

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Συγκομποστοποίηση βιολογικής ιλύος με  
τροφικά υπολείμματα με πρόσθετο περλίτη.**

---

**Καραγλάνης Γεώργιος**

**Επιβλέπουσα Καθ. κα. Λοϊζίδου Μ.**



## Περίληψη

Η διάθεση της ιλύος των μονάδων επεξεργασίας λυμάτων συνιστά πρόβλημα προς επίλυση για την εποχή μας. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού υιοθετούνται πολλές φορές λύσεις που δεν εξυπηρετούν τις αρχές της προστασίας του περιβάλλοντος και οι οποίες μπορούν ενδεχομένως να δημιουργήσουν σε αυτό ιδιαιτέρως δυσμενείς επιπτώσεις. Έτσι, η ορθολογική διαχείριση και εν τέλει αξιοποίηση της ιλύος αποτελεί καίριο περιβαλλοντικό ζήτημα που απαιτεί μια αποτελεσματική επίλυση.

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας ήταν η συμβολή για την αξιοποίηση της ιλύος ως βελτιωτικού εδάφους, σε αντικατάσταση του υπάρχοντος τρόπου διάθεσής της, σε Χώρους Υγειονομικής Ταφής Αποβλήτων (ΧΥΤΑ). Η χάραξη της στρατηγικής για την επίτευξη του τελικού στόχου έγινε με γνώμονα τη χρήση της αερόβιας κομποστοποίησης. Για την επίτευξη αυτού του στόχου χρησιμοποιήθηκαν οι βιοαντιδραστήρες της Μονάδας Επιστήμης και Τεχνολογίας Περιβάλλοντος.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στόχευε στην ανεύρεση της κατάλληλης φόρμουλας ώστε να πετύχει η ωρίμανση της ιλύος με τον καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Δόθηκε έμφαση στην χάραξη της βέλτιστης στρατηγικής και έγιναν οι απαραίτητες διορθωτικές ενέργειες όταν κρίθηκε απαραίτητο, ώστε το τελικό προϊόν να έχει τις θεμιτές φυσικοχημικές και βιολογικές ιδιότητες. Ο κορμός της μεθοδολογίας αποτελείτο από μια σειρά πειραματικών εφαρμογών εντός του βιοαντιδραστήρα, όπου εξελίσσεται η κομποστοποίηση και τον ποιοτικό και ποσοτικό χαρακτηρισμό της ποιότητας του τελικού προϊόντος (κόμποστ).

Πιο συγκεκριμένα, το πειραματικό πρωτόκολλο της κομποστοποίησης χωρίστηκε σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος, συμπεριλαμβάνεται η πειραματική εφαρμογή της κομποστοποίησης ιλύος προερχόμενη από ΜΕΛ βιομηχανίας και στο δεύτερο η αξιολόγηση του συστήματος κομποστοποίησης βάσει του ποιοτικού και ποσοτικού ελέγχου του τελικού προϊόντος ως προς τις φυσικοχημικές και βιολογικές του ιδιότητες για τον καθορισμό του βαθμού σταθεροποίησης και ωριμότητάς του. Η αρχική σκέψη εμπεριείχε τη χρήση περλίτη και πράσινων χωριστά στον κάθε κάδο και κομποστοποίηση 21 ημερών. Τα τελικά προϊόντα θα εξετάζονταν για τις φυσικοχημικές και βιολογικές ιδιότητές τους και θα χρησιμοποιούνταν, εφόσον πληρούσαν τις προϋποθέσεις, ως εδαφοβελτιωτικό. Προοικονομώντας τα αποτελέσματα των παράλληλων κομποστοποιήσεων έγινε η υπόθεση πως τόσο ο κάδος με τον περλίτη, λόγω απουσίας άμεσα διαθέσιμου οργανικού υποστρώματος, όσο και ο κάδος με τα πράσινα, λόγω της περίσσειας κυτταρινούχων πρώτων υλών τα οποία εμποδίζουν την έναρξη της θερμόφιλης φάσης, δεν θα ενεργοποιούσαν το θερμόφιλο στάδιο της κομποστοποίησης με αποτέλεσμα να μην σταθεροποιηθεί η ιλύς. Τα πειραματικά

αποτελέσματα αν συνέπιπταν με τις υποθέσεις μας θα επιβεβαίωναν το ότι η κομποστοποίηση ιλύος χρειάζεται ένα διαθέσιμο οργανικό υπόστρωμα, ικανό και αναγκαίο για τον μεταβολισμό των μικροοργανισμών. Σε αυτό το σενάριο, όπως και θα δούμε στο κεφάλαιο με τα πειραματικά αποτελέσματα, θα έπρεπε να μεταβούμε από το πρωτόκολλο της κομποστοποίησης σε αυτό της συγκομποστοποίησης με πρόσθετα που θα παρέχουν ένα στοιχειώδες οργανικό υπόστρωμα, όπως τα τροφικά υπολείμματα. Σε τακτικό επίπεδο θα τοποθετήσουμε δύο παράλληλους κάδους με ιλύ από την βιομηχανική ΜΕΛ και τροφικά υπολείμματα σε διαφορετικές συγκεντρώσεις (πάντα με προσθήκη περλίτη) ώστε να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα για τους δύο βιοαντιδραστήρες και να εξάγουμε πολύτιμα συμπεράσματα για την ποιότητα των τελικών ώριμων προϊόντων.

Διαφορετικά μίγματα των προαναφερόμενων αποβλήτων αποτέλεσαν το υλικό τροφοδοσίας του συστήματος. Η χρήση περλίτη βοήθησε στον αερισμό του μίγματος λόγω πορώδους και τα τροφικά έδωσαν την απαιτούμενη οργανική ύλη για τον μεταβολισμό των μικροοργανισμών. Η σύνθεσή των μιγμάτων ήταν η αναλογία ιλύος προς τροφικά υπολείμματα 1:1 για τον πρώτο αντιδραστήρα και 3:7 για τον δεύτερο. Πριν την έναρξη των κομποστοποιήσεων, έγιναν μετρήσεις σχετικά με τη θερμοκρασία, την υγρασία του υποστρώματος, το pH, την ηλεκτρική αγωγιμότητα, τον ολικό οργανικό άνθρακα (TOC), το ολικό άζωτο (TKN), τα  $\text{NH}_4^+$  και τα  $\text{NO}_3^-$  και τη συγκέντρωση των βαρέων μετάλλων στα δείγματα. Η υψηλή περιεκτικότητα σε άζωτο ήταν αισθητή στα αρχικά απόβλητα και επακολούθως διαμόρφωσε χαμηλές αναλογίες C/N στα αρχικά υποστρώματα. Αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα το σχηματισμό συνθηκών περίσσειας οργανικού αζώτου. Οι άνω παράγοντες ήταν αυτοί που εξετάστηκαν σε όλη την έκταση της συγκομποστοποίησης και θα έδιναν απτά αποτελέσματα για την επιτυχία του σκοπού μας.

Επί προσθέτως έγινε ποιοτική και ποσοτική αξιολόγηση τόσο των φυσικοχημικών όσο και των βιολογικών ιδιοτήτων των τελικών προϊόντων των αντιδραστήρων (κόμποστ) από τις οποίες θα συμπεράνουμε εάν το κόμποστ είναι ικανό για να αποτεθεί στο έδαφος. Η ωρίμανση του κόμποστ, η οποία διήρκεσε περίπου 8 ημέρες μετά το πέρας των συγκομποστοποιήσεων, συνοδεύτηκε από μείωση του pH προς ουδέτερες και ελαφρώς όξινες τιμές, αλλά και με αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Η περιεκτικότητα σε οργανικό άνθρακα μειώθηκε κατακόρυφα και στους δύο κάδους και το ολικό άζωτο αυξήθηκε ελαφρώς. Οι συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων (Cr, Cu, Mn, Fe, Ni, Cd, Pb και Zn) κυμάνθηκαν σε χαμηλά επίπεδα, τα οποία δεν ξεπερνούν τις οριακές τιμές που έχουν καθοριστεί από την ελληνική νομοθεσία αλλά αυξήθηκαν ανεπαίσθητα σε σχέση με τις αρχικές συγκεντρώσεις λόγω της μείωσης της οργανικής ουσίας. Οι τελικές τιμές του δείκτη C/N ήταν πολύ χαμηλές και εκτός ορίων του ποιοτικού εμπορικού εδαφοβελτιωτικού. Επιπλέον, αναφορικά με τις ανόργανες μορφές του αζώτου, οι συγκεντρώσεις των αμμωνιακών παρουσιάστηκαν πολύ χαμηλότερες συγκριτικά με αυτές των νιτρικών διαμορφώνοντας αναλογίες  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  εντός των επιθυμητών ορίων που χαρακτηρίζουν ένα ώριμο κόμποστ. Τέλος, εκτός της φυσικοχημικής αξιολόγησης της ποιότητας του

παραγόμενου κόμποστ πραγματοποιήθηκε και βιολογική αξιολόγηση. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της φυτοτοξικότητας του παραγόμενου κόμποστ, η προσθήκη τροφικών υπολειμμάτων σε συνδυασμό με περλίτη βελτίωσε σημαντικά το δείκτη βλαστικότητας σχεδόν σε όλους τους σπόρους μαρουλιού σε σύγκριση με αυτούς του πρώτου κύκλου. Το φαινόμενο αυτό είναι εντονότερο στον δεύτερο κάδο, γεγονός που πιθανόν να οφείλεται στη μικρότερη συγκέντρωση βαρέων μετάλλων και της μεγαλύτερης ποσότητας φυτοθρεπτικών προσθέτων, δηλαδή των οργανικών προσθέτων που προσθέσαμε (σε ποσότητα ίση με το 70% του μίγματος). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της φυτοτοξικότητας, το τελικό προϊόν χαρακτηρίζεται ως φυτοθρεπτικό και δεν περιέχει τοξικές ενώσεις οι οποίες δύνανται να αναστείλουν την ανάπτυξη των φυτικών μικροοργανισμών.

Τα αποτελέσματα αυτά συνηγορούν στην εκτίμηση ότι τα τελικά προϊόντα είναι κατάλληλα για χρήση ως βελτιωτικό εδάφους. Η μεγαλύτερη περιεκτικότητα του δεύτερου μίγματος σε πρόσθετο υλικό, είχε ως αποτέλεσμα την εντονότερη μετάβαση, κατά την διαδικασία της κομποστοποίησης, από τη μεσόφιλη στη θεرمόφιλη φάση. Χαρακτηριστικά για τον δεύτερο κάδο, η θερμοκρασία που αναπτύχθηκε ξεπέρασε τους 69°C έστω για λίγες ώρες. Ο πρώτος κάδος έφτασε σε αξιοσημείωτες τιμές επίσης αγγίζοντας τους 68,8°C. Οι θερμοκρασίες που αναπτύχθηκαν πρέπει να σημειώσουμε ήταν ικανές για να αποστειρώσουν όλη την έκταση του μίγματος σκοτώνοντας και αδρανοποιώντας όλους τους παθογόνους μικροοργανισμούς.

## Πίνακας περιεχομένων

|  |        |
|--|--------|
| Περίληψη .....   | - 2 -  |
| 1. Εισαγωγή .....  | - 7 -  |
| 1.1. Αναγκαιότητα διαχείρισης βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων .....  | - 7 -  |
| 1.2. Στόχος και διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας.....   | - 8 -  |
| 2. Βιοαποδομήσιμα στερεά απόβλητα .....  | - 9 -  |
| 2.1. Νομοθετικό Πλαίσιο Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση .....   | - 9 -  |
| 2.2. Προδιαγραφές ποιότητας του κόμποστ .....  | - 14 - |
| 2.2.1. Πρότυπα για τα βαρέα μέταλλα .....  | - 15 - |
| 2.2.2. Πρότυπα για τους οργανικούς ρύπους στο κόμποστ .....  | 20     |
| 2.2.3. Πρότυπα για την περιεκτικότητα σε παθογόνους μικροοργανισμούς, ακαθαρσίες και ζιζάνια.....                              | 21     |
| 2.2.4. Αξιολόγηση της παραγόμενης ύλης από τη ΜΕΛ - Χρήση ως εδαφοβελτιωτικό σύμφωνα με το υφιστάμενο νομοθετικό πλαίσιο ..... | 2-25   |
| 3. Βιολογική επεξεργασία βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων.....  | 3-28   |
| 3.1. Εισαγωγή.....   | 3-28   |
| 3.2. Βιολογικές Μέθοδοι Επεξεργασίας.....  | 3-30   |
| 3.2.1. Γενικά.....   | 3-30   |
| 3.3. Αερόβια Βιολογική επεξεργασία .....   | 3-31   |
| 3.3.1. Μικροβιακά Στάδια στο σύστημα Κομποστοποίησης.....  | 3-32   |
| 3.3.2. Ανασκόπηση των τεσσάρων φάσεων της αερόβιας κομποστοποίησης: .....  | 3-34   |
| 3.3.3. Η εξέλιξη της βιολογικής αποικοδόμησης.....   | 3-36   |
| 3.3.4. Υλικά κομποστοποίησης.....  | 3-40   |
| 3.4. Παράγοντες που ελέγχουν τη διαδικασία κομποστοποίησης.....  | 3-41   |
| 3.4.1. Αβιοτικοί παράγοντες .....  | 3-42   |
| 3.4.2. Βιοτικοί Παράγοντες .....   | 3-50   |
| 3.5. Κινητική μικροβιακής ανάπτυξης .....  | 3-55   |
| 3.6. Σταθεροποίηση Οργανικής Ύλης.....   | 3-58   |
| 3.6.1. Θερμοκρασία .....   | 3-58   |
| 3.6.2. Οργανική Ύλη .....  | 3-59   |
| 3.6.3. Ρυθμός Κατανάλωσης Οξυγόνου .....   | 3-59   |
| 3.6.4. Αναλογία NO <sub>3</sub> /NH <sub>3</sub> .....   | 3-60   |
| 3.6.5. Υγειονοποίηση Κομπόστ .....   | 3-60   |
| 3.7. Τεχνολογίες κομποστοποίησης .....   | 3-60   |
| 3.7.1. Κλειστά συστήματα .....   | 3-61   |
| 3.7.2. Ανοικτά συστήματα κομποστοποίησης .....   | 3-65   |
| 3.8. Δυνατότητες διάθεσης του κομποστοποιημένου υλικού .....   | 3-72   |
| 3.9. Πρόσθετα κομποστοποίησης.....   | 3-73   |
| 3.9.1. Ζεόλιθοι .....  | 3-74   |
| 3.9.2. Πριονίδι, ροκανίδι.....   | 3-76   |
| 3.9.3. Περλίτης.....   | 3-76   |
| 3.9.4. Επιταχυντής .....   | 3-81   |
| 3.9.5. Ανακύκλωση του προϊόντος .....  | 3-81   |
| 3.10. Οφέλη κομποστοποίησης.....   | 3-82   |
| 4. Μεθοδολογία μετρήσεων .....   | 4-84   |
| 4.1. Εισαγωγή.....   | 4-84   |

|         |  |      |
|---------|--|------|
| 4.2.    | Το πρότυπο σύστημα οικιακής κομποστοποίησης οργανικού κλάσματος απορριμμάτων ..... | 4-85 |
| 4.3.    | Σύσταση και Προέλευση ιλύος .....  | 4-87 |
| 4.3.1.  | Μεθοδολογία δειγματοληψιών και αναλύσεων ιλύος .....                               | 4-88 |
| 4.4.    | Μεθοδολογία δειγματοληψιών και αναλύσεων .....                                     | 4-89 |
| 4.4.1.  | Προσδιορισμός θερμοκρασίας .....   | 91   |
| 4.4.2.  | Προσδιορισμός υγρασίας .....   | 91   |
| 4.4.3.  | Προσδιορισμός pH .....   | 92   |
| 4.4.4.  | Προσδιορισμός ηλεκτρικής αγωγιμότητας .....  | 92   |
| 4.4.5.  | Προσδιορισμός πτητικών στερεών (VSS) .....   | 92   |
| 4.4.6.  | Προσδιορισμός ολικού οργανικού άνθρακα (TOC) .....                                 | 93   |
| 4.4.7.  | Προσδιορισμός ολικού αζώτου κατά Kjeldahl (TKN) .....                              | 94   |
| 4.4.8.  | Προσδιορισμός νιτρικών .....   | 96   |
| 4.4.9.  | Προσδιορισμός αμμωνιακών .....   | 98   |
| 4.4.10. | Προσδιορισμός αναλογίας $C/N$ .....  | 99   |
| 4.4.11. | Προσδιορισμός βαρέων μετάλλων και ιχνοστοιχείων .....                              | 100  |
| 4.4.12. | Προσδιορισμός φυτοτοξικότητας .....  | 101  |
| 5.      | Ανάλυση και Επεξεργασία Πειραματικών Αποτελεσμάτων .....                           | 104  |
| 5.1.    | Εισαγωγή .....   | 104  |
| 5.2.    | Πειραματικά αποτελέσματα παρακολούθησης ποιότητας παραγόμενης ιλύος .....          | 104  |
| 5.3.    | Α' κύκλος Πειραμάτων .....   | 105  |
| 5.4.    | Β' κύκλος Πειραμάτων .....   | 110  |
| 5.4.1.  | Σύσταση του υποστρώματος .....   | 110  |
| 5.4.2.  | Έλεγχος της διεργασίας της κομποστοποίησης .....                                   | 114  |
| 5.4.3.  | Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά παραγόμενου κόμποστ .....                              | 125  |
| 5.5.    | Βιολογικά χαρακτηριστικά παραγόμενου κόμποστ .....                                 | 130  |
| 5.5.1.  | Φυτοτοξικότητα .....   | 130  |
| 6.      | Συμπεράσματα .....   | 132  |
| 7.      | Βιβλιογραφία .....   | 136  |

## 1. Εισαγωγή

### 1.1. Αναγκαιότητα διαχείρισης βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων

Τα υγρά και στερεά απόβλητα που παράγονται σε μια σύγχρονη κοινωνία αποτελούν ένα σοβαρό περιβαλλοντικό και οικονομικό πρόβλημα που βαίνει αυξανόμενο. Ο όγκος των αποβλήτων αυξάνει με ρυθμούς ανάλογους της οικονομικής ανάπτυξης. Μεγάλο ποσοστό ρύπανσης προέρχεται από τα υγρά αστικά απόβλητα. Οι μονάδες επεξεργασίας αστικών λυμάτων ευθύνονται για τη διαχείριση αυτών των αποβλήτων και κατά την επεξεργασία τους παράγονται ύδατα που καταλήγουν συνήθως σε υδάτινους αποδέκτες και ιλύς η οποία παραμένει τις περισσότερες φορές αναξιοποίητη. Οι διαρκώς αυξανόμενες ποσότητες, οι αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, καθώς και η κοινωνική αντίδραση καθιστούν έντονη την ανάγκη επιλογής των πιο εξελιγμένων και έγκυρων τρόπων διαχείρισης της ιλύος των αστικών λυμάτων. Η μέχρι και σήμερα παρωχημένη πολιτική που ακολουθείται στην Ελλάδα, έγκειται στην απόρριψη και θάψιμο της ιλύος στους ΧΥΤΑ. Κατά αυτήν τη διαδικασία δημιουργούνται αναερόβιες συνθήκες βιοαποδόμησης στην έκτασή της με τη συνεπακόλουθη εκπομπή σημαντικών ποσοτήτων βιοαερίου στην ατμόσφαιρα και παράλληλα παράγονται στραγγίσματα μετά από μερικούς μήνες με τεράστιες συγκεντρώσεις σε οργανικό και ανόργανο φορτίο. Το αρχικό πρόβλημα διάθεσης της ιλύος έχει ήδη εκκολαφτεί σε δύο προβλήματα για την ελληνική κοινωνία. Το μείζονος σημασίας πρόβλημα έγκειται στην δραστηριότητα του μεθανίου στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Η συγκέντρωση μεθανίου στο βιοαέριο ποικίλει από 55-80% (Edible Planet, 2006) με αποτέλεσμα οι ανεξέλεγκτες εκπομπές βιοαερίου να συντελούν στην επιβάρυνση της ατμόσφαιρας σε οργανικούς ρύπους. Πέραν της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, το βιοαέριο προκαλεί ερεθισμούς, διαβρώσεις και καρκινογενέσεις. Συνεπώς, η εκτροπή της ασταθούς ιλύος από τους ΧΥΤΑ θα συμβάλει στη μείωση των επιπτώσεων στις κλιματικές αλλαγές και στις παράπλευρες συνέπειες.

Με την Οδηγία 1999/31/ΕΚ «σχετικά με την υγειονομική ταφή των αποβλήτων» προβλέπονται νέα χρονικά όρια μείωσης των βιοαποδομήσιμων αστικών αποβλήτων που ενταφιάζονται στους ΧΥΤΑ. Η αξιοποίηση της ιλύος για γεωργική χρήση, είναι κοινώς αποδεκτό, πως είναι η πλέον οικονομικότερη λύση. Ιδιαίτερα για τα εδάφη της χώρας μας, όπου οι ανάγκες σε οργανική ουσία είναι ιδιαίτερα αυξημένες λόγω της έντονης βιομηχανοποίησης των γεωργικών πρακτικών και της ολοένα αυξανόμενης ανάγκης για παραγωγή αγαθών. Ως αποτέλεσμα, τα ελληνικά εδάφη χαρακτηρίζονται από χαμηλές τιμές συγκέντρωσης μεταλλικών στοιχείων (κυρίως Fe, Zn, Cu, Mn) (Κουλουμπής κ.α., 2005).

Τα βιοαποδομήσιμα στερεά απόβλητα διαθέτουν, στην πλειοψηφία τους, περίσσεια σε οργανική ουσία η οποία βρίσκεται σε ασταθή κατάσταση και αυξημένη συγκέντρωση βαρέων μετάλλων και παθογόνων μικροοργανισμών. Για τον λόγο αυτό η μετέπειτα

επεξεργασία των αποβλήτων κρίνεται αναγκαία. Η αερόβια βιολογική επεξεργασία (κομποστοποίηση) των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων, αποτελεί διεθνώς επιστημονικά αποδεκτή λύση και δύναται να προσφέρει αφενός τη σταθεροποίηση της λύος και αφετέρου την παραγωγή ενός προϊόντος (κόμποστ) που είναι φορέας όλων των φυσικοχημικών ιδιοτήτων κατάλληλων για την απόθεσή του στο έδαφος, εμπλουτισμό ακαλλιέργητων και υποβαθμισμένων τεμαχίων γης και στη γεωργία.

## **1.2. Στόχος και διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας**

Ο στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας με τη χρήση του συστήματος κομποστοποίησης των αποβλήτων ΜΕΛ, με ή και χωρίς πρόσθετα για την παραγωγή ενός σταθεροποιημένου εδαφοβελτιωτικού. Συγκεκριμένα, η έρευνα επικεντρώθηκε στην καταγραφή των φυσικών, χημικών και βιολογικών χαρακτηριστικών της λύος.

Στο πρώτο μέρος της εργασίας, δηλαδή στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο, γίνεται βιβλιογραφική επισκόπηση της παραγωγής λύος αστικών λυμάτων, του νομοθετικού πλαισίου που διέπει τη λειτουργία των μονάδων επεξεργασίας αστικών λυμάτων, της υφιστάμενης κατάστασης στην Ελλάδα, των κυριότερων τρόπων διαχείρισης της λύος και της μεθόδου της κομποστοποίησης ως μέθοδος σταθεροποίησης της λύος. Στη συνέχεια, στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο, περιγράφεται εκτενώς η βιολογική επεξεργασία βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων και καταγράφονται τα πρόσθετα της κομποστοποίησης. Το 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο, αφιερώνεται στη μεθοδολογική προσέγγιση η οποία ακολουθήθηκε για την επίτευξη των στόχων της διπλωματικής εργασίας. Στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο, παρουσιάζεται ο σχεδιασμός του συστήματος κομποστοποίησης, οι δύο κύκλοι που ακολουθήθηκαν και ανλύονται όλα τα πειραματικά αποτελέσματα φυσικοχημικής και βιολογικής φύσεως καθώς και αναλύεται η αποτελεσματικότητα του συστήματος κομποστοποίησης. Στον πρώτο κύκλο οι κάδοι χρησιμοποίησαν πρόσθετο περλίτη και πράσινα φύλλα αντίστοιχα και στον δεύτερο κύκλο τροφικά υπολείμματα και περλίτη. Τα πειραματικά αποτελέσματα του πρώτου κάδου και του δεύτερου κύκλου αναλύονται διεξοδικά και γίνεται σύγκριση των αρχικών και των τελικών μεταβλητών μετά από 30 μέρες από την έναρξη της κομποστοποίησης. Στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο, δίνονται τα συμπεράσματα τα οποία προκύπτουν από τα αποτελέσματα της πειραματικής ανάλυσης. Η εργασία ολοκληρώνεται με την παράθεση της βιβλιογραφίας.



## 2. Βιοαποδομήσιμα στερεά απόβλητα

### 2.1. Νομοθετικό Πλαίσιο Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση

Η περιβαλλοντική προστασία έχει καθοριστική σημασία για την ποιότητα ζωής των σημερινών και των μελλοντικών γενεών. Σημαντική πρόκληση αποτελεί ο συνδυασμός της λήψης μέτρων για την προστασία του περιβάλλοντος, με την συνεχιζόμενη οικονομική δραστηριότητα και μεγέθυνση κατά τρόπο μακροπρόθεσμο και ολοκληρωμένο.

Η Κοινοτική Πολιτική για την προστασία του περιβάλλοντος ξεκίνησε ουσιαστικά με την Σύνοδο κορυφής των Παρισίων το 1974. Ακολούθησαν τα “προγράμματα δράσης” της Κοινότητας και ήδη από το 1975 προβλέπονται στον κοινοτικό προϋπολογισμό κονδύλια για την προστασία του περιβάλλοντος. Το 1981 οι ως τότε διάσπαρτες περιβαλλοντικές υπηρεσίες συγχωνεύονται στην Γενική Διεύθυνση XI (περιβάλλον, πυρηνική ασφάλεια προστασία πολιτών) και υπό το πρίσμα των εξελίξεων υιοθετείται η Ενιαία Ευρωπαϊκή Πράξη (1<sup>η</sup> Ιουλίου 1987) ως ανεξάρτητη πολιτική για το περιβάλλον. Την ίδια χρονιά υιοθετείται το 4<sup>ο</sup> Πρόγραμμα Δράσης για το περιβάλλον, με βασικό στόχο την αποτελεσματική εφαρμογή της κοινοτικής νομοθεσίας για το περιβάλλον από τα κράτη μέλη. Το 1991 η Ευρωπαϊκή Επιτροπή ξεκίνησε το πρόγραμμα για την διαχείριση των αποβλήτων προτεραιότητας στα οποία περιλαμβάνονταν:

- Απόβλητα από ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό.
- Απόβλητα από κατασκευές και κατεδαφίσεις.
- Οχήματα στο τέλος κύκλου ζωής τους.
- Συσσωρευτές.
- Ελαστικά.
- Συσκευασίες και απορρήματα συσκευασιών.
- Χρησιμοποιημένα ορυκτέλαια.
- Νοσοκομειακά απόβλητα.
- PCB's.

Ακολούθησε το 5<sup>ο</sup> Πρόγραμμα Δράσης για το Περιβάλλον "προς μια αειφόρο ανάπτυξη" το οποίο θέσπισε τις αρχές μιας πιο ενεργητικής Ευρωπαϊκής στρατηγικής για την περίοδο 1992-2000 και σηματοδότησε την αρχή μίας οριζόντιας κοινοτικής δράσεως, λαμβάνοντας υπόψη όλους τους παράγοντες ρύπανσης (βιομηχανία, ενέργεια, τουρισμός, μεταφορές, γεωργία). Πλέον τρέχει το 6<sup>ο</sup> Πρόγραμμα Δράσης για το Περιβάλλον το οποίο προσδιορίζει γενικούς στόχους και καθορίζει κατάλογο περιβαλλοντικών προτεραιοτήτων μέχρι και το έτος 2010.

Η περιβαλλοντική πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης εστιάζει στα εξής σημεία:

- Η πρόληψη είναι προτιμότερη από την λήψη διορθωτικών μέτρων.
- Τα περιβαλλοντικά προβλήματα πρέπει να αντιμετωπίζονται στην πηγή τους.
- Ο ρυπαίνων πρέπει να πληρώνει το κόστος των μέτρων που θα ληφθούν για την προστασία του περιβάλλοντος
- Η περιβαλλοντική πολιτική πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και να αποτελεί τμήμα των άλλων πολιτικών της Ευρωπαϊκής Κοινότητας.

Ολόκληρη η περιβαλλοντική πολιτική της Ε.Ε. βασίζεται στην αρχή "ο ρυπαίνων πληρώνει". Σύμφωνα με αυτήν, ο ρυπαντής, είναι υπεύθυνος για τις επιπτώσεις και για την δαπάνη αποκατάστασης των ζημιών. Κατά συνέπεια, είναι ζητούμενο ο κάθε πολίτης να υποχρεούται να καλύπτει πλήρως την δαπάνη διαχείρισης των ΑΣΑ (Αστικά Στερεά Απόβλητα) που παράγει. Οι πληρωμές μπορεί να πραγματοποιηθούν με την μορφή επενδύσεων για να επιτευχθεί συμμόρφωση προς αυστηρότερα πρότυπα ή με τη μορφή φόρου επιβαλλόμενου στις επιχειρήσεις ή στους καταναλωτές που χρησιμοποιούν μη οικολογικά προϊόντα. (Σκορδίλης, 2008).

Η Ευρωπαϊκή Ένωση, σύμφωνα με τις ισχύουσες Συνθήκες και βάσει των Αρχών της Βιώσιμης (αειφορικής) Ανάπτυξης, έχει υιοθετήσει την παρακάτω ιεράρχηση (η οποία έχει ενσωματωθεί και στην εθνική μας νομοθεσία) στον τομέα της διαχείρισης των Αστικών Στερεών Αποβλήτων (Εικόνα 2.1):

- Πρόληψη ή Μείωση στην πηγή
- Ελαχιστοποίηση
- Επαναχρησιμοποίηση
- Ανακύκλωση
- Ανάκτηση ενέργειας
- Τελική διάθεση.



**Εικόνα 2.1** Ιεράρχηση πολιτικών διαχείρισης των Αστικών Στερεών Αποβλήτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση

Τα δύο πρώτα μέτρα αποσκοπούν στην αποφυγή δημιουργίας αποβλήτων και τα δύο επόμενα στην αξιοποίησή τους εφόσον παραχθούν. Πριν από την τελική διάθεση επιβάλλεται επεξεργασία για μείωση του όγκου ή/και των αρνητικών επιπτώσεων (π.χ. διαλογή πριν την εδαφική διάθεση, κομποστοποίηση, ή καύση).

Η ιεράρχηση που φαίνεται να επικρατεί στην πράξη αφορά στα κριτήρια επιλογής εναλλακτικών συστημάτων διαχείρισης τα οποία είναι:

1. Κόστος
2. Κοινωνική αποδοχή και
3. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

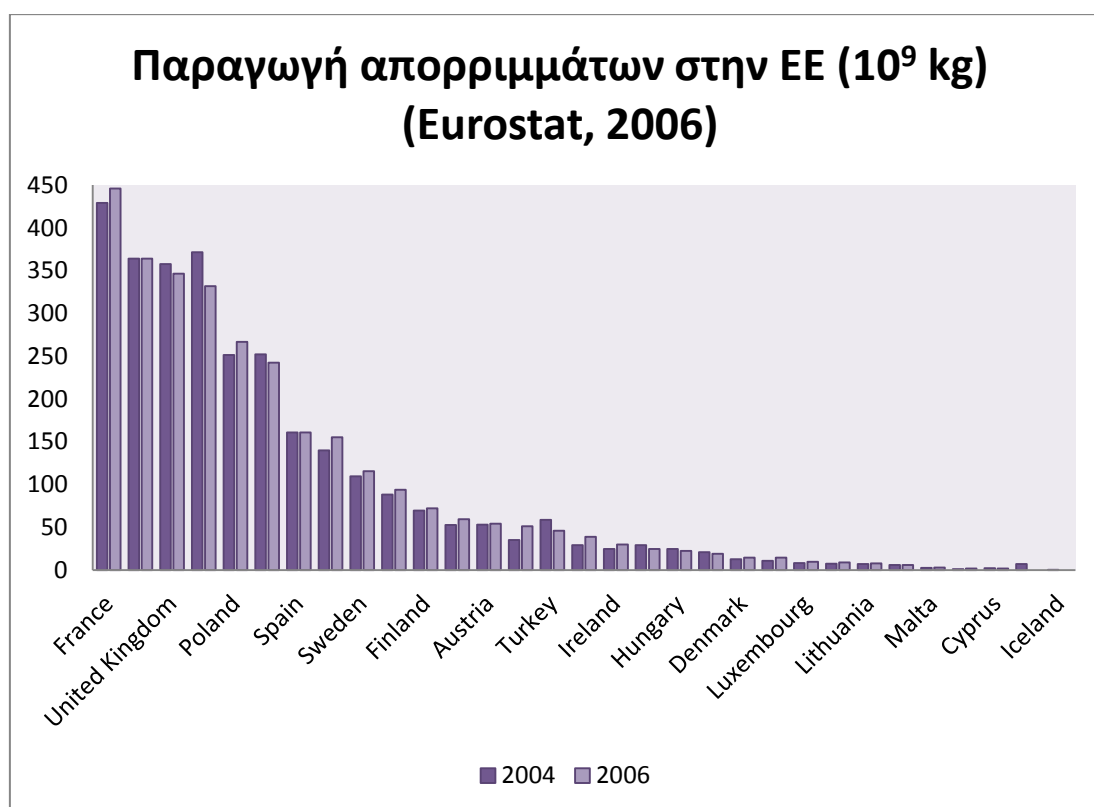
Σε Ευρωπαϊκό αλλά και σε παγκόσμιο επίπεδο έχουν υιοθετηθεί κατά σειρά προτεραιότητας, σε ότι αφορά την ολοκληρωμένη διαχείριση των στερεών αποβλήτων, οι ακόλουθες αρχές:

▪ **Αρχή της πρόληψης ή και μείωσης των παραγόμενων αποβλήτων**

Με την έννοια «Πρόληψη των απορριμμάτων» νοείται μια σειρά τεχνικών επιλογών και νομοθετικών-οικονομικών ρυθμίσεων, καθώς και ένα πλαίσιο κοινωνικής συμπεριφοράς και ενεργής συμμετοχής των πολιτών, με στόχο την ελάττωση της παραγωγής απορριμμάτων και κατά συνέπεια την μείωση του όγκου και του βάρους αυτών που καταλήγουν στους χώρους τελικής διάθεσης, σε όσο το δυνατόν πιο αρχικό στάδιο παραγωγής τους.

Οι δυνατότητες πρόληψης της δημιουργίας αποβλήτων εξαρτώνται από σειρά παραγόντων όπως η οικονομική ανάπτυξη, η έκταση στην οποία οι επιχειρήσεις έχουν ήδη υιοθετήσει βέλτιστες πρακτικές για τη μείωση των αποβλήτων, κ.λ.π. Η πρόληψη μπορεί να επιτευχθεί μόνον εάν επηρεαστούν οι πρακτικές αποφάσεις που λαμβάνονται κατά τα διάφορα στάδια του κύκλου ζωής: πώς σχεδιάζεται το προϊόν, πώς παράγεται, πώς διατίθεται στον καταναλωτή και πώς χρησιμοποιείται τελικά.

Η δυσκολία της πρόληψης φαίνεται ξεκάθαρα στο Διάγραμμα 2.1. Σε όλες σχεδόν τις Ευρωπαϊκές χώρες παρατηρείται αύξηση της παραγωγής απορριμμάτων (δεδομένα 2006) σε σχέση με το 2004. Στην βέλτιστη περίπτωση κάποιες χώρες όπως η Ρουμανία, το Ηνωμένο Βασίλειο, η Βουλγαρία και η Τουρκία παρουσιάζουν μια μικρή μείωση στην παραγωγή.



**Διάγραμμα 2.1 Παραγωγή απορριμμάτων στην ΕΕ (Eurostat, 2006)**

Βασικό ζήτημα στην πρόληψη παραγωγής απορριμμάτων αποτελεί η εκτίμηση των επιπτώσεων από το στάδιο της εξαγωγής παρθένων πρώτων υλών, της επεξεργασίας, μεταποίησης, μεταφοράς και χρήσης. Μέχρι σήμερα δεν υπάρχουν – σε αρκετά παγιωμένη μορφή – μέθοδοι αναλύσεων κύκλου ζωής για τα κάθε είδους προϊόντα, κατασκευές κ.λ.π. Ήδη όμως έχουν ληφθεί αποφάσεις που υλοποιούνται είτε μέσω χρηματοδοτικών προγραμμάτων (π.χ. LIFE), είτε μέσω θεσμοθέτησης τεχνικών προτύπων, στο πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Επιτροπής Τυποποίησης (CEN). Σε ειδικές περιπτώσεις, η πρόληψη μπορεί να

γίνεται μέσω περιορισμών ή απαγορεύσεων στην χρήση συγκεκριμένων ουσιών (π.χ. βαρέων μετάλλων), ώστε να προλαμβάνεται σε μεταγενέστερο στάδιο η δημιουργία επικίνδυνων αποβλήτων. Άλλοι τρόποι συνεισφοράς στην πρόληψη, είναι τα προγράμματα οικολογικών ελέγχων, με παράλληλη θέσπιση κινήτρων ή και αντικινήτρων σε οικονομικούς φορείς του Δημόσιου ή του Ιδιωτικού τομέα (οικολογικό σήμα) και η ενθάρρυνση των καταναλωτών να αγοράσουν προϊόντα που ρυπαίνουν λιγότερο.

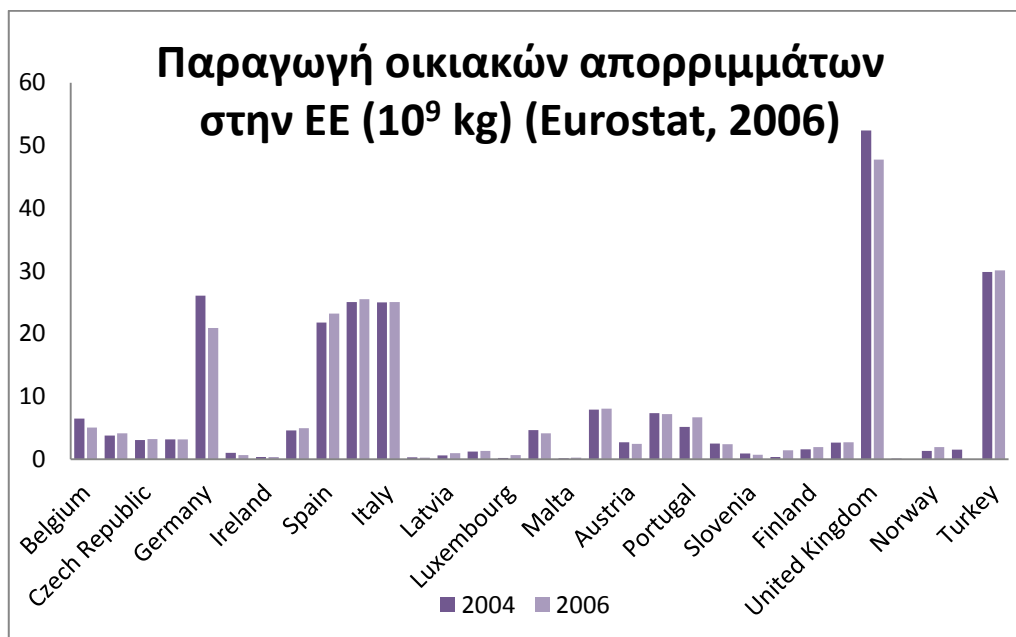
- **Αρχή επαναχρησιμοποίησης των υλικών**

Με βάση και την ευθύνη του παραγωγού, ο κατασκευαστής οφείλει να εξασφαλίζει τα μέσα, όχι μόνο για να περιορίσει την δημιουργία αποβλήτων (με συνετή χρήση των φυσικών πόρων, ανανεώσιμων πρώτων υλών ή μη επικίνδυνων υλικών) αλλά και για την δημιουργία προϊόντων ώστε να διευκολύνεται η επαναχρησιμοποίηση και ανάκτησή τους.

- **Αρχή ανακύκλωσης και αξιοποίησης των υλικών**

Η ανάκτηση από τα απορρίμματα αποτελεί τον πυρήνα κάθε ολοκληρωμένης πολιτικής διαχείρισής τους. Αυτό σημαίνει ότι σε περιπτώσεις όπου η δημιουργία τους δεν μπορεί να αποφεύγεται, θα πρέπει να επαναχρησιμοποιούνται ή να υποβάλλονται σε διαδικασίες ανάκτησης υλικών. Βασική διαδικασία για την ανάκτηση των υλικών, είναι ο διαχωρισμός τους στην πηγή. Αυτό απαιτεί την συμμετοχή των καταναλωτών και των τελικών χρηστών στην αλυσίδα διαχείρισης και τους καθιστά περισσότερο ευαίσθητους ως προς την ανάγκη μείωσης της παραγωγής αποβλήτων. Σημαντική επίσης προϋπόθεση αποτελεί για την οικονομική βιωσιμότητα συστημάτων ανακύκλωσης και η δημιουργία αγορών για τα προϊόντα που θα προκύψουν. Στόχος της στρατηγικής είναι να μειωθούν οι αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις των αποβλήτων καθ' όλο τον κύκλο ζωής τους, από την παραγωγή μέχρι την τελική διάθεσή τους. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει να αντιμετωπίζεται κάθε είδος αποβλήτων όχι μόνο ως πηγή ρύπανσης που επιβάλλεται να μειωθεί, αλλά και ως ενδεχόμενος πόρος που προσφέρεται για εκμετάλλευση.

Παρακάτω παρατίθεται ένα διάγραμμα με στοιχεία από την παραγωγή οικιακών απορριμάτων σε χώρες της Ευρωπαϊκής κοινότητας. Όπως είναι άμεσα αντιληπτό, είναι επιτακτική η ανάγκη της αξιοποίησης των παραπάνω, εφόσον αποτελούν ένα μεγάλο ποσοστό του συνόλου των απορριμάτων.



**Διάγραμμα 2.2 Παραγωγή οικιακών απορριμμάτων στην ΕΕ (Eurostat, 2006)**

- **Αρχή ανάκτησης ενέργειας**

Στις περιπτώσεις που δεν είναι δυνατή η ανάκτηση υλικών λόγω τεχνικών περιορισμών, θα πρέπει να οδηγούνται τα απόβλητα με σημαντικό θερμικό περιεχόμενο σε μονάδες θερμικής επεξεργασίας με στόχο την ανάκτηση ενέργειας, ώστε να διατεθεί τελικώς μόνο το κλάσμα που δεν δύναται να αξιοποιηθεί. Πρέπει να σημειωθεί ότι ανάκτηση ενέργειας επιτυγχάνεται και με τη βιολογική επεξεργασία της οργανικής ύλης μέσω της αναερόβιας χώνευσης κατά την οποία επιτυγχάνεται ανάκτηση και αξιοποίηση οργανικού υλικού με παράλληλη ανάκτηση ενέργειας.

- **Αρχή της ασφαλούς διάθεσης**

Η απόρριψη στερεών αποβλήτων σε χώρους διάθεσης έχει βαρύτερες επιπτώσεις στο περιβάλλον και θα πρέπει να επιλέγεται ως η έσχατη λύση. Χρησιμοποιείται εκτενώς μιας και είναι η οικονομικότερη λύση, αλλά οι πρόσφατες νομοθετικές διατάξεις έχουν ως μεσοπρόθεσμο στόχο να καταλήγουν σε χώρους διάθεσης μόνο τα μη ανακτήσιμα και αδρανή απόβλητα.

## 2.2. Προδιαγραφές ποιότητας του κόμποστ

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

ρύπων, το περιεχόμενο σε παθογόνους μικροοργανισμούς και το επίπεδο ωρίμανσης/σταθεροποίησης του κόμποστ.

### **2.2.1. Πρότυπα για τα βαρέα μέταλλα**

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

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

Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τα όρια σε βαρέα μέταλλα για διάφορες χώρες. Η Γερμανία μπορούμε να διακρίνουμε έχει τα πλέον αυστηρά κριτήρια.

| Χώρα      | Κανονισμός   | Τύπος προτύπων            | Cd  | Crtot | CrVI | Cu   | Hg  | Ni  | Pb                           | Zn   | As |
|-----------|--|---------------------------|-----|-------|------|------|-----|-----|------------------------------|------|----|
| Αυστρία   | Ποιοτική κατηγορία A+ (οργανική καλλιέργεια)   | νομικό διάταγμα           | 0.7 | 70    | -    | 70   | 0.4 | 25  | 45                           | 200  | -  |
|           | Ποιοτική κατηγορία A (καλλιέργεια κήπου)   |                           | 1   | 70    | -    | 150  | 0.7 | 60  | 120                          | 500  | -  |
|           | Ποιοτική κατηγορία Β (διαμόρφωση χώρου, αποκατάσταση)  |                           | 3   | 250   | -    | 500  | 3   | 100 | 200                          | 1800 | -  |
|           | Ποιοτική κατηγορία Β (διαμόρφωση χώρου, αποκατάσταση)  |                           |     |       |      | 400  |     |     |                              | 1200 |    |
| Βέλγιο    | Υπουργείο γεωργίας   | νομικό διάταγμα           | 1.5 | 70    | -    | 90   | 1   | 20  | 120                          | 300  | -  |
| Δανία     | Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (Κανονισμός Νο 49 «Εφαρμογή προϊόντων από απορρίμματα για γεωργική χρήση») | νομικό διάταγμα           | 0.8 |       |      | 1000 | 0.8 | 30  | 120/60 για ιδιωτικούς κήπους | 4000 | 25 |
| Φινλανδία | Αποφάσεις του Υπουργείου Γεωργίας και Δασών (46/94)  | νομικό διάταγμα           | 3   | -     | -    | 600  | 2   | 100 | 150                          | 1500 | 50 |
| Γαλλία    | Κανονισμός NF U 44 051 για εδαφοβελτιωτικά   | νομικό διάταγμα           | 3   |       |      |      | 8   | 200 | 800                          |      |    |
| Γερμανία  | Εξασφάλιση ποιότητας RAL GZ  | Εθελοντική συμφωνία (QAS) | 1.5 | 100   | -    | 100  | 1   | 50  | 150                          | 400  | -  |
|           | Διάταξη για οργανικά απορρίμματα (κατηγορία I)   | νομικό διάταγμα           | 1   | 70    |      | 70   | 0.7 | 35  | 100                          | 300  | -  |
|           | Διάταξη για οργανικά απορρίμματα (κατηγορία I)   |                           | 1.5 | 100   | -    | 100  | 1   | 50  | 150                          | 400  | -  |
| Ελλάδα    | Πλαίσιο προδιαγραφών και γενικά προγράμματα για τη διαχείριση στερεών αποβλήτων                                  | νομικό διάταγμα           | 10  | 510   | 10   | 500  | 5   | 200 | 500                          | 2000 | 15 |



|                     |   |                 |     |      |     |      |     |     |      |      |    |
|---------------------|---|-----------------|-----|------|-----|------|-----|-----|------|------|----|
| <b>Ιρλανδία</b>     | Χορήγηση αδειών των εργοστασίων επεξεργασίας όπως συμφωνείται με EPA                  | εθελοντικά      | 1.5 | 100  | -   | 100  | 1   | 50  | 150  | 350  | 15 |
|                     | Κατηγορία I   | εθελοντικά      | 1   | 100  | -   | 100  | 1   | 50  | 100  | 200  |    |
|                     | Κατηγορία II  | εθελοντικά      | 1.5 | 150  | -   | 150  | 1   | 75  | 150  | 400  |    |
| <b>Ιταλία</b>       | Τεχνικός κανονισμός, DCI 27/07/84 (MSWC) - οριακές τιμές για το στερεό οργανικό μέρος | νομικό διάταγμα | 10  | 500  | 10  | 600  | 10  | 200 | 500  | 2500 | 10 |
|                     | Σχέδιο διατάγματος στη χρήση της ποιότητας MBTC                                       | Σχέδιο νόμου    | 3   | -    | 3   | 300  | 3   | 100 | 280  | 1000 | -  |
|                     | Νόμος σχετικά με τα λιπάσματα (L 748/84 amd: 03/98) BWC/GC/SSC                        | νομικό διάταγμα | 1.5 | -    | 0.5 | 150  | 1.5 | 50  | 140  | 500  |    |
| <b>Λουξεμβούργο</b> | Χορήγηση αδειών για εγκαταστάσεις   |                 | 1.5 | 100  | -   | 100  | 1   | 50  | 150  | 400  | -  |
| <b>Ολλανδία</b>     | Κόμποστ   | νομικό διάταγμα | 1   | 50   | -   | 60   | 0.3 | 20  | 100  | 200  | 15 |
|                     | κόμποστ (πολύ καθαρό)   |                 | 0.7 | 50   | -   | 25   | 0.2 | 10  | 65   | 75   | 5  |
| <b>Πορτογαλία</b>   | Κανονισμός για ιλύς   | νομικό διάταγμα | 20  | 1000 |     | 1000 | 16  | 300 | 750  | 2500 | -  |
| <b>Ισπανία</b>      | Κανονισμός 1310/1990 pH>7 (χρήση ιλύς στη γεωργία)                                    |                 | 40  | 1500 | -   | 1750 | 25  | 400 | 1200 | 4000 | -  |
|                     | Κανονισμός 1310/1990 pH<7 (χρήση ιλύς στη γεωργία)                                    |                 | 20  | 1000 | -   | 1000 | 16  | 300 | 750  | 2500 | -  |
|                     | Διαταγή 28/V/1998 σχετικά με το λίπασμα ΒΟ.Ε.ν'μ.131.2 Ιουνίου 1998                   | νομικό διάταγμα | 10  | 400  | -   | 450  | 7   | 120 | 300  | 1100 | -  |

|  |   |   |     |                     |   |      |     |     |     |      |    |
|--|---|---|-----|---------------------|---|------|-----|-----|-----|------|----|
| <b>Ισπανικό σχέδιο</b><br>για την κομποστοποίηση | Κατηγορία AA  | Εν εξελίξη<br>νομικό διάταγμα           | 2   | 250                 | - | 300  | 2   | 100 | 150 | 400  | -  |
|  | Κατηγορία A (σταθεροποιημένο απόβλητο)                              | Εν εξελίξη<br>νομικό διάταγμα           | 5   | 400                 | - | 450  | 5   | 120 | 300 | 1100 | -  |
| <b>Σχέδιο της Catalunya στη κομποστοποίηση</b>   | Κατηγορία A   | Εν εξελίξη<br>νομικό διάταγμα           | 2   | 100                 | 0 | 100  | 1   | 60  | 150 | 400  | -  |
|  | Κατηγορία B (σταθεροποιημένο απόβλητο)                              | Εν εξελίξη<br>νομικό διάταγμα           | 3   | 250                 | 0 | 500  | 3   | 100 | 300 | 1000 | -  |
| <b>Σουηδία</b>                                   | Τιμές οδηγίας QAS   | Εθελοντικά                              | 1   | 100                 | - | 100  | 1   | 50  | 100 | 300  |    |
| <b>Ηνωμένο Βασίλειο</b>                          | «Συμβουλευτική Επιτροπή για τη θέσπιση προτύπων στο κόμποστ» (ACOS) | νομικό διάταγμα (ΕΚ κανονισμός 2092/91) | 0.7 | 70                  | 0 | 70   | 0.4 | 25  | 45  | 200  | -  |
|  | BSI PAS 100:2005  | Εθελοντική συμφωνία                     | 1.5 | 100                 | - | 200  | 1   | 50  | 200 | 400  | -  |
| <b>Καναδάς</b>                                   | BNQ τύποι AA και A,   |   | 3   | 210                 | - | 100  | 0.8 | 62  | 150 | 500  | 13 |
|  | CCME κατηγορία A  |   | 3   | 210                 | - | 400  | 0.8 | 62  | 150 | 700  | 13 |
|  | BNQ τύποι B, CCME κατηγορία B και AAFC                              |   | 20  | 1060*               |   | 757* | 5   | 180 | 500 | 1850 | 75 |
| <b>ΗΠΑ</b>                                       | Κανονισμός EPA CFR40/503 για ιλύς                                   |   | 39  | κανένα ανώτατο όριο | - | 1500 | 17  | 420 | 300 | 2800 | 41 |
|  | Νέας Υόρκη - Κατηγορία I  |   | 10  | 100                 | - | 1000 | 10  | 200 | 250 | 2500 | -  |
|  | Ουάσιγκτον – Βαθμός A   |   | 10  | 600                 | - | 750  | 8   | 210 | 150 | 1400 | 20 |

|                                 |   |                            |     |          |   |         |     |     |         |         |    |
|---------------------------------|---|----------------------------|-----|----------|---|---------|-----|-----|---------|---------|----|
|                                 | Ουάσιγκτον – Βαθμός AA                                  |                            | 39  | 1200     | - | 1500    | 17  | 420 | 300     | 2800    | 20 |
|                                 | Τέξας - Βαθμός 1 Compost                                |                            | 16  | 180      | - | 1020    | 11  | 160 | 300     | 2190    | 10 |
|                                 | Τέξας - Βαθμός 2 Compost                                |                            | 39  | 1200     | - | 1500    | 17  | 420 | 300     | 2800    | 41 |
|                                 | Ποιότητα κόμποστ στο ινστιτούτο Rodale                  |                            | 4   | 100      | - | 300     | 0.5 | 50  | 150     | 400     | 10 |
| <b>Αυστραλία</b>                | NRMMC ανώτατα όρια κατηγορίας C1                        |                            | 1   | 100-400  |   | 100-200 | 1   | 60  | 150-300 | 200-250 | 20 |
|                                 | NRMMC ανώτατα όρια κατηγορίας C2 κόμποστ                |                            | 20  | 500-3000 |   | 2500    | 15  | 270 | 420     | 2500    | 60 |
| <b>Νέα Ζηλανδία</b>             | Τιμές DoH (1992)  |                            | 15  | 1000     | - | 1000    | 10  | 200 | 600     | 2000    | -  |
| <b>Ευρωπαϊκή Κοινότητα (ΕΚ)</b> | βιολογική διαχείριση βιολογικών αποβλήτων (κατηγορία 1) | Εν εξελίξη νομικό διάταγμα | 0.7 | 100      |   | 100     | 0.5 | 50  | 100     | 200     |    |
|                                 | βιολογική διαχείριση βιολογικών αποβλήτων (κατηγορία 2) |                            | 1.5 | 150      |   | 150     | 1   | 75  | 150     | 400     |    |
|                                 | Σταθεροποιημένα βιολογικά απορρίμματα**                 |                            | 5   | 600      |   | 600     | 5   | 150 | 500     | 1500    |    |
| <b>ΕΚ/οικολογικό -σήμα'</b>     | 2001/688/ΕΚ   | εθελοντικά                 | 1   | 100      |   | 100     | 1   | 50  | 100     | 300     | 10 |
| <b>ΕΚ/οικολογική - γεωργία'</b> | 2092/91 EC-1488/97 ΕΚ                                   | εθελοντικά                 | 0.7 | 70       | 0 | 70      | 0.4 | 25  | 45      | 200     |    |

**Πίνακας 2. 1 Όρια βαρέων μετάλλων για τα ευρωπαϊκά πρότυπα κόμποστ (mg/kg ξηρής ύλης εκτός από όπου δηλώνεται) [10]**

\* Θέστε στα πρότυπα BNQ μόνο

\*\* Ομαλοποιημένος σε ένα περιεχόμενο οργανικής ουσίας 30%

### 2.2.2. Πρότυπα για τους οργανικούς ρύπους στο κόμποστ

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

(α) Η αποδόμηση από τους μικροοργανισμούς της σχετικής ένωσης είναι αργή (από μερικούς μήνες έως πολλά έτη) και επομένως υπάρχει κίνδυνος συγκέντρωσης στο χώμα

(β) Η οργανική ένωση μπορεί να συσσωρευτεί στα ζώα και επομένως θέτει μια σοβαρή απειλή στον άνθρωπο

(γ) Τα προϊόντα αποδόμησης της οργανικής ένωσης είναι τοξικότερα από την αρχική ένωση.

