότερες οριακές τιμές που τίθενται από τα Κράτη Μέλη στις εθνικές νομοθεσίες.

- Ο Δείκτης Βλαστικότητα του κόμποστ κυμαίνεται μεταξύ 106.8-132.5% και 105.3-113.3% για τους σπόρους μαρουλιού και καρδάμου αντίστοιχα, υποδηλώνοντας ότι το τελικό προϊόν παρουσιάζεται φυτοθρεπτικό και δεν δύναται να αναστείλει τη βλαστικότητα των συγκεκριμένων φυτών διότι δεν παρουσιάζονται φυτοτοξικές ενώσεις.
- 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. Επιπλέον ενδεικτικές μετρήσεις στο κόμποστ σε συγκεκριμένους δείκτες παρουσίας παθογόνων μικροοργανισμών και παρασίτων, όπως τα ολικά και περιπρωματικά κολοβακτηριοειδή και τα αυγά ελμίνθων, παρουσιάζονται σε συγκεντρώσεις μικρότερες των ανώτατων επιτρεπτών ορίων.
- Από την εφαρμογή προκαταρκτικών πειραματικών καλλιεργειών αραβόσιτου και ζαχαρότευτλων σε διαφορετικές δοσολογίες κόμποστ (2.5, 5.0 και 7.5 tn ha⁻¹) προκύπτει ότι το τελικό προϊόν διεγείρει την ανάπτυξη των φυτών. Στην περίπτωση των καλλιεργειών αραβόσιτου το επίπεδο βλάστησης των φυτών εμφανίζεται μεγαλύτερο σε όλες τις εξεταζόμενες δοσολογίες κόμποστ συγκριτικά τόσο με το τυφλό (καμία προσθήκη υλικού) όσο και με τη χρήση χημικού λιπάσματος (0.5 tn ha⁻¹ NPK:20-15-10), με τη μεγαλύτερη ανάπτυξη των φυτών να καταγράφεται κατά τη χρήση κόμποστ 5.0 tn ha⁻¹. Ως προς τις καλλιεργείες ζαχαρότευτλων εμφανίζεται αύξηση στη βλάστηση των φυτών με την αύξηση της δοσολογίας κόμποστ στο έδαφος σε επίπεδο μεγαλύτερο από αυτό του τυφλού δείγματος. Επιπλέον, οι δοσολογίες κόμποστ 5.0 και 7.5 tn ha⁻¹ επιφέρουν μεγαλύτερη ανάπτυξη έναντι των καλλιεργειών στις οποίες έγινε προσθήκη χημικού λιπάσματος (0.5 tn ha⁻¹ NPK:16-15-26).

Η ανάλυση της κινητικής των αντιδράσεων βιοξείδωσης του οργανικού υλικού αφορά στην κινητική εξίσωση πρώτης τάξης βασιζόμενη στις απώλειες της βιοαποδομήσιμης οργανικής ουσίας κατά την κομποστοποίηση των οργανικών αποβλήτων λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των κρίσιμων παραμέτρων της διεργασίας (θερμοκρασία, υγρασία και οξυγόνο). Τα συμπεράσματα τα οποία προκύπτουν είναι τα εξής.

- Η προσαρμογή του μοντέλου κινητικής πρώτης τάξης των απωλειών της οργανικής ουσίας (BOM_{loss}) στα πειραματικά δεδομένα θεωρείται ικανοποιητική τόσο ποιοτικά (οπτική προσαρμογή) όσο και ποσοτικά (1.54% < NRMSE < 2.75%).
- Το συνολικό ποσοστό της βιοαποδομήσιμης οργανικής ουσίας (BOM₀) των υποστρωμάτων στους τέσσερις πειραματικούς κύκλους υπολογίζεται μεταξύ 67.3-87.4% της αρχικής οργανικής ουσίας εκ των οποίων το 94.9-96.8% είναι οι συνολικές απώλειες της βιοαποδομήσιμης οργανικής ουσίας στο τέλος των διεργασιών. Το ποσοστό αυτό των απωλειών υποδηλώνει ότι οι βιοξειδωτικές διεργασίες σε όλους τους πειραματικούς κύκλους τελούνται σε υψηλό βαθμό.
- Ο μέγιστος ρυθμός βιοαποδόμησης της οργανικής ουσίας του υποστρώματος, k_{max} , υπολογίστηκε μεταξύ 0.173-0.236 d⁻¹ για τις τέσσερις πειραματικές εφαρμογές υποδηλώνοντας ότι το υπόστρωμα δύναται να βιοαποδομηθεί με υψηλό ρυθμό. Επιπλέον, σύμφωνα με την εξέλιξη του ρυθμού βιοαποδόμησης, k_d , κατά τα εξελικτικά στάδια των διεργασιών παρατηρείται ότι κατά τη θερμοφιλή φάση οι τιμές του k_d κυμαίνονται σε επίπεδα πλησίον του k_{max} , υποδηλώνοντας την υψηλή απόδοση του συστήματος στο σύνολό του.

