



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΙV: ΣΥΝΘΕΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ  
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ

## Παραγωγή κόμποστ από ζυμώσιμα οικιακά απορρίμματα

---



**Ζγκούρη Σοφία**

**Επιβλέπων καθηγητής : Γεράσιμος Λυμπεράτος**

**Αθήνα, 2018**

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Πρωτίστως θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον υπεύθυνο καθηγητή του Ε.Μ.Π. κο Γεράσιμο Λυμπεράτο που μου έδωσε τη δυνατότητα να μελετήσω ένα τόσο ενδιαφέρον και επίκαιρο θέμα, να ασχοληθώ ενεργά με τη περιβαλλοντική μηχανική και να συμμετεχω στο πρόγραμμα Horizon 2020 που χρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση.

Απευθύνω ευχαριστίες σε όλους τους ερευνητές του εργαστηρίου Οργανικής και Χημικής Τεχνολογίας του Ε.Μ.Π. , και συγκεκριμένα στον επιβλέποντα υποψήφιο διδάκτορα μου Γιώργο Λύτρα και τον υποψήφιο διδάκτορα Γιώργο Σειντή που υπομονετικά με συμβούλεψαν και με βοήθησαν στη διεξαγωγή πολλών εργαστηριακών μετρήσεων . Επίσης θέλω να ευχαριστήσω την κα Jelica Novakovic για την πολύτιμη συνεργασία μας στις αναλύσεις που διεξήχθησαν στο εργαστήριο Περιβαλλοντικής Επιστήμης και Τεχνολογίας.

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου, την αδερφή μου και τις φίλες μου που όλα αυτά τα χρόνια με στηρίζουν ηθικά για να μπορώ να αυτοβελτιώνομαι και να συνεχίζω τη σταδιοδρομία μου .

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ευρωπαϊκή νομοθεσία έχει προχωρήσει στην έκδοση κανονισμών, δηλαδή δεσμευτικών νομοθετικών πράξεων για τα κράτη μέλη της ΕΕ, σχετικά με τη διαχείριση των στερεών αποβλήτων. Στα πλαίσια εφαρμογής των παραπάνω κανονισμών έχει παρατηρηθεί μια ανανέωση του ενδιαφέροντος για τη βιολογική επεξεργασία στερεών αποβλήτων. Οι μέθοδοι διαχείρισης που χρησιμοποιούνταν παλιότερα (απόθεση, υγειονομική ταφή) τείνουν να περιοριστούν.

Αντίθετα, η ελεγχόμενη αερόβια κομποστοποίηση (βιοσταθεροποίηση) προκύπτει ως μια από τις πιο επικρατούσες μεθόδους διαχείρισης στερεών αποβλήτων, που συμπνέει με τους πυλώνες της κυκλικής οικονομίας (sustainability). Σημαντικές ποσότητες οργανικών αποβλήτων μετά από Διαλογή στην Πηγή (ΔσΠ) κομποστοποιούνται σε πολλές Ευρωπαϊκές χώρες, ενώ παράλληλα αυξάνει και η χρήση της αναερόβιας χώνευσης. Το παραγόμενο κομπόστ από διαλεγμένα στην πηγή οργανικά διατίθεται χωρίς πρόβλημα στην αγορά.

Η κομποστοποίηση βασίζεται στην παρουσία, ανάπτυξη και διαδοχή ενός μεγάλου πλήθους και ειδών μικροοργανισμών, υπό κατάλληλες συνθήκες, οι οποίοι βιοοξειδώνουν τις οργανικές ενώσεις παράγοντας διοξείδιο του άνθρακα, νερό και θερμότητα, ενώ το τελικό προϊόν που απομένει αποτελεί εδαφοβελτιωτικό απαλλαγμένο από παθογόνους μικροοργανισμούς, είναι βιολογικά σταθεροποιημένο, με υψηλή περιεκτικότητα σε οργανική ουσία και αξιόλογο ποσοστό θρεπτικών στοιχείων, κυρίως άζωτο, φώσφορο και κάλιο. Για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας της κομποστοποίησης, οι μικροοργανισμοί απαιτούν συγκεκριμένες συνθήκες, η παρέκκλιση των οποίων μπορεί να επηρεάσει έως και σταματήσει την διαδικασία. Οι σημαντικότεροι παράμετροι είναι τα υλικά προς κομποστοποίηση (υποστρώματα) , ο αρχικός και τελικός λόγος άνθρακα/αζώτου (λόγος C/N) με ιδανικό εύρος τελικού 25/1 έως 30/1, η υγρασία 35% - 60%, το pH 6 έως 8.5 και η κοκκομετρία των υλικών. Επίσης σημαντική παράμετρος είναι και η διακύμανση της

θερμοκρασίας κατά τη διαδικασία, καθώς από αυτή εξαρτώνται άμεσα τα είδη και το πλήθος των μικροοργανισμών που αναπτύσσονται σε κάθε φάση.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε ως υπόστρωμα βιοσταθεροποίησης για κομποστοποίηση ένα καινοτόμο προϊόν βιομάζας το Forbi – Food Residue Biomass. Το Forbi είναι αποτέλεσμα επεξεργασίας (τεμαχισμός και ξήρανση) οικιακών απορριμμάτων, διαλεγμένων στην πηγή, στο Δήμο Χαλανδρίου, στα πλαίσια εφαρμογής του Ευρωπαϊκού πιλοτικού προγράμματος Waste4Think. Εξετάστηκε η διαδικασία της αερόβιας χώνευσης σε οικιακό κομποστοποιητή όγκου 280 L, κλειστού τύπου κατασκευασμένου από 100% ανακυκλωμένο υλικό (PP). Ο αερισμός και η ομογενοποίηση του υλικού επιτεύχθηκαν με χειροκίνητη ανάδευση. Επιπλέον, οι αισθητήρες καταγραφής θερμοκρασίας τοποθετήθηκαν στον κύριο όγκο του υλικού.

Ως υποστρώματα προς κομποστοποίηση χρησιμοποιήθηκαν σκέτο Forbi για τη μία σωρό και forbi με κλαδέματα κήπου σε αναλογία 62,5% forbi - 31,25 % κλαδέματα για τη 2<sup>η</sup> σωρό. Και στις 2 σωρούς προστέθηκαν 5 kg ώριμου κόμποστ από προηγούμενες κομποστοποιήσεις που είχαν λάβει χώρα στο Εργαστήριο Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας. Τέλος, εξετάστηκε η κομποστοποίηση μιας σωρού με σκέτα κλαδέματα κήπων και ώριμο κόμποστ, οποία όμως δεν έφτασε ποτέ σε θερμοφιλικές συνθήκες .

Η θερμόφιλη φάση της κομποστοποίησης του forbi ( $T > 45^{\circ}\text{C}$ ) διήρκησε 73 μέρες , με μέγιστη θερμοκρασία  $67,6^{\circ}\text{C}$  . Η σωρός διατήρησε θερμοκρασία άνω των  $55^{\circ}\text{C}$  για χρονικό διάστημα 37 ημερών, που εξασφαλίζει την υγειονομοποίηση του κόμποστ. Η θερμόφιλη φάση της 2ης ανάμεικτης σωρού (forbi&κλαδέματα) διήρκησε 69 μέρες και έπιασε μέγιστη θερμοκρασία  $70,8^{\circ}\text{C}$  . Η σωρός αυτή κράτησε θερμοκρασία άνω των  $55^{\circ}\text{C}$  για 53 ημέρες. Τέλος , η 3<sup>η</sup> σωρός με τα κλαδέματα δεν ανέβασε θερμοκρασία πάνω από  $30^{\circ}\text{C}$  , οπότε θεωρείται πως δεν ολοκληρώθηκε η διαδικασία της βιοσταθεροποίησης.

Καθ' όλη τη διάρκεια της κομποστοποίησης των σωρών μετρούνταν και ελέγχονταν η υγρασία του σωρού, η οποία με προσθήκη νερού διατηρούνταν στο επιθυμητό ποσοστό 35%. Επιπλέον καταγράφονταν φυσικοχημικές ιδιότητες όπως το pH, η αγωγιμότητα , τα ολικά στερεά (Total Solids – TS) , τα πτητικά στερεά (Volatile Solids – VS). Πραγματοποιούνταν δειγματοληψία σε εβδομαδιαία βάση από τις σωρούς στη διάρκεια εξέλιξης της βιοσταθεροποίησης , και τα δείγματα αποθηκεύονταν στο ψυγείο στους  $4^{\circ}\text{C}$  για μελλοντικές αναλύσεις. Πραγματοποιήθηκαν χημικές αναλύσεις στα δείγματα , για παρακολούθηση της τάσης του αζώτου (TKN , αμμωνιακά) και του ολικού οργανικού άνθρακα (TOC) από την αρχή μέχρι τη φάση της ωρίμανσης, για καθένα από τα 2 κόμποστ. Επιπλέον μετρήθηκε η περιεκτικότητα των τελικών προϊόντων σε κάλιο, φώσφορο και βαρέα μέταλλα και διεξήχθησαν και κάποια τεστ φυτοθρεπτικότητας.

Τα 2 κόμποστ είχαν πτητικά στερεά μεταξύ 75% και 80% στο τέλος της βιοσταθεροποίησης , ξεκινώντας από το 90% . Επιπλέον , τα ώριμα κόμποστ ήταν ελαφρώς αλκαλικά με pH λίγο κάτω από το 9, και με ελαφρά αυξημένη ηλεκτρική αγωγιμότητα μεταξύ 6 και 7 mS/cm. Ο λόγος C/N είναι αρχικά 20% για το 1<sup>ο</sup> κόμποστ (forbi) και 15,9% για το 2<sup>ο</sup> κόμποστ (forbi&runings). Τα ώριμα κόμποστ έχουν τελικό λόγο C/N 6,2 και 7,3 το 1<sup>ο</sup> και το 2<sup>ο</sup> κόμποστ αντίστοιχα .

Όσον αφορά την περιεκτικότητα σε βαρέα μέταλλα , τα ώριμα κόμποστ ήταν εντός των ορίων που θέτει η ΕΕ . Επιπλέον , τα 2 κόμποστ παρουσίασαν καλή περιεκτικότητα σε φώσφορο σε συμφωνία με το κόμποστ εμπορίου , αλλά αρκετά αυξημένη περιεκτικότητα σε άζωτο

(%TKN), κάλιο και νάτριο. Τα τελικά προϊόντα είναι καλές πηγές ασβεστίου για το χώμα, ενώ παρατηρούνται και ελαφρά ανεβασμένες τιμές μαγνησίου σε σχέση με τη βιβλιογραφία. Επιπλέον, η τελική περιεκτικότητα σε αμμωνιακό άζωτο είναι αρκετά υψηλή και για τα 2 κόμποστ. Τα τεστ φυτοθρεπτικότητας έδειξαν πως η φυτοθρεπτικότητα των κόμποστ βελτιώνεται με τη πάροδο του χρόνου και πως το κόμποστ με υπόστρωμα forbi&κλαδέματα ωρίμασε πιο γρήγορα σε σχέση με το κόμποστ του forbi. Οστόσο, και τα 2 τελικά προϊόντα κρίθηκαν ώριμα με βάση το τεστ φυτοθρεπτικότητας.

Συμπερασματικά, για μελλοντική εφαρμογή του forbi σε συστήματα κομποστοποίησης, προτείνεται η χρήση του ως υλικό συγκομποστοποίησης αφού προέκυψε καλύτερο σταθερότερο και πιο ώριμο τελικό προϊόν συγκομποστοποίησης σε σύγκριση με το σκέτο forbi. Τέλος, ως μελλοντική έρευνα, προτείνεται η χρήση forbi σε συνδυασμό με υλικό υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, για μεγαλύτερο αρχικό λόγο C/N.

## ABSTRACT

The European legislation has proceeded in the establishment of regulations, a.k.a strict legislative actions for the member states of the European Union, concerning the solid waste management policy. In that direction there is a rising interest on biological treatment methods of solid organic waste. The treatment methods that were used in the past, like landfills, are significantly limited.

On the contrary, the controlled aerobic composting process appears to be one of the predominant methods of solid waste management, which is in accordance with circular economy concepts (sustainability). Big quantities of organic waste are getting composted after source separation in many European countries. Anaerobic digestion is also an interesting alternative for the treatment of solid organic waste. The compost deriving from source separation waste can then be easily available on the market.

Composting process is based on the presence, development and sequence of many different types of microorganisms which, under suitable conditions, biooxidize the organic compounds producing carbon dioxide, water and heat. The final remaining product is a soil amendment, free of pathogens, biologically stable, with high organic matter content and important nutritional elements, mainly nitrogen, phosphorus and potassium. For the optimization of the composting process, microorganisms require specific conditions. Deviations from these conditions might affect severely, even stop completely, the whole process. The most important parameters are the materials used for composting (substrates), the initial and final carbon to nitrogen ratio (C/N), which is optimum in the range of 25/1 – 30/1, the moisture that should be 35%-60%, the pH that should be between 6 and 8.5, and the particle size of the substrate. In addition, temperature variation during the composting process is an important factor, since it affects the amount and species of microorganisms that develop in all phases.

Within the framework of this thesis, a material called Forbi (Food Residue Biomass-product) was used as a substrate for composting. Forbi is a novel biomass produced by shredding and drying of source separated food waste at the municipality of Halandri, during the implementation of Waste4think project funded by the European Union. The process of aerobic composting took place in a pilot scale composter, closed-type, of 280L volume made of 100% recycled material (PP). Aeration and homogenization of the material were achieved

through manual mixing. For the temperature monitoring, sensors recording temperature were put in the bulk of the composted material.

Forbi itself and a combination of forbi and prunings were used as substrates for composting. 5kg of mature compost were used as inoculum in both cases. A third compost run took place, consisting entirely of prunings and inoculum which failed to proceed to the thermophilic phase.

The thermophilic phase ( $T > 45^{\circ}\text{C}$ ) of forbi composting lasted for 73 days, reaching up to  $67,6^{\circ}\text{C}$  maximum temperature. The temperature remained above  $55^{\circ}\text{C}$  for 37 days, which ensures the hygienization of the compost. The thermophilic phase of the second compost (forbi&prunings) lasted for 69 days and reached up to maximum temperature  $70,8^{\circ}\text{C}$ . This run preserved a temperature above  $55^{\circ}\text{C}$  for 53 days. The 3<sup>rd</sup> compost that consisted only of prunings did not manage to reach to thermophilic conditions.

During the composting process, the moisture was measured and was monitored to remain stable at 35% by addition of water. Physicochemical properties like pH, electrical conductivity, total solids (TS), volatile solids (VS) were measured in a regular basis. Samples were taken once a week and stored in the fridge at  $4^{\circ}\text{C}$  for future analysis. Chemical analyses were carried out for recording of the nitrogen (TKN, ammonia, nitrate, nitrite) and total organic carbon trend (TOC), from the start of the composting to the maturity phase for each of the first 2 compost runs. In the final mature composts, potassium, phosphorus and heavy metals were measured, and some germination tests were carried out.

The volatile solids of the final composts were between 75% and 80%, starting from 90%. The mature composts were slightly alkaline with a pH value close to 9, and portrayed elevated electrical conductivity between 6 and 7 mS/cm. As for nutrient content, the initial C/N ratio is 20% and 15,9% for the 1<sup>st</sup> (forbi) and the 2<sup>nd</sup> (forbi&prunings) compost respectively. The mature composts have low C/N values: the first has 6,2 and the second 7,3.

Concerning heavy metals, both composts were within the European Union limits for heavy metal content in composts. Also, the 2 composts have good phosphorus content in accordance with market compost, but elevated nitrogen content (%TKN), potassium and sodium. The final composts are good calcium sources for the soil, while they contain slightly more magnesium than expected according to literature. The phytotoxicity tests showed that the germination index increases with time and the 2<sup>nd</sup> compost matures more quickly than the 1<sup>st</sup> one. Nevertheless, both final composts were found to be mature according to the phytotoxicity tests.

In conclusion, the use of forbi as a co-composting material is highly recommended for future applications since the 2<sup>nd</sup> compost run (forbi and prunings) gave a more stable and mature compost compared to the 1<sup>st</sup> compost run (forbi). Last but not least, the composting of forbi in combination with a material high in carbon content is recommended as a future investigation, so that the initial C/N ratio is higher.

## Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	2
ABSTRACT .....	4
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	12
1.1 Ορισμοί – Κατηγοριοποίηση αποβλήτων.....	12
1.2 Διαχείριση στερεών αποβλήτων – τάσεις στο παρελθόν και σήμερα .....	15
1.2.1 Τάσεις στο παρελθόν και σήμερα.....	15
1.2.2 Μέθοδοι επεξεργασίας στερεών αποβλήτων .....	17
1.3 Νομοθετικό πλαίσιο διαχείρισης αποβλήτων σε Ευρωπαϊκό και Εθνικό επίπεδο	23
1.4 Υφιστάμενη κατάσταση διαχείρισης αποβλήτων σε Ελλάδα και Ευρώπη .....	30
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	37
2.1. Κομποστοποίηση - η διεργασία.....	37
2.2 Επίδραση φυσικών/χημικών παραμέτρων στην κομποστοποίηση .....	40
2.3 Μικροβιολογία κομποστοποίησης .....	49
2.4 Συστήματα βιοσταθεροποίησης (κομποστοποίησης) .....	54
2.4.1 Συστήματα ανοικτού τύπου .....	54
2.4.2 Συστήματα κλειστού τύπου .....	56
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ .....	61
3.1 Πειραματική διάταξη οικιακού κομποστοποιητή.....	61
3.2 Χαρακτηριστικά κύκλων πειραμάτων - tests .....	62
3.2.1 Forbi .....	62
3.2.2 Forbi & Prunings .....	64
3.2.3 Prunings .....	65
3.3 Μεθοδολογία αναλύσεων .....	66
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	81
4.1 Οργανοληπτικές παράμετροι (χρώμα, οσμή , μέγεθος σωματιδίων ) .....	81
4.2 Διαγράμματα .....	83
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	95
6. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ.....	95

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ..... 97

- Πίνακας 1.1 **Τυπική σύσταση ΑΣΑ (% wt)**
- Πίνακας 1.2 **Βασικά είδη ΜΒΕ και προϊόντα**
- Πίνακας 1.3 **Μέθοδοι θερμικής επεξεργασίας : συνθήκες λειτουργίας και προϊόντα**
- Πίνακας 1.4 **Στάδια πυραμίδας ιεράρχησης και περιγραφή**
- Πίνακας 1.5 **Ευρωπαϊκές οδηγίες διαχείρισης αποβλήτων**
- Πίνακας 1.6 **Στατιστικά στοιχεία σχετικά με τη διαχείριση των αστικών αποβλήτων στην Ελλάδα (EUROSTAT 2012)**
- Πίνακας 1.7 **Παραγωγή ΑΣΑ στην ΕΕ**
- Πίνακας 1.8 **Τάσεις διαχείρισης αποβλήτων σε χώρες της ΕΕ**
- Πίνακας 3.1 **Αναλύσεις forbi και πρότυπες μέθοδοι**
- Πίνακας 3.2 **Direct analysis results**
- Πίνακας 3.3 **Στοιχειακή ανάλυση forbi**
- Πίνακας 3.4 **Συγκέντρωση μετάλλων σε ξηρή βάση**
- Πίνακας 3.5 **Μέθοδοι αναλύσεων για κόμποστ**
- Πίνακας 3.6 **Επίδραση χρόνου ανάδευσης και αραίωσης στο pH και την ηλεκτρική αγωγιμότητα 1ου κόμποστ ( forbi)**
- Πίνακας 3.7 **Επίδραση χρόνου ανάδευσης και αραίωσης στο pH και την ηλεκτρική αγωγιμότητα 2ου κόμποστ ( forbi&prunings)**
- Πίνακας 3.8 **Επίδραση κοκκομετρίας δείγματος στο pH και την ηλεκτρική αγωγιμότητα των 2 κόμποστ**
- Πίνακας 3.9 **Όρια ανίχνευσης μετάλλων με FAAS**
- Πίνακας 4.1 **Χρονική διάρκεια θερμοφίλης φάσης και φάσης υγειονομοποίησης κόμποστ**
- Πίνακας 4.2 **Τελικές τιμές pH**
- Πίνακας 4.3 **Τελικές τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας**
- Πίνακας 4.4 **Περιεκτικότητα σε αμμωνιακό άζωτο**
- Πίνακας 4.5 **Περιεκτικότητα σε θρεπτικά συστατικά (mg/kg)**
- Πίνακας 4.6 **Συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων (mg/kg)**
- Πίνακας 4.7 **Συγκεντρώσεις N,P,K και μετάλλων (mg/kg)**



Εικόνα 1.1 Κατηγοριοποίηση αποβλήτων

Εικόνα 1.2 Κατηγοριοποίηση αποβλήτων

Εικόνα 1.3 Τεχνικές διαχείρισης στερεών απορριμμάτων

Εικόνα 1.4 Επεξεργασία αστικών αποβλήτων ανά κράτος μέλος το 2010

Εικόνα 1.5 Ιεράρχηση πολιτικών διαχείρισης ΑΣΑ

Εικόνα 1.6 Επεξεργασία και διάθεση αστικών αποβλήτων στην Ελλάδα 2001-2011

Εικόνα 1.7 Υφιστάμενες εγκαταστάσεις Μηχανικής Βιολογικής Επεξεργασίας (ΜΒΕ) αστικών αποβλήτων στην Ελλάδα

Εικόνα 1.8 Ποσοστό διάθεσης βιοαποδομήσιμων αστικών αποβλήτων σε ΧΥΤΑ στις χώρες της Ε.Ε. με βάση τη συνολική ποσότητα που είχε παραχθεί το 1995

Εικόνα 1.9 Συνολική ανακύκλωση αστικών αποβλήτων στην Ελλάδα, ΕΕ-27, Πορτογαλία, Ιρλανδία και Δανία το 2001 και το 2010 (%)

Εικόνα 1.10 Διαφορές πολιτικών διαχείρισης σε επιλεγμένες χώρες της ΕΕ

Εικόνα 2.1 Απεικόνιση της διεργασίας της κομποστοποίησης

Εικόνα 2.2 Τυπικά στάδια της ολοκληρωμένης διαχείρισης των βιοαποικοδομήσιμων στερεών αποβλήτων με τη μέθοδο της κομποστοποίησης

Εικόνα 2.3 Εύρος βέλτιστων θερμοκρασιακών τιμών (°C) στο οποίο παρατηρείται μεγιστοποίηση του ρυθμού διάσπασης της οργανικής ουσίας

Εικόνα 2.4 Συνθήκες θερμοκρασίας-χρόνου κατά την κομποστοποίηση για την υγειονομοποίηση του κόμποστ προερχόμενο από ιλύ, σύμφωνα με τις εθνικές προδιαγραφές διαφόρων χωρών

Εικόνα 2.5 Σχετική διαθεσιμότητα των απαιτούμενων θρεπτικών στα φυτά σε διάφορες τιμές pH

Εικόνα 2.6 Σειράδια (windrows)

Εικόνα 2.7 Αεριζόμενοι στατικοί σωροί

Εικόνα 2.8 Σχηματική αναπαράσταση τυπικών κάθετων κλειστών συστημάτων κομποστοποίησης (α) χωρίς ανάδευση και (β) με ανάδευση

Εικόνα 2.9 Τυπική διάταξη εγκιβωτισμένων συστημάτων κομποστοποίησης σε παράλληλα στοιχεία

Εικόνα 2.10 Κανάλια

Εικόνα 2.11 Τυπική διάταξη οριζόντιου κλειστού συστήματος κομποστοποίησης, τύπου περιστρεφόμενου τυμπάνου

Εικόνα 2.12 Ενδεικτικές παράμετροι ελέγχου ποιότητας κόμποστ

Εικόνα 3.1 Οικιακός κομποστοποιητής της εταιρίας GARANTIA

Εικόνα 3.2 Οικιακός κομποστοποιητής της εταιρίας GARANTIA

Εικόνα 3.3 Προεπεξεργασία οικιακών ζυμώσιμων απορριμμάτων προς FORBI

Εικόνα 3.4 Το FORBI μετά την ξήρανση και τεμαχισμό του

Εικόνα 3.5 Σωρός με Forbi και κλαδέματα την 3η και 10η ημέρα βιοσταθεροποίησης

Εικόνα 3.6 Τρίτη σωρός με κλαδέματα κήπου (prunings)

Εικόνα 3.7 Μετρητής υγρασίας εταιρείας ADAM με λάμπα αλογόνου

Εικόνα 3.8 Ηλεκτρονικό pH-μετρό pHs 3D pHmeter SANXIN

Εικόνα 3.9 Το σύστημα υπολογισμού ολικού οργανικού άνθρακα TOC και κάψες πορσελάνης όπου εισάχθηκε το δείγμα

Εικόνα 3.10 Kjelmaster 375

Εικόνα 3.11 Scrubber K-415

Εικόνα 3.12 Kjeldigester K-449

Εικόνα 3.13 Μέτρηση TKN - Σωλήνες αμέσως μετά τη χώνευση

Εικόνα 3.14 Μέτρηση TKN - Σωλήνες σε θερμοκρασία δωματίου

Εικόνα 3.15 Φασματοφωτόμετρο ατομικής απορρόφησης Agilent AA240FS

Εικόνα 3.16 Τεστ φυτοτοξικότητας

Εικόνα 4.1 Ενδεικτικές παράμετροι ελέγχου της ποιότητας του κόμποστ που εξετάστηκαν

Εικόνα 4.2 Forbi πριν και μετά την κομποστοποίηση

Εικόνα 4.3 Forbi&prunings πριν και μετά την κομποστοποίηση

Εικόνα 4.4 Συνθήκες θερμοκρασίας-χρόνου κατά την κομποστοποίηση για την υγειονομοποίηση του κόμποστ προερχόμενο από ιλύ, σύμφωνα με τις εθνικές προδιαγραφές διαφόρων χωρών

Εικόνα 4.5 Compost technical data sheet , US Composting Council , Seal Composting Assurance

Εικόνα 4.6 Τυπικές τιμές συγκέντρωσης θρεπτικών και μετάλλων σε κόμποστ εμπορίου

Εικόνα 4.7 Μέγιστες και ελάχιστες οριακές τιμές βαρέων μετάλλων στην ΕΕ (mg/kg)

Διάγραμμα 1 **Temperature profile compost #1**

Διάγραμμα 2 **Temperature profile compost #2**

Διάγραμμα 3 **Moisture % vs time**

Διάγραμμα 4 **Moisture % (moisture analyser) vs time**

Διάγραμμα 5 **pH vs time**

Διάγραμμα 6 **Electrical Conductivity vs time**

Διάγραμμα 7 **VS/TS % vs time**

Διάγραμμα 8 **TOC % vs time**

Διάγραμμα 9 **TKN % vs time**

Διάγραμμα 9 **C/N ratio vs time**

Διάγραμμα 10 **Germination Index for compost #1 (3,3% w/w)**

Διάγραμμα 11 **Germination Index for compost #2 ( 3,3% w/w)**

Διάγραμμα 12 **Germination Index for different compost concentrations**

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Ορισμοί – Κατηγοριοποίηση αποβλήτων

1. **Απόβλητα:** κάθε ουσία ή αντικείμενο, το οποίο ο κάτοχος του απορρίπτει ή προτίθεται ή υποχρεούται να απορρίψει.
2. **Αστικά απόβλητα (ΑΣΑ):** Υιοθετώντας τον πρόσφατο ορισμό της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ Σχέδιο Οδηγίας 6919/98) ως Α.Σ.Α. θεωρούνται τα οικιακά απόβλητα καθώς και άλλα απόβλητα τα οποία λόγω φύσης η σύνθεσης είναι παρόμοια με τα οικιακά. Τέτοια είναι τα απορρίμματα από εμπορικές και συναφείς δραστηριότητες, κτίρια γραφείων και ιδρύματα (σχολεία, νοσοκομεία, κυβερνητικά κτίρια). Περιλαμβάνει επίσης ογκώδη απόβλητα (στρώματα, έπιπλα κ.α.) και απόβλητα κήπων, φύλλα, κλαδιά, κηπευτικά, καθώς και απόβλητα από καθαρισμό δρόμων. Ο ορισμός αυτός αν και σε κάποιο βαθμό ασαφής, διαχωρίζει τα αστικά στερεά απόβλητα από τρεις άλλες βασικές κατηγορίες, τα επικίνδυνα απόβλητα (κυρίως βιομηχανικά ή μολυσματικά), τα αδρανή απόβλητα (κυρίως από οικοδομικές εργασίες) και τις ιλύες, για τα οποία προβλέπεται χωριστή συλλογή και επεξεργασία/διάθεση (με εξαίρεση τις ιλύες για τις οποίες είναι δυνατή η συνεπεξεργασία και συνδιάθεση).<sup>[1]</sup>

**Πίνακας 1.1 : Τυπική σύσταση ΑΣΑ (% wt) [ πηγή :A. Demirbas / Energy Conversion and Management 52 (2011) 1280–1287]**

Συστατικό	Ελάχιστο	Μέγιστο
Οργανικά	33,2	50,7
Χαρτί	18,3	21,2
Πλαστικό	7,8	13,2
Μέταλλα	7,3	10,5
Γυαλί	8,6	10,2
Υφασμα	2,0	2,8
Ξύλο	1,8	2,9
Υπόλοιπα	1,8	2,8

Η κατηγοριοποίηση των αποβλήτων μπορεί να γίνει είτε ως προς τις ιδιότητές τους (βιοαποδομήσιμα ή μη,) είτε βάσει της επίδρασής τους στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον (επικίνδυνα και μη επικίνδυνα), είτε ως προς την πηγή προέλευσής τους (αστικά, βιομηχανικά , αγροτικά, ζωικά , νοσοκομειακά). Αυτό φαίνεται στην παρακάτω εικόνα :

### Βάσει των ιδιοτήτων τους

#### Βιοδιασπάσιμα

μπορούν να διασπασθούν βιολογικά (φρούτα, λαχανικά, άλλα)

#### Μη βιοδιασπάσιμα

δεν μπορούν να διασπασθούν με βιολογικά (πλαστικά, μέταλλα, γυαλί)

### Βάσει την επίδρασή τους στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον

#### Επικίνδυνα απόβλητα

Υλικά που δεν είναι ασφαλή για χρήση γιατί έχουν τουλάχιστον μία από τις ιδιότητες (εύφλεκτα, διαβρωτικά, τοξικά, δραστικά). Η τελική διάθεση αυτών των αποβλήτων χρίζει ειδικής διαχείρισης

#### Μη επικίνδυνα απόβλητα

Υλικά που είναι ασφαλή για χρήση γιατί δεν έχουν καμία από αυτές τις ιδιότητες

### Βάσει της προέλευσής τους

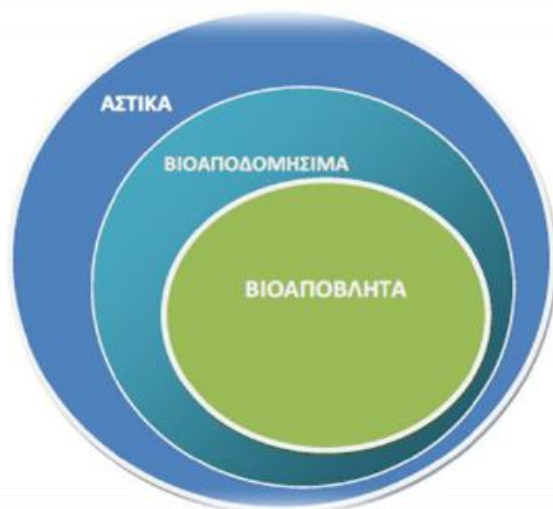
Αστικά, βιομηχανικά, αγροτικά, ζωικά, νοσοκομειακά

Εικόνα 1.1 : Κατηγοριοποίηση αποβλήτων <sup>[2]</sup>

Για την κατανόηση των νομοθετικών πλαισίων και κανονισμών πάνω στη διαχείριση στερεών αποβλήτων που θα αναφερθούν παρακάτω, είναι σημαντικό να δοθεί ένας ορισμός για τους όρους “βιοαποδομήσιμα” απόβλητα και “βιοαπόβλητα” .

**3. Βιοαποδομήσιμα απόβλητα (ΒΑΑ):** κάθε απόβλητο που είναι σε θέση να υποστεί αναερόβια ή αερόβια αποσύνθεση, όπως είναι τα απόβλητα τροφών και κηπουρικής, το χαρτί-χαρτόνι και το ξύλο

**4. Βιολογικά απόβλητα (βιοαπόβλητα):** τα βιοαποδομήσιμα απόβλητα κήπων και πάρκων, τα απορρίμματα τροφών και μαγειριών από σπίτια, εστιατόρια, εγκαταστάσεις ομαδικής εστίασης και χώρους πωλήσεων λιανικής και τα συναφή απόβλητα από εγκαταστάσεις μεταποίησης τροφίμων.



Εικόνα 1.2 : Κατηγοριοποίηση αποβλήτων

Παρακάτω δίνονται περισσότεροι ορισμοί για την αποσαφήνιση των όρων που χρησιμοποιούνται στη διαχείριση των αποβλήτων:

**5. Διαχείριση αποβλήτων:** η συλλογή, μεταφορά, ανάκτηση και διάθεση αποβλήτων, συμπεριλαμβανομένης της εποπτείας των εργασιών αυτών, καθώς και της επίβλεψης των χώρων διάθεσης (disposal sites) και των ενεργειών στις οποίες προβαίνουν οι έμποροι ή οι μεσίτες .

**6. Επαναχρησιμοποίηση:** κάθε εργασία με την οποία προϊόντα ή συστατικά στοιχεία που δεν είναι απόβλητα χρησιμοποιούνται εκ νέου για τον ίδιο σκοπό για τον οποίο σχεδιάστηκαν .

**7. Επεξεργασία:** οι εργασίες ανάκτησης ή διάθεσης, στις οποίες συμπεριλαμβάνεται η προετοιμασία πριν από την ανάκτηση ή τη διάθεση .

**8. Ανάκτηση:** οποιαδήποτε εργασία της οποίας το κύριο αποτέλεσμα είναι ότι απόβλητα εξυπηρετούν ένα χρήσιμο σκοπό αντικαθιστώντας άλλα υλικά τα οποία, υπό άλλες συνθήκες, θα έπρεπε να χρησιμοποιηθούν για την πραγματοποίηση συγκεκριμένης λειτουργίας, ή ότι απόβλητα υφίστανται προετοιμασία για την πραγματοποίηση αυτής της λειτουργίας, είτε στην εγκατάσταση είτε στο γενικότερο πλαίσιο της οικονομίας.

**9. Ανακύκλωση:** οποιαδήποτε εργασία ανάκτησης με την οποία τα απόβλητα μετατρέπονται εκ νέου σε προϊόντα, υλικά ή ουσίες που προορίζονται είτε να εξυπηρετήσουν και πάλι τον αρχικό τους σκοπό είτε άλλους σκοπούς. Περιλαμβάνει την επανεπεξεργασία οργανικών υλικών αλλά όχι την ανάκτηση ενέργειας και την επανεπεξεργασία σε υλικά που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμα ή σε εργασίες επίχωσης.

**10. Διάθεση:** οποιαδήποτε εργασία η οποία δεν συνιστά ανάκτηση, ακόμη και στην περίπτωση που η εργασία έχει ως δευτερογενή συνέπεια την ανάκτηση ουσιών ή ενέργειας.

**11. Χώρος υγειονομικής ταφής:** κάθε χώρος διάθεσης αποβλήτων για την απόθεση των αποβλήτων επί ή εντός του εδάφους ή υπογείου, συμπεριλαμβανομένων: των εσωτερικών χώρων διάθεσης των αποβλήτων (δηλαδή των χώρων υγειονομικής ταφής στους οποίους ένας παραγωγός αποβλήτων πραγματοποιεί τη διάθεσή τους στον τόπο παραγωγής) και κάθε μόνιμος (δηλαδή χρησιμοποιούμενος άνω του έτους) χώρος προσωρινής εναποθήκευσης αποβλήτων, αλλά εξαιρουμένων:

i) των εγκαταστάσεων στις οποίες εκφορτώνονται τα απόβλητα με σκοπό την προετοιμασία τους για περαιτέρω μεταφορά τους προς ανάκτηση χρήσιμων υλών, επεξεργασία ή διάθεση αλλού και

ii) της εναποθήκευσης των αποβλήτων πριν από την ανάκτηση χρήσιμων υλών ή την επεξεργασία για διάστημα μικρότερο των τριών ετών κατά γενικό κανόνα και

iii) της εναποθήκευσης αποβλήτων πριν από τη διάθεση για διάστημα μικρότερο του έτους

**12. Συλλογή:** η συγκέντρωση αποβλήτων, συμπεριλαμβανομένης της προκαταρκτικής διαλογής και της προκαταρκτικής αποθήκευσης αποβλήτων με σκοπό τη μεταφορά τους σε εγκατάσταση επεξεργασίας αποβλήτων.

**13. Χωριστή συλλογή:** η συλλογή όπου μια ροή αποβλήτων διατηρείται χωριστά με βάση τον τύπο και τη φύση για να διευκολυνθεί η ειδική επεξεργασία.

**14. Μεταφόρτωση:** οι εργασίες μετακίνησης των αποβλήτων από τα μέσα ή τους χώρους συλλογής σε άλλα μέσα μεταφοράς με ενδεχόμενη συμπίεσή τους (στην έννοια αυτή περιλαμβάνεται κινητός ή σταθερός σταθμός μεταφόρτωσης).

**15. Προσωρινή αποθήκευση:** η αποθήκευση των αποβλήτων για ορισμένο χρόνο σε εγκεκριμένο χώρο ή εγκατάσταση, μέχρι να πραγματοποιηθεί η μεταφορά τους σε εγκεκριμένη εγκατάσταση επεξεργασίας ή τελικής διάθεσης.

**16. Αποτέφρωση:** Η θερμική επεξεργασία αποβλήτων, με ή χωρίς ανάκτηση της θερμότητας που εκλύεται κατά την καύση, συμπεριλαμβανομένης της αποτέφρωσης αποβλήτων με οξείδωση, καθώς και άλλων τεχνικών θερμικών επεξεργασιών όπως της πυρόλυσης της αεριοποίησης ή της τεχνικής πλάσματος, εφόσον οι ουσίες που προέρχονται από την επεξεργασία αυτή, στη συνέχεια, αποτεφρώνονται.

**17. Μονάδα αποτέφρωσης:** κάθε σταθερή ή κινητή τεχνική μονάδα με τον εξοπλισμό της, που προορίζεται αποκλειστικά για θερμική επεξεργασία αποβλήτων, με ή χωρίς ανάκτηση της θερμότητας που εκλύεται κατά την καύση.

**18. Αποστείρωση:** Κάθε μέθοδος επεξεργασίας αποβλήτων από υγειονομικές μονάδες που πετυχαίνει μείωση του μικροβιακού φορτίου των αποβλήτων σε επίπεδα παρόμοια με αυτά των οικιακών αποβλήτων.

**19. Μεταφόρτωση:** Η φόρτωση των αποβλήτων από μέσο μεταφοράς, μέσω κινητής μονάδας ή μόνιμης εγκατάστασης, σε άλλο μέσο μεταφοράς. Η μεταφόρτωση μέσω κινητών μονάδων αποτελεί εργασία μεταφοράς, ενώ η μόνιμη εγκατάσταση μεταφόρτωσης αποτελεί εργασία αποθήκευσης. <sup>[1]</sup>

**20. Οικιακή κομποστοποίηση :** Μια σύγχρονη και αποτελεσματική πρακτική για τη μείωση των αποβλήτων και μια καλή επιλογή επεξεργασίας στην πηγή. Με την οικιακή κομποστοποίηση επιτυγχάνεται μείωση της ποσότητας των αποβλήτων που πρέπει να συλλέγεται από τις υπηρεσίες καθαριότητας των δήμων και σύμφωνα με όσα απορρέουν και από την Οδηγία 98/2008, αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα των συστημάτων ολοκληρωμένης διαχείρισης.