Σχετικά με τους οργανικούς ρύπους στο κόμποστ, για την ώρα στην ΕΕ μόνο Αυστρία, Δανία και Λουξεμβούργο φαίνεται να ανησυχούν και έτσι έχουν θεσπίσει τα όρια που βλέπουμε στον πίνακα 2.2. Ο Καναδάς δηλώνει ότι δεν υπάρχει κανένας ισχυρός λόγος να συνυπολογισθούν τα όρια οργανικών μολυσματικών παραγόντων στα πρότυπα του κόμποστ και ότι οι οργανικοί μολυσματικοί παράγοντες πρέπει να εξεταστούν για την τυποποίηση του λιπάσματος μόνο στην περίπτωση που πληροφορίες ή επιστημονικά συμπεράσματα το δικαιολογούν. Στις ΗΠΑ, το ζήτημα της απαγόρευσης των χημικών ουσιών που εισάγονται στο κόμποστ εστιάζεται σε ορισμένα ζιζανιοκτόνα των οποίων ο ρυθμός βιοαποδόμησης είναι πολύ χαμηλός.

**Πίνακας 2.2. Οριακές τιμές για οργανικούς ρύπους και φυτοφάρμακα στο κόμποστ**

|                           | <b>Αυστρία</b><br><b>MSWC<sup>1</sup></b> | <b>Δανία</b><br><b>κόμποστ από</b><br><b>βιοαπορρίμματα</b> | <b>Λουξεμβούργο</b><br><b>φρέσκο και ώριμο</b><br><b>κόμποστ</b> | <b>Αυστραλία</b><br><b>NRMMC</b> |
|---------------------------|---|---|--|----------------------------------|
| <b>PCB<sup>2</sup></b>    | 1 mg/kg dm                                |   | 0.1 mg/kg ξ.ο. (4 αναλύσεις το χρόνο)                            | 0.05-0.3 mg/kg ξ.ο.              |
| <b>PCCD/F<sup>3</sup></b> |   |   | 20 mg/kg ξ.ο. (4 αναλύσεις το χρόνο)                             |                                  |

1 Κόμποστ που παράγεται από αστικά απορρίμματα μόνο

2 Πολυχλωριωμένα διφαινύλια

3 Πολυχλωριωμένο διβενζοφουράνιο

|                                |                       |                 |   |           |
|--------------------------------|-----------------------|-----------------|---|-----------|
| <b>Διοξίνες</b>                | 50 ng<br>ITEQ/kg ξ.ο. |                 |   |           |
| <b>PAH<sup>1</sup></b>         | 6 mg/kg<br>din        | 3 mg/kg ξ.ο.    | 10 mg/kg ξ.ο. (2<br>αναλύσεις το χρόνο) |           |
| <b>ΑΟΧ<sup>2</sup></b>         | 500 mg/kg             |                 |   |           |
| <b>Υδρογονάνθρακες</b>         | 3000                  |                 |   |           |
| <b>LAS<sup>3</sup></b>         |                       | 1300 mg/kg ξ.ο. |   |           |
| <b>NPE<sup>4</sup></b>         |                       | 30 mg/kg ξ.ο.   |   |           |
| <b>DEHP<sup>5</sup></b>        |                       | 50 mg/kg ξ.ο.   |   |           |
| <b>OCPS<sup>6</sup></b>        |                       |                 |   | 0.02-0.05 |
| <b>DDT/DDD/DDE<sup>7</sup></b> |                       |                 |   | 0.5 mg/kg |

### 2.2.3. Πρότυπα για την περιεκτικότητα σε παθογόνους μικροοργανισμούς, ακαθαρσίες και ζιζάνια

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

Πίνακας 2.3 Ζεύγη θερμοκρασίας/χρόνου για την αποστείρωση

| Χώρα      | Ελάχιστη θερμοκρασία °C | Μέρες |
|-----------|-------------------------|-------|
| Αυστρία   |                         |       |
| Βέλγιο    | 60                      | 4     |
| Δανία     | 55                      | 14    |
| Γαλλία    | 60                      | 4     |
| Γερμανίας | 55                      | 14    |
|           | 60 (in-vessel)          | 7     |

1 Πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες

2 Απορροφήσιμα οργανικά αλόγονα

3 Άλατα των αλκυλοβενζολοσουλφονικών οξέων

4 nonylphenol

5 Φθαλικός διεστέρας

6 Οργανοχλωρικά φυτοφάρμακα

7 Dichloro-Diphenyl-Trichloroethane/ Dichloro – Diphenyl- Dichloroethane/ Dichloro – Diphenyl - Dichloroethylene

|   |   |  |
|---|---|--|
|   | 65 (not in-vessel)                                  | 7  |
| Ιταλία  | 55  | 3  |
| Ολλανδία  | 55  | 4  |
| Σουηδία   | 55-77, εξαρτάται από το προς κομποστοποίηση υλικό   |  |
| Ηνωμένο Βασίλειο  | 60 (δεν απαιτείται αλλά στοχεύεται να προσεγγιστεί) | Υπάρχει χρονική περίοδος για την διεργασία αλλά ανεξάρτητη της θερμοκρασίας  |
| Καναδάς (CCME)  | 55  | 3 in-vessel<br>15 for windrow<br>3 for aerated static pile   |
| ΗΠΑ   | 55  | 5 in vessel<br>15 for windrow  |
| Αυστραλία   | 55  | απαιτήσεις για τρεις στροφές του σωρού με εσωτερική θερμοκρασία που φθάνει τους 55°C για 3 ημέρες πριν από κάθε στροφή |
| Νέα Ζηλανδία  | 55  | 3  |
| Εν εξελίξη νομικό διάταγμα στη ΕΚ για τα βιοαπορρίμματα | 55 windrow composting                               | 14 (5στροφές)  |
|   | 65 windrow composting                               | 1 εβδομάδα (2 στροφές)   |
|   | 60 in-vessel composting                             |  |

Για την παρουσία ζιζανίων, δεν υπάρχει ομοιόμορφη εικόνα μεταξύ των χωρών. Εκείνες οι χώρες με τα αναπτυγμένα συστήματα - Αυστρία και Γερμανία - έχουν πρότυπα σε νομική βάση, όπως και το Βέλγιο. Η Σουηδία, η Ολλανδία, η Δανία και το Ηνωμένο Βασίλειο έχουν εθελοντικά πρότυπα σε ισχύ.

**Πίνακας 2.4. Απαιτήσεις σχετικά με τα παθογόνα, τις ακαθαρσίες και τα ζιζάνια σε διάφορες χώρες [10]**

| Χώρα           | Παρουσία παθογόνων                                   | Παρουσία ακαθαρσιών   | Παρουσία ζιζανίων  |
|----------------|--|---|--|
| <b>Αυστρία</b> | Νομοθετημένο, εξαρτώμενο από τον τομέα της εφαρμογής | Νομοθετημένο, ακαθαρσίες >2mm, agric. max. 0.5%;<br>non food: max. 1.0% | Νομοθετημένο, για κηπευτική χρήση: μέγιστο όριο είναι 3 φυτά/λίτρο |

|   |  |   |  |
|---|--|---|--|
| <b>Βέλγιο</b><br>Φλαμανδική περιοχή                                   | Νομοθετημένο, έμμεσος έλεγχος διεργασίας   | Νομοθετημένο, πέτρες >5 mm, max. 2%,<br>ακαθαρσίες >2mm, max. 0.5%  | Νομοθετημένο, κανένας σπόρος ζιζανίων<br><br>δεν επιτρέπεται   |
| <b>Βέλγιο</b><br><b>Waloonia</b>                                      | Νομοθετημένο, έμμεσος έλεγχος διεργασίας   | Νομοθετημένο, πέτρες >5 mm, max. 2%,<br>ακαθαρσίες >2mm, max. 0.5%  | Νομοθετημένο κανένας σπόρος ζιζανίων δεν επιτρέπεται   |
| <b>Βέλγιο</b><br>Βρυξέλλες  | Νομοθετημένο, έμμεσος έλεγχος διεργασίας   | Νομοθετημένο, πέτρες >5 mm, max. 2%,<br>ακαθαρσίες >2mm, max. 0.5%  | Νομοθετημένο, κανένας σπόρος ζιζανίων<br><br>δεν επιτρέπεται   |
| <b>Δανία</b>  | Νομοθετημένο   | Νομοθετημένο πλαστικό, μέταλλο, γυαλί<br><br>> 2 mm δε μπορεί να υπερβεί το 0.5% βάρος επί ξηράς ουσίας                                 | Εθελοντικά :<br><br>Πολύ χαμηλά όρια (<0.5 σπόροι και μέρη φυτού /1), σημαντικό(0.5-2/1),<br><br>Μεγάλο περιεχόμενο (>2/1) |
| <b>Φινλανδία</b>  | Μόνο με παρατήρηση απουσίας παθογόνων  | Νομοθετημένο: max 0.5% fin  | Όχι  |
| <b>Γαλλία</b>   | Νομοθετημένο, κανένας επιβλαβής μικροοργανισμός που μπορεί να επηρεάσει το άτομο, τα ζώα ή το περιβάλλον | Ναι   | Όχι  |
| <b>Γερμανία</b>   | Νομοθετημένο, έλεγχος διεργασίας της κομποστοποίησης και εξέταση του τελικού προϊόντος                   | Νομοθετημένο,<br><br><0.5% βάρος επί ξ.ο. σε πλαστικό γυαλί και μέταλλο πέτρες μεγέθους>5mm και <5% βάρος επί ξ.ο.                      | Νομοθετημένο, Για χρήση κόμποστ σε γλάστρες μέγιστο όριο είναι <0.5 φυτά/λίτρο   |
| <b>Ελλάδα</b>   | Νομοθετημένο, κανένα εντεροβακτήριο δεν πρέπει να είναι ανιχνεύσιμο                                      | Πλαστικό <0.3% βάρος επί ξ.ο., γυαλί <0.5% βάρος επί ξ.ο  | Όχι  |
| <b>Ιρλανδία (χορήγηση αδειών)</b><br><br><b>Χορήγηση αδειών δειών</b> | (καθεστώς χορήγησης αδειών) για τα παθογόνα ανθρώπων και εγκαταστάσεων                                   | <1.5% βάρος επί ξ.ο. και >25 mm r   | Όχι  |
| <b>Ιταλία</b>   | Νομοθετημένο   | νομοθετημένο,<br><br>πλαστικά (<10 mm): <0.5% βάρος επί ξ.ο.; αδρανή υλικά (<10mm):<1% βάρος επί ξ.ο<br><br>αδρανή υλικά (>10mm):απόντα | Νομοθετημένο,<br><br>Ο νόμος χρήσης λιπασμάτων απαιτεί την απουσία ζιζανίων  |
| <b>Λουξεμβού</b><br><b>Χορήγηση</b>                                   | Νομοθετημένο, έλεγχος  | Νομοθετημένο,πλαστικό,  | Νομοθετημένο, μέγιστο 2  |

|                         |   |  |   |
|-------------------------|---|--|---|
|                         | διεργασίας της κομποστοποίησης και  | γυαλί, μέταλλο (>2mm) <0.5%  | σπόροι/λίτρο  |
| <b>Ολλανδία</b>         | Εθελοντικές δοκιμές προϊόντων   | Εθελοντικά,<br>Γυαλί (>2mm) <0.2% βάρος επί ξ,ο,<br>πέτρα (>5mm) <2% βάρος επί ξ,ο,<br>glass (>16m) absent???  | Εθελοντικά,<br>μέγιστο όριο είναι 2 σπόροι ή φυτά/λίτρο |
| <b>Πορτογαλία</b>       | Όχι   | Όχι  | Όχι   |
| <b>Ισπανία</b>          | Νομοθετημένο product test   | Νομοθετημένο πλαστικά μόρια και άλλα αδρανή δεν πρέπει να είναι πάνω από 10 mm.  | Νομοθετημένο, να  |
| <b>Σουηδία</b>          | Εθελοντικά product test   | Εθελοντικά<br>πλαστικό, γυαλί, μέταλλο (>2mm) <0,5% dm   | Εθελοντικά, 82 ανα λίτρο                                |
| <b>Ηνωμένο Βασίλειο</b> | Εθελοντικά, Salmonella spp πρέπει να είναι απύσαστα στα 25gr φρέσκιας μάζας και το ανώτατο όριο Escherichia coli είναι 1000 CFUgr <sup>-1</sup>   | Εθελοντικά,<br>Για το συνολικό γυαλί, μέταλλο, πλαστικό και οποιαδήποτε μη-πέτρινα τεμάχια >2mm το ανώτατο όριο είναι 0.5 % m/m ξ,ο εκ της οποίας 0.25 είναι πλαστικό<br>Για πέτρες >4mm το ανώτατο όριο είναι 8% m/m ξ,ο  | Εθελοντικά,<br>Δεν επιτρέπεται η ανάπτυξη ζιζανίων      |
| <b>Καναδάς</b>          | <b>CCME</b> (νομοθετημένο)<br>Συγκεκριμένη θερμοκρασία – χρόνος κομποστοποίησης για τα απόβλητα αυλής σύμφωνα με την χρησιμοποιούμενη τεχνολογία λιπασματοποίησης. (I) Το κόμποστ πρέπει να έχει: Περιττωματικά κολοβακτηρίδια <1000MPN / g ολικά στερεά υπολογιζόμενα επί ξηρού βάρους, όχι Salmonella sp. Ανιχνεύσιμο επίπεδο < 3 MPN / 4g ολικά στερεά υπολογιζόμενα επί ξηρού βάρους. (II) Το κόμποστ των οργανικών αποβλήτων εκτός από της αυλής πρέπει να έχει: Fecal coliforms < 1000 MPN / g ολικά στερεά υπολογιζόμενα επί ξηρού βάρους, ή όχι Salmonella sp. Με επίπεδο ανίχνευσης < 3 MPN / 4 ολικά στερεά υπολογιζόμενα επί ξηρού βάρους. | CCME (Νομοθετημένο) και BNO (εθελοντικά) Ξένη ύλη ορίζεται αυτή που ξεπερνά τα 2 mm προερχόμενη από ανθρώπινη παρέμβαση και είναι οργανικά ή ανόργανα συστατικά όπως μέταλλο γυαλί και πολυμερή τα οποία μπορούν να είναι παρόντα στο κόμποστ αποκλείοντας τα ορυκτά χώματα ξύλα και πέτρες. | Όχι   |
| <b>ΗΠΑ</b>              | Νομοθετημένο - product test   | όχι  | Όχι   |
| <b>Αυστραλία</b>        | Κανόνες και οδηγίες   | Εθελοντικά<br>Γυαλί, μέταλλο και άκαμπτα πλαστικά >2 mm 50.5%dm;<br>Πλαστικά εύκαμπτα >5 mm, 80.05% dm; Πέτρες 85% dm Οι προμηθευτές και οι πελάτες ενθαρρύνονται να συμφωνήσουν σε ένα αποδεκτό ανώτατο όριο της  | Όχι   |



|                 |            |   |     |
|-----------------|------------|---|-----|
| Νέα<br>Ζηλανδία | Εθελοντικά | Να διαπερνά 100% 15mm x<br>15mm κόσκινο | Όχι |
|-----------------|------------|---|-----|

#### 2.2.4. Αξιολόγηση της παραγόμενης ιλύος από τη ΜΕΛ - Χρήση ως εδαφοβελτιωτικό σύμφωνα με το υφιστάμενο νομοθετικό πλαίσιο

Η τελευταία και πιο πρόσφατη νομοθεσία σχετικά με τη διαχείριση στερεών μη επικίνδυνων αποβλήτων είναι η Κ.Υ.Α. 50910/2727/2003 «Μέτρα και Όροι για τη Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων. Εθνικός και Περιφερειακός Σχεδιασμός Διαχείρισης». Σύμφωνα με αυτήν εντάσσεται στην ελληνική νομοθεσία ο Ευρωπαϊκός Κώδικας Αποβλήτων (ΕΚΑ), στον οποίο τα «απόβλητα από τον καθαρισμό λυμάτων» και η «λάσπη σηπτικής δεξαμενής» εντάσσονται στο Κεφάλαιο 20: Δημοτικά απόβλητα και γίνονται δεκτά σε ΧΥΤΑ.

Με την ίδια ΚΥΑ καθορίζεται ο Εθνικός Σχεδιασμός Διαχείρισης των μη επικίνδυνων αποβλήτων στα οποία περιλαμβάνεται και η ιλύς από ΜΕΛ. Σύμφωνα με το Παράρτημα ΙΙ, § Β.ΙΙΙ της εν λόγω ΚΥΑ, κύριος στόχος του Εθνικού Σχεδιασμού, όσον αφορά στην ιλύ που προέρχεται από Βιολογικούς Καθαρισμούς, είναι η επίτευξη υψηλού ποσοστού αξιοποίησης, μέσω των ακόλουθων δράσεων:

- Απ' ευθείας χρήση σε αγροτικές εφαρμογές, ως εδαφοβελτιωτικό
- Επανένταξη στο φυσικό περιβάλλον, 'τραυματισμένων' φυσικών ανάγλυφων, υπό την προϋπόθεση ότι η ιλύς θα είναι σταθεροποιημένη ή θα έχει υποστεί συνεπεξεργασία με άλλα μη επικίνδυνα βιοαποδομήσιμα απόβλητα, όπως το οργανικό κλάσμα των αστικών αποβλήτων.
- Ξήρανση της ιλύος και χρήση της ως καύσιμο

Επιπλέον η Ευρωπαϊκή Οδηγία 91/271/ΕΟΚ «περί επεξεργασίας και διάθεσης των λυμάτων», βάσει της οποίας καθορίζεται ότι η ιλύς πρέπει να επαναχρησιμοποιείται όταν κρίνεται σκόπιμο και να λαμβάνονται τα κατάλληλα μέτρα για την ελαχιστοποίηση τυχόν επιζήμιων επιδράσεων στο περιβάλλον.

Σχετικά με την επαναχρησιμοποίηση της ιλύος στη γεωργία, ισχύει η ΚΥΑ 80568/4225/1991 «Μέθοδοι, όροι και περιορισμοί για την χρησιμοποίηση στη γεωργία της ιλύος που προέρχεται από την επεξεργασία οικιακών και αστικών αποβλήτων», η οποία και αποτελεί εναρμόνιση της Ελληνικής Νομοθεσίας με την Ευρωπαϊκή Οδηγία 86/278/ΕΟΚ «Προστασία του περιβάλλοντος και ιδίως του εδάφους κατά την χρησιμοποίηση της ιλύος καθαρισμού λυμάτων στη γεωργία». Οι οριακές τιμές συγκέντρωσης βαρέων μετάλλων παραμένουν στην ΚΥΑ 80568/4225/1991 ίδιες με αυτές που ορίζονται στην Οδηγία 86/278/ΕΟΚ.

Η εν λόγω Οδηγία έχει ως αντικείμενο τη ρύθμιση της χρησιμοποίησης ιλύος καθαρισμού λυμάτων στη γεωργία, με σκοπό την αποφυγή επιβλαβών επιπτώσεων

στο έδαφος, τη βλάστηση, τα ζώα και τον άνθρωπο, ενθαρρύνοντας παράλληλα την ορθή της χρησιμοποίηση. Πιο συγκεκριμένα αναφέρονται τα ακόλουθα:

- Η ιλύς πρέπει να υφίσταται επεξεργασία (βιολογική, χημική ή θερμική) πριν χρησιμοποιηθεί στην γεωργία.

- Για τη χρησιμοποίηση της ιλύος πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι ανάγκες θρέψης των φυτών, οι επιπτώσεις στο έδαφος και στον υδροφόρο ορίζοντα και η υψηλή κινητικότητα των μετάλλων σε  $pH < 6$ .

- Καθορίζονται οριακές τιμές συγκέντρωσης βαρέων μετάλλων στο έδαφος και στην ιλύ, καθώς και οριακές τιμές για τις ποσότητες βαρέων μετάλλων, που μπορούν να εισάγονται σε ετήσια βάση στα καλλιεργούμενα εδάφη.

- Η ιλύς και το έδαφος στο οποίο χρησιμοποιείται, υποβάλλονται σε αναλύσεις που περιλαμβάνουν προσδιορισμό (α) ξηρής ουσίας, οργανικής ύλης,  $pH$ ,  $N$ ,  $P$  και βαρέων μετάλλων για την ιλύ και (β)  $pH$  και βαρέων μετάλλων για το έδαφος.

Στην Οδηγία 86/278/ΕΟΚ ορίζονται οι οριακές τιμές για τα βαρέα μέταλλα, (εκτός του χρωμίου), τα οποία είναι τοξικά για τα φυτά και τον άνθρωπο και συνεπώς απαγορεύεται η χρήση της ιλύος στο έδαφος όταν οι τιμές αυτές υπερβαίνουν τα όρια. Επιπλέον καθορίζονται οι ανώτατες τιμές βαρέων μετάλλων που μπορούν να εισάγονται ετήσια στα καλλιεργούμενα εδάφη. Η περιεκτικότητα της λάσπης σε βαρέα μέταλλα δημιουργεί ιδιαίτερο προβληματισμό, διότι η παρουσία τους περιορίζει τη μετέπειτα αξιοποίησή της. Οι συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων δεν πρέπει να ξεπερνούν τις προβλεπόμενες τιμές λόγω της δημιουργίας τοξικότητας. Πιο συγκεκριμένα ο χαλκός, ο ψευδάργυρος, το νικέλιο και το χρώμιο προκαλούν μείωση της αγροτικής παραγωγικότητας ενώ ο μόλυβδος, το κάδμιο και ο υδράργυρος προκαλούν βλάβες σε ανθρώπους και ζώα που καταναλώνουν αυτά τα φυτά. Επιπλέον η υψηλή περιεκτικότητα μετάλλων στο έδαφος μπορεί να επιφέρει ενδεχόμενη ρύπανση των υπογείων υδάτων.

Το σχέδιο αναθεώρησης της Οδηγίας 86/278/ΕΟΚ θέτει αυστηρότερα όρια στα βαρέα μέταλλα καθώς επίσης συζητείται η θεσμοθέτηση και άλλων παραμέτρων ποιότητας της ιλύος, όπως το μικροβιακό και το θρεπτικό φορτίο ( $N,P$ ).

Στην ΚΥΑ 114218/1997 «Κατάρτιση πλαισίου προδιαγραφών και γενικών προγραμμάτων διαχείρισης στερεών αποβλήτων» καθορίζεται επιπλέον οριακή τιμή για τη συγκέντρωση χρωμίου στην ιλύ για χρήση στη γεωργία. Οι υπόλοιπες οριακές τιμές παραμένουν ίδιες με αυτές που παραθέτει η ΚΥΑ 80568/4225/1991.

Οι οριακές τιμές συγκέντρωσης σύμφωνα με την Οδηγία 86/278/ΕΟΚ καθώς και το σχέδιο αναθεώρησης αυτής παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.5.

Πίνακας 2.5 Οριακές τιμές συγκέντρωσης μετάλλων στην ιλύ για χρήση στη γεωργία

| <b>Μέταλλο<br/>(mg/kg) DS</b> | <b>Οδηγία<br/>86/278/ΕΟΚ</b> | <b>Σχέδιο<br/>αναθεώρησης Οδηγίας<br/>86/278/ΕΟΚ</b> |
|-------------------------------|------------------------------|--|
| Cr *                          | -                            | 1000   |
| Cu                            | 1000-1750                    | 1000   |
| Hg                            | 16-25                        | 10   |
| Zn                            | 2500-4000                    | 2500   |
| Ni                            | 300-400                      | 300  |
| Cd                            | 20-40                        | 10   |
| Pb                            | 750-1200                     | 750  |

### 3. Βιολογική επεξεργασία βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων

#### 3.1. Εισαγωγή

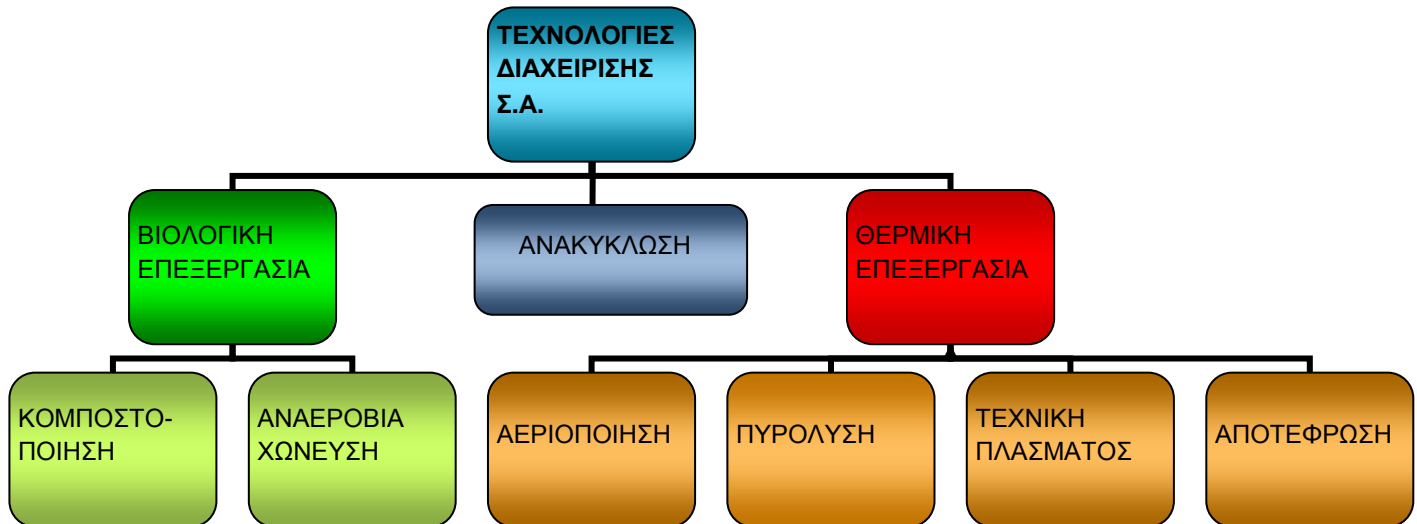
Το φαινόμενο της αστυφιλίας σε συνδυασμό με την τρομερή βιομηχανική αλλά κυρίως τεχνολογική ανάπτυξη των τελευταίων δεκαετιών οδήγησε στην αλματώδη αύξηση της ποσότητας των στερεών αποβλήτων γεγονός που αποτελεί σήμερα, ένα από τα σοβαρότερα προβλήματα της σύγχρονης κοινωνίας. Τα απορρίμματα δημιουργούν σημαντικά υγειονομικά προβλήματα, τόσο από άποψη της υγιεινής του περιβάλλοντος, όσο και της δημόσιας υγείας και επιδημιολογίας. Στην Ελλάδα, το θέμα των απορριμμάτων έχει προσλάβει εκρηκτική διάσταση, εξαιτίας της έλλειψης, μέχρι πρόσφατα, περιβαλλοντικής ευαισθησίας και της απουσίας ολοκληρωμένης πολιτικής για τη διαχείριση τους.

Όπως περιγράφηκε στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο, χιλιάδες τόνοι απορριμμάτων καταλήγουν ετησίως σε ακατάλληλες χωματερές με αποτέλεσμα να συντελούνται περιβαλλοντικά εγκλήματα όσον αφορά τη μόλυνση και τη ρύπανση. Αυτό έγκειται στο γεγονός ότι δεν υπάρχει ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης των αστικών αποβλήτων. Αλλά τι περιλαμβάνει ένα τέτοιο σύστημα και ποιο είναι το σκεπτικό στο οποίο βασίζεται;

Ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης αστικών αποβλήτων λοιπόν, περιλαμβάνει την εφαρμογή προγραμμάτων για τη βελτιστοποίηση του συστήματος συλλογής, τον περιορισμό της παραγωγής αποβλήτων, την διαλογή στην πηγή, την ανακύκλωση των διαχωρισθέντων υλικών, την εφαρμογή συστημάτων μεταφόρτωσης για την αύξηση της οικονομικής αποδοτικότητας του συστήματος, τη χρήση μεθόδων επεξεργασίας με στόχο την ενεργειακή αξιοποίηση ή την επαναχρησιμοποίηση των υλικών και τη διάθεση του τελικού υπολείμματος σε σύγχρονους χώρους υγειονομικής ταφής υπολειμμάτων (ΧΥΤΥ).

Σύμφωνα και με όσα ορίζει η ΚΥΑ 29407/3508 για την υγειονομική ταφή των αποβλήτων, δεν επιτρέπεται η διάθεση σε ΧΥΤΑ αποβλήτων που δεν έχουν υποστεί επεξεργασία. Σύμφωνα με την ίδια ΚΥΑ, 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. Κατά συνέπεια, ως επεξεργασία εννοείται η διαλογή στην πηγή (συσκευασιών, οργανικών, πράσινων, επικίνδυνων οικιακών κ.α.), η μηχανική διαλογή, η μεταφόρτωση και η δεματοποίηση, καθώς και όλες οι τεχνολογίες θερμικής, φυσικής, χημικής και βιολογικής επεξεργασίας.



Σχήμα 3. 1 Τεχνικές διαχείρισης Σ.Α.

Η σύγχρονη απάντηση που οδηγεί στην αειφόρο διαχείριση των απορριμμάτων είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης των στερεών αποβλήτων με στόχο να αναζητηθεί ο βέλτιστος συνδυασμός των μεθόδων διαχείρισης απορριμμάτων, ώστε το τελικό σύστημα να είναι περιβαλλοντικά αποτελεσματικό – οικονομικά εφικτό – κοινωνικά αποδεκτό.

Θα πρέπει να επισημάνουμε, πως δεν υπάρχει βέλτιστη τεχνολογία για το σύνολο των περιπτώσεων διαχείρισης στερεών αποβλήτων, καθώς κάθε μία από αυτές παρουσιάζει μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα τα οποία πρέπει να λαμβάνονται υπόψη από τους αρμόδιους φορείς (ΦοΔΣΑ) που θα κληθούν να κατασκευάσουν και να λειτουργήσουν τα έργα. Κρίσιμη παράμετρος σχεδιασμού είναι η ποιοτική και ποσοτική σύσταση των αποβλήτων αλλά και ο βαθμός ανάπτυξης της αγοράς για την αξιοποίηση των προϊόντων (π.χ. RDF, Compost, ανακυκλώσιμα υλικά). Οι παράμετροι αυτοί επηρεάζουν σημαντικά την αποτελεσματικότητα της τεχνολογίας που θα επιλεγεί, τόσο από οικονομική (βιωσιμότητα της μονάδας, απαιτούμενο κόστος επεξεργασίας ή και διάθεσης) όσο και από τεχνική και περιβαλλοντική άποψη (βαθμός αξιοποίησης δευτερογενών προϊόντων, τελική εκτροπή από ΧΥΤΥ κ.α.) (Eurostat, 2008).

## 3.2. Βιολογικές Μέθοδοι Επεξεργασίας

### 3.2.1. Γενικά

Οι μέθοδοι βιολογικής επεξεργασίας, όπως υποδηλώνει και η ονομασία τους, μπορούν να εφαρμοστούν μόνο σε απόβλητα που επιδέχονται τέτοια επεξεργασία, ήτοι σε βιοαποδομήσιμα ή οργανικά απόβλητα. Σε αυτή την κατηγορία περιλαμβάνεται μια μεγάλη ποικιλία αγροτικών αποβλήτων και υπολειμμάτων (κοπριές, φυτικά υπολείμματα καλλιέργειών, απόβλητα εκκοκκιστηρίων βάμβακος, ελαιοπυρήνα κλπ), πολλά στερεά απόβλητα και ιλύες από βιομηχανίες τροφίμων, η ιλύς βιολογικών καθαρισμών αστικών λυμάτων καθώς και το βιοαποδομήσιμο κλάσμα των αστικών αποβλήτων (BAA). Το τελευταίο, υπόκειται περιορισμούς της Οδηγίας για την Υγειονομική Ταφή (1999/31/ΕΕ) που επιβάλλουν τη σταδιακή εκτροπή του από τη διάθεση σε Χ.Υ.Τ.Α., από το 2010 έως το 2020 για την Ελλάδα.

Όσον αφορά τα βιοαποδομήσιμα αστικά απόβλητα, οι μονάδες βιολογικής επεξεργασίας μπορούν να δεχθούν:

- Το βιοαποδομήσιμο κλάσμα μετά από διαλογή στην πηγή, το οποίο μετά από μια αερόβια φάση βιοσταθεροποίησης μπορεί να χαρακτηριστεί ως «κομπόστ» και χαρακτηρίζεται από υψηλή ποιότητα, χαμηλές συγκεντρώσεις ρύπων και πολλές διεξόδους αξιοποίησης (π.χ. ως εδαφοβελτιωτικό, υλικό επικάλυψης λατομείων)
  - Ένα εμπλουτισμένο σε βιοαποδομήσιμα υλικά κλάσμα, που προέρχεται από εγκαταστάσεις μηχανικής διαλογής. Δεδομένου ότι η μηχανική διαλογή (δηλαδή οι μηχανικοί διαχωρισμοί με χρήση μηχανολογικού εξοπλισμού όπως κόσκινα, μαγνήτες, κ.λ.π.), εφαρμόζεται σε σύμμεικτα απορρίμματα όπως αυτά έρχονται με τα απορριματοφόρα, η ποιότητα του εμπλουτισμένου αυτού κλάσματος και κατ' επέκταση του προϊόντος μετά τη βιολογική επεξεργασία, εξαρτάται από τις επιμέρους διεργασίες της μηχανικής διαλογής. Σε κάθε περίπτωση όμως η ποιότητα του τελικού προϊόντος είναι πολύ χαμηλότερη από αυτή του κομπόστ που περιγράφηκε παραπάνω, γι' αυτό και συνήθως αναφέρεται ως υλικό «τύπου κομπόστ».
- [11]

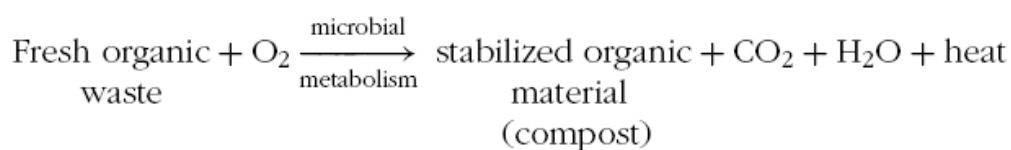
Οι μέθοδοι βιολογικής επεξεργασίας βασίζονται στην ελεγχόμενη ανάπτυξη και δράση των μικροοργανισμών, οι οποίοι επεξεργάζονται τα βιοαποδομήσιμα απορρίμματα. Σκοπός της βιολογικής επεξεργασίας είναι η εξασφάλιση των κατάλληλων συνθηκών εντός της εγκατάστασης οι οποίες θα ευνοούν το μέγιστο δυνατό ρυθμό αναπαραγωγής των μικροοργανισμών και διάσπασης των αποβλήτων.

Οι βασικές μορφές βιολογικής επεξεργασίας των οργανικών βιοαποδομήσιμων απορριμμάτων είναι (α) η αερόβια επεξεργασία (κομποστοποίηση ή βιολογική ξήρανση) η οποία μελετάται εκτενέστερα στο κεφάλαιο 4 και (β) η αναερόβια χώνευση.

### 3.3. Αερόβια Βιολογική επεξεργασία

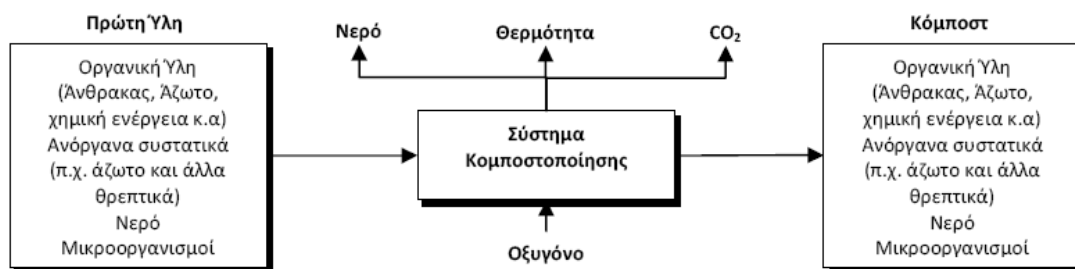
Ο όρος κομποστοποίηση αναφέρεται στη μετατροπή των οργανικών υπολειμμάτων, φυτικής ή ζωικής προέλευσης σε κοπριά. Είναι σε μεγάλο βαθμό μια μικροβιολογική διεργασία η οποία βασίζεται στις μεταβολικές δραστηριότητες αρκετών βακτηρίων, ακτινομυκήτων και μυκήτων (Bhargadwaj, 1995). Το κύριο προϊόν είναι πλούσιο σε χούμο και θρεπτικά συστατικά των φυτών τα υποπροϊόντα είναι διοξείδιο του άνθρακα, νερό και θερμότητα. Το τελικό προϊόν είναι σταθεροποιημένο και μπορεί να διατεθεί, χωρίς να έχει ανεπιθύμητες περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Στη διαδικασία της κομποστοποίησης, οι αερόβιοι μικροοργανισμοί χρησιμοποιούν τις οργανικές ύλες ως υπόστρωμα. Οι μικροοργανισμοί αποσυνθέτουν το υπόστρωμα, διασπώντας το σε ενδιάμεσες και στη συνέχεια σε απλούστερες ενώσεις (Erstein, 1997). Κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης, ενώσεις που περιέχουν άνθρακα και άζωτο μετατρέπονται μέσω των διαδοχικών δραστηριοτήτων των διαφορετικών μικροβίων σε πιο σταθερή οργανική ύλη, η οποία χημικά και βιολογικά μοιάζει με χουμικές ουσίες (Pare et al., 1998). Ο ρυθμός και η έκταση των εν λόγω μετασχηματισμών εξαρτάται από το διαθέσιμο υπόστρωμα και τις μεταβλητές που χρησιμοποιούνται για την διαδικασία της λιπασματοποίησης (Marche, et al., 2003).



**Εξίσωση 3.1 Η χημική διεργασία της κομποστοποίησης**

Στη φύση, η κομποστοποίηση λαμβάνει χώρα όταν τα φύλλα συσσωρεύονται και αρχίζουν να αποσυντίθενται. Τα σάπια φύλλα επιστρέφουν στο χώμα τις θρεπτικές ουσίες που οι ρίζες χρειάζονται για να αναπτυχθούν. Στην αρχαιότητα οι άνθρωποι στοίβαζαν τα υπολείμματα τροφών κοντά στρατόπεδά τους και διαπίστωσαν ότι τα σάπια απόβλητα διαμόρφωσαν έναν βίοτοπο που ευνοούσε την ανάπτυξη των σπόρων των σάπιων τροφών σε αυτήν την περιοχή. Ίσως αυτό οδήγησε στη διαπίστωση ότι οι σωροί αυτοί αποτελούσαν καλές θέσεις για την παραγωγή τροφίμων και οι άνθρωποι άρχισαν να βάζουν τους σπόρους εκεί σκοπίμως.



Εικόνα 3.1 Απεικόνιση της διεργασίας της κομποστοποίησης (Shaw and Stentiford, 1996, Rynk et al., 1992)

### 3.3.1. Μικροβιακά Στάδια στο σύστημα Κομποστοποίησης

Οι πρώτοι μικροοργανισμοί που αποικούν σε έναν σωρό βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων είναι τα μεσόφιλα βακτήρια, οι ακτινομύκητες, οι μύκητες και τέλος, τα πρωτόζωα. Η θερμοκρασία ανάπτυξής τους είναι μεταξύ 10°C και 45°C (Cooperband, 2000). Μπορούν με ευκολία να διασπάσουν συστατικά όπως σάκχαρα και αμινοξέα (Hellmann et al., 1997). Η βιοδιάσπαση των φρέσκων υλικών ξεκινά μόλις στοιβάζονται σε σωρούς. Λόγω της οξειδωτικής δράσης των μικροοργανισμών, αυξάνεται η θερμοκρασία. Παράλληλα, ακόμη και αν υπάρχει μια πτώση του pH στην αρχή της κομποστοποίησης, η οποία προκαλείται από το σχηματισμό πτητικών λιπαρών οξέων, η επακόλουθη διάσπασή τους οδηγεί σε σχετική αύξηση του pH.

Όταν η θερμοκρασία του σωρού αποβλήτων φτάνει τους 45°C – 50°C οι θεرمόφιλοι μικροοργανισμών αντικαταστούν τους μεσόφιλους (Hellman et al., 1997). Η δεύτερη φάση ονομάζεται *θερμόφιλη φάση* και μπορεί να διαρκέσει αρκετές εβδομάδες. Είναι η ενεργός φάση της κομποστοποίησης: Το μεγαλύτερο μέρος της οργανικής ύλης είναι διασπασμένο και συνεπώς το περισσότερο οξυγόνο καταναλώνεται σε αυτή τη φάση. Σύμφωνα με Tuomela et al. (2000), η διάσπαση της λιγνίνης αρχίζει κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης. Πράγματι, η βέλτιστη θερμοκρασία που οι θερμόφιλοι μικρο-μύκητες και οι ακτινομύκητες διασπούν τη λιγνίνη είναι 40°C - 50°C. Πάνω από τους 60°C, οι μικροοργανισμοί δεν μπορούν εύκολα να μεταβολιστούν και η διάσπαση της λιγνίνης επιβραδύνεται δραματικά (Hellman et al., 1997).

Μετά την θερμόφιλη φάση, η οποία αντιστοιχεί στην κορυφή της διάσπασης της φρέσκιας οργανικής ύλης, η μικροβιακή δραστηριότητα μειώνεται, ομοίως ακολουθεί και η θερμοκρασία. Αυτή καλείται φάση ψύξης. Η φάση ωρίμανσης του κομποστ ακολουθεί, με την θερμοκρασία του να μειώνεται εωσότου να ισοσταθμιστεί με εκείνη του αέρα του περιβάλλοντος. Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης, οι μεσόφιλοι μικροοργανισμοί αποικούν το σωρό και αποδομούν με αργό



ρυθμό πολύπλοκες οργανικές ενώσεις, όπως η λιγνίνη. Αυτή η τελευταία φάση είναι πολύ σημαντική γιατί οι ουσίες που παράγονται κατά τη διάρκειά της ευνοούν τον σχηματισμό ώριμου κομπόστ (Cooperband, 2000).

Κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης συμβαίνουν ταυτοχρόνως οι διαδικασίες ανοργανοποίησης και χουμοποίησης και είναι οι κύριες διαδικασίες που προκαλούν την διάσπαση του διαθέσιμου βιολογικού αποθέματος. Κατά τη διάρκεια της ανοργανοποίησης συμβαίνουν μετασχηματισμοί των αζωτούχων ενώσεων με συμμετοχή αρκετών βιοχημικών αντιδράσεων. Η διάσπαση πρωτεϊνών, ουρίας ή του ουρικού οξέως παράγει ιόντα αμμωνίου ( $\text{NH}_4^+$ ) (Hansen et al., 1990). Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αυτής, το υψηλό pH, η υψηλή θερμοκρασία και η υγρασία είναι τα στοιχεία που προσδιορίζουν την ισορροπία  $\text{NH}_3 / \text{NH}_4^+$ , όπως και των εκπομπών  $\text{NH}_3$ . Η διαλυτότητα της  $\text{NH}_3$  μειώνεται κατά περίπου 30% όταν η θερμοκρασία αυξάνεται στους  $40^\circ\text{C}$  -  $50^\circ\text{C}$ , και όταν το pH αυξάνεται επίσης.

Ένα άλλο βήμα της διάσπασης είναι η νιτροποίηση, η οποία μετατρέπει το αμμώνιο ( $\text{NH}_4^+$ ) σε νιτρικά ιόντα ( $\text{NO}_3^+$ ) με οξείδωση, κάτω από αερόβιες συνθήκες. Ένα από τα παραπροϊόντα της νιτροποίησης είναι το νιτρώδες οξείδιο  $\text{N}_2\text{O}$ . Αν και η κομποστοποίηση είναι ουσιαστικά μια αερόβια μετατροπή της οργανικής ύλης, αναερόβιες συνθήκες μπορεί να συμβούν σε θύλακες (τσέπες) του σωρού αποβλήτων, όπου το ελεύθερο οξυγόνο έχει εξαντληθεί. Μπορεί να οδηγήσει σε σχηματισμό πτητικών λιπαρών οξέων, που μειώνουν το pH στην αναερόβια ζώνη. Στο πλαίσιο αυτών των συνθηκών το  $\text{NO}_3$  μειώνεται σε  $\text{N}_2\text{O}$  και στη συνέχεια σε  $\text{N}_2$ . Επιπλέον,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}$  &  $\text{NO}_2$  μπορεί να παραχθούν σε έναν σωρό λιπάσματος που δεν είναι εντελώς αερόβιος. Εξαιτίας αυτών των λόγων, πρέπει να ληφθούν μέτρα για να αποφευχθεί η ανάπτυξη αναερόβιων ζωνών σε έναν σωρό λιπάσματος.

Κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης, ο άνθρακας μετατρέπεται σε  $\text{CO}_2$  και ενσωματώνεται σε οργανικές ουσίες, ως αποτέλεσμα της χουμοποίησης. Εάν οι αναερόβιες ζώνες σχηματιστούν σε έναν σωρό λιπάσματος, μεθάνιο μπορεί να απελευθερωθεί από αυτές τις ζώνες (Lopez-Real and Baptista, 1996). Σύμφωνα με τους Reigne και Girardin (2004), η χαμηλή οξειδοαναγωγική δυνατότητα και η υψηλή θερμοκρασία παρέχουν τις κατάλληλες συνθήκες για την ανάπτυξη των θερμοφίλων μεθανογόνων βακτηρίων. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια της θερμοφίλης φάσης, το οξυγόνο καταναλώνεται χωρίς μέτρο από τους αερόβιους μικροοργανισμούς, σαν αποτέλεσμα η επακόλουθη μείωση της συγκέντρωσης οξυγόνου στο σωρό ευνοεί τις αναερόβια συνθήκες για την παραγωγή μεθανίου (Ott, 1990).

### 3.3.2. Ανασκόπηση των τεσσάρων φάσεων της αερόβιας κομποστοποίησης:

#### I. Λανθάνουσα φάση

Αντιστοιχεί στο χρόνο που χρειάζεται για να γίνουν οι αποικίες των μικροοργανισμών στο καινούριο μέσο που δημιουργήθηκε γι' αυτούς.

#### II. Φάση της αυξήσεως

Κατά την οποία ανεβαίνει η θερμοκρασία, η οποία εξελίσσεται πιο γρήγορα, όταν ο αέρας και η υγρασία πλησιάζουν την επιθυμητή περιεκτικότητα. Αναπτύσσονται τα μεσόφιλα μικρόβια που προκαλούν την έναρξη της ζύμωσης. Στους 40°C – 50°C τα μεσόφιλα μικρόβια πεθαίνουν.

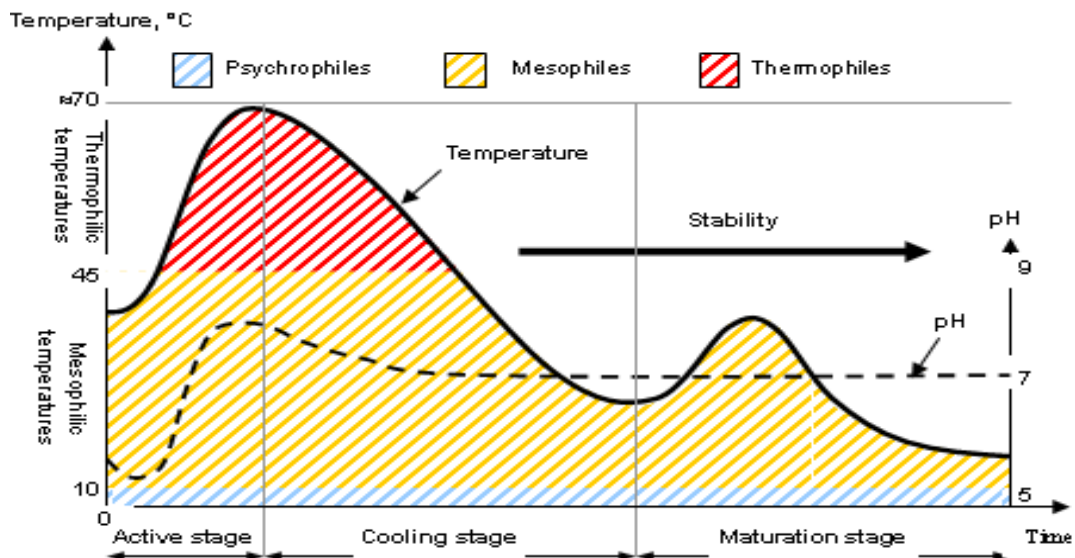
#### III. Θερμόφιλη Φάση

Αντιστοιχεί στην περίοδο ενέργειας ενός άλλου μικροβιακού κύματος, που αντικαθιστά το προηγούμενο και συνεχίζει το έργο της αποδόμησης και ανύψωσης της θερμοκρασίας. Στους 60°C – 70°C τα θερμόφιλα βακτήρια πεθαίνουν καθώς και οι παθογόνοι μικροοργανισμοί και τα διάφορα παράσιτα. Η φάση αυτή πρέπει να σταματήσει εγκαίρως για να μην ελαχιστοποιηθεί το περιεχόμενο σε οργανικές ουσίες του κόμποστ. Ένα φτωχό σε οργανικές ουσίες κόμποστ δεν πετυχαίνει τις προδιαγραφές για απόθεσή του στο έδαφος και άρα το σκοπό δημιουργίας του. Είναι διαπιστευμένο πως όταν η θερμόφιλη φάση σταθεροποιείται για ένα εύλογο χρονικό διάστημα μερικών ωρών άνω των 60 °C πετυχαίνεται αποστείρωση του δείγματος κόμποστ (Peigne, J., Girardin, P., 2004).

#### IV. Φάση ωριμάνσεως

Με τη φάση αυτή τελειώνει η διαδικασία. Τα δυο μικροβιακά κύματα (μεσόφιλα, θερμόφιλα) κατανάλωσαν το οξυγόνο και έκαναν προοδευτικά το μέσο αναερόβιο. Η φάση αυτή γεννά πτητικές ουσίες με δυσάρεστη οσμή ( $NH_3$ ,  $H_2S$ , διάφορα οργανικά προϊόντα). Για την αποφυγή του δυσάρεστου αυτού φαινομένου πρέπει να αποκαθίσταται η αερόβιος λειτουργία μέσω της ανάδευσης του σωρού.

