



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ IV ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ

## **Κομποστοποίηση προϊόντος βιομάζας από υπολείμματα τροφών**

Διπλωματική εργασία

Μπατσαλιά Μαρία

Υπεύθυνος καθηγητής:

Γεράσιμος Λυμπεράτος

Αθήνα 2019

## **Ευχαριστίες**

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας το έτος 2018-2019, στα πλαίσια ολοκλήρωσης του διπλώματος Χημικής Μηχανικής.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή Γεράσιμο Λυμπεράτο για την ανάθεση του θέματος της παρούσας διπλωματικής και τη στήριξη του στην πραγματοποίησή της. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την υπεύθυνη μου Δρ. Κωνσταντίνα Παπαδοπούλου ΕΔΙΠ του εργαστηρίου και τους Δρ. Γιώργο Μάριο Λύτρα, Δημήτρη Μαθιουδάκη, Γιώργο Σείντή και Δημοσθένη Τσίβα για τη πολύτιμη βοήθεια και τις συμβουλές τους. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας για τη συμπαράσταση και τη στήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

## Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	2
Περιεχόμενα Πινάκων.....	6
Πίνακας Εικόνων.....	6
Περιεχόμενα Διαγραμμάτων.....	6
Περιεχόμενα Σχημάτων.....	7
Περίληψη.....	8
Abstract.....	9
1. Εισαγωγή.....	12
1.1 Ορισμοί.....	12
1.2 Στερεά Απόβλητα.....	13
1.3 Κατάσταση στην Ελλάδα.....	15
1.4 Κατάσταση στην Ευρώπη.....	16
1.5 Διαχείριση στερεών αποβλήτων.....	18
1.5.1 Κυκλική Οικονομία.....	18
1.5.2 Ανακυκλώσιμα-Συσκευασίες.....	19
1.5.3 Οργανικά.....	19
1.5.4 ΧΥΤΑ.....	19
1.6 Συστήματα Διαλογής Απορριμμάτων.....	20
1.7 Θεσμικό πλαίσιο.....	21
1.7.1 Βιοαποδομήσιμα απόβλητα.....	21
1.7.2 Διαλογή στην πηγή- Κομποστοποίηση.....	23
2. Κομποστοποίηση.....	25
2.1 Απόβλητα κατάλληλα για κομποστοποίηση.....	25
2.2 Περιγραφή Διεργασίας.....	25
2.3 Μικροοργανισμοί.....	25
2.4 Μεταβολή οργανικής ύλης.....	27
2.4.1 Άζωτο.....	27
2.4.2 Άνθρακας.....	28
2.4.3 Χουμικές ουσίες.....	28
2.5 Φάσεις κομποστοποίησης.....	30
2.6 Λειτουργικοί παράγοντες.....	33

2.6.1 Σύσταση πρώτης ύλης.....	33
2.6.2 Μέγεθος σωματιδίων .....	34
2.6.3 Υγρασία .....	34
2.6.4 Αερισμός-Οξυγόνο .....	35
2.6.5 pH.....	35
2.6.6 Θερμοκρασία.....	35
2.7 Συστήματα Κομποστοποίησης .....	36
2.8 Προϊόν κομποστοποίησης.....	37
2.8.1 Οργανικά Εδαφοβελτιωτικά.....	37
2.8.2 Καταστροφή παθογόνων .....	38
2.8.3 Εφαρμογές προϊόντος .....	38
2.8.4 Μικροβιολογικό ενδιαφέρον .....	38
3. Πειραματικό μέρος.....	40
3.1 Διάταξη Κομποστοποίησης .....	40
3.1.1 FORBI .....	40
3.1.2 Παράγοντας διόγκωσης- Bulking agent .....	40
3.1.3 Κομποστοποίηση μικρής κλίμακας.....	41
3.1.4 Κομποστοποίηση μεγάλης κλίμακας .....	42
3.2 Μέθοδοι Ανάλυσης .....	43
3.2.1 Πειραματικές μέθοδοι .....	43
3.2.2 Μέτρηση θερμοκρασίας .....	44
3.2.3 Προσδιορισμός υγρασίας (water content) .....	44
3.2.4 Προσδιορισμός πτητικών στερεών (volatile solids).....	44
3.2.5 Μέτρηση pH .....	45
3.2.6 Μέτρηση ηλεκτρικής αγωγιμότητας( EC).....	45
3.2.7 Προσδιορισμός ολικού αζώτου κατά Kjeldahl-TKN.....	45
3.2.8 Προσδιορισμός ολικού οργανικού άνθρακα TOC .....	49
3.2.9 Υπολογισμός λόγου άνθρακα/αζώτου- C/N.....	50
3.2.10 Προσδιορισμός φυτοτοξικότητας (germination index) .....	50
3.2.11 Χουμικά Οξέα (humic acids) .....	51
4. Αποτελέσματα.....	53
4.1 Θερμοκρασία.....	53
4.2 Υγρασία .....	55
4.3 Πτητικά Στερεά .....	58

4.4 pH.....	60
4.5 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα.....	61
4.6 Ολικό άζωτο κατά Kjeldahl.....	63
4.7 Ολικός Οργανικός Άνθρακας - TOC .....	65
4.8 Λόγος άνθρακα-αζώτου C/N .....	66
4.9 Φυτοτοξικότητα - Germination index.....	68
4.10 Χουμικά οξέα (humic acids) .....	70
4.11 Τελικό προϊόν .....	71
4.12 Χαρακτηρισμός προϊόντος .....	72
5. Συμπεράσματα .....	76
6. Προτάσεις .....	76
7. Βιβλιογραφία .....	77
Παράρτημα .....	82

## Περιεχόμενα Πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 1 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ (EUROSTAT 2012).....	18
ΠΙΝΑΚΑΣ 2 ΘΕΣΜΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΓΙΑ ΑΣΤΙΚΑ-ΒΙΟΑΠΟΔΟΜΗΣΙΜΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ (ΕΠΠΕΡΑΑ 2012) .....	22
ΠΙΝΑΚΑΣ 3 ΠΟΣΟΤΙΚΟΙ ΣΤΟΧΟΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΒΙΟΑΠΟΒΛΗΤΩΝ (ΕΣΔΑ 2015).....	23
ΠΙΝΑΚΑΣ 4 ΑΝΑΛΟΓΙΑ C/N ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΠΡΩΤΩΝ ΥΛΩΝ (DIAZ 1994).....	34
ΠΙΝΑΚΑΣ 5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ .....	43
ΠΙΝΑΚΑΣ 6 ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟ ΣΤΙΣ ΦΛΑΣΚΕΣ .....	48
ΠΙΝΑΚΑΣ 7 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΜΕΘΟΔΟΥ ΓΙΑ ΣΤΕΡΕΑ ΔΕΙΓΜΑΤΑ (TKNS-NEW) .....	49
ΠΙΝΑΚΑΣ 8 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΑΝΑ ΧΩΡΑ (BRINTON 2000) .....	55
ΠΙΝΑΚΑΣ 9 ΥΓΡΑΣΙΑ-ΠΟΣΟΣΤΟ ΑΡΧΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ .....	56
ΠΙΝΑΚΑΣ 10 ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ, ΜΟΝΑΔΕΣ $dS/m = mS/cm$ , (BRINTON 2000).....	62
ΠΙΝΑΚΑΣ 11 ΕΠΙΡΡΟΗ ΛΟΓΟΥ ΑΡΑΙΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ.....	63
ΠΙΝΑΚΑΣ 12 C/N ΑΡΧΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	66
ΠΙΝΑΚΑΣ 13 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗ ΦΥΤΟΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑ (CUI ET AL. 2017).....	68
ΠΙΝΑΚΑΣ 14 ΦΥΤΟΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑ ΚΟΜΠΟΣΤ ΜΙΚΡΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ .....	69
ΠΙΝΑΚΑΣ 15 ΧΟΥΜΙΚΑ ΟΞΕΑ ΣΤΟ ΚΟΜΠΟΣΤ ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ .....	70
ΠΙΝΑΚΑΣ 16 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΟΜΠΟΣΤ ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΑΠΟ ΔΙΑΠΙΣΤΕΥΜΕΝΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ .....	72
ΠΙΝΑΚΑΣ 17 ΘΡΕΠΤΙΚΑ ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΚΟΜΠΟΣΤ (ΒΑΛΚΑΝΑΣ 1992) .....	72
ΠΙΝΑΚΑΣ 18 ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΚΟΜΠΟΣΤ (ECN 2014) .....	73
ΠΙΝΑΚΑΣ 19 ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΚΟΜΠΟΣΤ ΓΙΑ ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ ΚΑΙ ΠΑΘΟΓΟΝΑ (ECN 2014).....	73
ΠΙΝΑΚΑΣ 20 ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΚΟΜΠΟΣΤ (ΕΠΠΕΡΑΑ 2014) .....	74
ΠΙΝΑΚΑΣ 21 ΜΥΚΗΤΕΣ ΣΕ ΚΟΜΠΟΣΤ (BERTOLDI ET AL. 1983) .....	82
ΠΙΝΑΚΑΣ 22 ΒΑΚΤΗΡΙΑ ΣΤΗΝ ΚΟΜΠΟΣΤΟΠΟΙΗΣΗ (INSAM ET AL. 2007).....	83