**21: Διαλογή στην πηγή (ΔσΠ) :** Προσφέρει τη δυνατότητα μιας υψηλής ποιότητας πρώτης ύλης για βιολογική επεξεργασία και παραγωγής ενός μη μολυσματικού προϊόντος. Η καθαρή πρώτη ύλη που συλλέγεται μέσω της διαλογής στην πηγή είναι πιο πιθανό να ικανοποιήσει τις προδιαγραφές για το κομπόστ, ώστε να είναι κατάλληλο για πώληση ή χρήση, επιφέροντας και περιβαλλοντικά οφέλη. Η χρήση του κομπόστ μειώνει τις απαιτήσεις για χρήση άλλων βελτιωτικών εδάφους, όπως η τύρφη, για αγροτικές ή κηπευτικές δραστηριότητες. [πηγή : dasarxeio.com ]

## 1.2 Διαχείριση στερεών αποβλήτων – τάσεις στο παρελθόν και σήμερα

### 1.2.1 Τάσεις στο παρελθόν και σήμερα

Με τον όρο στερεά απόβλητα ή απορρίμματα περιγράφονται τα, ανθρωπογενούς κυρίως προέλευσης, στερεά ή ημιστερεά υλικά, τα οποία στερούνται άμεσης αξίας και είναι ανεπιθύμητα για τον κάτοχό τους ο οποίος επιθυμεί να τα απορρίψει. Με την ευρύτερη

έννοια τα στερεά απόβλητα περιλαμβάνουν υλικά που παράγονται όχι μόνον σε αστικές περιοχές αλλά και λόγω αγροτικών, βιομηχανικών και εξορυκτικών δραστηριοτήτων. Στα πλαίσια της παρούσας διερεύνησης έμφαση δίνεται στη διαχείριση των απορριμμάτων αστικής προέλευσης.

Η έννοια της διαχείρισης των απορριμμάτων εμφανίζει μια δυναμική με το χρόνο εξέλιξη. Η συσχέτιση μεταξύ δημόσιας υγείας και ανεπαρκών μεθόδων αποθήκευσης, συλλογής και τελικής διάθεσης απορριμμάτων (που οδηγεί στην παρουσία τρωκτικών και άλλων φορέων ασθενειών), είναι γνωστή από παλιά. Δεν είναι περίεργο λοιπόν που ιστορικά ο πρώτος στόχος της διαχείρισης αφορούσε αποκλειστικά στην *προστασία της δημόσιας υγείας*.

Με την έντονη ευαισθητοποίηση γύρω από τα περιβαλλοντικά προβλήματα (κυρίως μετά τη δεκαετία του 70) ο στόχος διευρύνεται και αποσκοπεί στην προστασία και αποτροπή δυσμενών επιπτώσεων στον αέρα, στα νερά και στο έδαφος. Αυτή είναι η επικρατούσα σε πολλές χώρες, συμπεριλαμβανομένης και της Ελλάδας, άποψη ως προς το θέμα του περιβαλλοντικά αποδεκτού τρόπου διαχείρισης, σύμφωνα με την οποία τα απορρίμματα αποτελούν άχρηστο προϊόν (απόβλητο) που θα πρέπει όμως να διατεθεί με μεθόδους που να εξασφαλίζουν την *προστασία όχι μόνον της δημόσιας υγείας αλλά και του περιβάλλοντος*. Παρά την μετατόπιση του ενδιαφέροντος από το στενό πλαίσιο της δημόσιας υγείας στον ευρύτερο της προστασίας του περιβάλλοντος και της αποτροπής της ρύπανσης, ορισμένα βασικά γνωρίσματα του καθεστώτος διαχείρισης δεν τροποποιούνται ουσιαστικά. Έτσι, για παράδειγμα, δεν αμφισβητείται το "δικαίωμα" του δημότη να απορρίπτει τα ανεπιθύμητα στερεά απόβλητα που παράγει. Η έμφαση δίνεται στην κατάλληλη επεξεργασία και ασφαλή διάθεση των αποβλήτων ώστε να αποτραπούν οι δυσμενείς επιπτώσεις (κίνδυνος για τη δημόσια υγεία, ρύπανση του περιβάλλοντος αργότερα). Τέλος η πολιτεία μέσω της τοπικής αυτοδιοίκησης (έστω και χωρικά διευρυμένης) είναι επιφορτισμένη με το καθήκον της διαχείρισης των αποβλήτων, επιμερίζοντας τις συνεπαγόμενες δαπάνες στους δημότες. Αξίζει ωστόσο να επισημανθεί ότι σε πολλές χώρες της Ευρώπης, αλλά και στα πλαίσια της εξελισσόμενης ενιαίας Ευρωπαϊκής πολιτικής, προβάλλεται με αυξανόμενη επίταση, κατά τη δεκαετία του 90, η έννοια της διαχείρισης στα πλαίσια της βιώσιμης ανάπτυξης, με έμφαση στην ελαχιστοποίηση παραγωγής και στη θεώρηση των απορριμμάτων ως αξιοποιήσιμου υλικού (μέσω ανάκτησης υλικών ή ενέργειας). Αποτέλεσμα της θεώρησης αυτής είναι η ριζική αλλαγή στον τρόπο αξιολόγησης των διαφόρων μεθόδων διαχείρισης, με προτεραιότητα σε εκείνες που συνεισφέρουν στην εξοικονόμηση φυσικών πόρων, έτσι ώστε να εξυπηρετείται η αρχή της αειφορίας.

Παράλληλα αναδύονται νέες αντιλήψεις για τον καταμερισμό της ευθύνης και τον τρόπο οργάνωσης της διαχείρισης. Έστω και εμβρυακά, αρχίζει να τίθεται υπό αμφισβήτηση το δικαίωμα απόρριψης των αποβλήτων. Επεκτείνεται η ευθύνη διαχείρισης στους παραγωγούς των αποβλήτων (π.χ. βιομηχανίες παραγωγής και χρήσης των υλικών συσκευασίας) οι οποίοι καλούνται να έχουν ενεργή συμμετοχή, με επακόλουθο να περιορίζεται η ευθύνη και ο ρόλος της πολιτείας. Τέλος η χωρική κλίμακα αντιμετώπισης του προβλήματος αρχίζει να ξεφεύγει από τα στενά πλαίσια των τοπικών κοινωνιών και επεκτείνεται όχι μόνον σε εθνική αλλά και υπερεθνική κλίμακα.

Με την κλασική έννοια της διαχείρισης απορριμμάτων νοείται το σύνολο των απαιτούμενων ενεργειών που περιλαμβάνει:

- την εκτίμηση της ποσότητας και ποιότητας των απορριμμάτων
- την προσωρινή αποθήκευση
- τη συλλογή (με ενδεχόμενη διαλογή στην πηγή)
- τη μεταφορά στη θέση επεξεργασίας/διάθεσης
- την τελική επεξεργασία και διάθεση

Λαμβάνοντας όμως υπόψη τις προαναφερθείσες πρόσφατες τάσεις, η έννοια της διαχείρισης των απορριμμάτων επεκτείνεται όλο και περισσότερο σε θέματα πολιτικής, που σχετίζονται αφ' ενός μεν με τις δυνατότητες ελαχιστοποίησης των παραγόμενων προϊόντων και



αξιοποίησής των μέσω επαναχρησιμοποίησης, ανακύκλωσης υλικών και ανάκτησης ενέργειας, αφ' ετέρου δε με τη σύσταση και λειτουργία κατάλληλων για τον σκοπό αυτό οργανωτικών σχημάτων διαχείρισης.

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 επιλεχθεί, 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.).

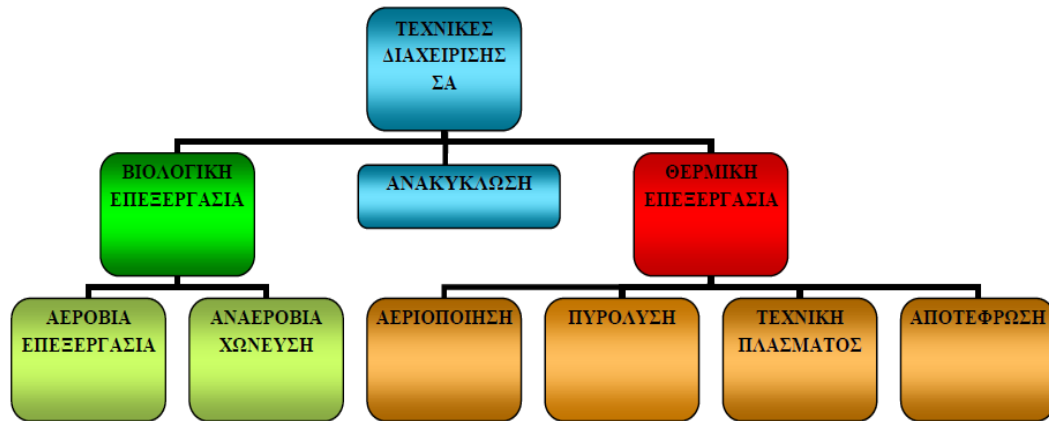
Η ορθολογική διαχείριση των στερεών αποβλήτων προϋποθέτει επαρκή γνώση της προέλευσης, του ρυθμού παραγωγής και της σύστασής των.

Οι κύριες πηγές στερεών αποβλήτων είναι οι ακόλουθες:

- οικιακά στερεά απόβλητα
- εμπορικά στερεά απόβλητα (καταστήματα, εστιατόρια, γραφεία)
- βιομηχανικά στερεά απόβλητα
- στερεά απόβλητα από διάφορες αστικές δραστηριότητες (νοσοκομεία, ιδρύματα καθαρισμός δρόμων και κήπων, ογκώδη αντικείμενα κλπ)
- στερεά απόβλητα από κατασκευές δραστηριότητες
- στερεά απόβλητα από εγκαταστάσεις επεξεργασίας νερού και λυμάτων (ιλύς).<sup>[3]</sup>

### **1.2.2 Μέθοδοι επεξεργασίας στερεών αποβλήτων**

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.



**Εικόνα 1.3: Τεχνικές διαχείρισης στερεών απορριμμάτων**

#### 1.2.2.1 Ανάκτηση υλικών: επαναχρησιμοποίηση – ανακύκλωση

Η ανάκτηση των υλικών περιλαμβάνει τόσο την άμεση επαναχρησιμοποίηση επιλεγμένων υλικών π.χ. μπουκάλια, όσο και την ανακύκλωση κατά την οποία τα ανακτηθέντα υλικά μετά από επεξεργασία επανέρχονται στο φυσικό και οικονομικό κύκλο.

Η άμεση επαναχρησιμοποίηση, κάποτε αρκετά διαδεδομένη υπό ορισμένες μορφές σε τοπικές αγορές, είναι μάλλον περιορισμένη σήμερα διεθνώς, παρά τις προσπάθειες για ευρύτερη εφαρμογή της. Η επαναχρησιμοποίηση γυάλινων μπουκαλιών εξακολουθεί να αποτελεί την κύρια μέθοδο επαναχρησιμοποίησης, ωστόσο η διεύρυνση των αγορών και το υφιστάμενο καθεστώς της ελεύθερης αγοράς στην Ευρωπαϊκή Ένωση δημιουργούν σοβαρές, όχι μόνο τεχνολογικές, αλλά και νομικές δυσκολίες. Με την εξεταζόμενη μορφή, η ανακύκλωση αφορά σε υλικά όπως χαρτί, γυαλί, αλουμίνιο, άλλα μέταλλα, πλαστικά, έπιπλα και είδη ένδυσης, υπολείμματα κατασκευών και κατεδαφίσεων και ελαστικά οχημάτων. Καθοριστικοί παράγοντες για ένα σύστημα ανακύκλωσης είναι το σύστημα διαλογής, η διάθεση στην αγορά ανακυκλωμένων προϊόντων και η οργανωτική, οικονομική και θεσμική στήριξη.

#### Συστήματα διαλογής

##### 1) Διαλογή στην πηγή

Η διαλογή στην πηγή είναι η μέθοδος ανακύκλωσης κατά την οποία τα ανακυκλούμενα υλικά διαχωρίζονται στην πηγή παραγωγής τους. Οι τεχνικές που μπορούν να εφαρμοστούν για την ανάκτηση υλικών μέσω προγραμμάτων διαλογής στην πηγή είναι οι εξής:

- Η συλλογή πόρτα- πόρτα.
- Συλλογή σε ειδικούς κάδους
- Λειτουργία κέντρων συλλογής υλικών
- Λειτουργία κέντρων αγοράς υλικών

##### 2) Μηχανική διαλογή

Με τη μέθοδο της μηχανικής διαλογής διαχωρίζονται τα διάφορα υλικά από το ρεύμα των Αστικών Στερεών Αποβλήτων (ΑΣΑ) με μηχανικά μέσα. Πρόκειται για τα πιο προηγμένα συστήματα ανάκτησης υλικών αποτελώντας σημαντική λύση για τις περιπτώσεις που δεν εφαρμόζεται η διαλογή στην πηγή. Υπάρχουν δύο βασικά συστήματα διαχωρισμού, ο υγρός

και ο ξηρός που αποτελεί και την πλειοψηφία των εγκαταστημένων μονάδων μηχανικής διαλογής ΑΣΑ. Η εφαρμογή αυτής της μεθόδου επιτρέπει την ενιαία συμβατική συλλογή και μεταφορά των ΑΣΑ ως την μονάδα διαλογής.

Με τις διαδικασίες της μηχανικής διαλογής είναι δυνατόν να επιτευχθούν:

- Ο διαχωρισμός των χρήσιμων υλικών, όπως χαρτί- χαρτόνι, μέταλλα, πλαστικό, γυαλί κλπ, με σκοπό την ανακύκλωση τους.
- Η εξασφάλιση πρώτης ύλης για παραγωγή εδαφοβελτιωτικού
- Η παραγωγή καύσιμης ύλης με τη μορφή RDF (Refuse Derived Fuel).
- Η βελτίωση των συνθηκών εφαρμογής αποτέφρωσης
- Η μείωση του όγκου των αποβλήτων.

#### **Διάθεση ανακυκλωμένων υλικών στην αγορά**

Στόχος της ανακύκλωσης είναι η διάθεση των ανακτημένων υλικών στην αγορά. Κατά συνέπεια είναι κατ' αρχήν απαραίτητη η εκτίμηση του κόστους ενός προγράμματος ανακύκλωσης, το οποίο επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες οι κυριότεροι των οποίων είναι:

- **Τα χαρακτηριστικά των οικιακών απορριμμάτων**, όπως ποσότητα, σύνθεση, ομοιογένεια, μεταβλητότητα των ιδιοτήτων τους σε συνάρτηση με το χρόνο και το χώρο κλπ.
- **Τα χαρακτηριστικά του εφαρμοζόμενου συστήματος:**
  - ✓ Η πυκνότητα συλλογής. Πυκνή χωροθέτηση των κάδων συλλογής ευνοεί την συμμετοχή των πολιτών αλλά αυξάνει το κόστος.
  - ✓ Η συχνότητα συλλογής. Η απόδοση και το κόστος αυξάνει ανάλογα με την αύξηση της συχνότητας συλλογής.
  - ✓ Το κόστος μεταφοράς, που συνήθως αποτελεί το μεγαλύτερο ποσοστό στο ολικό κόστος ανάκτησης κάποιου υλικού.
  - ✓ Η εικόνα των κάδων. Οι κάδοι πρέπει να είναι καλαίσθητοι, ευδιάκριτοι, εύκολα προσπελάσιμοι, να υπενθυμίζουν με την παρουσία τους χωρίς να προκαλούν.
- **Το ποσοστό συμμετοχής** είναι η παράμετρος εκείνη που ουσιαστικά καθορίζει την τύχη ενός προγράμματος διαλογής. Να υπογραμμιστεί ότι αυτή η μέθοδος ανακύκλωσης εξαρτάται σχεδόν αποκλειστικά από την εθελοντική συμμετοχή των κατοίκων σε αντίθεση με τις άλλες μεθόδους. Αύξηση του ποσοστού συμμετοχής οδηγεί σε μείωση του κόστους ανάκτησης των υλικών. Οι έρευνες έχουν αποδείξει ότι τα κοινωνικά χαρακτηριστικά των κατοίκων (μορφωτικό επίπεδο, οικονομική κατάσταση κλπ) και άλλα χαρακτηριστικά της περιοχής (τύπος κατοικίας κλπ) επηρεάζουν το ποσοστό συμμετοχής που συνήθως κυμαίνεται σε ποσοστά κάτω από 50 %. Έχει φανεί ότι το ποσοστό συμμετοχής και η ποσότητα των συλλεγόμενων ΑΣΑ αυξάνουν όσο εντείνονται τα προγράμματα πληροφόρησης.

Σε γενικές γραμμές φαίνεται ότι, με βάση καθαρά οικονομικές θεωρήσεις, η ανακύκλωση δεν μπορεί να δικαιολογηθεί, καθώς δεν μπορεί να διαμορφωθεί μια ελκυστική και ανταγωνιστική τιμή σε σύγκριση με προϊόντα από πρώτη ύλη. Έτσι τα προγράμματα ανακύκλωσης μπορεί να καταστούν βιώσιμα μόνο στα πλαίσια επιδοτούμενων, για περιβαλλοντικούς και οικολογικούς λόγους, πολιτικών και στο βαθμό που εξασφαλίζεται η απαραίτητη θετική (και μεταφραζόμενη σε αποδεκτή οικονομική επιβάρυνση) στάση των καταναλωτών. <sup>[3]</sup>

### 1.2.2.2 Βιολογικές Μέθοδοι Επεξεργασίας

#### **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 καλλιεργειών, 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. Το τελευταίο, υπόκειται περιορισμούς της Οδηγίας για την Υγειονομική Ταφή που επιβάλλουν τη σταδιακή εκτροπή του από τη διάθεση σε Χώρους Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων 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 απορριμματοφόρα, 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 περιεγράφηκε παραπάνω, γι' αυτό και συνήθως αναφέρεται ως υλικό «τύπου κομπόστ».

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 :

- η κομποστοποίηση, η οποία μελετάται εκτενέστερα στο κεφάλαιο 2
- η αναερόβια χώνευση
- η βιολογική ξήρανση

#### **Αναερόβια βιολογική επεξεργασία**

Κατά την αναερόβια βιολογική επεξεργασία (αναερόβια ζύμωση), πραγματοποιείται αποδόμηση των οργανικών ουσιών με τη βοήθεια μικροοργανισμών απουσία οξυγόνου. Το αποτέλεσμα της διεργασίας είναι η παραγωγή σταθεροποιημένου οργανικού υλικού και αερίου υψηλής περιεκτικότητας σε μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ), ενώ περιέχει και διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) και νερό ( $\text{H}_2\text{O}$ ), το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή ενέργειας. Η αναερόβια επεξεργασία γίνεται σε κλειστούς αντιδραστήρες κάτω από ελεγχόμενες

συνθήκες, με στόχο την ανάκτηση ενέργειας, τη μείωση του όγκου των ΑΣΑ και τη βιολογική σταθεροποίησή τους.

### **Μονάδες μηχανικής και βιολογικής επεξεργασίας**

Οι συνδυασμένες μονάδες Μηχανικής και Βιολογικής Επεξεργασίας (ΜΒΕ) έχουν τη δυνατότητα επεξεργασίας τόσο σύμμεικτων αστικών στερεών αποβλήτων, όσο και επιλεγμένων ρευμάτων για παραγωγή ανακυκλώσιμων υλικών και ανάλογα με το είδος της εγκατάστασης να δώσουν ως τελικό προϊόν RDF, SRF, compost. Τα τρία στάδια των ΜΒΕ είναι:

- Διαχωρισμός υλικών – Μηχανικός διαχωρισμός υλικών
- Βιολογική επεξεργασία – Σταθεροποίηση, μείωση του όγκου των αποβλήτων
- Παραγωγή προϊόντων – Υλικά επικάλυψης ΧΥΤΑ, SRF, ανακυκλώσιμα

Η βιολογική επεξεργασία όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, δύναται να είναι αερόβια και αναερόβια. Τα βασικά είδη εγκαταστάσεων μηχανικής και βιολογικής επεξεργασίας και κατά συνέπεια τα παραγόμενα προϊόντα από την επεξεργασία των αποβλήτων συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί :

**Πίνακας 1.2 : Βασικά είδη ΜΒΕ και προϊόντα**

Τύπος Μονάδας	Παραγόμενο προϊόν
<b>Μηχανική επεξεργασία και αερόβια κομποστοποίηση</b>	Ανακυκλώσιμα υλικά (χαρτί κ.α.), RDF, Βιοσταθεροποιημένο υλικό για compost, κάλυψη ΧΥΤΑ ή αποκατάσταση εδαφών
<b>Μηχανική επεξεργασία και αναερόβια χώνευση</b>	Ανακυκλώσιμα, RDF, Βιοαέριο, βιοσταθεροποιημένο απόρριμμα
<b>Μηχανική επεξεργασία Αναερόβια χώνευση Αερόβια κομποστοποίηση</b>	Ανακυκλώσιμα, RDF Βιοαέριο, βιοαέριο Υλικό για αποκατάσταση εδαφών
<b>Μηχανική επεξεργασία Βιολογική ξήρανση</b>	Ανακυκλώσιμα (μέταλλα) SRF

Στην αγορά υπάρχει σημαντικός αριθμός ΜΒΕ. Αυτά τα συστήματα έχουν αναπτυχθεί περισσότερο από μεθόδους θερμικής επεξεργασίας, όπως είναι η πυρόλυση, η αεριοποίηση, μέθοδοι που βασίζονται στο πλάσμα και άλλα καινοτόμα συστήματα.

### **Βιολογική Ξήρανση**

Αποτελεί τεχνική προεπεξεργασίας των ΑΣΑ με στόχο την ενεργειακή αξιοποίησή τους. Ειδικότερα στοχεύει στη μείωση της υγρασίας των ΑΣΑ και κατά επέκταση του όγκου τους, στη διευκόλυνση του μηχανικού διαχωρισμού των άχρηστων υλικών και στην παραγωγή SRF. Με τη μέθοδο αυτή το νερό που βρίσκεται στα απόβλητα απομακρύνεται σε μικρό χρονικό διάστημα με την ανάπτυξη βιοθερμικής ενέργειας. Η πιο σημαντική παράμετρος που επηρεάζει την εφαρμογή της μεθόδου είναι ο βαθμός ομογενοποίησης των αποβλήτων που εισέρχονται στους ξηραντήρες. Οι ξηραντήρες είναι συνήθως είτε κλειστές δεξαμενές εντός βιομηχανικών κτιρίων είτε κουτιά ορθογώνιου σχήματος (bio-boxes) τα οποία είναι αεροστεγώς κλειστά ώστε να αποφεύγονται οι εκπομπές οσμών και άλλων αερίων.<sup>[7]</sup>

#### **1.2.2.3 Θερμικές Μέθοδοι Επεξεργασίας**

##### **Γενικά**

Η θερμική επεξεργασία των ΑΣΑ, τόσο για μείωση του όγκου όσο και για ανάκτηση ενέργειας, αποτελεί ενδιαφέρουσα εφαρμογή στα πλαίσια ενός ολοκληρωμένου συστήματος

διαχείρισης απορριμμάτων. Με τη θερμική επεξεργασία γίνεται μετατροπή των στερεών απορριμμάτων σε αέρια και στερεά προϊόντα, ενδεχόμενα δε και υγρά, με ταυτόχρονη ή επακόλουθη απελευθέρωση θερμικής ενέργειας. Κατά τη θερμική επεξεργασία απαραίτητη διαδικασία είναι η εξάτμιση της υγρασίας των στερεών αποβλήτων.

Κύριος στόχος της θερμικής επεξεργασίας είναι:

- Η ελαχιστοποίηση του τελικού προς διάθεση όγκου απορριμμάτων
- Η πλήρης αξιοποίηση όλων των καύσιμων συστατικών τους
- Η παραγωγή αξιοποιήσιμης ενέργειας και η βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης
- Η τήρηση όλων των νομικών περιορισμών, όσον αφορά τις κάθε είδους περιβαλλοντικές οχλήσεις (ειδικότερα η αποφυγή δημιουργίας και εκπομπής οργανικών ενώσεων όπως διοξίνες και φουράνια)

Σε γενικές γραμμές οι βασικές αρχές λειτουργίας και οι προδιαγραφές, που πρέπει να πληρούνται, σε όλες τις εγκαταστάσεις θερμικής επεξεργασίας ΣΑ, είναι κοινές και μεταξύ άλλων περιλαμβάνουν :

- Σταθερές συνθήκες λειτουργίας
- Ευχέρεια προσαρμογής σε απότομες αλλαγές της σύστασης και της ποσότητας τροφοδοσίας
- Ευελιξία προσαρμογής στις βραχυπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες διακυμάνσεις της σύνθεσης και της ποσότητας του χρησιμοποιούμενου καυσίμου
- Πλήρης έλεγχος των ρύπων στις εκπομπές
- Μεγιστοποίηση της αξιοποίησης της θερμικής ενέργειας, κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- Ελαχιστοποίηση του κόστους κατασκευής και λειτουργίας

Ο πίνακας 1.3 συνοψίζει τα βασικά χαρακτηριστικά των μεθόδων θερμικής επεξεργασίας, όσον αφορά στις συνθήκες λειτουργίας των αντίστοιχων εγκαταστάσεων και τα προκύπτοντα προϊόντα.

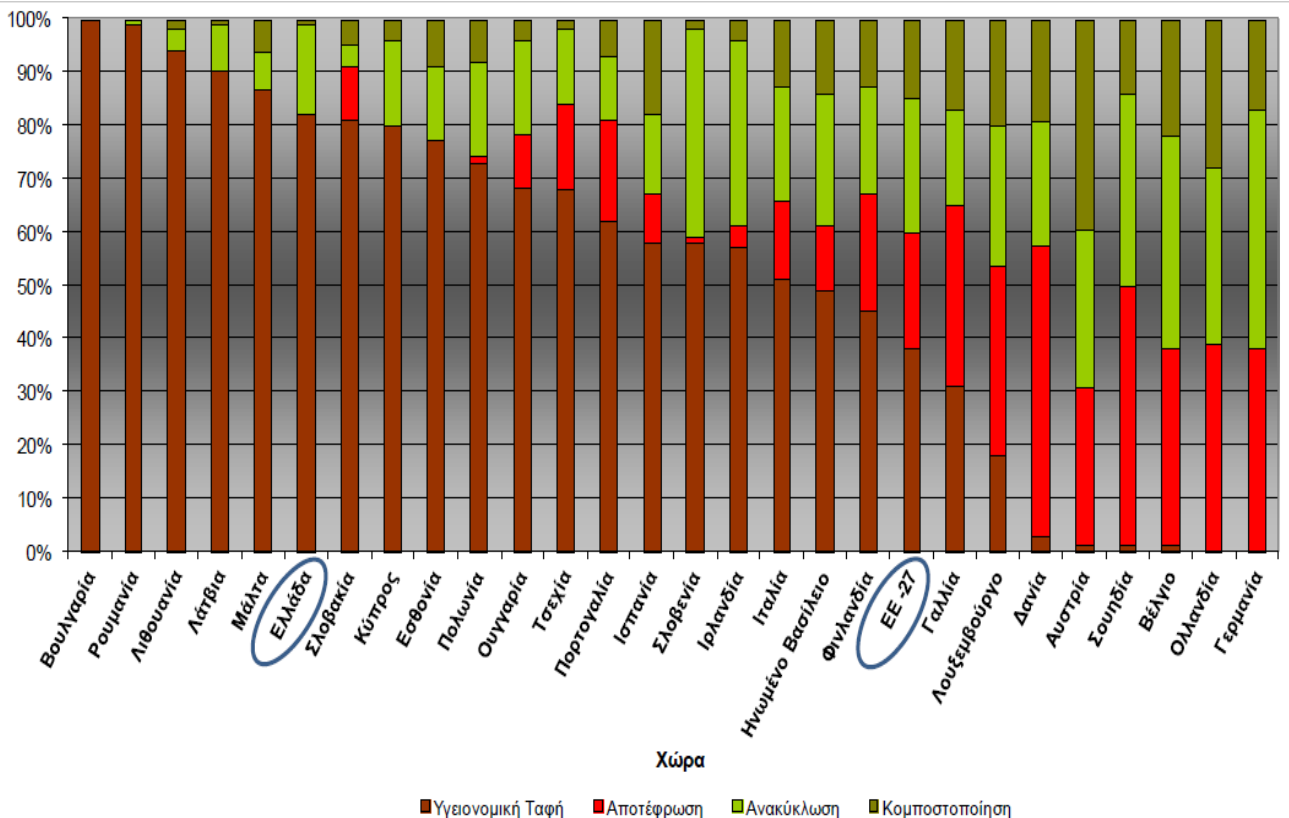
**Πίνακας 1.3 : Μέθοδοι θερμικής επεξεργασίας : συνθήκες λειτουργίας και προϊόντα <sup>[3]</sup>**

	Πυρόλυση	Αεριοποίηση	Αποτέφρωση
<b>Συνθήκες Λειτουργίας</b>			
<b>Θερμοκρασία αντίδρασης (°C)</b>	250-700	500-1600	800-1450
<b>Πίεση (bar)</b>	1	1-45	1
<b>Ατμόσφαιρα</b>	Αδρανής / Άζωτο	Παράγοντας αεριοποίησης O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	Αέρας
<b>Στοιχειομετρική αναλογία</b>	0	<1	>1
<b>Αέρια φάση</b>	H <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O, N <sub>2</sub> , υδρογονάνθρακες	H <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, N <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub>
<b>Στερεά φάση</b>	Τέφρα, κωκ	Τέφρα, σκωρία	Τέφρα, σκωρία
<b>Υγρή φάση</b>	Έλαια πυρόλυσης και νερό	Μικρή ποσότητα συμπυκνωμένου υγρού	

### 1.3 Νομοθετικό πλαίσιο διαχείρισης αποβλήτων σε Ευρωπαϊκό και Εθνικό επίπεδο

#### Ευρωπαϊκό θεσμικό πλαίσιο

Τα περισσότερα αστικά απόβλητα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, προωθούνται ακόμη σε Χώρους Υγειονομικής Ταφής (38%). Ωστόσο, όλο και περισσότερα αστικά απόβλητα ανακυκλώνονται (25%) ή κομποστοποιούνται (15%) ή αποτεφρώνονται με ανάκτηση ενέργειας (22%). Η απόρριψη σε χώρους υγειονομικής ταφής εξακολουθεί να αποτελεί την κύρια επιλογή διαχείρισης αποβλήτων στα περισσότερα κράτη μέλη της ΕΕ, μολονότι η ανάκτηση ενέργειας και ιδιαίτερα η ανακύκλωση έχουν κερδίσει έδαφος τα τελευταία έτη (Εικόνα 1.4).



Εικόνα 1.4: Επεξεργασία αστικών αποβλήτων ανά κράτος μέλος το 2010<sup>[6]</sup>

Προκειμένου να μειωθεί ο αρνητικός αντίκτυπος των αστικών αποβλήτων στο περιβάλλον και στη δημόσια υγεία και να προαχθεί μια πιο αποδοτική χρήση των πόρων, η ΕΕ έχει καθιερώσει γενικές αρχές και κοινά πρότυπα και επιμέρους στόχους υπό τη μορφή οδηγιών για τη διαχείριση των αστικών αποβλήτων.

Το πλαίσιο της πολιτικής διαχείρισης αποβλήτων της ΕΕ θεσπίστηκε με την οδηγία της 15ης Ιουλίου 1975, Ευρωπαϊκή οδηγία 75/442/ΕΕC, η οποία ουσιαστικά όρισε τα βασικά σημεία πάνω στα οποία βασίζεται ολόκληρη η πολιτική διαχείρισης αποβλήτων της Ευρωπαϊκής κοινότητας.

### Οδηγία 75/442/EEC – κυρίαρχα σημεία

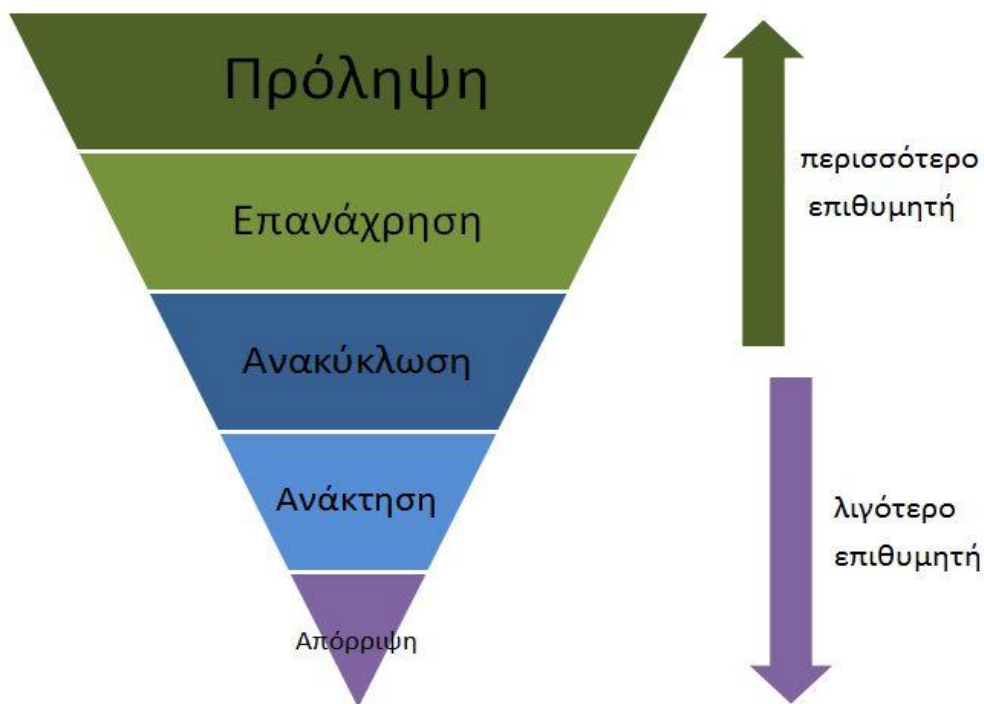
- ✓ Ορισμός αποβλήτου
- ✓ Κοινή τροπολογία για τις ενέργειες επαναχρησιμοποίησης και τελικής διάθεσης και διαφορετικές κατηγορίες αποβλήτων
- ✓ Ιεραρχία προτεραιοτήτων που οφείλουν να εφαρμόζονται από όλα τα συστήματα διαχείρισης αποβλήτων (πυραμίδα)
- ✓ Ίδρυση ενός ολοκληρωμένου δικτύου εγκαταστάσεων διάθεσης
- ✓ Η υποχρέωση των κρατών μελών να ακολουθήσουν σχέδια διαχείρισης αποβλήτων
- ✓ Η καθιέρωση μιας υποχρεωτικής διαδικασίας αδειοδότησης για κάθε εταιρεία που αναμειγνύεται σε ενέργειες διάθεσης ή επαναχρησιμοποίησης αποβλήτων

Η οδηγία 75/442/EEC τροποποιήθηκε στη συνέχεια από :

- Την οδηγία 91/156/EEC στις 18 Μάρτη του 1991
- Την οδηγία 91/692/EEC στις 23 Δεκέμβρη του 1991
- Την Απόφαση της επιτροπής 96/350/EC στις 24 Μαΐου 1996
- Τη ρύθμιση Νο 1882/2003 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του συμβουλίου στις 29 Σεπτεμβρίου 2003

Σύμφωνα με την ανωτέρω οδηγία, η πολιτική διαχείρισης αποβλήτων της ΕΕ βασίζεται στην παρακάτω ιεραρχία: προώθηση της πρόληψης, της επαναχρησιμοποίησης και της ανακύκλωσης των αποβλήτων . Εάν δεν είναι δυνατόν να προληφθεί η παραγωγή των αποβλήτων, πρέπει να ανακτώνται όσο το δυνατόν περισσότερα υλικά, κατά προτίμηση μέσω της ανακύκλωσης, και η απόρριψη σε χώρους υγειονομικής ταφής να χρησιμοποιείται ως ύστατη λύση. Με την ανωτέρω οδηγία εισήχθη και η αρχή «ο ρυπαίνω πληρώνει». Η οδηγία για τα απόβλητα του 2008 (2008/98/EC ) ανέπτυξε περαιτέρω τις ανωτέρω αρχές θεσπίζοντας μια υποχρεωτική πυραμίδα ιεράρχησης πέντε βημάτων για τα απόβλητα (εικόνα 1.5).<sup>[6]</sup>





Εικόνα 1.5: Ιεράρχηση πολιτικών διαχείρισης ΑΣΑ  
[\[http://ec.europa.eu/environment/waste/framework/\]](http://ec.europa.eu/environment/waste/framework/)

Στον παρακάτω πίνακα γίνεται μια συνοπτική περιγραφή του κάθε σταδίου της ιεράρχησης.

**Πίνακας 1.4 : Στάδια πυραμίδας ιεράρχησης και περιγραφή**

Στάδια	Περιλαμβάνει
<b>Πρόληψη</b>	Χρησιμοποίηση λιγότερου υλικού στην κατασκευή , χρησιμοποίηση προϊόντων για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα , χρησιμοποίηση λιγότερων επικίνδυνων υλικών
<b>Προετοιμασία για επαναχρησιμοποίηση</b>	Έλεγχος , καθαρισμός , επιδιόρθωση , ανακαίνιση
<b>Ανακύκλωση</b>	Τα ΑΣΑ τροποποιούνται σε ένα προϊόν ή μια ουσία που μπορεί εκ νέου να χρησιμοποιηθεί(συμπεριλαμβάνει και το κόμποστ)
<b>Ανάκτηση</b>	Περιλαμβάνει ανάκτηση ενέργειας μέσω διεργασιών όπως αναερόβια χώνευση, καύση, πυρόλυση
<b>Διάθεση</b>	ΧΥΤΑ

Παρακάτω αναφέρονται οι βασικές ευρωπαϊκές οδηγίες που ακολούθησαν μετά την 75/442/EEC, όσον αφορά στη διαχείριση των αποβλήτων, οι οποίες συμμορφώνονται στην προαναφερθείσα :

- Incineration 2000/76/EC

- Landfill 1999/31/EC
- Port reception facilities 2000/59/EC
- IPPC 2008/1/EC
- Directive 2008/98/EC<sup>[2]</sup>

**Πίνακας 1.5 : Ευρωπαϊκές οδηγίες διαχείρισης αποβλήτων**

Ευρωπαϊκές οδηγίες σχετικά με ενέργειες για τη διαχείριση αποβλήτων	Σκοπός [ <a href="http://eur-lex.europa.eu/">http://eur-lex.europa.eu/</a> ]
<b>Incineration 2000/76/EC</b>	Η μείωση των αρνητικών επιπτώσεων στο περιβάλλον (ατμόσφαιρα, έδαφος, επιφανειακά και υπόγεια νερά) και την ανθρώπινη υγεία που επιφέρει η αποτέφρωση και η συναποτέφρωση αποβλήτων, μέσω αυστηρών συνθηκών λειτουργίας και τεχνικών απαιτήσεων
<b>Landfill 1999/31/EC</b>	Μέτρα, διαδικασίες και καθοδήγηση για τη μείωση των αρνητικών επιπτώσεων στο περιβάλλον (ατμόσφαιρα, έδαφος, επιφανειακά και υπόγεια νερά) και την ανθρώπινη υγεία που επιφέρει η υγειονομική ταφή απορριμμάτων, στη διάρκεια όλου του κύκλου ζωής του ΧΥΤΑ
<b>Port reception facilities 2000/59/EC</b>	Η μείωση των αποβλήτων πλοίων στη θάλασσα μέσω χρήσης ειδικών νόμιμων εγκαταστάσεων υποδοχής
<b>IPPC 2008/1/EC</b>	Ολοκληρωμένη πρόληψη και έλεγχος της μόλυνσης από χημικές βιομηχανίες, βιομηχανίες μετάλλων, ορυκτών, ενέργειας, εγκαταστάσεις διαχείρισης απορριμμάτων, γάλακτος, πουλερικών κ.α.
<b>Waste management 2008/98/EC</b>	Μέτρα για τη προστασία του περιβάλλοντος και της ανθρώπινης υγείας μέσω πρόληψης ή μείωσης των δυσμενών επιπτώσεων από την παραγωγή και διαχείριση αποβλήτων

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

έχει προχωρήσει σε μερική εναρμόνιση με την Οδηγία 2008/1/EK με τη θέσπιση του Ν.2965/2001 και του Ν.3325/2005.