Η διαδικασία της ωρίμανσης ποικίλει σε διάρκεια. Περισσότερος χρόνος ωρίμανσης εξασφαλίζει ότι το κόμποστ είναι απαλλαγμένο από παθογόνους μικροοργανισμούς και φυτοτοξίνες. Σε περίπτωση που το κόμποστ δεν είναι ώριμο (όχι πλήρως σταθεροποιημένο), ευνοεί την μικροβιακή ανάπτυξη και άρα την κατανάλωση οξυγόνου. Αν χρησιμοποιηθεί στο έδαφος τότε θα μειώσει το διαθέσιμο οξυγόνο για τις ρίζες των φυτών. Επιπλέον μπορεί να περιέχει υψηλά επίπεδα διαλυτών οργανικών ουσιών (π.χ οργανικά οξέα), τα οποία θα προκαλέσουν προβλήματα τοξικότητας (M.Loizidou, 2007) & (L. Diaz et al., 1993).



Σχήμα 3.2 Στα παραπάνω σχήμα βλέπουμε τη μεταβολή της θερμοκρασίας και του pH στις διάφορες φάσεις της κομποστοποίησης.

Στο σχήμα 3.3 παρουσιάζεται η πυραμίδα των μικροοργανισμών κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης.



Σχήμα 3.3 Η πυραμίδα των μικροοργανισμών κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης

### 3.3.3. Η εξέλιξη της βιολογικής αποικοδόμησης

Η κομποστοποίηση αναμφισβήτητα ως μια γενικότερη έννοια εφαρμοζόταν στους αρχαίους χρόνους. Οι Ισραηλίτες, οι Έλληνες και οι Ρωμαίοι χρησιμοποιούσαν οργανικά απορρίμματα για την παραγωγή φυσικού λιπάσματος. Οι μεταγενέστεροι πολιτισμοί Ν. Αμερικής, Κίνας, Ιαπωνίας και Ινδιών εφάρμοζαν την κομποστοποίηση εντατικά στην γεωργία χρησιμοποιώντας ως υπόστρωμα για την παραγωγή του εδαφοβελτιωτικού απορρίμματα ζώων και ανθρώπων. Πολλά από αυτά τα οργανικά απορρίμματα τοποθετούνταν σε γραμμικούς σωρούς (Windrow) μέχρι να σταθεροποιηθούν και να δώσουν το τελικό προϊόν που δεν είναι άλλο από το κόμποστ. Έτσι γίνεται και η πρώτη αναφορά στα συστήματα κομποστοποίησης. Έρευνα για την κομποστοποίηση στις Ηνωμένες Πολιτείες εμφανίζεται να έχει αρχίσει το 1843. Την χρονιά εκείνη ο George Bommer προτείνει μια μέθοδο διαχείρισης των αγροτικών απορριμμάτων (κοπριάς). Η μέθοδος η οποία ονομάζεται «Bommer Method of Making Manure», έχει ως χαρακτηριστικό της την τοποθέτηση των απορριμμάτων αυτών σε δικτυωμένες σχάρες έτσι ώστε το παραγόμενο στράγγισμα να πέφτει προς τα κάτω, να συλλέγεται και στη συνέχεια να ανακυκλώνεται, εξοικονομώντας σημαντικές ποσότητες νερού (S. Gajalakshmi and S. A. Abbasi, 2009).

Η πρώτη όμως επίσημη αναφορά για την κομποστοποίηση στη Αμερικανική ήπειρο γίνεται το 1888 στο περιοδικό Bulletin N<sup>ο</sup> 61, απ' το Σταθμό Γεωργικών Πειραμάτων της Β. Καρολίνας και το οποίο εκδόθηκε τον Δεκέμβριο της ίδιας χρονιάς. Η μελέτη είχε τίτλο «XI. Compost - Formulas, Analyses and Value».

Πολλά χρόνια αργότερα στις Ινδίες και συγκεκριμένα το 1925, γίνεται η πρώτη σημαντική ανακάλυψη από τον Sir Albert Howard. Ο Sir Albert Howard ανέπτυξε την διεργασία της αναερόβιας χώνευσης των απορριμμάτων και των υγρών αποβλήτων. Η μέθοδος αυτή ήταν μέχρι τότε γνωστή ως Indore Process. Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή χρειάζονται έξι μήνες τουλάχιστον για να πάρουμε ένα καλό εδαφοβελτιωτικό – κόμποστ. Στη συνέχεια η μέθοδος μετατρέπεται σε αερόβια διεργασία και πήρε το όνομα Bangalore Process η οποία χρησιμοποιείται στις Ινδίες ακόμα και σήμερα. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή γίνεται εκμετάλλευση των αστικών απορριμμάτων και των λυμάτων. Στη μέθοδο Μπανγκαλόρ, τάφροι περίπου 1 μ. βάθους, και 01.05 - 02.05 μ. πλάτους, γίνονται σε κατάλληλο τόπο, εν γένει, στις παρυφές της πόλης. Το υπό κομποστοποίηση υλικό απορρίπτεται στην τάφρο ή λάκκο και απλώνεται ώστε να δημιουργηθεί ένα στρώμα πάχους περίπου 15 εκατοστών. Στη συνέχεια χώμα ή κοπριά τοποθετείται πάνω από τα απορρίμματα σε ένα στρώμα περίπου 5 cm. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου η τάφρος ή ο λάκκος να γεμίσει έως περίπου 30 εκ. πάνω από το επίπεδο του εδάφους και μια τελική στρώση κομποστοποιημένο υλικό τοποθετείται στην κορυφή. Σε κάθε στρώση, νερό ψεκάζεται πάνω στο υλικό για να βελτιστοποιήσει την υγρασία του.

Η υπέργεια υλικού γίνεται σε σχήμα θόλου και καλύπτεται με περίπου 2,5 εκατοστά λάσπη-γύψο. Εάν όλες οι εργασίες γίνουν κανονικά, το κομπόστ είναι έτοιμο σε 5 έως 6 μήνες.

Από το 1922 και μετά άρχισαν να εμφανίζονται και στη Ευρώπη διάφορες μέθοδοι κομποστοποίησης. Η πιο γνωστή από όλες ήταν η μέθοδος Baccari, σύμφωνα με την οποία η αποσύνθεση της οργανικής ύλης μπορούσε να γίνει σε ένα κλειστό σύστημα χρησιμοποιώντας αερόβιες και αναερόβιες συνθήκες. Η πρώτη πλήρης κλίμακα κομποστοποίησης στην Ευρώπη γίνεται το 1932 από μια Ολλανδική εταιρία την N.V. Vuilafvoer Moatscharij (VAM). Το σύστημα γνωστό και ως Van Maanen ήταν ουσιαστικά μια παραλλαγή της διεργασίας Indore. Σύμφωνα με τη μέθοδο VAM τα απορρίμματα βιοαποδομούνταν σε γραμμικούς σωρούς και στους οποίους η ανάδευση γινόταν με εναέριους γερανούς.

Το 1933 εμφανίζεται μια νέα διεργασία κομποστοποίησης, γνωστή μέχρι σήμερα με το όνομα DANO. Οι αντιδραστήρες DANO είναι αερόβιοι, έχοντας ένα οριζόντιο άξονα ο οποίος περιστρέφεται σιγά – σιγά και προσδίδει αέρα. Μετά από έρευνες οι αντιδραστήρες DANO πήραν την τελική τους μορφή. Κράτησαν το κυλινδρικό σχήμα το οποίο είχαν από την αρχή, αλλά το μήκος τους αυξήθηκε σε 30m και η διάμετρος σε 4,5m. Οι αντιδραστήρες αυτοί έχουν την ικανότητα να επεξεργάζονται απορρίμματα μέχρι και 150 τόνους/ημέρα. Αντιδραστήρες DANO χρησιμοποιούνται και σήμερα. Στο χώρο υγειονομικής ταφής στη χωματερή των Άνω Λιοσίων ξεκίνησε την εγκατάσταση του το εργοστάσιο μηχανικής ανακύκλωσης των απορριμμάτων του Νομού Αττικής. Στο εργοστάσιο αυτό έχουν τοποθετηθεί τρεις DANO αντιδραστήρες διαμέτρου 3,5 μέτρων και μήκους 50 μέτρων (περίπου) με δυνατότητα να επεξεργάζονται μέχρι και 1200 τόνους την ημέρα απορριμμάτων και λάσπης. Μετά το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο η κομποστοποίηση άρχισε να αναπτύσσεται πολύ στη γηραιά ήπειρο ενώ στην Αμερική για κάποιους λόγους σταμάτησε (S. Gajalakshmi and S. A. Abbasi, 2009).

Μέχρι τώρα, με τη βοήθεια των οργάνων, την εκμηχάνιση, και όλο και περισσότερο αυστηρή διαδικασία ελέγχου, είναι δυνατόν να αποκτήσουμε υψηλής ποιότητας λίπασμα σε διάρκεια 3-4 εβδομάδων. Από τα κυριότερα συστήματα κομποστοποίησης τα οποία καταγράφηκαν μέχρι το 1970 αναφέρονται στον Πίνακα 3.1 τα πιο σημαντικά. Από το 1970 μέχρι και σήμερα χρησιμοποιήθηκαν συστήματα με διαφορετικές ονομασίες, οι αρχές λειτουργίας των οποίων δεν διαφέρουν από τα παλαιότερα συστήματα.

Πίνακας 3.1 Τα κυριότερα συστήματα κομποστοποίησης μέχρι το 1970

| Συστήματα                 | Σύντομη Περιγραφή   | Προέλευση                         |
|---------------------------|---|-----------------------------------|
| <b>Bangalore (Indore)</b> | Λάκκος 0,6 – 1m βάθος ή σωρός. Χρόνος παραμονής 120 – 180 ημέρες. Επεξεργάζεται οργανικά λύματα                                     | Ινδίες, Ν. Αφρική                 |
| <b>Caspari</b>            | Συμπιεσμένα απορρίμματα σε κύβους στοιβαγμένα για 30 – 40 ημέρες.   | Γερμανία                          |
| <b>DANO</b>               | Κυλινδρικού σχήματος αντιδραστήρες μήκους 50 m και διαμέτρου 3 – 4 m. Χρόνος παραμονής 1 – 5 ημέρες. Ωρίμανση σε γραμμικούς σωρούς. | Αμερική, Ευρώπη                   |
| <b>Earp – Thomas</b>      | Αντιδραστήρες τύπου Σιλό με χρόνο παραμονής 2 – 3 ημέρες.   | Γερμανία, Ελβετία, Ιταλία, Ελλάδα |
| <b>Fairfield – Hardy</b>  | Κυλινδρικού σχήματος αντιδραστήρες με μηχανική παροχή αέρα.   | Αμερική                           |
| <b>Metro Waste</b>        | Ανοιχτού τύπου αντιδραστήρας, οριζόντιου ορθογώνιου σχήματος διαστάσεων 7 * 3,5 * 130 m, με χρόνο παραμονής 5 ημέρες.               | Αμερική                           |

Τεράστια ώθηση προς την κατεύθυνση της μελέτης, συστηματοποίησης και μηχανοποίησης της κομποστοποίησης έδωσε η ιδέα της εφαρμογής του στα δημοτικά σκουπίδια. Η προσπάθεια αυτή ενισχυμένη και από την αντίληψη του βιομηχανικού κεφαλαίου ότι ήταν δυνατή η εκμετάλλευση των σκουπιδιών για εύκολο κέρδος, σε πολλές περιπτώσεις ζημίωσε αντί να ωφελήσει την υπόθεση της κομποστοποίησης. Το αποκορύφωμα αυτής της εσφαλμένης αντίληψης σημειώνεται μέσα στη δεκαετία του 1960 οπότε και έχουμε πολλές οικονομικές αποτυχίες σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις κομποστοποίησης σκουπιδιών σε πολλά μέρη του κόσμου. Ιδιαίτερα στις Η.Π.Α. όπου και κυρίως το βιομηχανικό κεφάλαιο προσπάθησε να δημιουργήσει κερδοσκοπικές βιομηχανίες κομποστοποίησης των δημοτικών σκουπιδιών, η αποτυχία ήταν πλήρης, γεγονός που αποτέλεσε και ανασταλτικό παράγοντα στην παραπέρα πορεία της κομποστοποίησης σε αυτή τη χώρα. Αντίθετα στον ευρωπαϊκό χώρο όπου την εφαρμογή της κομποστοποίησης στα δημοτικά σκουπίδια την είδαν από την σκοπιά του κοινωφελούς έργου για τη διατήρηση του περιβάλλοντος και της γονιμότητας των εδαφών και οι κύριοι φορείς αυτής της προσπάθειας ήταν συνήθως οι τοπικές αρχές, η μηχανοποίηση της κομποστοποίησης των δημοτικών σκουπιδιών εξελίχθηκε ομαλά. Έτσι η σχετική ευρωπαϊκή τεχνολογία θεωρείται εξαιρετικά υψηλού επιπέδου, με χαμηλό σχετικά λειτουργικό κόστος.

Τη δεκαετία του 1960 δύο Διδάκτορες του Πανεπιστημίου της Καλιφόρνιας οι Gottas και Goulke άρχισαν να αναπτύσσουν τη διεργασία του Composting. Την ίδια περίοδο η Επιτροπή Δημόσιας Υγείας των Ηνωμένων Πολιτειών άρχισε δύο σημαντικές έρευνες για την κομποστοποίηση του οργανικού κλάσματος των απορριμμάτων με βιοστερεά. Η μία έρευνα έγινε στην Florida η άλλη στο

Tennessee. Η εφαρμογή του κόμποστ σε καλλιεργήσιμα εδάφη έδωσε πολύ καλά αποτελέσματα, αυξάνοντας σε ικανοποιητικό επίπεδο την παραγωγή.

Το 1975 το Υπουργείο Γεωργίας των Ηνωμένων Πολιτειών αναπτύσσει την μέθοδο αεριζόμενων στατικών σωρών για την κομποστοποίηση του οργανικού κλάσματος των απορριμμάτων.

Το 1976 το Rutgers University New Jersey αναπτύσσει μέθοδο για την κομποστοποίηση των βιοστερεών η οποία είναι γνωστή μέχρι σήμερα ως Rutgers Strategy Rutgers Methods. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται αντιδραστήρας κάθετης ή οριζόντιας ροής. Στο κέντρο του αντιδραστήρα αναπτύσσεται θερμοκρασία που φθάνει τους 65°C, ενώ η υγρασία του συστήματος δεν ξεπερνά το 60%. Υπάρχει μηχανική ανάδευση και αερισμός. Ο χρόνος παραμονής στον αντιδραστήρα κυμαίνεται μεταξύ 15-21 μέρες. Στη συνέχεια το μη ώριμο κόμποστ οδηγείται σε μη γραμμικούς σωρούς για ωρίμανση ή τοποθετείται σε σακούλες. Το τελικό προϊόν είναι έτοιμο για διάθεση μέσα σε 120 ημέρες (S. Gajalakshmi and S. A. Abbasi, 2009).

Είναι λοιπόν γνωστό ότι η διαχείριση των απορριμμάτων και των ιλύων, καθώς και η υποβάθμιση των αγροτικών εδαφών από τη συνεχή χρήση των φυτοφαρμάκων και των χημικών λιπασμάτων είναι ορισμένα από τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά προβλήματα που απασχολούν τις σύγχρονες κοινωνίες. Η υποβάθμιση των αγροτικών εδαφών οφείλεται στη συνεχή ελάττωση της οργανικής ουσίας τους και αποδίδεται στο ότι η φυσική κάλυψη των εδαφών αντικαταστάθηκε από καλλιέργειες που τις περισσότερες φορές είναι μονοκαλλιέργειες με σύντομους κύκλους. Η σύγχρονη γεωργία με τα μέσα που διαθέτει, βελτιώνει προσωρινά τη δομή των εδαφών αυξάνοντας την παραγωγικότητα. Αυτό όμως έχει ως αποτέλεσμα την γήρανση των εδαφών και κατ' επέκταση την υποβάθμισή τους.

Η ανακύκλωση τόσο όμως του οργανικού κλάσματος που βρίσκεται στα απορρίμματα όσο και της ιλύος (λάσπη) μπορεί να προσφέρει σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη, δεδομένου ότι τα βιοαποδομήσιμα συστατικά τους αντί να επιβαρύνουν το περιβάλλον θα δώσουν, έπειτα από αερόβια επεξεργασία οργανοχημικά υλικά που θα βελτιώσουν τη δομή των υποβαθμισμένων αγροτικών εδαφών (Ζορμπάς, 1999).

### 3.3.4. Υλικά κομποστοποίησης

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

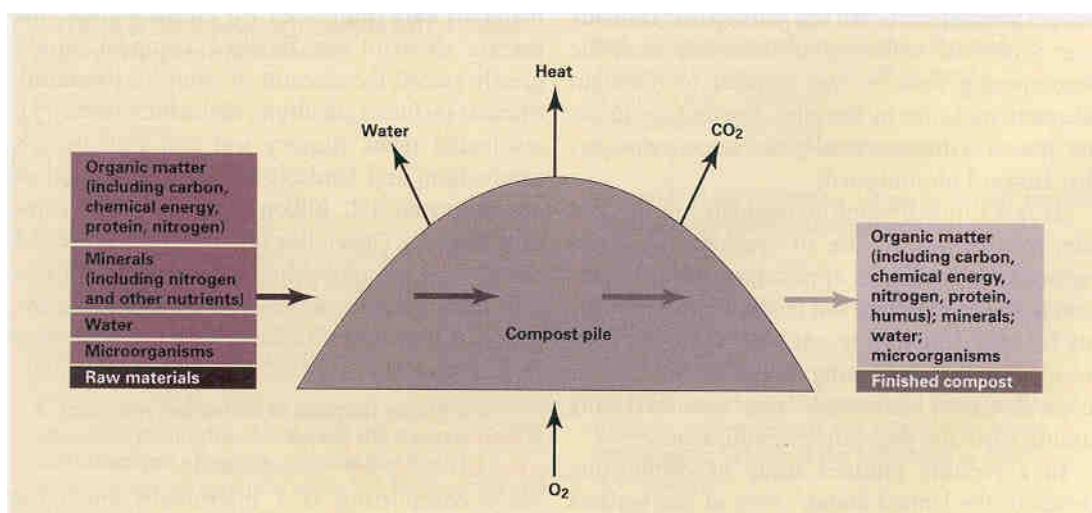
- **Ιλύς προερχόμενη από αστικά απόβλητα**  
Η εν λόγω ποσότητες έχουν υποστεί φυσική επεξεργασία (μείωση υγρασίας) σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων.
- **Κτηνοτροφικά απόβλητα**  
Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται υπολείμματα κτηνοτροφικών – πτηνοτροφικών εγκαταστάσεων (π.χ. κοπριά οικόσιτων ζώων)
- **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 (τα 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 (Malamis, 2011).



Αναφορικά με τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες των παραπάνω αποβλήτων γίνεται εκτενής περιγραφή στην ενότητα 3.2.5. 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 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 (Malamis, 2011).

### 3.4. Παράγοντες που ελέγχουν τη διαδικασία κομποστοποίησης

Λόγω του γεγονότος ότι η ανάπτυξη της μεθόδου στηρίζεται στην παρουσία κατάλληλων πληθυσμών μικροοργανισμών, οι παράμετροι που επηρεάζουν την ανάπτυξη και δραστηριότητά τους είναι αυτές που καθορίζουν τόσο το ρυθμό και την έκταση της διεργασίας όσο και την ποιότητα του παραγόμενου τελικού σταθεροποιημένου οργανικού προϊόντος (compost) (S. Gajalakshmi and S. A. Abbasi, 2009).



Σχήμα 3.4 Σχηματικά, η διεργασία της κομποστοποίησης.

Οι πιο σημαντικοί από αυτούς τους παράγοντες που απεικονίζονται είναι οι εξής:

### 3.4.1. Αβιοτικοί παράγοντες

#### i. Η φύση του υποστρώματος

Όλα τα είδη των οργανικών καταλοίπων δεκτικά στις ενζυμικές δραστηριότητες των μικροοργανισμών μπορούν να μετατραπούν σε λίπασμα, εάν επικρατούν οι κατάλληλες συνθήκες για βιοαποικοδόμηση. Δεδομένου ότι το υπόστρωμα είναι η μοναδική πηγή τροφής για τους μικροοργανισμούς σε έναν σωρό λιπάσματος, η φύση του υποστρώματος είναι ο πιο βασικός παράγοντας ελέγχου σε κάθε διαδικασία της κομποστοποίησης. Τα περισσότερα υποστρώματα αποτελούνται σε μεγάλο βαθμό από πολυμερή, που είναι αδιάλυτα στο νερό. Τα εξωκυττάρια ένζυμα που απελευθερώνονται από τα μικρόβια υδρολύουν αυτά τα πολυμερή σε μονομερή, τα οποία στη συνέχεια διαλύονται στο νερό και εισάγονται στις μικροβιακές κυψέλες όπου λαμβάνει χώρα περαιτέρω η αποσύνθεση (Ginkel, 1996). Η ωριμότητα του κομπόστ εξαρτάται επίσης από τη φύση του υποστρώματος (Zucconi και Bertoldi, 1987). Η χρήση του κομπόστ -είτε σε αγρονομικές είτε σε κηπευτικές δραστηριότητες- βασίζεται στην χημική σύνθεση του κομπόστ (Barker, 1997). Αν το υπόστρωμα είναι φυτικής προέλευσης, τότε τα κύρια συστατικά του είναι ανθρακώδεις ενώσεις όπως η κυτταρίνη, η ημικυτταρίνη, και η λιγνίνη. Αζωτούχα συστατικά (πρωτεΐνες) υπάρχουν σε μικρότερο βαθμό. Τα συστατικά των πρωτεϊνών, κυτταρίνη, ημικυτταρίνη αποσυντίθενται εύκολα. Αν και τα κυτταρινικά υποστρώματα αποτελούν καλή πρώτη ύλη για την κομποστοποίηση, η λιγνίνη, ένα σύνθετο αρωματικό πολυμερές, είναι ανθεκτική στη μικροβιακή επίθεση σε σημαντικό βαθμό. Πολυμερές τεράστιου βαθμού πολυμερισμού, υδρόφοβο & ανθεκτικό χημικά και θερμικά, αποτελεί τη βασική συγκολλητική ουσία του ξύλου. Ωστόσο, δεν είναι εντελώς ανθεκτική στη μικροβιακή αποσύνθεση· θα υποβληθεί σε αργή διάσπαση. Η αυξημένη θερμοκρασία που βρέθηκε κατά τη διάρκεια της θερμοφίλης φάσης είναι απαραίτητη για την ταχεία διάσπαση της λιγνίνης (Tuomela et al., 2000). Ένας αριθμός μυκήτων, ιδιαίτερα αυτών που ανήκουν στην ομάδα Βασιδιομυκήτων, είναι γνωστά για την ικανότητά τους να αποσυντεθούν λιγνίνη (Muthukumar και Mahadevan, 1983). Μερικά βακτήρια και ακτινομύκητες επίσης κατέχουν λιγνολυτικά χαρακτηριστικά (Bharadwaj, 1995).

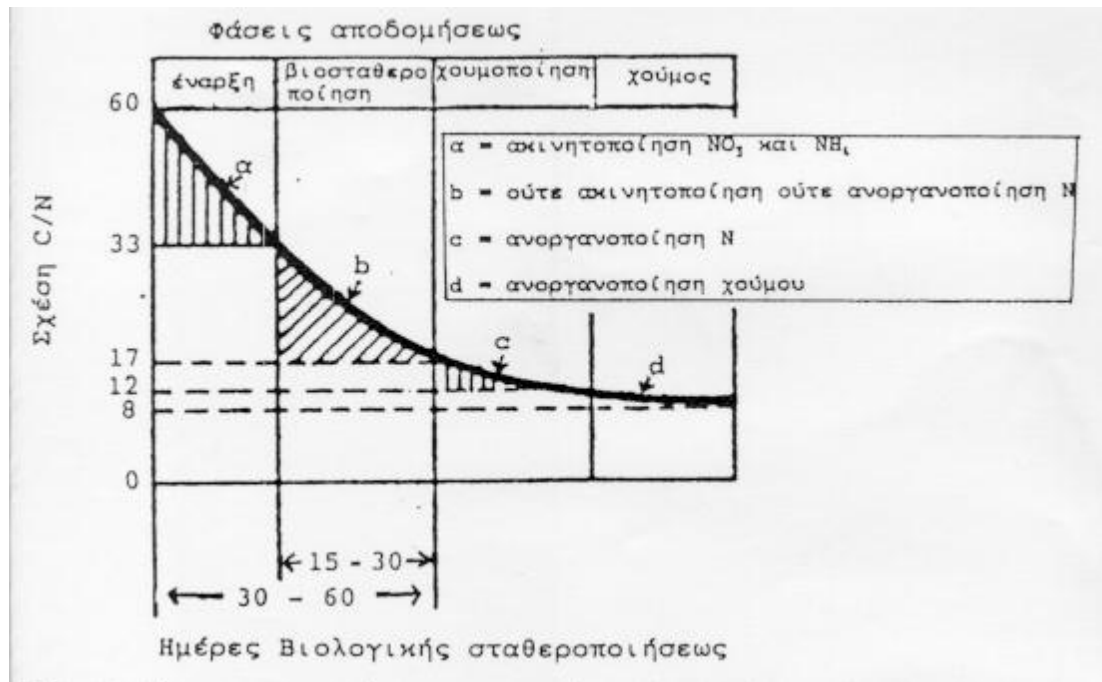
Οι οργανικές ενώσεις σε βιολογικά απόβλητα θα μπορούσε να χωριστεί σε τρία κύρια κλάσματα: (1) υδατάνθρακες (πολυμερή και απλά σάκχαρα), (2) λιγνίνη, και (3) ενώσεις του αζώτου. Στην αρχή της διαδικασίας κομποστοποίησης, οι απλοί υδατάνθρακες μετατρέπονται σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό, και η αποικοδόμηση των αζωτούχων ενώσεων οδηγεί κυρίως στην παραγωγή αμμωνίας. Στα μεταγενέστερα στάδια της κομποστοποίησης, η κυτταρίνη και η ημικυτταρίνη χρησιμοποιούνται από τη μικροχλωρίδα του κομπόστ και τελικά η λιγνίνη διασπάται (S. Gajalakshmi and S. A. Abbasi, 2009).

Εκτός από την μεταλλική ανοργανοποίηση, η οργανική ύλη μετατρέπεται σε χουμικές ουσίες. Το πορώδες του υποστρώματος παίζει σημαντικό ρόλο στη διαδικασία της κομποστοποίησης. Το πορώδες διευκολύνει την ανταλλαγή αέρα με την ατμόσφαιρα, και επιτρέπει στον αερόβιο μεταβολισμό να λάβει χώρα, απελευθερώνοντας θερμότητα αφειδώς.

Υλικά που δεν πρέπει να συμπεριληφθούν κατά τη διαμόρφωση ενός σωρού κομποστοποίησης περιλαμβάνουν χώμα, στάχτες από μια σόμπα ή το τζάκι, και κοπριά από τα σαρκοφάγα ζώα. Η κοπριά από τα φυτοφάγα ζώα, όπως κουνέλια, αίγες, βοοειδή, άλογα, ελέφαντες, ή πτηνά μπορεί να χρησιμοποιηθεί, δεδομένου ότι είναι πολύ πιο λιτή σε πρωτεΐνες από την κοπριά από τα σαρκοφάγα. Μόλις ένας σωρός ξεκινήσει την κομποστοποίηση, δεν απαιτείται περαιτέρω προσθήκη υποστρώματος, ο λόγος είναι ότι χρειάζεται μια ορισμένη ώρα για το υπόστρωμα για να διασπαστεί και οποιαδήποτε προσθήκη θα ξανάρχιζε τη διαδικασία από την αρχή επιμηκύνοντας την αποσύνθεση του σωρού.

#### ii. **Θρεπτικά συστατικά και αναλογία Άνθρακα/Αζώτου (C/N)**

Για την ικανοποιητική λειτουργία των μικροοργανισμών της κομποστοποίησης είναι απαραίτητα τα κάτωθι θρεπτικά συστατικά: κάλιο (K), άζωτο (N), φωσφόρος (P) και άνθρακας (C). Το άζωτο, ο φωσφόρος και το κάλιο είναι επίσης βασικά θρεπτικά συστατικά των φυτών. Επομένως η παρουσία τους στο κομπόστ καθορίζει και την εμπορική του αξία. Από τα θρεπτικά συστατικά, που περιέχονται στα οργανικά υλικά, η ποσότητα του άνθρακα και του αζώτου είναι αυτή που καθορίζει την αποτελεσματικότητα της διεργασίας της κομποστοποίησης. Το άζωτο χρησιμοποιείται από τους μικροοργανισμούς για την παρασκευή των πρωτεϊνών και την αναπαραγωγή τους, καθώς είναι βασικό συστατικό του πρωτοπλάσματός τους. Ο δε άνθρακας παρέχει την απαραίτητη ενέργεια στους μικροοργανισμούς, μέσω της οξειδωσής του κατά τον μεταβολισμό, για να επιτελέσουν τις διάφορες λειτουργίες τους. Επιπλέον, αποτελεί το σημαντικότερο συστατικό στη σύνθεση των κυτταρικών τοιχωμάτων και άλλων κυτταρικών δομών. Στην οξείδωση του άνθρακα προς διοξείδιο οφείλεται το μεγαλύτερο μέρος της απώλειας μάζας και της έκλυσης θερμότητας κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης.



**Διάγραμμα 3.1** Οι φάσεις κομποστοποίησης της οργανικής ουσίας με βάση τη σχέση C/N

Η σχέση C/N επηρεάζει αποφασιστικά την ταχύτητα της βιολογικής αποδόμησης του υλικού γιατί από τη διαθέσιμη ποσότητα του βασικού στοιχείου N στους μικροοργανισμούς, εξαρτάται η ταχύτητα της αποδόμησης των οργανικών ενώσεων του C για τον προσδιορισμό από αυτούς της απαιτούμενης ποσότητας C και ενέργειας. Με βάση την περιεκτικότητα του μικροβιακού κυττάρου σε C και N και το δεδομένο ότι μόνο το 1/3 του μεταβολιζόμενου C χρησιμοποιείται από τους μικροοργανισμούς το δε άλλο αποβάλλεται κυρίως ως CO<sub>2</sub>, η άριστη σχέση C/N στο υπό αποικοδόμηση υλικό υπολογίζεται γύρω στο 25:1. Ωστόσο, τα απορρίμματα (ιδίως με πολύ χαρτί) έχουν δυσμενή λόγο θρεπτικών υλικών (C/N μέχρι 60:1), που μπορεί όμως να βελτιωθεί με την προσθήκη αζωτούχων ενώσεων (π.χ. λάσπη λυμάτων με C/N 12:1). Έχει παρατηρηθεί ότι αρχικές χαμηλές τιμές του λόγου C/N (με τιμές μικρότερες από 10) έχουν ως αποτέλεσμα την επιβράδυνση της βιοαποδόμησης και την αύξηση των απωλειών αζώτου (μέσω απαερίωσης αμμωνίας, ειδικά υπό συνθήκες υψηλών τιμών pH και θερμοκρασίας). Αντίθετα, αν οι αρχικές τιμές του λόγου C/N είναι ιδιαίτερα υψηλές (μεγαλύτερες από 35), τότε απαιτούνται πολλοί βιοχημικοί κύκλοι (οι μικροοργανισμοί οξειδώνουν κάθε φορά την περίσσεια του άνθρακα), έως ότου επιτευχθεί ικανοποιητικός λόγος C/N. Η εμπειρία έχει δείξει ότι η βέλτιστη τιμή του λόγου C/N κυμαίνεται ανάμεσα στο 25 και 35. Υψηλότερες τιμές επιβραδύνουν την βιοαποδόμηση, ενώ χαμηλότερες οδηγούν σε απώλειες θρεπτικού αζώτου. Οι παρακάτω πίνακες δίνουν πληροφορίες για το λόγο C/N διαφόρων υλικών κομποστοποίησης.

Οι παρακάτω πίνακες δίνουν πληροφορίες για το λόγο C/N διαφόρων υλικών κομποστοποίησης.

**Πίνακας 3.2 Αναλογία άνθρακα-αζώτου στα διάφορα κομποστοποιήσιμα υλικά**

| <b>ΥΛΙΚΟ</b>             | <b>ΛΟΓΟΣ C/N</b> |
|--------------------------|------------------|
| Πριονίδι                 | 200-750          |
| Φύλλα από δέντρα         | 40-80            |
| Ξερό γκαζόν              | 20               |
| Φρέσκο γκαζόν            | 15               |
| Φρέσκα υπολείμματα κήπου | 20               |
| Υπολείμματα λαχανικών    | 12               |
| Απορρίμματα κουζίνας     | 15               |
| Χαρτόνι-Εφημερίδες       | 560              |

**Πίνακας 3.3 Αναλογία άνθρακα και αζώτου στα διάφορα οργανικά υλικά**

| <b>Υλικά</b>                                | <b>Αναλογία C/N</b> |
|---|---------------------|
| Ούρα ζώων (αγελάδες, πρόβατα)               | 0,8                 |
| Αίμα ζώων σε σκόνη                          | 3                   |
| Μαύρος χούμος                               | 10                  |
| Κοπριά (αγελάδες, πρόβατα) χωνεμένη 8 μηνών | 10                  |
| Κοπριά χωνεμένη χωρίς χώμα 4 μηνών          | 15                  |
| Κομένη χλόη (γκαζόν)                        | 12                  |
| Διάφορα πράσινα μέρη φυτών                  | 7                   |

|  |        |
|--|--------|
| Άχυρο οσπρίων                          | 15     |
| Ψυχανθές άλφα-άλφα                     | 16-20  |
| Οικιακά υπολείμματα                    | 20     |
| Υπολείμματα φυτού πατάτας              | 25     |
| Φύλλα πεύκων                           | 30     |
| Φρέσκια κοπριά αγελάδων με πολλά άχυρα | 30     |
| Φρέσκια κοπριά αγελάδων με λίγα άχυρα  | 20     |
| Φύλλα οπωροφόρων δένδρων               | 50     |
| Ανοιχτόχρωμη τύρφη                     | 50     |
| Άχυρα βρώμης                           | 50     |
| Άχυρα σίκαλης                          | 65     |
| Άχυρα σιταριού                         | 125    |
| Άχυρα δημητριακών (γενικά)             | 50-150 |
| Φρέσκο πριονίδι                        | 208    |
| Χωνεμένο πριονίδι                      | 511    |

### iii. Το ποσοστό υγρασίας

Η υγρασία είναι μία από τις μεταβλητές της κομποστοποίησης που επηρεάζουν τις μικροβιακές δραστηριότητες. Παρέχει ένα μέσο για τη μεταφορά των διαλυμένων θρεπτικών συστατικών που απαιτούνται για τις μεταβολικές και φυσιολογικές δραστηριότητες των μικροοργανισμών. Είναι απαραίτητη για τη διαδικασία της αποσύνθεσης, καθώς το μεγαλύτερο μέρος της αποσύνθεσης συμβαίνει στο λεπτό υγρό υμένιο (φίλμ) στις επιφάνειες των σωματιδίων. Η περιεκτικότητα σε υγρασία 60-70% θεωρείται ιδανική για την έναρξη της κομποστοποίησης. Σε μεταγενέστερα στάδια της αποσύνθεσης, η ιδανική περιεκτικότητα σε υγρασία μπορεί να είναι 50-

60%. Η διαχείριση της υγρασίας απαιτεί μια ισορροπία μεταξύ της μικροβιακής δραστηριότητας και την παροχής οξυγόνου. Πολύ χαμηλή (<30%) ή υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία (> 75%) αναστέλλει τις μικροβιακές δραστηριότητες λόγω της πρόωρης αφυδάτωση ή αναερόβιωσης (Bertoldi et al., 1983; Tiquia et al., 1996, 2002a). Η αυξημένη υγρασία θα καλύψει πολλούς από τους πόρους μεταξύ των σωματιδίων με νερό, περιορίζοντας έτσι τη μεταφορά οξυγόνου. Αυτό με τη σειρά του θα δημιουργήσει αναερόβιες συνθήκες και θα οδηγήσει σε σήψη, με αποτέλεσμα δυσάρεστες οσμές και ανεπιθύμητα προϊόντα. Από την άλλη πλευρά, εάν στο υπόστρωμα κομποστοποίησης παρέχεται ανεπαρκής ποσότητα νερού, η ανάπτυξη και ο πολλαπλασιασμός των μικροοργανισμών καθώς και το ποσοστό της αποσύνθεσης των οργανικών υλικών θα επιβραδυνθεί ή μπορεί ακόμα και να σταματήσει. Είναι σημαντικό, επομένως, να εξασφαλιστεί επαρκής υγρασία σε κάθε στρώμα του σωρού κομποστοποίησης.

#### **iv. Η συγκέντρωση O<sub>2</sub>**

Τα βιοαποδομήσιμα μέρη του υλικού προς κομποστοποίηση μεταβολίζονται σε μεγαλύτερο ποσοστό στα αρχικά στάδια της κομποστοποίησης. Κατά συνέπεια, η απελευθέρωση θερμότητας και οι απαιτήσεις σε οξυγόνο είναι μεγαλύτερες στα πρώτα στάδια της διεργασίας, ενώ μειώνονται σταθερά στα επόμενα στάδια. Στην περίπτωση που δεν πραγματοποιείται συνεχής παροχή οξυγόνου, τότε η διεργασία επιβραδύνεται. Για το λόγο αυτό απαιτείται παροχή οξυγόνου, μέσα στους πόρους του υλικού, μεγαλύτερη του 5%. Γενικά, όταν η παροχή του οξυγόνου δεν είναι ικανοποιητική τότε η διεργασία γίνεται αναερόβια. Σε αυτή την περίπτωση έχουμε μικρότερη παραγωγή θερμότητας και δημιουργία μη επιθυμητών χημικών, όπως μεθάνιο, οργανικά οξέα και υδρόθειο, που απελευθερώνουν δυσάρεστες οσμές και είναι μη ασφαλή.

#### **v. Η θερμοκρασία**

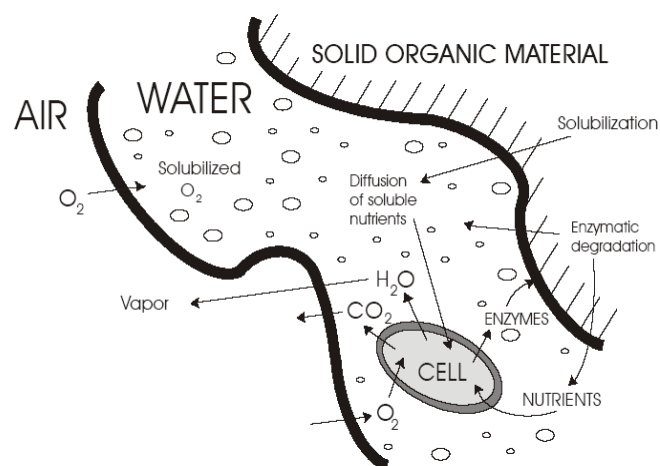
Η κομποστοποίηση λαμβάνει χώρα σε δύο περιοχές θερμοκρασιών γνωστές ως μεσόφιλη (10-40°C) και θερμόφιλη (>40°C) περιοχή. Αρχικά, με την έναρξη της διεργασίας της κομποστοποίησης η αποδόμηση των οργανικών υλικών από τους μικροοργανισμούς αυξάνει τη θερμοκρασία. Στη συνέχεια, η αύξηση της θερμοκρασίας συμβάλει στην αύξηση της μικροβιακής δραστηριότητας, που με τη σειρά της συμβάλει στην παραγωγή θερμότητας και στην περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας. Όταν η θερμοκρασία γίνει μεγαλύτερη των 45-50°C, τότε η δραστηριότητα των μικροοργανισμών επιβραδύνεται και παύει για θερμοκρασίες άνω των 70°C. Στις θερμοκρασίες της θερμόφιλης περιοχής λαμβάνει χώρα η καταστροφή παθογόνων μικροοργανισμών για τον άνθρωπο, τα ζώα και τα φυτά. Γενικά, είναι αποδεκτό ότι για θερμοκρασίες μεταξύ 43 και 65°C επιτυγχάνεται

αποδοτική κομποστοποίηση με παράλληλη αποστείρωση όλων των παθογόνων μικροοργανισμών.

Η παρακολούθηση της θερμοκρασίας πρέπει να είναι συνεχής και ενδείκνυται η χρήση διάταξης συνεχούς ελέγχου της θερμοκρασίας με ανιχνευτές. Καθορίζεται έτσι μία ανώτερη τιμή θερμοκρασίας, σύμφωνα με την οποία ρυθμίζεται η διάρκεια του αερισμού, ώστε να επιτυγχάνεται η απαγωγή θερμότητας που οφείλεται στη βιολογική δραστηριότητα.

#### vi. Ο αερισμός

Ο αερισμός είναι η διεργασία, η οποία παρέχει στο υλικό της κομποστοποίησης το απαιτούμενο οξυγόνο, ενώ παράλληλα απομακρύνει τους παραγόμενους υδρατμούς, αέρια και θερμοκρασία, που είναι παγιδευμένα στο υλικό. Ρόλος του αερισμού, πέρα από την οξυγόνωση του υλικού, είναι και η διατήρηση της θερμοκρασίας του υλικού σε ευνοϊκά για την κομποστοποίηση επίπεδα. Η ποσότητα του αέρα που απαιτείται για την ψύξη του υλικού είναι περίπου δέκα φορές μεγαλύτερη από αυτή που απαιτείται για οξυγόνωση. Ο ψυχρός αέρας εισερχόμενος μέσα από το υλικό θερμαίνεται αυξάνοντας το σημείο κορεσμού του σε υδρατμούς. Κατ' αυτό τον τρόπο η υγρασία του κομποστ ελαττώνεται επιτυγχάνοντας «βιολογική» ξήρανση των αποβλήτων και μετασχηματισμό αυτών σε πιο σταθερές μορφές. Σε απλούστερα συστήματα κομποστοποίησης ο αερισμός πραγματοποιείται με «γυρίσματα» (ανάδευση) του σωρού προς κομποστοποίηση. Η συχνότητα των αναδεύσεων εξαρτάται από το υλικό κομποστοποίησης και το στάδιο στο οποίο βρίσκεται κάθε στιγμή η διεργασία.



Εικόνα 3.2 Το μικροβιακό κύτταρο σε περιβάλλον με κόμποστ



## vii. Το pH

Η διεργασία της κομποστοποίησης είναι δυνατό να λάβει χώρα σε ένα ευρύ φάσμα τιμών του pH. Ωστόσο, εύρος τιμών του pH μεταξύ 6.5 και 8 θεωρείται προτιμότερο για βέλτιστη και ταχεία κομποστοποίηση. Παραταύτα, η κομποστοποίηση μπορεί να δουλέψει και για τις ακραίες τιμές του pH 5.5 και 9 με μικρότερο ρυθμό βιοαποδόμησης. Τιμή του pH πάνω από 8.5 ενθαρρύνει την μετατροπή των αζωτούχων ενώσεων σε αμμωνία, που συμβάλλει στην αύξηση της αλκαλικότητας. Ανεξάρτητα από το αρχικό pH του οργανικού κλάσματος της κομποστοποίησης το τελικό προϊόν αποκτά σταθερή τιμή pH κοντά στο 7. Το εύρος των τιμών pH, κατάλληλο για την ανάπτυξη βακτηρίων είναι 6,0 - 7,5, ενώ οι μύκητες προτιμούν το περιβάλλον στην περιοχή του pH 5,5 με 8,0 (Karpetanios et al. 1993, Ζορπάς et al, 2003. Οι Nakasaki et al. (1993) εξέτασαν την εξάρτηση από το pH των οργανισμών που δραστηριοποιούνται στην διαδικασία της κομποστοποίησης και βρήκαν το εύρος pH του 7-8 να είναι η βέλτιστο, ενώ σύμφωνα με Bharadwaj (1995) η βέλτιστη τιμή pH για τους περισσότερους μικροοργανισμούς είναι μεταξύ 6,5 και 7,5. Μια αρχική φάση κομποστοποίησης, χαρακτηριζόμενη από χαμηλό pH, παρατηρείται συχνά κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης των οργανικών αποβλήτων και ίσως ιδιαίτερα εύκολα κατά την αποικοδομήσιμη πλούσιων σε ενεργειακά αποθέματα υλικών, όπως το οικοκυρικά απόβλητα (Poincelot, 1974, Haug, 1993, Nakaskai et al, 1993, Kirchmann & Widen, 1994). Αυτό οφείλεται στο σχηματισμό του διοξειδίου του άνθρακα και των πτητικών λιπαρών οξέων. Με την μετέπειτα εξέλιξη των εκπομπών CO<sub>2</sub> και αξιοποίηση των ΠΛΟ (πτητικών λιπαρών οξέων), το pH αρχίζει να αυξάνεται και μπορεί να φτάσει ακόμη και τις τιμές που υπερβαίνουν το 8,0 (Sharma et al. 1997). Τα οργανικά οξέα παράγονται κατά τη διάσπαση της οργανικής ύλης, αλλά η ύπαρξή τους είναι παροδική. Ωστόσο, η αύξηση του pH πέρα από 7,5 θα μπορούσε να κάνει το περιβάλλον αλκαλικό και θα μπορούσε να προκαλέσει απώλεια του αζώτου, όπως αμμωνία. Η αύξηση των ενεργών μικροοργανισμών αναστέλλεται από τη θερμοκρασία πάνω από περίπου 40°C, εάν μικρής αλυσίδας λιπαρά οξέα και χαμηλό pH είναι παρόντα (Smars et al., 2002). Η μικροβιακή αντοχή στη θερμοφιλο θερμοκρασία μειώνεται με το συνδυασμό χαμηλού pH και αύξησης της συγκέντρωσης των λιπαρών οξέων. Σε μελέτες που πραγματοποιούνται από τους Beck-Friis et al (2001), διαπιστώθηκε ότι υπήρχε μια πρωταρχική μείωση του pH και αύξηση των συγκεντρώσεων της μικρής αλύσου λιπαρών οξέων, ιδιαίτερα γαλακτικού οξέος, κατά την έναρξη της διαδικασίας. Αυτά τα οξέα μπορεί παράγονται ως αποτέλεσμα της αποικοδόμησης των πιο εύκολα αποικοδομήσιμων θρεπτικών συστατικών, όπως σάκχαρα, άμυλο, και λίπη. Επιπλέον, έχει αποδειχθεί ότι η διαδικασία της αποικοδόμησης μπορεί να ενισχυθεί από τον έλεγχο του pH (Nakasaki et al, 1993, 1996, Smars et al, 2002).

### viii. Η κοκκομετρία των πρώτων υλών

Το μέγεθος των οργανικών υλικών: όταν τα οργανικά υλικά που πρόκειται να κομποστοποιηθούν είναι τεμαχισμένα σε μικρότερα κομμάτια τότε προσφέρεται μεγαλύτερη επιφάνεια στους μικροοργανισμούς να δράσουν και επίσης το οξυγόνο διαχέεται ευκολότερα σε όλη τη μάζα της οργανικής ύλης. Έτσι ευνοείται η αποσύνθεση και αποφεύγεται η ανάπτυξη αναερόβιων συνθηκών. Φυσικά το μέγεθος των υλικών δεν μπορεί να είναι πολύ μικρό, γιατί τότε είναι εξαιρετικά δύσκολο να έχει το σύστημα το απαραίτητο πορώδες. Το μέγεθος για κάθε υλικό εξαρτάται από την ικανότητά του να αποσυντίθεται. Για το μεγαλύτερο μέρος των λαχανικών και φρούτων το κατάλληλο μέγεθος ξεκινά από 2in (50mm) και ανάλογα με την ικανότητα αποσύνθεσης φτάνει μέχρι 6in (0,15m) ή και μεγαλύτερο (L.Diaz et al. 1993).

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη είναι η παρουσία τοξικών ουσιών (τοξικά – βαρέα μέταλλα) οι οποίες επηρεάζουν αρνητικά τόσο τις διεργασίες κομποστοποίησης όσο και την ποιότητα του παραγόμενου προϊόντος.

#### 3.4.2. Βιοτικοί Παράγοντες

Η κομποστοποίηση περιλαμβάνει μυριάδα μικροοργανισμών. Η σύνθεση και το μέγεθος των μικροοργανισμών αυτών είναι σημαντικές συνιστώσες της διαδικασίας της κομποστοποίησης. Τα μικρόβια αποσυνθέτουν την οργανική ύλη, και μετατρέπουν το στοιχείο του αζώτου μέσω της οξείδωσης, νιτροποίησης και απονιτροποίησης (Golueke, 1992, Tiquia και Tam, 2000a). Κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης, μπορεί να εξαντληθούν τα θρεπτικά συστατικά, εάν τα μικρόβια ενσωματώνουν ορυκτά από τα απόβλητα σε βιομάζα (Golueke, 1992). Ωστόσο, η κομποστοποίηση μπορεί να περιλαμβάνει τη διαδοχική αύξηση και υποβάθμιση των υποπληθυσμών. Ως εκ τούτου, μπορεί να μην υπάρξει κάποια σημαντική μεταβολή στο συνολικό επίπεδο των μικροοργανισμών ή ανόργανων θρεπτικών απαιτήσεων (Tiquiaetal.,2002α). Τα μικρόβια δεν μπορεί να μεταβολίσουν άμεσα τα αδιάλυτα μόρια της οργανικής ύλης. Όλες οι βιοχημικές αντιδράσεις κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης καταλύονται από τα ένζυμα (Ayuso et al, 1996, Garcia et al, 1992a, Godden et al, 1983, Vuorinen, 1999, 2000).

**Πίνακας 3.4 Οι σημαντικότεροι μύκητες, ακτινομύκητες και βακτήρια που εμφανίζονται στο κόμποστ.**

| Fungus                         | Actinomycete                  | Other bacteria                      |
|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| <i>Aspergillus fumigatus</i>   | <i>Nocardia</i> spp.          | <i>Bacillus</i> spp.                |
| <i>Chaetomium globosum</i>     | <i>Streptomyces</i> spp.      | <i>Flavobacterium</i> spp.          |
| <i>Chaetomium thermophilum</i> | <i>Thermoactinomyces</i> spp. | <i>Hydrogenobacter</i> spp.         |
| <i>Coprinus</i> spp.           | <i>Thermomonospora</i> spp.   | <i>Methylobacterium exotorquens</i> |
| <i>Fusarium</i> spp.           |                               | <i>Propionibacterium</i> spp.       |
| <i>Penicillium</i> spp.        |                               | <i>Pseudomonas</i> spp.             |
| <i>Thermoascus aurantiacus</i> |                               | <i>Serratia</i> spp.                |
| <i>Thermomyces lanuginosus</i> |                               | <i>Thermus</i> spp.                 |
| <i>Trichoderma viride</i>      |                               | <i>Xanthomonas maltophilia</i>      |

### i. Βακτήρια (bacteria)

Τα βακτήρια είναι οι μικρότεροι ζωντανοί οργανισμοί και οι περισσότεροι σε αριθμό στο κόμποστ, αποτελούν τα 80-90% των δισεκατομμυρίων των μικροοργανισμών που υπάρχουν σε ένα γραμμάριο κόμποστ.

Τα βακτήρια είναι μονοκύτταροι οργανισμοί, έχουν μέγεθος 0,5-5μm μήκος και 0,3-1,5 μm πλάτος. Τα συνήθη σχήματα τους είναι το σφαιρικό (κόκκοι), το κυλινδρικό (βάκιλοι) και το σπειροειδές (σπείρες), ενώ συνήθως τα κύτταρά τους διατάσσονται σε ζεύγη, συσσωματώματα ή αλυσίδες. Ο μέσος μοριακός τους τύπος είναι  $C_5H_7O_2NP_{0.2}$ .

Αναπαράγονται με τη μέθοδο της διχοτόμησης και έχουν κινητικότητα (όχι όλοι οι τύποι). Το πυρηνικό υλικό κατά τη διαδικασία της αναπαραγωγής διαμοιράζεται σε δύο νέα κύτταρα. Ο χρόνος διπλασιασμού τους είναι 20-30min.

Σε όλα τα βακτήρια υπάρχει:

- Ένα στερεό κύτταρο τοίχωμα το οποίο χρησιμεύει για τη διατήρηση του σχήματος του κυττάρου και ταυτόχρονα προστατεύει το περιεχόμενο από την οσμωτική πίεση. Μερικά βακτήρια καλύπτονται από ένα στρώμα μιας κολλώδους ουσίας, που ονομάζεται έλυτρο.
- Αμέσως μετά το κυτταρικό τοίχωμα, υπάρχει η κυτταροπλασματική μεμβράνη. Ο ρόλος της είναι να παρέχει ένα ημιπερατό φράγμα, διαχωρίζοντας έτσι το πρωτόπλασμα από το εξωτερικό περιβάλλον και επιτρέποντας ταυτόχρονα την είσοδο των θρεπτικών ουσιών μέσα στο κύτταρο και την έξοδο των αποβλήτων.
- Το πρωτόπλασμα ή διαφορετικά το εσωτερικό τμήμα του κυττάρου, χωρίζεται σε τρεις διαφορετικές περιοχές, το κυτταρόπλασμα, τον πυρήνα και τα πολυριβωσώματα. Τα τελευταία παράγουν πολύπλοκα ένζυμα,

εξαιρετικά εξειδικευμένα για κάθε βιοχημική αντίδραση που συντελείται μέσα στο βακτήριο. Το κυτταρόπλασμα περιέχει το RNA, ενώ η πυρηνική περιοχή το DNA, το οποίο όμως στα προκαρυωτικά κύτταρα διαχέεται σε ολόκληρο το εσωτερικό του κυττάρου.

Σε συνθήκες περιβάλλοντος που δεν ευνοούν την ανάπτυξη των βακτηρίων τότε αυτά παράγουν σπόρους οι οποίοι είναι πολύ ανθεκτικοί σε ακραίες συνθήκες (θερμοκρασίας, pH κ.α.) και οι οποίοι αναπτύσσονται σε κανονικά κύτταρα όταν οι συνθήκες το επιτρέψουν.