- Επιπλέον, σύμφωνα με την ανάλυση ευαισθησίας για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του μοντέλου που επιδρούν περισσότερο στον υπολογισμό του k_{max} , προκύπτει ότι η μερική ποσοστιαία διακύμανση ($\pm 10\%$) του συνολικού ποσοστού της βιοαποδομήσιμης οργανικής ουσίας του υποστρώματος (BOM_0), της βέλτιστης θερμοκρασίας (T_{opt}) και της βέλτιστης υγρασίας (MC_{opt}) μεταβάλλουν την εκτιμώμενη τιμή του k_{max} κατά 2 έως 3.5 φορές.
- Για την εκτίμηση της συνολικής λειτουργίας του συστήματος σε κάθε κύκλο κομποστοποίησης προσδιορίστηκε η συνδυασμένη επίδραση των κρίσιμων παραμέτρων της θερμοκρασίας, της υγρασίας και του οξυγόνου, $F(TOT)$, κατά την εξέλιξη των διεργασιών. Τα υψηλά επίπεδα του $F(TOT)$ τα οποία διαμορφώνονται για τη μεγαλύτερη διάρκεια των διεργασιών υποδηλώνουν ότι οι λειτουργικές συνθήκες διατηρούνται σε ευνοϊκά επίπεδα και ότι το σύστημα λειτουργεί αποδοτικά ως προς την επίτευξη των βέλτιστων περιβαλλοντικών συνθηκών για την εξέλιξη των διεργασιών της κομποστοποίησης.

Συνοψίζοντας διαπιστώνεται ότι τα μίγματα διαφορετικών ρών βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων δύναται να επεξεργαστούν αποτελεσματικά με τη χρήση του 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 αποκεντρωμένες περιοχές και σε ευρεία κλίμακα δύναται να συμβάλει στην ορθολογική διαχείριση των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων 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 ασφάλει 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 στερεών αποβλήτων μέσω αποκεντρωμένων διατάξεων. Αυτή η προσέγγιση στοχεύει στη βιώσιμη επεξεργασία, ανάκτηση και ανακύκλωση των αποβλήτων στο σημείο παραγωγής τους αλλά και στο περιορισμό της αναγκαιότητας 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., Halalshah, 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.
- 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., Albuquerque, 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/pubblizzazioni_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., Benitez, 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.
- García, 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.
- García, 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 Bhave, 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.
- Jouraphy, 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.
- 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., Cimadom, 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., Diné, 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 Saánchez-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., Saánchez-Monedero, M. A. and Cegarra, I., (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., Candidelli, 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. Diaz, 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/http/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 André, 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.
- 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., Shammas, N. K. and Evanylo, G., (2007). Engineering and Management of Agricultural Land Application. 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.
- 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.
- Zurbrugg, 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.
- Zurbrugg, 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., Μποσδογιάννη, 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 Αϊβαζίδης, 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 απορρίμματα και δέσμευση βαρέων μετάλλων του με χρήση κλινοπτιλόλιθου, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Διδακτορική διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- 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 χλωματερής 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.
- 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 υλός 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 υλός, 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.

Παράρτημα Ι: Ενδεικτικά φυσικοχημικά χαρακτηριστικά και παραγόμενες ποσότητες κοπριάς εκτρεφόμενων ζώων

Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά και παραγόμενες ποσότητες κοπριάς αγελάδων γαλακτοπαραγωγής (USDA-SCS, 2008)