### **Ελληνικό Θεσμικό πλαίσιο**

Παρακάτω θα γίνει αναφορά στους κυριότερους νόμους και κανονισμούς που ρυθμίζουν τη διαχείριση αποβλήτων στην Ελλάδα :

- **Ν. 2939/2001 (ΦΕΚ 179/Α/06.08.2001) «Συσκευασίες και εναλλακτική διαχείριση των συσκευασιών άλλων προϊόντων – Ίδρυση Εθνικού Οργανισμού Εναλλακτικής Διαχείρισης Συσκευασιών και άλλων Προϊόντων (ΕΟΕΔΣΑΠ) και άλλες διατάξεις», όπως τροποποιήθηκε με το Ν. 3854/10 (ΦΕΚ 94/Α/23.06.2010) «Τροποποίηση της νομοθεσίας για την εναλλακτική διαχείριση των συσκευασιών και άλλων προϊόντων και τον Εθνικό Οργανισμό Εναλλακτικής Διαχείρισης Συσκευασιών και Άλλων Προϊόντων (Ε.Ο.Ε.Δ.Σ.Α.Π.) και άλλες διατάξεις» και το Ν.4042/2012**

1. Σκοπός του παρόντος νόμου είναι η θέσπιση μέτρων για τη διαχείριση των συσκευασιών και άλλων προϊόντων με στόχο την επαναχρησιμοποίηση ή αξιοποίηση των αποβλήτων τους.

2. Ειδικότερα οι ρυθμίσεις του νόμου αυτού αποσκοπούν:

α) Στην πρόληψη της δημιουργίας αποβλήτων συσκευασιών με τον περιορισμό του συνολικού όγκου των συσκευασιών, καθώς και με τον περιορισμό των βλαπτικών συνεπειών από τα απορρίμματα αυτά για την υγεία των καταναλωτών και για το περιβάλλον, για μία σταθερή και διαρκή ανάπτυξη.

β) Στη μείωση της τελικής διάθεσης των αποβλήτων των συσκευασιών ή άλλων προϊόντων με την ενθάρρυνση κατά προτεραιότητα:

- συστημάτων επαναχρησιμοποίησής τους κατά τρόπο αβλαβή για το περιβάλλον, καθώς και ανάκτησης υλικών και ανακύκλωσής τους, ώστε να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας και πρωτογενών πρώτων υλών,

- της ανάκτησης ενέργειας ως αποτελεσματικό μέσο της αξιοποίησης των αποβλήτων τους.

γ) Στον καθορισμό ποσοτικών στόχων για την ανακύκλωση και τις άλλες εργασίες αξιοποίησης των αποβλήτων των συσκευασιών και άλλων προϊόντων, καθώς και μεσοπρόθεσμων και μακροπρόθεσμων χρονικών ορίων.

δ) Στο σχεδιασμό και την καθιέρωση συστημάτων επιστροφής (εγγυοδοσίας), συλλογής και αξιοποίησης με τη συμμετοχή όλων των εμπλεκόμενων μερών.

ε) Στην πρόβλεψη σήμανσης των συσκευασιών.

στ) Στον καθορισμό των βασικών απαιτήσεων ως προς τη σύνθεση και τη φύση της επαναχρησιμοποίησιμης και αξιοποιήσιμης συσκευασίας και άλλων προϊόντων συμπεριλαμβανομένης της ανακύκλωσης.

Στο διαχωρισμό των αποβλήτων στην πηγή, ώστε να επιτυγχάνεται υψηλό επίπεδο ανακύκλωσης και ανάκτησης υλικών.

η) Η πρόβλεψη υιοθέτησης προτύπων τυποποίησης των συσκευασιών.

θ) Η πρόβλεψη μέτρων και όρων για τη συνεργασία όλων όσων προβαίνουν σε διαχείριση των συσκευασιών και άλλων προϊόντων στα πλαίσια της αρχής "ο ρυπαίνων πληρώνει" και της συμμετοχής τους στην ευθύνη.

ι) Η καθιέρωση συστημάτων ενημέρωσης του καταναλωτή για την προσαρμογή της στάσης και συμπεριφοράς του κατά τη διαχείριση των συσκευασιών και άλλων προϊόντων.

ια) Η καθιέρωση διαδικασίας πληροφόρησης του κοινού στον τομέα των τεχνικών προτύπων και προδιαγραφών.

3. Η πραγματοποίηση των στόχων του νόμου αυτού ανατίθεται στον Εθνικό Οργανισμό Εναλλακτικής Διαχείρισης Συσκευασιών και άλλων προϊόντων (Ε.Ο.Ε.Δ.Σ.Α.Π.), σύμφωνα με τις διατάξεις του Κεφαλαίου Ε' του νόμου αυτού.

Οι ρυθμίσεις του νόμου αυτού ως προς τις συσκευασίες και τα απόβλητα των συσκευασιών εναρμονίζονται με τις διατάξεις της Οδηγίας 94/62/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 20ής Δεκεμβρίου 1994 "για τις συσκευασίες και τα απόβλητα της συσκευασίας" (ΕΕΙ\_ 365/10/31.12.1994) [Πηγή <https://www.forin.gr/laws> ]

**- Ν.4042/2012 (ΦΕΚ 24/Α/13-2-2012) «Ποινική Προστασία του περιβάλλοντος – Εναρμόνιση με την Οδηγία 2008/99/ΕΚ – Πλαίσιο παραγωγής και διαχείρισης αποβλήτων – Εναρμόνιση με την Οδηγία 2008/98/ΕΚ – Ρύθμιση θεμάτων Υπουργείου Περιβάλλοντος Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής» που ενσωματώνει στο εθνικό δίκαιο την οδηγία-πλαίσιο 2008/98/ΕΕ για τα απόβλητα [Πηγή: ΦΕΚ/24/Α/13.2.2012.]**

Με το νόμο 4042/2012 εναρμονίζεται το εθνικό δίκαιο προς τις διατάξεις της οδηγίας 2008/98/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 17ης Νοέμβρη 2008 <<σχετικά με την προστασία του περιβάλλοντος μέσω ποινικού δικαίου>> και θεσπίζονται αποτρεπτικές αποτελεσματικές και αναλογικές, κυρώσεις μέσω του ποινικού δικαίου, για τις περιπτώσεις που προκαλείται ή ενδέχεται να προκληθεί ρύπανση ή υποβάθμιση του περιβάλλοντος, με σκοπό τη διασφάλιση της αποτελεσματικής ποινικής προστασίας του.

Οι ποσοτικοί στόχοι που συνδέονται με τον εν λόγω νόμο είναι οι ακόλουθοι:

- Έως το 2015, προβλέπεται ξεχωριστή συλλογή τουλάχιστον για το 5% των συνολικά παραγόμενων βιοαποβλήτων
- Έως το 2020, , προβλέπεται ξεχωριστή συλλογή τουλάχιστον για το 10 % των συνολικά παραγόμενων βιοαποβλήτων

Τέλος, ο νόμος 4042/2012 προβλέπει την εισαγωγή τέλους υγειονομικής ταφής μέχρι το 2014 για τη διάθεση των αποβλήτων που δεν έχουν υποστεί επεξεργασία. Ως εκ τούτου οι παραγωγοί (οργανισμοί και επιχειρήσεις) θα επιβαρύνονται με επιπλέον χρέωση 35 ευρώ ανά τόνο το 2014, με αύξηση κατά 5 ευρώ ανά έτος έως ότου η τιμή φτάσει τα 60 ευρώ ανά τόνο (δηλαδή το έτος 2019). Ο φόρος θα πρέπει να υποβάλλεται στο πράσινο ταμείο για την χρηματοδότηση προγραμμάτων και έργων ανάκτησης και διάθεσης.<sup>[11]</sup>

**- ΚΥΑ 29407/3508/2002 (ΦΕΚ 1572 Β) «Μέτρα και όροι για την υγειονομική ταφή των αποβλήτων»**

Η Οδηγία 1999/31/ΕΚ για την Υγειονομική Ταφή Αποβλήτων υποχρεώνει τα κράτη μέλη να ελαττώσουν την ποσότητα των βιο-αποικοδομήσιμων απορριμμάτων στο 35% των ποσοτήτων που οδηγήθηκαν σε χώρους ταφής το 1995, έως το έτος 2016.

Η Η.Π. 29407/3508/2002, που ενσωματώνει στο Εθνικό Δίκαιο την Κοινοτική Οδηγία για την Υγειονομική Ταφή (1999/31/ΕΚ) θέτει σταδιακά αυξανόμενους στόχους για την εκτροπή των βιοαποδομήσιμων αστικών αποβλήτων (ΒΑΑ) από την υγειονομική ταφή: έως τον Ιούλιο του 2010, 2013 και 2020 μόνο το 75, 50 και 35% κατά βάρος, αντίστοιχα, των ΒΑΑ που παρήχθησαν το 1995, θα μπορούν να διατίθενται με τη μέθοδο της υγειονομικής ταφής. Η υπόλοιπη ποσότητα - όση κι αν είναι αυτή με δεδομένη τη συνεχή αύξηση της παραγωγής αποβλήτων που παρατηρείται σε όλη την Ευρώπη και στην Ελλάδα τις τελευταίες δεκαετίες - θα πρέπει να τύχει κάποιας κατάλληλης επεξεργασίας, η οποία θα ελαττώσει σημαντικά και σύμφωνα με συγκεκριμένα ποσοτικά κριτήρια μέτρησης το βαθμό βιοαποδομησιμότητάς της.

Για την επίτευξη των στόχων εκτροπής των ΒΑΑ μπορούν να αναπτυχθούν:

(α) προγράμματα ελαχιστοποίησης (κυρίως κομποστοποίηση στο σπίτι, παραμονή του κομμένου γρασιδιού στο έδαφος και μείωση της κατανάλωσης χαρτιού)

(β) χωριστής διαλογής και βιολογικής επεξεργασίας (δηλ. κομποστοποίησης ή αναερόβιας χώνευσης) του καθαρού, οργανικού κλάσματος

(γ) μηχανικής- βιολογικής επεξεργασίας (ΜΒΕ) του χαμηλότερης καθαρότητας, οργανικού κλάσματος που λαμβάνεται μετά τη μηχανική διαλογή και

(δ) θερμικής επεξεργασίας (καύση, αεριοποίηση, πυρόλυση) των σύμμεικτων αποβλήτων <sup>[4]</sup>

**- ΚΥΑ 50910/2727/2003 (ΦΕΚ 1909 Β) «Μέτρα και Όροι για τη Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων. Εθνικός και Περιφερειακός Σχεδιασμός Διαχείρισης», όπως έχει τροποποιηθεί και ισχύει.**

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

Τα τελευταία χρόνια, σε μεγάλο βαθμό ως αποτέλεσμα της Οδηγίας για την Υγειονομική Ταφή, εμφανίζεται μια ανανέωση του ενδιαφέροντος για τη βιολογική επεξεργασία. Σημαντικές ποσότητες οργανικών αποβλήτων μετά από ΔσΠ κομποστοποιούνται σε πολλές Ευρωπαϊκές χώρες, ενώ αυξάνει και η χρήση της αναερόβιας χώνευσης. Το παραγόμενο κομπόστ από διαλεγμένα στην πηγή οργανικά διατίθεται χωρίς πρόβλημα στην αγορά.<sup>[1]</sup>

Σε αυτή την κατεύθυνση προσανατολίζεται ο πιο πρόσφατος νόμος 4042 (ΦΕΚ Α΄ 24/13.2.2012) «Ποινική προστασία του περιβάλλοντος – Πλαίσιο παραγωγής και διαχείρισης αποβλήτων» που εναρμονίζεται με την Οδηγία 2008/99/ΕΚ και την Οδηγία 2008/98/Ε και θέτει στόχους σχετικά με τη διαχείριση των βιοαποβλήτων (άρθρο 41) ,ενώ ορίζονται τα κατάλληλα μέτρα, προκειμένου να ενθαρρυνθεί:

α) Η χωριστή συλλογή βιολογικών αποβλήτων (βιοαποβλήτων), με σκοπό την κομποστοποίηση ή και τη ζύμωση (digestion) των βιολογικών αποβλήτων

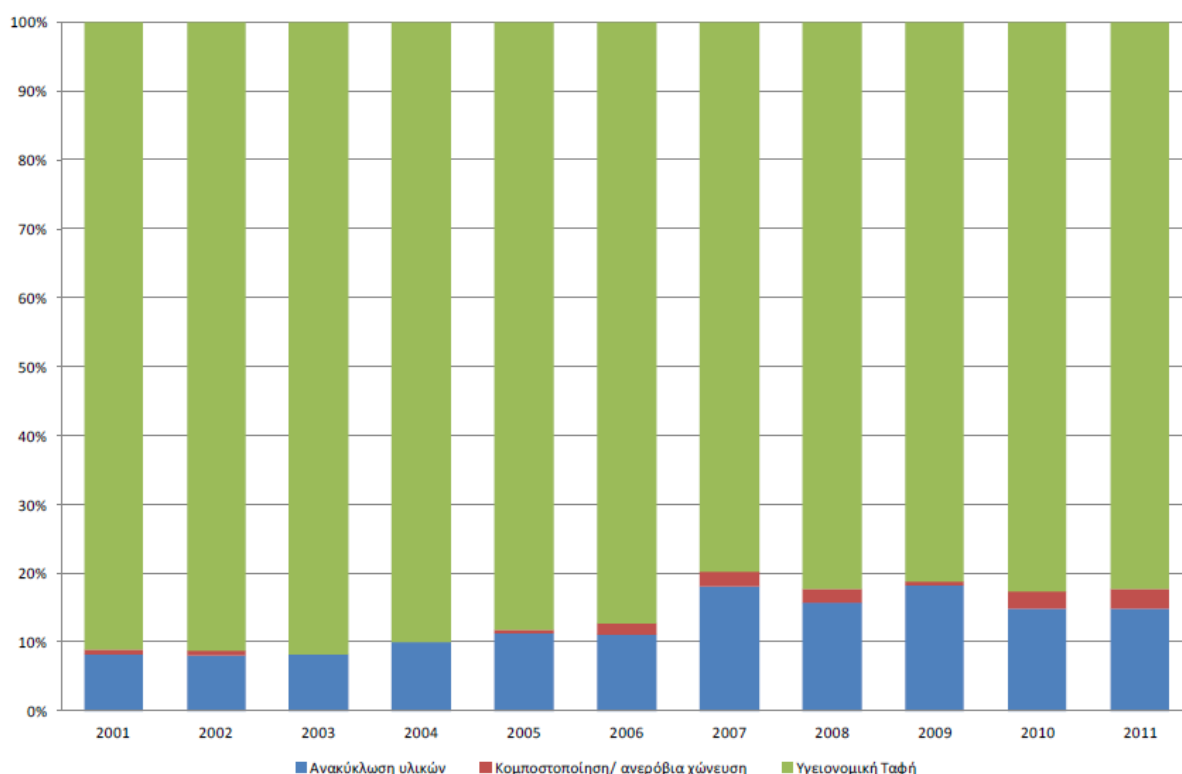
β) Η επεξεργασία των βιολογικών αποβλήτων κατά τρόπο που να διασφαλίζεται υψηλό επίπεδο περιβαλλοντικής προστασίας

γ) Η χρήση περιβαλλοντικά ασφαλών υλικών, τα οποία παράγονται από βιολογικά απόβλητα [<https://dasarxheio.com/2016/12/27/1822-3>].

#### 1.4 Υφιστάμενη κατάσταση διαχείρισης αποβλήτων σε Ελλάδα και Ευρώπη

##### ΕΛΛΑΔΑ

Στην Ελλάδα, το 2010, το 18% της συνολικής ποσότητας των αστικών αποβλήτων ανακυκλώθηκε (17%) ή κομποστοποιήθηκε (1%), το 82% διατέθηκε σε αδειοδοτημένους χώρους υγειονομικής ταφής (ΧΥΤ). Ένα επιπλέον περίπου 5% απορρίφθηκε παράνομα σε χώρους ανεξέλεγκτης διάθεσης απορριμμάτων (ΧΑΔΑ).



Εικόνα 1.6: Επεξεργασία και διάθεση αστικών αποβλήτων στην Ελλάδα 2001-2011 <sup>[6]</sup>

## Εθνικό Σχέδιο Διαχείρισης Αποβλήτων (ΕΣΔΑ)

Το ΕΣΔΑ ακολουθεί τις αρχές και τις κατευθύνσεις της Οδηγίας Πλαίσιο για τα απόβλητα 2008/98/ΕΚ, όπως ενσωματώθηκαν στο εθνικό δίκαιο με το Νόμο Πλαίσιο 4042/2012 (Α' 24). Παράλληλα καθορίζει τις προοπτικές διαχείρισης έως το 2020 σύμφωνα με τις τάσεις που διαγράφονται στην Ευρωπαϊκή Ένωση και σήμερα προσεγγίζονται με τη Στρατηγική «Ευρώπη 2020», την πρόταση για το 7ο Πρόγραμμα Δράσης για το Περιβάλλον και το Χάρτη Πορείας για την αποδοτικότητα των πόρων.

Η εθνική πολιτική για τα απόβλητα είναι προσανατολισμένη στους εξής στόχους-ορόσημα για το 2020: τα κατά κεφαλή παραγόμενα απόβλητα να έχουν μειωθεί δραστικά, η προετοιμασία προς επαναχρησιμοποίηση και η ανακύκλωση με χωριστή συλλογή ανακυκλώσιμων - βιοαποβλήτων να εφαρμόζεται στο 50% του συνόλου των ΑΣΑ, η ανάκτηση ενέργειας να αποτελεί συμπληρωματική μορφή διαχείρισης, όταν έχουν εξαντληθεί τα περιθώρια κάθε άλλου είδους ανάκτησης και η υγειονομική ταφή να αποτελεί την τελευταία επιλογή και να έχει περιοριστεί σε λιγότερο από το 30% του συνόλου των ΑΣΑ.

Οι στρατηγικές για την εφαρμογή της νέας εθνικής πολιτικής διαχείρισης των αποβλήτων είναι οι εξής:

- ✓ Κατάρτιση ολοκληρωμένου πλαισίου σχεδιασμών διαχείρισης αποβλήτων
- ✓ Διασφάλιση της υψηλής προστασίας του περιβάλλοντος και της ανθρώπινης υγείας
- ✓ Εφαρμογή της Διαλογής στην Πηγή, ως του πλέον δόκιμου τρόπου συλλογής με σκοπό την επίτευξη υψηλής ποιότητας ανακύκλωσης.
- ✓ Εξορθολογισμός κόστους υπηρεσιών διαχείρισης αποβλήτων και προώθηση οικονομικά και περιβαλλοντικά βιώσιμων επενδύσεων στον τομέα των αποβλήτων, με στόχο τη θεσμοθέτηση ανταποδοτικού οφέλους προς τον πολίτη από την ανακύκλωση.
- ✓ Ανάκτηση Ενέργειας- Ενεργειακή Αξιοποίηση Αποβλήτων

Προς εφαρμογή των κατευθύνσεων του ΕΣΔΑ, καταρτίζονται σε κάθε Περιφέρεια τα Περιφερειακά Σχέδια Διαχείρισης Αποβλήτων (ΠΕΣΔΑ) τα οποία εξειδικεύουν την ολοκληρωμένη διαχείριση του συνόλου των αποβλήτων που παράγονται στη γεωγραφική τους ενότητα σύμφωνα με τους στόχους και τις προβλέψεις του Εθνικού Σχεδίου Διαχείρισης Αποβλήτων. Με βάση το ΕΣΔΑ και την υφιστάμενη νομοθεσία, το ΠΕΣΔΑ εκπονείται και υλοποιείται από τον οικείο Περιφερειακό Φορέα Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων (Φο.Δ.Σ.Α.)<sup>[9]</sup>

**Πίνακας 1.6: Στατιστικά στοιχεία σχετικά με τη διαχείριση των αστικών αποβλήτων στην Ελλάδα (EUROSTAT 2012) <sup>[6]</sup>**

	Σε ετήσια βάση	
	2009/2010	2000/2001
<b>Παραγωγή αστικών αποβλήτων</b>	5.175 χιλ.τόνοι	<u>4.559</u> χιλ.τόνοι
	475 kg/άτομο	417 kg/άτομο
	1188 kg/νοικοκυριό	1.084 kg/νοικοκυριό
<b>Οικιακά απόβλητα ως % των αστικών</b>	92,8%	91,5%

Ρυθμός μεταβολής αστικών αποβλήτων	2001/2010 , 2009/2010	1995/2001 , 2001/2004
	+14,7%	+1,3%
<b>Παραγωγή βιοαποβλήτων</b>	2.254 χιλ.τόνοι	2.104 χιλ. τόνοι
	199 kg/άτομο	193 kg/άτομο
	517 kg/νοικοκυριό	502 kg/νοικοκυριό
<b>Βιοαπόβλητα ως % των οικιακών αποβλήτων</b>	43,6%	46,2%
<b>Ανακύκλωση , κομποστοποίηση και επαναχρησιμοποίηση αστικών αποβλήτων</b>	18,3%	9,2%
	945 χιλ.τόνοι	402 χιλ.τόνοι
	83 kg/άτομο	37 kg/άτομο
	216 kg/νοικοκυριό	96 kg/νοικοκυριό
<b>Παραγωγή αποβλήτων συσκευασιών</b>	82 kg/άτομο	89 kg/άτομο
<b>Απόβλητα συσκευασιών</b>	927 χιλ.τόνοι	974 χιλ.τόνοι
<b>Ανακύκλωση συσκευασιών</b>	544 χιλ.τόνοι	325 χιλ.τόνοι
	48 kg/άτομο	30 kg/άτομο
	58,7%	33,4%
<b>Υπόλειμμα αστικών αποβλήτων (μετά από ανακύκλωση , κομποστοποίηση και επαναχρησιμοποίηση)</b>	374 kg/άτομο	380 kg/άτομο
<b>Αστικά απόβλητα σε Χώρους Υγειονομικής ταφής</b>	374 kg/άτομο	380 kg/άτομο
	81,7%	90,8%
<b>Αποτέφρωση αστικών αποβλήτων με ανάκτηση ενέργειας</b>	0%	0%

Η πλειοψηφία των εν ισχύ σήμερα 13 Περιφερειακών Σχεδιασμοί Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων (ΠΕΣΔΑ) καταρτίσθηκε ή επικαιροποιήθηκε κατά την περίοδο 2003-2005, ενώ ορισμένοι από αυτούς έχουν ήδη υποστεί μια (1) σημαντική αναθεώρηση (Ανατολική Μακεδονία Θράκη, Πελοπόννησος) κυρίως λόγω αδυναμίας χωροθέτησης των προβλεπόμενων υποδομών.

Σήμερα έχει υλοποιηθεί το 70% των προβλεπόμενων στους Περιφερειακούς Σχεδιασμούς Χώρων Υγειονομικής Ταφής (Χ.Υ.Τ.) - 78 ΧΥΤ λειτουργούν και άλλοι 17 κατασκευάζονται ή επεκτείνονται και σε τέσσερις Περιφέρειες της χώρας (Δυτική Μακεδονία, Ήπειρος, Θεσσαλία και Κρήτη) λειτουργεί το σύνολο (ή σχεδόν) των προβλεπόμενων υποδομών διάθεσης. Η κατασκευή των υπολειπόμενων 43 ΧΥΤ (οι μισοί από τους οποίους σε νησιά του Ν. Αιγαίου και του Ιονίου) θα εξαλείψει πλήρως τους εναπομείναντες ενεργούς Χώρους Ανεξέλεγκτης Διάθεσης Απορριμμάτων (ΧΑΔΑ). Η πλειοψηφία αυτών των έργων υγειονομικής ταφής προβλέπεται ότι θα ενταχθούν σε προγράμματα χρηματοδότησης των ΠΕΠ και σύντομα θα αρχίσει η υλοποίησή τους στη τρέχουσα προγραμματική περίοδο.

Σχετική καθυστέρηση παρουσιάζεται στο δίκτυο των Σταθμών Μεταφόρτωσης (ΣΜΑ) που προβλέπουν οι ΠΕΣΔΑ, δεδομένου ότι λειτουργούν 51 ΣΜΑ, κατασκευάζονται άλλοι 17 και



υπολείπονται 76 (περίπου οι μισοί). Μεγαλύτερη καθυστέρηση στα έργα αυτά εμφανίζεται στις Περιφέρειες Αττικής, Κεντρικής Μακεδονίας και Πελοποννήσου, παράλληλα με τις πιο δύσκολες (νησιωτικές) Περιφέρειες όπως του Ν. Αιγαίου. Βέβαια, οι ΠΕΣΔΑ αφήνουν έτσι κι αλλιώς μεγάλο περιθώριο ευελιξίας στον αριθμό και τη χωροθέτηση ΣΜΑ για προσαρμογή στις εκάστοτε τοπικές συνθήκες. Να σημειωθεί τέλος ότι σημαντικός αριθμός κινητών ΣΜΑ αναμένεται ότι θα υλοποιηθεί στο πλαίσιο του προγράμματος εξάλειψης των ΧΑΔΑ, ως συνοδά έργα.

Σημαντική πρόοδος έχει σημειωθεί στην εξάπλωση των συστημάτων Διαλογής στην Πηγή αποβλήτων συσκευασιών και στις υποδομές ανακύκλωσης, με σημαντικά αποτελέσματα αφού λειτουργεί περίπου το 75% των Κέντρων Διαλογής Ανακυκλώσιμων Υλικών (ΚΔΑΥ) που προβλέπονται στους ΠΕΣΔΑ (32 από τα 43), τα οποία καλύπτουν γεωγραφικά το σύνολο σχεδόν της χώρας, εκτός από το Αιγαίο. Τα 11 που υπολείπονται μοιράζονται μεταξύ Κεντρικής Μακεδονίας και νησιωτικών περιοχών. Σημειώνεται ότι στη συντριπτική πλειοψηφία τους, οι υποδομές ανακύκλωσης αναπτύχθηκαν με ιδιωτικούς πόρους μέσω των συλλογικών Συστημάτων Εναλλακτικής Διαχείρισης (ΣΕΔ) συσκευασιών.

Ως προς τις κεντρικές μονάδες επεξεργασίας αποβλήτων (ΜΕΑ), από τις συνολικά προβλεπόμενες 45 Μονάδες Επεξεργασίας, λειτουργούν σήμερα 4 (Άνω Λιόσια, Χανιά, Ηράκλειο, Κεφαλονιά) και έχει δρομολογηθεί η υλοποίηση ΜΕΑ στη Δυτική Μακεδονία, Θεσσαλονίκη, Πελοπόννησο και Αττική, στο στάδιο της προετοιμασίας βρίσκεται ένας ικανός αριθμός νέων μονάδων όπως της Ηλείας και της Αιτωλοακαρνανίας, που υπέβαλαν προτάσεις στην Ειδική Γραμματεία ΣΔΙΤ, ενώ ωριμότητα υπάρχει και για τις ΜΕΑ των Σερρών, Αχαΐας, Ηπείρου και της Κέρκυρας.

Περιοχή	Δυναμικότητα (τόνοι ανά έτος)	Έναρξη λειτουργίας	Τεχνολογία
Αττική (Άνω Λιόσια)	385.000	2004	ΜΒΕ, κομποστοποίηση εμπλουτισμένου οργανικού κλάσματος
Χανιά (Κρήτη)	70.000	2005	ΜΒΕ, κομποστοποίηση εμπλουτισμένου οργανικού κλάσματος
Ηράκλειο	70.000	2010	ΜΒΕ, βιοξήρανση
Κεφαλονιά	10.000	2010	ΜΒΕ, βιοξήρανση
Καλαμάτα	32.000	1997	ΜΒΕ, κομποστοποίηση εμπλουτισμένου οργανικού κλάσματος. <b>ΔΕΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙ</b>

*Εικόνα 1.7 : Υφιστάμενες εγκαταστάσεις Μηχανικής Βιολογικής Επεξεργασίας (ΜΒΕ) αστικών αποβλήτων στην Ελλάδα <sup>[6]</sup>*

## ΕΥΡΩΠΗ

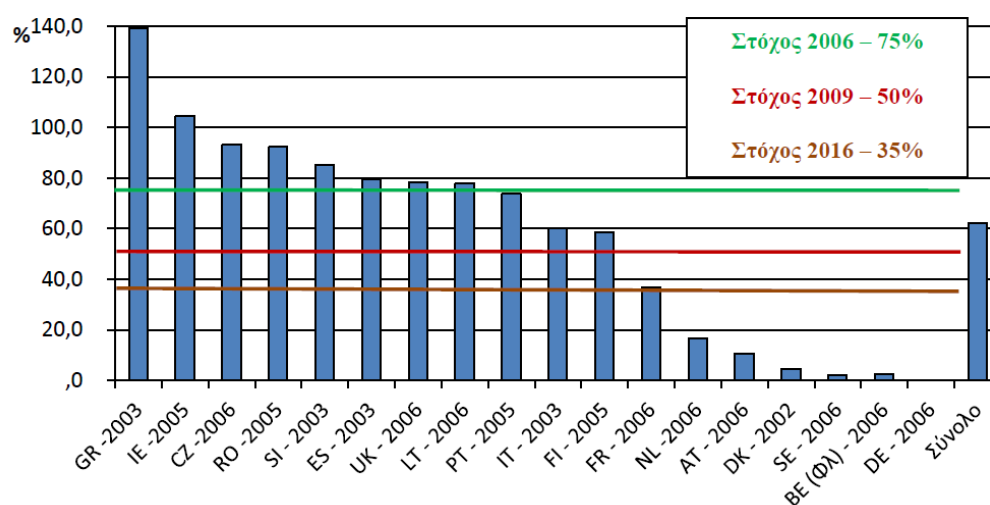
Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται συγκριτικά οι ποσότητες παραγωγής ΑΣΑ ανά κάτοικο σε χώρες της ΕΕ , συμπεριλαμβανομένης της Ελλάδας.

**Πίνακας 1.7: Παραγωγή ΑΣΑ στην ΕΕ [2]**

Συνολικά απόβλητα ανά άτομο (2010)	
Χώρες της ΕΕ	kg / άτομο
Φινλανδία	313
Ιρλανδία	387
Βέλγιο	429
Σουηδία	431
Δανία	439
Γερμανία	444
Γαλλία	452
Ελλάδα	460
Ηνωμένο Βασίλειο	465
Ισπανία	504
Πορτογαλία	514
Ιταλία	537
Ολλανδία	546
Αυστρία	551
Λουξεμβούργο	760

Η Ελλάδα, μεταξύ και άλλων κρατών μελών, παρουσιάζει τα μεγαλύτερα κενά στην εφαρμογή της ευρωπαϊκής νομοθεσίας. Οι αδυναμίες περιλαμβάνουν ανεπαρκείς ή ανύπαρκτες πολιτικές πρόληψης της δημιουργίας αποβλήτων, έλλειψη κινήτρων για να μην οδηγούνται τα απόβλητα στους χώρους υγειονομικής ταφής (ΧΥΤ) και ανεπαρκή υποδομή επεξεργασίας αποβλήτων.

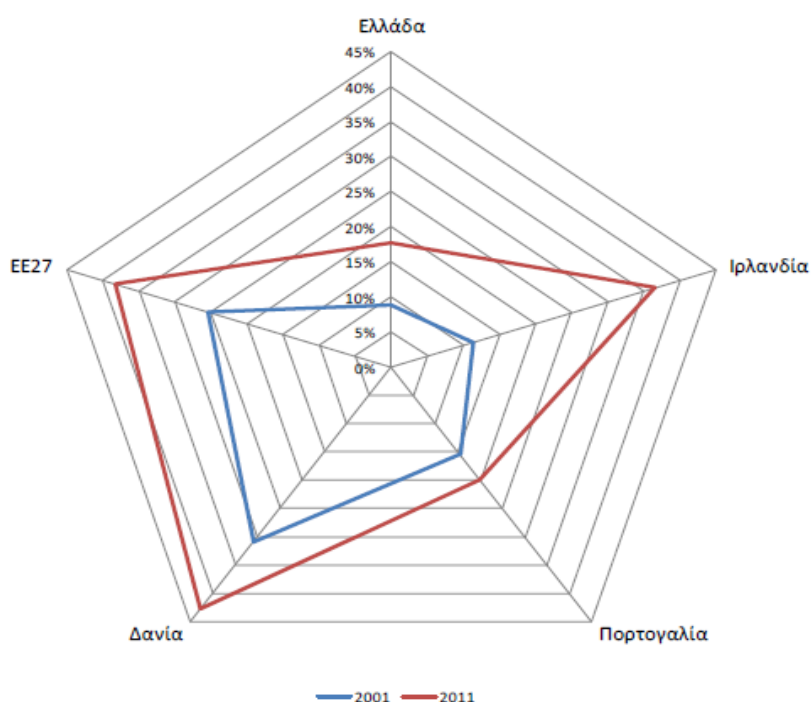
Η Ελλάδα οδηγεί σε χώρους υγειονομικής ταφής το διπλάσιο ποσοστό αστικών αποβλήτων από το μέσο όρο των 27 κρατών μελών της Ε.Ε. Η ισχυρή εξάρτηση από την υγειονομική ταφή σημαίνει ότι σημειώνεται συστηματικά υστέρηση αξιοποίησης καλύτερων επιλογών διαχείρισης αποβλήτων, όπως η επαναχρησιμοποίηση και η ανακύκλωση με δυσοίωνες προοπτικές. [6]



**Εικόνα 1.8 : Ποσοστό διάθεσης βιοαποδομήσιμων αστικών αποβλήτων σε ΧΥΤΑ στις χώρες της Ε.Ε. με βάση τη συνολική ποσότητα που είχε παραχθεί το 1995 [10]**

Αντίθετα, κράτη μέλη όπως η Δανία (αλλά και η Γερμανία, οι Κάτω Χώρες και η Σουηδία) διαθέτουν ολοκληρωμένα συστήματα αποκομιδής αποβλήτων και κατευθύνουν στους ΧΥΤ ποσοστό μικρότερο από το 5% των απορριμμάτων τους. Διαθέτουν καλώς αναπτυγμένα συστήματα ανακύκλωσης, επαρκή δυναμικότητα επεξεργασίας και παρουσιάζουν καλές επιδόσεις ως προς τα βιοαποδομήσιμα απόβλητα. Στην τυπική περίπτωση, συνδυάζουν νομικά, διοικητικά και οικονομικά μέσα για αποτελεσματική άσκηση των εθνικών πολιτικών διαχείρισης αποβλήτων.

Κράτη μέλη όπως η Πορτογαλία και η Ιρλανδία, ενώ κατευθύνουν στους ΧΥΤ ποσοστό μεγαλύτερο από το μέσο όρο των 27 κρατών μελών της Ε.Ε. (61,9% και 57,1%, αντίστοιχα για το 2009), έχουν καλύτερη επίδοση στην ανακύκλωση (Εικόνα 1.9) και συνεπέστερη εφαρμογή της κοινοτικής νομοθεσίας.



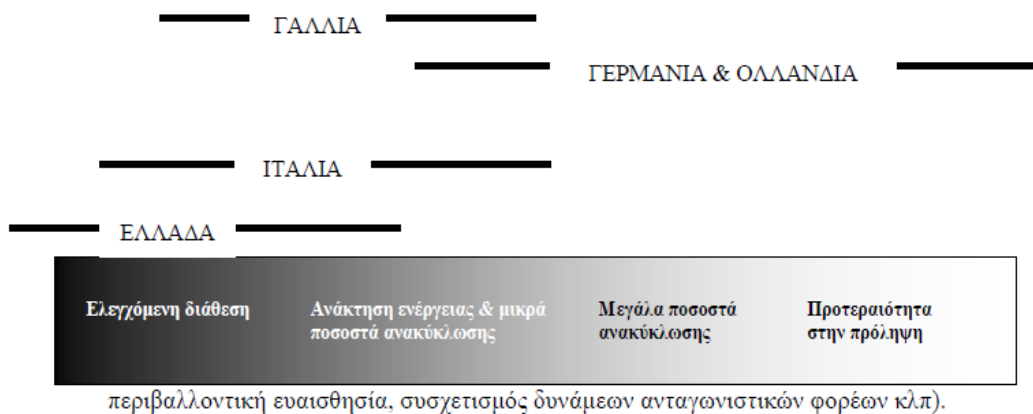
**Εικόνα 1.9: Συνολική ανακύκλωση αστικών αποβλήτων στην Ελλάδα, ΕΕ-27, Πορτογαλία, Ιρλανδία και Δανία το 2001 και το 2010 (%) [6] \***

\*Η συνολική ανακύκλωση περιλαμβάνει την ανακύκλωση υλικών, καθώς και την κομποστοποίηση και αναερόβια χώνευση των βιοαποβλήτων.