Τα βακτήρια που λαμβάνουν την ενέργεια και τον άνθρακα που χρειάζονται από ένα οργανικό συστατικό ή υλικό ονομάζονται ετερότροφα. Τα βακτήρια που χρησιμοποιούν διοξείδιο του άνθρακα ως πηγή άνθρακα και λαμβάνουν την απαιτούμενη ενέργεια από το ηλιακό φως ή από την οξείδωση ανόργανου υλικού ονομάζονται αυτότροφα.

### ***Ρόλος των βακτηρίων στο κόμποστ***

Τα βακτήρια συνδέονται με την αποσύνθεση του μεγαλύτερου μέρους της άμεσα αποικοδομήσιμης οργανικής ύλης και με την παραγωγή θερμότητας στο κόμποστ. Τα περισσότερα βακτήρια στο κόμποστ είναι ετερότροφα. Κάποια απ' αυτά είναι τόσο προσαρμόσιμα που μπορούν να χρησιμοποιήσουν πάνω από εκατό διαφορετικές οργανικές ουσίες σαν πηγή άνθρακα, κι' αυτό γιατί έχουν την ικανότητα να παράγουν μεγάλη ποικιλία ενζύμων.

### **Θερμοκρασία, pH, υγρασία, O<sub>2</sub>**

Το θερμοκρασιακό εύρος που αναπτύσσονται τα βακτήρια είναι :

- Ψυχρόφιλα, η βέλτιστη θερμοκρασία είναι περίπου 13°C, μπορούν όμως να αναπτυχθούν μέχρι τους 0°C και κάποιες φορές μέχρι και -10°C.
- Μεσόφιλα, ευδοκιμούν στο θερμοκρασιακό εύρος 20°C έως 45°C, αλλά επιβιώνουν και σε μικρότερες ή μεγαλύτερες θερμοκρασίες (5-20°C και 30-45°C).
- Θερμόφιλα, εργάζονται γρήγορα στο βέλτιστο θερμοκρασιακό εύρος 40-70°C. Ωστόσο εμφανίζονται και θερμόφιλα βακτήρια που αναπτύσσονται και σε θερμοκρασίες 99°C.

Το εύρος pH το οποίο αναπτύσσονται τα περισσότερα βακτήρια είναι 4,0-10,0. οι μεταβολικές λειτουργίες του βακτηρίου μπορούν να προκαλέσουν αλλαγές στο pH. Το περιβάλλον πρέπει να έχει την ικανότητα ρύθμισης, έτσι ώστε να εξουδετερώνονται αυτές οι αλλαγές.

Όλα τα βακτήρια χρειάζονται υγρασία, επειδή όλα τα θρεπτικά συστατικά πρέπει να είναι διαλυμένα για να μπορούν να διαπερνούν την κυτταρική μεμβράνη.

Τα βακτήρια που αναπτύσσονται στο κόμποστ είναι αερόβια. Σε συνθήκες όμως περιορισμένου οξυγόνου και υψηλής υγρασίας εμφανίζονται αναερόβια βακτήρια, τα οποία δουλεύουν σε πιο αργούς ρυθμούς. [Ρήγας, 2004] [Βλυσίδης, 2005] [Μακρή, Κέκου, 2001].

## **ii. Μύκητες (fungi)**

Οι μύκητες αριθμούν μεταξύ 0,01 και 1 εκατομμύριο ανά γραμμάριο απορριμμάτων.

Οι μύκητες αποτελούν μη φωτοσυνθετικούς ευκαριωτικούς οργανισμούς. Διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες : σε μούχλες (molds), που είναι νηματοειδείς, σε ζύμες (yeasts), που είναι μη νηματοειδείς μύκητες και σε μανιτάρια (mushrooms) που είναι μακροσκοπικοί μύκητες. Οι μύκητες είναι τυπικά σαπροφυτικοί, δηλ. τρέφονται διασπώντας νεκρή οργανική ύλη. Έχουν μέγεθος 5μm ή μεγαλύτερο. Έχουν μοριακό τύπο  $C_{10}H_{17}O_6N$  και πολλαπλασιάζονται με σπόρια.

### ***Ρόλος των μυκήτων στο κόμποστ***

Στο κόμποστ οι μύκητες είναι σημαντικοί, γιατί αποσυνθέτουν ουσίες δύσκολα αποδομήσιμες, όπως η κυτταρίνη, και έτσι επιτρέπουν στα βακτήρια να συνεχίσουν τη διαδικασία της αποικοδόμησης. Μπορούν να «επιτεθούν» σε οργανικά απορρίμματα που είναι σχετικά ξηρά, όξινα ή με χαμηλή συγκέντρωση αζώτου και τα βακτήρια δεν μπορούν να τα αποσυνθέσουν.

### ***Θερμοκρασία, pH, υγρασία, O<sub>2</sub>***

Η ενδεδειγμένη θερμοκρασία για τη δράση των μυκήτων στο σωρό του κόμποστ είναι περίπου 20-25°C, αν και υπάρχουν θερμόφιλες μορφές μυκήτων που προτιμούν μεγαλύτερες θερμοκρασίες και επιζούν και σε 50°C. Ωστόσο η πλειοψηφία των μυκήτων παραμένει στο εξωτερικό στρώμα του κόμποστ όταν η θερμοκρασία στο εσωτερικό είναι υψηλή.

Οι μύκητες είναι αερόβιοι και αναπτύσσονται σε περιβάλλον με λίγη υγρασία και χαμηλό pH (3-8,5) σε σχέση με άλλες κατηγορίες μικροοργανισμών (Λοϊζίδου, 2007), (Ρήγας, 2004), (Βλυσίδης, 2005), (Μακρή, Κέκου, 2001).



Εικόνα 3.3 Μύκητες στο χώμα



Εικόνα 3.4 Πλέγμα μυκήτων στο κόμποστ

### iii. Ακτινομύκητες (actinomycetes)

Οι ακτινομύκητες είναι περίπου το 5% ή και παραπάνω του βακτηριακού πληθυσμού των απορριμμάτων.

Αν και οπτικά οι ακτινομύκητες μοιάζουν στους μύκητες είναι νηματοειδή βακτήρια. Όπως τα βακτήρια, δεν έχουν πυρήνα, αλλά αναπτύσσουν πολυκύτταρα νημάτια όπως οι μύκητες. Σχηματίζουν μακριά, διακλαδωμένα νημάτια και μερικές φορές εμφανίζονται σε κυκλικές αποικίες. Διακλαδωμένες μορφές ακτινομυκητών βλέπουμε συνήθως στο τέλος της διαδικασίας της κομποστοποίησης, στο εξωτερικό στρώμα, 10-15cm, του σωρού. Η πλειοψηφία είναι αερόβιοι.

#### Ρόλος των ακτινομυκητών στο κόμποστ

Κατά τη διαδικασία της κομποστοποίησης είναι κατάλληλα για την αποικοδόμηση σύνθετων οργανικών υλών όπως κυτταρίνη, λιγνίνη, χιτίνη και πρωτεΐνες. Τα ένζυμα που διαθέτουν τους επιτρέπουν να αποσυνθέτουν ξύλινα κλαδιά, φλοιούς και εφημερίδες (Μ. Λοϊζίδου, 2007), (Α. Ζορπάς 1999).

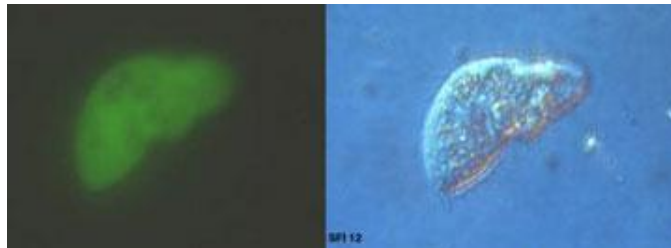
### iv. Πρωτόζωα (protozoa)

Ένα γραμμάριο απορριμμάτων μπορεί να περιέχει 1 εκατομμύριο πρωτόζωα, αλλά ένα γραμμάριο κόμποστ έχει πολλές εκατοντάδες λιγότερα.

Τα πρωτόζωα είναι μονοκύτταροι οργανισμοί και κατά μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερα από τα βακτήρια. Τα περισσότερα δεν είναι φωτοσυνθετικά και πολλαπλασιάζονται με διχοτόμηση. Τα περισσότερα είδη είναι αυτοκινούμενα και η διάκρισή τους βασίζεται στα μέσα που χρησιμοποιούν για την μετακίνησή τους (Ψευδόποδα, Μαστιγοφόρα, Βλεφαριδοφόρα, Παρασιτικά πρωτόζωα). Ο μέσος μοριακός τους τύπος είναι  $C_7H_{14}O_3N$ .

### **Ρόλος των πρωτόζωων στο κόμποστ**

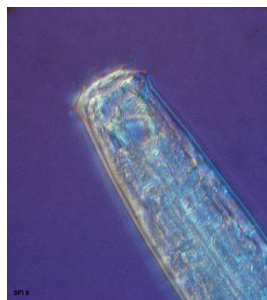
Τα πρωτόζωα προσλαμβάνουν τροφή από οργανική ύλη όπως τα βακτήρια, αλλά επειδή είναι σε πολύ μικρότερο ποσοστό στο κόμποστ από τα βακτήρια, συνεισφέρουν πολύ λιγότερο στη διαδικασία της κομποστοποίησης.



**Εικόνα 3.5 Πρωτόζωα που τρώνε βακτήρια**

#### **v. Νηματόζωα (nematodes)**

Τα νηματόζωα είναι τα περισσότερα στο κόμποστ από την κατηγορία των φυσικών αποδομητών. Είναι κυλινδρικά και μικρότερα από 1mm στο μήκος. Κάποια είδη ψάχνουν τροφή στα αλλοιωμένα, σάπια απόβλητα, άλλα τρέφονται με βακτήρια, μύκητες, πρωτόζωα και άλλα νηματόζωα και κάποια ρουφούν τους χυμούς από τις ρίζες των φυτών. Αν και υπάρχουν επιβλαβή είδη αυτής της κατηγορίας, τα περισσότερα απ' αυτά που βρίσκουμε στα απόβλητα και το κόμποστ είναι ωφέλιμα. (A. Ζορμπάς 1999).



**Εικόνα 3.6 Νηματόζων**

### **3.5. Κινητική μικροβιακής ανάπτυξης**

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

Τα στάδια από τα οποία περνά η κυτταρική ανάπτυξη είναι τα ακόλουθα:

- **Λανθάνουσα φάση**

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

- **Εκθετική φάση**

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

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

N: αριθμός κυττάρων

μ: ειδικός ρυθμός ανάπτυξης ( $h^{-1}$ )

Αλλιώς μπορεί να γραφεί αυτή η σχέση :

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

$N_0$ : αρχικός αριθμός κυττάρων

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

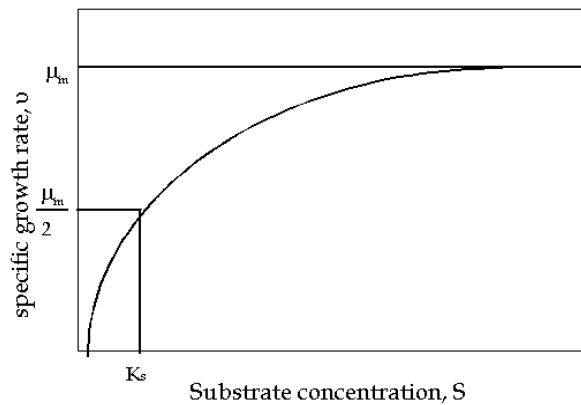
$$\mu = \mu(S)$$

Ο Monod πρότεινε τη σχέση:

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

η οποία παριστάνεται γραφικά στο Σχήμα 3.5 :





Σχήμα 3.5 Γραφική παράσταση της σχέσης Monod

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

- **Φάση στασιμότητας**

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

- **Φάση θανάτου**

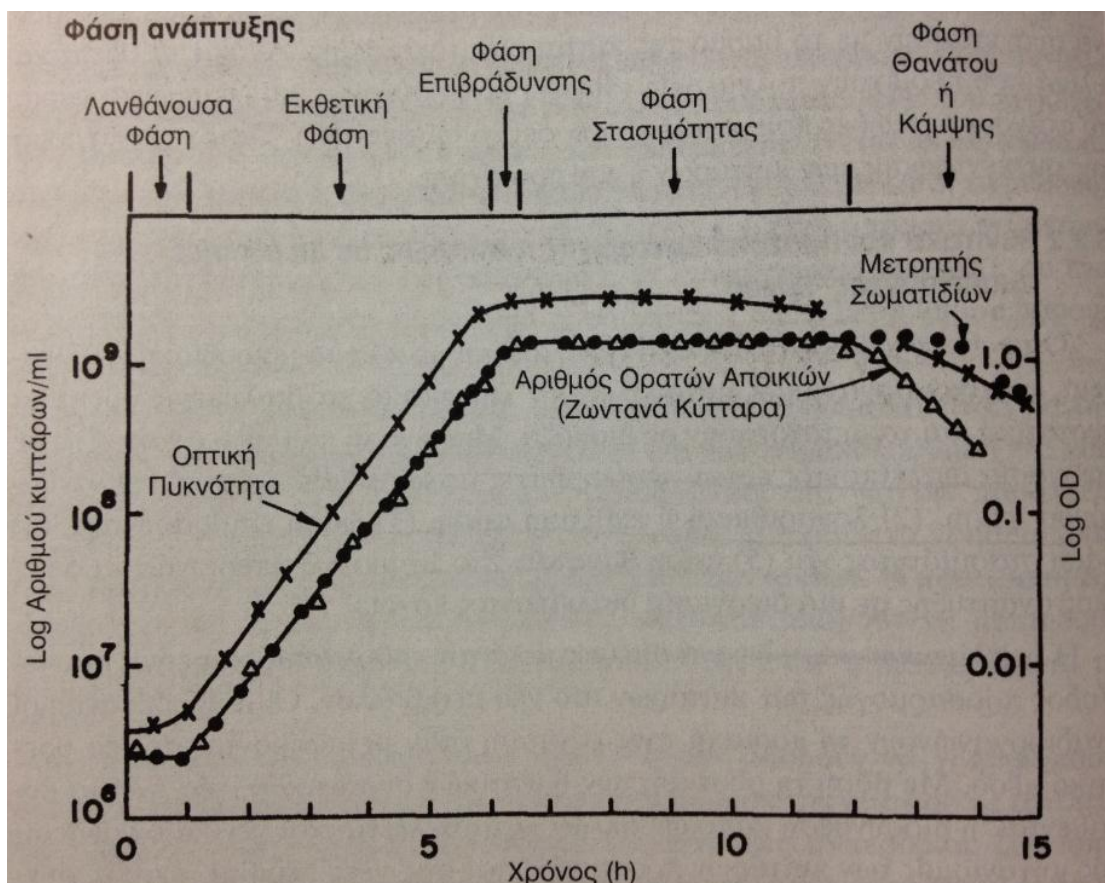
Στη φάση αυτή κυριαρχεί το φαινόμενο του θανάτου των κυττάρων και περιγράφεται από τη σχέση: (Μακρής, Κέκος, 2001)

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

$N$ : αριθμός ζώντων κυττάρων

$N_s$ : αριθμός κυττάρων στη φάση στασιμότητας

$K$ : ειδικός ρυθμός θανάτου ( $h^{-1}$ )



Σχήμα 3.6 Γραφική απεικόνιση της μικροβιακής ανάπτυξης (Κέκος, 2001)

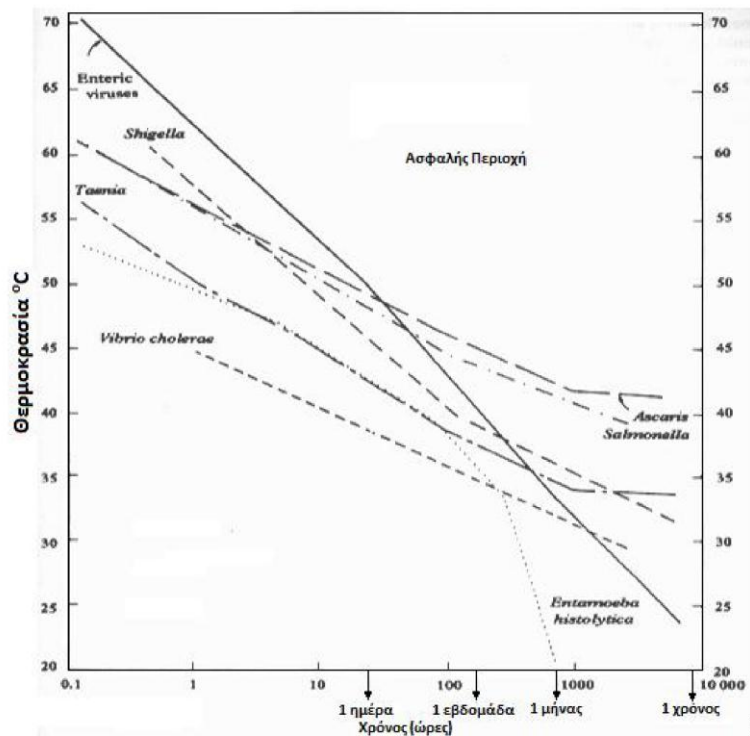
### 3.6. Σταθεροποίηση Οργανικής Ύλης

Η σημαντικότερη παράμετρος για την σταθεροποίηση του κομπόστ ως τελικό προϊόν είναι ο βαθμός σταθεροποίησης ή ωρίμανσής του. Οι σημαντικότεροι παράμετροι, που έχουν χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό του βαθμού ωρίμανσης του τελικού προϊόντος της κομποστοποίησης, είναι η θερμοκρασία του υλικού, η περιεχόμενη οργανική ύλη, η υγρασία του υλικού, ο ρυθμός κατανάλωσης οξυγόνου και η αναλογία  $\text{NH}_3/\text{NO}_3$ . Επιπλέον, σημαντική είναι η υγειονομοποίηση του υλικού προκειμένου να καταστεί πλήρως σταθεροποιημένο και εμπορεύσιμο.

#### 3.6.1. Θερμοκρασία

Σημαντική ένδειξη σταθεροποίησης του τελικού προϊόντος κομποστοποίησης είναι η πτώση της θερμοκρασίας στη μάζα του υλικού σε επίπεδα όμοια με αυτά του περιβάλλοντος. Η ένδειξη αυτή είναι αξιόπιστη όταν δεν οφείλεται σε άλλους παράγοντες, όπως η έλλειψη ή η παρουσία υπερβολικής υγρασίας στη μάζα του κομπόστ, το μικρό πορώδες, η έλλειψη οξυγόνου ή η εξόντωση της βιομάζας από την υπερβολική αύξηση της θερμοκρασίας στα πρώτα στάδια της κομποστοποίησης, που μπορεί να έχει ως συνέπεια την παρεμπόδιση της

μικροβιακής δραστηριότητας και την πτώση της θερμοκρασίας. Όταν οι παράγοντες, που επηρεάζουν την κομποστοποίηση είναι καλώς ρυθμισμένοι τότε η διατήρηση της θερμοκρασίας σε χαμηλά επίπεδα αποτελεί ένδειξη ώριμου τελικού προϊόντος. Αντιθέτως, αύξηση της θερμοκρασίας στο ρυθμισμένο τελικό προϊόν είναι ένδειξη μη σταθεροποιημένου υλικού (S. Gajalakshmi and S. A. Abbasi, 2009).



Διάγραμμα 3.2 Συνθήκες θερμοκρασίας - χρόνου για την αδρανοποίηση των παθογόνων μικροοργανισμών στην ιλύ (Strauch 1998; 1991)

### 3.6.2. Οργανική Ύλη

Το ποσοστό μείωσης της περιεχόμενης οργανικής ύλης στο υλικό κομποστοποίησης αποτελεί ένδειξη του βαθμού σταθεροποίησης. Η περιεχόμενη οργανική ουσία μπορεί να προσδιοριστεί είτε ως προς τα Πτητικά Στερεά (VS), είτε ως προς το Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο, είτε ως προς τον Ολικό Οργανικό Άνθρακα. Η περιεχόμενη οργανική ουσία στο τελικό προϊόν της κομποστοποίησης θα πρέπει να βρίσκεται κάτω του 35% (σε ξηρά βάση), ώστε να εξασφαλίζεται επαρκής ωρίμανση.

### 3.6.3. Ρυθμός Κατανάλωσης Οξυγόνου

Ο ρυθμός κατανάλωσης του οξυγόνου είναι απευθείας ανάλογος με το ρυθμό αποσύνθεσης της οργανικής ύλης. Οι υψηλοί ρυθμοί κατανάλωσης οξυγόνου αποτελούν ένδειξη του υψηλού ρυθμού ανάπτυξης της βιομάζας και κατά συνέπεια ικανή ποσότητα μη σταθεροποιημένης οργανικής ύλης στη μάζα του υλικού της κομποστοποίησης.

#### **3.6.4. Αναλογία $\text{NO}_3/\text{NH}_3$**

Ένδειξη σταθεροποίησης της οργανικής ύλης αποτελεί η μειωμένη παρουσία αμμωνιακών σε συνδυασμό με την αυξημένη παρουσία νιτρικών ενώσεων στα τελευταία στάδια της κομποστοποίησης. Αυτό στηρίζεται στη μετατροπή του οργανικού αζώτου, που περιέχεται στην οργανική ύλη και τη μετατροπή του σε αμμωνία κατά τα αρχικά στάδια της κομποστοποίησης (αμμωνιοποίηση). Στη συνέχεια μέσω της νιτροποίησης πραγματοποιείται μετατροπή των αμμωνιακών ενώσεων σε νιτρικές και νιτρώδεις ενώσεις. Ο λόγος  $\text{NO}_3/\text{NH}_3$  είναι υποχρεωτικά  $>1$ .

#### **3.6.5. Υγειονοποίηση Κομπόστ**

Η υγειονοποίηση του τελικού προϊόντος κομπόστ πραγματοποιείται με διατήρηση της θερμοκρασίας μεταξύ των 60 και 70°C για 3 συνεχόμενες μέρες. Η αυθόρμητη ή μερικώς ελεγχόμενη αποσύνθεση των οργανικών αποβλήτων με στόχο την αγροτική χρήση του παραγόμενου προϊόντος ήταν γνωστή εδώ και αιώνες. Ωστόσο η οργάνωση της διαδικασίας στη μορφή των διαφόρων τεχνολογιών κομποστοποίησης συνέβη τις τελευταίες δεκαετίες, ως αποτέλεσμα της ανάγκης επεξεργασίας πιο απαιτητικών αποβλήτων, όπως τα αστικά απορρίμματα και της αποτελεσματικότερης προστασίας του περιβάλλοντος και της δημόσιας υγείας. Τα συστήματα κομποστοποίησης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε ανοικτά και κλειστά συστήματα. Στα ανοικτά συστήματα η κομποστοποίηση λαμβάνει χώρα στην ύπαιθρο ή σε ημίκλειστα κτίρια. Στα κλειστά συστήματα η κομποστοποίηση λαμβάνει χώρα σε ειδικά σχεδιασμένους βιοαντιδραστήρες ή σε κλειστά κτίρια, από όπου είναι εφικτή η απαγωγή και επεξεργασία του αέρα και των οσμών, οι οποίες αποτελούν σημαντικό πρόβλημα για πολλές μονάδες κομποστοποίησης, ειδικά όταν είναι εγκατεστημένες κοντά σε κατοικημένες περιοχές.

### **3.7. Τεχνολογίες κομποστοποίησης**

Όλες οι γνωστές τεχνολογίες κομποστοποίησης των οργανικών υλικών αποσκοπούν στη δημιουργία του βέλτιστου περιβάλλοντος για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών που είναι υπεύθυνοι για την επιτυχή εφαρμογή της μεθόδου, ενώ η κύρια παράμετρος που επηρεάζεται από την τεχνολογία και με βάση την οποία σχεδιάζονται τα συστήματα είναι η διαθεσιμότητα του οξυγόνου (Γιδαράκος, 2007).

Η αρχική ταξινόμηση των τεχνολογιών βασίζεται στο γεγονός εάν το προς κομποστοποίηση υλικό τοποθετείται σε κλειστό αντιδραστήρα ή όχι. Στη συνέχεια, τα διάφορα συστήματα ταξινομούνται ανάλογα με το είδος του αντιδραστήρα, το μηχανισμό τροφοδοσίας των υλικών, τη διαστρωμάτωση του υλικού στον

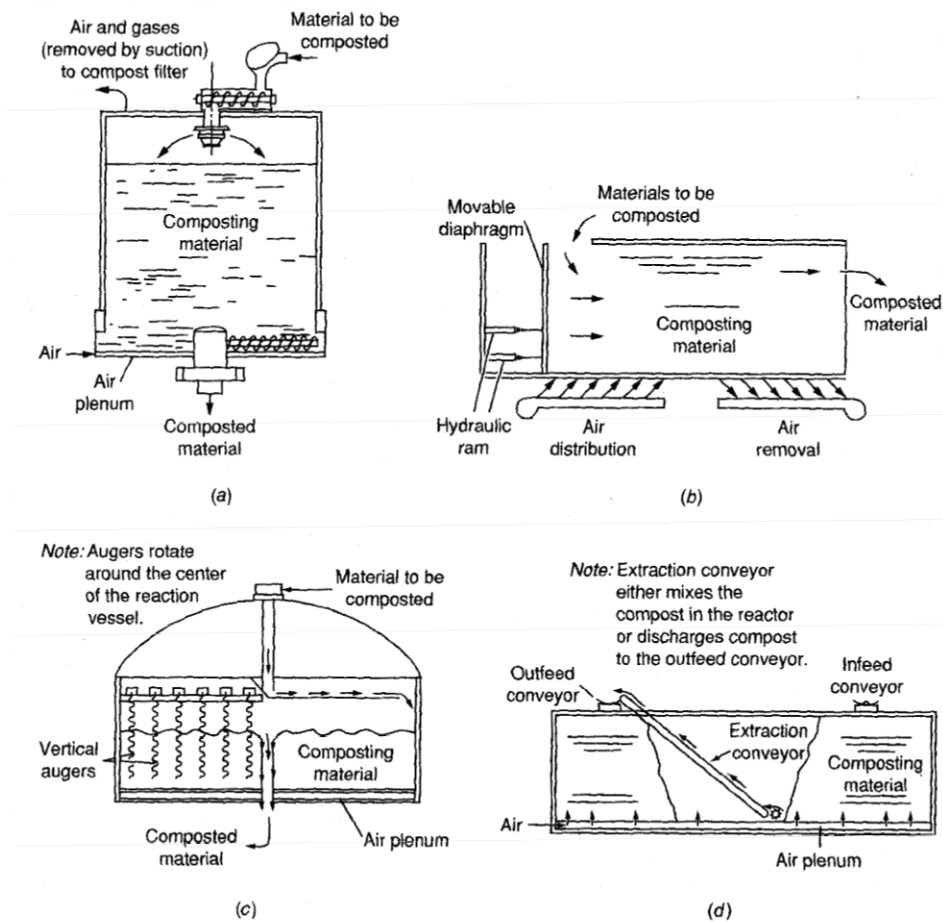
αντιδραστήρα και τη μέθοδο παροχής αέρα. Γενικά, οι εναλλακτικές τεχνολογίες/συστήματα κομποστοποίησης μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής:

### **3.7.1. Κλειστά συστήματα**

Με τα συστήματα αυτά, τα οποία χαρακτηρίζονται συνήθως από δυναμικό αερισμό, με ή χωρίς ανάδευση, επιτυγχάνεται η ταχύτερη βιοχημική σταθεροποίηση του οργανικού υλικού, η καλύτερη ποιότητα των χαρακτηριστικών του, αλλά κυρίως υπάρχει δυνατότητα ελέγχου και επεξεργασίας των οσμών. Η κυριότερη παράμετρος, που επηρεάζει την επιλογή του συστήματος, είναι το κόστος αρχικής επένδυσης και λειτουργίας, σε συνάρτηση με τις απαιτήσεις της νομοθεσίας και τις επικρατούσες συνθήκες στην αγορά του προϊόντος.

#### **Κάθετοι αντιδραστήρες**

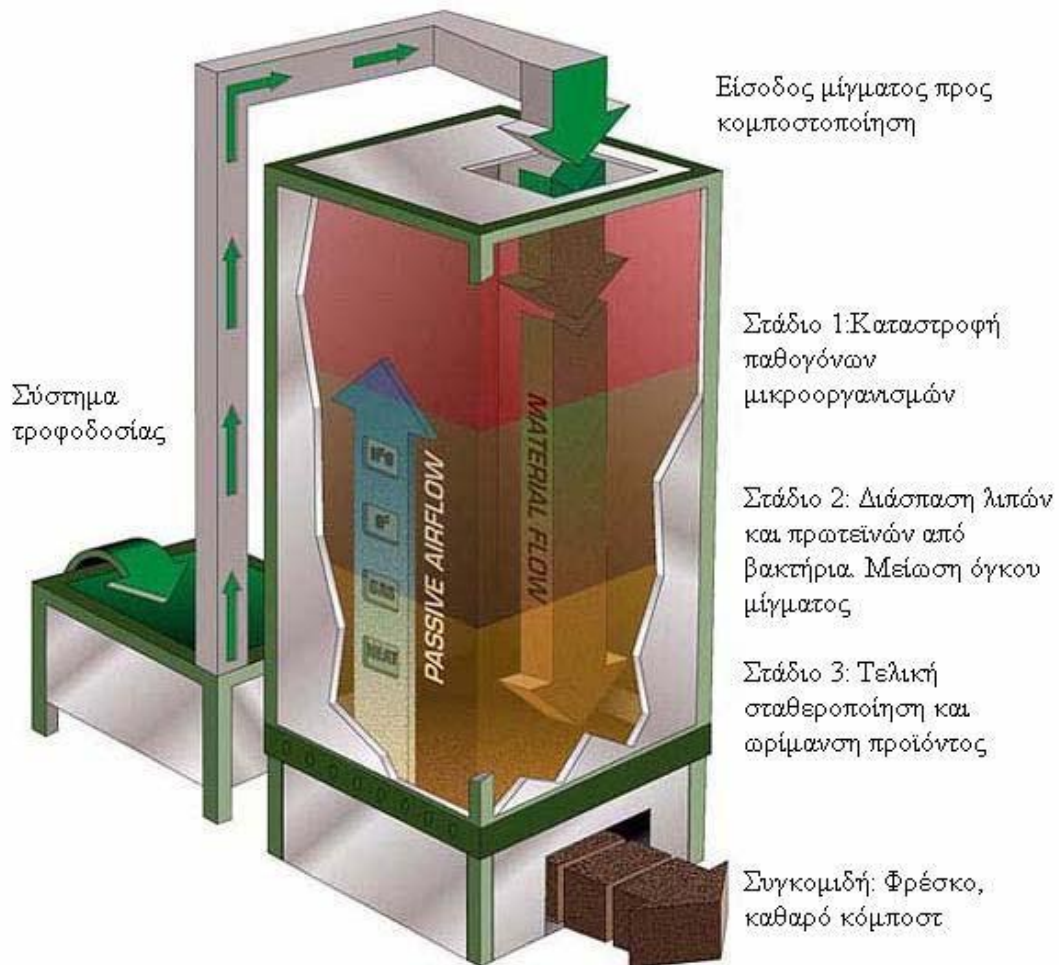
Ένα συνεχές κάθετο σύστημα χωρίς ανάδευση αποτελείται από ένα θερμικά μονωμένο αεροστεγή κλειστό κύλινδρο (ύψους μέχρι 9m). Το υλικό εισάγεται από την κορυφή και κατεβαίνει με τη βαρύτητα σε περίοδο δύο περίπου εβδομάδων. Η μάζα αερίζεται με ρεύμα αέρα από τον πυθμένα προς την κορυφή, με θετική πίεση στον πυθμένα και απορρόφηση στην κορυφή. Δεν υπάρχει μηχανική ανάδευση για να μη διαταραχθούν οι βιολογικές διαδικασίες και η διαδικασία είναι δύσκολο να ελεγχθεί, λόγω αδυναμίας ομοιογενούς κατανομής του οξυγόνου. Το υλικό τροφοδοτείται στην κορυφή του κυλίνδρου με ατέρμονα κοχλία και διασπείρεται με υποκείμενα πτερύγια, που περιστρέφονται και παρέχουν ομοιόμορφη κατανομή (η ταχύτητα περιστροφής είναι ανάλογη με την πλήρωση του αντιδραστήρα). Ο αέρας εισάγεται με ειδικό σύστημα σωληνώσεων υπό σταθερή ροή και πίεση και ελέγχεται η υγρασία του όταν εξέρχεται στην κορυφή, όπου μαζί με το παραγόμενο CO<sub>2</sub> κατά τη βιοαποδόμηση περνούν από φίλτρο απόσμησης (συνήθως βιόφιλτρο) και καταλήγουν στην ατμόσφαιρα. Το έτοιμο υλικό εξέρχεται από το κέντρο του πυθμένα του αντιδραστήρα με ειδική διάταξη κοχλία προσαρμοσμένου σε κεντρικό κύλινδρο περιστρεφόμενο περί άξονα (υδραυλική κίνηση), μέσω του οποίου αδειάζει η δεξαμενή. Ο κοχλίας χρησιμεύει στη μεταφορά του υλικού από την περιφέρεια στο κέντρο, ενώ ο κύλινδρος επιτρέπει τη διαδρομή του σε όλη την επιφάνεια του πυθμένα. Προβλήματα εκκένωσης παρουσιάζονται σε περίπτωση βλάβης των μηχανισμών ή συντήρησης.



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

Ένα κάθετο σύστημα με εσωτερικό αναδευτήρα αποτελείται από μια κυλινδρική κατακόρυφου άξονα δεξαμενή, 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 και περιοδικά 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. Το σύστημα μπορεί να συμπληρωθεί με εγκατάσταση ελεγχόμενης παροχής αέρα, καθώς και από υδραυλική εγκατάσταση ψεκασμού νερού για την προσθήκη υγρασίας. Καλύτερος αερισμός μπορεί να επιτευχθεί με κάθετο ασυνεχή αντιδραστήρα, δηλ. με το υλικό τοποθετημένο σε στρώματα, όχι υψηλότερα από 3m, σε επάλληλα επίπεδα. Ένας τέτοιος αντιδραστήρας αποτελείται από έναν κάθετο κυλινδρικό πύργο, που περιέχει μέχρι έξι επίπεδα. Τα απόβλητα εισάγονται στην κορυφή και παραμένουν εκεί για κάποιο χρονικό διάστημα (π.χ. μια μέρα), κατόπιν διέρχονται από κάθε επίπεδο και εξέρχονται μετά από ολική πορεία μιας ή δύο εβδομάδων. Τα διάφορα επίπεδα μπορούν να ρυθμιστούν, ώστε να δουλεύουν με ανεξάρτητο πρόγραμμα

αερισμού, ανάλογα με τις ανάγκες (οξυγόνωσης, θερμοκρασίας, υγρασίας, κλπ.) της βιομάζας, που περιέχουν.



Εικόνα 3.8 Κάθετος ασυνεχής αντιδραστήρας κομποστοποίησης

### Οριζόντια συστήματα

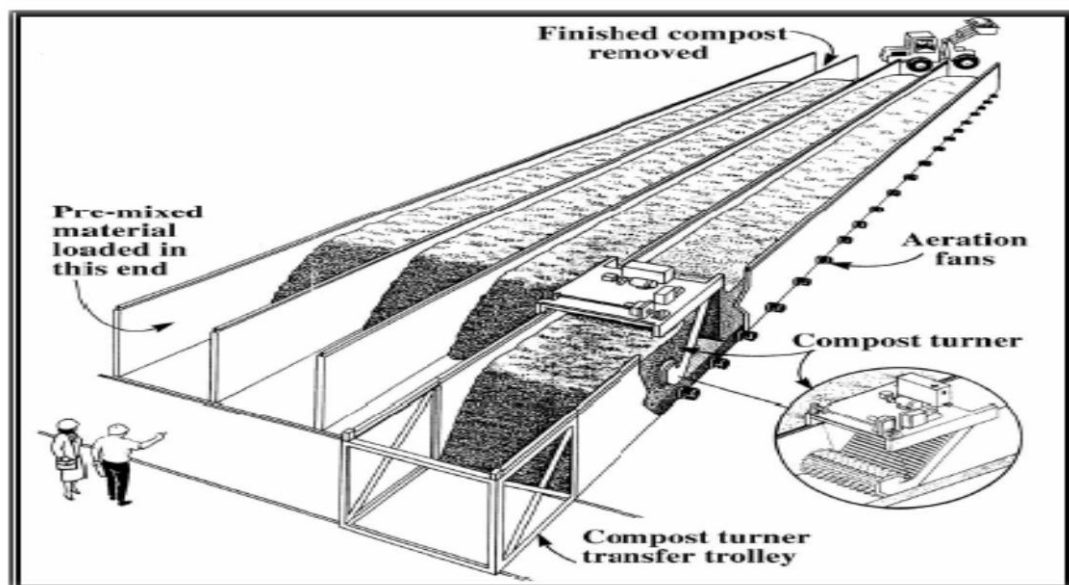
Στα συστήματα αυτά η διαδικασία λαμβάνει χώρα σε 15 - 30 ημέρες περίπου, αν και θα πρέπει να ακολουθηθεί περαιτέρω επεξεργασία σε ανοικτούς σωρούς για 4-12 εβδομάδες (φάση ωρίμανσης). Υπάρχει μεγάλη ποικιλία τέτοιων συστημάτων, που διακρίνονται σε εγκιβωτισμένα συστήματα (βιοκελιά - biocells, τούνελ - tunnel composting, κιβώτια - box composting), σε δεξαμενές (bay composting), τράπεζες κομποστοποίησης (extended beds) ή σε περιστρεφόμενους κυλίνδρους (rotating drum composting). Παρακάτω δίνονται σύντομες περιγραφές των βασικών συστημάτων, καθώς επίσης παρουσιάζονται φωτογραφίες χαρακτηριστικών συστημάτων.

Τα βιοκελιά, τα τούνελ και τα κιβώτια αποτελούν παραλλαγές εγκιβωτισμένων, αεροστεγών συστημάτων που προσφέρουν πολύ καλό έλεγχο της διεργασίας, καθώς η κομποστοποίηση πραγματοποιείται σε ένα σχεδόν πλήρως ελεγχόμενο περιβάλλον, ως προς τη θερμοκρασία και τον αερισμό. Αυτό επιτυγχάνεται λόγω

της δυνατότητας που παρέχουν τα συστήματα αυτά, ρύθμιση της αναλογίας του αέρα, που ανακυκλώνεται, προς το φρέσκο αέρα, που εισέρχεται στο σύστημα, καθώς και της ροής του αέρα μέσα από το υλικό. Το βασικό τους χαρακτηριστικό είναι ότι χρησιμοποιούν δυναμικό αερισμό, συνήθως με εμφύσηση αέρα, μέσα από το πάτωμα της κατασκευής με κανάλια ή σωλήνες, ενώ τα απαέρια απομακρύνονται συνήθως από το πάνω μέρος της. Ο αέρας ανακυκλώνεται εύκολα, επιτυγχάνοντας ομοιόμορφες και καλά ελεγχόμενες θερμοκρασίες σε όλη τη μάζα του οργανικού υλικού, ενώ μπορεί να υποστεί επεξεργασία για την απομάκρυνση οσμών και άλλων ρύπων. Τα συστήματα αυτά μπορεί να είναι μόνιμες κατασκευές μεταλλικές ή από μπετόν, αλλά μπορεί να είναι και πιο προσωρινές κατασκευές, με κινούμενη είσοδο από μπετό ή άλλα υλικά. Τα μεγέθη τους κυμαίνονται, με τα βιοκελιά και τα τούνελ να είναι συνήθως μεγαλύτερες κατασκευές (100 έως 1000 m<sup>3</sup>) και τα κιβώτια μικρότερες (20 έως 40 m<sup>3</sup>), που λειτουργούν ασυνεχώς και χρησιμοποιούνται ως παράλληλα στοιχεία, ώστε να εξυπηρετήσουν τις ανάγκες μικρότερων μονάδων (περίπου 3000-5000 τόνοι ανά έτος). Η βασική διαφορά των τούνελ με τα βιοκελιά είναι ότι τα τούνελ έχουν χωριστούς χώρους για φόρτωση και εκφόρτωση των υλικών στα άκρα του αντιδραστήρα, ενώ συχνά είναι συστήματα συνεχούς ροής, σε αντίθεση με τα κιβώτια. Στα συστήματα με δεξαμενές και τράπεζες κομποστοποίησης (composting bays and extended beds) το προς κομποστοποίηση υλικό εισέρχεται σε μεγάλα κτίρια, διαμορφωμένα με μακριές παραλληλόγραμμες δεξαμενές από μπετόν ή με μεγάλες «τράπεζες», όπου το υλικό τοποθετείται σε ένα συνεχές στρώμα και αναστρέφεται τμηματικά από κατάλληλο μηχανολογικό εξοπλισμό. Και στις δύο περιπτώσεις το υλικό αναδεύεται και μετακινείται σταδιακά από το σημείο εισόδου στο σημείο εξόδου, με τη βοήθεια εξοπλισμού, που περιλαμβάνει περιστρεφόμενα τύμπανα, ατέρμονους κοχλίες ή άλλες κατάλληλες διατάξεις. Οι διατάξεις αυτές είναι συνήθως τηλεχειριζόμενες και δεν απαιτούν την επί τόπου παραμονή των χειριστών. Η επεξεργασία και μετακίνηση του υλικού ολοκληρώνονται σε 2 έως 3 εβδομάδες. Συνήθως, εκτός από την ανάδευση, η επεξεργασία περιλαμβάνει και παροχή αερισμού μέσα από ένα διάτρητο πάτωμα, απ' όπου διέρχονται κανάλια ή σωλήνες αερισμού. Συχνά ακολουθείται διαφορετικό πρόγραμμα αερισμού κατά μήκος της δεξαμενής ή της τράπεζας, ανάλογα με το βαθμό σταθεροποίησης του υλικού (π.χ. πιο έντονος αερισμός στο πρώτο τμήμα της δεξαμενής, καθόλου στο τελευταίο τμήμα της, κλπ). Σε αυτά τα συστήματα ο αερισμός συνήθως επιτυγχάνεται με αναρρόφηση αέρα (εφαρμογή υποπίεσης), έτσι ώστε να μειώνονται οι οσμές μέσα στο κτίριο και να είναι εφικτή η επεξεργασία των απαερίων (με βιόφιλτρα ή πλυντρίδες). Τα περιστρεφόμενα τύμπανα είναι κυλινδρικοί, μεταλλικοί βιοαντιδραστήρες συνεχούς ροής του υλικού. Το υλικό εισέρχεται στο ένα άκρο ενός μεγάλου, αργά περιστρεφόμενου κυλίνδρου, όπου τεμαχίζεται με τη βοήθεια του ίδιου του βάρους και κατάλληλων προεξοχών στα τοιχώματα του κυλίνδρου, αερίζεται και σταθεροποιείται μερικώς έως ότου εξέλθει από την άλλη πλευρά του κυλίνδρου. Τα



περιστρεφόμενα τύμπανα είναι συστήματα υψηλού κόστους και χρησιμοποιούνται συνήθως για την πρώτη φάση έντονης βιολογικής δραστηριότητας της κομποστοποίησης (περίπου 72 ώρες), η οποία ακολουθείται από αερισμό σε δεξαμενές ή τράπεζες κομποστοποίησης ή επεξεργασία σε ανοικτά συστήματα. Εξ αιτίας του ήπιου τεμαχισμού, που επιτυγχάνουν, τα περιστρεφόμενα τύμπανα χρησιμοποιούνται συχνά και ως σύστημα προεπεξεργασίας (τεμαχισμού των πλαστικών σάκων, μείωσης του μεγέθους και διευκόλυνσης του διαχωρισμού του οργανικού κλάσματος), το οποίο ταυτόχρονα διευκολύνει την έναρξη της βιολογικής επεξεργασίας του οργανικού υλικού. Σε αυτή την περίπτωση το σύστημα λειτουργεί με χρόνο παραμονής 12-24 ώρες περίπου.



Εικόνα 3.9 Οριζόντιο κλειστό σύστημα κομποστοποίησης τύπου καναλιού

### 3.7.2. Ανοικτά συστήματα κομποστοποίησης

#### Γενικά χαρακτηριστικά

Στα ανοικτά συστήματα, η κομποστοποίηση πραγματοποιείται σε ανοιχτούς χώρους, χωρίς την χρήση σοβαρού μηχανολογικού εξοπλισμού. Στα ανοικτά συστήματα συγκαταλέγονται τα σειράδια και οι σταθεροί αεριζόμενοι σωροί. Οι βασικοί μηχανισμοί που ακολουθούνται και στα δύο συστήματα είναι παρόμοιοι, ο εξοπλισμός όμως που χρησιμοποιείται διαφέρει σημαντικά. Στην περίπτωση των σειραδίων το οξυγόνο εισέρχεται στη μάζα του υλικού με φυσικό αερισμό κατά το γύρισμά τους, ενώ στην περίπτωση των σταθερών σωρών γίνεται εμφύσηση ή αναρρόφηση αέρα με μηχανικούς αεριστήρες ή φυσητήρες.

## Σειράδια

Στην μέθοδο αυτή το μίγμα προς κομποστοποίηση σωριάζεται σε μακριές παράλληλες γραμμές, τα σειράδια. Τα σειράδια απλώνονται σε ανοιχτό χώρο και μόνο σε περιοχές με υψηλή βροχόπτωση τα σειράδια καλύπτονται από κάποιο στέγαστρο.

Η κομποστοποίηση με την μέθοδο αυτή βασίζεται στον φυσικό αερισμό των σειραδίων, ο οποίος επιτυγχάνεται με συχνή αναμόχλευση του σωρού. Σε μικρές εγκαταστάσεις, η αναμόχλευση γίνεται με τα χέρια ή με τρακτέρ ενώ σε μεγαλύτερες εγκαταστάσεις χρησιμοποιούνται ειδικά οχήματα. Σε στεγασμένες εγκαταστάσεις χρησιμοποιείται για την αναμόχλευση ειδικός εξοπλισμός που βρίσκεται αναρτημένος από την οροφή. Η αναμόχλευση επιτυγχάνει:

- Αερισμό του σωρού και παροχή οξυγόνου στους μικροοργανισμούς ώστε ο σωρός να μην καταστεί αναερόβιος.
- Καταστροφή των συσσωμάτων των οργανικών ουσιών που παρατηρούνται εξαιτίας της έκλυσης υγρασίας κατά την κομποστοποίηση. Τα συσσωματώματα αυτά γίνονται με τον χρόνο πρακτικά αδιαπέραστα ως προς τον αέρα και διαμορφώνονται ανεπιθύμητες αναερόβιες συνθήκες.
- Την συνεχή ανάμιξη των υλικών για την καλύτερη επαφή των μικροοργανισμών με το υπόστρωμα και την διατήρηση της επιθυμητής θερμοκρασίας στο εσωτερικό του σωρού.

Η εγκάρσια τομή του σωρού έχει σχήμα τραπεζίου. Το τυπικό πλάτος του σωρού είναι 4.5m και το ύψος του 1 – 2m. Κάθε σειράδι πρέπει να αναδεύεται δύο-τρεις φορές την ημέρα κατά την διάρκεια των 5 πρώτων ημερών, ώστε το μίγμα να αναμιχθεί πλήρως, να μειωθούν κατά το δυνατόν οι οσμές και να εξασφαλιστεί η είσοδος του απαιτούμενου οξυγόνου. Στην συνέχεια τα σειράδια αναμοχλεύονται μία φορά την ημέρα για άλλες 30 ημέρες.

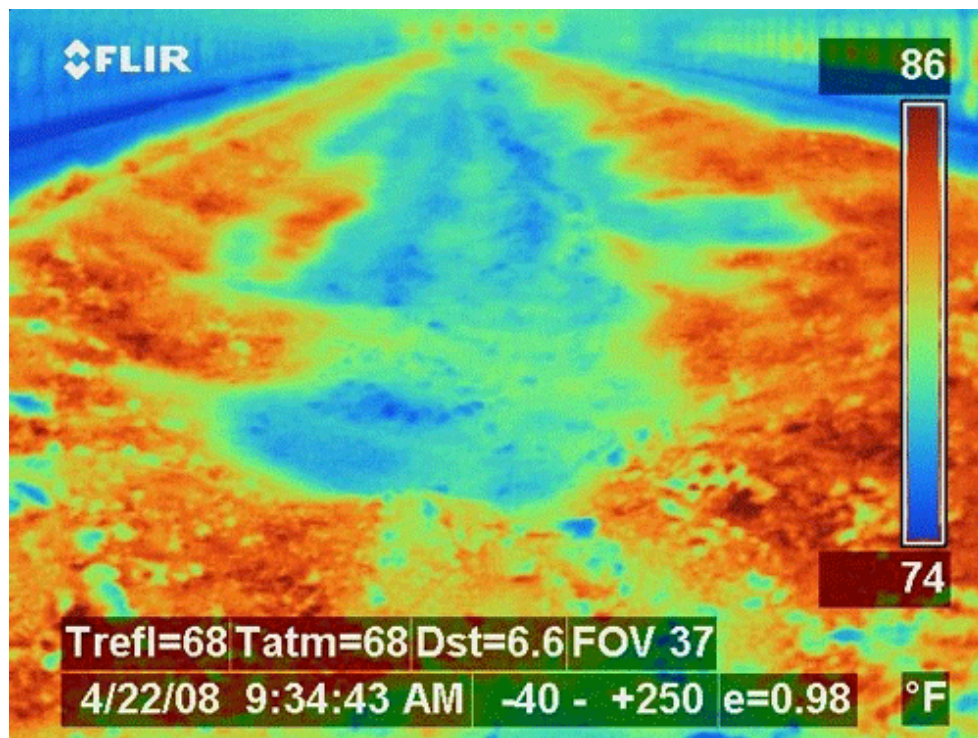
Η θερμοκρασία στο κέντρο του σειραδίου, μπορεί να φτάσει και τους 65°C και διατηρείται σταθερή μέχρι και 10 ημέρες. Τον χειμώνα οι θερμοκρασίες είναι χαμηλότερες και κυμαίνονται από 50°C – 60°C. Οι θερμοκρασίες κοντά στην επιφάνεια του σειραδίου είναι χαμηλότερες και τείνουν να εξισωθούν με την θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Όλα τα μηχανήματα που διατίθενται στην αγορά έχουν κατασκευαστεί αποκλειστικά για τον σκοπό της μηχανικής αναμόχλευσης των σειραδίων. Βασικά διακρίνονται σε δύο τύπους: Τους μετωπικούς αναμοχλευτές, (straddle turners) και τους πλευρικούς αναμοχλευτές, (Side-cutting windrow turners). Οι μετωπικοί αναμοχλευτές, (straddle turners) εκτείνονται σε όλο το πλάτος του σωρού. Περιλαμβάνουν ένα περιστρεφόμενο κοχλία που εισχωρεί στο σωρό, ανυψώνει το υλικό και το αποθέτει πίσω του καθώς προχωρεί. Ένας εναλλακτικός τύπος μηχανήματος χρησιμοποιεί ένα κεκλιμένο ταινιόδρομο με κλίση προς το πίσω τμήμα του μηχανήματος. Στην βάση του ταινιόδρομου υπάρχουν δόντια που

εισχωρούν στο σωρό και αναγκάζουν το υλικό να πέσει στην ταινία και να μεταφερθεί στο πίσω μέρος του μηχανήματος. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι αναμοχλευτές είναι αυτοκινούμενοι.



Εικόνα 3.10 Αυτοκινούμενος αναμοχλευτής σειραδίων



Εικόνα 3.11 Απεικόνιση σειραδίων με θερμοκάμερα

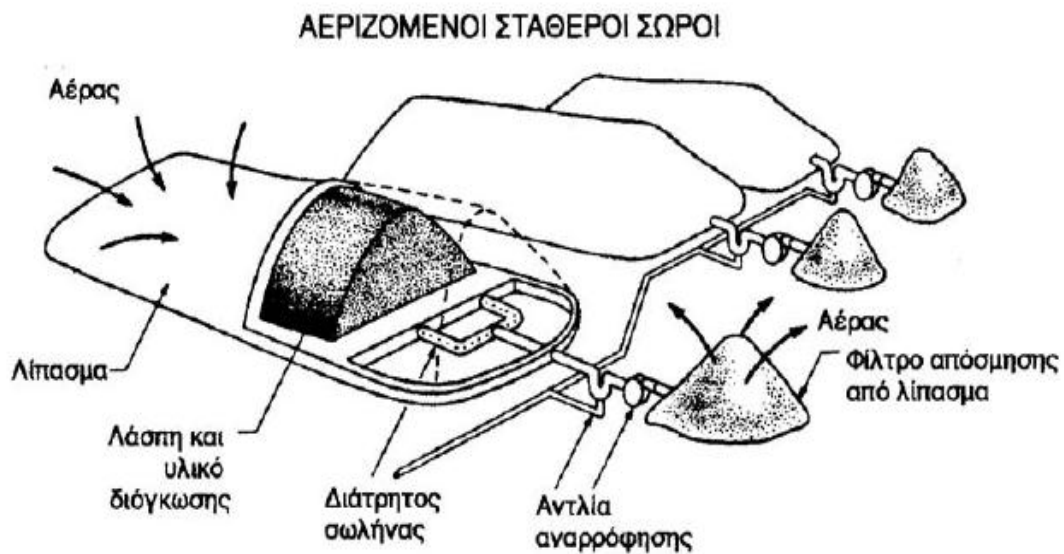


Εικόνα 3.12 Αεριζόμενοι σταθεροί σωροί (aerated static piles)

### Τύποι σταθερών σωρών

Στην μέθοδο αυτή, το μίγμα των υλικών σωριάζεται σε σταθερό σωρό στον οποίον εφαρμόζεται εξαναγκασμένος αερισμός. Η μέθοδος αναπτύχθηκε με στόχο την μείωση της απαιτούμενης έκτασης και την βελτιστοποίηση της διεργασίας της κομποστοποίησης.