## Πίνακας Εικόνων

ΕΙΚΟΝΑ 1 ΚΟΜΠΟΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕ ΣΕΙΡΑΔΙ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΤΥΠΟΥ (BIOSCYCLE).....	36
ΕΙΚΟΝΑ 2 FORBI (FOOD RESIDUE BIOMASS).....	40
ΕΙΚΟΝΑ 3 ΟΙΚΙΑΚΟΣ ΚΟΜΠΟΣΤΟΠΟΙΗΤΗΣ 280 L .....	41
ΕΙΚΟΝΑ 4 ΚΟΜΠΟΣΤ ΣΤΗ ΘΕΡΜΟΦΙΛΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑ ΤΗ ΘΕΡΜΟΦΙΛΗ ΦΑΣΗ .....	42
ΕΙΚΟΝΑ 5 ΣΕΙΡΑΔΙ ΤΗΣ ΚΟΜΠΟΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ .....	42
ΕΙΚΟΝΑ 6 SCRUBBER K-415, SPEEDDIGESTER K-425 .....	47
ΕΙΚΟΝΑ 7 KJELFLEXK-360.....	47
ΕΙΚΟΝΑ 8 ΦΛΑΣΚΕΣ ΜΕ ΔΕΙΓΜΑ ΑΜΕΣΩΣ ΜΕΤΑ ΤΗ ΧΩΝΕΥΣΗ .....	48
ΕΙΚΟΝΑ 9 ΜΕΤΡΗΣΗ ΦΥΤΟΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑΣ .....	51
ΕΙΚΟΝΑ 10 ΧΟΥΜΙΚΑ ΟΞΕΑ.....	70
ΕΙΚΟΝΑ 11 ΚΟΜΠΟΣΤ ΜΙΚΡΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ .....	71
ΕΙΚΟΝΑ 12 ΚΟΜΠΟΣΤ ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ.....	71

## Περιεχόμενα Διαγραμμάτων

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ-ΧΡΟΝΟΣ ΜΙΚΡΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ.....	53
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ- ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΝΕΡΟΥ, ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ.....	54
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3 ΥΓΡΑΣΙΑ- 1Η ΜΕΘΟΔΟΣ- ΜΙΚΡΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ .....	56
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4 ΥΓΡΑΣΙΑ-2Η ΜΕΘΟΔΟΣ- ΜΙΚΡΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ .....	57
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5 ΥΓΡΑΣΙΑ- ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ .....	58
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6 ΠΤΗΤΙΚΑ ΣΤΕΡΕΑ ΜΙΚΡΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ .....	59
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7 ΠΤΗΤΙΚΑ ΣΤΕΡΕΑ- ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ .....	59
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 8 pH ΜΙΚΡΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ.....	60
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9 pH-ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ .....	61
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 10 ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΜΙΚΡΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ .....	62
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 11 ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ .....	63
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 12 ΤΚΝ ΜΙΚΡΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ .....	64

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 13 ΤΚΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ .....	64
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 14 ΤΟΣ ΜΙΚΡΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ .....	65
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 15 ΤΟΣ ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ .....	66
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 16 ΛΟΓΟΣ ΑΝΘΡΑΚΑ/ΑΖΩΤΟΥ ΜΙΚΡΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ.....	67
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 17 ΛΟΓΟΣ ΑΝΘΡΑΚΑ/ΑΖΩΤΟΥ ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ .....	67
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 18 ΦΥΤΟΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑ ΚΟΜΠΟΣΤ ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ.....	69

## **Περιεχόμενα Σχημάτων**

ΣΧΗΜΑ 1 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΒΙΟΑΠΟΒΛΗΤΩΝ (ΕΠΠΕΡΑΑ 2012) .....	14
ΣΧΗΜΑ 2 ΣΥΣΤΑΣΗ ΑΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ ΕΛΛΑΔΑΣ (ΥΠΕΧΩΔΕ 2008).....	15
ΣΧΗΜΑ 3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΑΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ (EUROSTAT 2017) .....	17
ΣΧΗΜΑ 4 ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΜΕ ΔΙΑΛΟΓΗ ΣΤΗΝ ΠΗΓΗ (PLUSGREEN) .....	20
ΣΧΗΜΑ 5 ΘΕΣΜΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΒΙΟΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΚΑΙ ΚΟΜΠΟΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ (ΕΠΠΕΡΑΑ 2014) .....	24
ΣΧΗΜΑ 6 ΔΙΑΛΥΤΟΤΗΤΑ ΧΟΥΜΙΚΩΝ ΟΥΣΙΩΝ (MCLAREN 1996) .....	30
ΣΧΗΜΑ 7 ΦΑΣΕΙΣ ΚΟΜΠΟΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ- ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ/ΧΡΟΝΟΣ (ΚΟΛΛΙΑΣ 1993) .....	31
ΣΧΗΜΑ 8 ΦΥΤΟΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟ ΔΕΙΚΤΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ (ΜΑΡΓΑΡΙΤΗΣ 2012).....	68

## Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θεσπίσει νέους νόμους σχετικά με τη διαχείριση των στερεών αποβλήτων. Ένας από αυτούς αναφέρει ότι τα κράτη μέλη της Ε.Ε. πρέπει να μειώσουν το ποσοστό των οργανικών αποβλήτων που καταλήγουν στα ΧΥΤΑ αλλιώς υφίστανται πρόστιμα. Προτείνεται διαλογή στην πηγή των οργανικών αποβλήτων και επεξεργασία τους με κομποστοποίηση ή αναερόβια χώνευση. Στην Ελλάδα ένα από τα προγράμματα διαλογής στην πηγή των οργανικών αποβλήτων είναι το Waste4think. Στα πλαίσια του προγράμματος, υπολείμματα τροφών από το Δήμο Χαλανδρίου συλλέγονται και επεξεργάζονται (ξήρανση, τεμαχισμός), το προϊόν της επεξεργασίας ονομάζεται FORBI (Food Residue Biomass).

Ο στόχος της παρούσας διπλωματικής ήταν η βελτιστοποίηση της αξιοποίησης του προϊόντος βιομάζας από τα προδιαλεγμένα υπολείμματα τροφών με στόχο την παραγωγή κομπόστ. Κομποστοποίηση είναι η ελεγχόμενη αερόβια αποσύνθεση της οργανικής ύλης από διαφορετικούς μικροοργανισμούς. Είναι μια οξειδωτική διεργασία και παράγει θερμότητα, νερό, CO<sub>2</sub> και κομπόστ που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό. Είναι ένα σταθεροποιημένο υλικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια και δεν περιέχει παθογόνους μικροοργανισμούς. Οι πιο σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την κομποστοποίηση είναι το υπόστρωμα, το μέγεθος σωματιδίων, η αναλογία άνθρακα/αζώτου, το ποσοστό υγρασίας, η παροχή οξυγόνου και το pH. Συνολικά για να παραχθεί ένα προϊόν σταθεροποιημένο και ώριμο απαιτούνται περίπου 6 μήνες, ανάλογα με το υπόστρωμα και το σύστημα κομποστοποίησης.

Πραγματοποιήθηκαν δύο πειράματα, ένα μικρής κλίμακας και ένα μεγάλης κλίμακας. Το πείραμα μικρής κλίμακας έγινε σε οικιακό κομποστοποιητή με 40 kg υλικού, ο κομποστοποιητής τοποθετήθηκε έξω από το Εργαστήριο Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας. Περιείχε κλαδέματα-FORBI-γρασίδι με αναλογία υγρού βάρους (5 : 3 : 1). Το πείραμα μεγάλης κλίμακας πραγματοποιήθηκε σε στεγασμένο σειράδι με 4 τόνους υλικού, στον Ορχομενό Βοιωτίας. Η αναλογία υγρού βάρους των υλικών ήταν FORBI-κλαδέματα 1:1. Ως διογκωτικός παράγοντας (bulking agent) χρησιμοποιήθηκαν τεμαχισμένα κλαδέματα από το Δήμο Χαλανδρίου και στα δύο πειράματα. Δεν προστέθηκε αρχική καλλιέργεια μικροοργανισμών. Το υλικό και στα δύο πειράματα αναδευόταν καθημερινά με μηχανική ανάδευση για να εξασφαλισθεί η παροχή οξυγόνου στους μικροοργανισμούς. Επίσης όταν η υγρασία ήταν χαμηλή γινόταν προσθήκη νερού. Για την παρακολούθηση της θερμοκρασίας προστέθηκαν καταγραφικά. Για την παρακολούθηση και τον έλεγχο της διεργασίας πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις: Υγρασία, pH, Ηλεκτρική Αγωγιμότητα (EC), Πτητικά Στερεά (Volatile Solids), Ολικό Άζωτο κατά Κένταλ (Total Kjeldahl Nitrogen), Ολικός Οργανικός Άνθρακας (Total Organic Carbon), Δείκτης Βλάστησης (Germination Index), Χουμικά Οξέα (Humic Acids).

Η κομποστοποίηση μικρής κλίμακας διατήρησε τη θερμοφιλή φάση (θερμοκρασία >55 °C) για 11 μέρες, με υψηλότερη ημερήσια θερμοκρασία τους 63 °C. Συνολικά η θερμοκρασία ήταν πάνω από 40°C για 24 μέρες. Έπειτα ακολούθησε σταδιακή πτώση της θερμοκρασίας και ο σωρός έφτασε τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η κομποστοποίηση μεγάλης κλίμακας διατήρησε τη θερμοφιλή φάση για 18 μέρες, έπειτα η θερμοκρασία έπεσε στους 40 °C αλλά ξανανέβηκε στα θερμοφιλικά επίπεδα. Συνολικά η θερμοκρασία ήταν πάνω από 40°C για 68 μέρες. Η υψηλότερη ημερήσια θερμοκρασία ήταν 71 °C. Το κομπόστ πρέπει να διατηρήσει θερμοκρασία >55 °C για 15 μέρες για να θεωρηθεί ασφαλές από υγειονομική άποψη.