Από την εικόνα 1.9 , προκύπτει ο πίνακας 1.8 :

**Πίνακας 1.8 : Τάσεις διαχείρισης αποβλήτων σε χώρες της ΕΕ [2]**

Κυρίως ΧΥΤΑ	Κυρίως καύση	Ανακύκλωση	Κομποστοποίηση
Ρουμανία (99%)	Δανία (54%)	Ιρλανδία (37%)	Αυστρία (34%)
Βουλγαρία (94%)	Σουηδία (51%)	Βέλγιο (36%)	Ολλανδία (28%)
Μάλτα (92%)			
Λετονία (88%)			
Ελλάδα (82%)			

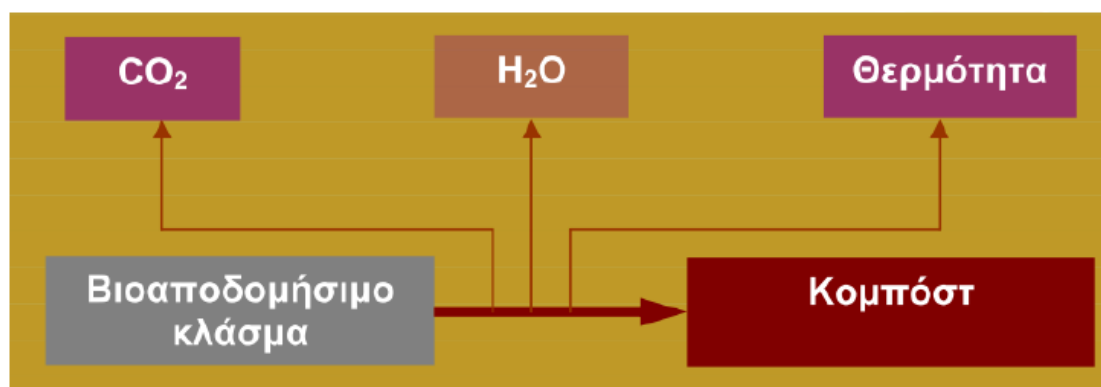


**Εικόνα 1.10 : Διαφορές πολιτικών διαχείρισης σε επιλεγμένες χώρες της ΕΕ <sup>[3]</sup>**

## 2. Θεωρητικό μέρος

### 2.1. Κομποστοποίηση - η διεργασία

Ο όρος κομποστοποίηση αναφέρεται στην αερόβια βιολογική διεργασία αποδόμησης των οργανικών αποβλήτων υπό ελεγχόμενες συνθήκες και τη σταδιακή μετατροπή τους σε ένα βιολογικά σταθεροποιημένο προϊόν ευρύτερα γνωστό ως κόμποστ. Ο ορισμός της κομποστοποίησης ως μιας «αερόβιας βιολογικής διεργασίας αποδόμησης» διαφοροποιεί την εν λόγω μέθοδο από άλλες τεχνικές διαχείρισης του οργανικού κλάσματος όπως είναι η αναερόβια χώνευση, η θερμική επεξεργασία και η υγειονομική ταφή. Με τον όρο «οργανικά απόβλητα» ορίζονται τα υλικά τα οποία δύναται να αποδομηθούν βιολογικά ενώ με τη φράση «ελεγχόμενες συνθήκες» η κομποστοποίηση διαφοροποιείται από τη βιολογική αποδόμηση που λαμβάνει χώρα στη φύση, καθώς ελέγχονται οι συνθήκες της θερμοκρασίας, της υγρασίας και του αερισμού κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Το τελικό προϊόν ορίζεται ως βιολογικά σταθεροποιημένο όταν δεν υπόκειται πλέον έντονη μικροβιακή δραστηριότητα, ενώ η τελική του χρήση εξαρτάται από ποικίλες φυσικοχημικές και βιολογικές παραμέτρους που προσδιορίζουν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του. Ενδεχόμενες χρήσεις του κόμποστ περιλαμβάνουν τη ρύθμιση εδαφών, την αποκατάσταση εδαφών την αξιοποίησή του ως φυσικό εδαφοβελτιωτικό κ.α. (Hogg et al., 2009; Κουλουμπής και Τσαντήλας, 2007; Epstein, 1997; Engeli et al., 1993; Carry et al., 1990; Toffey, 1990). Στην Εικόνα 2.1 παρουσιάζεται σχηματικά η διεργασία της κομποστοποίησης. Η κομποστοποίηση αποτελεί μια βιολογική διεργασία βασιζόμενη στις δραστηριότητες συγκεκριμένων βακτηρίων και μυκήτων (Bharadwaj, 1995). Κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης οι αερόβιοι μικροοργανισμοί καταναλώνουν οξυγόνο για την οξείδωση της οργανικής ουσίας διασπώντας σύνθετες οργανικές ενώσεις του υποστρώματος σε ενδιάμεσα προϊόντα και έπειτα σε απλούστερες ενώσεις παράγοντας CO<sub>2</sub>, ανόργανες μορφές αζώτου, νερό και θερμότητα ενώ επιτυγχάνεται μείωση του όγκου και της μάζας του υποστρώματος (Ipek et al., 2002; Epstein, 1997). Παράλληλα με τη βιοαποδόμηση της οργανικής ουσίας συντελούνται και διεργασίες χουμοποίησης οι οποίες περιλαμβάνουν τον πολυμερισμό ενώσεων από τους μικροοργανισμούς ή/και το σχηματισμό απλούστερων ενώσεων προερχόμενα από την αποσύνθεση της οργανικής ουσίας (Paredes et al., 2001). Επομένως, το βιοαποδομήσιμο οργανικό υλικό μετατρέπεται μέσω διαδοχικών μικροβιακών δραστηριοτήτων και βιοχημικών αντιδράσεων σε σταθερότερη οργανική ουσία η οποία έχει κοινά χημικά και βιολογικά χαρακτηριστικά με τις χουμικές ενώσεις (Εικόνα 2.1) (Pare et al., 1998).<sup>[8]</sup>



Εικόνα 2.1 : Απεικόνιση της διεργασίας της κομποστοποίησης [Μαλαμής 2011]

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

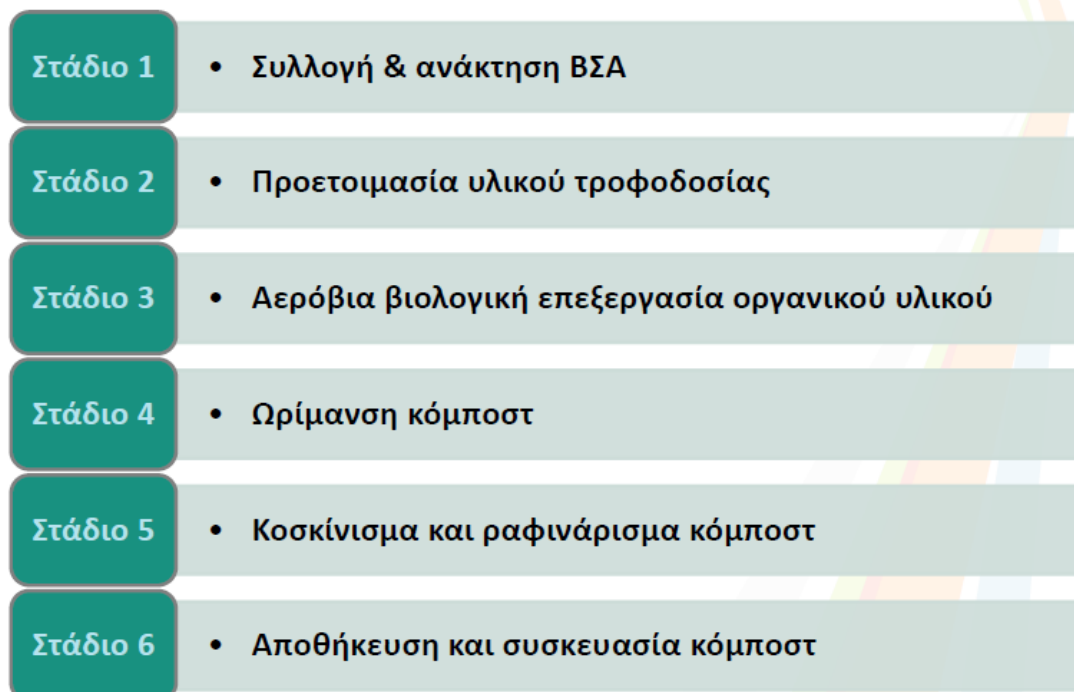
Η χημική σύσταση του compost αποτελείται κυρίως από δυσδιάσπαστες οργανικές ενώσεις, υγρασία, τέφρα (ανόργανες ενώσεις) και μικρές ποσότητες βιοαποδομήσιμων ενώσεων που δεν καταναλώθηκαν από τους μικροβιακούς πληθυσμούς (Brinton, 2000).

Συγκεκριμένα, τα βασικά συστατικά που συνθέτουν την ξηρή μάζα του compost, περιλαμβάνουν (Nova Scotia Final Report, 2001):

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

#### **Στάδια της ολοκληρωμένης διεργασίας της κομποστοποίησης**

Η κομποστοποίηση ως ολοκληρωμένη διεργασία διαχείρισης των Βιοαποικοδομήσιμων Στερεών Αποβλήτων (ΒΣΑ) χαρακτηρίζεται από μια σειρά αναπόσπαστων σταδίων τα βασικότερα από τα οποία παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.2.



**Εικόνα 2.2 : Τυπικά στάδια της ολοκληρωμένης διαχείρισης των βιοαποικοδομήσιμων στερεών αποβλήτων με τη μέθοδο της κομποστοποίησης (Μαλαμής 2011)**

Το πρώτο στάδιο αποτελεί την ανάκτηση του οργανικού κλάσματος των αποβλήτων το οποίο περιλαμβάνει την εποπτεία του συλλεχθέντος οργανικού υλικού και την απομάκρυνση ανεπιθύμητων συστατικών. Στα ανεπιθύμητα υλικά συμπεριλαμβάνονται ουσίες οι οποίες δεν είναι ζυμώσιμες καθώς και κάθε άλλου είδους ουσία που δύναται να επηρεάσει τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος. Η διεργασία αυτή διαφοροποιείται σημαντικά ανά είδος βιοαποδομήσιμου στερεού αποβλήτου. Ροές όπως είναι η ιλύς από αστικά υγρά απόβλητα, η κοπριά ζώων, τα δασοκομικά και γεωργικά απόβλητα έχουν σαφέστατα πιο ομοιόμορφη και ομοιογενής σύσταση συγκριτικά με τα οργανικά αστικά στερεά απορρίμματα, ο βαθμός ανάκτησής των οποίων εξαρτάται σημαντικά από την εκάστοτε πολιτική διαχείρισής τους (π.χ. διαλογή στην πηγή, σύστημα συλλογής κ.α.).

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

Το δεύτερο στάδιο της διεργασίας της κομποστοποίησης περιλαμβάνει την προετοιμασία του υλικού τροφοδοσίας για τη διαμόρφωση κατάλληλων φυσικοχημικών συνθηκών στο αρχικό υπόστρωμα για την ενίσχυση της απόδοσης της βιοαποδόμησης της οργανικής ουσίας. Η προετοιμασία αυτή δύναται να περιλαμβάνει μεταξύ άλλων (α) την επαρκή περιεκτικότητα του υποστρώματος σε θρεπτικά συστατικά (π.χ. άνθρακα, άζωτο, φώσφορο) με την προσθήκη ενός ή περισσότερων ζυμώσιμων οργανικών υλικών, (β) τη ρύθμιση του μεγέθους και του πορώδους του υποστρώματος για τη διευκόλυνση της διάχυσης του οξυγόνου στην οργανική μάζα (π.χ. τεμαχισμός, χρήση διογκωτικών υλικών), (γ) τη ρύθμιση της περιεχόμενης υγρασίας σε επιθυμητά επίπεδα και (δ) την ομογενοποίηση του οργανικού προς κομποστοποίηση υλικού.

Το τρίτο στάδιο αποτελεί το βιολογικό μέρος της κομποστοποίησης στο οποίο συντελείται η βιοαποδόμηση του οργανικού υλικού με τη χρήση κατάλληλων συστημάτων, όπως αυτά περιγράφονται αναλυτικότερα στην ενότητα 2.2. Έπειτα πραγματοποιείται η ωρίμανση του οργανικού υλικού και η περαιτέρω σταθεροποίησή του. Σε επόμενο στάδιο διεξάγεται το κοσκίνισμα και ραφινάρισμα του παραγόμενου κόμποστ για την απομάκρυνση μη επιθυμητών υλικών (π.χ. ογκώδη και αδρανή υλικά) ενώ παράλληλα επιτυγχάνεται το απαιτούμενο μέγεθος και η κατάλληλη υφή του κόμποστ για τις διαφορετικές απαιτήσεις ως προς την τελική του χρήση. Τέλος το κόμποστ αποθηκεύεται και συσκευάζεται καθώς η εποχική ζήτηση κόμποστ δεν συμπίπτει πάντοτε με τη διαθεσιμότητα σε οργανικά απόβλητα για επεξεργασία.

## 2.2 Επίδραση φυσικών/χημικών παραμέτρων στην κομποστοποίηση

### Παράμετροι ελέγχου και παρακολούθησης της κομποστοποίησης

Η επιτυχία ενός συστήματος βιοσταθεροποίησης μπορεί εύκολα να επηρεαστεί από τις φυσικές και χημικές παραμέτρους που επικρατούν σε αυτό και οι οποίες επιδρούν ουσιαστικά στη μικροβιακή δράση. Οι πιο καθοριστικές από αυτές είναι η θερμοκρασία, το ποσοστό της περιεχόμενης υγρασίας, ο αερισμός και η συγκέντρωση του οξυγόνου μέσα στο υλικό, το pH, η συγκέντρωση και η αναλογία των θρεπτικών στοιχείων και το μέγεθος των σωματιδίων του υλικού.

#### **Θερμοκρασία**

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

Η πρώτη φάση χαρακτηρίζεται από μια αρχική, σύντομης διάρκειας, ψυχρόφιλη φάση. Κατά την περίοδο αυτή οι μικροοργανισμοί του υποστρώματος αρχικά προσαρμόζονται στο νέο περιβάλλον προκειμένου οι πληθυσμοί των μικροοργανισμών να αναπτυχθούν και να εξαπλωθούν πλήρως σε όλο το υπόστρωμα. Αρχικά ο ρυθμός βιοαποδόμησης είναι χαμηλός διότι ο πληθυσμός των μικροοργανισμών δεν έχει ακόμη αναπτυχθεί σε ικανοποιητικό βαθμό. Γρήγορα όμως οι μικροοργανισμοί, κυρίως τα βακτήρια, προσβάλλουν απλές χημικές ενώσεις όπως μονοσακχαρίτες, δισακχαρίτες κ.α. με συνεπακόλουθη αύξηση της θερμοκρασίας (<40-45 °C) (Hellmann et al., 1997). Αυτές οι μεταβολές συνήθως επιφέρουν την άμεση ανάπτυξη άλλων ειδών μικροοργανισμών (μικροβιακή διαδοχή) και το πέρασμα από το ψυχρόφιλο στο μεσόφιλο στάδιο. Μεσόφιλα βακτήρια και μύκητες συνεχίζουν την αποδόμηση των οργανικών ενώσεων προτιμώντας την προσβολή οργανικών ενώσεων των οποίων ο λόγος C/N βρίσκεται πλησιέστερα μεταξύ 9-12. Η διάσπαση συνθετότερων οργανικών ενώσεων δίνει απλούστερες ενώσεις ενισχύοντας τη δραστηριότητα των μικροοργανισμών και αυξάνοντας περαιτέρω τη θερμοκρασία του υποστρώματος. Επισημαίνεται ότι η διάσπαση των οργανικών ενώσεων οφείλεται στα εξωκυτταρικά ένζυμα των μικροοργανισμών ενώ τα ενδοκυτταρικά ένζυμα ρυθμίζουν την ανάπτυξη, τον πολλαπλασιασμό τους και λοιπές βιολογικές δραστηριότητες τους. Την πρώτη μεσόφιλη φάση διαδέχεται το θερμόφιλο στάδιο της κομποστοποίησης κατά το οποίο οι μεσόφιλοι μικροοργανισμοί γίνονται λιγότερο ανταγωνιστικοί σε θερμοκρασίες άνω των 40-45°C (Jeong and Kim, 2001; Eklin and Kirchmann, 2000b; Hellmann et al., 1997) και αντικαθίστανται διαδοχικά από θερμόφιλους. Οι θερμόφιλοι μικροοργανισμοί, κυρίως βακτήρια και ακτινομήκυτες, βιοαποδομούν πιο σύνθετα μακρομόρια (π.χ. λίπη) (Miller, 1991) ενώ στη φάση αυτή παρουσιάζεται μέγιστη διάσπαση της οργανικής ουσίας καθώς και μέγιστα θερμοκρασιακά επίπεδα. Οι συνθήκες αυτές επικρατούν στο υπόστρωμα για όσο διάστημα υπάρχει διαθεσιμότητα θρεπτικών συστατικών και οργανικές ουσίες άμεσα διαθέσιμες προς κατανάλωση ενώ σημαντικός παράγοντας ως προς τη χρονική διάρκεια του θερμόφιλου σταδίου διαδραματίζουν οι διατάξεις ρύθμισης και ελέγχου κρίσιμων παραμέτρων της



κομποστοποίησης (π.χ. υγρασία, αερισμός, ανάδευση). Σε μετέπειτα στάδιο το υπόστρωμα υπόκειται σε μια δεύτερη μεσόφιλη φάση (<40-45 °C) η οποία χαρακτηρίζεται από σταδιακή μείωση της θερμοκρασίας λόγω της ελάττωσης της δραστηριότητας των μικροοργανισμών που προκύπτει από την εξάντληση της διαθέσιμης βιοαποδομήσιμης οργανικής ουσίας. Κατά συνέπεια οι θερμόφιλοι μικροοργανισμοί βαθμιαία θανατώνονται ενώ νέοι πληθυσμοί που αποτελούνται κυρίως από μύκητες, επικρατούν στο υπόστρωμα αποδομώντας τις πλέον δυσδιάσπαστες οργανικές ενώσεις (π.χ. κυτταρίνη) καθώς επίσης και διάφορες σύνθετες οργανικές ουσίες που μετασχηματίζονται σε απλούστερα σάκχαρα και άλλα ενδιάμεσα προϊόντα μεταβολισμού. Οι αντιδράσεις βιοξείδωσης της οργανικής ουσίας τελούνται με αργούς ρυθμούς με αποτέλεσμα η εκλυόμενη θερμότητα να μην ισοσκελίζει τις θερμικές απώλειες. Επομένως, το υπόστρωμα μεταβαίνει σταδιακά προς το τελικό ψυχρόφιλο στάδιο (στάδιο ωρίμανσης) όπου η θερμοκρασία σταδιακά τείνει να εξισωθεί με αυτή του περιβάλλοντος υποδηλώνοντας την ολοκλήρωση των διεργασιών της κομποστοποίησης (Cooperband, 2000). Αξίζει να σημειωθεί ότι στα πρώτα στάδια των διεργασιών (πρώτη μεσόφιλη, θερμόφιλη) επικρατεί κυρίως η αποδόμηση των σύνθετων οργανικών ενώσεων και λιγότερο η σύνθεση νέων σταθερότερων ενώσεων, ενώ στο δεύτερο μεσόφιλο στάδιο επικρατούν αντιδράσεις σύνθεσης σταθερότερων και συνθετότερων οργανικών ενώσεων (χουμικές ενώσεις κ.α.). (Μαλαμής 2011)

Η επίτευξη βέλτιστων θερμοκρασιακών επιπέδων είναι σημαντική για την αποτελεσματικότητα της διεργασίας της κομποστοποίησης (Finstein et al., 1986; Finstein and Morris, 1975) και συμβάλει σημαντικά στην ανάπτυξη υψηλών ρυθμών βιοαποδόμησης κατά την επεξεργασία του οργανικού κλάσματος (Miller, 1992). Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία το εύρος των βέλτιστων θερμοκρασιακών τιμών κατά το οποίο μεγιστοποιείται ο ρυθμός βιοαποδόμησης του οργανικού φορτίου κυμαίνεται από 43 έως 65°C (Εικόνα 2.3).

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

**Εικόνα 2.3 : Εύρος βέλτιστων θερμοκρασιακών τιμών ( °C) στο οποίο παρατηρείται μεγιστοποίηση του ρυθμού διάσπασης της οργανικής ουσίας**

Ενώ η ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών μπορεί να αναστείλει ή να επιβραδύνει τη διεργασία της κομποστοποίησης, υψηλές θερμοκρασίες είναι επιθυμητές για την καταστροφή των ανεπιθύμητων παθογόνων μικροοργανισμών που ενδεχομένως εμπεριέχονται στο υπόστρωμα. Η βασική παράμετρος για την εξασφάλιση της υγειονομοποίησης του υποστρώματος αφορά στη διάρκεια της θερμοκρασίας σε συγκεκριμένο επίπεδο (Hogg et al., 2002). Από διάφορους ερευνητές έχουν οριστεί ως ενδεδειγμένες σχέσεις μεταξύ της θερμοκρασίας και του χρόνου διάρκειάς της στο υπόστρωμα, κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης, για τη διασφάλιση της υγειονομοποίησης του τελικού προϊόντος. Ενδεικτικά οι Bollen et al. (1989), Lopez-Real and Foster (1985) και Bollen (1969) υποδεικνύουν ότι

Θερμοκρασία 65°C για τουλάχιστον τριάντα λεπτά είναι κρίσιμο όριο για την αδρανοποίηση ή/και την εξουδετέρωση των παθογόνων μικροοργανισμών. Οι de Bertoldi et al. (1988) προτείνουν θερμοκρασία ίση με 65°C για 3 ημέρες ενώ σύμφωνα με τους Κουλουμπής και Τσαντήλας (2007), η επίτευξη θερμοκρασίας τουλάχιστον 55°C για 3 ημέρες κατά την επεξεργασία της ιλύος μπορεί να θεωρηθεί ότι καταστρέφει κατά 99,9% τους παθογόνους μικροοργανισμούς που εμπεριέχονται στο αρχικό υπόστρωμα.

Πέρα από τη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν και εθνικές προδιαγραφές οι οποίες ρυθμίζουν τα επίπεδα θερμοκρασίας και τον απαιτούμενο χρόνο για τη μείωση των παθογόνων μικροοργανισμών στο τελικό προϊόν όπως παρουσιάζονται στην εικόνα 2.4 .

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

**Εικόνα 2.4 : Συνθήκες θερμοκρασίας-χρόνου κατά την κομποστοποίηση για την υγειονομοποίηση του κόμποστ προερχόμενο από ιλύ, σύμφωνα με τις εθνικές προδιαγραφές διαφόρων χωρών**

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

### **Υγρασία**

Η υγρασία είναι απαραίτητη για τη διεργασία της βιοαποδόμησης της οργανικής ουσίας, καθώς το μεγαλύτερο μέρος της πραγματοποιείται στα λεπτά υγρά στρώματα πάνω στην επιφάνεια των σωματιδίων. Σύμφωνα με τους Margesin et al. (2006) και Liang et al. (2003) η υγρασία του υποστρώματος μπορεί να θεωρηθεί βασικότερος ρυθμιστικός παράγοντας της κομποστοποίησης από ότι η θερμοκρασία επειδή επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό τη δράση των μικροοργανισμών. Οι Gajalakshmi and Abbasi (2008), Stentiford (1996) και Καπετάνιος (1990), ορίζουν ως βέλτιστο εύρος της αρχικής περιεχόμενης υγρασίας στο υπόστρωμα τιμές μεταξύ 50% και 70%, πρέπει όμως να τονιστεί ότι το εύρος αυτό εξαρτάται από τη φύση του

προς κομποστοποίηση υποστρώματος και πιο συγκεκριμένα από το πορώδες του υλικού (Nova Scotia, 2008; Diaz and Savage, 2007a; Manios, 2004; Μανιός, 1979). Παράγοντες όπως το μέγεθος και η διάταξη των οργανικών σωματιδίων καθώς και η δομική τους αντοχή διαμορφώνουν το πορώδες του οργανικού μίγματος και κατ' επέκταση το ιδανικό εύρος της περιεχόμενης υγρασίας στο αρχικό υπόστρωμα. Συνεπώς, οργανικό μίγμα με χαμηλό πορώδες απαιτεί ποσοστά περιεχόμενης υγρασίας μικρότερα από ότι ένα υπόστρωμα του οποίου το πορώδες είναι υψηλό (Diaz and Savage, 2007b).

Από τα αποτελέσματα κύκλων πειραμάτων που διεξήχθησαν στο εργαστήριο στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας της Σοφίας Μιχαλακίδη με τίτλο 'Συγκομποστοποίηση αγροτουπολειμάτων/κτηνοτροφικών αποβλήτων καθώς και οικιακών βιοαποβλήτων σε ημιβιομηχανικό κομποστοποιητή ' στη διάρκεια του 2016 , διαπιστώθηκε πως για την μέγιστη διάρκεια της θερμόφιλης φάσης και τη μέγιστη αύξηση της θερμοκρασίας του κόμποστ κατά τη φάση αυτή , απαιτείται διατήρηση της υγρασίας της σωρού μεταξύ 35% και 40 % .

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

Η περιεχόμενη υγρασία του υποστρώματος μειώνεται κατά τα εξελικτικά στάδια της κομποστοποίησης λόγω των υψηλών θερμοκρασιακών επιπέδων, του αερισμού και της ανάδευσης του υποστρώματος, συνθήκες οι οποίες ευνοούν την εξάτμιση και απομάκρυνση τμήματος της υγρασίας του οργανικού υλικού. Σημειώνεται ότι πολύ χαμηλή (<30%) και πολύ υψηλή περιεχόμενη υγρασία (>75%) κατά τη διάρκεια της θερμόφιλης φάσης της κομποστοποίησης αναστέλλει τις μικροβιακές δράσεις εξαιτίας της πρόωρης αφυδάτωσης και της διαμόρφωσης αναερόβιων συνθηκών αντίστοιχα (Gajalakshmi and Abbasi, 2008; de Bertoldi et al., 1983; Tiquia, et al., 2002, 1996a). Περίσσεια υγρασίας οδηγεί σε πλήρωση των πόρων του υποστρώματος με νερό, περιορίζοντας με αυτόν τον τρόπο τη μεταφορά και διάχυση του οξυγόνου στην οργανική μάζα. Αυτό διαδοχικά δημιουργεί αναερόβιες συνθήκες, έκλυση δυσάρεστων οσμών και ανεπιθύμητων προϊόντων (Qiao and Ho, 1997). Αντίθετα, εάν το υπόστρωμα δεν έχει την απαιτούμενη ποσότητα νερού, η ανάπτυξη και η αύξηση του πληθυσμού των μικροοργανισμών καθώς επίσης και ο ρυθμός αποσύνθεσης της οργανικής ουσίας μειώνονται ή σταματούν διαμορφώνοντας ένα τελικό προϊόν το οποίο είναι σταθεροποιημένο ως προς τις φυσικές του ιδιότητες αλλά όχι ως προς τις βιολογικές (Diaz and Savage, 2007a; de Bertoldi et al., 1983). Έχει αναφερθεί ότι τιμές περιεχόμενης υγρασίας μικρότερες από 10-15%, αναστέλλουν τη βιολογική δραστηριότητα (Diaz and Savage, 2007a; Diaz et al., 2002; EA, 2001). Αναφορικά με την περιεχόμενη υγρασία κατά τη

θερμόφιλη φάση της διεργασίας το εύρος των βέλτιστων τιμών που απαντάται στη επιστημονική κοινότητα κυμαίνεται από 40% έως 70%. Σε αυτό το εύρος τιμών ευνοείται η μικροβιακή δραστηριότητα και επιτυγχάνεται ο μέγιστος ρυθμός βιοαποδόμησης του οργανικού υποστρώματος. Στο τέλος της διεργασίας η περιεχόμενη υγρασία στο παραγόμενο κόμποστ συνίσταται να είναι σε χαμηλά επίπεδα προκειμένου να διασφαλιστεί η μείωση του όγκου και της μάζας του οργανικού υλικού, να αποφευχθεί η αποθήκευση, μεταφορά και πώληση περίσσειας νερού καθώς και για να επιτευχθεί μείωση της μικροβιακής δραστηριότητας.<sup>[8]</sup>

### **Αερισμός**

Ο αερισμός και κατ' επέκταση η παροχή οξυγόνου αποτελεί αναγκαίο και αναπόσπαστο μέρος για την εύρυθμη διεξαγωγή της διεργασίας της κομποστοποίησης καθώς διασφαλίζει την ανάπτυξη των αερόβιων μικροοργανισμών μέσω των αναπνευστικών και μεταβολικών διεργασιών τους (Barrington et al., 2003). Ο αερισμός κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης επιτυγχάνεται με ανάδευση ή με παροχή αέρα μέσω εμφύσησης ή αναρρόφησης ή με συνδυασμό των παραπάνω τρόπων. Η απουσία οξυγόνου στην οργανική μάζα έχει ως αποτέλεσμα τη διαμόρφωση αναγωγικών αντιδράσεων και ενδιάμεσων δύσοσμων προϊόντων (Diaz et al., 2002). Ο αερισμός επιτυγχάνει πολλαπλούς σκοπούς προκειμένου να διαμορφώσει αποδοτικότερες συνθήκες βιοαποδόμησης των οργανικών αποβλήτων όπως (α) η επαρκής παροχή οξυγόνου στο οργανικό προς κομποστοποίηση μίγμα, (β) ο έλεγχος της θερμοκρασίας του συστήματος και (γ) η απομάκρυνση και ο έλεγχος της υγρασίας καθώς και των αερίων εκπομπών (π.χ. CO<sub>2</sub>). Επομένως, η θερμοκρασία, η υγρασία και ο αερισμός του υποστρώματος αποτελούν παραμέτρους που αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους καθώς η μικροβιακή δραστηριότητα και κατ' επέκταση οι υψηλές θερμοκρασίες απαιτούν ορισμένο επίπεδο περιεχόμενης υγρασίας ώστε οι πόροι και τα διάκενα μεταξύ των σωματιδίων του υποστρώματος να επαρκούν για τη διάχυση του αέρα μέσα από αυτά. Στα πρώτα στάδια της κομποστοποίησης όπου πραγματοποιείται η αφομοίωση των άμεσα διαθέσιμων οργανικών ενώσεων, με συνεπακόλουθη αύξηση της θερμοκρασίας, ο ρυθμός κατανάλωσης του οξυγόνου είναι μέγιστος ενώ στη συνέχεια με την εξάντληση των οργανικών αυτών ενώσεων του υποστρώματος η απαίτηση οξυγόνου από τους αερόβιους μικροοργανισμούς μειώνεται σταδιακά (ΕΑ, 2001). Σημαντικοί παράγοντες ως προς την αποτελεσματικότητα του αερισμού και της διάχυσης του οξυγόνου στην οργανική μάζα αποτελούν η περιεκτικότητα του υποστρώματος σε υγρασία καθώς και οι φυσικές ιδιότητές του ούτως ώστε να διασφαλίζεται αφενός η ελεύθερη κίνηση του αέρα στο δίκτυο του διαμορφωμένου πορώδους και αφετέρου η διαφυγή των αερίων που εκλύονται κατά τις αντιδράσεις. (Μαλαμής 2011)

Σύμφωνα με τους Alexander et al. (2002) και Wesner (1978), οι βέλτιστες τιμές περιεκτικότητας σε οξυγόνο στο υπόστρωμα κυμαίνονται μεταξύ 5 και 15% v/v ενώ η επίτευξη μεγαλύτερων τιμών με παρατεταμένο αερισμό ή ανάδευση του υποστρώματος ενδέχεται να μειώσουν τη θερμοκρασία στο σύστημα όπως σημειώνουν οι Gajalakshmi and Abbasi (2008) και Shammass and Wang (2007). Επιπλέον, οι Mena et al. (2003) προτείνουν ως ιδανική περιεκτικότητα του υποστρώματος σε οξυγόνο τιμές από 10-16% v/v θεωρώντας ότι αυτό το εύρος τιμών επαρκεί για τη διατήρηση των αερόβιων συνθηκών. Παρότι έχει παρατηρηθεί ότι σε χαμηλά ποσοστά οξυγόνου, έως 0.5% v/v, επικρατούν αερόβιες συνθήκες (Gajalakshmi and Abbasi, 2008), ο Gaur (2000) συνιστά τη διατήρηση των επιπέδων του οξυγόνου σε τιμές ίσες ή υψηλότερες του 10% v/v καθόλη τη διεργασία της κομποστοποίησης ενώ ο Poincelot (1977) προτείνει ως ελάχιστη τιμή ίση με 5% v/v.<sup>[8]</sup>

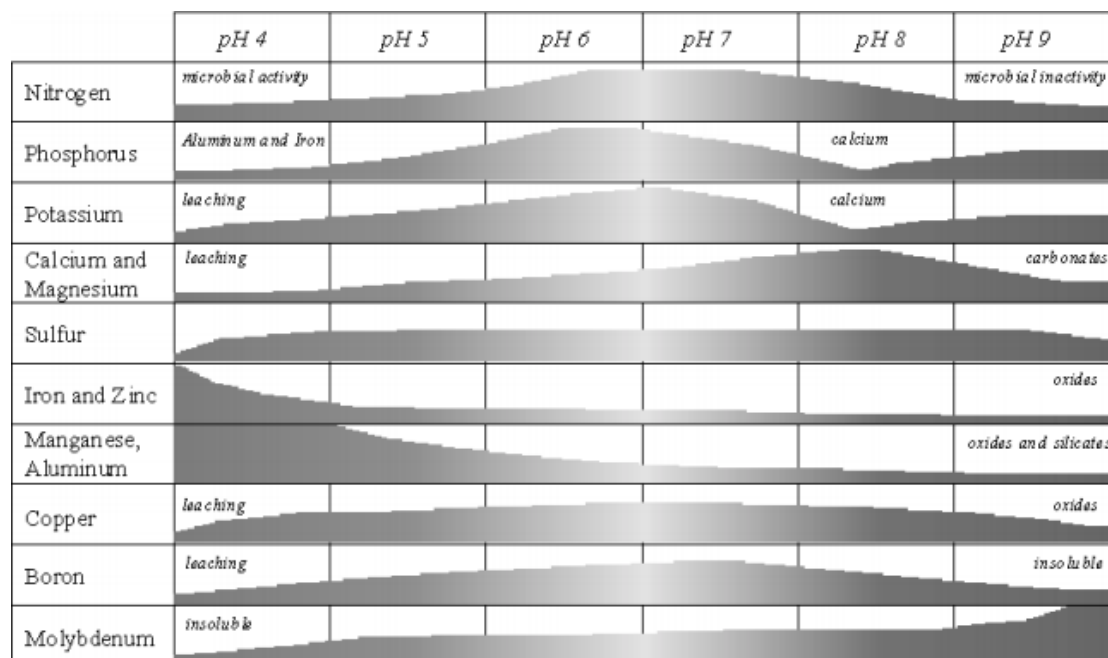
## pH

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

Οι Nakasaki et al. (1993) ερεύνησαν την επίδραση διαφορετικών τιμών pH στους μικροοργανισμούς κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης και διαπίστωσαν ότι το βέλτιστο εύρος τιμών είναι μεταξύ 7.0 και 8.0. Άλλοι ερευνητές ορίζουν ως ιδανικές συνθήκες αναφορικά με το pH, μεταξύ 6.5 και 8.5 (Μανιός και Μανιαδάκης, 2001; Gaur, 2000; Hoitink and Kuter, 1986), ενώ ο Bharadwaj (1995) συνιστά εύρος τιμών μεταξύ 6.5 και 7.5. Οι Diaz and Savage (2007b) αναφέρουν ότι οι θεωρητικά βέλτιστες συνθήκες pH για τη μικροβιακή δραστηριότητα και αποδοτικότητα κυμαίνεται από 6.0 έως 7.5, αλλά η πρακτική εμπειρία επιβεβαιώνει ότι τιμές μεταξύ 5.5-8.0 στο αρχικό υπόστρωμα δεν υποθάλπουν την ομαλή εξέλιξη της βιοαποδόμησης της οργανικής ουσίας. Επομένως, η διεργασία της κομποστοποίησης είναι αποτελεσματική σε ένα ευρύ φάσμα τιμών του pH στο οποίο κυμαίνεται η πλειονότητα των προς επεξεργασία οργανικών αποβλήτων. Σύμφωνα με τους Bernal et al. (2009) η σημαντικότητα του pH κατά τη διεργασία έγκειται κυρίως ως προς τον έλεγχο της ισορροπίας  $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$  στο υπόστρωμα και τη ρύθμιση των απωλειών αζώτου εξαιτίας της πτητικότητας της παραγόμενης αμμωνίας σε αλκαλικό περιβάλλον .<sup>[8]</sup>

Η τιμή του pH επηρεάζει πολλούς παράγοντες στο κόμποστ, συμπεριλαμβανομένης της διαθεσιμότητας θρεπτικών και τοξικών ουσιών, όπως επίσης και τις δραστηριότητες και τη φύση μικροβιακών πληθυσμών. Το pH επηρεάζει τη διαδικασία κομποστοποίησης επιδρώντας στους μικροβιακούς πληθυσμούς και ελέγχοντας τη διαθεσιμότητα θρεπτικών συστατικών σε μικρόβια. Για τα περισσότερα βακτήρια, το ιδανικό pH κυμαίνεται μεταξύ 6.0 και 7.5, ενώ το ιδανικό pH για τους μύκητες και τους ακτινομύκητες είναι μεταξύ 5.5 και 8.0. Μια τιμή pH πιο πάνω ή κάτω από το καθορισμένο βέλτιστο θα μειώσει τη μικροβιακή δραστηριότητα και θα παρεμποδίσει μικροβιακές διεργασίες. Επί προσθέτως, το pH είναι ενδεικτικό της ποιότητας του κόμποστ και ένα χρήσιμο εργαλείο για την αξιολόγηση της πιθανής εφαρμογής του. Το pH δείχνει αν ο χρήστης χρειάζεται να τροποποιήσει το κόμποστ

του για τη ρύθμιση του pH, κατά τη χρήση του σε μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Δείχνει τη σταθερότητα του κόμποστ, και τη φυτοτοξικότητα, και είναι δείκτης κινητικότητας και διαθεσιμότητας μετάλλων και θρεπτικών μέσα στο κόμποστ. Υψηλό pH σε χώμα ή κόμποστ, μειώνει τη μεταφορά καδμίου και άλλων μετάλλων στη τροφική αλυσίδα και τη πιθανή φυτοτοξικότητα λόγω μετάλλων. Η εικόνα 2.5 δείχνει τη σχέση μεταξύ pH και διαθεσιμότητας θρεπτικών στα φυτά.



**Εικόνα 2.5 :** Σχετική διαθεσιμότητα των απαιτούμενων θρεπτικών στα φυτά σε διάφορες τιμές pH

Το πάχος κάθε μπάρας μεταβάλλεται με το pH, και αντιπροσωπεύει τη σχετική διαθεσιμότητα των απαιτούμενων θρεπτικών που αναγράφονται στα αριστερά. Τα μικρά γράμματα στα τέλη κάθε μπάρας αναγράφουν τον κυρίαρχο λόγο για τον οποίο παρατηρείται μείωση της διαθεσιμότητας των θρεπτικών.

- Το άζωτο είναι διαθέσιμο για τιμές pH μεταξύ 6.0 και 8.0, αλλά μειώνεται σε χαμηλότερα ή υψηλότερα pH καθώς μειώνεται και η μικροβιακή δραστηριότητα.
- Ο φώσφορος μειώνεται σε χαμηλά pH (<5) καθώς δεσμεύεται με αλουμίνιο και σίδηρο, ενώ σε υψηλότερα pH (<8) μειώνεται καθώς δεσμεύεται με ασβέστιο.
- Οι ιδανικές τιμές pH για το φώσφορο και το Κάλιο είναι παρόμοιες. Σε αντίθεση με το φώσφορο, η διαλυτότητα του καλίου αυξάνει με μειούμενο pH, αλλά μπορεί να είναι λιγότερο διαθέσιμο σε χαμηλά pH εξαιτίας φαινομένου έκπλυσης (leaching).
- Οι διαλυτότητες του ασβεστίου, μαγνησίου, χαλκού και βορίου αυξάνουν με τη μείωση του pH, αλλά μπορεί να είναι λιγότερο διαθέσιμα σε χαμηλά pH εξαιτίας φαινομένου έκπλυσης (leaching). Αυτά τα μέταλλα γίνονται αδιάλυτα σχηματίζοντας ανθρακικά άλατα και οξείδια σε υψηλά pH. <sup>[14]</sup>

### Φυσικές ιδιότητες υποστρώματος

Οι φυσικές ιδιότητες του προς επεξεργασία υποστρώματος είναι μια ακόμη παράμετρος η οποία επηρεάζει τη διεργασία της κομποστοποίησης επιδρώντας στις συνθήκες αερισμού και

διάχυσης του οξυγόνου στην οργανική μάζα. Στις ιδιότητες αυτές περιλαμβάνονται το πορώδες, το μέγεθος, η δομή και η υφή των σωματιδίων του υποστρώματος. Η μικροβιακή δράση πραγματοποιείται κυρίως στην επιφάνεια κάθε σωματιδίου του υποστρώματος καθώς το οξυγόνο διαχέεται ελεύθερα ως αέριο διαμέσου των ελεύθερων πόρων (αεροθυλάκων) και δυσκολότερα μέσω των υγρών και στερεών τμημάτων των σωματιδίων (EA, 2001). Επομένως, το πορώδες συχνά ταυτίζεται με την αέρια φάση και ειδικότερα με τους αεροθύλακες που σχηματίζονται μεταξύ διαδοχικών και επάλληλων σωματιδίων του οργανικού υλικού. Ως εκ τούτου, το μέσο μέγεθος των σωματιδίων αποτελεί κρίσιμη φυσική παράμετρο που διέπει την ταχύτητα των αντιδράσεων βιοξείδωσης σε κάθε εξελικτικό στάδιο της κομποστοποίησης. Σωματίδια με μεγάλο εμβαδόν επιφάνειας ανά μονάδα όγκου διαμορφώνουν ένα υπόστρωμα πιο ομογενοποιημένο βελτιώνοντας τις μονωτικές ιδιότητές του και επιτρέποντας την αύξηση του ρυθμού αποδόμησης της οργανικής ουσίας καθώς και τη διατήρηση επιθυμητών θερμοκρασιακών επιπέδων (O'Leary and Walsh, 1995). Πρέπει όμως να επισημανθεί ότι το εμβαδόν επιφάνειας ανά μονάδα όγκου των σωματιδίων πρέπει να εξασφαλίζει επαρκή επιφάνεια για τη μικροβιακή δράση αλλά ταυτόχρονα να διαμορφώνει το απαραίτητο μέγεθος των διάκενων για την απαιτούμενη διάχυση του οξυγόνου λαμβάνοντας υπόψη ότι συντελείται βαθμιαία μείωση του μεγέθους των σωματιδίων της οργανικής ουσίας λόγω των διεργασιών αποδόμησης (Γιδαράκος, 2007). Επομένως, σωματίδια με πολύ μικρό μέγεθος δύναται να αποτρέψουν τη διέλευση του οξυγόνου από το υπόστρωμα διαμορφώνοντας μη επιθυμητές αναερόβιες συνθήκες. Σύμφωνα με τους Diaz et al. (2002), μεγέθη σωματιδίων μεταξύ 10mm και 50mm επιτυγχάνουν τα βέλτιστα αποτελέσματα. Εντούτοις, σε ορισμένες τεχνικές κομποστοποίησης οι οποίες δεν περιλαμβάνουν συστήματα ανάδευσης, όπως στην περίπτωση των αεριζόμενων στατικών σωρών, απαιτείται υψηλότερη δομική αντοχή των σωματιδίων προκειμένου να ανταπεξέλθουν στις συνθήκες τόσο της βαρυτικής πίεσης υπερκείμενων στρωμάτων οργανικού υλικού όσο και της βιοαποδόμησης της οργανικής μάζας (Diaz and Savage, 2007a). Για τέτοιου είδους συστήματα τα μεγέθη των σωματιδίων πρέπει να είναι μεγαλύτερα από 50mm (Diaz et al., 2002; EA, 2001; Gaur, 2000). Στις περισσότερες περιπτώσεις η ρύθμιση των φυσικών ιδιοτήτων του υποστρώματος επιτυγχάνεται με διεργασίες όπως ο θρυμματισμός, η κοκκοποίηση και ο τεμαχισμός καθώς και με τη επιλογή και την ανάμιξη κατάλληλων πρώτων υλών. Οι πρώτες ύλες οι οποίες χρησιμοποιούνται ως οργανικά πρόσθετα στη διεργασία της κομποστοποίησης για τον έλεγχο των φυσικών αυτών ιδιοτήτων καλούνται διογκωτικά υλικά (bulking agents). Η χρήση των διογκωτικών υλικών συνίσταται στην υδατική απορροφητική τους ικανότητα, στη διασφάλιση της απαραίτητης δομής και του πορώδους στο μίγμα ενώ επιπρόσθετα αποτελούν πηγή άνθρακα για τη ρύθμιση της αναλογίας C/N στο αρχικό υπόστρωμα (Seo et al., 2004; Eklind and Kirchmann, 2000a; Schaub and Leonard, 1996; Haug, 1980). Στις περισσότερες περιπτώσεις τα διογκωτικά υλικά προέρχονται από υπολείμματα φυτικών καλλιεργειών, από υπολείμματα και απόβλητα δασοκομίας καθώς και από υπολείμματα της βιομηχανίας και βιοτεχνίας τροφίμων. Ενδεικτικά διογκωτικά υλικά όπως αυτά απαντώνται συχνά στην βιβλιογραφία αποτελούν το ροκανίδι, το πριονίδι, τα φύλλα, τα κλαδιά και οι φλοιοί δέντρων, τα υπολείμματα από καλλιέργειες δημητριακών, το άχυρο, ο φλοιός ρυζιού κ.α. (Adhikari et al., 2009a; Bernal et al., 2009; Chang et al., 2006; Pagans et al., 2006; Hong and Park, 2005; Manios, 2004; Eklind and Kirchmann, 2000a; Crobe, 1994; Verville and Seekins, 1993; Riggle, 1989). Η επιλογή των υλικών αυτών στη διεργασία της κομποστοποίησης γίνεται συνήθως με βάση τη διαθεσιμότητα και την γειννίαση με τη μονάδα επεξεργασίας των οργανικών αποβλήτων (Schaub and Leonard, 1996).