Οι αεριζόμενοι σταθεροί σωροί διακρίνονται σε ατομικούς σωρούς και σε εκτεταμένους σωρούς. Η πρώτη μέθοδος είναι γνωστή σαν μέθοδος Rudgers και η δεύτερη μέθοδος ως μέθοδος Beltsville. Ο αερισμός των σωρών μπορεί να γίνει με αναρρόφηση αέρα, ή εμφύσηση αέρα, ή με συνδυασμό και των δύο. Τα δύο συστήματα παρουσιάζονται στα σχήματα 3.7 και 3.8. Στην συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικά ο τρόπος σχεδιασμού του συστήματος του εκτεταμένου σταθερού σωρού που είναι και ο πιο συνηθισμένος μιας που απαιτεί 50 φορές περίπου μικρότερη έκταση από την αντίστοιχη των ατομικών αεριζόμενων σωρών (Α. Ζορμπάς, 1999).

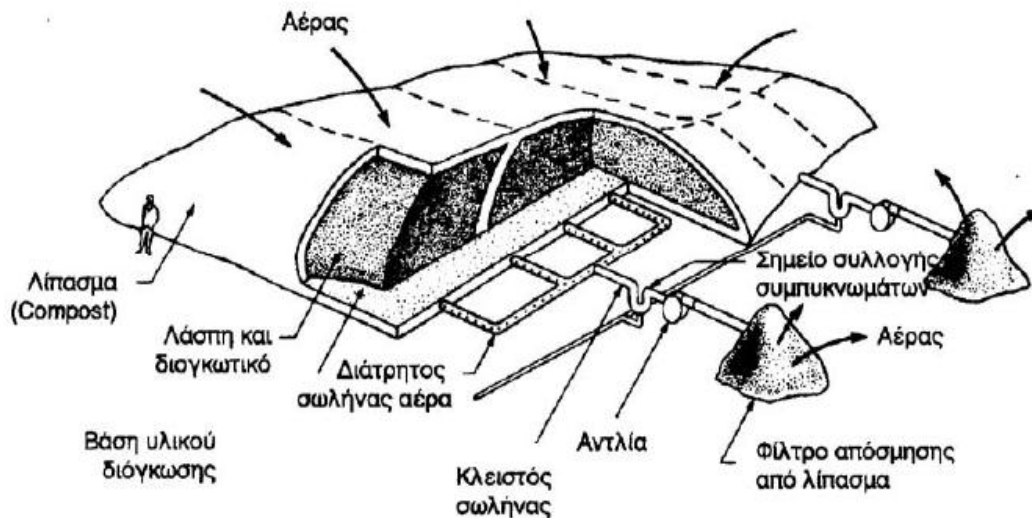


Σχήμα 3.6 Σχηματική διάταξη ατομικών αεριζόμενων σωρών (σύστημα Rudgers) (Α. Ζόρπας, 1999)

### Κατασκευή του σταθερού αεριζόμενου σωρού

Η επιφάνεια απόθεσης του σωρού, η επιφάνεια ξήρανσης και η επιφάνεια διαχωρισμού του πρόσθετου υλικού διαμορφώνεται από σκυρόδεμα. Στην επιφάνεια διάστρωσης δίδεται κλίση 2% για την συλλογή των ομβρίων και την ανακύκλωσή τους στην εγκατάσταση επεξεργασίας των λυμάτων. Ο εκτεταμένος σωρός κατασκευάζεται ως εξής:

Στην αρχή κατασκευάζεται ένας σωρός σε σχήμα τριγωνικό με την ποσότητα του μίγματος μιας ημέρας. Η μια πλευρά και τα άκρα του σωρού σκεπάζονται κανονικά με 25cm τελικού κόμποστ, ενώ η εσωτερική πλευρά καλύπτεται προσωρινά με μερικά εκατοστά κόμποστ μέχρι την άλλη μέρα. Ο σωρός που κατασκευάζεται έχει πλάτος 15m και ύψος 2.5m.



Σχήμα 3.7 Σχηματική διάταξη ατομικών αεριζόμενων σωρών (εμφύσηση αέρα) (Α. Ζορπάς, 1999)

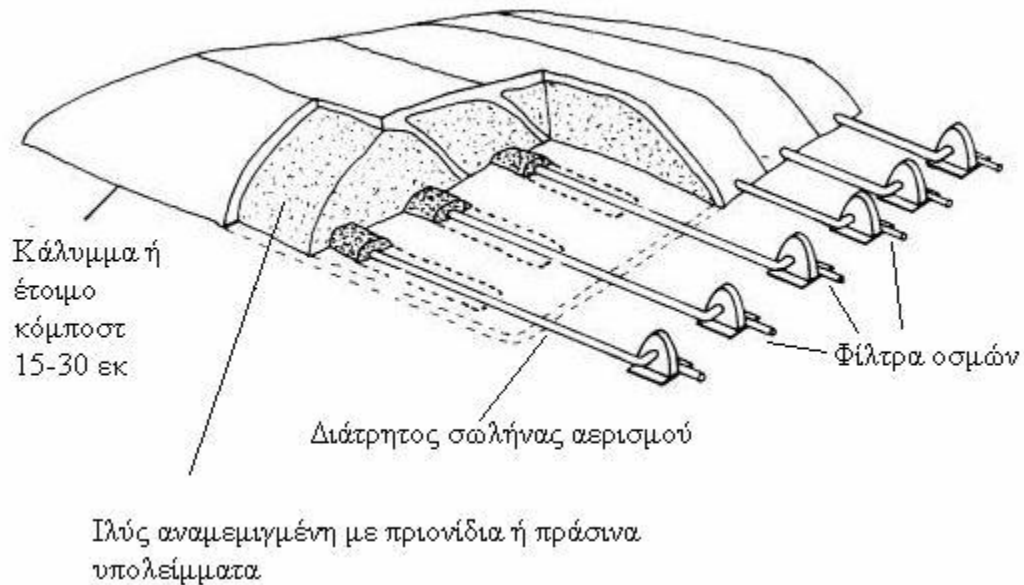
### Σωλήνες αερισμού

Οι σωλήνες αερισμού για την εμφύσηση ή την αναρρόφηση του αέρα τοποθετούνται σε μόνιμα τριγωνικά κανάλια, βάρους περίπου 20 – 25cm και σε απόσταση 1.6m μεταξύ τους, που διαμορφώνονται στο δάπεδο απόθεσης του σωρού. Τα κανάλια καλύπτονται με σιδερένια σχάρα. Σε κάθε ημερήσιο σωρό αναλογούν δύο σωλήνες που διατρέχουν το πλάτος του. Οι σωλήνες είναι από PVC και έχουν διάμετρο 10cm. Συνδέονται σε σταθερό δίκτυο σωληνώσεων που οδηγεί στους φυσητήρες. Ο χώρος γύρω από τους σωλήνες αερισμού γεμίζει με πρόσθετο υλικό που εξασφαλίζει καλύτερη κατανομή του οξυγόνου στο σωρό. Περιοδικά είναι απαραίτητη η αντικατάσταση του υλικού στα κανάλια αερισμού.

### Αερισμός του σωρού

Ο αερισμός του σωρού αποσκοπεί στην τροφοδοσία του μίγματος με το απαραίτητο για την διεργασία της κομποστοποίησης οξυγόνο. Ο αερισμός επιτυγχάνεται: (α) με την εμφύσηση πεπιεσμένου αέρα δια μέσου του σωρού και (β) με την αναρρόφηση αέρα δια μέσου του σωρού. Οι δύο αυτές λειτουργίες εναλλάσσονται έτσι ώστε να διατηρείται στον σωρό η απαραίτητη συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου καθώς και η απαραίτητη θερμοκρασία για την κομποστοποίηση και την καταστροφή των παθογόνων μικροοργανισμών. Η λειτουργία με εμφύσηση αέρα έχει σαν αποτέλεσμα την πτώση της θερμοκρασίας αλλά υποβοηθά σημαντικά την ξήρανση του κόμποστ. Αντίθετα η αναρρόφηση αέρα επιτρέπει την ανάπτυξη υψηλότερων θερμοκρασιών. Η επιθυμητή συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου είναι 15%. Η βέλτιστη θερμοκρασία στο εσωτερικό του σωρού είναι 60°C. Πάνω από την

Θερμοκρασία αυτή παρατηρείται σημαντική αναστολή της μικροβιακής δράσης ενώ σε χαμηλότερες θερμοκρασίες επιβραδύνεται η βιοαποικοδόμηση.



**Σχήμα 3.8 Μέθοδος κομποστοποίησης αεριζόμενων στατικών σωρών με απορρόφηση αέρα**

Κάθε σωρός είναι εφοδιασμένος με ρυθμιστική δικλείδα που παίρνει εντολές για την έναρξη ή την παύση του αερισμού ανάλογα με την θερμοκρασία στο εσωτερικό του σωρού. Η εναλλαγή των αεριστήρων μεταξύ των δύο αυτών τρόπων λειτουργίας ρυθμίζεται με την βοήθεια αισθητηρίων οξυγόνου και θερμοκρασίας που τοποθετούνται στην μάζα του σωρού. Το αισθητήριο της θερμοκρασίας τοποθετείται κοντά στην βάση του σωρού ενώ το αισθητήριο του οξυγόνου κοντά στο κέντρο του, όπου αναπτύσσονται και οι υψηλότερες θερμοκρασίες (Α. Ζορμπάς, 1999).

Συνδυασμός αναρρόφησης και εμφύσησης αέρα μπορεί να εξασφαλίσει ευνοϊκότερες συνθήκες για τη διεργασία της κομποστοποίησης. Για τον λόγο αυτό τις πρώτες μέρες της διεργασίας γίνεται αναρρόφηση των απαερίων προκειμένου να έχουμε απομάκρυνση των απαερίων (π.χ.  $CO_2$ ,  $NH_3$  και δύσοσμων χημικών ενώσεων) και εμπλουτισμού του υποστρώματος σε οξυγόνο διατηρώντας τη θερμοκρασία σε επιθυμητά επίπεδα. Κατά τη θερμοφιλή φάση γίνεται εμφύσηση αέρα καθότι ο ρυθμός κατανάλωσης οξυγόνου είναι πολύ μεγαλύτερος και προκειμένου να ρυθμιστεί ίση της θεροκρασίας είναι πολλές φορές επιτακτική.

### **Συλλογή στραγγισμάτων**

Στραγγίσματα παράγονται από την υγροποίηση των υδρατμών που δημιουργούνται λόγω της υψηλής θερμοκρασίας που επικρατεί στο εσωτερικό του σωρού. Τα

στραγγίσματα συλλέγονται σε στραγγιστήρι τοποθετημένο στο κανάλι αερισμού κάτω από τον σωλήνα του αέρα. Τα στραγγίσματα πρέπει χρίζονται κατάλληλης επεξεργασίας καθότι έχουν υψηλό ρυπαντικό φορτίο.

### **3.8. Δυνατότητες διάθεσης του κομποστοποιημένου υλικού**

Οι προδιαγραφές ποιότητας του compost ποικίλουν ευρύτατα από χώρα σε χώρα ακόμα και μέσα στην ΕΕ, τόσο όσον αφορά στην φιλοσοφία τους, όσο και στις παραμέτρους που προσδιορίζονται, τα θεσμοθετημένα όριά τους και τα συστήματα πιστοποίησης. Ο γενικός στόχος είναι κοινός και περιλαμβάνει την προστασία του εδάφους και ιδιαίτερα των γεωργικών εδαφών από τα βαρέα μέταλλα και κάποιες οργανικές τοξικές ουσίες.

Οι δυνατότητες διάθεσης του compost εξαρτώνται άμεσα από τα ποιοτικά του χαρακτηριστικά και ποικίλουν από την χρήση του σε βιολογικά καλλιεργούμενα τρόφιμα και γενικότερα καλλιέργειες παραγωγής τροφής και ζωοτροφών έως την χρήση του για αποκατάσταση εδαφών και την κάλυψη ΧΥΤΑ. Σε πολλές περιπτώσεις υπάρχουν νομοθετικοί περιορισμοί για τις επιτρεπόμενες χρήσεις, με στόχο την προστασία του περιβάλλοντος. Σε αυτό το πλαίσιο παρατίθεται ένας ενδεικτικός οδηγός χρήσεων compost:

- Φυτά μεγάλης καλλιέργειας, απαιτητικά σε χουμικά συστατικά, με κατάλληλη αμειψισπορά, προκειμένου να ενισχυθεί το ισοζύγιο χουμικών συστατικών στα καλλιεργούμενα εδάφη, π.χ. τεύτλα, πατάτες, αλλά και διάφορα λαχανικά αγρού σε ποσότητα 4-10 τόνων νωπού υλικού ανά στρέμμα κάθε 2-4 χρόνια.
- Σιτηρά σε ποσότητα 2-6 τόνων νωπού υλικού ανά στρέμμα κάθε 2-4 χρόνια.
- Λειβαδικές εκτάσεις σε ποσότητα 2-5 τόνων νωπού υλικού ανά στρέμμα, κάθε 2-4 χρόνια. Το compost πρέπει να είναι απαλλαγμένο από ξένα σώματα, που μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα στα ζώα.
- Δενδρώδεις καλλιέργειες, μηλοειδή, πυρηνόκαρπα, εσπεριδοειδή, συκιές, κλπ, σε ποσότητα 10-20 νωπού υλικού ανά στρέμμα, κάθε 3 χρόνια.
- Αμπέλια σε ποσότητα 10-25 τόνων νωπού υλικού ανά στρέμμα (φρέσκο compost σε βαριά εδάφη) ή 10 τόνων υλικού ανά στρέμμα (ώριμο compost σε ελαφρά εδάφη) κάθε 3-4 χρόνια. Σε περίπτωση επικλινών εκτάσεων, συνιστώνται μεγαλύτερες δόσεις: 20-30 τόνους νωπού υλικού ανά στρέμμα (φρέσκο compost). Ως χρόνος εφαρμογής συνίσταται η περίοδος μεταξύ τρυγητού και της έναρξης της βλάστησης.
- Θερμοκηπιακές καλλιέργειες σε ποσότητα 1-1.5 kg/m<sup>2</sup> νωπού υλικού, κάθε 2-4 χρόνια.



- Δασικά φυτώρια σε ποσότητα 15-20 τόνων νωπού υλικού ανά στρέμμα στην αρχή και έπειτα 3-4 τόνους νωπού υλικού κάθε 2 χρόνια.
- Ανθοκομικές καλλιέργειες σε ποσότητα 10-25 τόνων νωπού υλικού ανά στρέμμα ή για την παρασκευή υποστρωμάτων σε πρόσμιξη έως 20%.
- Διαμόρφωση περιβάλλοντος και επιφανειών πρασίνου σε αστικές περιοχές, πάρκα, αθλητικά πεδία, αποτροπή φαινομένων διάβρωσης σε επικλινείς εκτάσεις, συγκράτηση πρηνών, χλοοφορία σε ταράτσες, σε θαμνοσυστάδες σε δρόμους, αντικατάσταση μητρικού εδάφους για την αποκατάσταση λατομείων και χωματερών-ΧΥΤΑ, σε δόσεις των 10-30 τόνων νωπού υλικού ανά στρέμμα κάθε 2-4 χρόνια.
- Αναδασώσεις με ενσωμάτωση έως 150 τόνων νωπού υλικού ανά στρέμμα.
- Ως υλικό βιοφίλτρου για την απορρόφηση δυσάρεστων οσμών από βιομηχανικές εγκαταστάσεις με δύσοσμα απαέρια, εξαερισμών σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας αστικών λυμάτων, μαζικής διατήρησης ζώων, κλπ. Στις περιπτώσεις αυτές συνιστανται δόσεις 1 τόνου νωπού υλικού ανά  $m^2$  επιφάνειας βιοφίλτρου, κάθε 4 χρόνια, για ποσότητα απαερίων 50-100  $m^3$  ανά ώρα και ανά  $m^2$ .
- Ως ηχομονωτικό για την προστασία από θορύβους σε αυτοκινητόδρομους κοντά σε αστικές περιοχές, κλπ. Το κόστος της κομποστοποίησης παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις, οι οποίες οφείλονται στις ακόλουθες παραμέτρους:
  - το είδος της διεργασίας κομποστοποίησης που εφαρμόζεται,
  - την χρήση ή μη εξοπλισμού ελέγχου της ρύπανσης και των οσμών,
  - τον βαθμό προώθησης (marketing) του τελικού προϊόντος.

Η κομποστοποίηση είναι μια διαδικασία, που χρησιμοποιείται σε πολλές περιπτώσεις (π.χ. κομποστοποίηση σύμμεικτων απορριμμάτων). Με την κομποστοποίηση της λύος (ή την συγκομποστοποίησή της με το οργανικό κλάσμα των απορριμμάτων) παράγεται ένα καλά σταθεροποιημένο τελικό προϊόν, χωρίς οσμές, με υψηλή γεωργική αξία και χωρίς παθογόνους μικροοργανισμούς.

### 3.9. Πρόσθετα κομποστοποίησης

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

Ο όρος πρόσθετο αναφέρεται στο υλικό εκείνο, το οποίο προστίθεται στο υπόστρωμα τροφοδοσίας, με στόχο τη μείωση του ειδικού βάρους και την αύξηση του πορώδους, ώστε να διευκολύνεται ο αερισμός ή η αύξηση της ποσότητας των βιοαποδομήσιμων οργανικών υλικών στο μείγμα. Στα πρόσθετα υλικά που έχουν

χρησιμοποιηθεί περιλαμβάνονται: ζεόλιθος, ροκανίδι, πριονίδι, άχυρο, τύρφη, πυρηνόξυλο, κοπριά, και ώριμο κόμποστ. Το ιδανικό «πρόσθετο» πρέπει να είναι ξηρό, να έχει μικρό ειδικό βάρος και να βιοαποδομείται σχετικά εύκολα (Α. Ανδρεαδάκης).

Παρακάτω γίνεται αναφορά σε ορισμένα από τα πιθανά πρόσθετα και φυσικά στα χαρακτηριστικά του καθενός.

### 3.9.1. Ζεόλιθοι

Γενικά οι ζεόλιθοι αποτελούν μια μεγάλη οικογένεια ορυκτών η οποία έχει αρχίσει να μελετάται 200 και πλέον χρόνια, ενώ η χρήση τους είναι πολύ παλαιά, περί τα 2000 χρόνια. Είναι κρυσταλλικές ένυδρες αργιλοπυριτικές ενώσεις οι οποίες μπορούν να περιέχουν και στοιχεία από τις ομάδες I και II του περιοδικού πίνακα (αλκάλια και αλκαλικές γαίες). Ανακαλύφθηκαν από τον Cronstedt το 1756. Ο πρώτος ζεόλιθος που ανακαλύφτηκε ήταν ο στυλβίτης (stilbite). Στη φύση συναντώνται περισσότερα από 47 είδη ζεόλιθων από τα οποία τα 20 βρίσκονται σε ιζηματογενή αποθέματα.

Οι ζεόλιθοι που εμφανίζονται συχνότερα είναι οι: κλινοπτιλόλιθος, μορδενίτης, χαβαζίτης, αναλκιμίτης, φιλιψίτης, εριονίτης και ευλανδίτης.

Η δομή ενός ζεόλιθου περιέχει ελεύθερα κανάλια που καταλαμβάνονται από τα κατιόντα και από μόρια νερού. Τα κατιόντα είναι ευκίνητα και μπορούν να εναλλαχθούν από άλλα κατιόντα. Το κρυσταλλικό νερό μπορεί να αφαιρεθεί και να επαναπροσληφθεί χωρίς να επηρεάζεται η δομή. Σε πολλούς όμως ζεόλιθους, η εναλλαγή κατιόντων ή η αφυδάτωση μπορεί να προκαλέσει αλλαγές στη δομή τους. Η έκταση και η θέση των μορίων του νερού που ενσωματώνονται στο πλέγμα εξαρτάται από την κατασκευή του μοριακού πλέγματος του ζεόλιθου, δηλαδή από το μέγεθος και το σχήμα των κοιλοτήτων και των καναλιών που υπάρχουν, όπως και τη φύση των κατιόντων του πλέγματος.

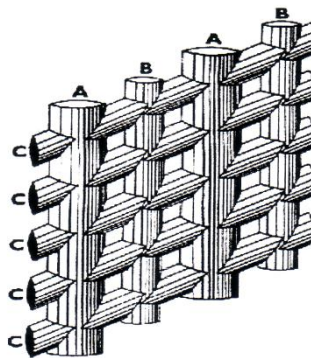
Μελετώντας από άποψη ρόφησης και κατάλυσης έχει παρατηρηθεί ότι υπάρχουν και άλλοι σημαντικοί τύποι δομών, οι οποίες περιλαμβάνουν τα είδη και τις ελεύθερες διαστάσεις των συστημάτων των καναλιών, τα οποία πρέπει να διασχίσουν τα εισερχόμενα μόρια προκειμένου να διεισδύσουν στον ενδοκρυσταλλικό ελεύθερο όγκο.



Αν ξεκινώντας από ένα δοσμένο σημείο στον κρύσταλλο, το μόριο επισκέπτης μπορεί διαμέσου των καναλιών να φθάσει σε οποιοδήποτε σημείο μέσα στον κρύσταλλο, τότε το σύστημα των καναλιών ορίζεται ως τρισδιάστατο (3-D). Αν το μόριο κατά την μετακίνησή του περιορίζεται σ' ένα επίπεδο του κρυστάλλου τότε το

σύστημα χαρακτηρίζεται ως δισδιάστατο (2-D). Τέλος, αν η κίνηση γίνεται προς μια κατεύθυνση, το σύστημα χαρακτηρίζεται ως μονοδιάστατο (1-D). Επιπλέον, διαφορές στις μοριακές διαστάσεις των επισκεπτών μορίων μπορεί να επιδράσει με τέτοιο τρόπο, που η διάχυση να είναι μονοδιάστατη για ένα μέγεθος μορίων, ενώ για μικρότερα μόρια να είναι δισδιάστατη ή και τρισδιάστατη.

Τέλος οι θέσεις, το μέγεθος και ο αριθμός των κατιόντων που μπορούν να εναλλαχθούν πρέπει να συνυπολογιστούν, καθώς είναι δυνατόν να λειτουργήσουν σαν εμπόδια στην είσοδο των καναλιών αφού μπορεί να αλλάξουν τις διαστάσεις των παραθύρων. Διαφορετικές ιοντικές μορφές του ίδιου ζεόλιθου είναι δυνατόν να συμπεριφέρονται με διαφορετικό τρόπο εξαιτίας των διαφορετικών κατιόντων του κρυσταλλικού πλέγματος.



Εικόνα 3.13 Σύστημα καναλιών κλινοπτιλόλιθου

Οι ζεόλιθοι είναι κατάλληλοι για πολύ μεγάλη ποικιλία χρήσεων. Οι χρήσεις τους αυτές οφείλονται στις ιδιότητες τους, οι οποίες μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες: εναλλαγή ιόντων, προσρόφηση και εκρόφηση νερού και προσρόφηση αερίων.

Χρήση:

- Κατεργασία πυρηνικών αποβλητων –Δέσμευση ραδιενεργών στοιχείων
- Επεξεργασία υδάτων
- Δομικά υλικά
- Ιχθυοκαλλιέργειες
- Βιομηχανία χαρτιού
- Γεωργία και εδαφοβελτιωτικά
- Κτηνοτροφία
- Προσρόφηση νερού και ξήρανση
- Απορρόφηση αερίων
- Κατάλυση
- Έλεγχος οσμών
- Απορρυπαντικά

Επομένως, με βάση τα παραπάνω, γίνεται κατανοητή η χρήση του ζεόλιθου για την προσρόφηση νερού καθώς επίσης και διαφόρων βαρέων ή μη μετάλλων στο κόμποστ (Κρομμυδάς Δημήτριος, 2005).

### 3.9.2. Πριονίδι, ροκανίδι

Πρόκειται για μικρά κομμάτια ξύλου (ξύσματα) που προέρχονται από τη βασική κατεργασία του. Αυτά αυξάνουν το πορώδες του κόμποστ και διευκολύνουν τον αερισμό του, προσλαμβάνοντας ποσοστό υγρασίας. Τέλος αυξάνουν την περιεκτικότητά του σε άνθρακα.



### 3.9.3. Περλίτης

Ο περλίτης είναι ένα ηφαιστειογενές υαλώδες αργιλλοπυριτικό πέτρωμα του οποίου η γενεσιουργός αιτία είναι η όξινη λαβα, που εγχύθηκε επιφανειακά ή υποθαλάσσια κατά την διάρκεια ηφαιστειακών δραστηριοτήτων. Η τελευταία στην συνέχεια ψύχθηκε και στερεοποιήθηκε ταχύτατα, υπό συνθήκες που δεν επέτρεψαν στα άτομα του ορυκτού να τοποθετηθούν σε σχηματισμούς κρυσταλλικού πλέγματος, γεγονός που έδωσε τελικά στον περλίτη την υαλώδη μορφή του. Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που επέδρασε για τον σχηματισμό του περλίτη ήταν η παρουσία νερού και διαφόρων αερίων που παγιδεύτηκαν στην μάζα του, την στιγμή της ψύξης και στερεοποίησης του. Το όνομα προέρχεται από την υφή του που χαρακτηρίζεται από την παρουσία κόκκων, θυμίζοντας μικρά μαργαριτάρια (πέρλες). Πετρογραφικά ο περλίτης είναι ένα ηφαιστειογενές υλικό. Έχει χαρακτηριστική περλιτική δομή που αποτελείται από ομόκεντρα σπασίματα τα οποία μοιάζουν με πέρλες που είναι τοποθετημένες σε όλο το γυαλί, άλλοτε κυκλικά και άλλοτε σε πολυγωνικούς σχηματισμούς. Αυτό είναι και το έντονο χαρακτηριστικό του περλίτη. Τα προαναφερθέντα σπασίματα είναι φαινόμενο που παρατηρείται σε όξινα γυαλιά.



Εικόνα 3.14 Κοκκομετρία περλίτη

### ΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Τα φυσικά χαρακτηριστικά του περλίτη ποικίλουν ανάλογα με την περιοχή προέλευσης του ορυκτού . Τα πιο σημαντικά από αυτά τα χαρακτηριστικά είναι : η υφή , το χρώμα , η ειδική πυκνότητα και η ψαθυρότητα.

**Υφή :** Η υφή του περλίτη αποτελεί ίσως το σημαντικότερο φυσικό χαρακτηριστικό του, αφού αποτελεί το κυριότερο κριτήριο αναγνώρισης και ποικίλει από ανοιχτόχρωμη αφρώδη (σαν της ελαφρόπετρας) έως λεπτόκοκκη περλιτική. Μερικοί τύποι ωστόσο, έχουν λεία υαλώδη επιφάνεια .

**Χρώμα :** Το χρώμα του φυσικού περλίτη ποικίλει από μαύρο έως λευκό με πιο συνηθισμένες του γκρίζου , ενώ έχει σημειωθεί και μια σειρά άλλων χρωμάτων όπως ανοιχτό κίτρινο έως καφέ , βαθύ ροζ και κιτρινωπό πράσινο . Σημειώνεται επίσης ότι μερικοί από τους χρωματισμούς του ορυκτού οφείλονται σε κηλίδες .

**Ειδικό βάρος :** Το ειδικό βάρος του φυσικού πετρώματος ποικίλει από 2,36 g/cm<sup>3</sup> μοιάζοντας αρκετά με αυτό του γυαλιού , έως 1,2 g/cm<sup>3</sup> πλησιάζοντας σε τιμή το ειδικό βάρος της ελαφρόπετρας . Το ειδικό βάρος του περλίτη που εξορύσσεται στα Ελληνικά λατομεία κυμαίνεται μεταξύ 2,3 με 2,4 g/cm<sup>3</sup> .

**Ψαθυρότητα :** Η σκληρότητα του περλίτη παρουσιάζει διακυμάνσεις από κοίτασμα σε κοίτασμα. Έτσι παρουσιάζεται μια σειρά πετρωμάτων που ξεκινά από εξαιρετικής σκληρότητας και καταλήγει σε πετρώματα εξαιρετικά μαλακά και ψαθυρά . Η μεγάλη σημασία της ψαθυρότητας του περλίτη φαίνεται στο στάδιο της κονιοποίησης του πετρώματος σε μύλους , με στόχο τη δημιουργία κόκκων .

Πίνακας 3.5 Ενδεικτικές φυσικές ιδιότητες περλίτη

| Ενδεικτικές Φυσικές Ιδιότητες Περλίτη  |  |
|--|--|
| Δείκτης Διάθλασης  | 1.5  |
| Υγρασία, Maximum   | 0.5%   |
| pH   | 6.5 - 8.0  |
| Ειδικό Βάρος   | 2.2 - 2.4  |
| Πυκνότητα (αορίστου βάρους)  | 2-25 lb/ft <sup>3</sup> range (32-400kg/m <sup>3</sup> ) |
| Κοκκομετρία  | 4-8 mesh & finer   |
| Σημείο εξευμενισμού  | 1600-2000°F (871-1093°C)                                 |
| Σημείο Τήξης   | 2300-2450°F (1260-1343°C)                                |
| Ειδική Θερμότητα   | 0.2 Btu/lb°F (387 J/kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )   |
| Θερμική αγωγιμότητα στους 75°F (24°C)  | 0.04-0.06 Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )             |
| Διαλυτότητα θερμά, πυκνά διαλύματα αλκαλιών, σε HF, αδιάλυτο σε μεταλλικά οξέα Προσρόφηση Ελαίων | 50-100 g/g περλίτη                                       |
| Προσρόφηση νερού   | 200-600% κατά βάρος                                      |

Επιπλέον ο περλίτης παρουσιάζει τα παρακάτω χαρακτηριστικά, που του προσδίδουν την ικανότητα να έχει τεράστια ποικιλία εφαρμογών : 1) Φυσική σταθερότητα 2) Χημική αδράνεια 3) Καθαρότητα και απουσία οσμών 4) Χαμηλό ειδικό βάρος 5) Θερμομονωτικές ιδιότητες 6) Ηχομόνωση 7) Ασφάλεια και ευκολία στη χρήση 8) Ουδέτερο pH 9) Βέλτιστος αερισμός και διατήρηση υγρασίας στις ρίζες για υπέργειες καλλιέργειες 10) Αποστειρωμένο υλικό 11) Φιλικότητα προς το περιβάλλον



#### ΧΗΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Με βάση την περιεκτικότητα σε  $\text{SiO}_2$  (70-75%) ο περλίτης κατατάσσεται στα όξινα πυριγενή πετρώματα

Το κυρίως πτητικό υλικό του περλίτη είναι το νερό, το οποίο βρίσκεται σε ποσοστό 3-5% και είναι παγιδευμένο στη δομή του. Το νερό του περλίτη υπάρχει σε δύο μορφές: ως μοριακό νερό και στη μορφή υδροξυλίων. Η αναλογία των δύο μορφών νερού ποικίλει και εξαρτάται από τον τρόπο δημιουργίας του περλίτη. Πιστεύεται, ότι η σύσταση του περλίτη και ιδιαίτερα το ποσοστό  $\text{MgO}$  και του  $\text{CaO}$  επηρεάζει τον ρυθμό με τον οποίο ενυδατώνεται. Η περλιτική υφή οφείλεται στη διάχυση του μοριακού νερού στην ηφαιστειακή ύαλο. Καθώς αυτό διαχέεται δημιουργούνται ισχυρές τάσεις στο μέτωπο της σφαιρικής επιφάνειας διάδοσης του μοριακού νερού μεταξύ αυτού και της ύαλου. Όταν οι τάσεις υπερβούν την αντοχή της ύαλου, θραύεται δημιουργώντας τη χαρακτηριστική σφαιρική θραυσιγενή επιφάνεια.

Πίνακας 3.6 Ενδεικτικές χημικές ιδιότητες περλίτη εκφρασμένες σε (% w/w)

| Ενδεικτικές Χημικές Ιδιότητες Περλίτη (% w/w) |       |
|---|-------|
| SiO <sub>2</sub>                              | 73.20 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                | 13.50 |
| K <sub>2</sub> O                              | 3.90  |
| Na <sub>2</sub> O                             | 3.35  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                | 1.20  |
| CaO   | 0.65  |
| MgO   | 0.3   |
| Καθαρό Σύνολο                                 | 96.10 |
| Κρυσταλλικό Νερό                              | 3.90  |
| Σύνολο  | 100   |

Τέλος να τονίσουμε πως όταν ο ακατέργαστος περλίτης θερμανθεί σε 750 ως και 1.000 βαθμούς Κελσίου αυξάνεται στο 20πλάσιο του αρχικού όγκου του, χάρη στο ενωμένο με τη μάζα του νερό που ελευθερώνεται με μορφή ατμού αλλά δυσκολεύεται να φύγει.

#### ΤΥΠΟΙ ΠΕΡΛΙΤΙΚΩΝ ΔΟΜΩΝ

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

A) Κίσηρής . Εμφανίζεται κοντά στην επιφάνεια. Πρόκειται για περλίτη με μικρό ειδικό βάρος, ο οποίος δεν επηρεάστηκε από τη λιθοστατική πίεση. Με το βάθος οι φυσαλίδες της κίσηρης γίνονται πιο επίπεδες, ενώ παρατηρείται επιμήκυνση κατά μήκος ροής. Αν και ο περλίτης αυτός μπορεί να διογκωθεί, η σημασία του γενικά είναι μικρή λόγω της ευθρυπτότητάς του .

B) Κοκκώδης . Ο περλίτης με κοκκώδη δομή είναι πιο συμπαγής, έχει ζαχαρώδη εμφάνιση και είναι πιο σημαντικός από οικονομική άποψη, λόγω της μεγαλύτερης ευκολίας κατά την κονιοποίηση, ταξινόμηση και διόγκωση. Συχνά εμφανίζονται ρευστικές δομές .

Γ) Τυπική περλιτική . Το υλικό με την κλασική περλιτική δομή εμφανίζεται κάτω από το προηγούμενο. Ο περλίτης έχει προκύψει από ενυδάτωση οψιδιανού ο οποίος διατηρείται .



Εικόνα 3.15 Απεικόνιση περλίτη

#### Κοκκομετρίες περλίτη

Η μόνη επεξεργασία του θρυμματισμένου περλίτη είναι η διόγκωση (rodding), η οποία γίνεται σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 750-1000 °C , ανάλογα με το είδος του περλίτη. Οι κόκκοι περνούν με μεγάλη ταχύτητα από ειδικούς κλιβάνους με τη βοήθεια κατάλληλου αναρροφητή. Έτσι επιτυγχάνεται στιγμιαία πύρωση χωρίς τήξη και συρρίκνωση. Κατά την διόγκωση, το ρεύμα του αέρα μεταφέρει στον κυκλώνα τα ελαφρότερα σωματίδια. Τα βαρύτερα παραμένουν χαμηλά , στην θερμή ζώνη, έως ότου διογκωθούν και ανυψωθούν με το ρεύμα του αέρα. Τα υλικά που δεν διογκώνονται όπως οψιδιανός και άστριοι παραμένουν στον πυθμένα.

#### Χρήσεις του Περλίτη

Το πεδίο εφαρμογών του περλίτη είναι τεράστιο και ολοένα διευρύνεται. Όλες όμως σχεδόν οι χρήσεις αφορούν τον διογκωμένο περλίτη που συνδυάζει ένα πλήθος ιδιοτήτων: μικρό μοριακό βάρος, τεράστια ειδική επιφάνεια και πορώδες, δυνατότητα κατεργασίας της επιφάνειας του περλίτη και μετατροπή της σε υδρόφοβη. Γενικά οι χρήσεις του περλίτη μπορούν να διαιρεθούν σε τρεις γενικές κατηγορίες: 1. κατασκευαστικές εφαρμογές 2. αγροτικές- γεωργικές εφαρμογές 3. βιομηχανικές εφαρμογές.

Στις κηπευτικές εφαρμογές ο περλίτης χρησιμοποιείται παγκοσμίως ως συστατικό για ειδικά μείγματα χώματος κυρίως με τύρφη για τη δημιουργία του κατάλληλου



υποστρώματος ανάπτυξης των φυλλωδών και ανθοφόρων καλλωπιστικών φυτών σε γλάστρες. Η επιτυχία του στη συγκεκριμένη περίπτωση οφείλεται στο συνδυασμό πολλαπλών ιδιοτήτων: παρέχει στη ριζόσφαιρα την ιδανική αναλογία αέρα και νερού καθόλη τη διάρκεια του έτους, και παρουσιάζει τις ιδανικότερες συνθήκες στράγγισης. Επίσης, αποτελεί ένα ομοιόμορφο μέσο ανάπτυξης καθιστώντας τις ρίζες πυκνότερες με ομοιόμορφη κατανομή στο υπόστρωμα (για τον θερισμό ριζοβολημάτων χρησιμοποιείται 100% περλίτης). Έρευνες έχουν δείξει πως τα υδροπονικά συστήματα βασισμένα σε περλίτη έχουν εξαιρετικές αποδόσεις.

Άλλα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει ο περλίτης στις κηπευτικές εφαρμογές είναι το ουδέτερο pH του, η στείρωσή του και το γεγονός ότι δεν επιτρέπει την ανάπτυξη αγριόχορτων. Επιπλέον, το ελαφρύ του βάρος τον καθιστά ιδανικό για καλλιέργεια σε κοντέινερ (container growing).

Άλλες αγροτικές εφαρμογές του περλίτη περιλαμβάνουν την χρήση του ως κομιστή λιπάσματος, βοτανισμάτων, φυτοφαρμάκων και για ταξινόμηση των σπόρων. Ο "κηπευτικός" περλίτης είναι εξίσου χρήσιμος στον απλό κηπουρό όσο και στον επαγγελματία αγρότη. Χρησιμοποιείται με την ίδια επιτυχία στην θερμοκηπευτική, τις χωματουργικές εφαρμογές των αγρών, τον κήπο και στα φυτά εσωτερικού χώρου του σπιτιού.

#### 3.9.4. Επιταχυντής

Οι επιταχυντές λειτουργούν ως ενεργητικά για τους μικροβιακούς πληθυσμούς, ως επιφανειακοί βιολογικοί καταλύτες και ως καταλύτες χούμους.

Συγκεκριμένα:

- Προσφέρουν τα αρχικά απαραίτητα μέταλλα (nutrients) για τη μικροβιακή δράση
- Ρυθμίζουν το pH μειώνοντας τη συγκέντρωση των οργανικών οξέων μέσα στο μείγμα.
- Λειτουργούν ως προ-οξειδωτικά μέσα
- Ευνοούν τη δράση επιλεκτικών πρωτεϊνικών αποδομητών σε υψηλές θερμοκρασίες.
- Δεσμεύουν αζωτούχα και θειικά συστατικά
- Προωθούν το σχηματισμό σταθερού ώριμου χούμους (Βογιατζιδάκη Ευγενία-Ελένη, 2006).



#### 3.9.5. Ανακύκλωση του προϊόντος

Στη μέθοδο αυτή γίνεται ανάμειξη του ανακυκλωμένου προϊόντος με την αφυδατωμένη πρώτη ύλη. Πρόκειται δηλαδή, για απλή κομποστοποίηση,

δεδομένου ότι δεν προστίθενται ογκώδη τεμάχια ή άλλα υλικά, και το ανακυκλούμενο κλάσμα προέρχεται αποκλειστικά από το ίδιο το ώριμο κόμποστ.

Η μέθοδος αυτή από μόνη της ίσως και να αποτελεί την καλύτερη για τη διεργασία μιας και το ώριμο κόμποστ διαθέτει όλα εκείνα τα απαραίτητα στοιχεία που απαιτούν οι μικροοργανισμοί, λειτουργώντας παράλληλα ως ξηραντικό δεσμεύοντας την ήδη υπάρχουσα υγρασία.



Παρά την πολυπλοκότητα του οικοσυστήματος από μικροβιακής απόψεως, οι αρχές που διέπουν συνολικά την πορεία της διεργασίας της κομποστοποίησης είναι σχετικά απλές. Αφορούν κυρίως την αναλογία πηγών άνθρακα και αζώτου, τις πιθανές ανεπιθύμητες προσμίξεις και την ορθή διαχείριση του καθεστώτος αερισμού. Δυστυχώς, ορισμένες εμπορικές μονάδες παραγωγής προϊόντων κομποστοποίησης παραβλέπουν ή δεν εφαρμόζουν σωστά τις αρχές της μεθόδου, με αποτέλεσμα να κυκλοφορούν στην αγορά προϊόντα χαμηλής ποιότητας, φυτοτοξικά και ασταθή (Α. Ανδρεαδάκης).

### 3.10. Οφέλη κομποστοποίησης

Με την κομποστοποίηση μπορούμε να συνοψίσουμε ότι οδηγούμαστε σε σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη τα κυριότερα από τα οποία είναι:

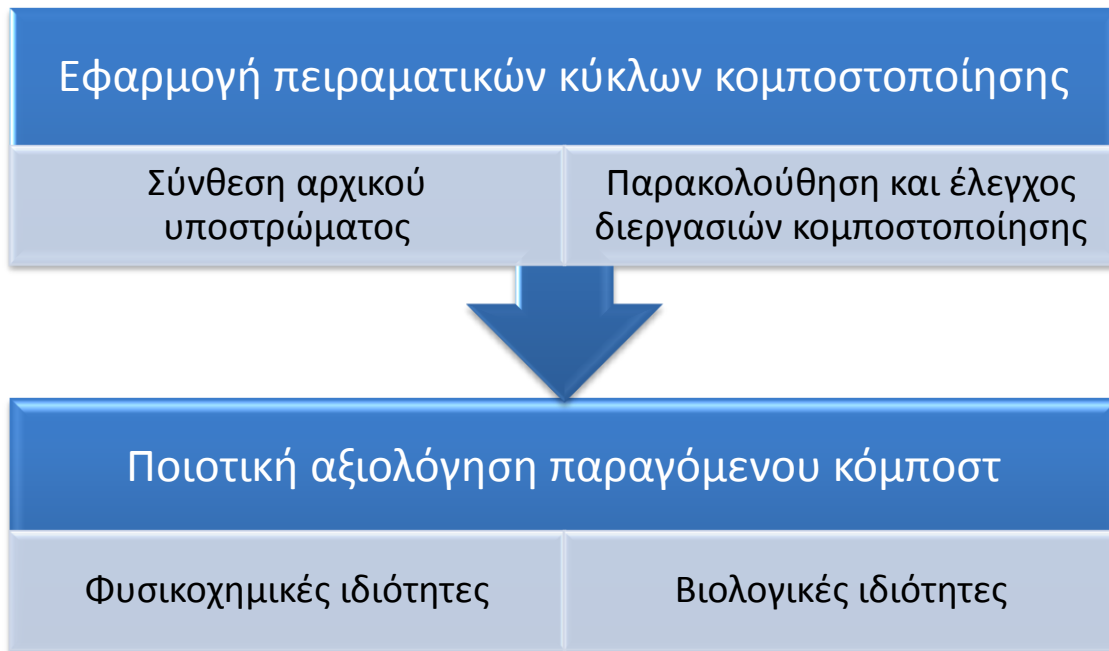
- Μείωση των οχλήσεων κατά τη συλλογή και μεταφορά των οικιακών στερεών αποβλήτων
- Μικρότερη επιβάρυνση των χώρων ταφής αποβλήτων (τόσο ποσοτικά όσο και ως προς το ρυπαντικό φορτίο) λόγω της μειωμένης ποσότητας στερεών αποβλήτων που καταλήγουν στους χώρους αυτούς, γεγονός που οδηγεί σε αύξηση του χρόνου λειτουργίας τους.
- Μειωμένη παραγωγή στραγγισμάτων στους χώρους ταφής αποβλήτων τα οποία επιπλέον, περιέχουν μικρότερο ρυπαντικό φορτίο.
- Μειωμένες αέριες εκπομπές από τους χώρους διάθεσης τόσο ποσοτικά όσο και ποιοτικά (διοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο, πτητικές οργανικές ενώσεις κ.λπ.)
- Παραγωγή προϊόντος προστιθέμενης αξίας το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές – αποφυγή της χρήσης συνθετικών λιπασμάτων
- Παραγωγή προϊόντος υψηλής ποιότητας λόγω του γεγονότος ότι προέρχεται από τη χρήση υλικών διαχωρισμένων στην πηγή (σε αντίθεση με το προϊόν που προέρχεται από οργανικό υλικό το οποίο διαχωρίζεται σε κεντρικές μονάδες μηχανικής διαλογής)

Η χωριστή συλλογή και αξιοποίηση των βιοαποδομήσιμων οργανικών αποβλήτων εντός της οικίας έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της απαιτούμενης συχνότητας για συλλογή των μικτών οικιακών αποβλήτων που τοποθετούνται στους κάδους. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για χώρες όπως η Ελλάδα όπου οι κλιματικές συνθήκες απαιτούν συχνό άδειασμα των κάδων για αποφυγή της ανάπτυξης συνθηκών αποδόμησης των αποβλήτων που συλλέγονται σε αυτούς (Texas A&M University System).

## 4. Μεθοδολογία μετρήσεων

### 4.1. Εισαγωγή

Στην παρούσα διπλωματική εργασία ερευνάται η δυνατότητα συγκομποστοποίησης ιλύος με τροφικά υπολείμματα και πρόσθετο περλίτη με σκοπό τη χρήση του τελικού ώριμου προϊόντος σαν εδαφοβελτιωτικό. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, ήταν στοχευόμενη στην ανεύρεση του κατάλληλου πρωτοκόλλου ώστε να πετύχει η ωρίμανση της ιλύος με το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Δόθηκε έμφαση στην χάραξη της βέλτιστης στρατηγικής και έγιναν οι απαραίτητες διορθωτικές ενέργειες όταν κρίθηκε απαραίτητο, ώστε το τελικό προϊόν να έχει τις θεμιτές φυσικοχημικές και βιολογικές ιδιότητες. Πιο συγκεκριμένα, στο πρώτο μέρος του πειραματικού πρωτοκόλλου που ακολουθήθηκε, ανήκε η πειραματική εφαρμογή της κομποστοποίησης ιλύος προερχόμενη από ΜΕΛ βιομηχανίας χωρίς πρόσθετα. Η αρχική σκέψη εμπεριείχε τη χρήση περλίτη στον ένα κάδο και πράσινων στον έτερο τα οποία μετά από την παράλληλη κομποστοποίηση 3 εβδομάδων θα οδηγούσαν σε μια σταθεροποιημένη ιλύ. Το τελικό προϊόν θα εξετάζονταν για τις φυσικοχημικές και βιολογικές ιδιότητές του και θα χρησιμοποιούνταν, εφόσον πληρούσε τις προϋποθέσεις, ως εδαφοβελτιωτικό. Προοικονομώντας τα αποτελέσματα των παράλληλων κομποστοποιήσεων υποθέσαμε πως τόσο ο κάδος με τον περλίτη, λόγω απουσίας άμεσα διαθέσιμου οργανικού υποστρώματος, όσο και ο κάδος με τα πράσινα, λόγω της περίσσειας κυτταρινούχων πρώτων υλών τα οποία αποτελούν τροχοπέδη στην έναρξη της θερμόφιλης φάσης, δεν θα ευδοκίμουν στην έναρξη της βιοαποικοδόμησης της ιλύος και της σταθεροποίησής της εν τέλει. Τα πειραματικά αποτελέσματα αν συνέπιπταν με τις υποθέσεις μας θα επιβεβαίωναν το ότι η κομποστοποίηση ιλύος χρειάζεται ένα εναρκτήριο διαθέσιμο οργανικό ποσό, ικανό και αναγκαίο για τον μεταβολισμό των μικροοργανισμών. Σε αυτό το σενάριο, όπως και θα δούμε στο κεφάλαιο με τα πειραματικά αποτελέσματα, θα έπρεπε να διορθώσουμε τη στρατηγική της κομποστοποίησης σε συγκομποστοποίηση με πρόσθετα που θα παρέχουν ένα στοιχειώδες οργανικό υπόστρωμα, όπως τα τροφικά υπολείμματα. Σε τακτικό επίπεδο θα τοποθετούσαμε δύο παράλληλους κάδους με ιλύ από την βιομηχανική ΜΕΛ και τροφικά υπολείμματα σε διαφορετικές συγκεντρώσεις (πάντα με πρόσθήκη περλίτη) ώστε να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα για τους δύο βιοαντιδραστήρες και να εξάγουμε πολύτιμα συμπεράσματα για την ποιότητα των τελικών ώριμων προϊόντων. Τέλος, στο στάδιο αξιολόγησης του συστήματος κομποστοποίησης θα γινόταν ποιοτικός και ποσοτικός έλεγχος του τελικού προϊόντος ως προς τις φυσικοχημικές και βιολογικές ιδιότητες για τον καθορισμό του βαθμού σταθεροποίησης και ωριμότητάς του.



Σχήμα 4.1 Διαγραμματική απεικόνιση μεθοδολογίας της διπλωματικής εργασίας

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας. Ειδικότερα αναλύεται το πρότυπο σύστημα οικιακής κομποστοποίησης, το οποίο σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από τη Μονάδα Επιστήμης και Τεχνολογίας Περιβάλλοντος του Ε.Μ.Π., η σύσταση της ύλης που χρησιμοποιήθηκε σαν υπόστρωμα για τη διαδικασία της κομποστοποίησης, τα όργανα μέτρησης, οι αναλυτικές μέθοδοι για τη διεξαγωγή των πειραμάτων και οι μέθοδοι υπολογισμού των αποτελεσμάτων.

#### 4.2. Το πρότυπο σύστημα οικιακής κομποστοποίησης οργανικού κλάσματος απορριμμάτων



Εικόνα 4.1 Πρότυπο σύστημα οικιακής κομποστοποίησης (Comwaste, 2006)

Ο κάδος κομποστοποίησης οργανικών απορριμμάτων (εικόνα 4.1) είναι κατασκευασμένος από ανοξείδωτο χάλυβα και έχει χωρητικότητα 60 λίτρα.

Στον άξονα ανάδευσης είναι ενσωματωμένα 4 πτερύγια, 2 κυλινδρικά στο πάνω μέρος του άξονα με σκοπό την ανάδευση του υλικού και 2 λεπίδες στο κάτω τμήμα του άξονα για τον τεμαχισμό του υλικού και την διοχέτευση του έτοιμου προϊόντος προς τα συρτάρια συλλογής.

Μετά τη διεξαγωγή του πρώτου κύκλου πειραμάτων, κρίθηκε σκόπιμη η επέμβασή μας σε νευραλγικούς τομείς του κάδου. Συγκεκριμένα, έγινε αφαίρεση του τμήματος τροφοδοσίας υλικού και ενίσχυση των πτερυγίων του κάδου με ηλεκτροσυγκόλληση ούτως ώστε να ανταπεξέλθουν στον αυξημένο όγκο του υλικού. Οι παρεμβάσεις αυτές είχαν ως αποτέλεσμα την αύξηση του όγκου του κάδου σε 75 λίτρα καθώς και την ευκολότερη πρόσβαση των υλικών και των οργάνων μέτρησης (θερμόμετρο, οξυγονόμετρο, μετρητής CO<sub>2</sub>).

Ο αντιδραστήρας κομποστοποίησης έχει σχεδιαστεί για να δέχεται αποκλειστικά το οργανικό κλάσμα από τα απορρίμματα που καθημερινά παράγουμε.

Ως «οργανικά απορρίμματα» θεωρούνται όλα εκείνα τα υπολείμματα των τροφών τα οποία με την πάροδο του χρόνου υπόκεινται σε αποσύνθεση. Σε αυτά δεν περιλαμβάνονται κανένα είδος συσκευασίας.

Μερικοί χαρακτηριστικοί τύποι οργανικών απορριμμάτων που μπορούν να τροφοδοτήσουν τον κάδο κομποστοποίησης περιλαμβάνουν:

- Στυμμένα λεμόνια, πορτοκάλια και άλλα εσπεριδοειδή
- Φλούδες και κοτσάνια, φρούτων και λαχανικών, όπως ντομάτες, κρεμμύδια, μήλα καρπούζια, λάχανα, χορταρικά κ.ά.
- Ληγμένα ή μουχλιασμένα τρόφιμα, αφού προηγουμένως αφαιρεθεί η συσκευασία τους
- Μουχλιασμένο ή ξερό ψωμί και τυρί
- Στάχτη (όχι όμως αποσίγαρα)
- Ξερά φύλλα από τα λουλούδια ή από καθαρισμό του κήπου
- Αποφάγια που δεν καταναλώθηκαν κατά τη διάρκεια ενός γεύματος,
- Τσόφλια αυγών, λίπη από κρέατα.

Ο κάδος δεν τροφοδοτείται με:

- Κόκαλα από κρέας, κοτόπουλο, ψάρι και όστρακα θαλασσινών
- Πλαστικό (σακούλες, συσκευασίες τροφίμων, μπουκάλια νερού, αναψυκτικών κ.ά.)
- Γυαλί και κεραμικά (μπουκάλια ποτών, σπασμένα πιάτα, ποτήρια κ.ά.)
- Χαρτόνι (χάρτινες συσκευασίες, μπουκάλια γάλακτος, αναψυκτικών κ.ά.)
- Μέταλλα (κουτάκια αναψυκτικών, κονσέρβες κ.ά.)