Τα πτητικά στερεά αποτελούν δείκτη της οργανικής ύλης του κομπόστ. Η αρχική ύλη του πειράματος μικρής κλίμακας περιείχε 88% πτητικά στερεά ενώ της μεγάλης κλίμακας 90%. Μετά από 6 μήνες και τα δύο πειράματα είχαν πτητικά στερεά κοντά στο 72%. Και τα δύο πειράματα ξεκίνησαν με όξινο pH, κοντά στο 6, και κατέληξαν σε βασικό (8-9). Η ηλεκτρική αγωγιμότητα παρέμεινε σχετικά σταθερή στο 2-3 mS/cm, το κομπόστ μικρής κλίμακας παρουσίασε αύξηση προς το τέλος, έφτασε τα 5 mS/cm. Την πρώτη μέρα της κομποστοποίησης το οργανικό άζωτο (TKN) ήταν 2.2% και τον τελευταίο μήνα ήταν 2.7%. Στο σειράδι την πρώτη μέρα ήταν 1.8% και τον τελευταίο μήνα ήταν 3.1%. Ο ολικός οργανικός άνθρακας αρχικά ήταν 50% και στα δύο κομπόστ. Στον οικιακό κομποστοποιητή έφτασε το 41% στο τέλος της κομποστοποίησης. Ο λόγος άνθρακα/αζώτου ξεκίνησε από 22:1 και κατέβηκε στο 15:1 στον οικιακό κομποστοποιητή. Ο αρχικός λόγος άνθρακα/αζώτου στο σειράδι ήταν 29:1. Για την εξέταση της ωριμότητας του κομπόστ χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης φυτοτοξικότητας: Germination Index. Χρησιμοποιήθηκαν σπόροι κάρδαμου (*Lepticum Sativum*) καθώς είναι ταχείας ανάπτυξης και ενδείκνυνται για τεστ φυτοτοξικότητας. Το κομπόστ μεγάλης κλίμακας παρουσίασε G.I.>80% και κρίνεται μη φυτοτοξικό ενώ το κομπόστ μικρής κλίμακας παρουσίασε G.I.<80% και κρίνεται φυτοτοξικό. Όσον αφορά τις υγειονομικές απαιτήσεις, το κομπόστ μεγάλης κλίμακας είναι απαλλαγμένο από παθογόνους μικροοργανισμούς. Επιπλέον έχει καλή αναλογία αζώτου/φωσφόρου/καλίου και είναι πλούσιο σε οργανική ύλη.

Οι λειτουργικές παράμετροι διατηρήθηκαν στα επιθυμητά επίπεδα και οι διεργασίες διεξήχθησαν ομαλά. Συμπερασματικά η κομποστοποίηση μεγάλης κλίμακας παρήγαγε καλύτερο προϊόν από την κομποστοποίηση μικρής κλίμακας. Είναι ένα ασφαλές υλικό, πλούσιο σε σταθεροποιημένη οργανική ύλη και με σωστή αναλογία θρεπτικών συστατικών. Ο συνδυασμός της διαλογής στην πηγή των τροφικών υπολειμμάτων και της κομποστοποίησης σε στεγασμένο σειράδι κρίνεται αποτελεσματικός στην μετατροπή ενός υλικού που θα κατέληγε στο ΧΥΤΑ σε ένα χρήσιμο οργανικό υλικό που μπορεί να εναποτεθεί με ασφάλεια στο έδαφος.

## Abstract

"Composting of a biomass product derived from food waste"

In recent years the European Union has enacted new laws regarding the treatment of solid wastes. One such law states that the members of the EU must reduce the percentage of organic wastes that end up in landfills by a certain date or they will face penalties. Source separation of organic wastes and treatment with composting or anaerobic digestion is encouraged. In Greece one of the programs involved in source separation of organic wastes is Waste4think. Within the program, food wastes from Chalandri (Athens) are collected and processed (they are dried and shredded), the processed material is called FORBI (Food Residue Biomass).

The purpose of my thesis was to optimize the utilization of the biomass product derived from source separated food waste in order to produce compost. Composting is the controlled aerobic decomposition of organic matter with a succession of different microorganisms. It is an oxidative process that produces heat, water, CO<sub>2</sub> and compost that can be used as a soil amendment. Compost is a stable material that is safe to use and does not contain pathogens. The most important

factors that influence composting are the starting material, particle size, carbon to nitrogen ratio, water content, oxygen supply and pH. From beginning to end the process takes about 6 months to produce a stabilized and mature product depending on the substrate and the composting system.

Two experiments were conducted, the first was a small scale experiment and the second a large scale experiment. The small scale experiment took place in a home composting bin with 40 kg of material, the bin was placed outside the Organic Chemical Technology Lab. The material in the bin was prunings-FORBI-grass in wet weight ratio (5:3:1). The large scale experiment was conducted in a roofed windrow in Orchomenos (Viotia) with 4 tonnes of material. The wet weight ratio was FORBI:prunings 1:1. Prunings from Chalandri were used as a bulking agent in both experiments. Inoculants were not added in any of the experiments. The compost piles were turned manually every day to ensure adequate oxygen supply to the microbes. Water was added when necessary to maintain adequate moisture levels. Temperature sensors were placed in the compost piles to monitor and record the temperature. In order to monitor and control the process the following measurements were performed: Water Content, pH, Electric Conductivity, Volatile Solids, Total Kjeldahl Nitrogen, Total Organic Carbon, Germination Index and Humic Acids.

The small scale composting pile maintained the thermophilic phase (temperature above 55°C) for 11 days, the maximum daily temperature was 63°C. Temperatures above 40 °C were maintained for 24 days. The pile then slowly reached ambient temperature. The large scale experiment maintained the thermophilic phase for 18 days, then there was a drop to 40°C followed by the continuation of thermophilic temperatures. Temperatures above 40 °C were maintained for 68 days. The highest daily temperature was 71 °C. The compost must maintain temperature above 55°C for 15 days to be considered hygenised.

Volatile solids are indicators of the organic matter in compost. The substrate of the small scale experiment contained 88% volatile solids and the large scale 90%. After six months both composts contained 72% volatile solids. Both experiments started with acidic pH, around 6, and ended with alkaline pH (8-9). Electrical conductivity remained relatively stable at 2-3mS/cm, in the small scale compost there was a rise to 5 mS/cm in the last phase.

On the first day, the total Kjeldahl nitrogen in the home composting bin was 2.2% and at the last month it was 2.7%. In the windrow experiment the total kjeldahl nitrogen in the beginning was 1.8% and at the last month it was 3.1%. The total organic carbon on the initial phase of composting was around 50% in both composts. On the last phase of composting it was around 41% in the home composting bin. Carbon to nitrogen ratio started at 22:1 and ended at 15:1 in the home composting bin. The initial carbon to nitrogen ratio in the windrow was 29:1. Germination index was used as a maturity index for the composts. Garden cress seeds (*Lepidium sativum*) were used since they grow fast and are recommended for seed germination tests. The large scale compost had a G.I. value >80% and was deemed non phytotoxic, the small scale compost had a G.I. value <80% and was deemed phytotoxic. In respect to sanitization requirements, compost from the large scale experiment is free of pathogens. Moreover it has a good nitrogen/phosphorus/potassium ratio and is rich in organic matter.

Operating parameters were within the intended limits and the processes were conducted without problems. In conclusion the large scale composting produced a better product than small scale composting. It is a safe product, rich in stabilized organic matter and good nutrient ratio. Source

separation of food wastes in combination with roofed windrow composting proved to be effective in transforming a material that would otherwise be landfilled into a useful organic material that can be applied to the soil.

## 1. Εισαγωγή

Η αύξηση του πληθυσμού αλλά και η βελτίωση του βιοτικού επιπέδου έχει οδηγήσει σε αύξηση των παραγόμενων αποβλήτων. Η ελλιπής διαχείριση τους δημιουργεί προβλήματα στον άνθρωπο και στο περιβάλλον. Το πρόβλημα της διαχείρισης των αποβλήτων είναι από τα πιο δύσκολα και σημαντικά προβλήματα που αντιμετωπίζει η ανθρωπότητα σήμερα. Κάθε χώρα έχει τη δική της στρατηγική επίλυσης του προβλήματος αλλά μια βιώσιμη λύση πρέπει να περιλαμβάνει όλες τις διαθέσιμες στρατηγικές μείωσης των αρνητικών συνεπειών της κατανάλωσης. Το απόβλητο είναι απόβλητο μόνο όταν δεν ξέρουμε πως να χρησιμοποιήσουμε το υλικό και την ενέργεια που περιέχει (Stucki et al. 2003). Θετικό είναι ότι υπάρχουν αρκετές διαθέσιμες τεχνολογίες ανάκτησης χρήσιμων υλικών και ενέργειας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν με στόχο τη δημιουργία ενός βιώσιμου συστήματος διαχείρισης. Αυτές οι κατευθύνσεις έχουν τεθεί και από την Ευρωπαϊκή Ένωση με τη μορφή Οδηγιών με συγκεκριμένα χρονικά περιθώρια και έχουν ενσωματωθεί στις εθνικές νομοθεσίες των κρατών μελών.

Η Ελλάδα έχει ενσωματώσει τις Ευρωπαϊκές Οδηγίες στο εξής εθνικό σχέδιο με 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 αστικών στερεών αποβλήτων (ΑΣΑ), η ανάκτηση ενέργειας να αποτελεί συμπληρωματική μορφή διαχείρισης, όταν έχουν εξαντληθεί τα περιθώρια κάθε άλλου είδους ανάκτησης και η υγειονομική ταφή να αποτελεί τελευταία επιλογή και να έχει περιοριστεί σε λιγότερο από το 30% του συνόλου των ΑΣΑ.» [ΕΣΔΑ 2015]

Αυτοί οι στόχοι, την στιγμή που η πλειοψηφία των ΑΣΑ καταλήγει σε ΧΥΤΑ το 2019, είναι δύσκολο να επιτευχθούν. Για αυτό το λόγο η ύπαρξη προγραμμάτων όπως το Waste4think είναι κύριας σημασίας για την ανάπτυξη και εφαρμογή μεθόδων που μπορούν να φέρουν την Ελλάδα πιο κοντά στους στόχους που έχει θέσει.

Η παρούσα διπλωματική ασχολείται με το κομμάτι διαχείρισης προδιαλεγμένων τροφικών υπολειμμάτων, συγκεκριμένα με την κομποστοποίησή τους.

### 1.1 Ορισμοί

1. **«οικιακά απόβλητα»:** τα απόβλητα που παράγονται από τα νοικοκυριά.
2. **«συναφή απόβλητα»:** απόβλητα τα οποία, λόγω της φύσης και της σύνθεσής τους, είναι συγκρίσιμα με τα οικιακά απόβλητα, εκτός των αποβλήτων της παραγωγής και των αποβλήτων της γεωργίας και της δασοκομίας.
3. **«αστικά απόβλητα»:** τα οικιακά απόβλητα και τα συναφή απόβλητα.
4. **«σύμμεικτα αστικά απόβλητα»:** τα αστικά απόβλητα τα οποία δεν έχουν διαχωριστεί στην πηγή ή δεν έχουν υποβληθεί σε διαδικασία διαχωρισμού (ΕΚΑ 20 03 01).
5. **«μηχανική – βιολογική επεξεργασία»:** συνίσταται σε τεχνικές που συνδυάζουν τη μηχανική επεξεργασία (διαλογή) με τη βιολογική επεξεργασία (αερόβια χώνευση ή αναερόβια χώνευση)

σύμμεικτων αστικών αποβλήτων, προκειμένου να περιοριστούν ο όγκος ή οι επικίνδυνες ιδιότητες τους, να σταθεροποιηθούν, να διευκολυνθεί η διακίνηση τους ή να βελτιωθεί η ανάκτηση χρήσιμων υλών ή οι ιδιότητες καύσης τους.