## Θρεπτικά συστατικά

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

Ο άνθρακας είναι το στοιχείο το οποίο καλύπτει τις ενεργειακές απαιτήσεις των μικροοργανισμών, αλλά ταυτόχρονα ένα μέρος του καθίσταται ως βασικό δομικό συστατικό τους. Το άζωτο αποτελεί αναπόσπαστο στοιχείο των πρωτεϊνών, των νουκλεϊκών οξέων, των αμινοξέων, των ενζύμων και των συνενζύμων που είναι απαραίτητα για τη μικροβιακή ανάπτυξη των κυττάρων αποτελώντας το 50% της ξηρής τους μάζας (Gajalakshmi and Abbasi, 2008). Επομένως, η θρεπτική ισορροπία στο υλικό τροφοδοσίας μπορεί να προσδιοριστεί κυρίως με το λόγο του άνθρακα προς το άζωτο (C/N) όπως επισημαίνεται από τους Bernal et al. (2009), εκφράζοντας ουσιαστικά την αναλογία των ατόμων άνθρακα προς τα άτομα αζώτου στο πρότυπο μόριο του αποβλήτου. Η σχέση C/N για τους μικροοργανισμούς έχει αναφερθεί ότι κυμαίνεται μεταξύ 9 έως 12 (Zucconi and de Bertoldi, 1987) ενώ σύμφωνα με τον Alexander (1977) οι μικροοργανισμοί κατά την αποδόμηση των οργανικών ενώσεων αφομοιώνουν το 1/3 περίπου του μεταβολιζόμενου άνθρακα ενώ το υπόλοιπο απελευθερώνεται ως CO<sub>2</sub>. Συνεπώς, προκύπτει ότι η θεωρητικά βέλτιστη αναλογία C/N στο αρχικό υπόστρωμα είναι μεταξύ 27 έως 36. Πράγματι, οι τιμές που αναφέρονται ως βέλτιστες από διάφορους ερευνητές είναι μεταξύ 25 και 35 μέρη άνθρακα για κάθε μέρος αζώτου (Gaur, 2000; Golueke, 1992; Bishop and Godfrey, 1983). Επιπλέον, έχει παρατηρηθεί ότι σε υψηλές τιμές λόγου C/N στο υπόστρωμα (C/N>35), απαιτούνται διαδοχικοί βιοχημικοί κύκλοι για την οξείδωση της περίσσειας του άνθρακα, έως ότου επιτευχθεί ικανοποιητικός λόγος C/N για το μεταβολισμό των μικροοργανισμών (Bernal et al., 1998c; Verdonck, 1988). Αντίθετα, αν οι αρχικές τιμές του λόγου C/N είναι χαμηλές (C/N<10) διαμορφώνονται συνθήκες περίσσειας αζώτου με αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών του, κυρίως υπό μορφή αμμωνίας, ειδικά όταν συντρέχουν ευνοϊκά και άλλες παράμετροι όπως υψηλές τιμές pH και θερμοκρασίας για τη ρύθμιση επιθυμητών λόγων C/N απαιτείται η κατάλληλη ανάμιξη οργανικών αποβλήτων ώστε οργανικά υλικά με υψηλή περιεκτικότητα σε άζωτο να αντισταθμίζονται με οργανική ουσία της οποίας η περιεκτικότητα να είναι υψηλότερη σε άνθρακα και αντίστροφα.

Η μεταβολή του λόγου C/N κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης εξαρτάται από την εξέλιξη του άνθρακα, του αζώτου και των ανόργανων μορφών του (π.χ. NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) κατά τη διάσπαση τη οργανικής ουσίας του υποστρώματος.

Επομένως, η αναλογία C/N διαμορφώνεται από:

- το ρυθμό κατανάλωσης του άνθρακα και του αζώτου κατά τη διάσπαση των οργανικών μακρομορίων του υποστρώματος,
- το βαθμό απωλειών άνθρακα κατά τις βιοξειδωτικές αντιδράσεις, υπό μορφή αερίων εκπομπών (π.χ. CO<sub>2</sub>) και
- το βαθμό απωλειών αζώτου που προκύπτουν λόγω της πτητικότητας της αμμωνίας, των διεργασιών της απονιτροποίησης αλλά και της εκχύλισης μέσω των στραγγισμάτων.

Σε γενικά πλαίσια οι απώλειες άνθρακα και αζώτου κατά την αερόβια βιοαποδόμηση της οργανικής ουσίας είναι σημαντικές με πιο σύνθητες φαινόμενο οι απώλειες του άνθρακα να υπερτερούν έναντι αυτών του αζώτου με αποτέλεσμα τη μείωση της αναλογίας C/N στο τελικό προϊόν (Goyal et al., 2005).<sup>[8]</sup>



Ομοίως, το κάλιο και ο φώσφορος είναι απαραίτητα συστατικά για την κυτταρική διαίρεση και το μεταβολισμό. Οι μικροοργανισμοί χρειάζονται επίσης ιχνοστοιχεία, όπως βόριο, κοβάλτιο, σίδηρο, μαγνήσιο, μολυβδαίνιο, σελήνιο, νάτριο και ψευδάργυρο. Ακόμα και αν υπάρχουν τα απαραίτητα θρεπτικά σε επαρκείς ποσότητες, η χημική τους σύσταση μπορεί να μην τα καθιστά διαθέσιμα σε ορισμένους ή όλους τους μικροοργανισμούς. Η ικανότητα της χρησιμοποίησης των οργανικών ενώσεων εξαρτάται από τα ένζυμα του κάθε μικροοργανισμού.<sup>[11]</sup>

### 2.3 Μικροβιολογία κομποστοποίησης

Η βιοσταθεροποίηση είναι μία κατά βάση δυναμική διεργασία που επιτυγχάνεται από μία γρήγορη εναλλαγή μικτών μικροβιακών πληθυσμών. Συνεπώς η μελέτη της βιοποικιλότητας καθώς και του ρόλου τους είναι ουσιαστική τόσο για το σωστό σχεδιασμό όσο και για τη σωστή λειτουργία ενός συστήματος βιοσταθεροποίησης [van Heerden et al., 2002].

Οι μικροοργανισμοί που απαιτούνται για τη βιοσταθεροποίηση των αποβλήτων βρίσκονται παντού στο φυσικό περιβάλλον. Υπάρχουν στα υλικά που πρόκειται να κομποστοποιηθούν καθώς και στο νερό, στον αέρα, στο έδαφος κ.α.. Όλες αυτές οι πηγές παρέχουν μία μεγάλη ποικιλία μικροοργανισμών καθιστώντας σχεδόν απίθανη την ανάγκη προσθήκης άλλων εξειδικευμένων στη κομποστοποίηση. Εξαιρέση αποτελούν κάποιες λίγες εργασίες όπου επέλεξαν να εμβολιάσουν μίγμα αστικών στερεών απορριμμάτων. Τα αποτελέσματα έδειξαν μια σαφέστατη βελτίωση των ποσοστών αποδόμησης καθώς και επίσπευση του σταδίου της ωρίμανσης. [Wei et al., 2007]

Ο μικροβιακός πληθυσμός αποτελείται κυρίως από βακτήρια, ακτινομύκητες και μύκητες, ενώ υπάρχουν και οι ασπόνδυλοι οργανισμοί που εμφανίζονται σε μεγάλης κλίμακας συστήματα λιπασματοποίησης. Θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι οι ακτινομύκητες, αν και ανήκουν στην ευρύτερη κατηγορία των βακτηριδίων, προκειμένου για τη βιοσταθεροποίηση, μελετώνται ξεχωριστά λόγω του ιδιαίτερου ρόλου τους στη διεργασία [Tuomela et al., 2000, Fourti et al., 2008]. Η πλειοψηφία των μικροοργανισμών που είναι υπεύθυνοι για τη βιοσταθεροποίηση και την παραγωγή του τελικού προϊόντος είναι αερόβιοι. Η ύπαρξη αναερόβιων ή προαιρετικά αναερόβιων παρατηρείται στην περίπτωση του έντονου σχηματισμού συσσωματωμάτων στη μάζα του μίγματος [Watanabe et al., 2008].<sup>[11]</sup>

#### **Βακτήρια**

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

βακτηρίων που δρουν κατά τη βιοσταθεροποίηση, το μέσο μέγεθος των κυψελών τους κυμαίνεται περί τα 2000 nm (Aliss et al., 2005).<sup>[8]</sup>

Λόγω του μικρού τους μεγέθους, ο λόγος του εμβαδού της επιφάνειας προς τον όγκο τους είναι πολύ μεγάλος και επομένως επιτρέπει τη γρήγορη μεταφορά των διαλυτών υποστρωμάτων μέσα στο κύτταρο. Έτσι, οι μικροοργανισμοί αυτοί μπορούν συνήθως να επικρατήσουν έναντι των μεγαλύτερων [Haug, 1993].

Γενικά, τα βακτήρια είναι ιδιαίτερα προσαρμόσιμα και πολυποίκιλα και γι' αυτό επιβιώνουν ακόμα και σε περιβαλλοντικές συνθήκες που αλλάζουν συνεχώς, όπως συμβαίνει κατά τη βιοσταθεροποίηση. Κάποια βακτήρια, όταν ο συνθήκες παύουν να είναι ευνοϊκές για αυτά, σχηματίζουν σπόρια. Στη μορφή αυτή παρουσιάζουν «βιοχημική ευλυγισία», έχουν χαμηλούς μεταβολικούς ρυθμούς, ενώ είναι ανθεκτικά στη ζέστη, στο κρύο, στην έλλειψη θρεπτικών, στην ακτινοβολία ή στην ξηρασία. Όταν οι συνθήκες γίνουν ευνοϊκές τα βακτήρια γίνονται πάλι ενεργά [Atlas & Bartha, 1998].

Στη διεργασία της βιοσταθεροποίησης τα βακτήρια έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση στη διαδικασία της αποσύνθεσης και της παραγωγής θερμότητας έναντι των μυκήτων και των ακτινομυκήτων [Balmer, 2004]. Είναι τα πρώτα που αναλαμβάνουν δράση στο υλικό χρησιμοποιώντας γρήγορα τα εύκολα αφομοιώσιμα θρεπτικά συστατικά της αποσύνθεσης (πρωτεΐνες, υδατάνθρακες και σάκχαρα) και ευδοκιμούν σε όλα τα στάδια της βιοσταθεροποίησης [Miller, 1996]. Στις μέχρι σήμερα επιστημονικές μελέτες αναφέρεται ένας πολύ μεγάλος αριθμός βακτηρίων που έχει απομονωθεί από διαφορετικά περιβάλλοντα λυψασματοποίησης. Παρόλα αυτά, οι σχετικοί με τη μικροβιολογία της εστιάζουν το ενδιαφέρον τους σε κάποια συγκεκριμένα γένη που σχετίζονται με την υγιεινή καθώς και σε κάποια θερμόφιλα.

Αναλυτικότερα, με την έναρξη της διεργασίας αναπτύσσεται ένα ευρύ φάσμα βακτηρίων που οδηγεί στη γρήγορη ανύψωση της θερμοκρασίας. Στο στάδιο αυτό δε φαίνεται να υπάρχουν κάποια ιδιαίτερα βακτήρια βιοσταθεροποίησης παρά μόνο αυτά που εισέρχονται στο σύστημα μέσω της τροφοδοσίας. Άρα, ο έντονα ετερογενής αυτός πληθυσμός σχετίζεται άμεσα με το είδος του απόβλητου που επεξεργάζεται [Finstein & Morris, 1975]. Στη συνέχεια, καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία στο σύστημα, παρατηρείται αλλαγή στο μικροβιακό πληθυσμό και εμφανίζονται πλέον συγκεκριμένα θερμόφιλα βακτήρια. Τα πιο συχνά απαντώμενα είναι τα είδη του γένους *Bacillus*, όπως π.χ. τα *B. subtilis*, *B. stearothermophilus*, *B. circulans*, *B. licheniformis*, . Η ποικιλία των βακτηρίων που ανήκουν στο γένος αυτό είναι μεγάλη όταν η θερμοκρασία στο υλικό κυμαίνεται από 50°C έως 55°C αλλά μειώνεται δραστικά σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 60°C. Όταν οι συνθήκες γίνονται αντίξοες για αυτούς, οι βάκιλλοι επιβιώνουν σχηματίζοντας σπόρια [Strom, 1985(a), Miyatake & Iwabuchi, 2005]. Η περαιτέρω άνοδος της θερμοκρασίας σε τιμές μεγαλύτερες των 60°C οδηγεί στην επικράτηση κάποιων άλλων θερμόφιλων βακτηρίων που ανήκουν στο γένος *Thermus*. Τα είδη αυτού φαίνεται να προσαρμόζονται καλύτερα σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες οι οποίες πολλές φορές ξεπερνούν και τους 80°C [Beffa et al., 1996].<sup>[11]</sup>

### **Ακτινομύκητες**

Οι ακτινομύκητες κάνουν την εμφάνισή τους στα αρχικά στάδια της μεσόφιλης και κατά την ψυχρόφιλη φάση. Η δράση τους έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία φαιού χρώματος στην εξωτερική επιφάνεια της σωρού. Επίσης, προσδίδουν στο τελικώς παραγόμενο compost την ευχάριστη οσμή του νοτισμένου χώματος. Οι ακτινομύκητες αποδομούν κυρίως τις

οργανικές χημικές ενώσεις που συγκροτούν τα ξυλώδη υλικά της σωρού και εμφανίζονται αρκετά ανθεκτικοί κυρίως στις χαμηλές θερμοκρασίες (Polomski, 2003). Οι θερμόφιλοι ακτινομύκητες αναπτύσσονται και δρουν αποτελεσματικά σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται μεταξύ 30 και 60 °C , για σωρούς οργανικού υλικού όπου επικρατούν σχετικά υψηλά επίπεδα υγρασίας. Επιπλέον, αποτελούν δείκτες για τη διάχυση των θερμόφιλων συνθηκών στα επιμέρους τμήματα της σωρού, καθώς η απουσία τους καταδεικνύει την ύπαρξη θερμόφιλων συνθηκών.

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

- *Saccharopolyspora (Faenia) rectivirgula*,
- *Saccharomonospora* spp. και ιδιαίτερα
  - ✓ *Saccharomonospora viridis*
  - ✓ *Thermoactinomyces thalophilus*
  - ✓ *Thermoactinomyces vulgaris*.
- *Thermomonospora* spp.

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

Οι ακτινομύκητες εμφανίζονται ως κυρίαρχοι αποδομητές του οργανικού υλικού κατά την ψυχρόφιλη φάση. Μάλιστα, ο ρυθμός πολλαπλασιασμού τους είναι αντιστρόφως ανάλογος με τη μέση θερμοκρασία κατά τη φάση αυτή. Τα εναπομείναντα μόρια κυτταρίνης και λιγνίνης, αποδομούνται από τους πληθυσμούς ακτινομυκήτων και κατά τη φάση ωρίμανσης του compost, οι σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες που επικρατούν ευνοούν την ανάπτυξη, τον πολλαπλασιασμό και τη δράση των εν λόγω μικροοργανισμών. <sup>[8]</sup>

### **Μύκητες**

Οι μύκητες είναι ευκαρυωτικοί μικροοργανισμοί και διακρίνονται σε ζυμομύκητες και υφομύκητες. Ζουν παρασιτικά ή σαπροφυτικά και διατρέφονται από οργανικά συστατικά ζών ή νεκρών οργανισμών. Γενικά, μπορούν να προσβάλλουν οργανικά υπολείμματα τα οποία είναι πολύ ξηρά, όξινα ή χαμηλής περιεκτικότητας σε άζωτο και τα οποία δεν αποδομούνται από τα βακτήρια.

Η παρουσία των μυκήτων στη βιοσταθεροποίηση είναι ιδιαίτερα σημαντική. Οι μικροοργανισμοί αυτοί διεισδύουν στο υπόστρωμα, αποσυνθέτουν χημικά και μηχανικά τις πιο ανθεκτικές πολυμερείς ενώσεις, όπως είναι η λιγνίνη και η κυτταρίνη, και αφήνουν στη συνέχεια τα βακτήρια να ολοκληρώσουν την αποδόμηση. Η δράση αυτή των μυκήτων παρατηρείται κάτω από κανονικές έως μέτριες θερμοκρασίες, όχι όμως και στις πολύ υψηλές. Σε κάποιες περιπτώσεις παρατηρήθηκε πως καθώς ανεβαίνει η θερμοκρασία πάνω από τους 55°C αναστέλλεται η δράση των μυκήτων. [Ryckeboer et al., 2003] Όταν όμως η θερμοκρασία στο σύστημα λιπασματοποίησης πέφτει, οι πληθυσμοί τους επανακάμπτουν.

Οι μύκητες που εμφανίζονται στα συστήματα λιπασματοποίησης είναι υποχρεωτικά αερόβιοι [Haug, 1993].<sup>[11]</sup>

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

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

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

Γενικότερα, η δράση των μυκήτων εντοπίζεται κυρίως κατά τη μεσόφιλη και ψυχρόφιλη φάση. Προκειμένου για 'ανοικτά' συστήματα βιοαποδόμησης, η δράση των μεσόφιλων και ψυχρόφιλων μυκήτων, περιορίζεται χωρικά σε μια καθορισμένη και ευδιάκριτη ζώνη στα εξωτερικά στρώματα της σωρού, η οποία έχει πάχος που κυμαίνεται μεταξύ 5 και 15 cm και λόγω της μικροβιακής δραστηριότητας αποκτά μια εμφάνιση φαιού χρώματος. Οι δραστηριότητες αποδόμησης του οργανικού υλικού από τους μύκητες, λαμβάνουν χώρα στην εν λόγω περιοχή, ενώ ταυτόχρονα, στον πυρήνα της σωρού επικρατούν οι θερμόφιλες συνθήκες (Martin, 1991). Λόγω του γεγονότος ότι, οι μύκητες δεν είναι ιδιαίτερα ανθεκτικοί στις υψηλές θερμοκρασίες του πυρήνα των διεργασιών, ενδεχόμενη ανάδευση της σωρού παρεμποδίζει τη δράση και ανάπτυξη των μικροοργανισμών αυτών. (Μιχαλόπουλος 2010)<sup>[8]</sup>

### **Παθογόνοι μικροοργανισμοί**

Πέρα από όλους τους μικροοργανισμούς που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, τα αρχικά υποστρώματα της κομποστοποίησης ενδέχεται να περιέχουν και μία ποικιλία παθογόνων, ιδιαίτερα μάλιστα όταν πρόκειται για επεξεργασία αστικών στερεών απορριμμάτων, λυματολάσπης ή ζωικών περιττωμάτων [Bustamante et al., 2008, Petric & Selimbašić, 2008, Vaz-Moreira et al., 2008]. Τα κυριότερα παθογόνα ανήκουν στις κατηγορίες των μυκήτων, των βακτηρίων, των ιών, των ακτινομυκήτων και των πρωτοζώων. Μπορεί δε να είναι παθογόνα για τον άνθρωπο, τα ζώα ή και τα φυτά.

Αναμφίβολα, η θερμότητα που εκλύεται κατά το θερμόφιλο στάδιο της βιοσταθεροποίησης μπορεί να καταστρέψει σημαντικό μέρος των παθογόνων. Σε μελέτη που παρακολούθηθηκε η τύχη κάποιων ευρέως απαντώμενων παθογόνων κατά τη διάρκεια

βιοσταθεροποίησης λυματολάσπης, τα αποτελέσματα έδειξαν πως κατά τη θερμοφιλική φάση της διεργασίας παρατηρείται εξαφάνιση των εντερικών παθογόνων *Salmonella* sp. και *Campylobacter jejuni* καθώς και σημαντική μείωση της συγκέντρωσης των *Escherichia coli*, *Enterococcus* sp., και *Clostridium perfringens*. Μάλιστα, η συγκέντρωση του *Enterococcus* sp. συνέχισε να μειώνεται σημαντικά ακόμα και κατά το στάδιο της ωρίμανσης. [Wéry et al., 2008]

Σύμφωνα με την Αμερικάνικη Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος [US EPA], η διατήρηση της θερμοκρασίας κατά τη βιοσταθεροποίηση στους 55°C για δύο με τρεις ημέρες είναι αρκετή προκειμένου να εξαφανιστούν όλοι οι παθογόνοι που απαντώνται στη λυματολάσπη [US EPA, 1993]. Παρόλα αυτά και χαμηλότερες θερμοκρασίες μπορούν να οδηγήσουν σε καταστροφή των παθογόνων με την προϋπόθεση ενός μεγαλύτερου διαστήματος βιοσταθεροποίησης [Wéry et al., 2008]. Γενικά, θεωρείται πως η ποσότητα της θερμότητας που απαιτείται για την ολική απομάκρυνση των παθογόνων εξαρτάται σημαντικά από την πυκνότητα του μικροβιακού πληθυσμού. Η πιθανή επιβίωση κάποιων παθογόνων, ακόμα και σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, μπορεί να αποδοθεί στα χαμηλά ποσοστά υγρασίας που ενδεχομένως επικρατούν στο σύστημα λιπασματοποίησης [Liang et al., 2003, Singh et al., 2006].

Ενδιαφέρον επίσης παρουσιάζει η περίπτωση της αδρανοποίησης των παθογόνων λόγω της παρουσίας τοξικών για αυτά ουσιών. Συγκεκριμένα, κατά την αποδόμηση των διαφόρων υποστρωμάτων από το μικροβιακό πληθυσμό, παράγονται μεταβολικά προϊόντα τα οποία έχουν επιζήμια αποτελέσματα για τους παθογόνους μικροοργανισμούς. Για παράδειγμα, η μεθανόλη, η αιθανόλη και η φορμαλδεΐδη, που παράγονται κατά την αποδόμηση υπολειμμάτων καλλιεργειών, καθώς επίσης και η αμμωνία οδηγούν στην καταστροφή κάποιων παθογόνων μυκήτων [Farrell, 1993].

Οι παραπάνω περιπτώσεις δεν είναι οι μόνες που συνεπάγονται την εξάλειψη των επικίνδυνων για τα φυτά, τα ζώα άλλα και των άνθρωπο μικροοργανισμών. Ο συναγωνισμός μεταξύ του μικροβιακού πληθυσμού, που επικρατεί στη βιοσταθεροποίηση, για τα θρεπτικά συστατικά θεωρείται ότι είναι ο σημαντικότερος παράγοντας καταστολής των παθογόνων [Singh et al., 2006]. Ιδιαίτερα στο ώριμο μίγμα, οι υψηλές συγκεντρώσεις μικροβιακής βιομάζας επιβιώνουν με συναγωνισμό για τα θρεπτικά, ενώ οι παθογόνοι τείνουν να μειωθούν εφόσον βρίσκονται σε ένα ξένο γι' αυτούς οικοσύστημα. Επιπρόσθετα, αρκετές είναι και οι αναφορές για μείωση του παθογόνου πληθυσμού λόγω παρεμπόδισης και ανταγωνισμού από τον αυτόχθονα μικροβιακό πληθυσμό της κομποστοποίησης [Bertoldi et al., 1983, Singh et al., 2006].

Όλα τα παραπάνω τείνουν στο συμπέρασμα πως η διεργασία της βιοσταθεροποίησης είναι ικανή να μειώσει ή και να εξαλείψει το παθογόνο περιεχόμενο των οργανικών αποβλήτων. Όμως, δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις που παρατηρήθηκε η επανεμφάνιση κάποιων παθογόνων στο τελικό προϊόν. [Fourti et al., 2008, Bustamante et al., 2008] Έτσι, οδηγούμαστε στην ανάγκη περαιτέρω έρευνας που θα αποκαλύψει τις ιδανικές συνθήκες της βιοσταθεροποίησης για την επίτευξη ολικής εξάλειψης των παθογόνων και περιορισμό της επαναδραστηριοποίησής τους μετά το πέρας της διεργασίας. Λύση θα μπορούσε να αποτελέσει ένα πρώτο στάδιο επεξεργασίας των αποβλήτων. Για παράδειγμα, προκειμένου για τη λυματολάσπη, η προεπεξεργασία της με αναερόβια χώνευση συνεπάγεται τόσο τη σταθεροποίησή της όσο και τη μείωση του παθογόνου περιεχομένου. Ενδεχομένως λοιπόν,

η λιπασματοποίηση της προεπεξεργασμένης ιλύος να οδηγήσει στην ολική απομάκρυνση των παθογόνων μικροοργανισμών.<sup>[11]</sup>

## 2.4 Συστήματα βιοσταθεροποίησης (κομποστοποίησης)

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

### 2.4.1 Συστήματα ανοικτού τύπου

Τα ανοικτά συστήματα διακρίνονται ανάλογα με τη μέθοδο αερισμού του υποστρώματος σε :

- ✓ αναστρεφόμενα σειράδια (windrows)
- ✓ αεριζόμενους στατικούς σωρούς (aerated static pile)

Στα συστήματα αναστρεφόμενων σειραδιών το οργανικό υλικό τοποθετείται σε παράλληλες σειρές μεγάλου μήκους (γραμμικές σωροί) όπως φαίνεται στην Εικόνα 16. Ο αερισμός του υποστρώματος επιτυγχάνεται αποκλειστικά με την περιοδική αναμόχλευση της σωρού με τη χρήση κατάλληλου μηχανολογικού εξοπλισμού ενώ παράλληλα γίνεται ομογενοποίηση και μείωση του μεγέθους της οργανικής ουσίας (Shammas and Wang, 2009). Το ύψος, το πλάτος και το σχήμα των γραμμικών σωρών ρυθμίζονται σύμφωνα με το είδος του προς επεξεργασία υλικού και από τον τύπο του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται για την ανάδευση. Η βέλτιστη αναλογία πλάτους προς ύψος της σωρού είναι ίση με 2. Σε μεγαλύτερες αναλογίες παρουσιάζονται μεγαλύτερες απώλειες θερμότητας με συνεπακόλουθη μείωση της θερμοκρασίας στο υπόστρωμα (μη επίτευξη κρίσιμου όγκου) ενώ σε μικρότερους λόγους δύναται να διαμορφωθούν αναερόβιες συνθήκες εξαιτίας της ελλιπούς διάχυσης του αέρα (Γιδαράκος, 2007).<sup>[8]</sup> Συνήθως, κάτω από τις τυπικές συνθήκες λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος, οι σωροί αναστρέφονται 2 - 3 φορές την ημέρα κατά τη διάρκεια των 5 πρώτων ημερών, ώστε το μίγμα να αναμιχθεί πλήρως, να μειωθούν κατά το δυνατό οι οσμές και να διευκολυνθεί η είσοδος οξυγόνου, ενώ στη συνέχεια αναδεύονται μία φορά την ημέρα για άλλες 30 ημέρες [Μαστάκα, 2007].

Με την ανάδευση των σωρών επιτυγχάνεται [Κατσίρη, 2003]:

- αερισμός στο εσωτερικό των σωρών και παροχή οξυγόνου στους μικροοργανισμούς ώστε ο σωρός να μην καταστεί αναερόβιος.
- καταστροφή των συσσωματωμάτων των οργανικών ουσιών που παρατηρούνται εξαιτίας της έκλυσης υγρασίας κατά τη βιοσταθεροποίηση. Τα συσσωματώματα αυτά γίνονται με το χρόνο πρακτικά αδιαπέραστα ως προς τον αέρα και καθίστανται αναερόβια.
- Συνεχής ανάμιξη των υλικών για την καλύτερη επαφή των μικροοργανισμών με την τροφή.

- διατήρηση ομοιογενούς και σταθερής θερμοκρασίας σε όλο το σωρό.

Ο μηχανικός εξοπλισμός ανάμιξης των σειραδίων διακρίνεται στους μετωπικούς αναμοχλευτές (straddle turners) και στους πλευρικούς αναμοχλευτές (side-cutting windrow turners). Από τη δεκαετία του '80 και έπειτα, παρουσιάστηκε μια σημαντική εξέλιξη στις συσκευές ανάδευσης που επέδρασε θετικά στην ευρύτατη εφαρμογή της μεθόδου. <sup>[8]</sup>

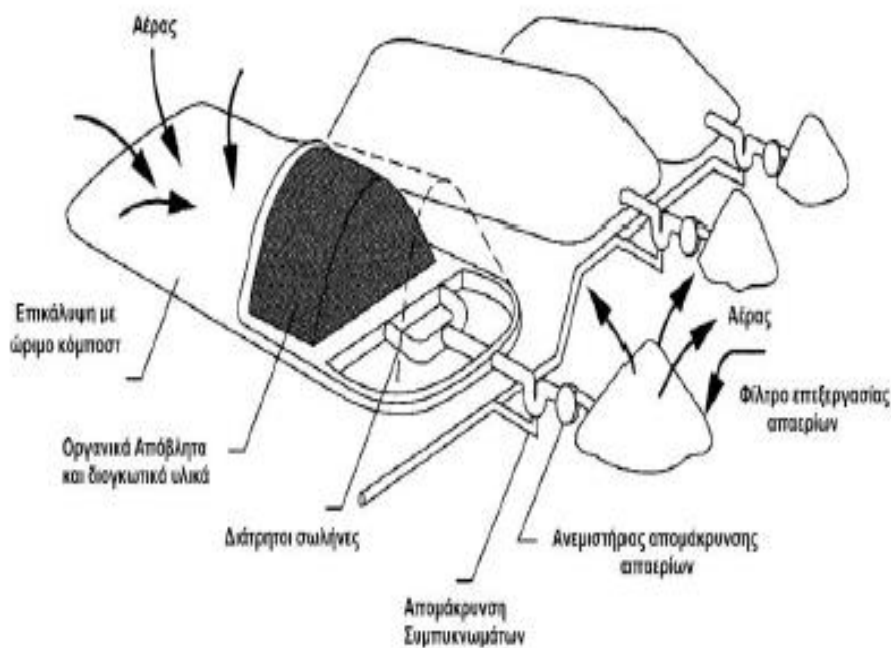


**Εικόνα 2.6 : Σειράδια (windrows)**

Αναφορικά με τα συστήματα των αεριζόμενων στατικών σωρών, το οργανικό υλικό τοποθετείται όπως και στην περίπτωση των αναστρεφόμενων σειραδίων, ενώ το υπόστρωμα δεν αναδεύεται κατά τη διάρκεια του κύκλου κομποστοποίησης με αποτέλεσμα οι σωροί να πρέπει να διαμορφώνονται από την αρχή της διεργασίας. Το οργανικό υπόστρωμα συνήθως εμπλουτίζεται με διογκωτικό υλικό, ώστε να παρέχεται η κατάλληλη δομική σταθερότητα για τη διάχυση του οξυγόνου στην οργανική μάζα ενώ ο αερισμός της πραγματοποιείται με θετική (εμφύσηση) ή αρνητική πίεση (αναρρόφηση) (Shammas and Wang, 2009). <sup>[8]</sup>

Η μέθοδος των αεριζόμενων στατικών σωρών αναπτύχθηκε στις αρχές της δεκαετίας του '80 από το Υπουργείο Γεωργίας των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής (Σταθμός γεωργικής έρευνας, Beltsville, πολιτεία Maryland) για την επεξεργασία χωνευμένης ιλύος από αστικά λύματα [Haug, 1993]. Εφαρμόζεται κυρίως σε σχετικά υδαρά μίγματα, όπως είναι η λυματολάσπη, και αναπτύχθηκε με στόχο τη μείωση της απαιτούμενης έκτασης καθώς και τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας της βιοσταθεροποίησης. <sup>[11]</sup>





Εικόνα 2.7 : Αεριζόμενοι στατικοί σωροί<sup>[12]</sup>

## 2.4.2 Συστήματα κλειστού τύπου

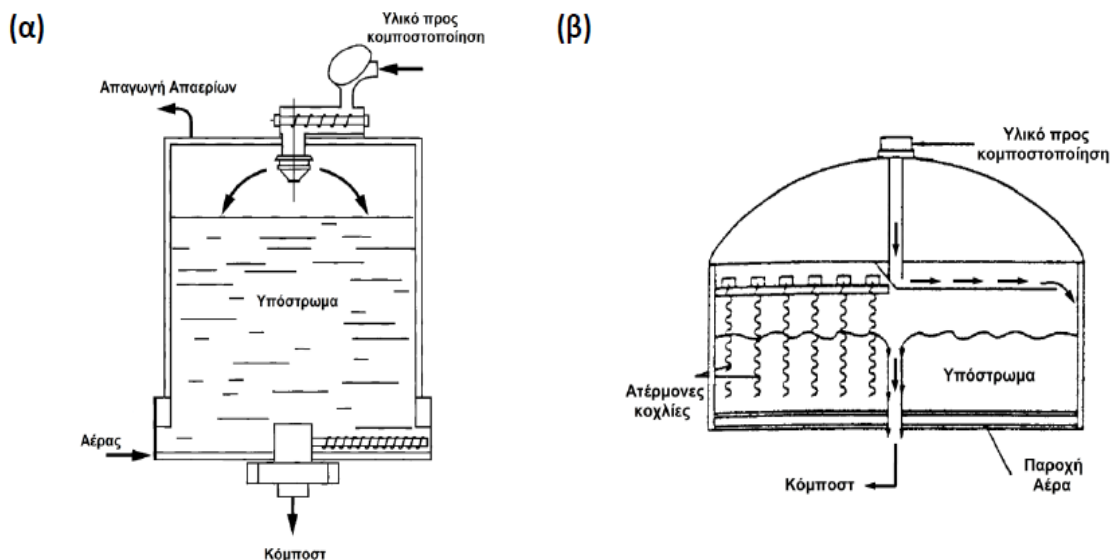
Η κατηγοριοποίηση των κλειστών συστημάτων κομποστοποίησης γίνεται, κατά βάση, σύμφωνα με τη ροή του οργανικού υλικού σε οριζόντιου και κάθετου τύπου. Επιπλέον, τα κλειστά συστήματα κομποστοποίησης διαφοροποιούνται ως προς τα χαρακτηριστικά του αερισμού του υποστρώματος, την ανάδευση, καθώς και τις διατάξεις φόρτωσης και εκφόρτωσης του οργανικού υλικού (Shammas and Wang, 2009). Κοινός συντελεστής είναι η επίτευξη της επιτάχυνσης των βιοξειδωτικών διεργασιών και της σταθεροποίησης του προς επεξεργασία οργανικού υλικού με τον έλεγχο και τη ρύθμιση των περιβαλλοντικών συνθηκών της διεργασίας, παράγοντας ένα τελικό προϊόν με υψηλά ποιοτικά χαρακτηριστικά. Παράλληλα γίνεται ο έλεγχος και η δέσμευση των αερίων εκπομπών με βιόφιλτρα (Misra et al., 2003) ή άλλο κατάλληλο σύστημα ελέγχου (π.χ. πλυντρίδες) (Shammas and Wang, 2009).<sup>[8]</sup>

### Κλειστοί κάθετοι αντιδραστήρες

Οι εμπορικά διαθέσιμοι κλειστού τύπου κάθετοι αντιδραστήρες είναι κυρίως συνεχούς λειτουργίας με ή χωρίς ανάδευση. Τα συνεχούς ροής κάθετα συστήματα χωρίς ανάδευση περιλαμβάνουν θερμικά μονωμένους αεροστεγείς κλειστούς κυλίνδρους. Το υλικό εισάγεται περιοδικά (τυπικά σε ημερήσια ή εβδομαδιαία βάση) από την κορυφή και κατεβαίνει βαρυτικά (Shammas and Wang, 2009). Ο αερισμός του υποστρώματος επιτυγχάνεται με την παροχή αέρα από τον πυθμένα και την αναρρόφηση των αερίων εκπομπών από την κορυφή. Δεν εφαρμόζεται μηχανική ανάδευση για να μη διαταραχθούν οι βιολογικές διεργασίες γεγονός που καθιστά δύσκολο τον έλεγχο της ομοιογενούς κατανομής του οξυγόνου στην οργανική μάζα. Το τελικό προϊόν εξέρχεται και συλλέγεται από τον πυθμένα του αντιδραστήρα με ειδική διάταξη. Τυπικό κάθετο κλειστό σύστημα κομποστοποίησης συνεχούς ροής χωρίς ανάδευση παρουσιάζεται στην Εικόνα 16 (α).



Τα συνεχή κάθετα συστήματα με ανάδευση περιλαμβάνουν εσωτερικό αναδευτήρα που φέρει περιστρεφόμενη γέφυρα με ατέρμονες κοχλίες στο μισό της μήκος. Το προς κομποστοποίηση υλικό εισάγεται στο κέντρο περιστροφής της γέφυρας και με τη βοήθεια του ατέρμονα κοχλία μετατοπίζεται προς την περίμετρο. Περιοδικά το υπόστρωμα έρχεται σε επαφή με τον αέρα ενώ σταδιακά κινείται προς τα κάτω μέχρι που τελικά απάγεται από τον πυθμένα και οδηγείται σε κατάλληλο χώρο για ωρίμανση. Τυπικό κάθετο κλειστό σύστημα κομποστοποίησης συνεχούς ροής με ανάδευση παρουσιάζεται στην (Εικόνα 2.8(β)).