Παράμετρος	Μονάδες ^(α)	Αγελάδα γαλακτοπαραγωγής Παραγωγή γάλακτος (kg d ⁻¹)				Μόσχος	Νεαρή Αγελάδα ^(β)	Μη γαλακτική αγελάδα
		22.7	34.0	45.4	56.7			
Μάζα	kg d ⁻¹ tn ⁻¹	97	108	119	130	83	56	51
Υγρασία	%	87.0	87.0	87.0	87.0	83.0	83.0	87.0
TS	kg d ⁻¹ tn ⁻¹	12	14	15	17	9.2	8.5	6.6
VS	kg d ⁻¹ tn ⁻¹	9.2	11	12	13	7.7	7.3	5.6
FS	kg d ⁻¹ tn ⁻¹	2.80	3.00	3.00	4.00	1.50	1.20	1.00
N	kg d ⁻¹ tn ⁻¹	0.66	0.71	0.76	0.81	0.42	0.27	0.30
P	kg d ⁻¹ tn ⁻¹	0.11	0.12	0.14	0.15	0.05	0.05	0.042
K	kg d ⁻¹ tn ⁻¹	0.30	0.33	0.35	0.38	0.11	0.12	0.10
C/N		7.74	8.61	8.77	8.92	10.19	15.02	10.37

^(α) Οι μονάδες εκφράζονται σε ποσότητες ανά ημέρα και ανά τόνο εκτρεφόμενου ζώου εκτός αν αναγράφεται διαφορετικά

^(β) η αγελάδα η οποία δεν έχει γεννήσει πάνω από μια φορά

Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά και παραγόμενες ποσότητες κοπριάς βοοειδών (USDA-SCS, 2008, 1992)

Παράμετρος	Μονάδες ^(α)	Βουστάσια Πάχυνσης 340-500kg		Βοοειδή 204-340kg	Αγελάδα	Πάχυνση Μοσχαριών
		Διατροφή υψηλής βοσκής	Διατροφή υψηλής ενέργειας			
Μάζα	kg d ⁻¹ tn ⁻¹	59.10	51.20	58.20	63.00	60.00
Υγρασία	%	88.40	88.40	87.00	88.40	97.50
TS	% wb	11.60	11.60	13.00	11.60	2.50
	kg d ⁻¹ tn ⁻¹	6.78	5.91	7.54	7.30	1.50
VS	kg d ⁻¹ tn ⁻¹	6.04	5.44	6.41	6.20	0.85
FS	kg d ⁻¹ tn ⁻¹	0.74	0.47	1.13	1.10	0.65
N	kg d ⁻¹ tn ⁻¹	0.31	0.30	0.30	0.33	0.20
P	kg d ⁻¹ tn ⁻¹	0.11	0.094	0.10	0.12	0.03
K	kg d ⁻¹ tn ⁻¹	0.24	0.21	0.20	0.26	0.25
C/N		11.00	10.00	12.00	10.00	2.00

^(α) Οι μονάδες εκφράζονται σε ποσότητες ανά ημέρα και ανά τόνο εκτρεφόμενου ζώου εκτός αν αναγράφεται διαφορετικά

Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά και παραγόμενες ποσότητες κοπριάς πτηνών (USDA-SCS, 2008, 1992)

Παράμετρος	Μονάδες ^(α)	Όρνιθες αυγοπαραγωγής	Πουλάδα	Όρνιθες κρεατοπαραγωγής	Γαλοπούλα	Πάπια
Μάζα	kg d ⁻¹ tn ⁻¹	60.50	45.60	80.00	43.60	-
Υγρασία	%	75.00	75.00	75.00	75.00	-
TS	% w.b.	25.00	25.00	25.00	25.00	-
	kg d ⁻¹ tn ⁻¹	15.10	11.40	20.00	10.90	12.00
VS	kg d ⁻¹ tn ⁻¹	10.80	9.70	15.00	9.70	7.00
FS	kg d ⁻¹ tn ⁻¹	4.30	1.70	5.00	1.25	5.00
N	kg d ⁻¹ tn ⁻¹	0.83	0.62	1.10	0.74	0.7
P	kg d ⁻¹ tn ⁻¹	0.31	0.24	0.34	0.28	0.3
K	kg d ⁻¹ tn ⁻¹	0.34	0.26	0.46	0.28	0.3
C/N		7.0	9.00	8.0	7.0	6.0

^(α) Οι μονάδες εκφράζονται σε ποσότητες ανά ημέρα και ανά τόνο εκτρεφόμενου ζώου εκτός αν αναγράφεται διαφορετικά

Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά και παραγόμενες ποσότητες κοπριάς χοίρων (USDA-SCS, 2008, 1992)