6. **«αερόβια επεξεργασία (κομποστοποίηση)»:** η ελεγχόμενη αερόβια (οξειδωτική) βιολογική διαδικασία αποδόμησης και σταθεροποίησης οργανικών υλικών, που πραγματοποιείται υπό τις φυσικές και χημικές εκείνες συνθήκες που ευνοούν τη διαδοχή συγκεκριμένων θερμοφίλων, θερμοάντοχων και μεσόφιλων μικροβιακών πληθυσμών.

7. **«αναερόβια χώνευση»:** η ελεγχόμενη βιολογική αποδόμηση των οργανικών υλικών απουσία οξυγόνου (αναερόβιες συνθήκες), σε θερμοκρασίες κατάλληλες για την ανάπτυξη μεσόφιλων ή θερμοφίλων βακτηρίων, που οδηγεί στην παραγωγή βιοαερίου (ένα μίγμα κυρίως μεθανίου και διοξειδίου του άνθρακα) και ενός υδαρούς υπολείμματος (**χώνευμα**).

8. **«κομπόστ (compost)»:** το υγειονοποιημένο και σταθεροποιημένο στερεό υλικό, το οποίο προκύπτει από την κομποστοποίηση οργανικών υλικών.

9. **«κομπόστ τύπου Α»:** το υγειονοποιημένο και σταθεροποιημένο κομπόστ που προκύπτει από την επεξεργασία σύμμεικτων αστικών αποβλήτων.

10. **«επίχωση»:** εργασία ανάκτησης κατά την οποία χρησιμοποιούνται κατάλληλα μη επικίνδυνα απόβλητα, υποκαθιστώντας υλικά που δεν είναι απόβλητα, σε χώρους όπου έχουν γίνει εκσκαφές, με σκοπό την ποιοτική αποκατάσταση τους ή για λόγους μηχανικής ισορροπίας στην αρχιτεκτονική τοπίου.

11. **«αποκατάσταση εδάφους»:** Η χρησιμοποίηση κομπόστ τύπου Α ή χωνεύματος τύπου Α για την βελτίωση της ποιότητας του εδάφους.

[Πηγή: Υ.Α. οικ. 56366/4351/2014]

## 1.2 Στερεά Απόβλητα

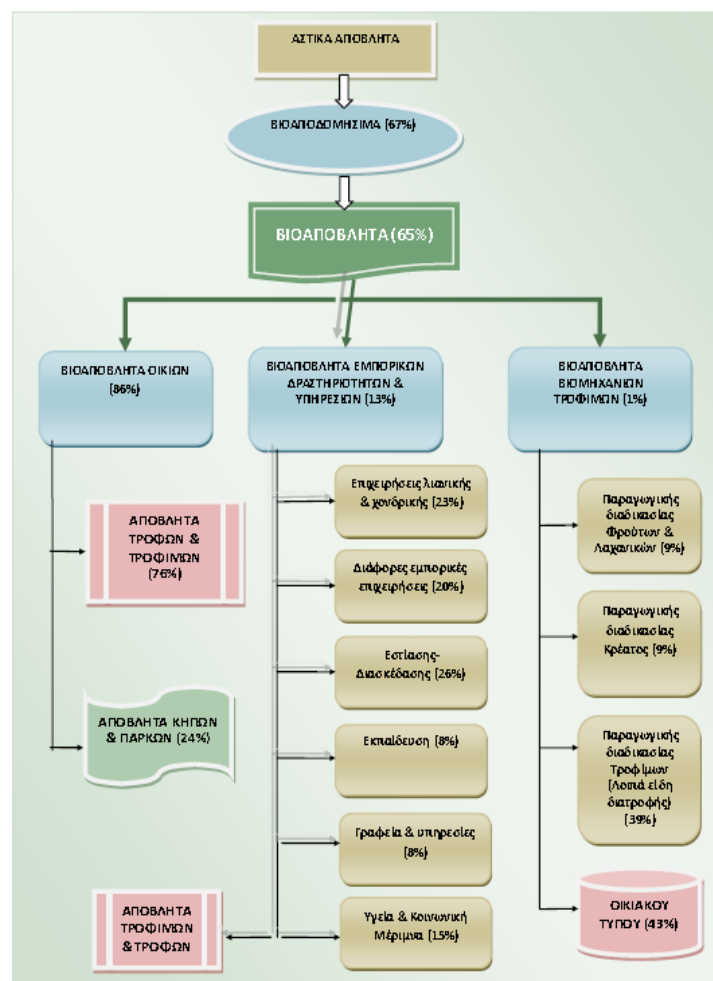
Η παραγωγή στερεών αποβλήτων αποτελεί στις σύγχρονες κοινωνίες ένα - σε μεγάλο βαθμό αναπόφευκτο - επακόλουθο της παραγωγικής διαδικασίας και της κατανάλωσης. Η μείωση της παραγόμενης ποσότητας απορριμμάτων αποτελεί κατά συνέπεια το σταθερό μακροπρόθεσμο στόχο προς τον οποίο θα πρέπει να κατατείνουν οι προσπάθειες της πολιτείας, μέσα από τη σταδιακή αναδιάρθρωση των πρακτικών και συμπεριφορών παραγωγών και καταναλωτών. Βραχυπρόθεσμα όμως, και παράλληλα προς το στόχο αυτό, θα πρέπει να ληφθούν όλα τα αναγκαία μέτρα για την ορθολογική διαχείριση των απορριμμάτων έτσι ώστε να εξοικονομηθούν φυσικοί πόροι και να αποφευχθούν οι δυσμενείς επιπτώσεις της διάθεσης τους στο φυσικό περιβάλλον.

Αστικά στερεά απόβλητα (ΑΣΑ) είναι τα στερεά απόβλητα που παράγονται από δραστηριότητες των νοικοκυριών (οικιακά στερεά απόβλητα), των εμπορικών δραστηριοτήτων (εμπορικά στερεά απόβλητα), των καθαρισμών οδών και άλλων κοινόχρηστων χώρων καθώς και άλλα στερεά απόβλητα (από ιδρύματα επιχειρήσεις, κλπ) τα οποία μπορούν από τη φύση τους ή τη σύνθεση τους να εξομοιωθούν με τα οικιακά στερεά απόβλητα. Άλλες κατηγορίες στερεών αποβλήτων είναι

τα Βιομηχανικά, τα Εξορυκτικά και τα μολυσματικά-επικίνδυνα απόβλητα. Εκτιμάται ότι στην Ελλάδα, σε χωριά με πληθυσμό κάτω των 2000 κατοίκων, η μέση παραγωγή ΑΣΑ, σε kg/άτομο/ημέρα είναι από 0.6-0.8 ενώ σε πόλεις μέχρι 100.000 κατοίκους κυμαίνεται από 1.1 έως 1.3. Σε μεγαλύτερες πόλεις, η μέση παραγωγή εκτιμάται ότι είναι από 1.3 έως 1.5.

Τα αστικά στερεά απόβλητα διαχωρίζονται σε οργανικά και ανόργανα συστατικά. Το βασικότερο βιολογικό χαρακτηριστικό των αστικών στερεών αποβλήτων είναι ότι το οργανικό κλάσμα τους είναι βιοαποδομήσιμο. Αυτό σημαίνει ότι το κλάσμα αυτό μπορεί να μετατραπεί με βιολογικές διεργασίες σε αέρια και σε σχετικώς αδρανή οργανικά και ανόργανα στερεά. Η βιολογική διαδικασία μπορεί να είναι είτε αερόβια ή αναερόβια. Γενικά τα αστικά απόβλητα διαχωρίζονται σε βραδέως (χαρτόνι, ξύλο) και ταχέως βιοαποδομήσιμα (φρούτα, λαχανικά) [Παναγιωτακόπουλος 2007, WWF Greece].

Τα βιοαπόβλητα ή βιολογικά απόβλητα (ΒΑ) είναι υποκατηγορία των βιοαποδομήσιμων αποβλήτων (ΒΑΑ) και περιλαμβάνουν τα βιοαποδομήσιμα απόβλητα κήπων και πάρκων, τα απόβλητα τροφών μαγειρείων και νοικοκυριών, εστιατορίων μονάδων εστίασης και καταστημάτων λιανικής πώλησης και παρεμφερή απόβλητα εγκαταστάσεων και επεξεργασίας τροφίμων. Δεν περιλαμβάνονται τα δασικά ή γεωργικά κατάλοιπα, η κοπριά, η ιλύς επεξεργασίας λυμάτων ή άλλα βιοαποδομήσιμα απόβλητα όπως οι φυσικές ίνες, το χαρτί ή το κατεργασμένο ξύλο [ΕΠΠΕΡΑΑ 2012].