**Εικόνα 2.8 :** Σχηματική αναπαράσταση τυπικών κάθετων κλειστών συστημάτων κομποστοποίησης (α) χωρίς ανάδευση και (β) με ανάδευση (Diaz et al., 2002) <sup>[8]</sup>

### Κλειστοί αντιδραστήρες οριζόντιου τύπου

Τα κλειστά συστήματα κομποστοποίησης οριζόντιου τύπου μπορούν να διακριθούν σε:

- ✓ Εγκιβωτισμένα συστήματα
- ✓ Κανάλια (channels ή trenches)
- ✓ Περιστρεφόμενους κυλίνδρους (rotating drums)



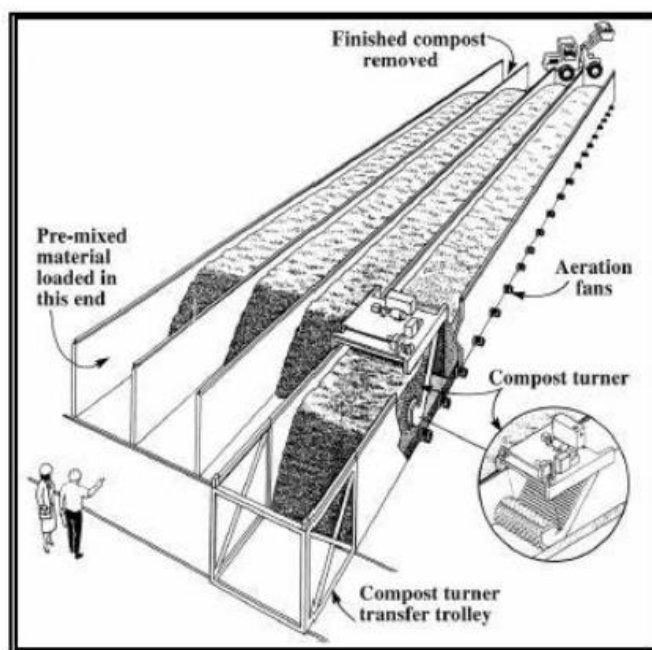
**Εικόνα 2.9 :** Τυπική διάταξη εγκιβωτισμένων συστημάτων κομποστοποίησης σε παράλληλα στοιχεία

### Εγκιβωτισμένα συστήματα

- ✓ πλήρως ελεγχόμενο περιβάλλον αναφορικά με τις συνθήκες θερμοκρασίας, υγρασίας και αερισμού
- ✓ ρύθμιση αερισμού με εμφύσηση αέρα ή την αναρρόφηση των αερίων εκπομπών
- ✓ συστήματα ύγρανσης για την προσθήκη και ανακύκλωση του νερού για τη ρύθμιση της περιεκτικότητας του υποστρώματος σε υγρασία.
- ✓ κατάλληλες διατάξεις απόσμησης για τον έλεγχο των αερίων εκπομπών που εκλύονται κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης

### Κανάλια (channels ή trenches)

- ✓ το οργανικό υλικό εισέρχεται σε στεγασμένο κτίριο το οποίο είναι διαμορφωμένο με παράλληλα κανάλια διαχωρισμένα με τείχος
- ✓ το οργανικό υλικό τοποθετείται σε ένα συνεχές στρώμα και αναστρέφεται τμηματικά από κατάλληλο μηχανολογικό εξοπλισμό.
- ✓ είναι συνεχούς ή ασυνεχούς λειτουργίας,
- ✓ ο αερισμός του υποστρώματος εξασφαλίζεται με την ανάδευσή του αλλά και μέσω συστημάτων εμφύσησης ή αναρρόφησης αέρα



Εικόνα 2.10 : Κανάλια

### Περιστρεφόμενοι κύλινδροι (rotating drum)

- ✓ Το υλικό εισέρχεται στο ένα άκρο του βιοαντιδραστήρα
- ✓ Με αργή περιστροφή του κυλίνδρου το οργανικό υλικό μεταφέρεται κατά μήκος του συστήματος έως ότου εξέλθει από το άλλο άκρο του κυλίνδρου.
- ✓ Συνήθως οι αντιδραστήρες αυτού του τύπου είναι εξοπλισμένοι με προεξοχές στο εσωτερικό του κυλίνδρου ώστε κατά την περιστροφική κίνηση του αντιδραστήρα το υπόστρωμα να τεμαχίζεται και να αναδεύεται βοηθώντας στην ομογενοποίηση και στην κατάτμηση του υλικού



**Εικόνα 2.11 : Τυπική διάταξη οριζόντιου κλειστού συστήματος κομποστοποίησης, τύπου περιστρεφόμενου τυμπάνου <sup>[12]</sup>**

Η ποιότητα του παραγόμενου κόμποστ και η δυνατότητα διάθεσής του είναι καθοριστικές τόσο για την επιτυχία μιας μονάδας ή ενός συστήματος κομποστοποίησης, όσο και για την αποδοχή και εξέλιξη της μεθόδου της αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας στο πλαίσιο της ορθολογικής και βιώσιμης διαχείρισης των βιοαποδομήσιμων στερεών αποβλήτων. Ο χαρακτηρισμός της ποιότητας του παραγόμενου κόμποστ βασίζεται στον προσδιορισμό του βαθμού ωρίμανσης και σταθεροποίησής του. Ο όρος ωρίμανση συσχετίζεται με την ανάπτυξη των φυτών ή με την φυτοτοξικότητα (Iannotti et al., 1993), ενώ ο όρος σταθεροποίηση συνήθως αναφέρεται στη μικροβιακή δραστηριότητα που παρατηρείται στο κόμποστ. Ωστόσο, σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται και οι δύο όροι για τον προσδιορισμό της ποιότητας του τελικού προϊόντος παρότι εννοιολογικά είναι διαφορετικές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι φυτοτοξικές ενώσεις παράγονται από μικροοργανισμούς που προέρχονται από μη σταθεροποιημένο κόμποστ (Zucconi et al., 1985). Μη ώριμο και μη σταθεροποιημένο κόμποστ δύναται να προκαλέσει προβλήματα κατά την αποθήκευση και την τελική του χρήση. Κατά τη διάρκεια της αποθήκευσής του ενδέχεται να διαμορφωθούν αναερόβιες συνθήκες και έκλυση οσμών καθώς και δημιουργία τοξικών ενώσεων. Επιπλέον, η εναπόθεση μη ώριμου κόμποστ μπορεί να παρεμποδίσει τη βλάστηση των σπόρων, να καταστρέψει τη ρίζα και να οδηγήσει στην παρεμπόδιση της ανάπτυξης του φυτού. Αναλυτικότερα, η εναπόθεση μη σταθεροποιημένου κόμποστ μεταξύ άλλων μπορεί να οδηγήσει σε περίσσεια αμμωνιακών ή οργανικών οξέων, να προκαλέσει ακινητοποίηση του αζώτου εξαιτίας της υψηλής αναλογίας C/N καθώς και μείωση της συγκέντρωσης οξυγόνου και του δυναμικού οξειδοαναγωγής λόγω της γρήγορης αποσύνθεσης της οργανικής ουσίας με μια πιθανή αύξηση της κινητικότητας μερικών βαρέων μετάλλων (Bernal et al., 2009; Smith and Hughes, 2004).

Σύμφωνα με τους Bernal et al. (2009), Eggerth et al. (2007) και Iglesias Jim nez and Perez Garcia (1989) ορισμένες από τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται διεθνώς για την αξιολόγηση του τελικού προϊόντος επισημαίνονται στην εικόνα 2.12. (Μαλαμής 2010)

Κατηγορία	Κριτήριο	Παράμετροι ελέγχου
Φυσικές	Χρώμα	Χρωματισμός
	Οσμή	Έκλυση και ένταση δυσάρεστων οσμών
	Θερμοκρασία	Σταθεροποίηση της θερμοκρασίας
	Υγρασία	Περιεκτικότητα υγρασίας
	Συγκράτηση νερού	Προσδιορισμός της υδατοϊκανότητας
	Αδρανή ύλη	Περιεκτικότητα σε αδρανή υλικά
	Μέγεθος σωματιδίων	Κοκκομετρία
Χημικές	Θρεπτικά συστατικά	Αναλογία C/N, Άζωτο ( $\text{NH}_4^+$ , $\text{NO}_3^-$ , Λόγος $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ )
	Ποιότητα οργανικής ουσίας	Σύνθεση οργανικών: λιγνίνη, κυτταρίνη, σύνθετοι υδατάνθρακες, λιπίδια, σάκχαρα κ.α.
	Χουμοποίηση	Χαρακτηρισμός χουμικών ενώσεων (π.χ. κατανομή MB), Δείκτες χουμοποίησης (C-HA/C-FA, $E_2/E_6$ κ.α.) <sup>(1)</sup>
	Ρυπαντές	Βαρέα μέταλλα και επίμονες οργανικές ενώσεις
	Υδατοδιαλυτότητα εκχυλίσματος	pH, ηλεκτρική αγωγιμότητα κ.α.
Βιολογικές	Παθογόνοι μικροοργανισμοί	Συνθήκες θερμοκρασίας -χρόνου Προσδιορισμός συγκέντρωσης παθογόνων
	Μικροβιολογική δραστηριότητα	Αναπνευστικές παράμετροι (π.χ. πρόσληψη $\text{O}_2$ , κατανάλωση $\text{O}_2$ , παραγωγή $\text{CO}_2$ , έλεγχος αυτοθέρμανσης), Ενζυμική δραστηριότητα, Περιεχόμενο ATP <sup>(2)</sup> , Μικροβιακή βιομάζα, Δυναμική αζώτου (διεργασίες ανοργανοποίησης-ακίνητοποίησης)
	Φυτοτοξικότητα	Βλαστικότητα και έλεγχος ανάπτυξης φυτών

Εικόνα 2.12 : Ενδεικτικές παράμετροι ελέγχου ποιότητας κόμποστ

Παρατηρείται λοιπόν ότι ο χαρακτηρισμός της ποιότητας του τελικού προϊόντος διέπεται από μια πολλαπλότητα αναφορικά με τον αριθμό των παραμέτρων αξιολόγησης. Επιπλέον, οι ενδεικτικές τιμές και τα όρια αυτών των παραμέτρων πολλές φορές διαφοροποιούνται σημαντικά μεταξύ τους, γεγονός το οποίο αντικατοπτρίζει την απουσία ενιαίου τρόπου προσδιορισμού της καταλληλότητας του κόμποστ η οποία ενδεχομένως έγκειται στην ποικιλομορφία της αρχικής προς κομποστοποίηση πρώτης ύλης ως προς τις φυσικές, χημικές και βιολογικές της ιδιότητες (Benito et al., 2003; Saviozsi et al., 1988; Roletto et al., 1985). <sup>[8]</sup>



### 3. Πειραματικό μέρος

#### 3.1 Πειραματική διάταξη οικιακού κομποστοποιητή

Για τη βιοσταθεροποίηση χρησιμοποιήθηκε οικιακός κομποστοποιητής όγκου 280 L της εταιρίας *garantia* . Ο κομποστοποιητής είναι φτιαγμένος από 100% ανακυκλωμένο πολυπροπυλένιο (PP) , και ιδανικός για μια οικογένεια 4 ατόμων. Διαθέτει πλευρικές θυρίδες εξαερισμού για πιο γρήγορη κομποστοποίηση, και ένα ολισθαίνων πορτάκι στον πάτο , για εύκολη αφαίρεση κόμποστ από τη σωρό αν κριθεί αναγκαίο. Από πάνω διαθέτει καπάκι , απ' το οποίο περάστηκε το καλώδιο του ψηφιακού θερμομέτρου , για καταγραφή της θερμοκρασίας. Τα παραπάνω φαίνονται στις εικόνες :



*Εικόνα 3.1 : Οικιακός κομποστοποιητής της εταιρίας GARANTIA*



*Εικόνα 3.2 : Οικιακός κομποστοποιητής της εταιρίας GARANTIA*

*[<http://www.garantia.co.uk>]*

### 3.2 Χαρακτηριστικά κύκλων πειραμάτων - tests

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε υλικό τροφοδοσίας τα οικιακά ζυμώσιμα απορρίμματα του προγράμματος Waste 4Think, ένα πρόγραμμα του Horizon 2020, που προτείνει διαλογή στην πηγή και χωριστή συλλογή των ζυμώσιμων οικιακών απορριμμάτων (Fermentable Household Waste , FHW) στον Δήμο Χαλανδρίου. Ακολούθως, τα απορρίμματα υφίστανται ξήρανση και τεμαχισμό στον Δήμο όπως φαίνεται στην εικόνα 22 , οπότε και παράγεται ένα προϊόν ονομαζόμενο FORBI (Food Residue Biomass). Το FORBI είναι ένα υψηλής ποιότητας, ομογενοποιημένο και ξηρό προϊόν, που περιέχει περίπου 25% των αρχικών απορριμμάτων κουζίνας και μπορεί να αποθηκεύει για μεγάλες περιόδους χωρίς να υποστεί αλλοιώσεις. [Michalopoulos et al,2017]



**Εικόνα 3.3 : Προεπεξεργασία οικιακών ζυμώσιμων απορριμμάτων προς FORBI**

Εξετάστηκε η βιοσταθεροποίηση του FORBI σε οικιακό κομποστοποιητή με καπάκι . Σε ένα δεύτερο κύκλο πειραμάτων , εξετάστηκε η βιοσταθεροποίηση ενός υλικού αποτελούμενου από FORBI σε συνδυασμό με κλαδέματα κήπου από το Δήμο Χαλανδρίου(ευκάλυπτος). Τέλος, σε ένα τρίτο οικιακό κομποστοποιητή επιχειρήθηκε να κομποστοποιηθούν σκέτα κλαδέματα κήπου (φύλλα και κλαδιά ευκάλυπτου), για αξιολόγηση του forbi σαν υλικό συγκομποστοποίησης (co – composting) κατόπιν σύγκρισης με τις άλλες 2 σωρούς.

#### 3.2.1 Forbi

Ο πρώτος οικιακός κομποστοποιητής πληρώθηκε με 95 kg υλικό 100% forbi και 5 kg ώριμου κόμποστ forbi, που έχει αποδειχθεί ότι βοηθά στα αρχικά στάδια της διαδικασίας κομποστοποίησης .



Εικόνα 3.4 : Το FORBI μετά την ξήρανση και τεμαχισμό του

Πίνακας 3.1 : Αναλύσεις forbi και πρότυπες μέθοδοι

Παράμετρος	Πρότυπη μέθοδος
Υγρασία (moisture)	EN 15414-3
Στάχτη (ash)	EN 15403
Πτητικά στερεά (Volatile compounds)	EN 15402
Πυκνότητα (Bulk density)	EN 15401
Θερμιδική αξία (Calorific value)	EN 15400
Μέταλλα (As,Cd,Co,Cr,Cu,Hg,K,Mn,Na,Ni,P,Pb,Sb,Tl,V,Zn)	EPA 200.7
F,Cl,S	EN 15408
C,H,N	EN 15407
O	ISO 16993

Τα αρχικά χαρακτηριστικά του forbi από τις αναλύσεις φαίνονται στους πίνακες 3.2 , 3.3 και 3.4 παρακάτω:

Πίνακας 3.2 : Direct analysis results

Direct Analysis Forbi	
Moisture (%)	1.1 – 1.4
Ash (% dry basis)	8 – 8.7
Volatiles (% dry basis)	75.3 – 78.1
Fixed Carbon (% dry basis)	13.2 – 16.4

Πίνακας 3.3 : Στοιχειακή ανάλυση forbi

Forbi Elemental Analysis , NCV, GCV	
C (%)	47.9 – 48.7
H (%)	6.16 – 6.26
N (%)	2.29 – 2.31
S (%)	0.13 – 0.16
O(%)	33 – 34.2
Cl (%)	0.45 – 0.55
NCV (MJ/Kg)	18.09 – 18.38
GCV (MJ/Kg)	19.32 – 19.65

**Πίνακας 3.4 : Συγκέντρωση μετάλλων σε ξηρή βάση <sup>[13]</sup>**

Forbi Concentration of metals dry basis	
Cd	Δεν εντοπίστηκε
Hg	Δεν εντοπίστηκε
Pb	Δεν εντοπίστηκε
K	15 – 16.5
Na	3.7 – 4.6
Sum (As+Co+Cr+Cu+Sb+Pb+Mn+Ni+V)	49.3 – 57.4

Η αρχική υγρασία του forbi που ήταν διαθέσιμο σε κάδους μέσα στο εργαστήριο μετρήθηκε κοντά στο 10% , παρά την αρχική του υγρασία αμέσως μετά την προεπεξεργασία που ήταν στο 1.1 - 1.4 %. Για αύξηση του περιεχόμενου της υγρασίας στο 40% προστέθηκαν εμπειρικά 3 λίτρα νερό . Ακολούθησε εκτενής μηχανική ανάδευση της σωρού με μεταλλικό σπιράλ . Τέλος , έγινε δειγματοληψία 5g περίπου από το κέντρο της σωρού για μέτρηση υγρασίας, ολικών και πτητικών στερεών , pH και αγωγιμότητας.

### 3.2.2 Forbi & Prunings

Σε ένα δεύτερο οικιακό κομποστοποιητή τοποθετήθηκε μίγμα forbi, κλαδεμάτων του Δήμου Χαλανδρίου και συγκεκριμένα φύλλα και ξύλα (κλαδιά) ευκάλυπτου, και 5 κιλά μαγιάς όπως και στον 1<sup>ο</sup> κομποστοποιητή. Η τελική συνολική μάζα του μίγματος ήταν 80 κιλά, σε αναλογίες 62,5% compost, 31,25% κλαδέματα και 6,25% μαγιά. Σε αυτόν τον 2<sup>ο</sup> κομποστοποιητή εισάχθηκε 20 κιλά λιγότερο υπόστρωμα προς βιοσταθεροποίηση σε σχέση με τον 1<sup>ο</sup> εξαιτίας του μεγάλου όγκου που καταλάμβαναν τα κλαδέματα . Προστέθηκαν επίσης εμπειρικά 3 λίτρα νερό και το μίγμα αναδεύτηκε μηχανικά με μεταλλικό σπιράλ.

Να σημειωθεί πως αυτή η σωρός σε αντίθεση με την 1<sup>η</sup> που περιείχε αποκλειστικά forbi, εμφανίζει σημαντικά μεγάλη ετερογένεια στον όγκο της εξαιτίας των κλαδεμάτων, όπως φαίνεται στην εικόνα 27. Γι' αυτό το λόγο , οι πρώτες μετρήσεις υγρασίας, ολικών και πτητικών στερεών , pH και αγωγιμότητας που έγιναν θεωρείται πως μπορεί να παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση στα διάφορα σημεία του όγκου της σωρού.

Με την άνοδο της θερμοκρασίας στη θερμόφιλη φάση και τη καθημερινή ανάδευση η σωρός ομογενοποιείται σημαντικά και πλέον , με τη πάροδο του χρόνου θεωρείται πως παίρνουμε καλές και αντιπροσωπευτικές τιμές μετρήσεων για όλο τον όγκο της σωρού.





Εικόνα 3.5 : Σωρός με forbi και κλαδέματα την 3η και 10η ημέρα βιοσταθεροποίησης

### 3.2.3 Prunings

Ένας τρίτος οικιακός κομποστοποιητής πληρώθηκε με 30kg υλικού που αποτελούνταν από 28,5kg κλαδέματα κήπων από το Δήμο Χαλανδρίου (ευκάλυπτος ) και 1,5 kg ώριμου κόμποστ από τη 1<sup>η</sup> σωρό με πρώτη ύλη το forbi , όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα :



Εικόνα 3.6 : Τρίτη σωρός με κλαδέματα κήπου (prunings)

Σε αντίθεση με τις 2 προηγούμενες σωρούς , σε αυτή δε προστέθηκε καθόλου νερό , καθώς περιείχε γρασίδι με υγρασία 86,3% και φύλλα με υγρασία 24,4% . Τα επίπεδα υγρασίας της πρώτης ύλης της σωρού θεωρούνται ικανοποιητικά για έναρξη της διαδικασίας βιοσταθεροποίησης. Αξίζει να αναφερθεί ότι η μάζα αυτής της σωρού ήταν σημαντικά μικρότερη σε σχέση με τις άλλες 2 εξαιτίας του μεγάλου όγκου που καταλάμβαναν τα κλαδέματα.

### 3.3 Μεθοδολογία αναλύσεων

Για τις αναλύσεις που έγιναν στα 2 υποστρώματα βιοσταθεροποίησης σε όλες τις φάσεις της διαδικασίας μέχρι την ωρίμανση, ακολουθήθηκαν κάποιες πρότυπες μέθοδοι όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα. Σε αυτή τη κατεύθυνση χρησιμοποιήθηκε το εγχειρίδιο TMECC (Test Methods for the Examination of Composting and Compost) σαν οδηγός σε διάφορες φάσεις της διαδικασίας.

**Πίνακας 3.5 : Μέθοδοι αναλύσεων για κόμποστ**

Παράμετρος	Μέθοδος
Υγρασία	ISO 11465: 1993
Ολικά στερεά (Total Solids – TS)	ISO 11465: 1993
Πτητικά στερεά (Volatile Solids – VS)	SM 2540-E *
pH	TMECC 4.11 – A (παραλλαγή)
Ηλεκτρική αγωγιμότητα	Van der Gheynst, J.S., Pettygrove, S., Dooley, T.M. and Arnold, K.A. (2004)
Άζωτο κατά kjeldahl - TKN	Standards EN 13342 & DIN ISO 11261
Ολικός οργανικός άνθρακας (TOC)	EN 13137 : 2002 / ISO 11465:1993
Αμμωνιακά (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	Απευθείας απόσταξη με ατμό (Buchi)
Νιτρικά (NO <sub>2</sub> /NO <sub>3</sub> )	Απόσταξη Devarda (Buchi)
Κάλιο (K)	US EPA 3051A : 2007 / APHA-AWWA – WEF Standard Methods : 3111, 2012 / ISO 11465:1993
Φώσφορος (P)	US EPA 3051A : 2007 / APHA-AWWA – WEF Standard Methods : 3111, 2012 / ISO 11465:1993
Βαρέα μέταλλα (Cr, Cu, Cd, Pb, Ni, Zn, Mn)	US EPA 3051A : 2007 / APHA-AWWA – WEF Standard Methods : 3111, 2012 / ISO 11465:1993
Δείκτης φυτοθρεπτικότητας (Germination Index)	KAPANEN, A., ITAVAARA, M. (2001)

\*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Part 2000

Να σημειωθεί ότι η προεπεξεργασία των δειγμάτων στα οποία μετρήθηκε ολικό άζωτο κατά kjeldahl (TKN), και ανόργανο άζωτο (αμμωνιακά και νιτρικά) έγινε σύμφωνα με το πρότυπο DIN ISO 11464&11465 ή εναλλακτικά τα EN 12880 και EN ISO 5667-13.

Η θερμοκρασία των υποστρωμάτων καταγραφόταν μέσω ψηφιακού θερμομέτρου καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας κομποστοποίησης και σε όλες τις φάσεις της. Η υγρασία, η ηλεκτρική αγωγιμότητα, το pH, τα πτητικά στερεά (VS) και τα ολικά στερεά (TS) είναι κάποιες από τις φυσικοχημικές παραμέτρους που παρακολουθούνταν στενά (μέτρηση 4 ή 5 φορές εβδομαδιαίως).

Από τη 1<sup>η</sup> ημέρα που στήθηκαν τα οργανικά υποστρώματα προς κομποστοποίηση στον οικιακό κομποστοποιητή, πραγματοποιούταν τακτικά δειγματοληψία από το υλικό σε αεροστεγή πλαστικά σακουλάκια, τα οποία έπειτα τοποθετούνταν στο ψυγείο στους 4°C για μελλοντικές χημικές αναλύσεις όπως περιεκτικότητα σε ολικό οργανικό άνθρακα (TOC), ολικό άζωτο κατά kjedhal (TKN), νιτρικά και αμμωνιακά, ώστε να προσδιοριστούν οι λόγοι C/N και NH<sub>3</sub>/NH<sub>4</sub><sup>+</sup> σαν συνάρτηση του χρόνου βιοσταθεροποίησης. Επιπλέον, στα παραπάνω

δείγματα προσδιορίστηκε ποσοτικά και η στοιχειακή περιεκτικότητα σε κάλιο , φώσφορο και βαρέα μέταλλα.

Στη φάση ωρίμανσης του κόμποστ προσδιορίστηκε και ο δείκτης φυτοθρεπτικότητας (germination index) , για περαιτέρω αξιολόγηση του τελικού προϊόντος.

Παρακάτω ακολουθεί συνοπτική περιγραφή της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε σε κάθε ανάλυση .

### **Προεπεξεργασία δειγμάτων για αναλύσεις**

Η σωρός και των 2 κόμποστ δεν περιείχε ογκώδη μεταλλικά ή πλαστικά υλικά , οπότε παρά την ετερογένεια κυρίως της σωρού με τα κλαδέματα ευκάλυπτου , δεν απαιτήθηκε προηγούμενη αφαίρεση αδρανών (inert removal) .

Για την υγρασία, το pH , την ηλεκτρική αγωγιμότητα , τα ολικά και πτητικά στερεά χρησιμοποιήθηκε δείγμα από τη σωρό όπως είναι χωρίς κάποια προεπεξεργασία ξήρανσης ή άλεσης και χωρίς την ανάγκη αποθήκευσης δείγματος , αφού οι μετρήσεις γίνονταν επιτόπου αμέσως μετά τη δειγματοληψία.

Για τις χημικές αναλύσεις TOC και TKN , καλίου , φωσφόρου και βαρέων μετάλλων , αμμωνιακών και νιτρικών γινόταν αποθήκευση των δειγμάτων στους 4°C μέσα σε πλαστικές αεροστεγείς σακούλες για μελλοντική ανάλυση καθώς και κάποια προεπεξεργασία ξήρανσης και άλεσης .

### **Διατήρηση και αποθήκευση δειγμάτων για ανάλυση**

Σύμφωνα με το TMECC , η βραχυπρόθεσμη αποθήκευση (<24 h) απαιτεί την τοποθέτηση δείγματος από τη σωρό στους 4 °C έως ότου η προετοιμασία του δείγματος αρχίσει, προκειμένου να μειωθεί η μικροβιακή και χημική δραστηριότητα που θα μπορούσαν να αλλοιώσουν τα χαρακτηριστικά του υλικού. Η μακροπρόθεσμη αποθήκευση (>24 h) απαιτεί διατήρηση δείγματος στους -4 °C μέχρι την έναρξη των αναλύσεων. Αν η ανάλυση λάβει χώρα εντός των επόμενων 14 ημερών από τη στιγμή της αποθήκευσης , τότε προτείνεται η ξήρανση και το άλεσμα του δείγματος πριν την αποθήκευση σε αεροστεγή πλαστική σακούλα στους 4 °C. Για αναλύσεις σε περισσότερες από 14 ημέρες , προτείνεται η ξήρανση και το άλεσμα του δείγματος πριν την αποθήκευση σε αεροστεγή πλαστική σακούλα στους -4 °C.  
[17]

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής , δείγμα από τη σωρό αποθηκευόταν ανά τακτά χρονικά διαστήματα σε αεροστεγείς πλαστικές σακούλες και τοποθετούνταν στο ψυγείο του εργαστηρίου στους 4 °C. Οι αναλύσεις έλαβαν χώρα σε χρονικό διάστημα μικρότερο των 24 ωρών.

#### **➤ Προσδιορισμός θερμοκρασίας**

Για την καταγραφή της θερμοκρασίας των κάδων χρησιμοποιήθηκε ψηφιακό θερμόμετρο, και πραγματοποιούνταν μετρήσεις σε διάφορα σημεία του αντιδραστήρα. Το θερμόμετρο ήταν τοποθετημένο μέσα στα κόμποστ καθ' όλη τη διάρκεια του διαστήματος κομποστοποίησης, μέχρι τα κόμποστ να έρθουν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ( ψυχρόφιλη φάση) .

### ➤ Προσδιορισμός υγρασίας

Σε κατάλληλες προζυγισμένες κάψες τοποθετείται δείγμα compost. Τα δείγματα τοποθετούνται σε φούρνο σε θερμοκρασία 105°C για 24h. Η υγρασία υπολογίζεται από τη διαφορά μάζας πριν και μετά την ξήρανση στους 105°C.

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

$$\frac{(M_{\kappa} + M_{s1}) - (M_{\kappa} + M_{s2})}{M_{s1}} * 100\%$$

Όπου ,

$M_{\kappa}$  : η μάζα της κάψας

$M_{s1}$  : η μάζα του δείγματος πριν τους 105°C

$M_{s2}$  : η μάζα του δείγματος μετά τους 105°C

Για τις μετρήσεις της υγρασίας του compost χρησιμοποιήθηκε επίσης και θερμοζυγός όπως αυτός της εικόνας 3.7. Η αφαίρεση της υγρασίας στο θερμοζυγό πραγματοποιείται με χρήση λάμπας αλογόνου.



Εικόνα 3.7 : Μετρητής υγρασίας εταιρείας ADAM με λάμπα αλογόνου

### ➤ Προσδιορισμός pH

Σύμφωνα με το εγχειρίδιο TMECC , για τη μέτρηση του pH απαιτείται η προετοιμασία διαλύματος στερεού κόμποστ με απιονισμένο σε αναλογία στερεού ξηρού δείγματος προς υγρό 1 : 5. Στις μετρήσεις που διεξήχθησαν στο εργαστήριο στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής, 3 g δείγματος όπως είναι από τη σωρό (χωρίς ξήρανση ) διαλύθηκαν σε 30mL απεσταγμένου ύδατος. Ακολούθησε μηχανική ανάδευση για περίπου 3 με 5 λεπτά. Η μέτρηση του pH πραγματοποιείται ποτενσιομετρικά με την εμβάπτιση του ηλεκτροδίου, φορητού, βαθμονομημένου, ηλεκτρονικού pH-μέτρου (pHS 3D pHmeter SANXIN).



**Εικόνα 3.8 : Ηλεκτρονικό pH-μετρό pHs 3D pHmeter SANXIN**

### ➤ Προσδιορισμός ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC)

#### **Σημασία μέτρησης**

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι μια αριθμητική έκφραση της ικανότητας ενός υδατικού διαλύματος να άγει το ηλεκτρικό ρεύμα. Σχετίζεται με τη συνολική συγκέντρωση του διαλύτη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν ποσοτική έκφραση της συγκέντρωσης διαλυμένων αλάτων, παρόλο που επηρεάζεται και από τη κινητικότητα, το φορτίο, και τη σχετική συγκέντρωση του κάθε ιόντος που είναι παρόν στο διάλυμα.<sup>[14]</sup> Η αγωγιμότητα σχετίζεται με την πιθανή καταλληλότητα ή ακαταλληλότητα του παραγόμενου προϊόντος για εδαφοβελτιωτικές εφαρμογές. Τα ακατάλληλα επίπεδα αλατότητας ενός κόμποστ είναι ικανά να επηρεάσουν αρνητικά τη βλάστηση των φυτών, εάν το παραγόμενο προϊόν χρησιμοποιηθεί ως μέσο ανάπτυξης σε αυτά.<sup>[11]</sup>

Για χώμα υπάρχουν πρότυπες μέθοδοι προσδιορισμού της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, ωστόσο για κόμποστ και λάσπες δεν υπάρχει ακόμη. Σύμφωνα με τους Van der Gheynst, J.S., Pettygrove, S., Dooley, T.M. και Arnold, η μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε κόμποστ θα πρέπει να διεξάγεται διαφορετικά απ' ότι για χώμα όσον αφορά το λόγο νερού: στερεού στο διάλυμα που ετοιμάζεται. Συγκεκριμένα, προτείνεται λόγος 10:1, σε αντίθεση με τις μετρήσεις ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε χώμα όπου ο λόγος είναι 5:1. Αυτό συμβαίνει για 2 λόγους:

- 1) Η αραίωση του διαλύματος είναι πιο ομογενής και η μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας πιο ακριβής.
- 2) Δεν απαιτείται διήθηση υπό κενό για την εξαγωγή εκχυλίσματος, αλλά απλή εκχύλιση δια βαρύτητας.<sup>[14]</sup>

Συνεπώς, χρησιμοποιήθηκε το ίδιο δείγμα που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση του pH. Μετά από 3 με 5 λεπτά ανάδευσης του δείγματος για εξαγωγή των αλάτων από το στερεό στο υγρό, έγινε απλή εκχύλιση δια βαρύτητας για λήψη του διαλύτη που περιείχε τα διαλυμένα άλατα. Η μέτρηση της αγωγιμότητας πραγματοποιείται με την εμβάπτιση του ηλεκτροδίου, φορητού, βαθμονομημένου, ηλεκτρονικού αγωγιμομέτρου (WTW INOLAB COND1) μέσα στον διαλύτη του αρχικού μίγματος.

#### **Πειράματα pH και ηλεκτρικής αγωγιμότητας**

Για διαπίστωση της επίδρασης του κοσκινίσματος και αραίωσης του διαλύματος για μέτρηση pH και αγωγιμότητας, στα τελικά κόμποστ διεξήχθησαν κάποια πειράματα με αναλογίες διαλυμάτων 1:5 και 1:16 με το στερεό σε ξηρή βάση (ξηραμένο και κοσκινισμένο σε κόσκινο 9,5mm όπως αναγράφει η βιβλιογραφία του TMECC). Μετρήθηκαν τιμές pH και ηλεκτρικής



αγωγιμότητας σε διάφορους χρόνους μηχανικής ανάδευσης με μαγνήτη για τους διαφορετικούς αυτούς λόγους για καθένα από τα 2 κόμποστ.

**Πίνακας 3.6 : Επίδραση χρόνου ανάδευσης και αραιώσης στο pH και την ηλεκτρική αγωγιμότητα 1ου κόμποστ ( forbi)**

Αραιώση Compost	Χρόνος ανάδευσης	pH	EC (mS/cm)
<b>Forbi 1:5</b> dry wt/water	20' ανάδευση	8.85	9.73
	30' ανάδευση	8.85	9.79
<b>Forbi 1:16</b> dry wt/water	1' ανάδευση	8.96	5.27
	3' ανάδευση	8.87	6.15
	20' ανάδευση	8.86	6.26
	30' ανάδευση	8.69	6.31

**Πίνακας 3.7 : Επίδραση χρόνου ανάδευσης και αραιώσης στο pH και την ηλεκτρική αγωγιμότητα 2ου κόμποστ ( forbi&prunings)**

Αραιώση Compost	Χρόνος ανάδευσης	pH	EC (mS/cm)
<b>Forbi&amp;prunings 1:5</b> dry wt/water	20' ανάδευση	9.18	10.25
	30' ανάδευση	9.08	10.16
<b>Forbi&amp;prunings 1:16</b> dry wt/water	1' ανάδευση	8.83	6.97
	3' ανάδευση	8.87	7
	20' ανάδευση	8.96	7
	30' ανάδευση	8.93	6.92

#### Επίδραση χρόνου ανάδευσης και αραιώσης στο pH

- ✓ Η αραιώση δε φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά το pH . Συγκρίνονται τα 20 και τα 30 λεπτά ανάδευσης των 2 λόγων αραιώσης , και μετράται ότι η σημαντικότερη απόκλιση μεταξύ 2 τιμών pH δεν υπερβαίνει σε κανένα από τα 2 κόμποστ και σε κανένα χρόνο τον αριθμό 0,22.
- ✓ Το pH δε μεταβάλλεται σημαντικά με το χρόνο ανάδευσης . Συγκεκριμένα , η διαφορά τιμών pH μεταξύ του 1 λεπτού και των 30 λεπτών δεν υπερέβαινε το 0,2 και για τα 2 κόμποστ.

#### Επίδραση χρόνου ανάδευσης και αραιώσης στην ηλεκτρική αγωγιμότητα

- ✓ Βλέπουμε μια αυξητική τάση της αγωγιμότητας με αύξηση της αραιώσης . Συγκεκριμένα , και στα 2 κόμποστ ,τα δείγματα με αραιώση 1:5 εμφανίζουν σημαντικά μεγαλύτερη αγωγιμότητα σε σχέση με τα δείγματα αραιώσης 1:16, καθώς μεγαλύτερη ποσότητα στερεού στο διάλυμα σημαίνει και μεγαλύτερη ποσότητα αλάτων στο υγρό .
- ✓ Η ηλεκτρική αγωγιμότητα φαίνεται να επηρεάζεται από το χρόνο ανάδευσης στην περίπτωση του κόμποστ με το σκέτο forbi , σε αντίθεση με το 2<sup>ο</sup> κόμποστ με τα κλαδέματα, όπου δε παρουσιάζει κάποια αξιοσημείωτη μεταβολή. Συγκεκριμένα , παρατηρείται απόκλιση τιμών αγωγιμότητας μεταξύ του ενός και των 30 λεπτών της τάξης του 1,04 mS/cm.

Στην συντριπτική πλειοψηφία των μετρήσεων pH και ηλεκτρικής αγωγιμότητας που διεξήχθησαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής, περίπου 3 g δείγμα από τη σωρό όπως ήταν σε υγρή βάση , διαλύονταν σε 30 mL απιονισμένο νερό , χωρίς προηγούμενο

κοσκίνισμα. Για να εξεταστεί και η επίδραση του κοσκίνισματος σε κόσκινο των 9,5 mm του δείγματος πριν από τη μέτρηση , μετρήθηκαν ακόμα 2 δείγματα από τη σωρό σε υγρή βάση στην αραιώση που προαναφέρθηκε (3g υγρής βάσης σε 30mL απιονισμένο) . Προκύπτει ο παρακάτω πίνακας :

**Πίνακας 3.8 : Επίδραση κοκκομετρίας δείγματος στο pH και την ηλεκτρική αγωγιμότητα των 2 κόμποστ**

	Χρόνος ανάδευσης	pH	EC (mS/cm)
<b>Forbi</b>	3' ανάδευση	8.81	4.53
	30' ανάδευση	9.02	6.25
<b>Forbi&amp;prunings</b>	3' ανάδευση	8.92	4.06
	30' ανάδευση	9.16	6.15

#### Γενικές παρατηρήσεις

Συγκρίνονται τα δεδομένα του πίνακα 17 με αυτά των πινάκων 15 και 16 όσον αφορά τις αραιώσεις 1:16 , που είναι παρόμοιες με την αραιώση των δειγμάτων του πίνακα 17. Βλέπουμε ότι η διαφορετική προεπεξεργασία του δείγματος δεν επηρέασε σημαντικά το pH. Όσον αφορά την ηλεκτρική αγωγιμότητα , στα 30 λεπτά ανάδευσης τα δείγματα με και χωρίς κοσκίνισμα πριν τη μέτρηση δε δίνουν διαφορετικές τιμές . Ωστόσο στα 3 λεπτά ανάδευσης, τα δείγματα με και χωρίς κοσκίνισμα πριν τη μέτρηση φαίνεται πως παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση. Συγκεκριμένα , τα δείγματα που έχουν περάσει από το κόσκινο παρουσιάζουν μεγαλύτερη ηλεκτρική αγωγιμότητα . Αυτό ίσως να οφείλεται στη μεγαλύτερη δυνατότητα εξαγωγής των αλάτων από το στερεό στο υγρό όταν αναδεύεται μικρότερης κοκκομετρίας δείγμα . Το γεγονός ότι στα 30 λεπτά τα δείγματα με και χωρίς κοσκίνισμα έχουν ίδια αγωγιμότητα δείχνει πως αν ο χρόνος ανάδευσης είναι αρκετός , τα άλατα προλαβαίνουν να εξαχθούν από το στερεό και να περάσουν στο υγρό , ανεξάρτητα από τη κοκκομετρία του υλικού . Στα 3 λεπτά ανάδευσης, το υλικό με μικρότερη κοκκομετρία παρουσιάζει μεγαλύτερη αγωγιμότητα σε σχέση με το μη κοσκινισμένο , λόγω μεγαλύτερης ευκολίας διάχυσης των ιόντων των αλάτων στο υγρό από το στερεό , εξαιτίας μεγαλύτερου λόγου επιφάνειας: όγκου του υλικού .