- Ξύλο
- Χημικά (απορρυπαντικά κ.α.)

Ότι προστίθεται στον κάδο πρέπει να τεμαχίζεται (1-2cm). Αυτό γίνεται για να επιταχυνθούν οι διεργασίες βιοαποδόμησης, και για να πραγματοποιείται πιο εύκολα η περιστροφή του άξονα.

### 4.3. Σύσταση και Προέλευση ιλύος

Ανάλογα με το στάδιο επεξεργασίας των λυμάτων η ιλύς διακρίνεται σε (α) πρωτοβάθμια, η οποία παράγεται κατά την πρωτοβάθμια επεξεργασία των λυμάτων, (β) βιολογική, η οποία παράγεται κατά τη δευτεροβάθμια επεξεργασία των λυμάτων, (γ) μικτή, η οποία παράγεται τόσο κατά την πρωτοβάθμια όσο και κατά τη δευτεροβάθμια επεξεργασία των λυμάτων και (δ) τριτοβάθμια, η οποία παράγεται κατά την τριτοβάθμια επεξεργασία.

Η πρωτοβάθμια επεξεργασία περιλαμβάνει συνήθως εσχάρωση, αφαίρεση άμμου ή επιπλεόντων υλικών, λιποσυλλογή και πρωτοβάθμια καθίζηση. Ο πρωτοβάθμιος καθαρισμός μπορεί να ελαττώσει το ρυπαντικό φορτίο (οργανικά, στερεά), κατά μέσο όρο, από 35% έως 50% περίπου.

Σε ότι αφορά στη δευτεροβάθμια επεξεργασία, αυτή στοχεύει στην απομάκρυνση όσο κατά το δυνατό περισσότερων διαλυμένων ουσιών και επιτελείται συνήθως με βιολογική αποδόμηση των οργανικών ουσιών και στη συνέχεια απομάκρυνση των σχηματιζόμενων αιωρημάτων με δευτεροβάθμια καθίζηση. Η ελάττωση του ρυπαντικού φορτίου (BOD<sub>5</sub>, αιωρούμενα στερεά, κωλοβακτηριοειδή), κατά τη δευτεροβάθμια επεξεργασία (σε συνδυασμό με την πρωτοβάθμια) είναι κατά μέσο όρο της τάξεως του 90%.

Τέλος η τριτοβάθμια επεξεργασία αφορά στην περαιτέρω μείωση της συγκέντρωσης οργανικών ουσιών, αζωτούχων και φωσφορούχων ενώσεων, βαρέων μετάλλων, τοξικών ουσιών και παθογόνων μικροοργανισμών και ιών.

Η ιλύς παραλήφθηκε δειγματοληπτικά από δευτεροβάθμια επεξεργασία λυμάτων και συνεπώς είναι βιολογική ιλύς. Η ιλύς όταν φτάσει μία συγκεκριμένη συγκέντρωση πτητικών αιωρούμενων στερεών (VSS), αντλείται προς το φρεάτιο απολάσπωσης όγκου 2,52 m<sup>3</sup>. Από εκεί μέρος του μικτού υγρού οδεύει προς επανακυκλοφορία στη δεξαμενή αερισμού ενώ το υπόλοιπο οδηγείται στις κλίνες ξήρανσης. Η ημερήσια ποσότητα της εισερχόμενης ιλύος στις κλίνες ξήρανσης δεν ξεπερνά το 1 m<sup>3</sup> / ημέρα.

Σημειώνεται ότι δεν έχει πραγματοποιηθεί πρωτοβάθμια επεξεργασία στην ιλύ πριν τη δευτεροβάθμια επεξεργασία και συνεπώς δεν επιτυγχάνεται πλήρως η

απομάκρυνση επιπλεόντων καθώς και αιωρούμενα οργανικά και ανόργανα στερεά για να μειωθεί το ρυπαντικό φορτίο που προορίζεται για τα επόμενα στάδια.

#### 4.3.1. Μεθοδολογία δειγματοληψιών και αναλύσεων ιλύος

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής πραγματοποιήθηκαν δειγματοληψίες από κλίνες ξήρανσης όπου γίνεται η απόθεση της ιλύος προκειμένου να εξεταστούν τα χαρακτηριστικά της. Επιπλέον, διεξήχθησαν πειραματικές δοκιμές για την αερόβια σταθεροποίηση της ιλύος με σκοπό τη χρήση της ως εδαφοβελτιωτικό. Τέλος, μελετήθηκε η φυτοτοξικότητα της ανεπεξέργαστης παραγόμενης ιλύος καθώς και η φυτοτοξικότητα της επεξεργασμένης ιλύος μετά τη χρήση προσθέτων.

Για τη μελέτη των χαρακτηριστικών της ιλύος έγιναν δειγματοληψίες από τις κλίνες ξήρανσης όπου γίνεται η απόθεση της ιλύος. Μετά τη λήψη των δειγμάτων έγινε ποιοτική ανάλυση για το χαρακτηρισμό της ιλύος.

Μετά από κάθε δειγματοληψία τα δείγματα μεταφέρονταν στο εργαστήριο της Μονάδας Περιβαλλοντικής Επιστήμης και Τεχνολογίας για τη διεξαγωγή των απαιτούμενων αναλύσεων. Οι παράμετροι που αναλύθηκαν καθώς και οι μέθοδοι προσδιορισμού και τα πρότυπα που ακολουθήθηκαν παρουσιάζονται στον πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1 Παράμετροι, Μέθοδοι Προσδιορισμού και Πρότυπα Αναλύσεων

| Παράμετροι          | Μέθοδος Προσδιορισμού   | Πρότυπο  | Όργανο μέτρησης   |
|---------------------|---|--|---|
| pH                  | Ηλεκτρομετρικός προσδιορισμός του pH                              |  | Mettler Toledo MCC 227  |
| Υγρασία             |   |  | Ζυγός Mettler Toledo PB 303-S<br>Φούρνος Carbolite                                |
| TOC                 | Προσδιορισμός ολικού οργανικού άνθρακα (TOC) σε ιλύες και ιζήματα | Standard methods 5310B                                 | Συσκευή Προσδιορισμού οργανικού άνθρακα TOC-V <sub>CSH</sub><br>Shimadzu SSM 5500 |
| NH <sub>4</sub> - N | Προσδιορισμός ιοντοεναλλάξιμου αμμωνιακού αζώτου                  |  | Συσκευή απόσταξης Gerhardt Vapodest 30s   |
| NO <sub>3</sub> - N | Προσδιορισμός νιτρικού αζώτου κατά KJELDAHL                       | DIN 19684<br>US Standard methods 4500-N <sub>org</sub> | Συσκευή χώνευσης Gerhardt Kjeldatherm<br>Συσκευή απόσταξης Gerhardt Vapodest 30s  |
| TKN                 | Προσδιορισμός ολικού αζώτου κατά KJELDAHL                         | DIN 19684<br>US Standard methods 4500-N <sub>org</sub> | Συσκευή χώνευσης Gerhardt Kjeldatherm<br>Συσκευή απόσταξης Gerhardt Vapodest 30s  |



| Παράμετροι | Μέθοδος Προσδιορισμού                                 | Πρότυπο                  | Όργανο μέτρησης   |
|------------|---|--------------------------|---|
| VSS        |   |                          | Ζυγός Mettler Toledo PB 303-S<br>Φούρνος Barnstead<br>Thermolyne                    |
| Μέταλλα    | Φασματοφωτομετρία ατομικής απορρόφησης (AAS) με φλόγα | US Standard methods 3111 | Συσκευή χώνευσης HACH<br>Dijesdahl<br>Συσκευή Ατομικής Απορρόφησης Agilent AA 240FS |

#### 4.4. Μεθοδολογία δειγματοληψιών και αναλύσεων

Η δειγματοληψία, συντήρηση και ανάλυση των δειγμάτων για τον ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό των ρυπαντικών παραμέτρων έγινε σύμφωνα με το πρωτόκολλο δειγματοληψιών και διεξαγωγής αναλύσεων της Μονάδας Περιβαλλοντικής Επιστήμης και Τεχνολογίας του ΕΜΠ το οποίο βασίζεται σε πρότυπες μεθόδους όπως αυτές καθορίζονται από τις Κοινοτικές Οδηγίες, το Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης (ISO), το Δημόσιο Αμερικάνικο Οργανισμό Υγείας (APHA), τον Αμερικάνικο Οργανισμό Εργασιών σχετικά με το Νερό (AWWA), την Ομοσπονδία Προστασίας Ρύπανσης του Νερού (WPCF), καθώς και τον Εθνικό Οργανισμό Τυποποίησης (ΕΛΟΤ).

Η διενέργεια της δειγματοληψίας έγινε δια χειρός και αφορά στις περισσότερες των περιπτώσεων σε στιγμιαία δείγματα. Η ποσότητα του δείγματος ήταν επαρκής τόσο για τη διενέργεια των χημικών αναλύσεων, όσο και για τις επαναληπτικές μετρήσεις (εξασφάλιση επαναληψιμότητας μέτρησης).

Μετά τη δειγματοληψία, ακολουθούσε άμεση μεταφορά των δειγμάτων στο εργαστήριο και κατάλληλη συντήρηση και αποθήκευση μέχρι τη διενέργεια των απαιτούμενων αναλύσεων. Για ορισμένες παραμέτρους, κρίθηκε απαραίτητος ο άμεσος προσδιορισμός τους, ενώ για άλλες ακολούθησε κατάλληλη συντήρηση του δείγματος. Με τον τρόπο αυτό, επιβραδύνονται οι βιολογικές δράσεις, η υδρόλυση των χημικών ενώσεων και συμπλόκων, ενώ μειώνεται η πτητικότητα ορισμένων συστατικών του δείγματος.

Η επιλογή της μεθόδου έγινε λαμβάνοντας υπόψη το είδος και το αναμενόμενο εύρος συγκέντρωσης των ρυπαντικών παραμέτρων καθώς και την ελαχιστοποίηση των πιθανών παρεμβολών και αλληλεπιδράσεων από διάφορες ουσίες που μπορεί να συνυπάρχουν στο δείγμα με την προς μέτρηση ουσία.

Τα όργανα μέτρησης καθώς και το όριο ανίχνευσης των παραμέτρων που μετρήθηκαν στα ληφθέντα δείγματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2 Όργανα μέτρησης και όρια ανίχνευσης παραμέτρων

| Παράμετροι                 | Όργανο μέτρησης   | Όριο ανίχνευσης |
|----------------------------|---|-----------------|
| pH                         | Mettler Toledo MCC 227                                  | -               |
| Αγωγιμότητα                |   | -               |
| TDS (mg/L)                 | Mettler Toledo PB 303-S                                 | 0,020 mg/L      |
| TSS (mg/L)                 |   | 0,020 mg/L      |
| BOD (mg/L)                 | Οξυγονόμετρο YSI ProODO                                 | -               |
| COD (mg/L)                 | Φασματοφωτόμετρο Merck Spectroquant NOVA60              | 4,000 mg/L      |
| Φαινόλες                   |   | 0,025 mg/L      |
| CN (mg/L)                  |   | 0,002 mg/L      |
| Cl <sub>2</sub> – ελεύθερο |   | 0,030 mg/L      |
| NH <sub>4</sub> – N        |   | 0,010 mg/L      |
| NO <sub>2</sub> – N        |   | 0,010 mg/L      |
| NO <sub>3</sub> – N        |   | 0,200 mg/L      |
| Cr(VI) (mg/L)              | Chromate Test Kit Merck No 114758                       | 0,010 mg/L      |
| Cr (mg/L)                  | Varian AA240 FS<br>Flame atomic absorption spectroscopy | 0,020 mg/L      |
| Cu (mg/L)                  |   | 0,010 mg/L      |
| Mn (mg/L)                  |   | 0,002 mg/L      |
| Fe (mg/L)                  |   | 0,020 mg/L      |
| Ni (mg/L)                  |   | 0,010 mg/L      |
| Cd (mg/L)                  |   | 0,002 mg/L      |
| Pb (mg/L)                  |   | 0,050 mg/L      |
| Zn (mg/L)                  |   | 0,005 mg/L      |

Συμβολισμοί που χρησιμοποιούνται κατά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων:  
**n.m.:** not measured, δεν πραγματοποιήθηκε μέτρηση για τη συγκεκριμένη παράμετρο

**n.d.:** not detected, δεν ανιχνεύθηκε η εν λόγω παράμετρος από το όργανο μέτρησης

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων από τις δειγματοληψίες.

Κατά τη διάρκεια της διεργασίας και στο τελικό προϊόν πραγματοποιήθηκαν συνολικά οι παρακάτω αναλύσεις:

- Θερμοκρασία (°C)
- Υγρασία (%wb)
- pH
- Ηλεκτρική αγωγιμότητα (μSiemens)
- Πτητικά στερεά (VSS)

- Ολικός οργανικός άνθρακας (TOC)
- Ολικό άζωτο κατά Kheldahl (TKN)
- Νιτρικά ( $NO_3^- - N$ )
- Αμμωνιακά ( $NH_4^+ - N$ )
- Αναλογία C/N
- Βαρέα μέταλλα και ιχνοστοιχεία (K, Na, Ca, Mg)
- Φυτοτοξικότητα

Σε καθημερινή βάση έγινε μέτρηση θερμοκρασίας, υγρασίας, pH και αγωγιμότητας, ανά δύο μέρες έγινε μέτρηση των VSS, του TOC και του TKN και ανά 4 μέρες έγιναν μετρήσεις  $NO_3$  και  $NH_4$ .

#### 4.4.1. Προσδιορισμός θερμοκρασίας

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



Εικόνα 4.2 Ψηφιακό θερμόμετρο

#### 4.4.2. Προσδιορισμός υγρασίας

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

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

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

Όπου:

$M_k$ : η μάζα της κάψας (g).

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

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

#### 4.4.3. Προσδιορισμός pH

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



Εικόνα 4.3 Πεχάμετρο και Αγωγιμόμετρο

#### 4.4.4. Προσδιορισμός ηλεκτρικής αγωγιμότητας

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

#### 4.4.5. Προσδιορισμός πτητικών στερεών (VSS)

Δείγμα στο οποίο έχει προηγηθεί ξήρανση στους 105°C λιотριβείται και ζυγίζεται περίπου 1 g σε πορσελάνινες κάψες. Το δείγμα ξηραίνεται στους 550°C για 20 λεπτά. Τα πτητικά στερεά υπολογίζονται από τη διαφορά μάζας πριν και μετά την ξήρανση στους 550°C.



Εικόνα 4.4 Φούρνος μέτρησης πτητικών στερεών

Το επί τοις εκατό (%) ποσοστό πτητικών στερεών του δείγματος δίνεται από το λόγο της παραπάνω διαφοράς προς το αρχικό βάρος του δείγματος και συγκεκριμένα

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

Όπου:

$M_k$ : η μάζα της κάψας ( $g$ ).

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

$M_{c,2}$ : η τελική μάζα δείγματος μετά από ξήρανση στους  $550^{\circ}C$  ( $g$ ).

#### 4.4.6. Προσδιορισμός ολικού οργανικού άνθρακα (TOC)

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

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

Όπου:

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

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

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

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



Εικόνα 4.5 Συσκευή αυτόματου προσδιορισμού ολικού οργανικού άνθρακα (TOC) της εταιρείας Shimadzu

#### 4.4.7. Προσδιορισμός ολικού αζώτου κατά Kjeldahl (TKN)

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

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

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

Ο σωλήνας, στη συνέχεια, προσαρμόζεται στην ειδική συσκευή απόσταξης Varodest 30s της εταιρείας



Εικόνα 4.6 Συσκευή Χώνευσης

Gerhardt.

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



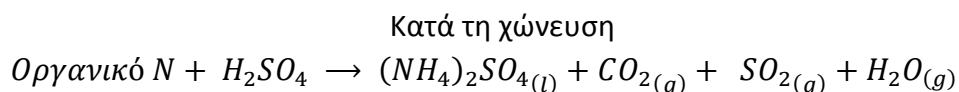
Εικόνα 4.7 συσκευή απόσταξης Vapodest 30s της εταιρίας Gerhardt.

Η τιτλοδότηση ολοκληρώνεται μόλις παρατηρηθεί αλλαγή του χρώματος, από magenta σε ανοιχτό πράσινο. Παράλληλα εκτελείται και τυφλός προσδιορισμός.

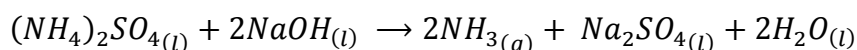


Εικόνα 4.8 (αριστερά)πριν την τιτλοδότηση, (δεξιά) μετά την τιτλοδότηση

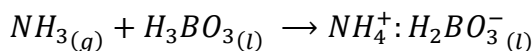
Οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά την χώνευση, την απόσταξη και την τιτλοδότηση παρατίθενται αναλυτικά παρακάτω.



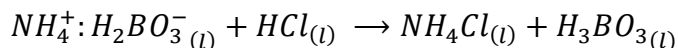
Κατά την απόσταξη



Κατά την συλλογή του αποστάγματος



Κατά την τιτλοδότηση



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

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

Όπου:

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

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

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

$m$ : η αρχική μάζα του δείγματος ( $g$ ). (Μαργαρίτης Μάρκος, 2007)

#### 4.4.8. Προσδιορισμός νιτρικών

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

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

Δείγμα στο οποίο έχει προηγηθεί ξήρανση στους  $105^\circ C$  λιотριβείται και ζυγίζονται  $1,5 \text{ g}$ . Το δείγμα τοποθετείται σε ειδικό σωλήνα χώνευσης και στη συνέχεια προστίθενται ταμπλέτες  $5 \text{ g}$  που περιέχουν τους καταλύτες, (θειικό άλας χαλκού  $CuSO_4$  και σελήνιο  $Se$ ), και  $20 \text{ ml}$  πυκνού θειικού οξέος ( $H_2SO_4$  98%). Εν συνεχεία προσθέτουμε περίπου  $0,2 - 0,3 \text{ g}$  κράματος Devarda. Το κράμα Devarda, κατά τη



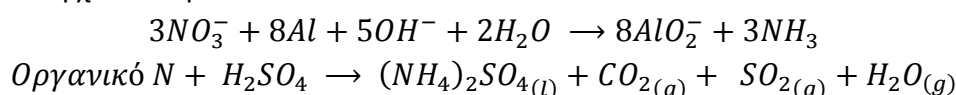
διάρκεια της χώνευσης, μετατρέπει τα νιτρικά ανιόντα  $NO_3^-$  σε αμμωνία  $NH_3$ . Ο σωλήνας με το περιεχόμενό του τοποθετούνται στην ειδική συσκευή χώνευσης KJELDATHERM.

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

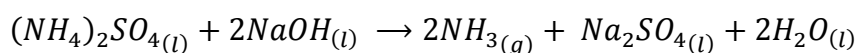
Ο σωλήνας, στη συνέχεια, προσαρμόζεται στην ειδική συσκευή απόσταξης VaroDest 30s. Για τη συλλογή του αποστάγματος χρησιμοποιείται κωνική φιάλη των 250 ml μέσα στην οποία έχουν προστεθεί 50 ml βορικού οξέος  $H_3BO_3$  2% w/v. Η συσκευή απόσταξης, μέσω ρυθμιζόμενου προγράμματος διοχετεύει περίσσεια διαλύματος καυστικού νατρίου  $NaOH$  32% w/v και απιονισμένου νερού. Κατά τη διάρκεια της ανάμειξης του θειικού αμμωνίου  $(NH_4)_2SO_4$  με το καυστικό νάτριο  $NaOH$ , απελευθερώνεται αέρια αμμωνία  $NH_3$  η οποία με τη διαδικασία της απόσταξης παγιδεύεται από το βορικό οξύ  $H_3BO_3$ . Στη συνέχεια γίνεται τιτλοδότηση με πρότυπο διάλυμα  $HCl$  0,1N. Χρησιμοποιούνται 3-5 σταγόνες από μεικτό προπαρασκευασμένο δείκτη που περιέχει ερυθρό του μεθυλίου και μπλε του μεθυλενίου. Η τιτλοδότηση ολοκληρώνεται μόλις παρατηρηθεί αλλαγή του χρώματος, από magenta σε ανοιχτό πράσινο. Παράλληλα εκτελείται και λευκός προσδιορισμός.

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

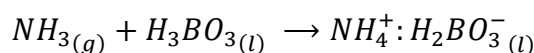
Κατά τη χώνευση



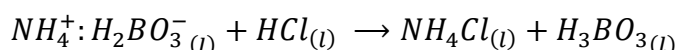
Κατά την απόσταξη



Κατά την συλλογή του αποστάγματος



Κατά την τιτλοδότηση



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

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

Όπου:

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

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

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

$m$ : η αρχική μάζα του δείγματος ( $g$ ).

Τέλος η επί τις εκατό περιεκτικότητα του δείγματος σε νιτρικά  $NO_3^-$  υπολογίζεται από τη σχέση:  $\%NO_3^- = \%N - \%TKN$  (Μαργαρίτης Μάρκος, 2007).

#### 4.4.9. Προσδιορισμός αμμωνιακών

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

Στη συγκεκριμένη μέθοδο υπολογισμού αμμωνιακών χρησιμοποιούνται τα παρακάτω αντιδραστήρια:

Διάλυμα βορικού οξέος  $H_3BO_3$  2% w/v

2-4 σταγόνες από μεικτό προπαρασκευασμένο δείκτη που περιέχει ερυθρό του μεθυλίου και μπλε του μεθυλενίου

Ετερογενές διάλυμα υδροξειδίου του μαγνησίου  $MgOH$ . Θερμαίνονται  $17 \text{ g } MgO$  στους  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  για 2 ώρες. Εν συνεχεία η ποσότητα αφήνεται να ψυχθεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος μέσα σε αφυγραντήρα. Τέλος διαλύονται τα  $17 \text{ g}$  σε  $100 \text{ ml}$  νερού.

Οκτανδιόλη. Χρησιμοποιείται για τη μείωση του αφρισμού.

Διάλυμα χλωριούχου καλίου  $KCl$  2M. Διαλύονται  $745,51 \text{ g}$  στερεού χλωριούχου καλίου  $KCl$  σε  $5 \text{ lt}$  απιονισμένου νερού.

Διάλυμα θειικού οξέος  $H_2SO_4$  0,005M

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

Στο σωλήνα χώνευσης πάλι με τη χρήση πιπέτας εκχύνονται 6 ml διαλύματος υδροξειδίου του μαγνησίου  $MgOH$  και μερικές σταγόνες οκτανδιόλης.

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

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

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

Όπου:

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

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

$V_a$ : ο αρχικός όγκος του δείγματος (ml).

#### 4.4.10. Προσδιορισμός αναλογίας C/N

Η αναλογία C/N υπολογίζεται από την σχέση:

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

#### 4.4.11. Προσδιορισμός βαρέων μετάλλων και ιχνοστοιχείων

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

Η διαδικασία της χώνευσης περιγράφεται ως εξής:

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



Εικόνα 4.9 Συσκευή χώνευσης Digesdahl Digestion

Το διάλυμα φέρεται με απιονισμένο νερό σε όγκο συνήθως 15 ml και σε αυτό προσδιορίζονται τα μέταλλα στο φασματοφωτόμετρο της ατομικής απορρόφησης Agilent Technologies 200 Series AA 240FS.



Εικόνα 4.10 Ατομική απορρόφηση AAS

#### 4.4.12. Προσδιορισμός φυτοτοξικότητας

Η φυτοτοξικότητα χαρακτηρίζεται από την παρουσία τοξικών ουσιών στο κόμποστ, που είναι επιβλαβείς για την ισόρροπη και ανεμπόδιση ανάπτυξη των φυτών. Ο προσδιορισμός της φυτοτοξικότητας στο τελικό προϊόν δείχνει εάν αυτό έχει σταθεροποιηθεί πλήρως και επιπλέον εάν οι διεργασίες κομποστοποίησης έχουν εξελιχθεί ομαλά. Οι φυτοτοξίνες είναι δυνατόν να προκαλέσουν την καταστροφή των ριζικών συστημάτων των φυτών, όταν μη σταθεροποιημένο κόμποστ έρθει άμεσα σε επαφή με το έδαφος.

Η φυτοτοξικότητα μπορεί να δημιουργηθεί από την παρουσία βαρέων μετάλλων, διαλυτών αλάτων και οργανικών και ανόργανων ενώσεων. Επίσης φυτοτοξικές ενώσεις κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης μπορούν να δημιουργηθούν ως αποτέλεσμα αναερόβιων συνθηκών, οι οποίες απορρέουν από ανεπαρκή αερισμό ή υπερβολική υγρασία. Ένα αποτέλεσμα του αναερόβιου μεταβολισμού είναι η παραγωγή οργανικών οξέων με μικρό μοριακό βάρος, όπως είναι το οξικό, το προπιονικό και το βουτυρικό οξύ. Η φυτοτοξικότητα που προκαλείται από οργανικές ενώσεις που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης μπορεί να αντιμετωπιστεί με την αύξηση της περιόδου της αερόβιας αποδόμησης.

Για τη συγκεκριμένη μέθοδο υπολογισμού φυτοτοξικότητας χρησιμοποιούνται τα παρακάτω αντιδραστήρια:

- Τρυβλία.
- Σπόροι.
- Διηθητικό χαρτί (Whatman #1).
- Απιονισμένο νερό.
- Ψυγείο  $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$  (σκοτεινός θάλαμος).
- Χάρακας.

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

- 10g φρέσκου compost ζυγίζονται.
- Προστίθενται 100ml  $\text{H}_2\text{O}$ .
- Ανάδευση για 30 λεπτά.
- Φυγοκέντρηση στις 3000rpm για 10 λεπτά.
- Διήθηση υπό κενό με Whatman 41 (20 – 25  $\mu\text{m}$ ).
- Σε δύο τρυβλία (Petri dish) τοποθετείται διηθητικό χαρτί (Whatman 1).
- 20 σπόροι μαρουλιού τύπου PARRIS ISLAND COS (σε κάθε τρυβλίο) τοποθετούνται σε διάταξη ώστε να ισαπέχουν μεταξύ τους.
- Προστίθενται 10ml  $\text{H}_2\text{O}$  και 10ml extract αντίστοιχα.
- Τοποθετούνται σε ψυγείο ( $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ) όπου επικρατούν συνθήκες σκότους για 5 ημέρες.
- Καταμέτρηση αριθμού σπόρων όπου έχουν βλαστήσει.
- Καταμέτρηση μήκους βλαστών.



Εικόνα 4.11 Τριβλία με σπόρια μαρουλιού

Ο δείκτης βλάστησης υπολογίζεται σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$\text{Δείκτης βλάστησης } \Delta.B. (\%) = \frac{G * L}{G_0 * L_0} * 100 \quad (1), \text{ όπου:}$$

**G**: ο μέσος όρος του αριθμού των σπόρων που βλάστησαν στο υπό εξέταση δείγμα

**G<sub>0</sub>**: ο μέσος όρος των σπόρων που βλάστησαν στα δείγματα αναφοράς

**L**: ο μέσος όρος του μήκους των ριζών των σπόρων που βλάστησαν στο υπό εξέταση δείγμα

**L<sub>0</sub>**: ο μέσος όρος του μήκους των ριζών των σπόρων που βλάστησαν στα δείγματα αναφοράς.

Για το δείκτη βλαστικότητα ισχύει:

|                                    |                             |
|------------------------------------|-----------------------------|
| $0 < \Delta.B. < 25 \rightarrow$   | πολύ φυτοτοξικό             |
| $26 < \Delta.B. < 65 \rightarrow$  | φυτοτοξικό                  |
| $66 < \Delta.B. < 100 \rightarrow$ | μή φυτοτοξικό               |
| $\Delta.B. > 101 \rightarrow$      | φυτοδιέγερση – φυτοθρεπτικό |

## 5. Ανάλυση και Επεξεργασία Πειραματικών Αποτελεσμάτων

### 5.1. Εισαγωγή

Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης διερευνήθηκε η δυνατότητα βελτίωσης της ποιότητας της παραγόμενης ιλύος με τη μέθοδο της κομποστοποίησης σε συνδυασμό με τη χρήση προσθέτων. Το σύστημα κομποστοποίησης που σχεδιάστηκε χωρίστηκε στο στάδιο παρακολούθησης των κύκλων κομποστοποίησης στους αντιδραστήρες και στην αξιολόγηση του τελικού προϊόντος με γνώμονα τις φυσικές, χημικές και βιολογικές του ιδιότητές ώστε να εξαχθούν βάσιμα συμπεράσματα τόσο για την αποδοτικότητα των διεργασιών όσο και για την λειτουργικότητα του συστήματος.

Στο παρών κεφάλαιο παρατίθενται τα πειραματικά αποτελέσματα που λήφθηκαν με τη χρήση των μεθόδων του προηγούμενου κεφαλαίου. Διεξήχθησαν δύο κύκλοι πειραμάτων. Ο κάθε κύκλος αποτελείται από μετρήσεις που έγιναν σε 2 αντιδραστήρες. Τα αρχικά υλικά πλήρωσης των δύο κύκλων ήταν κοινά, ενώ διέφεραν τα πρόσθετα υλικά. Παρακάτω ακολουθεί λεπτομερής καταγραφή των αποτελεσμάτων των δύο κύκλων, συνοδευόμενα από τα σχετικά διαγράμματα (συγκριτικά διαγράμματα παραμέτρων στους 2 αντιδραστήρες).

### 5.2. Πειραματικά αποτελέσματα παρακολούθησης ποιότητας παραγόμενης ιλύος

Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων των επτά (7) δειγμάτων που ελήφθησαν από την ιλύ που παράγεται από τη ΜΕΛ παρατηρήθηκαν τιμές μετάλλων με υψηλές συγκεντρώσεις και μεγάλη διακύμανση όπως το χρώμιο του οποίου οι συγκεντρώσεις κυμαίνονταν από 225 έως 4053 mg/kg, ο σίδηρος με συγκεντρώσεις 166-6271 mg/kg και το μαγγάνιο με συγκεντρώσεις 202-3658 mg/kg.

Για τα υπόλοιπα μέταλλα (χαλκός, μόλυβδος, ψευδάργυρος, κάδμιο και νικέλιο) οι συγκεντρώσεις κυμαίνονταν σε χαμηλότερα επίπεδα.

Πίνακας 5.1 Γενικά χαρακτηριστικά της ιλύος και συγκεντρώσεις μετάλλων

| Παράμετροι           | Δείγματα ανά ημέρα δειγματοληψίας |                       |                       |                      |                      |                      |                      |
|----------------------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                      | 5/1/2011<br>Δείγμα 1              | 16/3/2011<br>Δείγμα 2 | 31/3/2011<br>Δείγμα 3 | 6/4/2011<br>Δείγμα 4 | 6/4/2011<br>Δείγμα 5 | 6/4/2011<br>Δείγμα 6 | 6/4/2011<br>Δείγμα 7 |
| Υγρασία %            | 89,0                              | 75,6                  | 74,0                  | -                    | -                    | -                    | -                    |
| pH                   | 7,35                              | 5,35                  | 5,98                  | -                    | -                    | -                    | -                    |
| Αγωγιμότητα<br>μS/cm | 363                               | -                     | 1940                  | -                    | -                    | -                    | -                    |



|                                     |       |        |        |       |        |        |        |
|-------------------------------------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
| <b>TOC %</b>                        | 38,5  | 50     | 47     | -     | -      | -      | -      |
| <b>VSS %</b>                        | 70,4  | 72     | 68     | -     | -      | -      | -      |
| <b>TKN %</b>                        | 1,59  | 2,36   | 3,03   | -     | -      | -      | -      |
| <b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup> %</b> | 0,26  | 0,62   | -      | -     | -      | -      | -      |
| <b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup> %</b> | 1,12  | -      | -      | -     | -      | -      | -      |
| <b>Cr mg/kg</b>                     | 426,3 | 973,2  | 4053   | 225,2 | 2132   | 1705   | 1294,5 |
| <b>Cu mg/kg</b>                     | 273,6 | 375,4  | 471,4  | 327,6 | 320,3  | 305,7  | 302,9  |
| <b>Mn mg/kg</b>                     | 311,5 | 567,2  | 3658   | 201,6 | 171,5  | 136,8  | 162,1  |
| <b>Fe mg/kg</b>                     | 221   | 165,65 | 6271   | 188,3 | 5358   | 1394   | 587,3  |
| <b>Ni mg/kg</b>                     | 148   | 122,8  | 312,4  | 63,3  | 183,4  | 166,5  | 135,9  |
| <b>Cd mg/kg</b>                     | 115   | 209,8  | 121,4  | 211,3 | 183,7  | 166,8  | 163,4  |
| <b>Pd mg/kg</b>                     | 586   | 98     | 63     | 162   | 144    | 247    | 328    |
| <b>Zn mg/kg</b>                     | -     | 367,12 | 199,32 | 175,2 | 176,85 | 177,95 | 178,9  |

Σημειώνεται ότι τα δείγματα 4,5,6,7 τα οποία ελήφθησαν την ίδια μέρα και σε διαφορετικά σημεία από την ίδια μάζα ιλύος παρουσιάζουν ανομοιογένεια μεταξύ τους και μεγάλες διακυμάνσεις στις συγκεντρώσεις μετάλλων. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στην ικανότητα συσσώρευσης των μετάλλων τοπικά στην ιλύ.

Στη συνέχεια εξετάστηκε ο δείκτης βλαστικότητας στο ανεπεξέργαστο δείγμα ιλύος που ελήφθη στις 5/1/2011 από την ΜΕΛ και στη συνέχεια το δείγμα υπέστη επεξεργασία με τη μέθοδο της αερόβιας χώνευσης σε συνδυασμό με χρήση προσθέτων. Σημειώνεται ότι το εν λόγω δείγμα είχε υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία (>89%), γεγονός το οποίο αποτέλεσε ανασταλτικό παράγοντα για την πλήρη ανάπτυξη της θερμοκρασίας στη θερμοφιλή φάση. Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προαναφερθέντων πειραματικών δοκιμών.

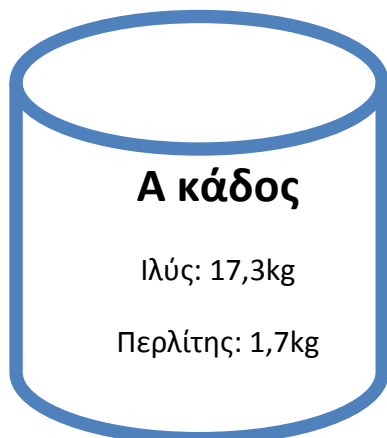
### 5.3. Α' κύκλος Πειραμάτων

Μετά τον πλήρη χαρακτηρισμό της λάσπης αναπτύχθηκε μέθοδος για την κομποστοποίησή της.

Στον Α' πειραματικό κύκλο κομποστοποίησης εξετάστηκε η δυνατότητα αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας ιλύος προερχόμενης από την βιομηχανική ΜΕΛ σε συνδυασμό με τη χρήση προσθέτων.

Για την τροφοδοσία του πρώτου κύκλου χρησιμοποιήθηκε η ιλύς που λήφθηκε την 5/1/2011. Στον πρώτο κάδο προστέθηκε μόνο περλίτης, σαν πρόσθετο, ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας, ενώ στον δεύτερο μόνο πράσινα (φύλλα) ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας της τροφοδοσίας επίσης.

|   |   |
|---|---|
| <b>A κάδος:</b><br>17,3kg ιλύς +1,7kg περλίτης (19kg) | <b>B κάδος:</b><br>15,5kg ιλύς + 1,5kg φύλλα (17kg) |
|---|---|



Η έναρξη του πειράματος έγινε ταυτόχρονα και σε καθημερινή βάση γινόταν μέτρηση θερμοκρασίας, υγρασίας & pH.

Όπως φαίνεται στους πίνακες που ακολουθούν, η διεργασία της κομποστοποίησης δεν ξεκίνησε ποτέ. Τόσο για τον πρώτο κάδο όσο και για τον δεύτερο οι μέγιστες θερμοκρασίες που επετεύχθησαν δεν ξεπέρασαν ποτέ τους 24 και 28° C αντίστοιχα.

Πίνακας 5.2 Θερμοκρασία στον κάδο Α (°C) και % Υγρασία

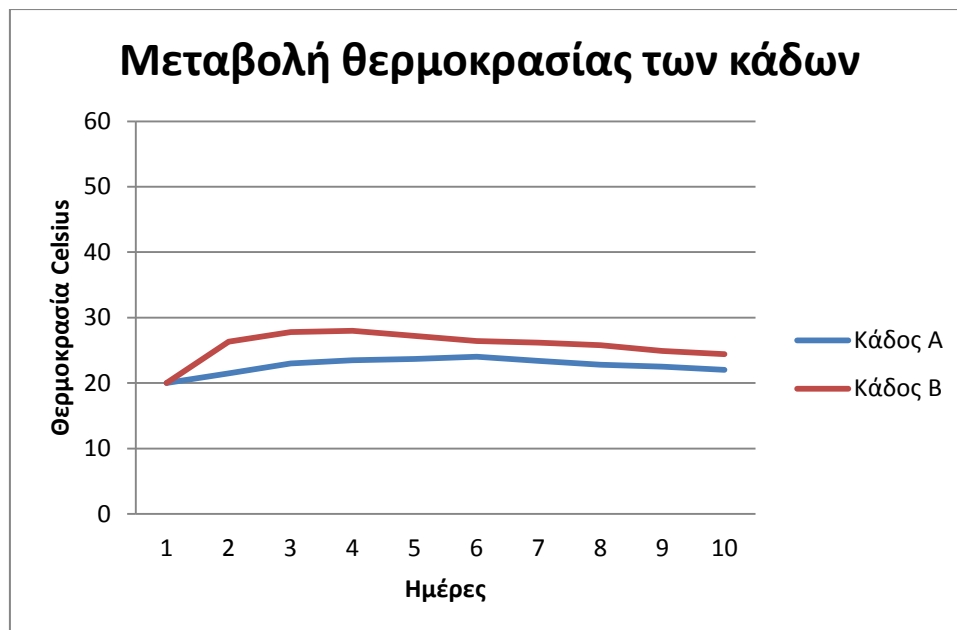
| Κάδος Α |                     |      |         |
|---------|---------------------|------|---------|
| Ημέρα   | Θερμοκρασία Celsius | pH   | Υγρασία |
| 1       | 20                  | 6,22 | 67,3    |
| 2       | 21,5                | 6,1  | 66,1    |
| 3       | 23                  | 6,1  | 66,3    |
| 4       | 23,5                | 6,78 | 65,8    |
| 5       | 23,7                | 6,7  | 64,2    |
| 6       | 24                  | 6,7  | 64,5    |
| 7       | 23,4                | 6,6  | 63,6    |
| 8       | 22,8                | 6,5  | 62,8    |
| 9       | 22,5                | 6,4  | 62,1    |
| 10      | 22                  | 6,4  | 60,9    |

Πίνακας 5.3 Θερμοκρασία στον κάδο Β (°C) και % Υγρασία

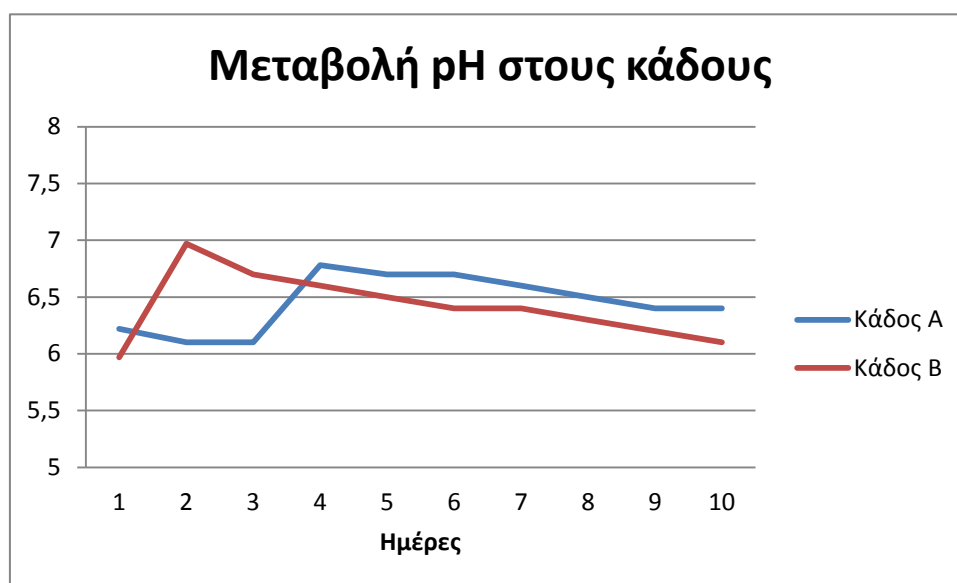
| Κάδος Β |                        |      |         |
|---------|------------------------|------|---------|
| Ημέρα   | Θερμοκρασία<br>Celsius | pH   | Υγρασία |
| 1       | 20                     | 5,97 | 70      |
| 2       | 26,3                   | 6,97 | 68      |
| 3       | 27,8                   | 6,7  | 67,1    |
| 4       | 28                     | 6,6  | 65,9    |
| 5       | 27,2                   | 6,5  | 65      |
| 6       | 26,4                   | 6,4  | 64,4    |
| 7       | 26,2                   | 6,4  | 64      |
| 8       | 25,8                   | 6,3  | 63,5    |
| 9       | 24,9                   | 6,2  | 63,1    |
| 10      | 24,4                   | 6,1  | 62,3    |

Η μεταβολή της θερμοκρασίας για τους 2 κάδους εμφανίζεται παραστατικά στο διάγραμμα που ακολουθεί. Αντίστοιχα έχει γίνει και γραφική παράσταση για το pH και την υγρασία. Τα πειραματικά αποτελέσματα δεν ταυτίστηκαν με την θεωρία γι' αυτό εγκαταλείφτηκε πρόωρα η ιδέα του πρώτου κύκλου. Επιβεβαιώθηκε παρόλα ταύτα η θεωρία που θέλει εκτός από το υγιές υπόστρωμα της ιλύος και μια αποικοδομήσιμη πρώτη ύλη για να επιτευχθεί η διεργασία της κομποστοποίησης. Από την οπτική των προσθέτων, ο περλίτης έδωσε στην ιλύ το απαιτούμενο πορώδες ώστε να επιτευχθεί καλύτερος αερισμός αλλά δεν υπήρχε η ικανή και αναγκαία οργανική ύλη που θα μεταβόλιζαν οι μικροοργανισμοί. Επίσης τα φύλλα βοήθησαν στην παροχή τόσο οργανικού υποστρώματος όσο και αύξησης του πορώδους, όμως ο υψηλός λόγος άνθρακα προς άζωτο των φύλλων  $C/N_{\text{φύλλων}} = 40-80$  δεν επέτρεψε στην κομποστοποίηση να ξεκινήσει. Τέλος να τονίσουμε ότι τα φύλλα παρέχουν στο υπόστρωμα μεγάλες ανθρακώδεις ενώσεις όπως η κυτταρίνη, η ημικυτταρίνη, και η λιγνίνη που δεν διασπώνται γρήγορα από τους μικροοργανισμούς. Αυτή είναι η κυρίως αιτία που δεν εξελίσσεται ομαλά η διεργασία της κομποστοποίησης με τη χρήση φύλλων.

Η κομποστοποίηση δεν πέρασε ποτέ στην μεσόφιλη φάση. Η μεταβολή των θερμοκρασιών, όπως δείχνει το διάγραμμα ακολούθησε μια ανοδική πορεία αλλά δεν έφτασε ποτέ στα όρια της μεσόφιλης φάσης. Οι διεργασίες αποδόμησης στο εσωτερικό του πρώτου κάδου ήταν σχεδόν μηδενικές και ενδεχομένως να οφείλεται στην περιορισμένη οργανική ουσία η οποία είναι άμεσα διαθέσιμη προς τους μικροοργανισμούς. Χαρακτηριστικά, στο διάγραμμα της θερμοκρασίας για τον πρώτο κάδο η αύξηση της θερμοκρασίας είναι μόλις της τάξης των  $3,7^{\circ}\text{C}$ , ενώ για τον έτερο κάδο είναι  $8,0^{\circ}\text{C}$ , όταν θεωρητικά περιμέναμε η θερμοκρασία να αυξηθεί κατά  $50^{\circ}\text{C}$ .

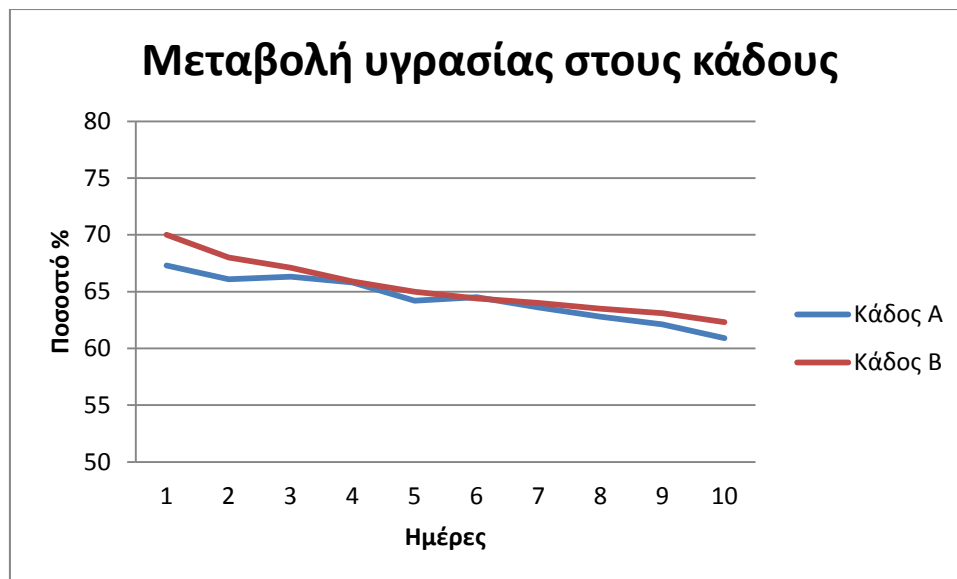


Διάγραμμα 5.1 Μεταβολή της θερμοκρασίας στους 2 κάδους



Διάγραμμα 5.2 Μεταβολή της τιμής του pH στους 2 κάδους

Η μεταβολή του pH και στους 2 κάδους ήταν παρόμοια. Η αύξησή του τις πρώτες ημέρες και η σταδιακή μείωσή του με την πάροδο των ημερών δείχνει πως η διεργασία ήταν έτοιμη να ακολουθήσει την πορεία της κανονικής κομποστοποίησης εάν δεν έλειπε η προσθήκη οργανικού υποστρώματος. Τέλος, στο τελευταίο διάγραμμα της μεταβολής υγρασίας στους 2 κάδους γίνεται η επαλήθευση του εύρους της διεργασίας. Οι τιμές της υγρασίας είναι συνεχώς μειούμενες με σταθερή κλίση. Στο Διάγραμμα 5.3 παρατηρείται ότι η ανάμιξη του περλίτη με την ιλύ ρυθμίζει την αρχική υγρασία του υποστρώματος ίση με 67,3% και 70,0% αντίστοιχα λόγω των απορροφητικών ιδιοτήτων του ορυκτού.



**Διάγραμμα 5.3 Μεταβολή της υγρασίας στους 2 κάδους**

Από τον παρακάτω πίνακα συμπεραίνεται ότι παρόλο που κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης δεν έλαβε χώρα η πλήρης ανάπτυξη της θερμοκρασίας στη θερμόφιλη φάση, τα πρόσθετα βοήθησαν στον καλύτερο αερισμό και κυρίως στη βελτίωση των ιδιοτήτων και τη δημιουργία ενός φυτοθρεπτικού τελικού προϊόντος. Εντούτοις εάν η αρχική ιλύς είχε χαμηλότερη υγρασία, τα αποτελέσματα θα ήταν ικανοποιητικότερα.

**Πίνακας 5.4 Μετρήσεις δείκτη βλαστικότητας στο δείγμα ιλύος**

| 1ο δείγμα                             | Δείκτης Βλαστικότητας | Χαρακτηρισμός |
|---------------------------------------|-----------------------|---------------|
| Ανεπεξέργαστο δείγμα                  | 91,35                 | Μη Φυτοτοξικό |
| Επεξεργασμένο δείγμα με πράσινα κήπου | 101,2                 | Φυτοθρεπτικό  |
| Επεξεργασμένο δείγμα με περλίτη       | 123,8                 | Φυτοθρεπτικό  |

Παρά το γεγονός ότι τα πειράματα έδειξαν ότι μπορεί να παραχθεί κόμποστ από την ιλύ το οποίο έχει φυτοθρεπτικές ιδιότητες, στη συγκεκριμένη περίπτωση η αυξημένη παρουσία μετάλλων (πάνω από τα νομοθετικά όρια για χρήση στη γεωργία ως εδαφοβελτιωτικό) εμποδίζει μια τέτοια χρήση. Συνεπώς η ιλύς θα πρέπει να διαχειριστεί περαιτέρω και με άλλους τρόπους.

#### 5.4. Β' κύκλος Πειραμάτων

Στον Β' πειραματικό κύκλο κομποστοποίησης εξετάστηκε η δυνατότητα αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας ιλύος προερχόμενης από την ίδια βιομηχανική ΜΕΛ σε συνδυασμό με τη χρήση τόσο οργανικών τροφικών υπολειμμάτων όσο και προσθέτων. Προκειμένου να αποφευχθεί ενδεχόμενη δυσλειτουργία των κάδων χρησιμοποιήθηκε κοινό πρόσθετο, ο περλίτης, και στους δύο κάδους, για την ενίσχυση των φυσικών χαρακτηριστικών της ιλύος (Turan and Ergun 2008). Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του περλίτη, το οποίο τον κάνει να ξεχωρίζει 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 (30-150kg/m<sup>3</sup>) να είναι πολύ χαμηλή. Η διόγκωση του περλίτη οφείλεται στην παρουσία νερού, 2-5% του ακατέργαστου ορυκτού (Mladenovic et al, 2004) το οποίο κατά την βίαιη εξάτμισή του διαμορφώνει στο εσωτερικό σώμα του περλίτη διάκενα, κοιλότητες και εγκοιλώσεις αυξάνοντας σημαντικά την ενεργή καλυπτόμενη επιφάνειά του. Η ιδιαίτερη αυτή δομή του περλίτη μας εξυπηρετεί διότι τον καθιστά υλικό με φυσικές ιδιότητες που παρέχουν ποικιλία χρήσεων όπως την δέσμευση/ συγκράτηση μορίων νερού, τη διάχυση του αέρα, τη χαμηλή πυκνότητα και τη συμπαγή δομική του σύσταση καθώς και τη χημική του ουδετερότητα (Perlite Insitute, 2000).

##### 5.4.1. Σύσταση του υποστρώματος

Σύμφωνα με τον Πίνακα 5.3, η ιλύς έχει θεμιτή υγρασία ίση με 67%. Ο λόγος C/N διαμορφώνεται στο 6,56. Η παρουσία άνθρακα και αζώτου καθώς και των υπόλοιπων μακροστοιχείων θεωρούνται επαρκή για την ανάπτυξη μικροβιακής δραστηριότητας και κατ' επέκταση για την επιτέλεση της διεργασίας της κομποστοποίησης (Diaz and Salvage, 2007a). Επιπλέον οι συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων στην ιλύ είναι εντός των επιτρεπτών ορίων για την αερόβια επεξεργασία όπως βάσει του πίνακα 5.5. Η 2<sup>η</sup> πειραματική εφαρμογή περιλαμβάνει την προσθήκη τροφικών υπολειμμάτων και περλίτη. Η σύνθεση του μίγματος και περλίτη δεν τροποποιεί σημαντικά τα αρχικά χαρακτηριστικά της ιλύος διότι το προστιθέμενο ορυκτό είναι χημικά αδρανές και δεν επηρεάζει τη χημική σύσταση του οργανικού υλικού ούτε τις διεργασίες που θα λάβουν χώρα. Κατά την 2<sup>η</sup> πειραματική διεργασία κομποστοποίησης η ιλύς επιλέχθηκε από τις ίδιες κλίνες με αυτής της 1<sup>η</sup> σειράς. Η ημέρα δειγματοληψίας ήταν η 30/5/2011.

Πίνακας 5.5 Παράμετροι ιλύος

| Παράμετρος           | Τιμή  |
|----------------------|-------|
| pH                   | 6     |
| Αγωγιμότητα mS/cm    | 3,41  |
| Υγρασία %            | 67    |
| TOC %                | 36,74 |
| VSS %                | 20    |
| TKN %                | 5,6   |
| NO <sub>3</sub> -N % | 3,08  |
| NH <sub>4</sub> -N % | 0,28  |
| Cr mg/Kg             | 265   |
| Cu mg/kg             | 324   |
| Mn mg/kg             | 229   |
| Fe mg/kg             | 347   |
| Ni mg/kg             | 56    |
| Cd mg/kg             | 123   |
| Pb mg/kg             | 76    |
| Zn mg/kg             | 92    |

Ο προσδιορισμός της σύστασης του αρχικού υποστρώματος, είναι καθοριστικός για την αξιολόγηση των αερόβιων διεργασιών της κομποστοποίησης και του τελικού προϊόντος. Η ποιότητα και η σύσταση του παραγόμενου κόμποστ είναι άμεσα εξαρτώμενες από το είδος και την αναλογία των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για να δημιουργήσουν το αρχικό υπόστρωμα.