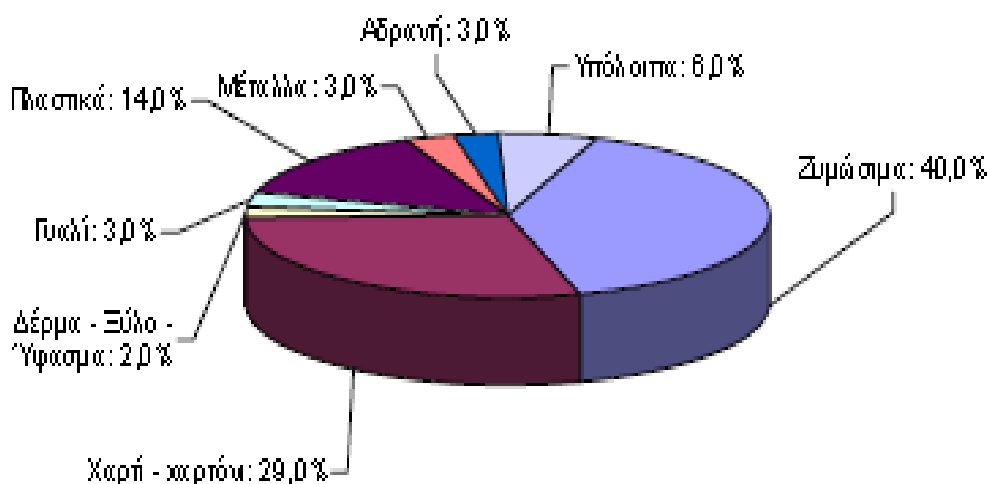


Σχήμα 1 Κατηγορίες Βιοαποβλήτων (ΕΠΠΕΡΑΑ 2012)

### 1.3 Κατάσταση στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα σήμερα παράγονται ημερησίως περίπου 15.000 τόνοι αστικών απορριμμάτων, δηλαδή σχεδόν 5,5 εκατομμύρια τόνοι ετησίως, η παραγωγή τους εμφανίζει αυξητικές τάσεις – 40% αύξηση την τελευταία 10ετία και η λύση για την ορθολογική διαχείρισή τους δεν έχει βρεθεί ακόμη. Η προβλεπόμενη συνεχής αύξηση του όγκου των Αστικών Στερεών Αποβλήτων (ΑΣΑ) οφείλεται κυρίως στην κατά παραδοχή σταθερή αύξηση της ιδιωτικής τελικής κατανάλωσης και τη διατήρηση των τάσεων που παρατηρούνται σήμερα στα καταναλωτικά πρότυπα. Μόνο το 73% του πληθυσμού έχει πρόσβαση στο δίκτυο ανακύκλωσης (μπλε κάδοι), μόνο το 6,9% των ΑΣΑ καταλήγουν στα Κέντρα Διαλογής και Ανακύκλωσης Υλικών (ΚΔΑΥ) και μόνο το 2% των ΑΣΑ κομποστοποιείται. Το υπόλοιπο, δηλαδή περίπου το 80% των ΑΣΑ καταλήγουν σε ΧΥΤΑ ή ΧΥΤΥ, όταν στην Αυστρία κομποστοποιείται το 40%, στην Ιταλία το 32% και στην Ολλανδία το 28%. Ενδεικτικά, αναφέρουμε ότι σε ΧΥΤΑ που εξυπηρετεί 1 εκ. κατοίκους παράγονται 800.000 τόνοι διοξειδίου του άνθρακα ετησίως. Τα παραπάνω οφείλονται στο γεγονός ότι δεν ακολουθείται η διεθνώς αποδεκτή ιεράρχηση διαχείρισης των ΑΣΑ.

Η σύνθεση των οικιακών απορριμμάτων στην Ελλάδα διαφοροποιείται αισθητά από τον μέσο όρο της Ε.Ε. Όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα, το πολύ υψηλό ποσοστό ζυμώσιμων υλικών (αποφάγια, υπολείμματα λαχανικών, φλούδες φρούτων κλπ), στο 40% των συνολικών οικιακών αποβλήτων αποτελεί ένδειξη ότι οι διατροφικές συνήθειες των Ελλήνων ακολουθούν πρότυπα περισσότερο υγιεινά και φιλικά προς το περιβάλλον. Παράλληλα όμως δυσχεραίνει την επίτευξη υψηλού ποσοστού ανάκτησης και την εφαρμογή της καύσης ως μεθόδου διάθεσης των απορριμμάτων, λόγω του μεγάλου ποσοστού υγρασίας που συνοδεύει την παρουσία των ζυμώσιμων υλικών.



Σχήμα 2 Σύσταση Αστικών Απορριμμάτων Ελλάδας (ΥΠΕΧΩΔΕ 2008)

Η κοινοτική νομοθεσία, που αφορά τη διαχείριση των αποβλήτων, έχει ενσωματωθεί στο σύνολό της στην εθνική.

Οι βασικές τεχνολογίες που εφαρμόζονται στη διαχείριση απορριμμάτων είναι οι:

- Μηχανική/Βιολογική επεξεργασία

- Θερμική επεξεργασία (καύση-αποτέφρωση)
- Εδαφική εναπόθεση (Υγειονομική Ταφή-ΧΥΤΑ)

Ως πιο φθηνή μέθοδος, μετά την υγειονομική ταφή, αναδεικνύεται αυτή της μηχανικής-βιολογικής επεξεργασίας: €50 ανά τόνο. Η καύση - αποτέφρωση στοιχίζει €100 ανά τόνο.

Ένα μεγάλο μέρος των παραγόμενων αστικών απορριμμάτων διατίθεται για υγειονομική ταφή, η δε ολοκληρωμένη διαχείριση (πρόληψη – επαναχρησιμοποίηση – ανακύκλωση) αποβλήτων βρίσκεται στα πρώτα στάδια αλλά σχετικές δράσεις καλύπτουν μεγάλο μέρος της χώρας και παρουσιάζουν μια σημαντική πρόοδο τα τελευταία χρόνια. Έτσι, ενώ το 2003 ανακυκλώθηκε/κομποστοποιήθηκε μόλις το 8,2% της συνολικής ποσότητας παραγόμενων αποβλήτων, το 2006 το ποσοστό αυτό ανήλθε στο 13% και το 2007 έφθασε το 16% .

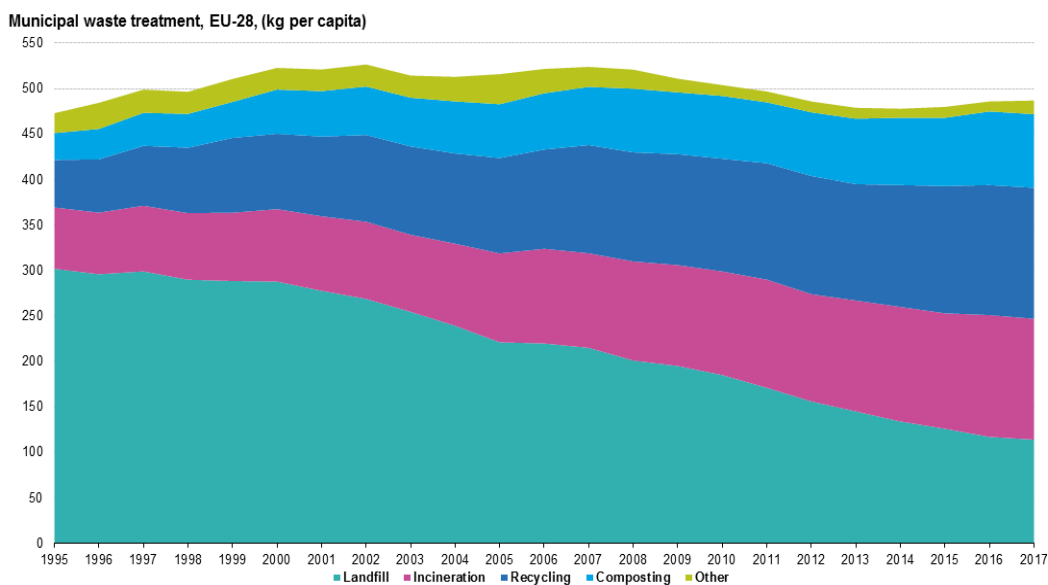
Παρά την πρόοδο αυτή, εξακολουθεί να υπάρχει ένα σημαντικό έλλειμμα σε υποδομές επεξεργασίας και διάθεσης στερεών αποβλήτων. Το ποσοστό ανακύκλωσης παραμένει ακόμη σε ιδιαίτερα χαμηλά επίπεδα. Ως αποτέλεσμα, σήμερα στη χώρα μας δαπανώνται μεγάλα ποσά για τη συλλογή και τη μεταφορά των αποβλήτων και πολύ μικρότερα για την επεξεργασία και τη διάθεσή τους [Σοφιανίδης 2015, WWF Greece].

#### **1.4 Κατάσταση στην Ευρώπη**

Η επιβάρυνση του περιβάλλοντος σε συνδυασμό με τα προβλήματα που δημιουργούν τόνοι αστικών και βιομηχανικών απορριμμάτων έχουν οδηγήσει την Ευρωπαϊκή Ένωση να θεσπίσει σειρά μέτρων για να στηρίξει την ανακύκλωση υλικών. Η Ε.Ε έχει θέση την εξής ιεράρχηση επιλογών σχετικά με την διαχείριση αποβλήτων, από τη βέλτιστη έως τη χειρίστη:

1. πρόληψη και μείωση δημιουργίας αποβλήτων
- 2.επαναχρησιμοποίηση προϊόντων και συσκευασιών (π.χ. επαναπλήρωση συσκευασιών ποτών, απορρυπαντικών)
3. ανακύκλωση ή λιπασματοποίηση των απορριμμάτων
- 4.ανάκτηση/παραγωγή ενέργειας από τα απορρίμματα
- 5.ελεγχόμενη εδαφική εναπόθεση (υγειονομική ταφή)





Σχήμα 3 Μέθοδοι Διαχείρισης Αστικών Απορριμμάτων στην Ευρώπη (Eurostat 2017)

Η διαχείριση των στερεών αποβλήτων στην ΕΕ παρουσιάζει ιδιαιτερότητες ανά χώρα ανάλογα με το επίπεδο ανάπτυξης, το επίπεδο περιβαλλοντικής τεχνολογίας και τεχνογνωσίας, τα χαρακτηριστικά εδάφους, κλίματος κ.λ.π. Ενοποιητικό στοιχείο αποτελεί το θεσμικό πλαίσιο της ΕΕ για τα απόβλητα, το οποίο με τη μορφή των Οδηγιών αποτελεί υποχρεωτικό πλαίσιο για όλα τα κράτη μέλη. Η ΕΕ προσπαθεί να αντιμετωπίσει την τεράστια πίεση που ασκούν στο περιβάλλον και τη δημόσια υγεία οι 1,3 δις τόνοι στερεών αποβλήτων που παράγονται κάθε χρόνο, εκ των οποίων σχεδόν 20% είναι οικιακά.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η παραγωγή και η διαχείριση αστικών απορριμμάτων στις χώρες της ΕΕ με την ανακύκλωση – κομποστοποίηση να κυμαίνεται από 42% στην Ευρώπη έναντι 18% στην Ελλάδα, την Ενεργειακή Αξιοποίηση κυρίως μέσω Αποτέφρωσης (Καύσης) στο 24% έναντι 0% για την Ελλάδα και για την Ταφή στο 34% έναντι 82% στην Ελλάδα [Σοφιανίδης 2015, Τερζής 2009].