#### ➤ Προσδιορισμός πτητικών στερεών (VS)

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

#### **Διαδικασία**

Οι προζυγισμένες κάψες που περιέχουν το δείγμα στο οποίο έχει προηγηθεί ξήρανση στους 105°C τοποθετούνται σε φούρνο στους 550°C για 20 λεπτά. Τα πτητικά στερεά υπολογίζονται από τη διαφορά μάζας πριν και μετά την ξήρανση στους 550°C . Το επί τοις εκατό ποσοστό πτητικών στερεών του δείγματος δίνεται από το λόγο της παραπάνω διαφοράς προς το αρχικό βάρος του δείγματος και συγκεκριμένα:

$$\frac{(M_{\kappa} + M_{s1}) - (M_{\kappa} + M_{s2})}{M_{s1}} * 100\%$$

Όπου ,

$M_{\kappa}$  : η μάζα της κάψας

$M_{s1}$  : η μάζα του δείγματος πριν τους 550 °C

$M_{s2}$  : η μάζα του δείγματος μετά τους 550 °C

Για τις μετρήσεις ολικού οργανικού άνθρακα (TOC) και ολικού αζώτου κατά kjeldahl (TKN) έγινε προεπεξεργασία στα δείγματα που είχαν αποθηκευτεί στο ψυγείο στους 4°C για ομογενοποίηση . Μετά την εξαγωγή τους από το ψυγείο, ξηράθηκαν στους 40°C κι έπειτα αλέσθηκαν και πέρασαν από κόσκινο 1600μm . Έπειτα ανατοποθετήθηκαν στους 40° C , όπου και παρέμειναν σε μορφή σκόνης μέχρι την πραγματοποίηση της ανάλυσης.

### ➤ Προσδιορισμός ολικού οργανικού άνθρακα (TOC)

Στερεό δείγμα λιотριβείται σε γουδί με γουδοχέρι, κοσκινίζεται και ζυγίζονται με ακρίβεια 40mg τα οποία χωρίζονται ισόποσα σε ειδικές κάψες από πορσελάνη. Στη συνέχεια οι κάψες τοποθετούνται στον ειδικό φούρνο (Solid Sample Module SSM 5000A) όπου το δείγμα θερμαίνεται στους 900°C. Στη θερμοκρασία αυτή γίνεται καύση του οργανικού άνθρακα και τα καυσαέρια αυτής οδηγούνται στην κεντρική μονάδα TOCVCSH. Στη μονάδα αυτή υπολογίζεται η μάζα του οργανικού άνθρακα από το CO<sub>2</sub> που παράγεται κατά την καύση. Επίσης υπολογίζεται και ο ανόργανος άνθρακας (IC- Inorganic Carbon) που περιέχει το στερεό δείγμα, και το % ποσοστό του οργανικού άνθρακα (TOC –Total Organic Carbon) προκύπτει από τη διαφορά TC - IC. Στα στερεά δείγματα του κόμποστ, το ποσοστό του ανόργανου άνθρακα κρίθηκε αμελητέο, αφού μετρήθηκε περίπου 1 με 1,5 % και δε συνυπολογίστηκε. Τέλος , λήφθηκε υπόψιν και η υγρασία που περιείχε το δείγμα που εισάχθηκε στις κάψες , καθώς το ποσοστό του TOC αναφέρεται σε ξηρή βάση.

Επομένως ο υπολογισμός του % TOC δίνεται από το μηχάνημα που μετράει το παραχθέν CO<sub>2</sub>. Έπειτα , γνωρίζοντας την υγρασία του δείγματος, υπολογίζεται το %TOC σε ξηρή βάση .



**Εικόνα 3.9 :** Το σύστημα υπολογισμού ολικού οργανικού άνθρακα TOC και κάψες πορσελάνης όπου εισάχθηκε το δείγμα



### ➤ Προσδιορισμός ολικού αζώτου κατά Kjeldahl (TKN)

Το άζωτο αποτελεί συστατικό των πρωτεϊνών, των νουκλεϊκών οξέων, των αμινοξέων και των ενζύμων και είναι ύψιστης σημασίας για την μικροβιακή ανάπτυξη. Οι αέριες απώλειες του αζώτου οφείλονται κυρίως στην έκλυση, αλλά μπορεί να οφείλονται και στην έκλυση νιτρικών ιόντων και νιτρικών οξέων. Εξ' ορισμού, το άζωτο κατά Kjeldahl είναι το άθροισμα του οργανικού αζώτου και του αζώτου σε ανόργανη μορφή αμμωνίας που περιέχεται στα φυτά και μπορεί να μετατραπεί σε ιόν  $\text{NH}_4^+$  - N.

### **Διαδικασία**

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτή που προτάθηκε από την εταιρία Buchi, βασισμένη στα πρότυπα EN 13342 και DIN ISO 11261. Τα δείγματα αρχικά χωνεύονται στο Kjeldigester K-449 από ' όπου τα παραγόμενα όξινα αέρια ( $\text{SO}_3$ ) απορροφώνται από τη διάταξη Scrubber K-415. Η απόσταξη με βορικό οξύ γίνεται στη συσκευή Kjelmaster K-375 και η απόσταξη λαμβάνει χώρα μετά την απόσταξη, ογκομετρικά με θειικό οξύ.



**Εικόνα 3.10 : Kjelmaster 375**



*Εικόνα 3.11 : Scrubber K-415*



*Εικόνα 3.12 : Kjeldigester K-449*

### **Χημικά**

- Πυκνό θειικό οξύ 98%
- Ταμπλέτες Titanium BUCHI Kjeldahl (Στο εργαστήριο χρησιμοποιήθηκε μίγμα  $K_2SO_4$  :  $CuSO_4$  :  $TiO_2$  σε αναλογία 100 : 3 : 3)
- NaOH 32%
- Βορικό οξύ 2%, (200 g βορικού οξέος, διαλύονται σε 10 L απιονισμένου νερού)

- Θειικό οξύ 0,01 mol/L, (100 ml θειικού οξέος 0,1 mol/L) αραιώνονται σε απιονισμένο νερό μέχρι τελικού όγκου 1 L
- Διάλυμα εξουδετέρωσης για το scrubber: 600 g sodium carbonate  $Na_2CO_3$ , 2 ml αιθανόλη και μικρή ποσότητα bromothymol blue διαλύονται σε 3 L απιονισμένου νερού.
- Ουρία 99.5% , όπου 1.0560 g Urea/L περιέχει θεωρητικά 0.4925 mg N/mL

### Διαδικασία

Ο προσδιορισμός του αζώτου στο compost γίνεται σύμφωνα με τα ακόλουθα συνοπτικά βήματα:

- ✓ Προεπεξεργασία δείγματος compost : ξήρανση στους 40 °C για 1 ημέρα, άλεση του ξηρού δείγματος και κοσκίνισμα σε κόσκινο 1600 μm
- ✓ Οξύνιση του δείγματος compost (0.5 g compost) με πυκνό θειικό οξύ
- ✓ Χώνευση του δείγματος για 70 λεπτά, χρησιμοποιώντας τη συσκευή χώνευσης BUCHI Kjeldigester K-449
- ✓ Απόσταξη για 240s και τιτλοδότηση του δείγματος με θειικό οξύ  $H_2SO_4$

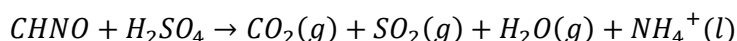
Η αρχή της μεθόδου είναι η χώνευση του δείγματος με περίσσεια πυκνού θειικού οξέος παρουσία καταλύτη. Σχηματίζεται όξινο θειικό αμμώνιο και όξινα απαέρια , τα οποία απομακρύνονται με τον Scrubber . Από το όξινο θειικό αμμώνιο που σχηματίζεται σε υγρή μορφή , μέσω της απόσταξης ελευθερώνεται αμμωνία, σε αλκαλικό περιβάλλον, η οποία αποστάζεται και δεσμεύεται σε περίσσεια διαλύματος βορικού οξέος, όπου και προσδιορίζεται.

Δείγμα στο οποίο έχει προηγηθεί ξήρανση στους 40 °C για 1 ημέρα κοσκινίζεται , και λαμβάνονται 0,15 – 0,5 g βάρος ανάλογα με το αναμενόμενο ποσοστό % περιεκτικότητας σε άζωτο.

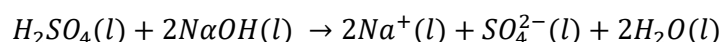
Το δείγμα τοποθετείται σε ειδικό σωλήνα χώνευσης 300mL και στη συνέχεια προστίθενται η κατάλληλη ποσότητα καταλύτη και θειικού οξέος. Ο σωλήνας με το περιεχόμενό του τοποθετούνται στην ειδική συσκευή χώνευσης Kjeldigester K-449 της εταιρίας Buchi που εικονίζεται παραπάνω. Η συσκευή χώνευσης επίσης πληρώνεται και με τυφλό δείγμα που περιέχει 30 mL απιονισμένο νερό και με ένα standard δείγμα γνωστής ποσότητας ουρίας.

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

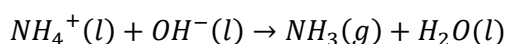
Κατά τη χώνευση : Το οργανικά δεσμευμένο άζωτο μετατρέπεται σε ιόντα αμμωνίου



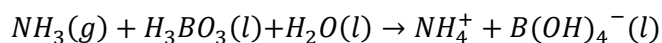
Πριν την απόσταξη : Εξουδετέρωση εναπομείναντος θειικού οξέος στη συσκευή απόσταξης



Κατά την απόσταξη



Κατά την συλλογή του αποστάγματος : Παγίδευση αμμωνίας με βορικό οξύ



Κατά την τιτλοδότηση με θειικό οξύ



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

$$WN = \frac{(V_{sample} - V_{blank}) \cdot 14,007 \cdot N}{m_{sample} \cdot 1000}$$

$$\% TKN = WN * 100$$

Όπου ,

$V_{sample}$  , ο όγκος που καταναλώθηκε κατά τη τιτλοδότηση του δείγματος (mL)

$V_{blank}$  , ο όγκος που καταναλώθηκε κατά τη τιτλοδότηση του τυφλού (mL)

$N$  , η κανονικότητα του τίτλου (0,2 N  $H_2SO_4$ )

$m_{sample}$  , η μάζα του στερεού δείγματος που μπήκε στο σωλήνα των 300 mL (g)

Να σημειωθεί πως αυτό το %TKN αφορά την υγρή βάση του δείγματος . Με υπολογισμό της υγρασίας που περιέχει , υπολογίζεται το %TKN σε ξηρή βάση.

Το πράσινο χρώμα των δειγμάτων της εικόνας 34 μετά την πέψη είναι ενδεικτικό της παρουσίας αμμωνιακών ιόντων. Αφού τα δείγματα έρθουν σε θερμοκρασία δωματίου αποχρωματίζονται. Ακολουθεί για κάθε δείγμα απόσταξη στο μηχάνημα Kjeldmaster 375 για 240 s και ογκομετρική τιτλοδότηση με θειικό οξύ  $H_2SO_4$  0,2N .



**Εικόνα 3.13: Μέτρηση TKN - Σωλήνες αμέσως μετά τη χώνευση**



**Εικόνα 3.14 : Μέτρηση TKN - Σωλήνες σε θερμοκρασία δωματίου**

### ➤ Προσδιορισμός αμμωνιακών

#### **Σημασία μέτρησης**

Κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης και ειδικότερα κατά τη θερμόφιλη φάση σχηματίζονται αμμωνιακά. Η δημιουργία τους εξαρτάται κατά κύριο λόγο απ' το αρχικό υπόστρωμα και συγκεκριμένα απ' το διαθέσιμο άζωτο των αρχικών υλικών. Κατά τη θερμόφιλη φάση αυξάνεται η συγκέντρωση των αμμωνιακών λόγω της διάσπασης του αζώτου του αρχικού υποστρώματος. Εν συνεχεία, η συγκέντρωση των αμμωνιακών μειώνεται λόγω της μετατροπής τους σε νιτρικά. Υψηλές συγκεντρώσεις αμμωνιακών επηρεάζουν το τελικό προϊόν και το καθιστούν αδύνατο για χρήση στη γεωργία.<sup>[8]</sup>

#### **Διαδικασία**

Το αμμωνιακό άζωτο από ανόργανες πηγές, όπως θειικό αμμώνιο [  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  ] ή δισόξινο φωσφορικό αμμώνιο [  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$  ] προσδιορίζεται από απευθείας απόσταξη αμμωνίου. Γίνεται απόσταξη με ατμό, χωρίς να προηγείται χώνευση του δείγματος. Το NaOH μετατρέπει

το αμμώνιο ( $\text{NH}_4^+$ ) σε πτητική αμμωνία ( $\text{NH}_3$ ) η οποία όπως και στην περίπτωση της μέτρησης TKN δεσμεύεται στο απόσταγμα με χρήση βορικού οξέος. Ακολουθεί τιτλοδότηση του αποστάγματος με θειικό οξύ. Για δείγματα που περιέχουν και αμμώνιο και νιτρικά ( $\text{NO}_3^-$ ), πρώτα προσδιορίζεται το αμμωνιακό άζωτο με απόσταξη. Για χρήση του κατάλληλου βάρους στερεού δείγματος στους σωλήνες καθώς και των συνθηκών της απόσταξης (ποσότητα  $\text{NaOH}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  και βορικού οξέος), χρησιμοποιήθηκε όπως και στη μέτρηση TKN, η εφαρμογή KjelOptimizer.

➤ **Προσδιορισμός P, K, Na, Ca, Mg, Fe, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn, Cd**

Ο φώσφορος προσδιορίστηκε με χρήση σπεκτροφωτόμετρου.



**Εικόνα 3.15: Φασματοφωτόμετρο ατομικής απορρόφησης Agilent AA240FS**

Έγινε στοιχειακή ανάλυση των μετάλλων με τη μέθοδο της φασματοσκοπίας ατομικής απορρόφησης φλόγας (FAAS) στο Εργαστήριο Γενικής Χημείας του τομέα Χημικών Επιστημών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Χρησιμοποιήθηκαν ξηρά αλεσμένα και κοσκινισμένα δείγματα από το φούρνο των  $40^\circ\text{C}$ , όπως έγινε και για τις μετρήσεις TOC και TKN. Τα δείγματα υπέστησαν αραιώση 1:50 σε κωνικές φιάλες, και από εκεί γινόταν η δειγματοληψία για τις αναλύσεις. Πόσότητα από κάθε φιάλη τοππυθιήθηκε σε σύστημα χώνευσης με μικροκύματα για 1 ώρα πριν την εισαγωγή δείγματος στο φασματοφωτόμετρο.

Παρατίθενται παρακάτω τα όρια ανίχνευσης της μεθόδου για κάθε μέταλλο :

**Πίνακας 3.9 : Όρια ανίχνευσης μετάλλων με FAAS**

ΜΕΤΑΛΛΟ	ΕΥΡΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ
<b>Cr</b>	LOQ – 250 mg/kg
<b>Cu</b>	LOQ – 200 mg/kg (χωρίς αραίωση) LOQ – 1000 mg/kg (με αραίωση 1/5)
<b>Mn</b>	LOQ – 100 mg/kg (χωρίς αραίωση) LOQ – 1000 mg/kg (με αραίωση 1/10)
<b>Ni</b>	LOQ – 300 mg/kg
<b>Cd</b>	LOQ – 50 mg/kg (χωρίς αραίωση) LOQ – 100 mg/kg (με αραίωση 1/2)
<b>Pb</b>	LOQ – 500 mg/kg
<b>Zn</b>	LOQ – 45 mg/kg (χωρίς αραίωση) LOQ – 2250 mg/kg (με αραίωση 1/50)

➤ **Προσδιορισμός φυτοτοξικότητας, φυτοθρεπτικότητας, δείκτη βλάστησης (GI)**

Για τη μέτρηση της φυτοτοξικότητας χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της βλάστησης των σπόρων – seed germination , που είναι και η συχνότερη μέθοδος αξιολόγησης της φυτοτοξικότητας [17]. Σε τρυβλία petri που περιείχαν 4 στρώσεις διηθητικού χαρτιού τοποθετήθηκαν 10 ml εκχυλίσματος του τελικού προϊόντος (κόμποστ) και 10 σπόροι κάρδαμου (*Lepidum sativum*) διασπείρονται πάνω από αυτό, σε διακριτή απόσταση μεταξύ τους. Ως τυφλό χρησιμοποιείται ένα τρυβλίο με απιονισμένο νερό 10ml. Τα τρυβλία τυλίγονται με parafilm ώστε να αποφευχθούν απώλειες υγρασίας και τοποθετούνται σε ξηρό και σκιερό μέρος.

Χρησιμοποιούνται 4 τυφλά δείγματα και 4 επαναλήψεις από κάθε δείγμα κόμποστ. Μετά από 4 ημέρες μετράται το ποσοστό των σπόρων που φύτρωσαν σε σχέση με το σύνολο τους μέσα σε κάθε τρυβλίο ( Seed Germination% ), καθώς και ο μέσος όρος του μήκους της ρίζας όλων των τρυβλίων (Root average) , για το κόμποστ και το τυφλό αντίστοιχα . Ο δείκτης βλάστησης , GI, προσδιορίζεται σαν συνάρτηση των μεγεθών Seed Germination & Relative Growth ως εξής :

$$\text{Seed Germination \%} = \frac{\text{No seeds germinated in petri}}{\text{No overall seeds}} \cdot 100\%$$



$$\text{Relative Growth \%} = \frac{\text{Root average in compost samples}}{\text{Root average in water}} \cdot 100\%$$

$$\text{GI \%} = \text{Seed Germination \%} * \text{Relative Growth \%} / 100$$

Παρόμοιες μέθοδοι χαρακτηρισμού χρησιμοποιούνται σε πολλές μελέτες. [Tiquia et al,1998, Shelim et al,2012]

Για την αξιολόγηση του κόμποστ , χρησιμοποιήθηκαν διάφορες συγκεντρώσεις εκχυλισμάτων , και εξετάστηκε πως μεταβάλλεται η τιμή του δείκτη βλάστησης GI με τη συγκέντρωση. Συγκεκριμένα , εξετάστηκαν οι συγκεντρώσεις 3,33% w/w ( 10 g compost σε ξηρή βάση σε διάλυμα με απιονισμένο νερό τελικού όγκου 300mL) , 6,66% w/w ( 20 g compost σε ξηρή βάση σε διάλυμα με απιονισμένο νερό τελικού όγκου 300mL) , 10 % w/w ( 30 g compost σε ξηρή βάση σε διάλυμα με απιονισμένο νερό τελικού όγκου 300mL) και 16,66 % w/w ( 50 g compost σε ξηρή βάση σε διάλυμα με απιονισμένο νερό τελικού όγκου 300mL). Η προσέγγιση αυτή ακολουθήθηκε και από άλλους ερευνητές που αξιολόγησαν κόμποστ (Mitelut and Popa et al. , 2010) .

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ένα τεστ φυτοτοξικότητας στο κόμποστ #1 - forbi - για συγκεντρώσεις εκχυλίσματος 3,33% και 16,66% , που είναι τα ανοιχτά καφέ και τα σκούρα καφέ τρυβλία αντίστοιχα. Τα λευκά τρυβλία περιέχουν απιονισμένο νερό.



**Εικόνα 3.16 : Τεστ φυτοτοξικότητας**



## 4. Αποτελέσματα

Όπως προαναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2 , υπάρχουν συγκεκριμένες παράμετροι αξιολόγησης κόμποστ , που φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.

Κατηγορία	Κριτήριο	Παράμετροι ελέγχου
Φυσικές	Χρώμα	Χρωματισμός
	Οσμή	Έκλυση και ένταση δυσάρεστων οσμών
	Θερμοκρασία	Σταθεροποίηση της θερμοκρασίας
	Υγρασία	Περιεκτικότητα υγρασίας
	Συγκράτηση νερού	Προσδιορισμός της υδατοϊκανότητας
	Αδρανή ύλη	Περιεκτικότητα σε αδρανή υλικά
	Μέγεθος σωματιδίων	Κοκκομετρία
Χημικές	Θρεπτικά συστατικά	Αναλογία C/N, Άζωτο ( $\text{NH}_4^+$ , $\text{NO}_3^-$ , Λόγος $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ )
	Ποιότητα οργανικής ουσίας	Σύνθεση οργανικών: λιγνίνη, κυτταρίνη, σύνθετοι υδατάνθρακες, λιπίδια, σάκχαρα κ.α.
	Χουμοποίηση	Χαρακτηρισμός χουμικών ενώσεων (π.χ. κατανομή MB), Δείκτες χουμοποίησης (C-HA/C-FA, E <sub>4</sub> /E <sub>6</sub> κ.α) <sup>(1)</sup>
	Ρυπαντές	Βαρέα μέταλλα και επίμονες οργανικές ενώσεις
	Υδατοδιαλυτότητα εκχυλίσματος	pH, ηλεκτρική αγωγιμότητα κ.α.
Βιολογικές	Παθογόνοι μικροοργανισμοί	Συνθήκες θερμοκρασίας -χρόνου Προσδιορισμός συγκέντρωσης παθογόνων
	Μικροβιολογική δραστηριότητα	Αναπνευστικές παράμετροι (π.χ. πρόσληψη O <sub>2</sub> , κατανάλωση O <sub>2</sub> , παραγωγή CO <sub>2</sub> , έλεγχος αυτοθέρμανσης), Ενζυμική δραστηριότητα, Περιεχόμενο ATP <sup>(2)</sup> , Μικροβιακή βιομάζα, Δυναμική αζώτου (διεργασίες ανοργανοποίησης-ακινητοποίησης)
	Φυτοτοξικότητα	Βλαστικότητα και έλεγχος ανάπτυξης φυτών

Εικόνα 4.1 : Ενδεικτικές παράμετροι ελέγχου της ποιότητας του κόμποστ που εξετάστηκαν

Οι τονισμένες παράμετροι είναι αυτές που στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εξετάστηκαν όσον αφορά το τελικό προϊόν που παράχθηκε.

### 4.1 Οργανοληπτικές παράμετροι (χρώμα, οσμή , μέγεθος σωματιδίων )

#### Χρώμα

##### Forbi

Το χρώμα του υλικού πριν και μετά τη βιοσταθεροποίηση φαίνεται στην παρακάτω εικόνα .



**Εικόνα 4.2 : Forbi πριν και μετά την κομποστοποίηση**

Είναι φανερό πως το τελικό προϊόν έχει χρώμα σκούρο καφέ προς μαύρο . Σύμφωνα με το TMECC , το κόμποστ κρίνεται ώριμο από άποψη χρώματος.

#### Forbi&Prunings



**Εικόνα 4.3 : Forbi&prunings πριν και μετά την κομποστοποίηση**

Είναι φανερό πως το τελικό προϊόν έχει χρώμα σκούρο καφέ προς μαύρο. Σύμφωνα με το τεστ χρώματος του TMECC , το κόμποστ κρίνεται ώριμο από άποψη χρώματος.

#### **Οσμή**

Σύμφωνα με το TMECC και άλλους ερευνητές , ένα ώριμο σταθεροποιημένο τελικό προϊόν κομποστοποίησης πρέπει να έχει οσμή παρόμοια με αυτή του χώματος , χωρίς την υπόνοια μούχλας, αλλά ούτε και αμμωνίας , καθώς αυτό θα σήμαινε αναερόβιες συνθήκες. Η τελική αξιολόγηση της οσμής των 2 κόμποστ πληρούσε αυτά τα κριτήρια.

## Μέγεθος σωματιδίων

Σύμφωνα με οδηγίες χρήσης κόμποστ σε διάφορες εφαρμογές , η κοκκομετρία του τελικού υλικού ποικίλει ανάλογα τη χρήση και το σκοπό της εφαρμογής του κόμποστ. Ένα τεστ αξιολόγησης της κοκκομετρίας των σωρών είναι το κοσκίνισμα σε κόσκισμα των 16 mm , και ο υπολογισμός του ποσοστού του υλικού που είναι πάνω από 16mm . Σε αυτό το τεστ , το κόμποστ με το forbi έδειξε πως το 60% του υλικού είναι πάνω από τα 16mm , ενώ για τη σωρό με τα κλαδέματα το ποσοστό αυτό ανήλθε στο 70%, λόγω των κλαδιών του αρχικού υλικού. [compostforsoils.com]. Compost μικρότερης κοκκομετρίας θεωρείται καλύτερο ως προς την απελευθέρωση των θρεπτικών συστατικών του λόγω μεγαλύτερης ειδικής επιφάνειας.

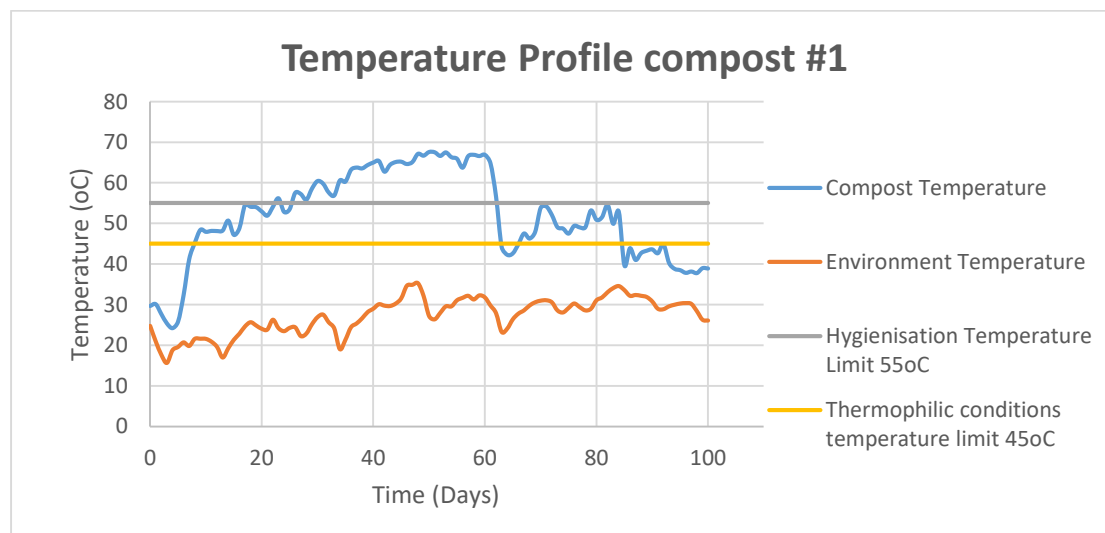
## 4.2 Διαγράμματα

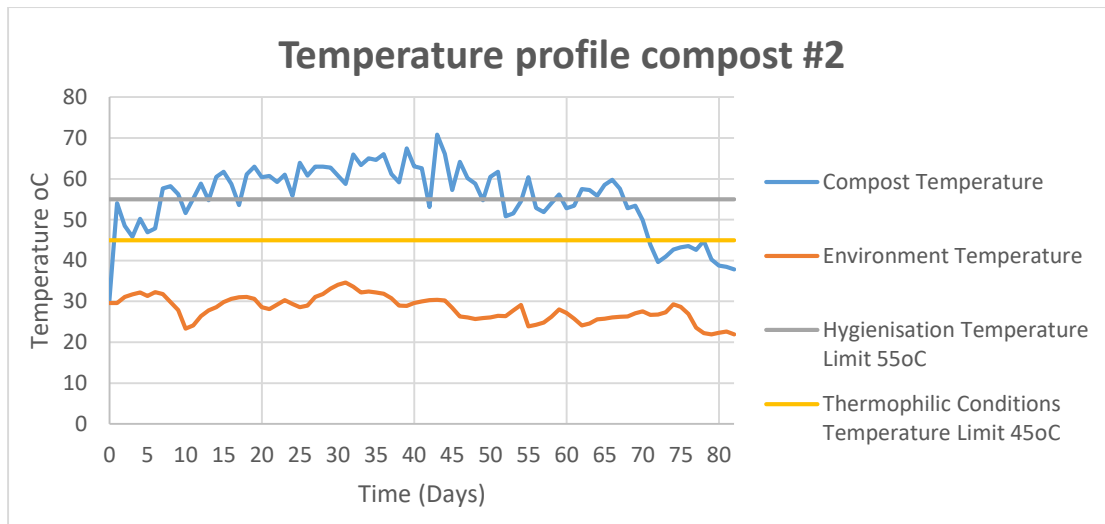
Παρακάτω παρουσιάζονται διαγράμματα θερμοκρασίας, υγρασίας, pH, ηλεκτρικής αγωγιμότητας , πτητικών στερεών (VS), ολικού οργανικού άνθρακα (TOC) , αζώτου κατά kjeldahl (TKN) , λόγου C/N και φυτοτοξικότητας συναρτήσει του χρόνου. Στα διαγράμματα αυτά εξετάζονται οι 2 πρώτες σωροί (forbi και forbi&runings) , όπου το compost #1 είναι η σωρός με το forbi και το compost #2 η σωρός με το forbi και τα κλαδέματα.

Επιπλέον παρουσιάζονται και πίνακες που προκύπτουν από τις αναλύσεις που έγιναν για την περιεκτικότητα των 2 αρχικών υλικών και τελικών ώριμων κόμποστ σε μέταλλα και φώσφορο, καθώς και διαγράμματα από τα τεστ φυτοθρεπτικότητας.

Να αναφερθεί πως στους πίνακες που ακολουθούν , ο συμβολισμός #1 αναφέρεται στο compost με πρώτη ύλη το forbi, και ο συμβολισμός #2 στο compost με πρώτη ύλη forbi και κλαδέματα.

## Θερμοκρασία





Οι θερμοκρασίες που αναπτύχθηκαν είναι στο εύρος των βέλτιστων θερμοκρασιακών τιμών για τη μεγαλύτερη διάρκεια του χρόνου παραμονής του υποστρώματος στον κομποστοποιητή. Το εύρος αυτό των τιμών, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, ορίζεται μεταξύ 43-65 °C (Εικόνα 4.4).

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

**Εικόνα 4.4 :** Συνθήκες θερμοκρασίας-χρόνου κατά την κομποστοποίηση για την υγειονομοποίηση του κόμποστ προερχόμενο από ιλύ, σύμφωνα με τις εθνικές προδιαγραφές διαφόρων χωρών

Κατά τη φάση της ενεργής κομποστοποίησης, θα πρέπει να διασφαλίζεται η υγειονομοποίηση του υλικού, δεδομένου ότι τα βιοαπόβλητα περιλαμβάνουν υλικά ζωικής προέλευσης. Σύμφωνα με τον Κανονισμό (ΕΚ) 1069/2009 περί υγειονομικών κανόνων για ζωικά υποπροϊόντα και παράγωγα προϊόντα που δεν προορίζονται για κατανάλωση από τον άνθρωπο (στα οποία εμπίπτουν τα προδιαλεγμένα βιοαπόβλητα), προβλέπονται τα εξής παρακάτω προφίλ χρόνου-θερμοκρασίας .

- 65 °C ή περισσότερους για τουλάχιστον 5 ημέρες
- 60 °C ή περισσότερους για τουλάχιστον 7 ημέρες
- 55 °C ή περισσότερους για τουλάχιστον 14 ημέρες

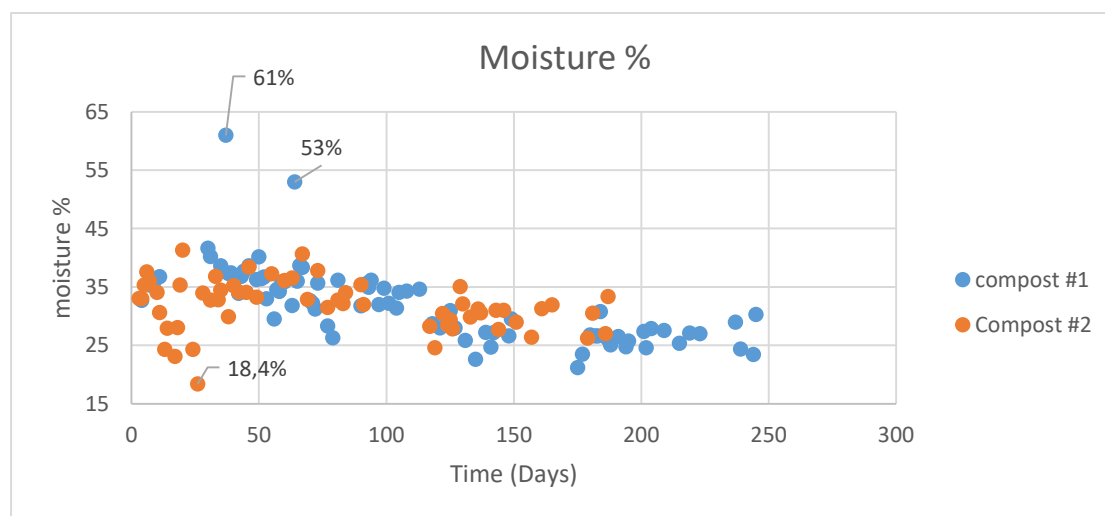
Εκτιμάται ότι επιτυγχάνεται η απαιτούμενη συνθήκη των 55°C για τουλάχιστον 14 ημέρες κατά τη θερμοφιλή φάση της διεργασίας και για τα 2 κόμποστ, οπότε κρίνεται πως έγινε επιτυχής υγειονοποίηση των 2 κόμποστ. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η χρονική διάρκεια της θερμοφιλής φάσης και της φάσης υγειονοποίησης κάθε κόμποστ .

**Πίνακας 4.1 : Χρονική διάρκεια θερμοφιλής φάσης και φάσης υγειονοποίησης κόμποστ**

	Διάρκεια Θερμοφιλής φάσης T>45°C	Διάρκεια για T > 55°C
<b>Compost #1</b>	73 ημέρες	37 ημέρες
<b>Compost #2</b>	69 ημέρες	53 ημέρες

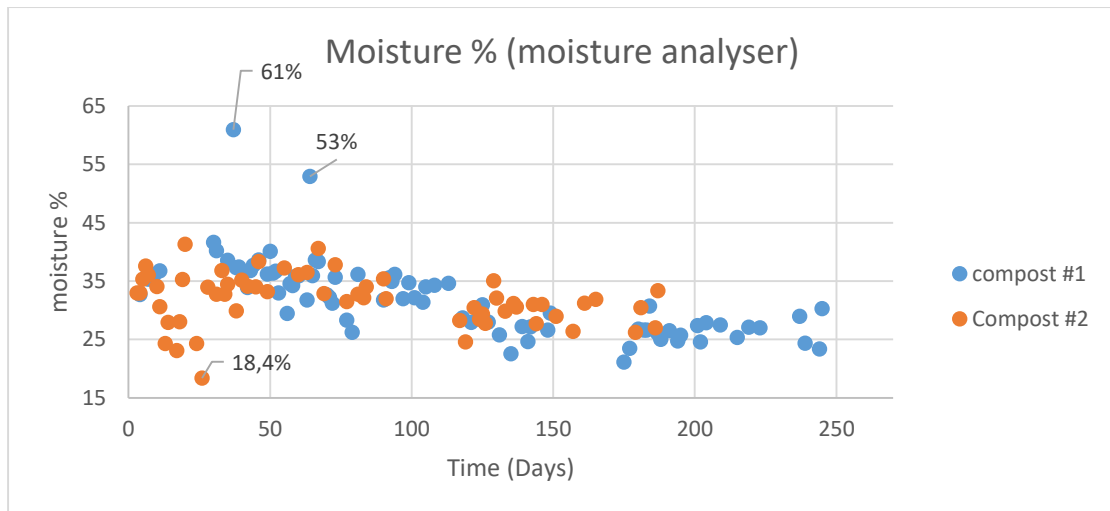
Οι υψηλές θερμοκρασίες στον οικιακό κομποστοποιητή διατηρούνται για όσο χρονικό διάστημα υπάρχει άμεσα διαθέσιμο προς αφομοίωση υπόστρωμα το οποίο ενισχύει τη μικροβιακή δραστηριότητα. Μετέπειτα η θερμοκρασία μειώνεται σταδιακά με αποτέλεσμα οι εναπομείνουσες οργανικές ενώσεις να μεταβολίζονται με βραδύτερο ρυθμό από τους μικροοργανισμούς και η παραγόμενη θερμότητα να μην μπορεί να αναπληρώσει τις απώλειες. Κατά συνέπεια η θερμοκρασία του υποστρώματος μειώνεται και προσεγγίζει τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος υποδηλώνοντας τη σταθεροποίηση του οργανικού κλάσματος.

### Υγρασία



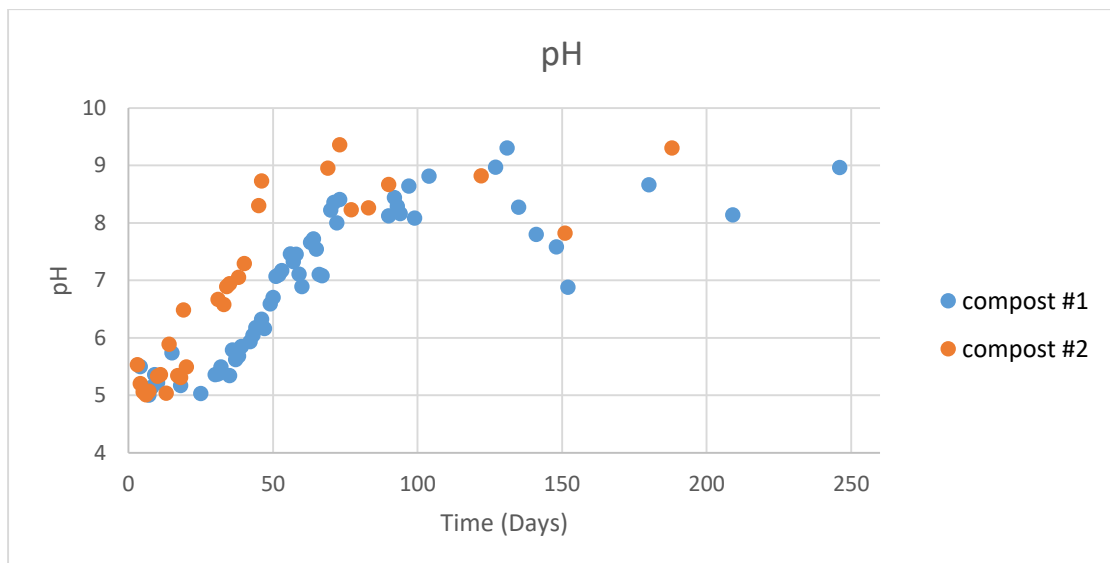
✓ Τα 2 κόμποστ καταλήγουν σε τιμές υγρασίας μεταξύ 25% και 35%

Η συνολική εικόνα της πορείας της υγρασίας των σωρών παρατίθεται και το διάγραμμα υγρασίας – χρόνου που προκύπτει από τις μετρήσεις στο θερμοζυγό.



- ✓ Το κόμποστ Νο 2 (forbi & prunings) που παρουσιάζει μεγάλη ετερογένεια , βλέπουμε πως τις πρώτες 50 μέρες κινείται σε μεγάλο εύρος τιμών υγρασίας (22,5% - 35,5%). Αυτό αποδίδεται στην ετερογένεια του υλικού . Μετά την πάροδο 50 ημερών ωστόσο βλέπουμε την πλειοψηφία των τιμών να βρίσκονται στο εύρος 35% έως 40 % , γεγονός που αντανακλά και την ομοιογένεια που αποκτά το υλικό με την πάροδο της κομποστοποίησης.
- ✓ Η σωρός με το forbi σταθεροποιείται περίπου στο 30%, ενώ η σωρός με το forbi και τα κλαδέματα στο 35% υγρασίας.

### pH



- ✓ Και οι 2 σωροί ξεκινούν με pH κοντά στο 5 το οποίο ανεβαίνει με το χρόνο.
- ✓ Η 1<sup>η</sup> σωρός (forbi) εμφανίζει pH μεγαλύτερο του 8 από την ημέρα 70 και μετά , ενώ η 2<sup>η</sup> σωρός από τη 50η ημέρα και μετά.
- ✓ Το pH και των 2 σωρών σταθεροποιείται κοντά στο 9 κατά τη φάση ωρίμανσης.