Παράμετρος	Μονάδες ^(α)	Εκτροφή ανάπτυξης (18-100 kg)	Εκτροφή χοιρομητέρων (συνών)		Αγριόχοιρος	Θηλασμός χοιριδίων (0-18 kg)
			Κύηση	Γαλουχία		
Μάζα	kg d ⁻¹ tn ⁻¹	63.40	27.20	60.00	20.50	106.00
Υγρασία	%	90.00	90.80	90.00	90.70	90.00
TS	%w.b.	10.00	9.20	10.00	9.30	10.00
	kg d ⁻¹ tn ⁻¹	6.34	2.50	6.00	1.90	10.60
VS	kg d ⁻¹ tn ⁻¹	5.40	2.13	5.40	1.70	8.80
FS	kg d ⁻¹ tn ⁻¹	0.94	0.37	0.60	0.30	1.80
N	kg d ⁻¹ tn ⁻¹	0.42	0.19	0.47	0.15	0.60
P	kg d ⁻¹ tn ⁻¹	0.16	0.06	0.15	0.05	0.25
K	kg d ⁻¹ tn ⁻¹	0.22	0.12	0.30	0.10	0.35
C/N		7.00	6.00	6.00	6.00	8.00

^(α) Οι μονάδες εκφράζονται σε ποσότητες ανά ημέρα και ανά τόνο εκτρεφόμενου ζώου εκτός αν αναγράφεται διαφορετικά