Πίνακας 1 Παραγωγή και διαχείριση αστικών απορριμμάτων στην Ευρώπη (Eurostat 2012)

	Municipal waste generated,	Total municipal waste treated,	Municipal waste treated, %			Residual waste per person
	kg per person	kg per person	Recycled & composted	Landfilled	Incinerated	kg per person
EU28	492	480	42	34	24	285,36
Belgium	456	458	57	1	42	196,08
Bulgaria	460	433	27	73	0	335,8
Czech Republic	308	308	24	57	20	234,08
Denmark	668	668	45	3	52	367,4
Germany	611	610	65	0	35	213,85
Estonia	279	220	40	44	16	167,4
Ireland	570	570	45	39	16	313,5
Greece	503	493	18	82	0	412,46
Spain	464	464	27	63	10	338,72
France	534	534	39	28	33	325,74
Croatia	391	381	16	85	0	328,44
Italy	529	523	38	41	20	327,98
Cyprus	663	663	21	79	0	523,77
Latvia	301	301	16	84	0	252,84
Lithuania	469	458	21	79	1	370,51
Luxembourg	662	662	47	18	36	350,86
Hungary	402	402	26	65	9	297,48
Malta	589	559	13	87	0	512,43
Netherlands	551	551	50	2	49	275,5
Austria	552	528	62	3	35	209,76
Poland	314	249	25	75	1	235,5
Portugal	453	453	27	54	20	330,69
Romania	389	313	1	99	0	385,11
Slovenia	362	301	47	51	2	191,86
Slovakia	324	313	13	77	10	281,88
Finland	506	506	34	33	34	333,96
Sweden	462	462	47	1	52	244,86
United Kingdom	472	465	46	37	17	254,88

Source: Eurostat 2012

## 1.5 Διαχείριση στερεών αποβλήτων

### 1.5.1 Κυκλική Οικονομία

Ο όρος "απόβλητο" δεν νοείται στην φύση καθώς κάτι που είναι άχρηστο για έναν οργανισμό είναι τροφή για κάποιον άλλο, οι φυσικοί πόροι επαναχρησιμοποιούνται. Όμως η ανθρώπινη οικονομία λειτουργεί διαφορετικά: παράγεται ένα προϊόν χρησιμοποιώντας φυσικούς πόρους, χρησιμοποιείται και έπειτα θεωρείται απόβλητο (έχει μηδενική αξία) και συνήθως θάβεται, δηλαδή ακολουθεί γραμμική πορεία. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας της οικονομίας δεν είναι πλέον βιώσιμος, για αυτό και έχει προταθεί το μοντέλο της κυκλικής οικονομίας. Η κυκλική οικονομία είναι ένα βιομηχανικό σύστημα που βασίζεται στην αντικατάσταση του "τέλους ζωής" ενός προϊόντος με την αναδόμηση του προϊόντος. Προωθεί τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, την μείωση των τοξικών ουσιών (δυσκολεύουν την αναδημιουργία των προϊόντων και ρυπαίνουν τη βιόσφαιρα) και την μείωση των αποβλήτων μέσω ανώτερου σχεδιασμού προϊόντων, συστημάτων και επιχειρήσεων.

Στην κυκλική οικονομία τα "αναλώσιμα" συστατικά βιολογικής προέλευσης που συνήθως δεν είναι τοξικά αντιμετωπίζονται ως θρεπτικά συστατικά και όχι ως απόβλητα δηλαδή μπορούν μέσα από κάποια κατεργασία να επιστραφούν στη βιόσφαιρα.

Τα "μη αναλώσιμα" συστατικά που είναι κατασκευασμένα από μέταλλα και πλαστικά που δεν μπορούν να επιστραφούν στη βιόσφαιρα έχουν κατασκευαστεί εξ αρχής με το σκεπτικό επαναχρησιμοποίησης-επισκευής-αναβάθμισης έτσι ώστε να επιτελούν το σκοπό τους για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα (για παράδειγμα ηλεκτρικές συσκευές). Η έννοια του καταναλωτή (consumer) αντικαθίσταται από αυτή του χρήστη (user). Εισάγεται η έννοια της ενοικίασης και κοινής χρήσης των "μη αναλώσιμων" πόρων. Εάν γίνει αγορά, εξασφαλίζεται ότι μετά τη χρήση του προϊόντος, θα επαναχρησιμοποιηθεί αυτό ή τα υλικά από τα οποία είναι κατασκευασμένο.

Η ενέργεια που κινεί την κυκλική οικονομία προέρχεται από ανανεώσιμους πόρους για να μειωθεί η εξάρτηση από τους ορυκτούς πόρους και να αυξηθεί η αντοχή του συστήματος στην ενδεχόμενη αύξηση των τιμών των ορυκτών πόρων. [W.E.F]

### **1.5.2 Ανακυκλώσιμα-Συσκευασίες**

Τα υλικά κατατάσσονται σε κατηγορίες ανάλογα με τη σύσταση τους και έπειτα γίνεται ανάκτηση υλικών και επαναχρησιμοποίηση. Υλικά όπως χαρτί, γυαλί, αλουμίνιο, ασφάλι και κάποια είδη πλαστικού θεωρούνται ανακυκλώσιμα υλικά. Επίσης υπάρχουν κάποιες ειδικές κατηγορίες ανακύκλωσης όπως ηλεκτρικές συσκευές, υφάσματα, λάμπες κ.α. Με την ανακύκλωση είναι εφικτή η εξοικονόμηση ενέργειας από τη μειωμένη παραγωγή πρώτων υλών (για το γυαλί η εξοικονόμηση είναι 90% και για το αλουμίνιο 95 %), η εκτροπή συγκεκριμένων υλικών, η εκτροπή συγκεκριμένων υλικών από το ρεύμα των αποβλήτων και η μείωση των αρνητικών επιπτώσεων στο περιβάλλον.

### **1.5.3 Οργανικά**

Το ποσοστό του οργανικού φορτίου των οργανικών απορριμμάτων, ειδικά στην Ελλάδα είναι αρκετά υψηλό και σύμφωνα με την Κοινωνική περιβαλλοντική πολιτική και νομοθεσία, πρέπει να λαμβάνονται μέτρα για την ανάκτηση και αξιοποίηση του. Με την ανάκτηση του από το ρεύμα των στερεών αποβλήτων παράγονται χρήσιμα προϊόντα και ταυτόχρονα αυξάνεται η διάρκεια ζωής των υπαρχόντων ΧΥΤΑ και μειώνονται τα στραγγίσματα και το μεθάνιο που παράγουν. Οι μέθοδοι που εφαρμόζονται για την αξιοποίηση του οργανικού κλάσματος των στερεών αποβλήτων είναι:

Αερόβια επεξεργασία (κομποστοποίηση): ανακύκλωση των βιοαποδομήσιμων οργανικών υλικών και παραγωγή σταθεροποιημένου υλικού-compost.

Αναερόβια επεξεργασία: ανακύκλωση βιοαποδομήσιμων οργανικών υλικών και παραγωγή μεθανίου και σταθεροποιημένου υλικού.

Θερμική επεξεργασία: Ανάκτηση ενέργειας που περιέχεται στο οργανικό υλικό (αποδομήσιμο και μη αποδομήσιμο) με αποτέφρωση, αεριοποίηση, πυρόλυση και τεχνική πλάσματος.

### **1.5.4 ΧΥΤΑ**

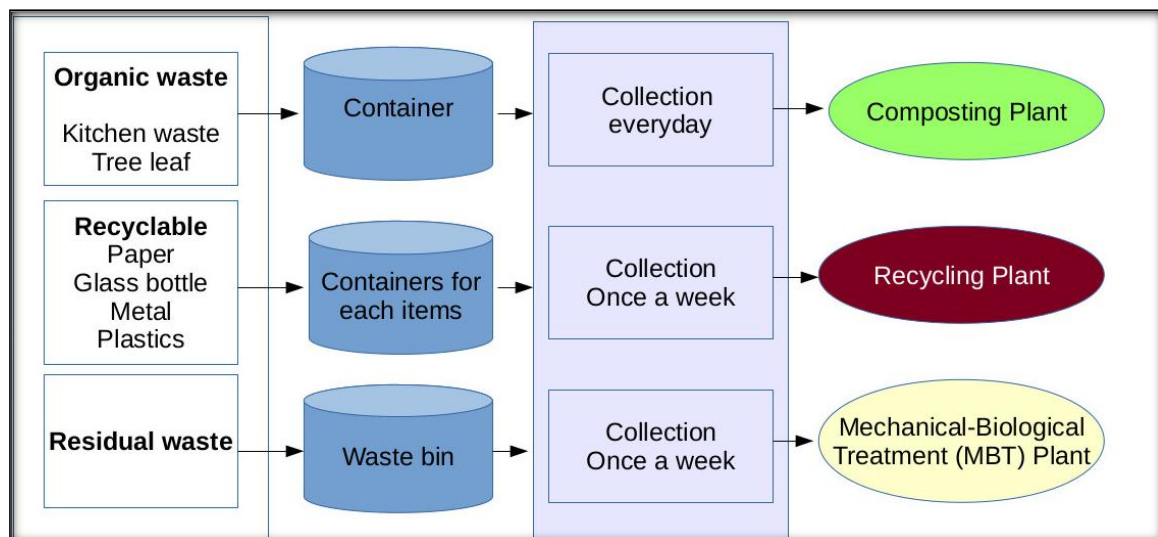
Ο ΧΥΤΑ είναι ένας χώρος κατάλληλα διαμορφωμένος ώστε να αποτίθεται σε αυτόν στερεά απόβλητα και να ελέγχονται τα προϊόντα της αποσύνθεσης τους μέχρι να καταστούν μη επικίνδυνα για το περιβάλλον και την υγεία. Ο πυθμένας και οι πλευρές της υπεδάφιας διαμόρφωσης «στεγανοποιούνται» με φυσικά ή συνθετικά υλικά. Η εναπόθεση γίνεται με διάστρωση των αποβλήτων με στρώσεις, συμπίεση τους σε προκαθορισμένο βαθμό, και κάλυψη τους με εδαφικό ή

άλλο υλικό σε περιοδική βάση. Μετά την πλήρωση του διαθέσιμου χώρου εντός του επιτρεπόμενου ανάγλυφου, ο χώρος καλύπτεται με κάλυμμα ελεγχόμενης διαπερατότητας επί του οποίου αναπτύσσεται βλάστηση.