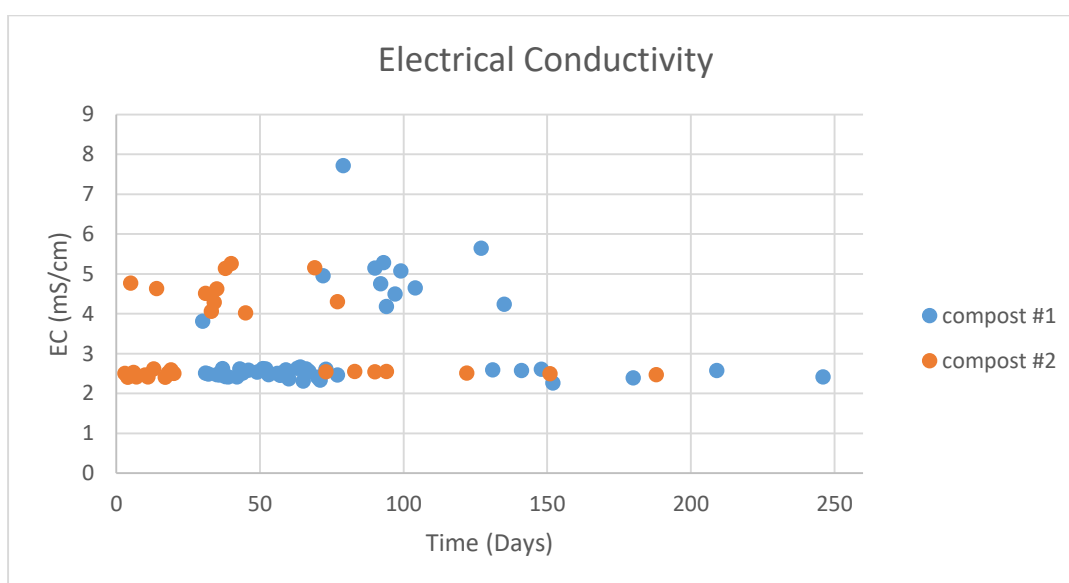
Το pH του τελικού προϊόντος σταθεροποιήθηκε στις τιμές που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα :

**Πίνακας 4.2 : Τελικές τιμές pH**

pH ώριμου κόμποστ	
Forbi	8.69
Forbi&prunings	8.93

- ✓ Το βέλτιστο εύρος pH θεωρείται 5.0 – 8.5. Τα 2 κόμποστ εμφανίζουν pH λίγο κάτω από το 9 , οπότε πρόκειται για ένα τελικό προϊόν πιο βασικό από το επιθυμητό . Απαιτείται να γίνουν ενέργειες για τη ρύθμιση του pH στο εύρος των προτεινόμενων τιμών.

### Ηλεκτρική αγωγιμότητα



- ✓ Η πλειοψηφία των τιμών φαίνεται να είναι σταθερές και για τα 2 κόμποστ περίπου στα 2,5 mS/cm , με κάποιες αποκλίσεις στα 4 με 6 mS/cm σε κάποιες μετρήσεις. Οι μετρήσεις αποτελούν υποεκτίμηση της πραγματικής τιμής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, καθώς κατά τη μέτρηση τα δείγματα αφήνονταν να αναδευτούν για 3 μόλις λεπτά και όχι 30 όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία. Ο παράγοντας του χρόνου ανάδευσης όπως φαίνεται από τη μεθοδολογία των αναλύσεων είναι ιδιαίτερα σημαντικός για τη μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας , καθώς δίνεται αρκετός χρόνος στα ιόντα αλάτων να εξαχθούν από το στερεό δείγμα στο υγρό. Έγιναν μετρήσεις ηλεκτρικής αγωγιμότητας στα τελικά κόμποστ με τη μέθοδο που αναφέρεται στη βιβλιογραφία (επαρκής χρόνος ανάδευσης 30 λεπτά) και τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω :

**Πίνακας 4.3 : Τελικές τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας**

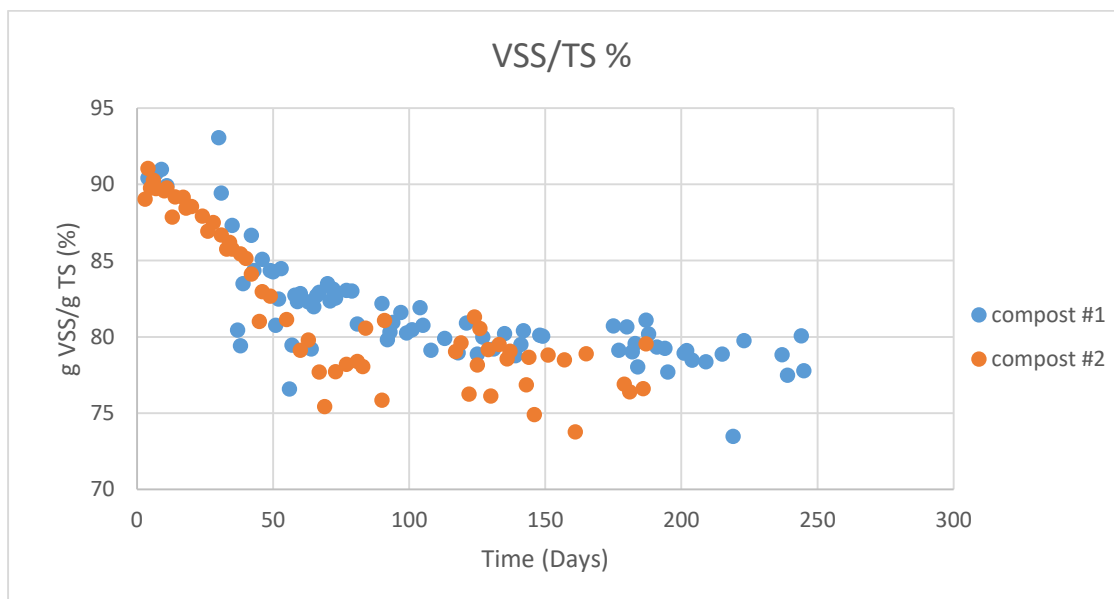
Αγωγιμότητα ώριμου κόμποστ (mS/cm)	
Forbi	6.31
Forbi&prunings	6.92



- ✓ Ασφαλές εύρος τιμών ηλεκτρικής αγωγιμότητας θεωρείται το 0 - 4 mS/cm . Για κόμποστ με ηλεκτρική αγωγιμότητα πάνω από τα 4 mS/cm , απαιτείται προσεκτική χρήση του σε χώματα που δεν παρουσιάζουν ήδη αυξημένη περιεκτικότητα σε άλατα [compostforsoils.com]. Ωστόσο σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία η αγωγιμότητα για κόμποστ από αστικά στερεά απόβλητα κινείται στο εύρος 3,69 mS/cm με 7,49 mS/cm.

### Πτητικά στερεά σε ξηρή βάση (VS/TS%)

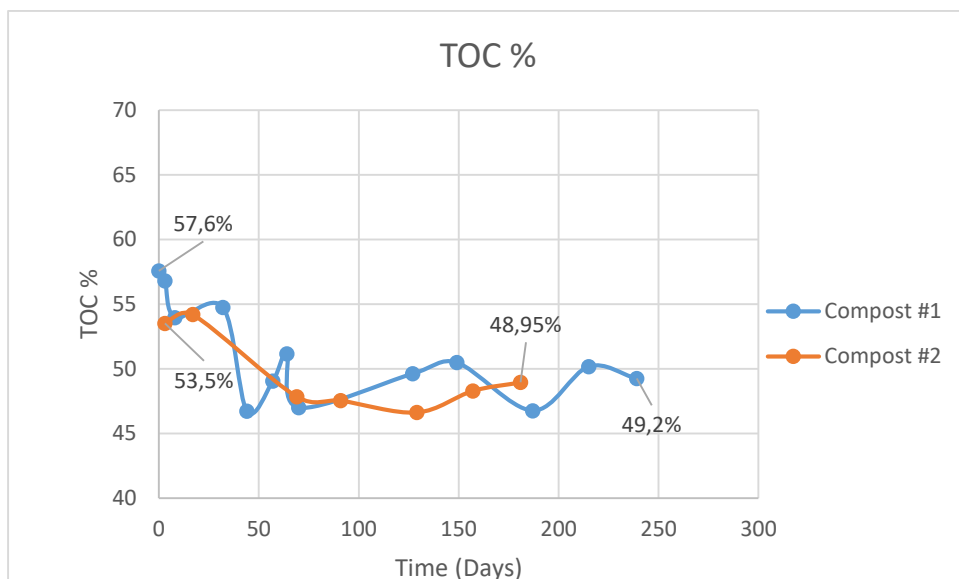
Επειδή η σταθεροποίηση του κόμποστ είναι μια διαδικασία που έχει σχέση με την ποσότητα και την αποσύνθεση του οργανικού υλικού, το περιεχόμενο σε πτητικά στερεά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης της πορείας της αποσύνθεσης.



- ✓ Και τα 2 κόμποστ έχουν τελικό %VS/g ξηρού μεταξύ 75 – 80% ξεκινώντας από πάνω από 90 % .
- ✓ Η μείωση των πτητικών στερεών είναι μια ένδειξη αποδόμησης των οργανικών πτητικών ενώσεων και ομαλής διεξαγωγής της διαδικασίας βιοσταθεροποίησης.

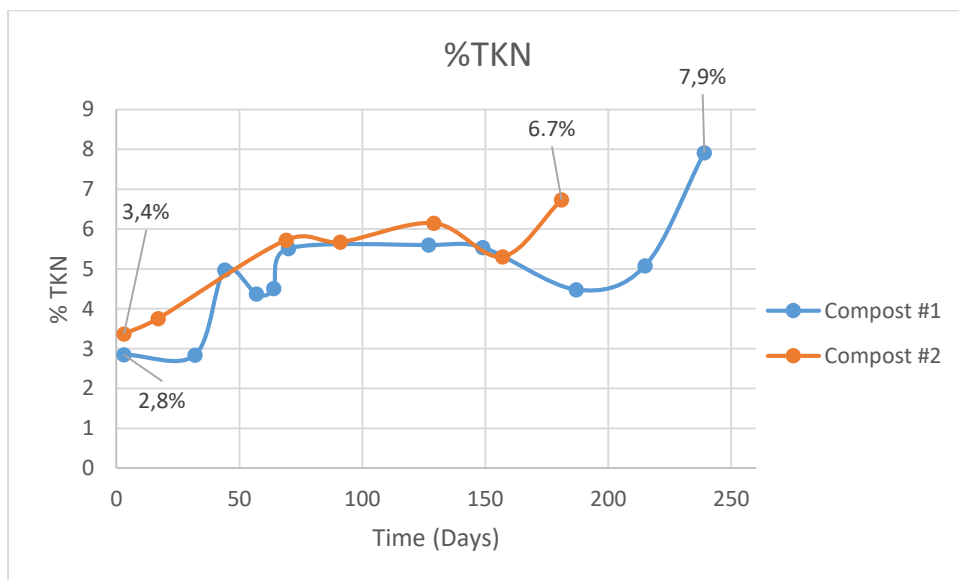


### Ολικός οργανικός άνθρακας (TOC)



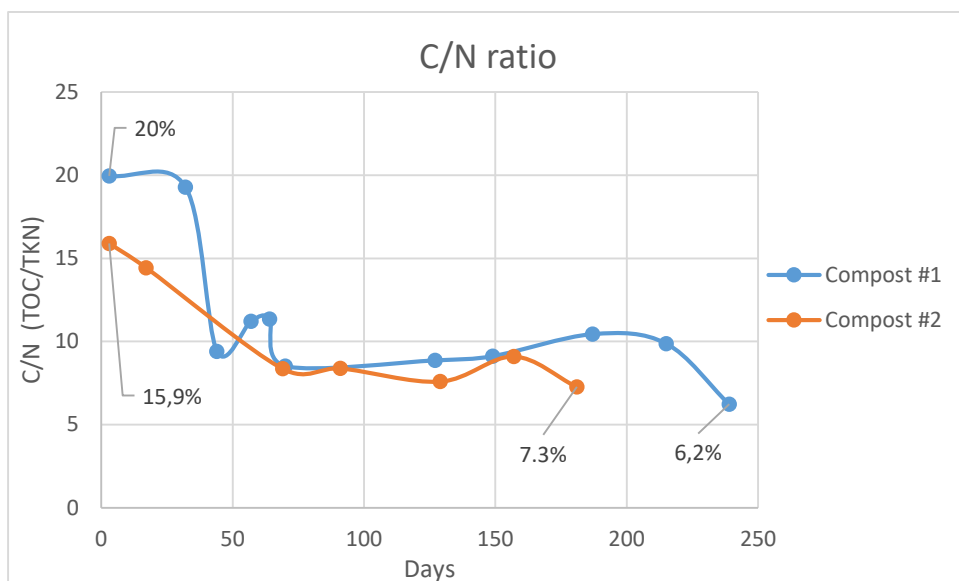
- ✓ Παρατηρείται πτώση του ολικού οργανικού άνθρακα στη διάρκεια της βιοσταθεροποίησης λόγω κατανάλωσης από τους μικροοργανισμούς και μετατροπής σε ανόργανο, αλλά η πτώση αυτή χαρακτηρίζεται μικρή.
- ✓ Η τελική τιμή %TOC και για τα 2 κόμποστ είναι πανομοιότυπη κοντά στο 49%.

### Άζωτο κατά Kjeldahl (TKN)



- ✓ Λόγω ταχύτερης κατανάλωσης του άνθρακα, το ποσοστό του αζώτου αναμενόταν είτε να παραμένει σταθερό είτε να παρουσιάζει αύξηση, όπως και συμβαίνει.
- ✓ Παρατηρούνται υψηλές τιμές αζώτου στα τελικά προϊόντα, καθώς η βιβλιογραφία αναφέρει τυπικές τιμές TKN αζώτου μέχρι 3%

## Λόγος C/N



- ✓ Ο λόγος C/N ακολουθεί καθοδική τάση , γεγονός που δείχνει ότι η διαδικασία βιοσταθεροποίησης διεξήχθη ομαλά.
- ✓ Οι αρχικές τιμές C/N των 2 πρώτων υλών κατά την έναρξη της διαδικασίας συμφωνούν με τη βιβλιογραφία, σύμφωνα με την οποία η τυπική τιμή C/N απορριμμάτων τροφών είναι 14-16 και για κλαδέματα 16 (Diaz et. al) .<sup>[8]</sup>
- ✓ Η μείωση του λόγου οφείλεται στην οξείδωση της οργανικής ύλης και στο γεγονός ότι η μείωση του οργανικού άνθρακα είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη μείωση του αζώτου (λόγω απωλειών αμμωνίας) στο υπόστρωμα. Αυτό γίνεται φανερό από τη σημαντική μείωση του λόγου C/N.
- ✓ Η τελική τιμή του λόγου C/N είναι και η χαμηλότερη του διαγράμματος και για τα 2 κόμποστ. Συγκεκριμένα , για το compost #1 , ισχύει C/N = 6,2 % και για το compost #2 προκύπτει C/N = 7,3 Με βάση την διεθνή βιβλιογραφία το ώριμο κόμποστ από οικιακά οργανικά απόβλητα πρέπει να έχει λόγο από 10 έως 18 για να θεωρηθεί καλής ποιότητας [Μαργαρίτης 2012]. Καμία από τις 2 σωρούς δε πληρεί αυτό το κριτήριο.
- ✓ Στο 2<sup>ο</sup> κόμποστ με τα κλαδέματα βλέπουμε μεγαλύτερη τιμή C/N ίσως της μεγαλύτερης δυσκολίας βιοαποδόμησης που παρουσίαζαν τα ξύλα που είχε η σωρός.

### Περιεκτικότητα σε αμμωνιακό άζωτο

Το αμμωνιακό άζωτο από ανόργανες πηγές του αρχικού υλικού forbi καθώς και των 2 τελικών ώριμων κόμποστ προσδιορίστηκε . Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα :

**Πίνακας 4.4 : Περιεκτικότητα σε αμμωνιακό άζωτο**

Sample	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> d.b. (mg/kg)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> %	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> /TKN %
Forbi	1762	0.18	-
Comp#1	2640	0.26	3.3
Comp#2	3293	0.33	4.9

Το άζωτο κατά kjeldahl TKN είναι εξ ορισμού το άθροισμα οργανικού και αμμωνιακού αζώτου (αμμωνία , μορφές αμμωνίου ). Στην 3<sup>η</sup> στήλη του παραπάνω πίνακα φαίνεται το ποσοστό αμμωνιακού αζώτου ως προς το άζωτο TKN. Παρατηρείται πως το αμμωνιακό άζωτο κατέχει ένα πολύ μικρό ποσοστό του αζώτου TKN της τάξης 3 με 5 %. Σύμφωνα με τιμές της βιβλιογραφίας οστόσω , το αμμωνιακό άζωτο σε κόμποστ εμπορίου δε πρέπει να ξεπερνάει τα 500mg/kg . Επομένως τα 2 τελικά κόμποστ έχουν αρκετά μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε αμμωνιακό άζωτο από το επιθυμητό.

**Περιεκτικότητα σε θρεπτικά συστατικά**

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα αποτελέσματα από τις αναλύσεις αζώτου TKN , φωσφόρου, καλίου , νατρίου , ασβεστίου , μαγνησίου και σιδήρου για την έναρξη της κομποστοποίησης και το τέλος και για κάθε κόμποστ .

**Πίνακας 4.5 : Περιεκτικότητα σε θρεπτικά συστατικά (mg/kg)**

	TKN	P	K	Na	Ca	Mg	Fe
forbi		2768	13339	3912	12131	1458	291
#1d32	28395	3449	-	-	-	-	-
#1 d239	79125	7704	32734	9385	57319	4514	1700
#2d3	33680	4398	26027	3215	23913	3433	3592
#2d181	67331	8648	40583	8469	58641	5520	2979

\* d32 σημαίνει ημέρα 32, ομοίως και για τους υπόλοιπους παρόμοιους συμβολισμούς

Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται κάποιες τυπικές τιμές των παραπάνω στοιχείων για κόμποστ εμπορίου , από 2 διαφορετικές πηγές :

LABORATORY: Soil Control Lab; 42 Hangar Way; Watsonville, CA 95076 tel: 831.724.5422 fax: 831.724.3188			
Compost Parameters	Reported as (units of measure)	Test Results	Test Results
Plant Nutrients:	%, weight basis	%, wet weight basis	%, dry weight basis
Nitrogen	Total N	1.0	2.3
Phosphorus	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.36	0.80
Potassium	K <sub>2</sub> O	0.37	0.82
Calcium	Ca	4.2	9.4
Magnesium	Mg	0.16	0.37

**Εικόνα 4.5 : Compost technical data sheet , US Composting Council , Seal Composting Assurance**

Property	Forage Trial	Arable Trial	Trace Element Limits	
			Alvarenga <i>et al.</i> [15] <sup>4</sup>	BioGro NZ <sup>5</sup>
pH	7.7	-		
Organic matter (%)	49.1	37.1		
Total C (g·kg <sup>-1</sup> ) <sup>1</sup>	285	215		
Total N (g·kg <sup>-1</sup> ) <sup>1</sup>	25.2	20.6		
C:N ratio	11.3	10.5		
Mineral N (mg·kg <sup>-1</sup> ) <sup>2</sup>	2869	1979		
Total P (g·kg <sup>-1</sup> ) <sup>3</sup>	4.6	4.2		
Total S (g·kg <sup>-1</sup> ) <sup>3</sup>	0.25	2.5		
Total K (g·kg <sup>-1</sup> ) <sup>3</sup>	12.7	14		
Total Ca (g·kg <sup>-1</sup> ) <sup>3</sup>	21	21		
Total Mg (g·kg <sup>-1</sup> ) <sup>3</sup>	3.7	4.3		
Total Na (g·kg <sup>-1</sup> ) <sup>3</sup>	4.9	1.6		
Total Fe (mg·kg <sup>-1</sup> ) <sup>3</sup>	8750	9900		
Total Mn (mg·kg <sup>-1</sup> ) <sup>3</sup>	399	302		
Total Zn (mg·kg <sup>-1</sup> ) <sup>3</sup>	274	459	600	300
Total Cu (mg·kg <sup>-1</sup> ) <sup>3</sup>	39	47	200	60
Total B (mg·kg <sup>-1</sup> ) <sup>3</sup>	26	34		
Total Cr (mg·kg <sup>-1</sup> ) <sup>3</sup>	20.3	27.1	100	150
Total As (mg·kg <sup>-1</sup> ) <sup>3</sup>	15.9	16.9		
Total Pb (mg·kg <sup>-1</sup> ) <sup>3</sup>	254	141.4	120	250
Total Ni (mg·kg <sup>-1</sup> ) <sup>3</sup>	6.4	11.5	50	60
Total Hg (mg·kg <sup>-1</sup> ) <sup>3</sup>	0.07	0.06	1	1
Total Cd (mg·kg <sup>-1</sup> ) <sup>3</sup>	0.47	0.47	1.5	1

<sup>1</sup>: Total N and total C were determined by an automated dry combustion (Dumas) method using a LECO TruSpec<sup>®</sup> C/N analyzer (LECO Corporation, St. Joseph, MO USA) operating at 950 °C; <sup>2</sup>: mineral N extracted in 2 M KCl and determined by standard colorimetric methods [16]; <sup>3</sup>: Nitric/hydrochloric acid digestion followed by determination using Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectroscopy (Thermo Fisher, Waltham, MA, USA); <sup>4</sup>: Proposed limit values for heavy metals in composts and organic wastes used for soil application [15]; <sup>5</sup>: BioGro New Zealand standard.

**Εικόνα 4.6: Τυπικές τιμές συγκέντρωσης θρεπτικών και μετάλλων σε κόμποστ εμπορίου<sup>[19]</sup>**

- ✓ Αρκετά περισσότερη περιεκτικότητα σε άζωτο από τις συνηθισμένες τιμές που είναι ανάμεσα στο 1,5% και 3% .
- ✓ Σημαντικά μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε Κάλιο και Νάτριο απ’ ότι συνηθίζεται στα κόμποστ εμπορίου .
- ✓ Ελαφρά ανεβασμένες τιμές μαγνησίου σε σχέση με τη βιβλιογραφία.
- ✓ Μικρότερη περιεκτικότητα σε σίδηρο από το συνηθισμένο.
- ✓ Ικανοποιητική πηγή ασβεστίου.

### **Ρυπαντές-βαρέα μέταλλα**

Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές σε περιεκτικότητα σε μέταλλα για κόμποστ από οικιακά ζυμώσιμα απορρίμματα (MSW ) και για απορρίμματα μηχανικής και βιολογικής επεξεργασίας (MBT) καθώς και για κόμποστ από διαλογή στην πηγή όπως στην παρούσα περίπτωση.

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

**Εικόνα 4.7 : Μέγιστες και ελάχιστες οριακές τιμές βαρέων μετάλλων στην ΕΕ (mg/kg)<sup>[8]</sup>**

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η περιεκτικότητα των 2 κόμποστ σε βαρέα μέταλλα όπως μετρήθηκαν στο εργαστήριο.

**Πίνακας 4.6 : Συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων (mg/kg)**

<b>Βαρέα μέταλλα (mg/kg)</b>							
	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Mn</b>	<b>Ni</b>	<b>Pb</b>	<b>Zn</b>	<b>Cd</b>
<b>#1 day 1</b>	0	1,2	20,2	0	0	30	0
<b>#1 day 32</b>	0	14,7	25,1	-	-	124	0
<b>#1 d 239</b>	0	43,0	60,6	0,5	7,9	354	0
<b>#2 day 3</b>	0	23,9	74,6	0	0,5	211	0
<b>#2 day 181</b>	0,95	32,9	82,7	0,7	13,5	302	0

Συγκρίνονται οι τιμές της εικόνας με τα ευρωπαϊκά άνω και κάτω όρια και του πίνακα και διαπιστώνεται πως η περιεκτικότητα των 2 τελικών προϊόντων σε βαρέα μέταλλα κρίνεται εντός ορίων και αποδεκτή.

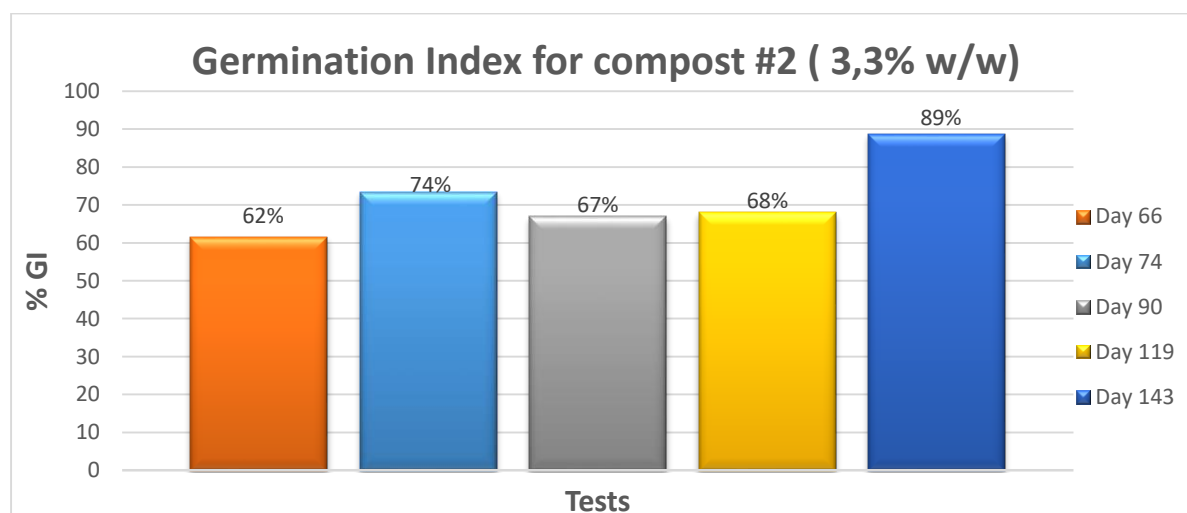
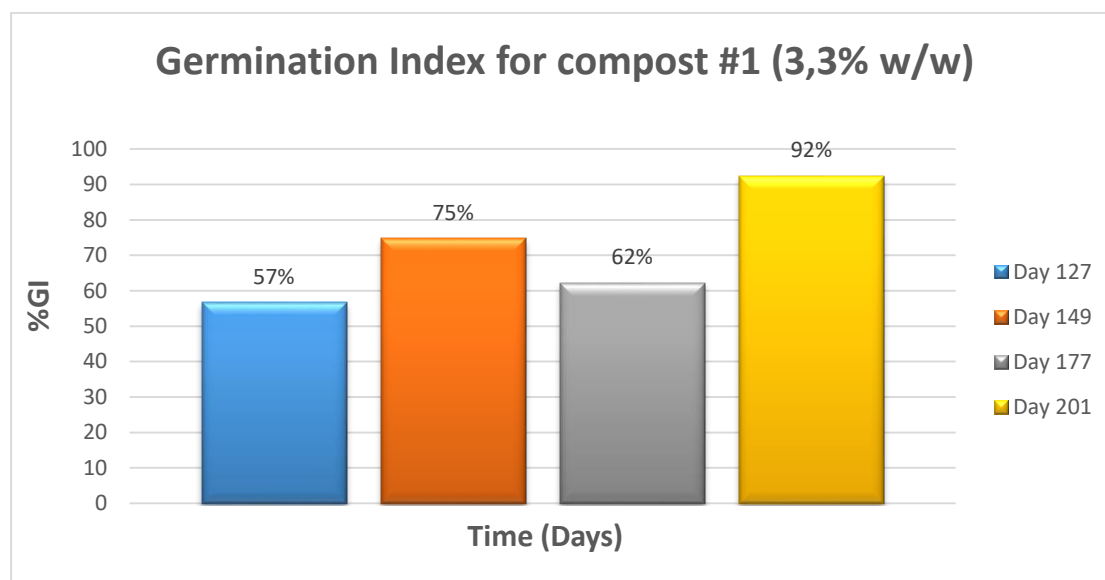
Παρακάτω, φαίνονται συγκεντρωτικά τα παραπάνω :

**Πίνακας 4.7 : Συγκεντρώσεις N,P,K και μετάλλων (mg/kg)**

<b>N , P, K and metals analysis for composts (mg/kg)</b>														
	<b>TKN</b>	<b>P</b>	<b>K</b>	<b>Na</b>	<b>Ca</b>	<b>Mg</b>	<b>Fe</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Mn</b>	<b>Ni</b>	<b>Pb</b>	<b>Zn</b>	<b>Cd</b>
<b>#1 day 1</b>		2768	13339	3912	12131	1458	291	0	1,2	20,2	0	0	30	0
<b>#1 day 32</b>	28395	3449	-	-	-	-	-	0	14,7	25,1	-	-	124	0
<b>#1 d 239</b>	79125	7704	32734	9385	57319	4514	1700	0	43,0	60,6	0,5	7,9	354	0
<b>#2 day 3</b>	33680	4398	26027	3215	23913	3433	3592	0	23,9	74,6	0	0,5	211	0
<b>#2 day 181</b>	67331	8648	40583	8469	58641	5520	2979	0,95	32,9	82,7	0,7	13,5	302	0

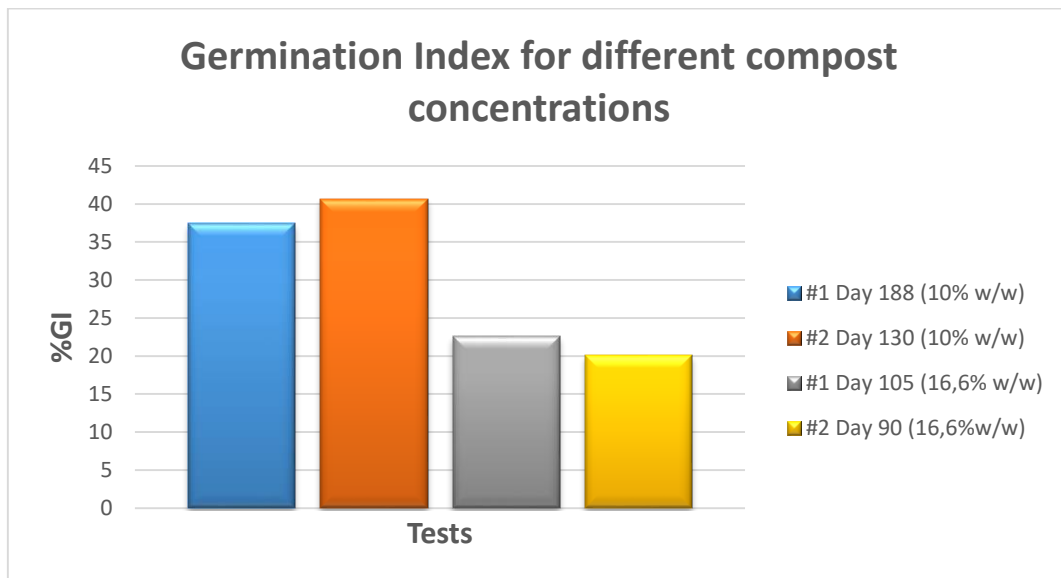
## Φυτοτοξικότητα

Παρακάτω φαίνονται 2 διαγράμματα με μπάρες δεικτών φυτοθρεπτικότητας σε ποσοστά για καθένα από τα 2 κόμποστ. Στο εργαστήριο εξετάστηκαν διάφορες συγκεντρώσεις στερεού κόμποστ διαλυμένου σε απιονισμένο νερό . Παρατηρήθηκε πως σε συμφωνία με τη βιβλιογραφία , οι πιο μεγάλες αραιώσεις στερεού μέσα σε υγρό έδιναν σημαντικά μεγαλύτερους δείκτες φυτοθρεπτικότητας σε σύγκριση με τις μικρότερες αραιώσεις. Στα 2 παρακάτω διαγράμματα επιλέχθηκε η μεγαλύτερη αραιώση που έγινε στη διεξαγωγή αυτής της μέτρησης, 3,3 % w/w.



- ✓ Ο δείκτης φυτοθρεπτικότητας αυξάνει με το χρόνο
- ✓ Συγκρίνοντας δείκτες μεταξύ των 2 κόμποστ συμπεραίνει κανείς πως το 2<sup>ο</sup> κόμποστ είναι αναμφίβολα πιο φυτοθρεπτικό από το 1<sup>ο</sup> . Η τελευταία μπάρα του 1<sup>ου</sup> κόμποστ μπορεί να ξεπερνάει κατά 3% τη μπάρα του 2<sup>ου</sup> , αλλά αν παρατηρήσει κανείς τις ημέρες για καθένα από τα 2 κόμποστ θα διαπιστώσει πως πρόκειται για απόκλιση 60 ημερών . Το 1<sup>ο</sup> κόμποστ είναι 60 ημέρες πιο ώριμο από το πρώτο , οπότε από τη στιγμή που εμφανίζουν σε αυτές τις συνθήκες παρόμοιους δείκτες φυτοθρεπτικότητας , είναι βέβαιο πως το 2<sup>ο</sup> κόμποστ με τα κλαδέματα σε 60 ημέρες θα είναι ακόμα πιο φυτοθρεπτικό .

- ✓ Η παραπάνω παρατήρηση φαίνεται και αν συγκρίνει κανείς την ημέρα 127 του 1<sup>ου</sup> κόμποστ με την ημέρα 119 του 2<sup>ου</sup>. Βλέπουμε πως το 2<sup>ο</sup> κόμποστ έχει GI 68% ενώ το 1<sup>ο</sup> μόλις 56%.



## 5. Συμπεράσματα

Τα 2 κόμποστ που παρήχθησαν θεωρείται πως με τη σωστή επεξεργασία που υπέστησαν και με το ομαλό πέρασμα από κάθε φάση της κομποστοποίησης (θερμόφιλη , μεσόφιλη) , έφτασαν στη φάση ωρίμανσης, όπου απέκτησαν θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Ωστόσο, παρουσιάζουν υψηλά ποσοστά σε άζωτο (%TKN) και αρκετά χαμηλό λόγο C/N (C/N<10) . Επιπλέον χαρακτηρίζονται ελαφρώς αλκαλικά, με αποδεκτή περιεκτικότητα σε άλατα και βαρέα μέταλλα.

Το 2<sup>ο</sup> κόμποστ με τα κλαδέματα και το forbi έχει καλύτερους δείκτες φυτοθρεπτικότητας σε σύγκριση με το 1<sup>ο</sup> κόμποστ , καθώς επίσης συγκρατεί περισσότερη υγρασία , περίπου 35% , στον κυρίως όγκο του και εμφανίζει μικρότερη κοκκομετρία . Αυτοί οι 2 παράγοντες καθιστούν το 2<sup>ο</sup> κομποστ καλύτερο του 1<sup>ου</sup> , και κατ' επέκταση το forbi καταλληλότερο για εφαρμογές συγκομποστοποίησης .

## 6. Προτάσεις για το μέλλον

Σαν μελλοντική εφαρμογή , ως συνέπεια της παραπάνω εργασίας , προτείνεται η κομποστοποίηση forbi και forbi με κλαδέματα σε συνδυασμό με υλικό πλούσιο σε ολικό οργανικό άνθρακα , για μεγαλύτερο αρχικό λόγο C/N. Επιπλέον , θα μπορούσαν να διεξαχθούν και παραπάνω μετρήσεις στο κόμποστ , όπως αναφέρονται παρακάτω :

- Μελέτη της μεταβολής περαιτέρω φυσικοχημικών παραμέτρων όπως συγκέντρωση παραγόμενου αερίου O<sub>2</sub> και CO<sub>2</sub> στο κόμποστ, χημικά απαιτούμενο οξυγόνο(COD) και βιολογικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD)
- Συγκέντρωση σταθερών ενώσεων στο τελικό προϊόν όπως χουμικά/φουλβικά οξέα, χουμίνες



- Βιολογική μελέτη της βιοσταθεροποίησης, με την έννοια της ταυτοποίησης των μικροοργανισμών που συμμετέχουν και επικρατούν σε κάθε στάδιο της κομποστοποίησης

## 7. Βιβλιογραφία

- 1) Αναθεώρηση Εθνικού Σχεδιασμού Διαχείρισης Αποβλήτων , Υπουργείο Περιβάλλοντος , Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής ΥΠΕΚΑ , 03/06/2013
- 2) Αστικά Στερεά Απόβλητα (ΑΣΑ) : Κατηγοριοποίηση, Χαρακτηριστικά, Συλλογή, Μεταφορά και Διαχείριση, Δρ. Σίμος Μαλαμής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, Αθήνα 26/10/2015
- 3) Σημειώσεις για το μάθημα 'Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων και Ιλύος' , Αρχές και Μέθοδοι Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων , Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, Α. Ανδρεαδάκης
- 4) Το νέο θεσμικό πλαίσιο για τη διαχείριση των βιοαποικοδομήσιμων αστικών αποβλήτων: προκλήσεις και προοπτικές για τις τοπικές κοινωνίες , Κάτια Λαζαρίδη Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Τμήμα Γεωγραφίας , 2002
- 5) Νομοθετικό πλαίσιο για τη διαχείριση των στερεών αποβλήτων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων
- 6) Κοινοτική πολιτική και διαχείριση απορριμμάτων στην Ελλάδα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, Ε. Τερζης - Α. Ανδρεαδάκης
- 7) Πεζούλας Ιωάννης , Επεξεργασία οργανικού κλάσματος απορριμμάτων με χρήση πρότυπου οικιακού κομποστοποιητή, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα 2012
- 8) Μαργαρίτης Μάρκος, «Αξιοποίηση του βιοαποδομήσιμου κλάσματος απορριμμάτων με χρήση πρότυπου συστήματος οικιακού τύπου», Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα 2012
- 9) Εθνικό Σχέδιο Διαχείρισης Αποβλήτων (ΕΣΔΑ) , Ιούνιος 2015
- 10) EC (European Commission), (2006). Annex report from the commission to the council and the European parliament on the implementation of community waste legislation Directive 75/442/EEC on waste, Directive 91/689/EEC on hazardous waste, Directive 75/439/EEC on waste oils, Directive 86/278/EEC on sewage sludge and Directive 94/62/EC on packaging and packaging waste Directive 1999/31/EC on the landfill of waste for the period 2001-2003, European Commission, COM(2006) 406 final
- 11) Μιχαλακίδη Σοφία , «Συγκομποστοποίηση αγροτοϋπολειμμάτων/κτηνοτροφικών αποβλήτων καθώς και οικιακών βιοαποβλήτων σε ημιβιομηχανικό κομποστοποιητή» , Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα 2017
- 12) Κομποστοποίηση , Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων και Ιλύος , Δρ. Σίμος , Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών , Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 1/11/2015
- 13) Food Residue Biomass Product as an Alternative Energy Source for the Cement Industry , K. Papanikola<sup>1,4</sup>, K. Papadopoulou<sup>1</sup>, C. Tsiligiannis<sup>2</sup>, I. Fotinopoulou<sup>2</sup>, A. Katsiampoulas<sup>3</sup>, M. Georgiopolou<sup>1</sup>, V. Rontogianni<sup>1</sup>, I. Michalopoulos<sup>1</sup>, G . Lyberatos<sup>1</sup> ,<sup>1</sup>School of Chemical Engineering, National Technical University of Athens, <sup>2</sup>Anion Environmental LTD, <sup>3</sup>Titan Cement Group., <sup>4</sup>Polyeco S.A.
- 14) Desk study to assess the feasibility of a draft horizontal standard for electrical conductivity Literature review Lars Johnsson<sup>1</sup>, S. Ingvar Nilsson<sup>1</sup> and Per Jennische<sup>2</sup> , <sup>1</sup>Department of Soil Sciences, Box 7014, <sup>2</sup>Rector's office, Box 7070 , Swedish University of Agricultural Sciences (SLU), SE-750 07 Uppsala Sweden

- 15) Van der Gheynst, J.S., Pettygrove, S., Dooley, T.M. and Arnold, K.A. 2004. Estimating electrical conductivity of compost extracts at different extraction ratios, *Compost Science & Utilization*, 12 , 202-207
- 16) Chemical Properties Electrometric pH Determinations 04.11, Test Methods for the Examination of Composting and Compost March 21, 2002 04.11-1
- 17) KAPANEN, A., ITAVAARA, M. Ecotoxicity tests for compost applications, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 49, p. 1-16, 2001.
- 18) Sample Collection and Laboratory Preparation 02.02, Laboratory Sample Preparation for Analysis, Test Methods for the Examination of Composting and Compost April 7, 2002 , 02.02-4
- 19) Municipal Compost as a Nutrient Source for Organic Crop Production in New Zealand , Abie Horrocks \*, Denis Curtin, Craig Tregurtha and Esther Meenken