Το προς κομποστοποίηση υπόστρωμα συνίσταται από κυτταρινούχα (μαρούλι) καθώς και από υλικά πλούσια σε υδατάνθρακες (ψωμί, φλούδες πατάτας) τα οποία τροφοδότησαν τον αντιδραστήρα σε προκαθορισμένη αναλογία. Τεμαχίστηκαν σε κομμάτια των 2 έως 4 εκατοστών και έγινε επαρκής ομογενοποίηση.

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις βασικών παραμέτρων, των υλικών τα οποία θα αποτελούσαν το υπόστρωμα, ξεχωριστά, ώστε να γίνει μια πρώτη προσέγγιση των επιθυμητών τιμών των παραμέτρων του. Στον πίνακα 5.6 παρατίθενται κάποιες βασικές παράμετροι, όπως το pH, η αγωγιμότητα, η περιεκτικότητα σε υγρασία, ολικό οργανικό άνθρακα, άζωτο κατά Kjeldahl (TKN) και ο λόγος C/N, για διάφορα τρόφιμα.

| Τρόφιμο | pH   | Αγωγιμότητα<br>(mS/cm) | Υγρασία<br>% | % C <sub>org</sub> | %<br>TKN | C/N  |
|---------|------|------------------------|--------------|--------------------|----------|------|
| Μαρούλι | 6,22 | 1,63                   | 89,62        | 34,20              | 4,48     | 7,63 |
| Ψωμί    | 5,64 | 5,69                   | 22,29        | 46,40              | 5,34     | 8,69 |
| Πατάτα  | 6,61 | 1,47                   | 79,09        | 42,07              | 4,87     | 8,64 |

Πίνακας 5.6 Αρχικές μετρήσεις τροφίμων του υποστρώματος (Μαργαρίτης Μάρκος, 2007)

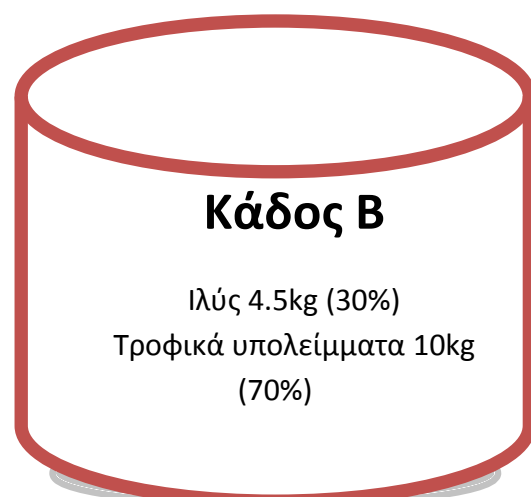
Και στους δύο κάδους προστέθηκαν τροφικά υπολείμματα, όπως ψωμί, μαρούλι και φλούδες πατάτας και σαν πρόσθετο περλίτης ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας του μίγματος της τροφοδοσίας. Η σύσταση της τροφοδοσίας των 2 κάδων ήταν διαφορετική και αναλύεται εκτενώς στον Πίνακα 5.7.

| Κάδος | Αναλογία | Ιλύς kg | Τροφικά υπολείμματα (kg) |      |             | Περλίτης<br>10% κ.β. | Σύνολο kg |
|-------|----------|---------|--------------------------|------|-------------|----------------------|-----------|
|       |          |         | Μαρούλι                  | Ψωμί | Φλ. πατάτας |                      |           |
| A     | 50-50    | 8       | 3,7                      | 4    | 0,3         | 1,6                  | 17,6      |
| B     | 30-70    | 4,5     | 5,3                      | 4    | 0,7         | 1,5                  | 16        |

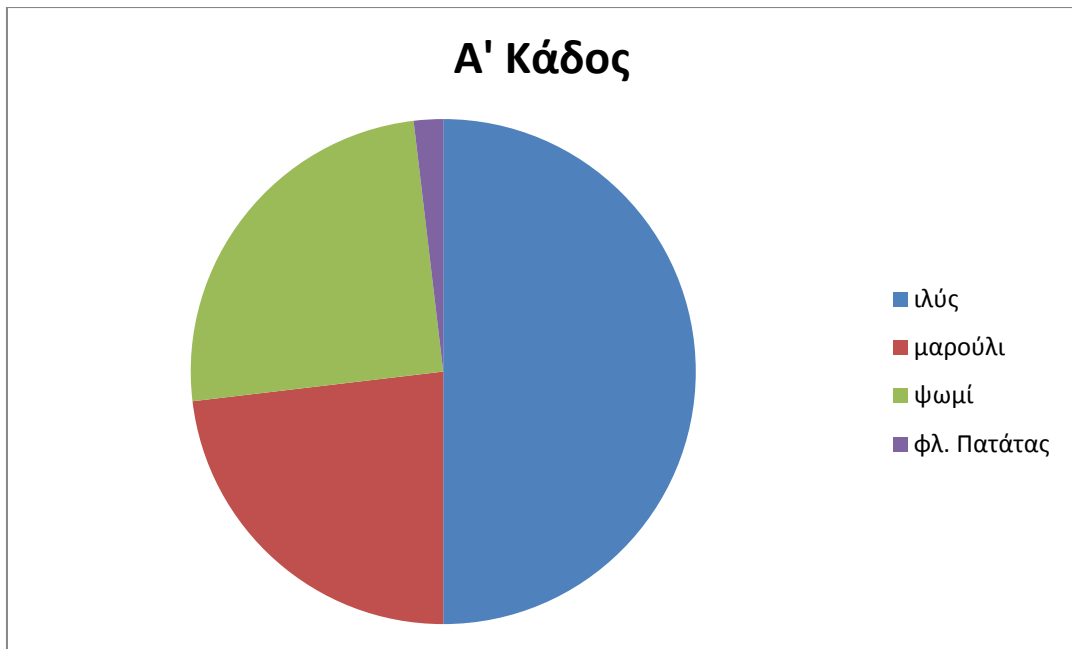
Πίνακας 5.7 Σύσταση κάδων

Στον πρώτο κάδο τοποθετήθηκε ιλύς και τροφικά υπολείμματα σε αναλογία 1:1 και σαν πρόσθετο περλίτης ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας του μίγματος της τροφοδοσίας. Η σύσταση της τροφοδοσίας ήταν 8kg ιλύος και 8kg τροφικών υπολειμμάτων (μαρούλι, ψωμί και φλούδες πατάτας). Επιπλέον προστέθηκαν και 1,6 kg περλίτη σε σύνολο 17,6kg πρώτων υλών.

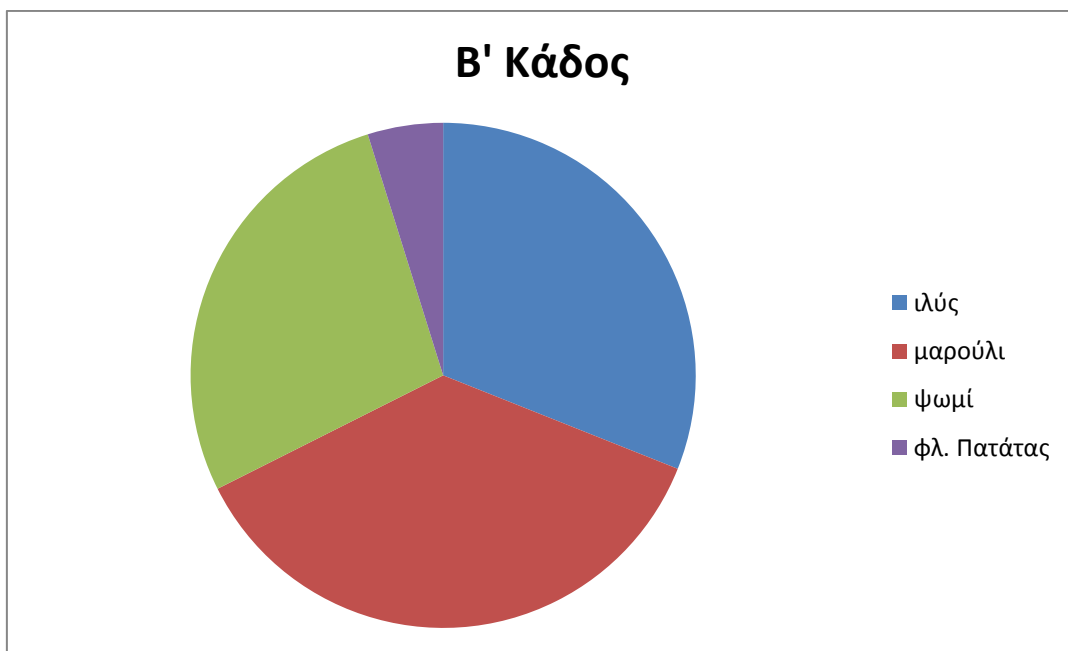
Στο δεύτερο κάδο τοποθετήθηκε ιλύς και τροφικά υπολείμματα σε αναλογία 3:7 και σαν πρόσθετο περλίτης ποσότητας ίσης με το 10% κατά βάρος της αρχικής μάζας του μίγματος της τροφοδοσίας. Η σύσταση της τροφοδοσίας ήταν 4,5kg ιλύος και 10kg τροφικών υπολειμμάτων (μαρούλι, ψωμί και φλούδες πατάτας). Επιπλέον προστέθηκαν και 1,5 kg περλίτη σε σύνολο 16kg πρώτων υλών.







Διάγραμμα 5.4 Σύσταση Α' κάδου



Διάγραμμα 5.5 Σύσταση Β' κάδου

Μετά την ανάμιξη των πρώτων υλών και την τοποθέτησή τους στους δύο κάδους αντίστοιχα έγινε δειγματοληψία και μέτρηση των παραμέτρων. Η δειγματοληψία αυτή είναι ο ακρογωνιαίος λίθος για την διεργασία της κομποστοποίησης αφού αποτελεί την αρχική εικόνα για κάθε κάδο που θα μας χρησιμεύσει αργότερα στη σύγκριση του τελικού με το αρχικό προϊόν για την έκβαση συμπερασμάτων.

Πίνακας 5.8 Αποτελέσματα Α' κάδου

| Α Κάδος              |       |
|----------------------|-------|
| Παράμετρος           | Τιμή  |
| pH                   | 6,08  |
| Αγωγιμότητα mS/cm    | 7,08  |
| Υγρασία %            | 54,5  |
| TOC %                | 33,84 |
| VSS %                | 66    |
| TKN %                | 6,8   |
| NO <sub>3</sub> -N % | 3,64  |
| NH <sub>4</sub> -N % | 0,22  |
| Cr mg/Kg             | 256   |
| Cu mg/kg             | 84    |
| Mn mg/kg             | 95    |
| Fe mg/kg             | 467   |
| Ni mg/kg             | 8     |
| Cd mg/kg             | 29    |
| Pb mg/kg             | 177   |
| Zn mg/kg             | 139   |

Πίνακας 5.9 Αποτελέσματα Β' κάδου

| Β Κάδος              |       |
|----------------------|-------|
| Παράμετρος           | Τιμή  |
| pH                   | 6,02  |
| Αγωγιμότητα μS/cm    | 8,5   |
| Υγρασία %            | 63,2  |
| TOC %                | 31,32 |
| VSS %                | 71    |
| TKN %                | 6,9   |
| NO <sub>3</sub> -N % | 4,16  |
| NH <sub>4</sub> -N % | 0,2   |
| Cr mg/Kg             | 184   |
| Cu mg/kg             | 42    |
| Mn mg/kg             | 111   |
| Fe mg/kg             | 583   |
| Ni mg/kg             | 2     |
| Cd mg/kg             | 17    |
| Pb mg/kg             | 5     |
| Zn mg/kg             | 419   |

Η έναρξη του πειράματος έγινε ταυτόχρονα για τους 2 κάδους και σε καθημερινή βάση έγινε μέτρηση θερμοκρασίας, υγρασίας, pH και αγωγιμότητας, ανά δύο μέρες έγινε μέτρηση των VSS, του TOC και του TKN και ανά 4 μέρες έγιναν μετρήσεις NO<sub>3</sub> και NH<sub>4</sub>.

#### 5.4.2. Έλεγχος της διεργασίας της κομποστοποίησης

Κατά τη διαδικασία του 2<sup>ου</sup> πειραματικού κύκλου, το υπόστρωμα περνάει μέσα από την πρώτη μεσόφιλη στη θερμόφιλη φάση εντός της δεύτερης ημέρας από την έναρξη λειτουργίας του συστήματος όπως φαίνεται στο διάγραμμα 5.4. Εξαιτίας της αφομοίωσης και της κατανάλωσης της άμεσα διαθέσιμης οργανικής ουσίας που εμπεριέχεται στην υλή (Mena et al, 2003) σε συνδυασμό με τις αυτομονωτικές ιδιότητες, την καθημερινή αποδοτική ανάδευση και τον επαρκή αερισμό του συστήματος (λόγω μηχανικής ανάδευσης αλλά και παρουσίας περλίτη στο υπόστρωμα), αναπτύσσονται πολύ υψηλές θερμοκρασίες με μέγιστη αυτή των 68,8°C για τον πρώτο κάδο την τέταρτη μέρα και των 69,1°C για τον δεύτερο κάδο την τέταρτη επίσης μέρα. Παράλληλα και στους 2 κάδους η κορυφαία τιμή της θερμοκρασίας επιτυγχάνεται την τέταρτη μέρα, ενώ μετά την 8<sup>η</sup> μέρα η θερμοκρασία βαίνει σταδιακά μειούμενη περνώντας από την δεύτερη μεσόφιλη

φάση και τέλος στη φάση θανάτου των μικροοργανισμών και ωρίμανσης της ιλύος μετά την 14<sup>η</sup> ημέρα.

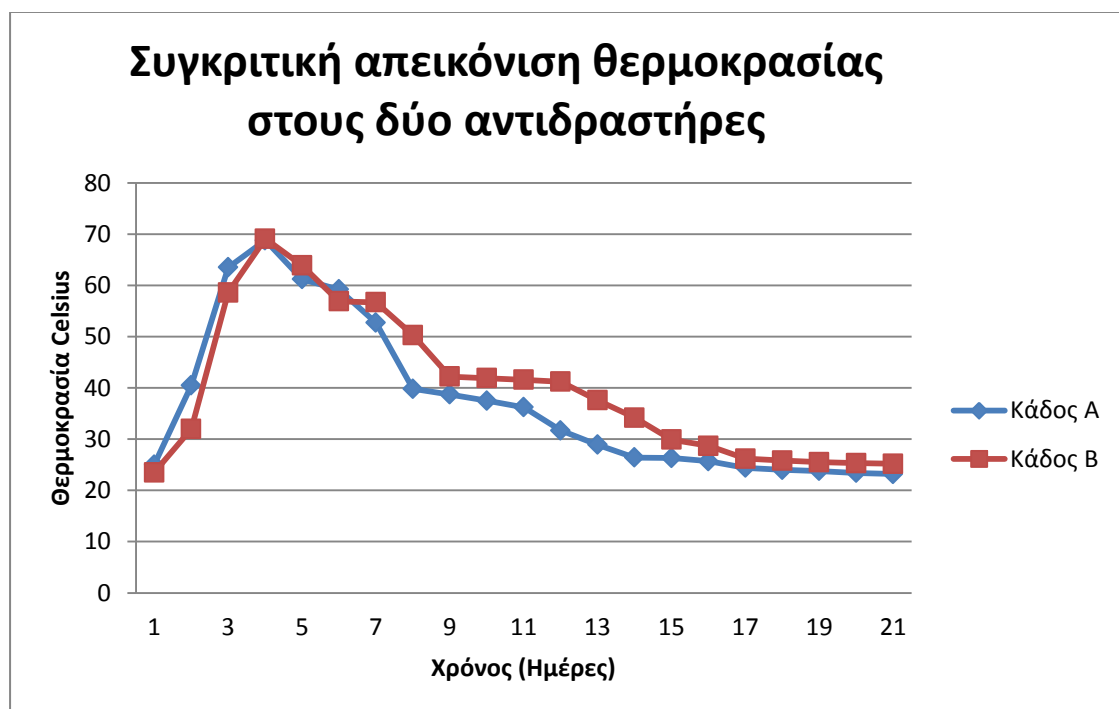
Μετά το πέρας της δεύτερης ημέρας η θερμοκρασία για τον πρώτο κάδο εκτοξεύεται πάνω από τους 40°C, οπότε μπορούμε εύλογα να πούμε πως το άμεσα διαθέσιμο οργανικό υπόστρωμα ευνοεί την έντονη μικροβιακή δραστηριότητα και μικροβιακό μεταβολισμό. Μέχρι την 4<sup>η</sup> ημέρα που φτάνουμε στη μέγιστη θερμοκρασία, υπάρχει οργανική ουσία που καταναλώνεται άμεσα από τους μικροοργανισμούς συμβάλλοντας στις μεταβολικές τους διεργασίες και κατ'επέκταση στην περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας στον βιοαντιδραστήρα. Στην θερμοφιλή φάση το σύστημα παραμένει για 6 ημέρες επιτυγχάνοντας θερμοκρασίες άνω των 69°C έστω για λίγες ώρες. Η παραμονή της ιλύος σε τέτοιες θερμοκρασίες έστω για λίγες ώρες είναι συνθήκη ικανή για να αποστειρώσει την ιλύ σκοτώνοντας ή αδρανοποιώντας όλους τους παθογόνους μικροοργανισμούς που αναπτύσσονται. Η ιλύς, δρώντας σαν ξενιστής στους παθογόνους μικροοργανισμούς δεν θα μπορούσε να αποτεθεί στο έδαφος ως εδαφοβελτιωτικό, ενώ, πλέον, με την απώλειά τους μέσω της θερμικής αποστείρωσης είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί σαν εδαφοβελτιωτικό. Η δεύτερη μεσόφιλη φάση διαρκεί 12 ημέρες ώσπου οι διεργασίες στο σύστημα σταματάνε σηματοδοτώντας την έναρξη της τελικής φάσης ή φάσης θανάτου και της ωρίμανσης της ιλύος. Αντίστοιχα στον δεύτερο κάδο, η πρώτη μεσόφιλη φάση δεν διαρκεί πάνω από 2,5 ημέρες. Η θερμοφιλή φάση λαμβάνει χώρα για 11 ημέρες, σχεδόν τις διπλάσιες από αυτές του πρώτου κάδου. Η μέγιστη θερμοκρασία ξεπερνά τους 69°C όπου και παραμένει για λίγες ώρες. Η θερμοφιλή φάση αντικαθιστάται από την δεύτερη μεσόφιλη η οποία διαρκεί 7 ημέρες ώσπου η θερμοκρασία σταθεροποιείται ύστερα από την διακοπή κάθε διεργασίας στον κάδο.

**Πίνακας 5.9 Μεταβολή της Θερμοκρασίας στους 2 κάδους**

| Ημέρα | Θερμοκρασία T° C |      |
|-------|------------------|------|
|       | A                | B    |
| 1     | 25               | 23,5 |
| 2     | 40,5             | 32   |
| 3     | 63,5             | 58,6 |
| 4     | 68,8             | 69,1 |
| 5     | 61,2             | 63,9 |
| 6     | 59,2             | 56,9 |
| 7     | 52,7             | 56,7 |
| 8     | 39,8             | 50,3 |
| 9     | 38,7             | 42,2 |
| 10    | 37,5             | 41,9 |
| 11    | 36,2             | 41,6 |

|    |      |      |
|----|------|------|
| 12 | 31,7 | 41,2 |
| 13 | 28,9 | 37,6 |
| 14 | 26,4 | 34,2 |
| 15 | 26,3 | 29,9 |
| 16 | 25,7 | 28,7 |
| 17 | 24,4 | 26,2 |
| 18 | 24   | 25,8 |
| 19 | 23,8 | 25,5 |
| 20 | 23,4 | 25,3 |
| 21 | 23,2 | 25,2 |

Οι δύο κάδοι ήθελαν είκοσι ημέρες για να εκτελέσουν έναν πλήρη κύκλο της διεργασίας της κομποστοποίησης. Στη συνέχεια εξισορροπούν την θερμοκρασία τους με αυτήν του περιβάλλοντος. Στο παρακάτω διάγραμμα μπορούμε να δούμε τη μεταβολή της θερμοκρασίας για τους 2 κάδους.

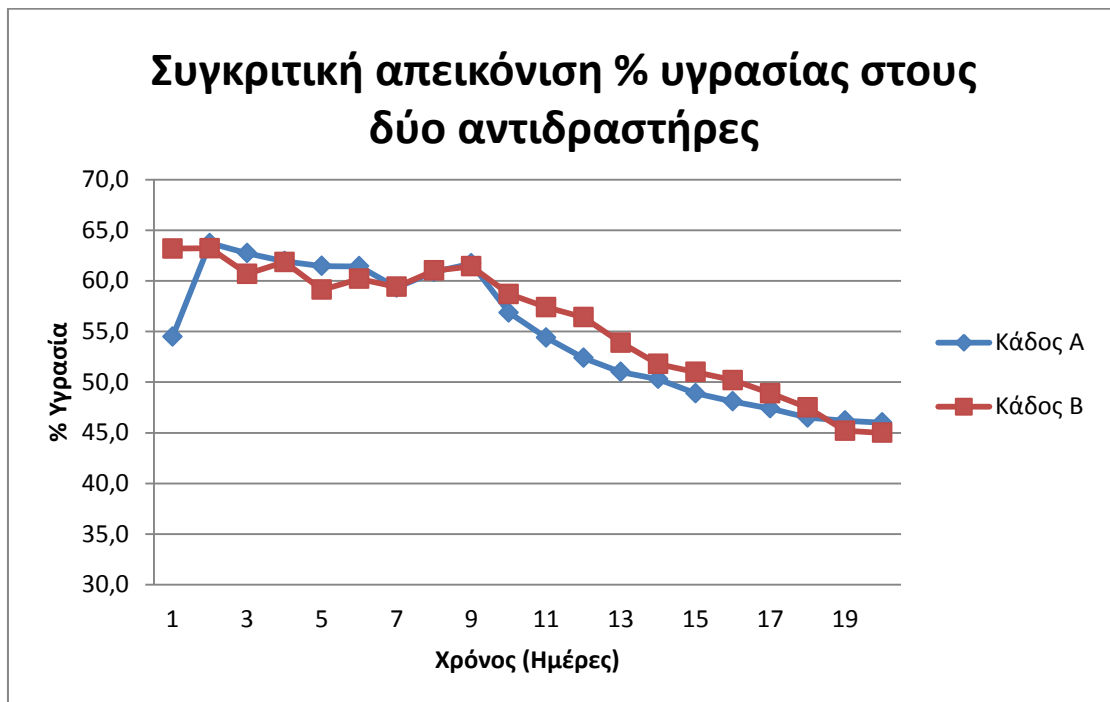


Διάγραμμα 5.6 Κοινό διάγραμμα μεταβολής θερμοκρασίας για τους 2 κάδους

**Πίνακας 5.10 Μεταβολή της υγρασίας  
στους 2 κάδους**

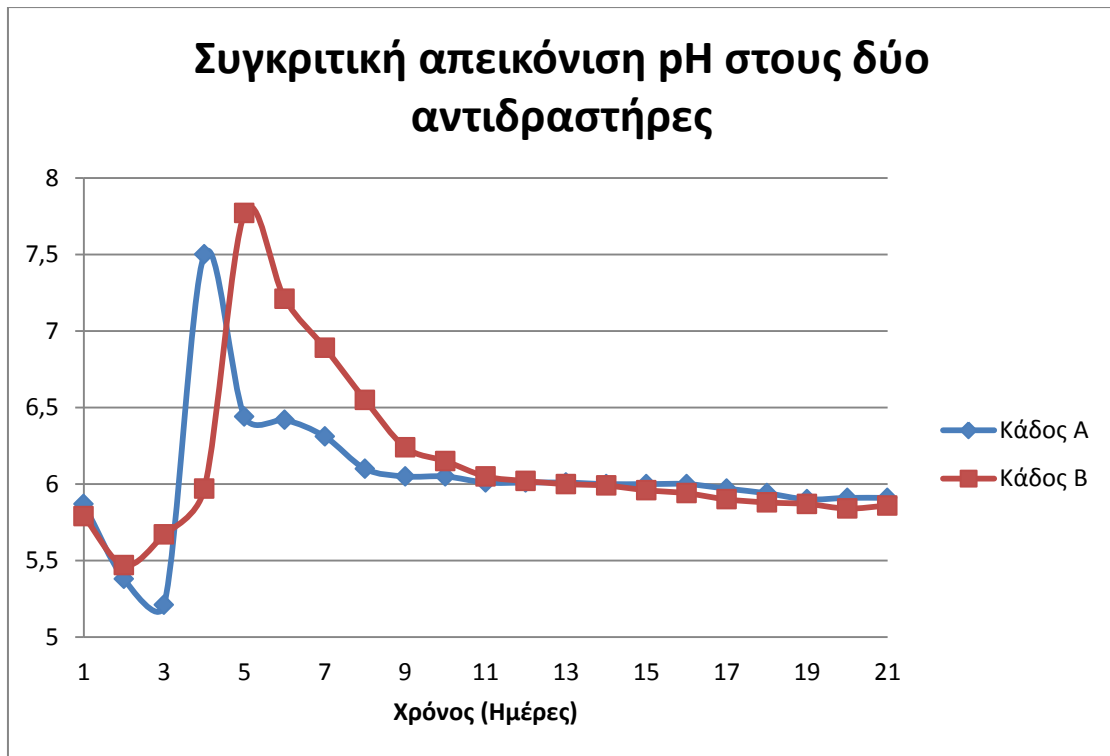
| Ημέρα | Υγρασία % |      |
|-------|-----------|------|
|       | A         | B    |
| 0     | 66,9      | 66,9 |
| 1     | 54,5      | 63,2 |
| 2     | 63,7      | 63,2 |
| 3     | 62,7      | 60,7 |
| 4     | 61,9      | 61,9 |
| 5     | 61,5      | 59,1 |
| 6     | 61,4      | 60,2 |
| 7     | 59,3      | 59,4 |
| 8     | 60,9      | 61,0 |
| 9     | 61,7      | 61,4 |
| 10    | 56,9      | 58,7 |
| 11    | 54,4      | 57,4 |
| 12    | 52,4      | 56,4 |
| 13    | 51,0      | 53,9 |
| 14    | 50,3      | 51,8 |
| 15    | 48,9      | 51   |
| 16    | 48,1      | 50,2 |
| 17    | 47,4      | 48,9 |
| 18    | 46,5      | 47,5 |
| 19    | 46,2      | 45,2 |
| 20    | 46,0      | 45,0 |

Η άμεση κινητοποίηση των μικροοργανισμών με συνεπακόλουθη άμεση έκλυση θερμότητας κατά τις πρώτες κιόλας μέρες της διεργασίας έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση της περιεχόμενης υγρασίας σε επίπεδα μικρότερα του 61% ενώ την πρώτη ημέρα η υγρασία έπεσε σχεδόν ακαριαία στο 54,5% και χρειάστηκε να γίνει προσθήκη 880ml H<sub>2</sub>O ώστε να αυξηθεί κατά 9% η υγρασία στον πρώτο αντιδραστήρα προκειμένου να διατηρηθεί σε επίπεδα ευνοϊκά για τη βιοαποδόμηση της οργανικής ουσίας. Στο θερμόφιλο στάδιο της κομποστοποίησης διαμορφώθηκαν ελεγχόμενες συνθήκες, ως προς την περιεκτικότητα της υγρασίας στο υπόστρωμα, σε τιμές που κυμάνθηκαν από 59-62% μιας και η εκτεταμένη δραστηριότητα της βιοαποδόμησης παρήγαγε H<sub>2</sub>O σαν προϊόν ενώ παράλληλα γινόταν ελεγχόμενη προσθήκη νερού όταν η υγρασία έφτανε σε τιμές κάτω του 59%. Μετά το πέρας της θερμόφιλης φάσης, η παροχή νερού διακόπτεται προκειμένου να μειωθεί ποσοσιαία η περιεκτικότητα της υγρασίας και κατ' επέκταση ο όγκος, η μάζα και η μικροβιακή δραστηριότητα του υποστρώματος.



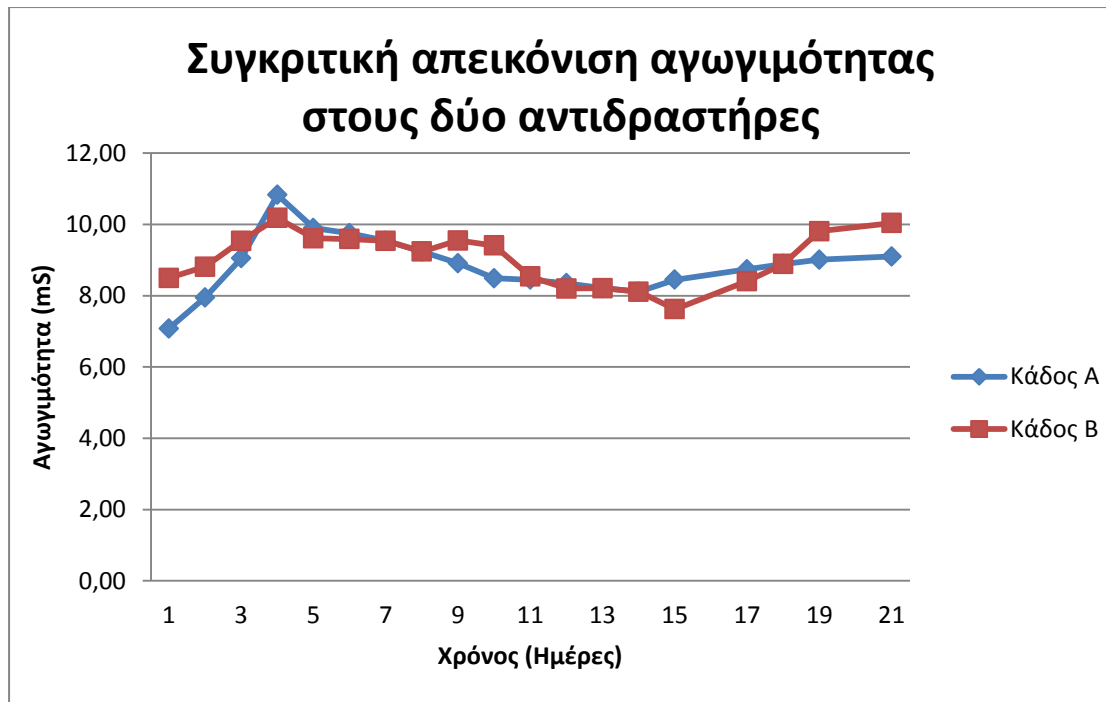
**Διάγραμμα 5.7 Κοινό διάγραμμα μεταβολής της υγρασίας για τους 2 κάδους**

Το pH του υποστρώματος στην αρχή της διεργασίας διαμορφώνεται στο 6,00 ενώ στη συνέχεια της 2<sup>ης</sup> μέρας διαμορφώνεται στο 5,21 η οποία αποδίδεται στην παρουσία οργανικών οξέων από τη διάσπαση της οργανική ύλης. Στη συνέχεια λόγω της κατανάλωσης των οργανικών οξέων και της παράλληλης διάσπασης αζωτούχων ενώσεων της οργανικής ουσίας με αποτέλεσμα την απελευθέρωση αμμωνιακών αυξάνει το pH, λαμβάνοντας μέγιστη τιμή 7,5 για τον 1<sup>ο</sup> κάδο την 4<sup>η</sup> ημέρα και 7,7 για τον 2<sup>ο</sup> την 5<sup>η</sup> ημέρα και ύστερα το pH μειώνεται σταδιακά προς τις ουδέτερες τιμές λόγω των απωλειών σε αμμωνιακά αλλά και της παράλληλης εξέλιξης των διεργασιών της νιτροποίησης.



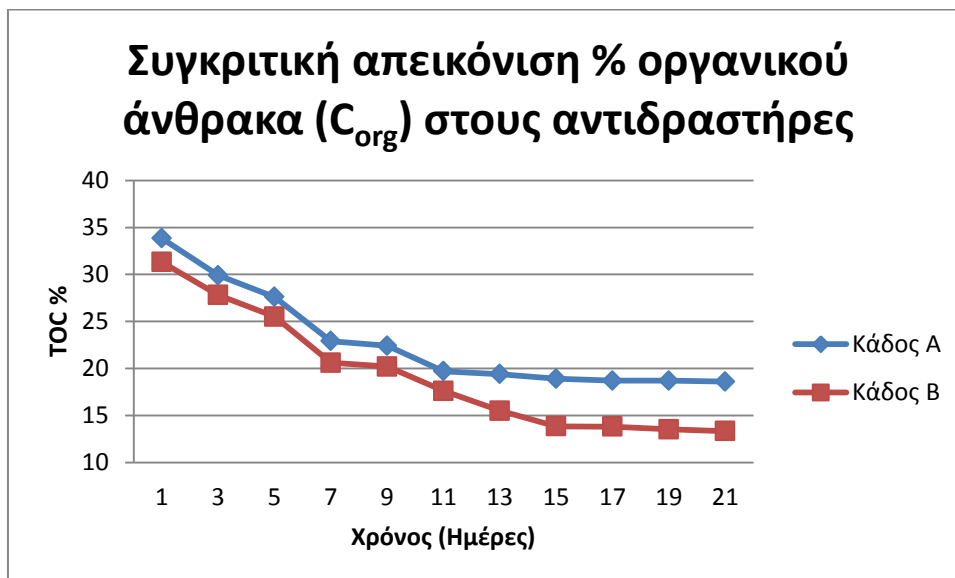
**Διάγραμμα 5.8 Κοινό διάγραμμα μεταβολής pH για τους 2 κάδους**

Στο παρακάτω διάγραμμα, 5.9 απεικονίζεται συγκριτικά η αγωγιμότητα για τα δύο υπό εξέταση υλικά. Τόσο στον πρώτο κάδο όσο και στον δεύτερο, η υψηλότερη τιμή της αγωγιμότητας λαμβάνει χώρα κατά την 4<sup>η</sup> μέρα και ταυτίζεται χρονικά με την θερμόφιλη φάση. Στη συνέχεια και καθ' όλη τη διεργασία της κομποστοποίησης, μειώνεται ανεπαίσθητα και σταθεροποιείται κοντά στα 8,5mS. Προς το τέλος της διεργασίας της αυξάνεται αισθητά και λαμβάνει τιμές 9,1mS και 10,04mS για τους δύο κάδους αντίστοιχα. Οι Levlin E. and Hultman B. (2008) στην έρευνά τους υποστηρίζουν ένα όμοιο μοντέλο εξέλιξης της αγωγιμότητας στην κομποστοποίηση ιλύος με πρόσθετα.



Διάγραμμα 5.9 Κοινό διάγραμμα μεταβολής pH για τους 2 κάδους

Η μεταβολή του ολικού οργανικού άνθρακα κατά τη διεργασία του β' κύκλου απεικονίζεται στο διάγραμμα 5.10:



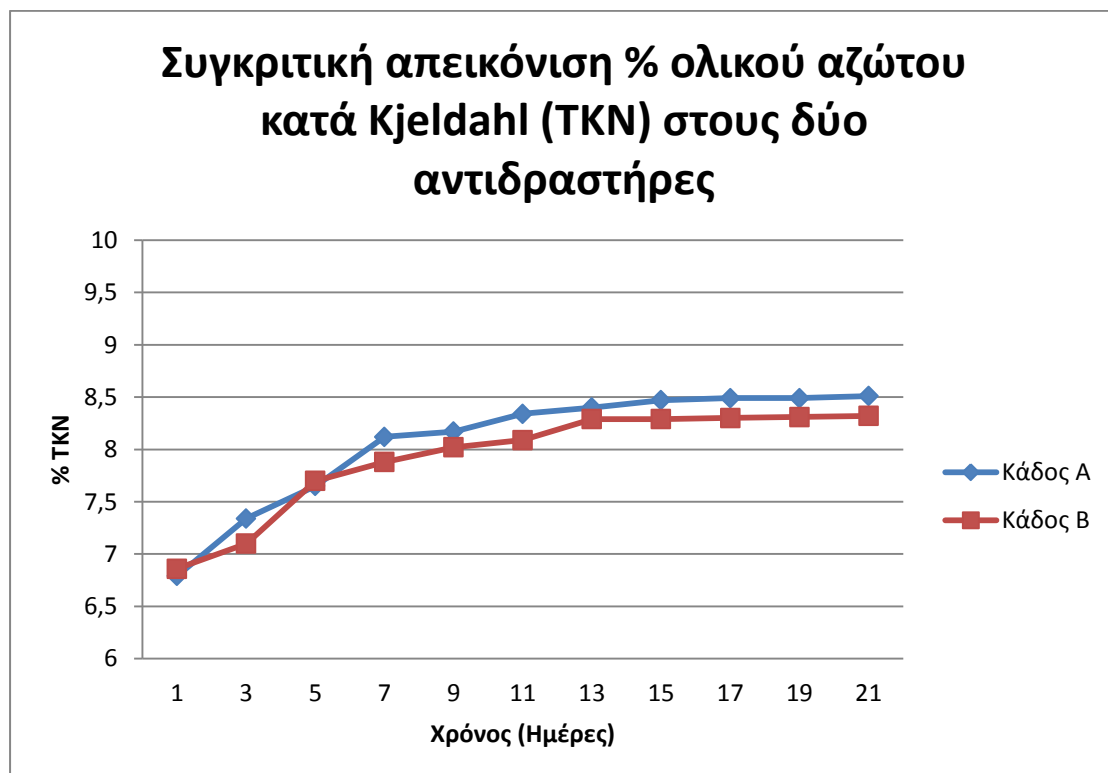
Διάγραμμα 5.10 Κοινό διάγραμμα μεταβολής συνολικής περιεκτικότητας άνθρακα για τους 2 κάδους (TOC %)

Η αρχική περιεκτικότητα του υποστρώματος σε οργανικό άνθρακα ανέρχεται σε 33,84% και 31,32% για τους δύο κάδους αντίστοιχα και παρουσιάζει σημαντική μείωση κατά τη θερμοφίλη φάση της διεργασίας με μείωση εντός των πρώτων 4 ημερών της τάξης του 8% για τον πρώτο και 17,3% για τον δεύτερο κάδο.



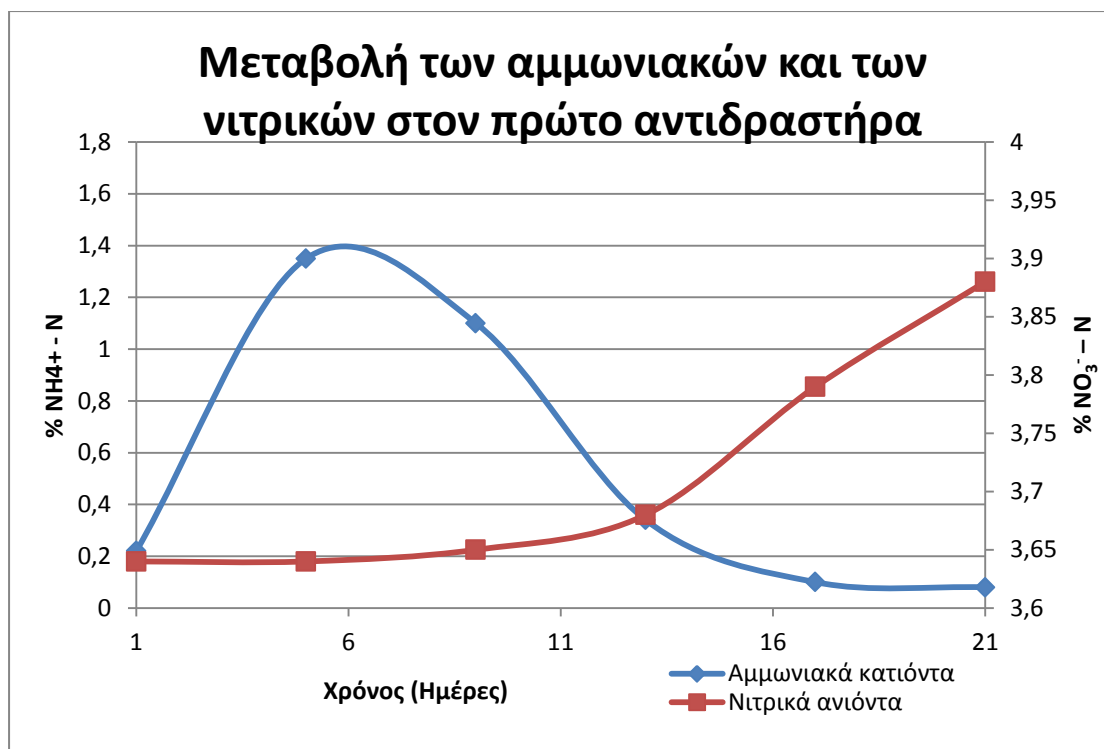
Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνονται οι μεταβολές του ολικού αζώτου (% T.K.N.), των νιτρικών ( $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ) και των αμμωνιακών ( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ).

Η τιμή του ολικού αζώτου παρουσιάζει αύξηση από τα πρώτα στάδια της διεργασίας. Η αύξηση αυτή οφείλεται κυρίως στην μείωση της περιεκτικότητας του άνθρακα και οργανικού υποστρώματος που χάνεται σαν  $\text{CO}_2$ . Στην αύξηση όμως του ολικού αζώτου συμβάλει ακόμα ένας παράγοντας. Η παραγωγή αμμωνίας κατά την αντίδραση και η απομάκρυνσή της από το σύστημα προς το περιβάλλον αντισταθμίζεται με την ύπαρξη των αζωτοδεσμευτικών βακτηρίων. Τα βακτήρια αυτά ανακτούν ένα μέρος των απωλειών του αζώτου που χάνεται σαν αμμωνία (Insam and de Bertoldi, 2007).



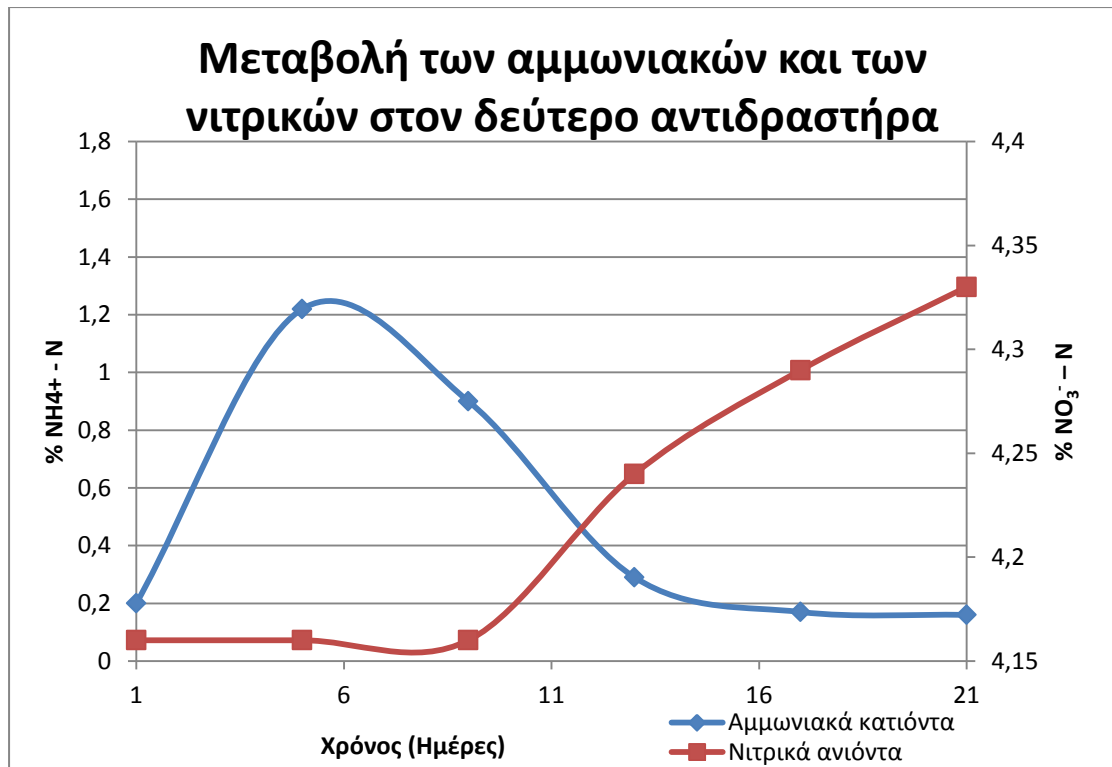
**Διάγραμμα 5.11 Κοινό διάγραμμα της & μεταβολής ολικού αζώτου για τους 2 κάδους**

Από την πρώτη ήδη ημέρα παρατηρείται αύξηση της τιμής των αμμωνιακών και για τα δύο δείγματα μέχρι και την έκτη μέρα. Αυτό οφείλεται στην επαρκή διαθέσιμη ποσότητα οργανικών ενώσεων που είναι πλούσιες σε αζωτούχες ενώσεις. Από εκεί και έπειτα αρχίζει μια σταδιακή πτώση των τιμών μέχρι και το πέρας της διεργασίας.



**Διάγραμμα 5.12** Μεταβολή αμμωνιακών-νιτρικών στον πρώτο αντιδραστήρα

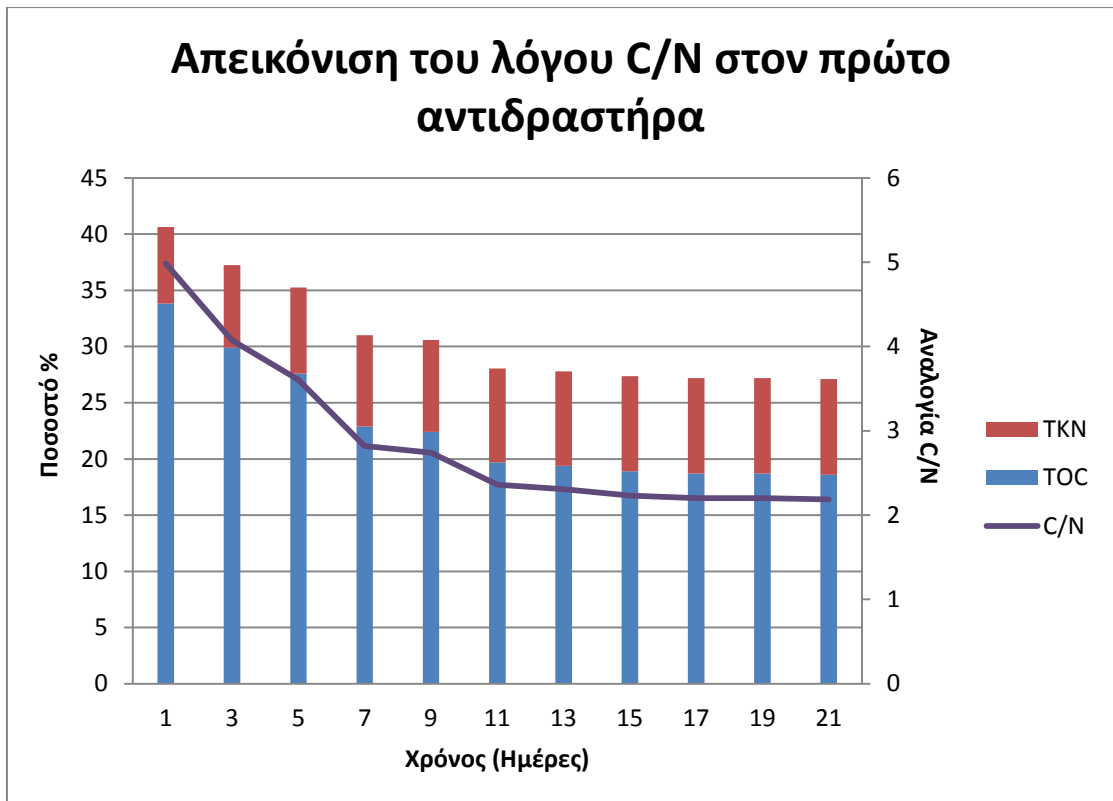
Ο πρώτος αντιδραστήρας αρχικά έχει 0,22% αμμωνιακά κατιόντα και έπειτα από την ανοδική πορεία καταλήγει την 21η ημέρα στο 0,08%. Αντίστοιχα για τον δεύτερο κάδο, το ποσοστό ξεκινά στο 0,2% και καταλήγει την 21η ημέρα στο 0,16%. Όπως βλέπουμε στα διαγράμματα, τα ποσοστά των νιτρικών ανιόντων είναι συγκριτικά αυξημένα σε σχέση με τα αμμωνιακά. Η έναρξη στον πρώτο κάδο γίνεται στο 3,64% και συνεχίζει ανοδικά μέχρι το πέρας της 21<sup>ης</sup> ημέρα όπου κλείνει στα 3,88%. Ομοίως για τον δεύτερο κάδο, το ποσοστό των νιτρικών αρχίζει από 4,16% και φτάνει στο τέλος της διεργασίας στο 4,33%. Πρέπει να τονίσουμε την αξιοσημείωτη αύξηση της περιεκτικότητας του υποστρώματος σε νιτρικά κατά την τελευταία εβδομάδα της διεργασίας της κομποστοποίησης και παράλληλα τη στασιμότητά της κατά την θερμόφιλη φάση (>40°C). Αυτό οφείλεται στον περιορισμό παραγωγής νιτρικών εξαιτίας της επικράτησης υψηλών θερμοκρασιών, την σημαντική παρουσία αμμωνιακών σε συνδυασμό με την διαμόρφωση αλκαλικού περιβάλλοντος. Στη δεύτερη μεσόφιλη φάση οι συνθήκες ανατρέπονται και ευνοείται η νιτροποίηση δηλαδή μετατροπή των αμμωνιακών σε νιτρικά. Αξίζει να σχολιασθεί το γεγονός ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση η αζωτούχος συγκέντρωση της ιλύος που πήραμε από την ΜΕΛ ήταν πάρα πολύ υψηλή. Τόσο υψηλές συγκεντρώσεις νιτρικών θα οδηγήσουν σε χαμηλής ποιότητας εδαφοβελτιωτικό μιας και ο λόγος C/N που θα προκύψει, ο οποίος είναι χαρακτηριστικό μέγεθος της ποιότητας και της ωρίμανσης του κομπόστ, θα βγει πολύ χαμηλός.



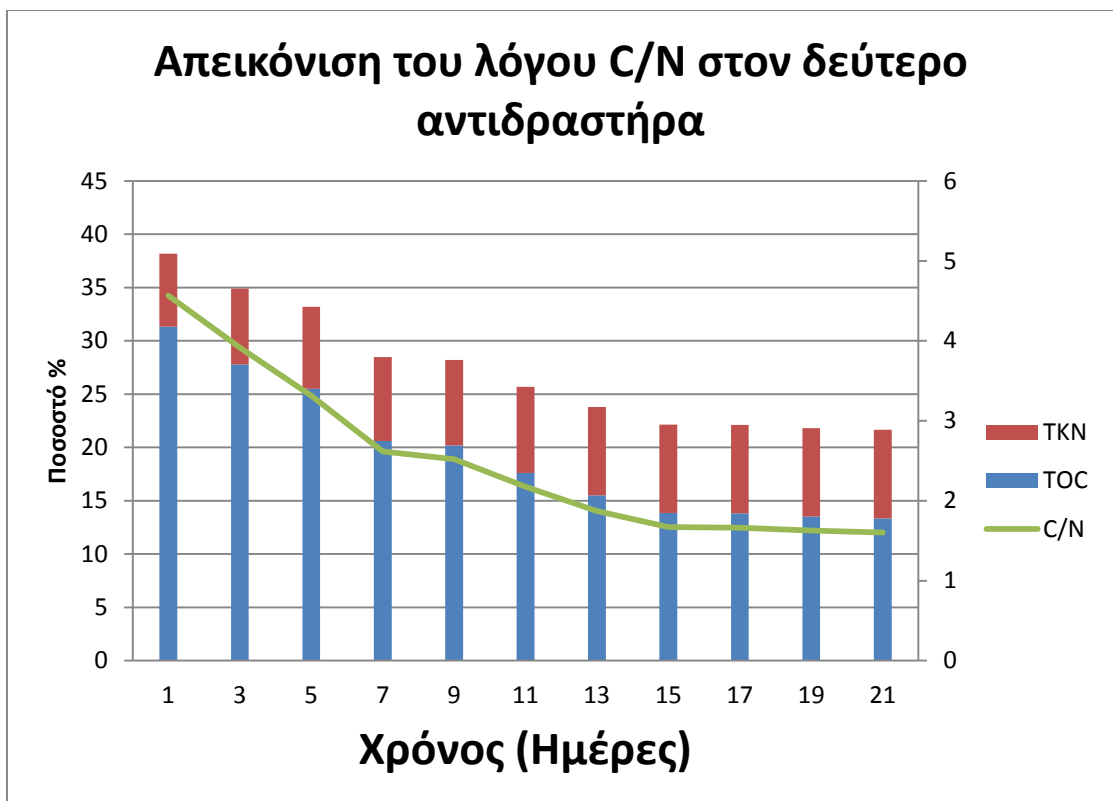
**Διάγραμμα 5.12 Μεταβολή αμμωνιακών-νιτρικών στον δεύτερο κύκλο**

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):

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



Διάγραμμα 5.13 Λόγος C/N στον πρώτο αντιδραστήρα



Διάγραμμα 5.14 Λόγος C/N στον δεύτερο αντιδραστήρα

Ο λόγος C/N και σε όλους τους αντιδραστήρες μειώνεται με το χρόνο καθότι ο ρυθμός μείωσης του άνθρακα είναι μεγαλύτερος από το ρυθμό μείωσης του αζώτου. Μέχρι την 11<sup>η</sup> ημέρα για τον πρώτο κάδο και την 15<sup>η</sup> ημέρα για τον δεύτερο, ο λόγος C/N μειώνεται δραματικά. Για τον πρώτο κάδο η μείωση είναι της τάξης του 35% ενώ για τον δεύτερο κάδο 60%. Η διαφορά σε αυτά τα ποσοστά έγκειται στο γεγονός ότι στον πρώτο κάδο η μείωση του ολικού άνθρακα είναι πιο περιορισμένη σε σχέση με αυτήν του δεύτερου και συγχρόνως στον δεύτερο κάδο η περιεκτικότητα σε άζωτο είναι εξορισμού μεγαλύτερη.