Συνήθως πραγματοποιείται συνδυασμός των παραπάνω μεθόδων, αφού αφαιρεθούν τα ανακυκλώσιμα και τα βιοαποδομήσιμα το ρεύμα καταλήγει στο ΧΥΤΑ ή σε αποτέφρωση.

## 1.6 Συστήματα Διαλογής Απορριμμάτων

Το παραδοσιακό σύστημα διαλογής που εφαρμόζεται στην Ελλάδα περιλαμβάνει δύο ρεύματα, το ρεύμα των ανακυκλούμενων και το ρεύμα των απορριμμάτων. Είναι ένα απλό σύστημα το οποίο δεν επιβαρύνει τον πολίτη αλλά τους φορείς διαχείρισης απορριμμάτων, καθώς η ανάκτηση και ο διαχωρισμός υλικών από αυτά τα ρεύματα είναι αρκετά δύσκολος. Όσον αφορά τα βιοαπόβλητα και την παραγωγή εδαφοβελτιωτικού το σύστημα των δύο ρευμάτων δεν έχει καλά αποτελέσματα, το τελικό προϊόν έχει ρυπαντές και προσμίξεις και σπάνια μπορεί να εφαρμοστεί στο έδαφος. Ο διαχωρισμός στην πηγή των βιοαποβλήτων κρίνεται αναγκαίος.



Σχήμα 4 Σύστημα διαχείρισης με διαλογή στην πηγή (plusgreen)

Με το διαχωρισμό των διαφόρων ρευμάτων των αποβλήτων μέσα στο σπίτι ή την επιχείρηση, τα υλικά μεταφέρονται είτε με την ευθύνη των πολιτών (σε κέντρα ανακύκλωσης ή σε ειδικούς κάδους) ή με ευθύνη του δημοτικού φορέα (σύστημα τακτικής περιοδικής συλλογής «από πόρτα σε πόρτα» ή συλλογή με προ συνεννόηση νοικοκυριού-συλλέκτη). Για την διαλογή στην πηγή των οικιακών αποβλήτων απαιτούνται τα εξής: Χωριστές σακούλες στο σπίτι για κάθε υλικό, ειδικοί κάδοι για τη συλλογή των υλικών, κέντρα συλλογής των διαχωρισμένων υλικών και ειδικά οχήματα συλλογής και μεταφοράς των διαχωρισμένων υλικών. Διεθνής έρευνα έχει δείξει ότι το συνολικό κόστος συλλογής και μεταφοράς μειώνεται με τα συστήματα διαλογής στην πηγή ακόμα και αν χρησιμοποιηθούν ειδικές σακούλες, κάδοι και προσωπικό συλλογής. Αυτό οφείλεται κυρίως στα 1) τα οχήματα συλλογής βιοαποβλήτων δεν έχουν σύστημα συμπίεσης 2) η συχνότητα συλλογής των υπόλοιπων αποβλήτων αραιώνει σημαντικά. [Παναγιωτόπουλος 2007, Λοϊζίδου 2006]

## 1.7 Θεσμικό πλαίσιο

### 1.7.1 Βιοαποδομήσιμα απόβλητα

Οι σχετικές οδηγίες της Ε.Ε. με τα απόβλητα, θέτουν τους ποσοτικούς στόχους ανακύκλωσης για το 47% από τα 3 εκ. τόνους αποβλήτων τα οποία παράγονται στα κράτη μέλη, ενώ περίπου το 50% αυτής της ποσότητας οδηγείται προς ανακύκλωση.

Χαρακτηριστική περίπτωση αποτελεί η εφαρμογή της Οδηγίας 1999/31/ΕΚ για την υγειονομική ταφή σχετικά με τη μείωση των βιοαποδομήσιμων αστικών αποβλήτων που καταλήγουν σε ΧΥΤΑ όπου σε συνδυασμό με τους μακροπρόθεσμους στόχους, λειτούργησε προς την κατεύθυνση αυτή. Ωστόσο, η πλήρης υλοποίηση των στόχων εκτροπής εξακολουθεί να αποτελεί πρόκληση για πολλές χώρες στην ΕΕ όπως και στην Ελλάδα.

Τα παραπάνω επιβεβαιώνουν το γεγονός ότι οι στόχοι που τίθενται σε ευρωπαϊκό επίπεδο παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο σε ότι αφορά την περαιτέρω προώθηση της ανακύκλωσης ανά ρεύμα αποβλήτων και καθιστά επιβεβλημένη την θέσπιση και ενσωμάτωση στόχων στις επερχόμενες μελλοντικές πολιτικές όλων των κρατών μελών.

Σε αυτήν την κατεύθυνση προσανατολίζεται ο ΝΟΜΟΣ 4042 (ΦΕΚ Α' 24/13-02-2012) «Ποινική προστασία του περιβάλλοντος-Πλαίσιο παραγωγής και διαχείρισης αποβλήτων» όπου εναρμονίζεται με την Οδηγία 2008/99/ΕΚ και την Οδηγία 2008/98/ΕΚ και θέτει στόχους σχετικά με τη διαχείριση των βιοαποβλήτων (άρθρο 41) ενώ ορίζονται τα κατάλληλα μέτρα και οι ελάχιστες απαιτήσεις ανάλογα με την περίπτωση (άρθρο 45) προκειμένου να ενθαρρυνθεί: α) Η χωριστή συλλογή βιολογικών αποβλήτων (βιοαποβλήτων) με σκοπό την κομποστοποίηση ή τη ζύμωση (digestion) των βιολογικών αποβλήτων, β) Η επεξεργασία των βιολογικών αποβλήτων κατά τρόπο που να διασφαλίζει υψηλό επίπεδο περιβαλλοντικής προστασίας, γ) Η χρήση περιβαλλοντικά ασφαλών υλικών, τα οποία παράγονται από βιολογικά απόβλητα. [ΕΠΠΕΡΑΑ 2012]

Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζεται το υπάρχον θεσμικό πλαίσιο όσον αφορά τα αστικά και τα βιοαποδομήσιμα απόβλητα.