Παράρτημα II: Εκτίμηση των παραγόμενων γεωργικών υπολειμμάτων

Λόγοι Υπολειμμάτων Προϊόντος (RPR) για διάφορες γεωργικές καλλιέργειες

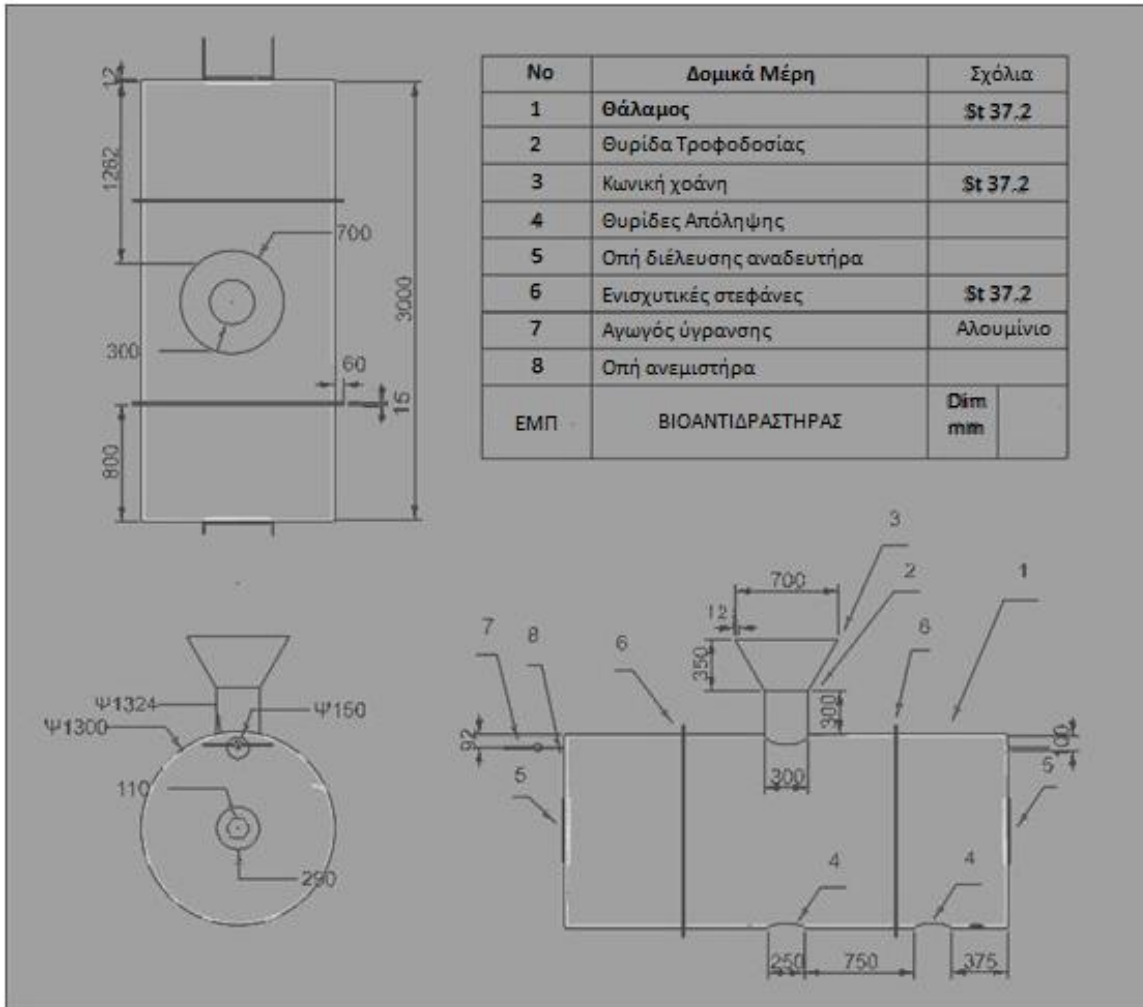
Καρπός	Υπόλειμμα	RPR	Βιβλιογραφία
Δημητριακά	Άχυρο	2.00 Βόρεια Κεντρική Ευρώπη	Nikolaou et al. (2003)
	Άχυρο	1.10 Νότια Ευρώπη	Nikolaou et al. (2003)
Ρύζι	Άχυρο	1.10 - 2.90	Kristoferson and Bokalders (1991) Ryan and Openshaw (1991)
	Άχυρο	1.76	Bhattacharya et al. (1993)
	Άχυρο	1.10 - 3.00	Massaquoi (1990)
	Φλοιός	0.30	Ryan and Openshaw (1991)
	Φλοιός	0.20	Mahajan and Mishra (1992)
	Φλοιός	0.27	Bhattacharya et al. (1993)
	-	1.40	Mulkey et al. (2008)
	-	0.80-2.30	Scarlat et al. (2010)
Αραβόσιτος	Μίσχος	1.00-2.50	Massaquoi (1990); Ryan and Openshaw (1991)
	Μίσχος	1.00	Strehler and Stutzle (1987)
	Ρίζα	0.20 - 0.50	Barnard and Kristoferson (1985); Massaquoi (1990)
	Ρίζα	0.70-1.80	Ryan and Openshaw (1991)
	Ρίζα	0.27	Bhattacharya and Shrestha (1990)
	-	1.10	Mulkey et al. (2008)
	-	0.70-1.30	Scarlat et al. (2010)
Ηλιάνθος	-	1.00-3.00	Scarlat et al. (2010)
Σιτάρι	Άχυρο	0.70 -1.80	Massaquoi (1990); Ryan and Openshaw (1991)
	Άχυρο	1.00 -1.80	Barnard and Kristoferson (1985)
	Άχυρο	1.00 - 1.66	Barnard and Kristoferson (1985)
	Άχυρο	1.75	Bhattacharya et al. (1993)
	-	1.30	Mulkey et al. (2008)
	-	1.2-1.75	Scarlat et al. (2010)
Κριθάρι	Άχυρο	0.60 - 1.80	Ryan and Openshaw (1991)
	Άχυρο	1.50 - 1.80	Kristoferson and Bokalders (1991)
	Άχυρο	0.60 - 1.80	Massaquoi (1990)
	Άχυρο	1.70	Ishaque and Chahal (1991)
	Άχυρο	1.75	Bhattacharya et al. (1993)
	-	1.20	Mulkey et al. (2008)
	-	0.90-1.80	Scarlat et al. (2010)
Βρώμη	-	1.00-2.00	Scarlat et al. (2010)
Σίκαλη	-	1.70-1.75	Scarlat et al. (2010)
Ελαιοκράμβη		1.10-1.70	Scarlat et al. (2010)
		1.25-2.00	Stout (1984); Lal (1995); Larson et al. (1982)
Ζαχαρότευτλα		0.20-0.25	Stout (1984); Lal (1995); Larson et al. (1982)
Ζαχαροκάλαμα		0.20-0.25	Stout (1984); Lal (1995); Larson et al. (1982)
Πατάτα		0.20-0.30	Stout (1984); Lal (1995); Larson et al. (1982)

Παγκόσμια παραγωγή γεωργικών υπολειμμάτων για το έτος 1991 και 2001 (Lal, 2005; FAO 1991, 2001)