#### 5.4.3. Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά παραγόμενου κόμποστ

Όπως έχει αναφερθεί λήφθηκε αριθμός δειγμάτων λάσπης από τον σταθμό επεξεργασίας υγρών αποβλήτων μιας Βιομηχανίας στον Δ. Σχηματαρίου του Ν. Βοιωτίας. Όλη η ποσότητα της λάσπης συλλέχθηκε από κλίνες και αφέθηκε να ξηραθεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και στη συνέχεια αφού λειοτριβήθηκε και ομογενοποιήθηκε φυλάχθηκε σε μεγάλες σακούλες σε δροσερό και σκιερό μέρος. 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. Η διάρκεια ωρίμανσης του υλικού είναι 30 ημέρες από την ημέρα έναρξης της κομποστοποίησης και οι τελικές μετρήσεις έγιναν την 8<sup>η</sup> ημέρα μετά το πέρας της κομποστοποίησης. Το σύνολο των δεικτών αυτών και των παραμέτρων που μετρήθηκαν, παρατίθεται στον παρακάτω πίνακα για τους δύο αντιδραστήρες αντίστοιχα.

Πίνακας 5.11 Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του παραγόμενου κόμποστ και του αρχικού υποστρώματος (μίγματος) για κάθε πειραματικό κύκλο

| Παράμετρος           | Α Κάδος     |                       | Β Κάδος     |                       |
|----------------------|-------------|-----------------------|-------------|-----------------------|
|                      | Αρχική Τιμή | 28 <sup>η</sup> ημέρα | Αρχική Τιμή | 28 <sup>η</sup> ημέρα |
| pH                   | 6,08        | 5,9                   | 6,02        | 5,85                  |
| Αγωγιμότητα mS/cm    | 7,08        | 9,66                  | 8,5         | 11,05                 |
| Υγρασία %            | 54,5        | 45,1                  | 63,2        | 44,7                  |
| TOC %                | 33,84       | 18,6                  | 31,32       | 13,3                  |
| TKN %                | 6,8         | 8,55                  | 6,9         | 8,34                  |
| NO <sub>3</sub> -N % | 3,64        | 3,9                   | 4,16        | 4,35                  |
| NH <sub>4</sub> -N % | 0,22        | 0,08                  | 0,2         | 0,15                  |
| Cr mg/Kg             | 256         | 261                   | 184         | 189                   |
| Cu mg/kg             | 84          | 85                    | 42          | 42                    |
| Mn mg/kg             | 95          | 98                    | 111         | 112                   |
| Fe mg/kg             | 467         | 471                   | 583         | 589                   |
| Ni mg/kg             | 8           | 8                     | 2           | 2                     |

|                 |            |            |            |            |
|-----------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>Cd mg/kg</b> | <b>29</b>  | <b>29</b>  | <b>17</b>  | <b>17</b>  |
| <b>Pb mg/kg</b> | <b>177</b> | <b>187</b> | <b>5</b>   | <b>5</b>   |
| <b>Zn mg/kg</b> | <b>139</b> | <b>201</b> | <b>419</b> | <b>621</b> |

#### 5.4.3.1. Χρώμα και οσμή

Το χρώμα και η οσμή του κόμποστ αποτελούν φυσικά χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος τα οποία δύναται να παρέχουν άμεσες πληροφορίες σχετικά με τον βαθμό ωρίμανσής του (Bernal et al., 2009; Thompson, 2002). Σε αναντιστοιχία, οι δείκτες αυτοί είναι ποιοτικής φύσεως άρα αποτελούν μια πιο υποκειμενική προσέγγιση στον τελικό χαρακτηρισμό. Το αρχικό οργανικό μίγμα που αποτέλεσε την τροφοδοσία των δύο κύκλων είχε μια δυσάρεστη οσμή και το χρώμα του ήταν καφέ σκούρο και μαύρο. Κατά την πρόοδο της διεργασίας της κομποστοποίησης και αφού έχουν προστεθεί οι προσμίξεις του μαρουλιού, ψωμιού, φλούδας πατάτας και περλίτη, η απόχρωση του προϊόντος αλλάζει χρώμα από το καστανό και φαιό καφέ προς το ανοιχτό καστανό μέχρι το τέλος που παίρνει έναν πιο χρυσό καφέ – καφέ αμμώδη, γήινο τόνο. Η οσμή του είναι καθαρή χωμάτινη. Η οσμή της αμμωνίας έχει εξαλειφτεί. Όλα αυτά τα χαρακτηριστικά επιβεβαιώνονται από τη διεθνή βιβλιογραφία (Gajalakshmi, S., and Abbasi, 2008) και (M.A.P. Dinis, 2009).

#### 5.4.3.2. Υγρασία

Η υγρασία της ιλύος όπως αυτή παραλήφθηκε από την ΜΕΛ ήταν 67% ενώ μετά την προσθήκη των λοιπών πρώτων υλών έπεσε στο 54,5 και 63,2% αντίστοιχα για τους 2 κάδους. Η προσθήκη νερού ανά τακτά διαστήματα διόρθωνε το τυχόν χαμηλό ποσοστό υγρασίας σε ποσοστά που κυμαίνονταν από 50-60%. Στο τέλος της κομποστοποίησης οι δύο αντιδραστήρες είχαν τιμές 46,0 και 45,0 αντίστοιχα ενώ την 8<sup>η</sup> μέρα μετά το πέρας των διεργασιών έπεσε στο 45,1% για τον πρώτο κάδο και στον 44,7% για τον δεύτερο. Η διεθνής βιβλιογραφία ποικίλει στο θέμα της θεμιτής υγρασίας στο τελικό προϊόν. Οι Eggerth et al. (2007 και οι Bary et al. (2002) συνιστούν η τελική υγρασία να είναι εντός του εύρους 50 – 60%. Βάσει αυτής και οι δύο κάδοι είναι οριακά κάτω των κάτω ορίων. Η πλειοψηφία της επιστημονικής κοινότητας απεναντίας υποστηρίζει ότι μια υγρασία άνω του 50% στο τελικό προϊόν είναι ένα αρνητικό χαρακτηριστικό μιας και του ότι υπάρχει μεγάλο υδατινό φορτίο το οποίο αυξάνει την φαινόμενη πυκνότητα (bulk density) του τελικού προϊόντος και κατ' επέκταση του κόστους μεταφοράς. Αξίζει να σημειωθεί 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 οικολογικού σήματος σε βελτιωτικά εδάφους, το τελικό προϊόν πρέπει να περιέχει υγρασία μικρότερη του 75%.

#### 5.4.3.3. pH

Το pH του παραγόμενου κόμποστ αποτελεί μια επιπλέον παράμετρο αξιολόγησης του τελικού προϊόντος. Η σημαντικότητα ελέγχου της τιμής του pH στο κόμποστ απόκειται στην επίδραση του pH του εδάφους και κατ' επέκταση στη διαθεσιμότητα των χημικών ενώσεων στους φυσικούς οργανισμούς. Αναφορικά με τις τιμές του pH στο κόμποστ, το τελευταίο φαίνεται να έχει όξινες προς ουδέτερες τιμές. Τόσο στον πρώτο όσο και στον δεύτερο κάδο το pH την 8<sup>η</sup> μέρα μετά την περάτωση της διεργασίας έχει τιμές κοντά στο 6,0 και συγκεκριμένα 5,91 και 5,86 αντίστοιχα.

Για τους Zorras et al. (2000b) και Καπετάνιος 1990 το προτεινόμενο εύρος τιμής pH στο τελικό προϊόν είναι μεταξύ 6,0 και 7,0. Τιμές μικρότερες του 5,0 και μεγαλύτερες του 8,0 δύναται να φορτίσουν όξινα ή αλκαλικά το έδαφος και να προκαλέσουν αρνητικές επιπτώσεις στην πανίδα. Οι Κουλουμπής και Τσαντήλας (2007) παρουσιάζουν ενδεικτικές τιμές κοντά στο 7,0 τονίζοντας πως θα ήταν ευνοϊκότερο να τείνουν προς το όξινο με προτεινόμενο εύρος από 6,0 έως 7,5. Οι Diaz et al. (2002), αναφέρουν πως οι ενδεικτικές εμπορικές προδιαγραφές ποιότητας του τελικού προϊόντος ως κλάσης Α κόμποστ είναι 5,5-6,5 και κλάσης Β από 5,0-8,0.

#### 5.4.3.4. Αγωγιμότητα

Η αγωγιμότητα που προέκυψε για τους δύο αντιδραστήρες είναι σχετικά υψηλή, γεγονός που αποτελεί αποθαρρυντική ένδειξη για γεωργικές χρήσεις, εφόσον η τιμή της είναι σε άμεση συνάρτηση με την παρουσία των μεταλλικών και άλλων ιόντων στο υπόστρωμα. Για τον πρώτο κάδο η τιμή της αγωγιμότητας ήταν 9,66mS ενώ για τον δεύτερο 11,05mS.

Υψηλές τιμές αγωγιμότητας σημαίνει και μεγάλες συγκεντρώσεις αλάτων, τα οποία σε πολλές περιπτώσεις δημιουργούν προβλήματα στις καλλιέργειες. Η αγωγιμότητα είναι μια παράμετρος που είναι αντιστρόφως ανάλογη του pH (Wong et al, 1995). Αύξηση στην τιμή της αγωγιμότητας σημαίνει σημαντική μείωση στην τιμή του pH. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι σε χαμηλές τιμές του pH η χημική ισορροπία των μεταλλικών αλάτων αλλάζει με αποτέλεσμα να αυξάνει η διαλυτότητα των κατιονικών και ανιοντικών αλάτων (Wong et al, 1995).

#### 5.4.3.5. Αναλογία C/N

Η αναλογία C/N θεωρείται δικαίως ως ένας από τους πιο σημαντικούς δείκτες ελέγχου και αξιολόγησης του παραγόμενου κόμποστ διότι τόσο ο άνθρακας όσο και το άζωτο αποτελούν τα πιο σημαντικά στοιχεία στην απόδοση θρεπτικής ταυτότητας στο τελευταίο. Δεν πρέπει να ξεχνάμε πως ο δείκτης C/N δεν είναι ο πιο αξιόπιστος μιας και του ότι εξαρτάται απόλυτα από τις συγκεντρώσεις του αρχικού υποστρώματος (Cofie et al. 2009). Στον πίνακα 5.12 παρουσιάζονται προτεινόμενοι λόγοι C/N στο τελικό προϊόν από διάφορους ερευνητές.

Πίνακας 5.12 Προτεινόμενοι λόγοι C/N

| Αναλογία C/N    | Βιβλιογραφική αναφορά   |
|-----------------|---|
| <25             | Aslam et al. (2008), Brewer and Sullivan (2003), Erhart and Burian (1997) |
| A<20 & B<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<br>max.22 | Faithfull (2002)  |
| ~10             | Mathur (1991)   |
| <20             | Goyal et al. (2005), Μανιός και Μανιαδάκης (2001), Li et al.(2001)        |
| 15-20           | Bary et al. (2002)  |
| 15-25           | Sæbø and Ferrini (2006)   |
| <17             | WERL (2005)   |

Οι Diaz et al. (2002) ορίζουν ως ενδεικτικές εμπορικές προδιαγραφές ποιότητας του τελικού προϊόντος, αναφορικά με τον δείκτη C/N, ως κλάσης A μέγιστη τιμή ίση με 15 και ως κλάσης B μέγιστη τιμή ίση με 20. Χαρακτηριστικά όπως απεικονίζεται στον πίνακα 5.12 η αναλογία C/N κυμαίνεται μεταξύ 10 και 25 αν συγκρίνουμε τις διάφορες βιβλιογραφικές προτάσεις. Στην ουσία ένας λόγος C/N μικρότερος του 10 θα προκαλέσει τοξικές συνθήκες στους μικροοργανισμούς λόγω της παρουσίας αυξημένων συγκεντρώσεων αμμωνιακών που προέρχονται από την ανοργανοποίηση της περίσσειας αζώτου. (Diaz et al 2007). Επιπλέον, σύμφωνα με τους Gutser et al. (2005), οι αναλογίες μεγαλύτερες του 25 προκαλούν την ακινητοποίηση του αζώτου. Ο λόγος C/N και στους δύο αντιδραστήρες μειώνεται με το χρόνο διότι η συγκέντρωση του άνθρακα μειώνεται ραγδαία ενώ του αζώτου αυξάνεται ανεπαίσθητα σε σχέση με την αρχική. Στα τελικά προϊόντα των πειραματικών κύκλων οι αναλογίες C/N είναι 2,2 για τον πρώτο κάδο και 1,6 για τον δεύτερο. Εντός 10 ημερών ο λόγος C/N και για τους δύο κάδους υποδιπλασιάζεται και για τις υπόλοιπες δέκα μέρες παραμένει σταθερός με μια ανεπαίσθητη αρνητική κλίση. Οι τιμές του δείκτη C/N κρίνονται πολύ χαμηλές αν θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε τη λάσπη αυτή για την παραγωγή ενός καλής ποιότητας εδαφοβελτιωτικού. Ειδικά για τον λόγο C/N που έχουμε σαν ελάχιστο όριο το 10:1,



ο λόγος 2,2:1 και 1,6:1 είναι πολύ μικρός άρα το κόμποστ ποιοτικά είναι πολύ μικρής αξίας. Η φύση του λόγου  $C/N_{\text{τελικό}}$  είναι άμεσα εξαρτώμενη από την ποιότητα των πρώτων υλών. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η αζωτούχος συγκέντρωση της ύλης που πήραμε από την ΜΕΛ ήταν πάρα πολύ υψηλή άρα ήταν αναμενόμενο πως ο λόγος  $C/N_{\text{τελικό}}$  δεν θα ήταν εντός των θεμιτών ορίων.

Για να διαμορφώσουμε το υπόστρωμα με μεγαλύτερη αναλογία  $C/N$  πρέπει να προσθέσουμε υλικά με μεγάλο λόγο  $C/N$  τα οποία θα εξισορροπήσουν το  $C/N$  του αρχικού μίγματος και ταυτόχρονα θα προσφέρουν στην διαδικασία της κομποστοποίησης. Η ποσότητα που θα προστεθεί πρέπει να είναι ικανή να αυξήσει το δείκτη αλλά να μην παρακωλύσει την κομποστοποίηση λόγω συσσώρευσης κυτταρινούχων πρώτων υλών.

#### 5.4.3.6. Αμμωνιακά και Νιτρικά

Από τη δράση των πρωτεϊνολυτικών βακτηρίων που αρχίζει με την αύξηση της θερμοκρασίας του υποστρώματος στις πρώτες μέρες της διεργασίας της κομποστοποίησης παράγεται αμμωνία. Σημαντικό μέρος του αζώτου παράλληλα χάνεται στην ατμόσφαιρα υπό την μορφή αμμωνίας, ενώ η απώλεια είναι εντονότερο όταν συμβάλλουν και άλλοι παράγοντες, όπως η υψηλή θερμοκρασία και ο χαμηλός λόγος  $C/N$  (Καπετανίος, 1990, Zucconi et al 1988).

Η αυτότροφη νιτροποίηση είναι σχεδόν ανύπαρκτη στις πρώτες μέρες (2 εβδομάδες περίπου) της κομποστοποίησης. Η υψηλή θερμοκρασία είναι αυτή που δρα ανασταλτικά στην οξειδωση της αμμωνίας προς νιτρικά και νιτρώδη, ενώ για θερμοκρασίες μικρότερες της μεσόφιλης περιοχής η οξειδωση γίνεται με εντονότερο ρυθμό. Η νιτροποίηση αυτού του τύπου λαμβάνει χώρα μετά την 15 ημέρα της διεργασίας.

Οι συγκεντρώσεις των αμμωνιακών στο παραγόμενο κόμποστ είναι 0,08% για τον πρώτο κάδο και 0,19% για τον δεύτερο. Υψηλές συγκεντρώσεις αμμωνιακών στο κόμποστ υποδηλώνει μη σταθεροποιημένο υλικό το οποίο κατά την εναπόθεσή του στο έδαφος θα προκαλέσει ακινητοποίηση του αζώτου. Σύμφωνα με τους Bernal et al., (2002) το όριο είναι ίσο με  $400 \text{ mg kg}^{-1} \text{ dm}$  ενώ σύμφωνα με τους Barry et al., (2002) το όριο είναι  $500 \text{ mg kg}^{-1}$ . Επιπλέον, σύμφωνα με τις προδιαγραφές ποιότητας του Συμβουλίου ποιότητας κόμποστ της Καλιφόρνια των ΗΠΑ, το τελικό κόμποστ θεωρείται πολύ ώριμο αν έχει περιεκτικότητα σε αμμωνιακά μικρότερη του  $75 \text{ mg kg}^{-1} \text{ dm}$ , ώριμο αν έχει περιεκτικότητα ανάμεσα σε  $75$  με  $500 \text{ mg kg}^{-1} \text{ dm}$  και ως μη ώριμο αν έχει περιεκτικότητα πάνω από  $500 \text{ mg kg}^{-1} \text{ dm}$ .

Πέραν των συγκεντρώσεων των νιτρικών και αμμωνιακών στο κόμποστ, σημαντικός δείκτης ποιότητας και αξιολόγησης του τελικού προϊόντος αποτελεί λόγος των αμμωνιακών προς τα νιτρικά ( $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ). Σύμφωνα με τους Ko et al. (2008) ο

δείκτης  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  θεωρείται πιο αξιόπιστος από την αναλογία C/N για τον καθορισμό της ποιότητας του τελικού προϊόντος ενώ το Συμβούλιο Ποιότητας Κόμποστ της Καλιφόρνιας 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  $250 \text{ mg kg}^{-1} \text{ dm}$ .

Οι Pare et al. (1998) και οι Garcia et al. (1992) ορίζουν ως γενικό δείκτη ωρίμανσης του κόμποστ λόγου  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  μικρότερου του 1,0 ενώ σύμφωνα με το Συμβούλιο Ποιότητας Κόμποστ της Καλιφόρνιας, το τελικό κόμποστ ορίζεται ως πολύ ώριμο για λόγο  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^- < 0,5$ . Αναφορικά με τους πειραματικούς κύκλους, το τελικό κόμποστ έχει λόγο  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^- < 1$  και για τους δύο κάδους και πιο συγκεκριμένα 0,08 για τον πρώτο και 0,04 για τον δεύτερο. Η υψηλή συγκέντρωση του αρχικού δείγματος σε νιτρικά ήταν επόμενο πως θα μας οδηγούσε σε λόγο  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  μικρότερο του ένα.

#### 5.4.3.7. Χημικές μορφές μετάλλων

Τα βαρέα μέταλλα αποτελούν μια ομάδα χημικών ιχνοστοιχείων με μεγάλο μοριακό βάρος ( $\rho > 5 \text{ gr cm}^{-3}$ ). 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 μεγάλη συσσώρευσή τους στο έδαφος αυξάνει τις πιθανότητες διείσδυσης τους στα φυτά μέσω των ριζών και από εκεί στους βρώσιμους καρπούς. Η κατανάλωση των τελευταίων θα μεταφέρει τα βαρέα μέταλλα στον ανθρώπινο οργανισμό. Λόγω του ότι δεν μεταβολίζονται, η συγκέντρωσή τους θα αυξάνεται με συνέπειες στην υγεία όπως καρκινογένεσις, δηλητηριάσεις και μεταλλάξεις (Smith, 2009). Τα βασικότερα βαρέα μέταλλα που συναντώνται στο κόμποστ είναι το κάδμιο (Cd), το χρώμιο (Cr), ο χαλκός (Cu), το νικέλιο (Ni), ο μόλυβδος (Pb) και ο ψευδάργυρος (Zn). Καθώς τα βαρέα μέταλλα ενδέχεται να επηρεάσουν την ανάπτυξη των φυτών αλλά και την υγεία του ανθρώπου αλλά και των ζώων, το επίπεδο συγκέντρωσής τους στο κόμποστ θεωρείται βασική παράμετρος για τον χαρακτηρισμό της ποιότητάς του.

### 5.5. Βιολογικά χαρακτηριστικά παραγόμενου κόμποστ

Εκτός της φυσικοχημικής αξιολόγησης της ποιότητας του παραγόμενου κόμποστ πραγματοποιείται και βιολογική αξιολόγηση σύμφωνα με τα αποτελέσματα της φυτοτοξικότητας του παραγόμενου κόμποστ.

#### 5.5.1. Φυτοτοξικότητα

Ο σπόρος που χρησιμοποιείται διεθνώς για την εύρεση του Δείκτη Βλαστικότητας (Δ.Β.) είναι το μαρούλι.

Για την πραγματοποίηση του συγκεκριμένου πειράματος χρησιμοποιήθηκε ο σπόρος:

*Γένος: Lactuca*

*Είδος: Lactuca sativa*

*Οικογένεια: Asteraceae family*

Η φυτοτοξικότητα βελτιώνεται αισθητά σχεδόν σε όλους τους σπόρους μετά το πέρας 30 ημερών όπως βλέπουμε στον παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας 5.13 Δείκτης βλαστικότητας στα τελικά δείγματα και των δύο κάδων**

|                                     | <b>Δείκτης<br/>Βλαστικότητας</b> | <b>Χαρακτηρισμός</b> |
|-------------------------------------|----------------------------------|----------------------|
| Ανεπεξέργαστο δείγμα                | 91,35                            | Μη Φυτοτοξικό        |
| Τελικό δείγμα 1 <sup>ου</sup> κάδου | 104,2                            | Φυτοθρεπτικό         |
| Τελικό δείγμα 2 <sup>ου</sup> κάδου | 112,8                            | Φυτοθρεπτικό         |

Η προσθήκη τροφικών υπολειμμάτων σε συνδυασμό με περλίτη βελτίωσε σημαντικά το δείκτη βλαστικότητας σχεδόν σε όλους τους σπόρους σε σύγκριση με αυτούς του πρώτου κύκλου όπως βλέπουμε στον πίνακα 5.13. Το φαινόμενο αυτό είναι εντονότερο στον δεύτερο κάδο, γεγονός που πιθανόν να οφείλεται στη μικρότερη συγκέντρωση βαρέων μετάλλων και της μεγαλύτερης ποσότητας φυτοθρεπτικών προσθέτων, δηλαδή των οργανικών προσθέτων που προσθέσαμε (σε ποσότητα ίση με το 70% του μίγματος). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της φυτοτοξικότητας του μαρουλιού, το τελικό προϊόν χαρακτηρίζεται ως φυτοθρεπτικό και δεν περιέχει τοξικές ενώσεις οι οποίες δύναται να αναστείλουν την ανάπτυξη των φυτικών μικροοργανισμών.

## 6. Συμπεράσματα

Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας είχε σκοπό την σταθεροποίηση βιολογικής ύλης βιομηχανικής προέλευσης σε συνδυασμό με τροφικά υπολείμματα και πρόσθετο περλίτη μέσω αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας (κομποστοποίησης).

Η μέθοδος η οποία αναπτύχθηκε ήταν η διεργασία της κομποστοποίησης. Μια μέθοδος η οποία εκμεταλλεύεται όλα τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά της πρώτης ύλης δίνοντάς μας ένα τελικό προϊόν το οποίο είναι σταθεροποιημένο, δεν περιέχει παθογόνους μικροοργανισμούς και μπορεί πλέον να αποτεθεί σε καλλιεργήσιμες εκτάσεις ως εδαφοβελτιωτικό, όπως επίσης σε χώρους υγειονομικής ταφής, σε χώρους αποκατάστασης παλαιών λατομείων ή ακόμα και στη δασοπονία για λόγους αναδάσωσης. Το υλικό τροφοδοσίας του συστήματος κομποστοποίησης επιλέχθηκε δειγματοληπτικά από τον σταθμό επεξεργασίας υγρών αποβλήτων μιας Βιομηχανίας στον Δ. Σχηματαρίου του Ν. Βοιωτίας. Με βάση τις αρχικές συνθήκες των υποστρωμάτων προέκυψε ότι τα αρχικά μίγματα χαρακτηρίζονται από πολύ χαμηλό δείκτη C/N λόγω της υψηλής περιεκτικότητας των αποβλήτων σε άζωτο ενώ η περιεκτικότητά τους σε βαρέα μέταλλα είναι κάτω των ορίων αλλά σε επικίνδυνη ζώνη.

Οι σχετικά υψηλές συγκεντρώσεις σε βαρέα μέταλλα που περιέχει η λάσπη η οποία χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική δημιουργεί επιπρόσθετα προβλήματα στην ασφαλή διάθεσή τόσο της πρώτης ύλης ως έχει όσο και του κομποστ. Για τον λόγο αυτό έγινε προσπάθεια κομποστοποίησης της λάσπης αυτής με τη χρήση περλίτη (πρόσθετο ορυκτό) ο οποίος 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 όμως να λαμβάνει μέρος στη βιοχημική διεργασία της κομποστοποίησης καθώς αποτελεί αδρανές υλικό.

Η διεργασία της συγκομποστοποίησης αναπτύχθηκε σε κλειστούς κάθετους κάδους για 21 ημέρες με ανάδευση. Μετά την 21<sup>η</sup> ημέρα και το πέρας της κομποστοποίησης, το μίγμα παρέμεινε για 8 ημέρες μέσα σε κλειστές σακούλες για ωρίμανση. Τα δείγματα αναδεύονταν καθημερινά για να μην επικρατήσουν αναερόβιες συνθήκες.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την εργασία αφορούν (α) τον έλεγχο και την παρακολούθηση των διεργασιών της κομποστοποίησης στους δύο αντιδραστήρες και (β) την ποιότητα του τελικού προϊόντος (φυσικοχημικές και βιολογικές ιδιότητες). Ως προς τη λειτουργία του συστήματος της κομποστοποίησης κατά την αερόβια βιολογική επεξεργασία παρατηρούνται τα εξής:

- Η διακύμανση της θερμοκρασίας που αναπτύχθηκε και στους δύο κάδους κρίνεται φυσιολογική για τα δεδομένα της αερόβιας συγκομποστοποίησης καθώς περνάμε από την πρώτη μεσόφιλη φάση στην θερμοφιλή και έπειτα στην δεύτερη μεσόφιλη φάση ομαλά. Η μετάβαση από τη μεσόφιλο προς τη θερμοφιλή φάση γίνεται σταδιακά εντός τριών ημερών. Τόσο στον πρώτο όσο και στον δεύτερο κάδο επιτυγχάνονται χαρακτηριστικά υψηλές θερμοκρασίες άνω των 69°C έστω για λίγες ώρες στη θερμοφιλή φάση και σαν αποτέλεσμα αποστειρώνεται όλη η έκταση του μίγματος από παθογόνους μικροοργανισμούς. Η γρήγορη μετάβαση στη θερμοφιλή φάση της διεργασίας αποδίδεται στις ελεγχόμενες συνθήκες των βιοξειδωτικών αντιδράσεων και στον περιορισμό της επίδρασης εξωγενών παραγόντων όπως η θερμοκρασία περιβάλλοντος, η βροχόπτωση κλπ., λόγω του κλειστού τύπου αντιδραστήρα.
- Η υγρασία της αρχικής ύλης βρίσκεται εντός του επιθυμητού εύρους των 50-60°C και μετά την ανάμιξή της με τα πρόσθετα πέφτει αισθητά. Η διακύμανσή της στη θερμοφιλή φάση ρυθμίζεται προσεκτικά με συχνή προσθήκη νερού ώστε να εξομαλυνθούν οι απώλειες από την εξάτμιση. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα ποσοστά υγρασίας όλων των πειραματικών κύκλων στη μέτρηση των 30 ημερών παραμένουν σε φυσιολογικά επίπεδα (κυμαίνονται από 45,0% έως 46,0% κ.β.) για το λόγο αυτό δεν συνίσταται το παραγόμενο κόμποστ να αφεθεί εκτός αντιδραστήρα για περαιτέρω μείωση της υγρασίας και της σταθεροποίησης του.
- Το pH σε όλους τους αντιδραστήρες ακολουθεί πορεία που υποδεικνύει τη σωστή εξέλιξη της διεργασίας της κομποστοποίησης. Αρχικά παρουσιάζεται πτώση του pH, λόγω του σχηματισμού οργανικών οξέων από τη διάσπαση των οργανικών ενώσεων, και εν συνεχεία αυξάνεται λόγω της διάσπασης των οργανικών οξέων σε απλούστερες ενώσεις και την παράλληλη έκλυση αμμωνίας. Η κορύφωση του pH ταυτίζεται χρονικά με την θερμοφιλή φάση και συγκεκριμένα τη μέρα όπου παρουσιάζεται η μέγιστη θερμοκρασία. Προς το τέλος της διεργασίας το ελαφρώς αλκαλικό περιβάλλον που έχει διαμορφωθεί, τείνει προς ελαφρώς όξινες λόγω της μείωσης της παραγωγής αμμωνιακών κατιόντων και της συνέχιση της διάσπασης της οργανικής ύλης προς όξινες ενώσεις.
- 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 και οι απώλειες της οργανικής ουσίας ανέρχονται σε υψηλά επίπεδα με το μεγαλύτερο ποσοστό απωλειών να λαμβάνει χώρα κατά το θερμοφιλή στάδιο της κομποστοποίησης. Τόσο οι απώλειες όσο και ο ολικός οργανικός άνθρακας τείνουν να εξομαλυνθούν κατά το τέλος της κομποστοποίησης, πράγμα που οφείλεται στις σταθερότερες οργανικές ενώσεις που

επικρατούν στο υπόστρωμα. Μεγαλύτερη αποδόμηση οργανικού άνθρακα παρουσιάζεται στον δεύτερο αντιδραστήρες με περισσότερα πρόσθετα, ενώ αντίθετα στον πρώτο αντιδραστήρα (50-50) υπάρχει μικρή αποδόμηση λόγω πιθανής μη ορθής ανάπτυξης των διεργασιών.

- Η ποσοστιαία περιεκτικότητα του αζώτου στο αρχικό υπόστρωμα είναι υψηλή λόγω της φύσης του προς επεξεργασία υλικού (ιλύς) αυξημένη. Η παραγωγή νιτρικών είναι σταθερή κατά τα πρώτα στάδια της κομποστοποίησης και αυξάνεται προς το τέλος της διεργασίας.
- Λόγω της υψηλής περιεκτικότητας της πλειονότητας των επιλεγμένων βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων σε άζωτο, διαμορφώνονται χαμηλοί λόγοι C/N στο αρχικό μίγμα των υποστρωμάτων, κάνοντας εντονότερη τη διάσπαση του οργανικού αζώτου με συνεπακόλουθη αύξηση της συγκέντρωσης αμμωνιακών στα πρώτα στάδια των διεργασιών της κομποστοποίησης. Ο εμπλουτισμός του μίγματος σε O<sub>2</sub> μέσω της τακτικής ανάδευσης, ενισχύει τη διεργασία της νιτροποίησης και της σταδιακή αύξηση των νιτρικών. Η συνεχής αυτή αύξηση των νιτρικών αποτελεί δείκτη της επικράτησης αερόβιων συνθηκών και κατ' επέκταση της αποδοτικότητας και λειτουργικότητας του συστήματος κομποστοποίησης.
- Οι αρχικοί λόγοι C/N που προκύπτουν για τους δύο αντιδραστήρες είναι ήδη πολλοί χαμηλοί σε σχέση με τα ιδανικά επίπεδα για την παραγωγή ενός ποιοτικού εδαφοβελτιωτικού.
- Το ποσοστό των θρεπτικών συστατικών (άζωτο και ιχνοστοιχεία) στο τελικό προϊόν καθώς και η μειωμένη υγρασία και το καλύτερα ρυθμισμένο pH του, επαληθεύει την ορθή επιλογή του περλίτη. Ο περλίτης προσδίδει πορώδες στο μίγμα ευνοώντας όλες τις αερόβιες διεργασίες αποτρέποντας τις αναερόβιες συνθήκες που θα μόλυναν το υπόστρωμα.
- Η αρχική πλήρωση του αντιδραστήρα πρέπει να είναι στο 100 % ή τουλάχιστον άνω του 80% του όγκου του για την ορθή διεξαγωγή της διεργασίας της κομποστοποίησης. Η μεγάλη απώλεια μάζας που συντελείται στα αρχικά στάδια της διεργασίας καθιστά δύσκολη την διατήρηση της θερμοκρασίας σε επιθυμητά επίπεδα με αποτέλεσμα να χρειάζονται περισσότερες συμπληρωματικές τροφοδοσίες.

Ως προς τα φυσικοχημικά και βιολογικά χαρακτηριστικά του παραγόμενου κόμποστ το οποίο προέρχεται από τις πειραματικές εφαρμογές τους συστήματος κομποστοποίησης προκύπτουν τα εξής:

- Η περιεχόμενη τελική υγρασία του τελικού προϊόντος ανέρχεται σε 45,0% για τον πρώτο κάδο και 46,0% για τον δεύτερο κάδο, εντός των ορίων της διεθνούς βιβλιογραφίας.
- Τόσο στον πρώτο όσο και στον δεύτερο κάδο το pH την 8<sup>η</sup> μέρα μετά την περάτωση της διεργασίας έχει τιμές κοντά στο 6,0 και συγκεκριμένα 5,91 και

5,86 αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές είναι εντός των επιθυμητών ορίων για την εναπόθεση του κόμποστ στο έδαφος με μια μικρή μετατόπιση προς την όξινη περιοχή.

- Το παραγόμενο κόμποστ είναι πλούσιο σε οργανική ουσία (34,0% και 24,6% 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 πολύ χαμηλά και πιο συγκεκριμένα 2,2 και 1,6 αντίστοιχα για τους δύο κάδους. Δύναται να προκληθεί 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.
- Το τελικό κόμποστ έχει λόγο  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^- < 1$  και για τους δύο κάδους και πιο συγκεκριμένα 0,08 για τον πρώτο και 0,04 για τον δεύτερο. Η υψηλή συγκέντρωση του αρχικού δείγματος σε νιτρικά ήταν επόμενο πως θα μας οδηγούσε σε λόγο  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  μικρότερο του ένα ενδεικτική τιμή καλής ποιότητας κόμποστ
- 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. Στον αντίποδα, οι συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων είναι πάντα εντός των πλαισίων που έχει θέσει η Ε.Ε. για την τελική διάθεση στο έδαφος.
- Ο Δείκτης Βλαστικότητας του κόμποστ είναι 104,2 και 112,8% για τους σπόρους μαρουλιού υποδεικνύοντας πως το κόμποστ έχει φυτοθρεπτικό χαρακτήρα και πρόκειται να ευνοήσει την ανάπτυξη και βλαστικότητα συγκεκριμένων φυτών.
- Η φυτοθρεπτική ικανότητα του τελικού παραγόμενου προϊόντος, σε όλους τους κύκλους πειραμάτων, εξασφαλίζεται από την ανάπτυξη του πρότυπου σπόρου μαρούλι *Γένος: Lactuca - Είδος: Lactuca sativa*.

Συνοψίζοντας διαπιστώνουμε πως το μίγμα ιλύος και προσθέτων δύναται να επεξεργαστεί αποτελεσματικά με τη χρήση του συστήματος αερόβιας κομποστοποίησης ενώ παράλληλα το τελικό κόμποστ πληροί τις απαραίτητες φυσικοχημικές και βιολογικές ιδιότητες για το χαρακτηρισμό του ως ώριμο το οποίο μπορεί να διατεθεί με ασφάλεια για εδαφοβελτιωτικές δραστηριότητες.

## 7. Βιβλιογραφία

- Abbasi S.A., Ramasamy E.V., Gajalakshmi S., Khan F.I. and Abbasi N., eds. (2000), "A waste management project involving engineers and scientists of a university, a voluntary (non-governmental) organization, and lay people—A case study", In Proceedings of International Conference on Transdisciplinarity, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, (February 1-3).
- Alef K. and Kleiner D., eds. (1986), "Arginine ammonification as a simple method to estimate soil microbial activity potentials in soil", *Soil Biology and Biochemistry*, 18, pp. 233–235.
- Alexander M., (1961), "Introduction to soil microbiology", Wiley, New York, pp. 163–182.
- Andreadakis AD., Mamais D., Gavalaki E., Kampylafka S., eds. (2002), "Sludge Utilization Agriculture: Possibilities and Prospects in Greece", *Water Science and Technology*, 46 (10), pp. 231-238.
- Beck-Friis B., Smars S., Jonsson H. and Kirchmann H., eds., (2001), "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), pp. 423–430.
- Bertoldi M. de and Vallini, P.A. (1983), "The biology of composting: A review", *Waste*
- Bertoldi M. de, Zucconi F. and Civilini M. eds. (1988), "Temperature, pathogen control and product quality", *Biocycle*, 29(2), pp. 43–50.
- Bharadwaj K.K.R., (1995), "Improvements in microbial compost technology: A special reference to microbiology of composting", *Wealth from waste*, Khanna S. and Mohan K. eds., Tata Energy Research Institute, New Delhi, pp. 115–135.
- Cofie O., Kone D., Rothenberger S., Moser D. and Zubruegg C., eds. (2009), "Co-composting of faecal sludge and organic solid waste for agriculture: Process dynamics", *Water Research* 43(18) , pp. 4665-4675.
- Comwaste, LIFE03 ENV/GR/205, (2006), "Προώθηση και εφαρμογή συστήματος για την παραγωγή υψηλής ποιότητας compost από βιοαποδομήσιμο οργανικό υλικό διαχωρισμένο στην πηγή".
- Cooperband, L.R. (2000), "Composting: art and science of organic waste conversion to a valuable soil resource", *Laboratory Medicine*, 31, pp. 283–289.
- Diaz M.J., Eugenio M.E., Jimenez L., Madejon E. and Cabrera F. eds. (2003), "Modeling vinasse/cotton waste ratio incubation for optimum composting", *Chemical Engineering Journal*, 93, pp. 233–240.



- Diaz M.J., Madejon E., Lopez F., Lopez R. and Cabrera F., eds. (2002b). *"Optimization of the rate vinasse/grape marc for co-composting process"*, *Process Biochemistry*, 37, pp. 1143–1150.
- Diaz M.J., Madejon E., Lopez F., Lopez R. and Cabrera F., eds. (2002a), *"Composting of vinasse and cotton gin waste by using two different systems"*, *Resources, Conservation and Recycling*, 34, pp. 235–248.
- Diaz-Burgos M.A., Ceccanti B. and Polo A., eds. (1993), *"Monitoring biochemical activity during sewage sludge composting"*, *Biology and Fertility of Soils*, 16, pp. 145–150.
- Dinis M.A.P., (2009), "Co-composting. A Brief Review", Pesoa, Portugal
- Dominic Hogg, Josef Barth, Enzo Favoino, Massimo Centemero, Valentina Caimi, Florian Amlinger, Ward Devliegher, Will Brinton and Susan Antler, eds., (2002), *"Comparison Of Compost Standards Within the EU, North America and Australasia"*, The Waste and Resources Action Programme .
- 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.
- EC (European Commission), (2001), *" Working Document: Biological treatment of biowaste"*, DG ENV,
- 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), (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.  
ENV.A.2/LM/biowaste/2nd draft.  
[http://www.compost.it/www/publicazioni\\_on\\_line/biod.pdf](http://www.compost.it/www/publicazioni_on_line/biod.pdf)
- Epstein E., (1997), *"The science of composting"*, Technomic Publishing, Lancaster, PA.  
Eurostat waste generated treated in Europe (data 1995 -2003).
- Gajalakshmi S. and Abbasi S.A. (2003), *"High-rate vermicomposting systems for recycling paper waste"*, *Indian Journal of Biotechnology*, 2, pp. 613–615.
- Gajalakshmi S. and Abbasi S.A. (2004a), *"Earthworms and vermicomposting"*, *Indian Journal of Biotechnology*, 3, pp. 486–494.
- Gajalakshmi S. and Abbasi S.A., (2002), *"Effect of the application of water hyacinth compost/ vermicompost on the growth and flowering of Crossandra"*

- undulaefolia, and on several vegetables*", Bioresource Technology, 85, pp. 197–199.
- Gajalakshmi S. and Abbasi. S.A. (2004b), "*Neem leaves as a source of vermicompostcum-pesticide*", Bioresource Technology, 92, pp. 291–296.
- Gajalakshmi S., (2003), "*Development of methods for the treatment and reuse of municipal and agricultural solid wastes appropriate for rural/suburban households*", PhD thesis, Pondicherry University, Pondicherry, India.
- Gajalakshmi S., Ramasamy E.V. and Abbasi E.V., eds. (2001b), "*Screening of four species of detritivorous (humus-former) earthworms for sustainable vermicomposting of paper waste*", Environmental Technology, 22, pp. 679–685.
- Gajalakshmi S., Ramasamy E.V. and Abbasi E.V., eds. (2001c), "*Towards maximizing output from vermireactors fed with cowdung spiked paper waste*", Bioresource Technology, 79, pp. 67–72.
- Gajalakshmi S., Ramasamy E.V. and Abbasi S.A., eds (2005b), "*A highly cost-effective simplification in the design of fast-pacedc vermireactors based on epigeic earthworms*", Biochemical Engineering Journal, 22, pp.111–116.
- Gajalakshmi S., Ramasamy E.V. and Abbasi E.V. eds., (2001a), "*Potential of two epigeic and two anecic earthworm species in vermicomposting of water hyacinth*", Bioresource Technology 76, pp. 177–181.
- Gajalakshmi S., Ramasamy E.V. and Abbasi S.A., eds., (2005a), "*Composting, vermicomposting of leaf litter ensuing from the trees of mango (Mangifera indica) Kinberg*", Bioresource Technology, 96, pp. 1057–1061.
- Gajalakshmi S. and Abbasi S.A," *Solid Waste Management by Composting: State of the Art*", Critical reviews in Environmental Science & Technology, Pondicherry, India.
- Hansen R.C., Keener H.M., Dick W.A., Marugg C. and Hoitink H.A.J., eds. (1990), "*Poultry manure composting: Ammonia capture and aeration control*", Proceedings of American Society of Agricultural Engineers meeting, Columbus, OH, paper 894075, pp. 24–27.
- Hargreaves J.C., ADL M.S. and WARMAN P.R., eds. (2008), "*A review of the use of composted municipal solid waste in agriculture*", Agriculture, Ecosystems and Environment, 123 (1-3), pp. 1-14.
- Haug R.T., (1993), "*The practical handbook of compost engineering*", Lewis Publishers, London.
- <http://europa.eu.int/comm/environment/sludge/report10.htm>  
[http://www.eea.europa.eu/publications/topic\\_report\\_2001\\_15](http://www.eea.europa.eu/publications/topic_report_2001_15).
- Kapetanios E.G., Loizidou M. and Vakanas G., eds. (1993), "*Compost production from Greek domestic reuse*", Bioresource Technology, 43, pp. 13–16.
- Kim H. Tan, (1996), "*Soil Sampling, Preparation, and Analysis*", University of Georgia Athens, Georgia, Marcel Dekker Inc., Ed. USA.

- Komilis D.P., Tziouvaras I.S., eds.,(2009), "*A statistical analysis to assess the maturity and stability of six composts*", Waste Management (29) 5, pp. 1504 – 1513.
- Levlin E. and Hultman B., eds., (2008), "*Konduktivitetmätningar som mät och kontrollmetod vid kommunala avloppsanläggningar*", Svenskt Vatten Utveckling, Nr 2008-04.
- Liu C. and Lo K. V., eds., (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(9), pp. 1671-1688.
- Lopez-Real J. and Baptista M., eds., (1996), "*A preliminary comparative study of three manure composting systems and their influence on process parameters and methane emissions*", Compost Science and Utilization, 4, pp.71–82.
- Malamis, S. A., (2009), "*Biological Wastewater Treatment with the Use of Membranes*", Civil Engineering, Ph.D, National Technical University of Athens, Athens, Greece.  
Management Research 1, pp. 157–176.
- Marche T., Schnitzer M., Diné H., Pare T., Champagne P., Schulten H.R. and Facey G., eds., (2003), "*Chemical changes during composting of a paper mill sludge/ hardwood sawdust mixture*", Geoderma, 116, pp. 345–356.  
*mesophilic temperature control*", Bioresource Technology, 84, pp. 237–241.
- Muthukumar G. and Mahadevan A., eds., (1983), "*Microbial degradation of lignin*", Journal of Science and Industrial Research, 42, pp. 518–528.
- Nakasaki K., Yaguchi, H., Sasaki M. and Kubota H., eds., (1993), "*Effects of pH control on composting of garbage*", Waste Management and Research, 11, pp. 117–125.
- Official Journal of the European Communities L 181/6 COUNCIL DIRECTIVE of 12 June 1986 on the protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture (86/278/EEC).
- Official Journal of the European Communities L 182/1 COUNCIL DIRECTIVE 1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste.
- Official Journal of the European Communities L 242/17 Commission Decision of 28 August 2001 establishing ecological criteria for the award of the Community eco-label to soil improvers and growing media (Text with EEA relevance) (notified under document number C(2001) 2597), (2001/688/EC).
- Ott P., (1990), "*The composting of farmyard manure with mineral additives and under forced aeration, and the utilization of FYM and FYM compost in crop production*", PhD thesis, Universität des Landes, Hessen.
- 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, pp. 173–178.

- Peigne J. and Girardin P., eds., (2004), *"Environmental impacts of farm-scale composting practices"*, Water, Air and Soil Pollution, 153, pp. 45–68.
- Smars S., Gustafsson L., Beck-Friis B. and Johnsson H., eds., (2002), *"Improvement of the composting time for household waste during an initial low pH phase by"*
- Stylianou M. A., Inglezakis V. J., Moustakas K. G. and Loizidou M. D., eds., (2008), *"Improvement of the quality of sewage sludge compost by adding natural clinoptilolite"*, Desalination 224 (1-3), pp. 240-249.
- Tiquia S.M. and Tam N.F.Y., eds., (2000a), *"Microbiological and chemical parameters for compost maturity evaluation of spent pig litter disposed from the pig-onlitter system"*, Wannan P.R. and Taylor B.R. (Eds.), Proceedings of the International Composting Symposium (ICS 1999), II, CBA Press, Nova Scotia, Canada, pp. 648–669.
- Tuomela M., Vikman M., Hatakka A. and Itavaara M., eds., (2000), *"Biodegradation of lignin in a compost environment: A review"*, Bioresource Technology, 72(2), pp. 169–183.
- Turan N. G. and Ergun O. N., eds., (2007), *"Ammonia uptake by natural zeolite in municipal solid waste compost"*, Environmental Progress, 26(2), pp. 149-156.
- Turan N. G. and Ergun O. N., eds., (2008), *"Improving the quality of municipal solid waste compost by using expanded perlite and natural zeolite"*, Clean - Soil, Air, Water, 36(3), pp. 330-334.
- Washington State Department of Ecology, (1994), *"Interim Guidelines for Compost Quality"*, Solid Waste Services Program, USA.
- Zorpas A.A., Arapoglou D. and Panagiotis K., eds., (2003), *"Waste paper and clinoptilolite as a bulking material with dewatered anaerobically stabilized primary sewage sludge (DASPSS) for compost production"*, Waste Management, 23, pp. 27–35.
- Zorpas A.A., Kapetanios E., Zorpas G.A., Karlis P., Vlyssides A., Haralambous I. and Loizidou M., eds., (2000a), *"Compost produced from organic fraction of municipal solid waste, primary stabilized sewage sludge and natural zeolite"*, Journal of Hazardous Materials, B77, pp. 149–159.
- Zorpas A.A., Vassilis I., Loizidou M. and Grigoropoulou H., eds., (2002), *"Particle size effects on uptake of heavy metals from sewage sludge compost using natural zeolite clinoptilolite"*, Journal of Colloid and Interface Science, 250, pp. 1–4.
- Zucconi F. and De Bertoldi M., eds., (1987), *"Compost specifications for the production and characterization of compost from municipal solid waste"*, Compost: Production, Quality and use, pp. 30-50.
- Ανδρεαδάκης Α., *"Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων"* σημειώσεις για το μάθημα Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων και Ιλύος Αρχές και Μέθοδοι Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων.
- Βογιατζιδάκη Ευγενία-Ελένη,(2006), *"Παραγωγή Εδαφοβελτιωτικού με Χρήση Οικιακού Κομποστοποιητή"*, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα

- Γιδαράκος Ευάγγελος, *"Διαχείριση και Επεξεργασία Αστικών Απορριμμάτων"*, Σημειώσεις Μαθήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Εργαστήριο τοξικών και επικινδύνων αποβλήτων, Απρίλιος 2007.
- Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης L 114/9 ΟΔΗΓΙΑ 2006/12/ΕΚ ΤΟΥ ΕΥΡΩΠΑΙΚΟΥ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ της 5ης Απριλίου 2006 περί των στερεών αποβλήτων.
- Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης L 312/3 ΟΔΗΓΙΑ 2008/98/ΕΚ ΤΟΥ ΕΥΡΩΠΑΙΚΟΥ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ της 19ης Νοεμβρίου 2008 για τα απόβλητα και την κατάργηση ορισμένων οδηγιών.
- Επίσημη Εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων L 194 ΟΔΗΓΙΑ 75/442/ΕΟΚ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ της 15ης Ιουλίου 1975 περί των στερεών αποβλήτων.
- Επίσημη Εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων L 257/26 ΟΔΗΓΙΑ 96/61/ΕΚ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ της 24ης Σεπτεμβρίου 1996, σχετικά με την ολοκληρωμένη πρόληψη και έλεγχο της ρύπανσης.
- Ζορπάς Αντώνης Α., *"Ανάπτυξη Μεθοδολογίας για την Κομποστοποίηση της Ιλύος με Χρήση Ζεόλιθων"*, Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 1999.
- Κατερινόπουλος Αθανάσιος και Σταματάκης Μιχαήλ, (2004), *"Εφαρμοσμένη Πετρολογία -Βιομηχανικά Ορυκτά"*, Έκδοση Πανεπιστημίου Αθηνών- Τμήμα Γεωλογίας, Αθήνα 2004.
- Κοσιάρης Γ., *"Τα βιομηχανικά ορυκτά της Ελλάδας"*, Γ' Συνέδριο για τον Ελληνικό Πλούτο, Αθήνα 1987.
- Λάλας Δ., Γεωργοπούλου Ε., Γιδαράκος Ε., Γκέκας Ρ., Λαζαρίδη Α., Μαυρόπουλος Α., Μοιρασγεντής Σ., Σελλάς Ν., Σχέδιο τελικής έκθεσης προς το ινστιτούτο τοπικής αυτοδιοίκησης για την μελέτη, *"Εκτίμηση των Γενικευμένων Επιπτώσεων και Κόστους Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων"*, Αθήνα, Απρίλιος 2007.
- Λοϊζίδου Μ., *"Στερεά απόβλητα"*, Σημειώσεις για το μάθημα, ΕΜΠ, Αθήνα 2006.
- Μαλαμής Δ. (2011), PhD, *"Σχεδιασμός, κατασκευή και λειτουργία βιοαντιδραστήρα για την επεξεργασία οργανικών αποβλήτων"*, Αθήνα.
- Μαργαρίτης Μ., *"Ανάπτυξη συστημάτων δέσμευσης βαρέων μετάλλων από σταθεροποιημένα οργανικά στερεά απόβλητα"*, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα 2006.
- Νικολάου Ν.Γ., Πορφύρης Σ.Δ., *"Περλίτης ,ο Ελληνικός Ορυκτός Πλούτος"*, Σύνδεσμος Μεταλλευτικών Επιχειρήσεων, 1979, σελ. 566-567
- Πέππας Α., *"Εμβάθυνση στην πειραματική διόγκωση του Περλίτη"*, Αθήνα 1998.
- Σταματάκης Δρ.Μιχαήλ, *"Βιομηχανικά ορυκτά και πετρώματα (Περιβάλλον σχηματισμού, Κοιτάσματα και Βιομηχανικές Χρήσεις τους)"* , Έκδοση Πανεπιστημίου Αθηνών- Τμήμα Γεωλογίας, Αθήνα 2001
- Φιλλιπίδης Α., (1986), Σημειώσεις Κοιτασματολογίας, Βιομηχανία Ορυκτά και Πετρώματα-Περλίτης, Α.Π.Θ .

Φραγγελάκης Ε., *"Κομποστοποίηση Οργανικού Κλάσματος Οικιακών Απορριμμάτων"*, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα 2006.

Χρηστίδης Δρ. Γεώργιος, *"Κοισματολογία II (Βιομηχανικά Ορυκτά και Πετρώματα)"*, Χανιά 2004.

European Commission, Eurostat : [www.eurostat.ec.europa.eu](http://www.eurostat.ec.europa.eu)

Humintech : [www.humintech.com](http://www.humintech.com)

S & B Βιομηχανικά Ορυκτά : [www.sandb.com](http://www.sandb.com)

[www.perlite.net](http://www.perlite.net)

Ελληνικού Οργανισμού Εξωτερικού Εμπορίου: [www.hepo.gr](http://www.hepo.gr)

Μεταλλευτικό Μουσείο Μήλου : [www.milosminingmuseum.com](http://www.milosminingmuseum.com)

<http://www.edibleplanet.org>