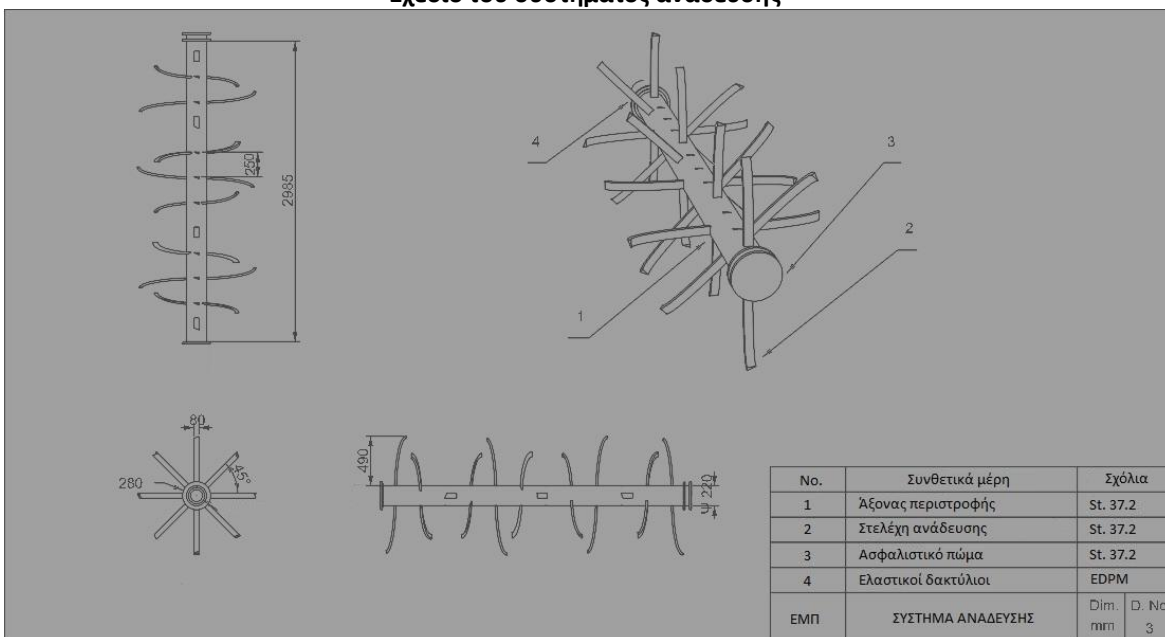
Συγκομιδή	Έκταση (Mha)		Παραγωγή (10 ⁶ tn)		Παραγωγή Υπολειμμάτων (10 ⁶ tn)	
	1991	2001	1991	2001	1991	2001
Δημητριακά						
Κριθάρι	76	54	169	141	254	212
Αραβόσιτο	129	138	479	609	479	609
Κεχρί	37	37	29	29	44	44
Βρώμη	21	13	34	27	34	27
Ρύζι	148	152	520	593	780	890
Σίκαλη	14	10	27	23	41	35
Σόργο – Ζαχαρόχορτο	45	43	58	58	87	87
Σιτάρι – Σίτος	224	214	551	583	826	875
Άλλα	10	10	18	23	18	23
Σύνολο	704	671	1885	2086	2563	2802
Όσπρια						
Φασόλια	26	23	18	17	18	17
Κουκιά	3	2	5	4	5	4
Ρεβίθια	8	9	11	6	11	6
Αραχίδα	20	26	23	35	23	35
Φακή	3	4	2	3	2	3
Αρακάς	9	6	16	11	16	11
Όσπρια	70	66	60	52	60	52
Σόγια	55	76	103	177	103	177
Σύνολο	194	212	238	305	238	305
Καλλιέργειες Ελαιούχων						
Λιναρόσπορος	4	3	3	2	3	2
Ελαιοκράμβη	20	24	27	36	41	54
Κάρδαμο	1	1	1	0,6	1	1
Βαμβακόσπορος	38	16	60	16	90	24
Σουσάμι	7	8	2	3	4	6
Ηλιόσπορος	17	18	23	21	23	21
Σύνολο	87	70	116	79	162	108
Σακχαρώδη						
Ζαχαρότευτλα	9	6	303	234	76	59
Ζαχαροκάλαμο	17	19	1054	1255	264	314
Σύνολο	26	25	1357	1489	340	373
Άλλα						
Κόνδυλοι	279	322	187	234	47	59
Πατάτες	177	193	266	308	67	77
Γλυκοπατάτα	9	9	124	135	31	34
Σύνολο	465	524	577	677	145	170
Ολικό Σύνολο	1476	1502	4173	4636	3448	3758

Παράρτημα III: Σχεδιασμός δομικών μερών συστήματος κομποστοποίησης

Σχέδιο του βιοαντιδραστήρα



Σχέδιο του συστήματος ανάδευσης



Σχέδιο του βιόφιλτρου απόσμησης