**Πίνακας 2 Θεσμικό πλαίσιο για αστικά-βιοαποδομήσιμα απόβλητα (ΕΠΠΕΡΑΑ 2012)**

Ευρωπαϊκή Νομοθεσία	Εθνική Νομοθεσία	Επισημάνσεις
<b>Οδηγία 98/2008/ΕΚ για τα απόβλητα</b> <b>Οδηγία 2008/99/ΕΚ</b> σχετικά με την προστασία του περιβάλλοντος μέσω του ποινικού δικαίου.	<b>ΝΟΜΟΣ 4042</b> (ΦΕΚ Α' 24/13-02-2012) Ποινική προστασία του περιβάλλοντος - Πλαίσιο παραγωγής και διαχείρισης αποβλήτων.	(Εναρμόνιση με την Οδηγία 2008/99/ΕΚ και την Οδηγία 2008/98/ΕΚ.) Σύμφωνα με το άρθρο 41: Έως το 2015, το ποσοστό χωριστής συλλογής των βιολογικών αποβλήτων πρέπει να ανέλθει, κατ' ελάχιστον, στο 5% του συνολικού βάρους των βιολογικών αποβλήτων και έως το 2020, κατ' ελάχιστον, στο 10% του συνολικού βάρους των βιολογικών αποβλήτων.
<b>Οδηγία 91/156/ΕΚ</b> περί στερεών αποβλήτων.	<b>ΚΥΑ 114218/1997</b> (ΦΕΚ 1016Β/17.11.97), Κατάρτιση πλαισίου Προδιαγραφών και γενικών προγραμμάτων διαχείρισης στερεών αποβλήτων.	Ενσωμάτωση των γενικών κατευθύνσεων και προδιαγραφών της 75/442/ΕΚ περί στερεών αποβλήτων, όπως τροποποιήθηκε από την 91/156/ΕΚ.
<b>Οδηγία 1999/31/ΕΚ</b> περί υγειονομικής ταφής αποβλήτων.	<b>ΚΥΑ 29407/3508/2002</b> (ΦΕΚ 1572Β/16.12.02), Μέτρα και όροι για την υγειονομική ταφή των αποβλήτων	Θέσπιση στόχων για επεξεργασία πριν την ταφή και μείωση της ποσότητας των ΒΑΑ που οδηγείται για ταφή.
<b>Οδηγία 75/442/ΕΚ</b> , όπως τροποποιήθηκε με την 91/156/ΕΚ.	<b>ΚΥΑ 50910/2727/2003</b> (ΦΕΚ 1909Β/22.12.2003), Μέτρα και Όροι για τη Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων. Εθνικός και Περιφερειακός Σχεδιασμός Διαχείρισης.	Εναρμόνιση εθνικού με ευρωπαϊκό δίκαιο Σε εθνικό επίπεδο με την εν λόγω ΚΥΑ ενσωματώθηκε η 75/442/ΕΚ, όπως τροποποιήθηκε με την 91/156/ΕΚ θέτοντας αυστηρότερες κατευθύνσεις, μέτρα, όρους και διαδικασίες για την διαχείριση στερεών αποβλήτων και εισήγαγε τους ευρωπαϊκούς στόχους και αρχές στην εθνική στρατηγική διαχείρισης.
<b>Οδηγία 2008/1/ΕΚ</b> , σχετικά με την ολοκληρωμένη πρόληψη και έλεγχο της ρύπανσης.	<b>ΚΥΑ 22912/1117</b> (ΦΕΚ 759Β/06.06.05) Μέτρα και όροι για την πρόληψη και τον περιορισμό της ρύπανσης του περιβάλλοντος από την αποτέφρωση των αποβλήτων.	Εναρμόνιση εθνικού με ευρωπαϊκό δίκαιο.
<b>Κανονισμός 1774/2002/ΕΚ</b> , για τον καθορισμό υγειονομικών κανόνων σχετικά με τα ζωικά υποπροϊόντα που δεν προορίζονται για κατανάλωση από τον άνθρωπο.	<b>ΠΔ 211/2006</b> (ΦΕΚ 211Α/05.06.06), Συμπληρωματικά μέτρα εκτέλεσης του <b>Κανονισμού 1774/2002/ΕΚ</b> του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 3 <sup>ης</sup> Οκτωβρίου 2002 για τον καθορισμό υγειονομικών κανόνων σχετικά με τα ζωικά υποπροϊόντα που δεν προορίζονται για κατανάλωση από τον άνθρωπο.	Ενσωμάτωση εθνικού με ευρωπαϊκό δίκαιο Το ΠΔ συμπληρώνεται και με τις εγκυκλίους όπως παρουσιάστηκαν ανωτέρω. Δίνονται προδιαγραφές για εγκαταστάσεις λιασματοποίησης και αναερόβιας χώνευσης (παρασκευής βιοαερίου), αδειοδότηση και ορθή λειτουργία. Επίσης, γίνεται και προσέγγιση για θέσπιση κριτηρίων οργανικών λιασμάτων από υλικά αυτών των κατηγοριών.
<b>Κανονισμός 1069/2009/ΕΚ</b> , περί υγειονομικών κανόνων για ζωικά υποπροϊόντα και παράγωγα προϊόντα που δεν προορίζονται για κατανάλωση από τον άνθρωπο - κατάργηση του κανονισμού (ΕΚ) αριθ. 1774/2002 (κανονισμός για τα ζωικά υποπροϊόντα).	-	Νέο συνθετικό και συνολικό πλαίσιο κοινοτικών υγειονομικών κανόνων για τη συλλογή, τη μεταφορά, τον χειρισμό, τον μετασχηματισμό, τη μεταποίηση, την αποθήκευση, τη διάθεση στην αγορά, τη διακίνηση, τη χρήση ή την απόρριψη των ζωικών υποπροϊόντων.
<b>Κανονισμός 142/2011/ΕΚ</b> , για την εφαρμογή του κανονισμού (ΕΚ) αριθ. 1069/2009 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου περί υγειονομικών κανόνων για ζωικά υποπροϊόντα και παράγωγα προϊόντα που δεν προορίζονται για κατανάλωση από τον άνθρωπο.	-	Θέσπιση κανόνων για τη διαχείριση ζωικών υποπροϊόντων, την επίτευξη των στόχων του Κανονισμού 1069/2009/ΕΚ και τη βιώσιμη χρήση ζωικών υλικών, αλλά και τη διατήρηση υψηλού επιπέδου προστασίας της δημόσιας υγείας και υγείας των ζώων στην ΕΕ.
<b>Οδηγία 2000/76/ΕΚ</b> , για την αποτέφρωση των αποβλήτων.	<b>ΚΥΑ 22912/1117</b> (ΦΕΚ 759Β/06.06.05) Μέτρα και όροι για την πρόληψη και τον περιορισμό της ρύπανσης του περιβάλλοντος από την αποτέφρωση των αποβλήτων.	Εναρμόνιση εθνικού με ευρωπαϊκό δίκαιο.
<b>Οδηγία 2006/799/ΕΚ</b> , περί καθορισμού αναθεωρημένων οικολογικών κριτηρίων και των σχετικών απαιτήσεων αξιολόγησης και εξακρίβωσης για την απονομή κοινοτικού οικολογικού σήματος σε βελτιωτικά εδάφους.	-	Με τις οδηγίες αυτές είναι σαφής η προώθηση της χρήσης ανανεώσιμων υλικών ή/και η ανακύκλωση οργανικής ύλης προερχόμενης από συγκέντρωση ή/και επεξεργασία αποβλήτων, ως συμβολή στην ελαχιστοποίηση των προς τελική διάθεση στερεών αποβλήτων σε εθνικό επίπεδο ακόμη δεν έχουν εναρμονιστεί.
<b>Οδηγία 2007/64/ΕΚ</b> , περί καθορισμού αναθεωρημένων οικολογικών κριτηρίων και των σχετικών απαιτήσεων αξιολόγησης και εξακρίβωσης για την απονομή κοινοτικού οικολογικού σήματος σε καλλιεργητικά μέσα.	-	
<b>Οδηγία 28/2009/ΕΚ</b> , σχετικά με την προώθηση της χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές	<b>Νόμος 3468/2006</b> (ΦΕΚ 129Α/27.06.06) Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές & Συμπαράγωγή Ηλεκτρισμού & Θερμότητας Υψηλής Απόδοσης (τροποποιήθηκε από τους Ν. 3734/2009, Ν. 3851/2010, Ν. 3889/2010.	Ενσωμάτωση της ευρωπαϊκής στην εθνική νομοθεσία. Τίθενται στόχοι σε εθνικό επίπεδο συμπεριλαμβανόμενοι και τα βιοαπόβλητα ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, στο ευρύτερο πλαίσιο της βιομάζας.

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά οι στόχοι της Η.Π. 29407/3508/2002 (απόκριση της Ελλάδας στην Ευρωπαϊκή οδηγία 1999/31/ΕΚ) καθώς σχετίζεται άμεσα με την παρούσα διπλωματική εργασία.

Η εθνική στρατηγική για τη μείωση των βιοαποδομήσιμων αστικών αποβλήτων που προορίζονται για ΧΥΤΑ προσδιορίζεται από το ΥΠΕΧΩΔΕ σε συνεργασία με τους συναρμόδιους φορείς του Δημοσίου και ιδιωτικού τομέα και περιλαμβάνει την λήψη των αναγκαίων και καταλλήλων μέτρων για την επίτευξη των ακόλουθων στόχων:

α) Μέχρι την 16η Ιουλίου 2010 τα βιοαποδομήσιμα αστικά απόβλητα που προορίζονται για ΧΥΤΑ πρέπει να μειωθούν στο 75% της συνολικής (κατά βάρος) ποσότητας των βιοαποδομήσιμων αστικών αποβλήτων που είχαν παραχθεί το 1995 ή το τελευταίο προ του 1995 έτος για το οποίο υπάρχουν διαθέσιμα τυποποιημένα στοιχεία της Eurostat.

β) Μέχρι την 16η Ιουλίου 2013 τα βιοαποδομήσιμα αστικά απόβλητα που προορίζονται για ΧΥΤΑ πρέπει να μειωθούν στο 50% της συνολικής (κατά βάρος) ποσότητας των βιοαποδομήσιμων αστικών αποβλήτων που είχαν παραχθεί το 1995 ή το τελευταίο προ του 1995 έτος για το οποίο υπάρχουν διαθέσιμα τυποποιημένα στοιχεία της Eurostat.

γ) Μέχρι την 16η Ιουλίου 2020 τα βιοαποδομήσιμα αστικά απόβλητα που προορίζονται για ΧΥΤΑ πρέπει να μειωθούν στο 35% της συνολικής (κατά βάρος) ποσότητας των βιοαποδομήσιμων αστικών αποβλήτων που είχαν παραχθεί το 1995 ή το τελευταίο προ του 1995 έτος για το οποίο υπάρχουν διαθέσιμα τυποποιημένα στοιχεία της Eurostat.

Τα μέτρα για την επίτευξη των στόχων της προηγούμενης παραγράφου αναφέρονται κυρίως στην προώθηση της αξιοποίησης των αποβλήτων και ειδικότερα στην **ανακύκλωση, λιπασματοποίηση ή παραγωγή βιομεθανίου ή ανάκτηση υλικών/ενέργειας**. [ΦΕΚ Β-1572]

Πίνακας 3 Ποσοτικοί στόχοι διαχείρισης βιοαποβλήτων (ΕΣΔΑ 2015)

	2020	
Παραγόμενα ΒΑΑ [Βιοαπόβλητα & Χαρτί-Χαρτόνι]	χιλ. τόνοι	3.844
Στόχος με έωσης ΒΑΑ που προορίζονται για υγειονομική ταφή σε σχέση με την παραγόμενη ποσότητα ΒΑΑ του 1997 <sup>(*)</sup>	%	35%
	χιλ. τόνοι	910
Στόχος εκτροπής ΒΑΑ	χιλ. τόνοι	2.934
<i>Ταφή σε σχέση με την τρέχουσα παραγωγή ΒΑΑ</i>	%	23,7%
<i>Εκτροπή από ταφή σε σχέση με την τρέχουσα παραγωγή ΒΑΑ</i>	%	76,3%

<sup>(\*)</sup> Έτος βάσης ποσοτικοποίησης των στόχων για το οποίο υπάρχουν διαθέσιμα τυποποιημένα στοιχεία της Eurostat

### 1.7.2 Διαλογή στην πηγή- Κομποστοποίηση

Με τον Ν. 4042/2012 και την αναθεώρηση του ΕΣΔΑ καθιερώνεται πλέον στην Ελλάδα η χωριστή συλλογή των βιοαποβλήτων και προωθείται η ανάπτυξη δικτύου για την ανάκτηση τους. Στο πλαίσιο αυτό, οι μονάδες κομποστοποίησης αναμένεται να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο τη διαχείριση των αποβλήτων:

-Σύσταση φορέα συντονισμού διαχείρισης βιοαποβλήτων, με αντικείμενο την οργάνωση, το συντονισμό και την υποστήριξη των φορέων διαχείρισης αποβλήτων (ΦοΔΣΑ, Δήμοι) και των αρμόδιων υπηρεσιών της κεντρικής διοίκησης, καθώς και τη συνεργασία με τους φορείς εκμετάλλευσης μέσω των κλαδικών τους φορέων

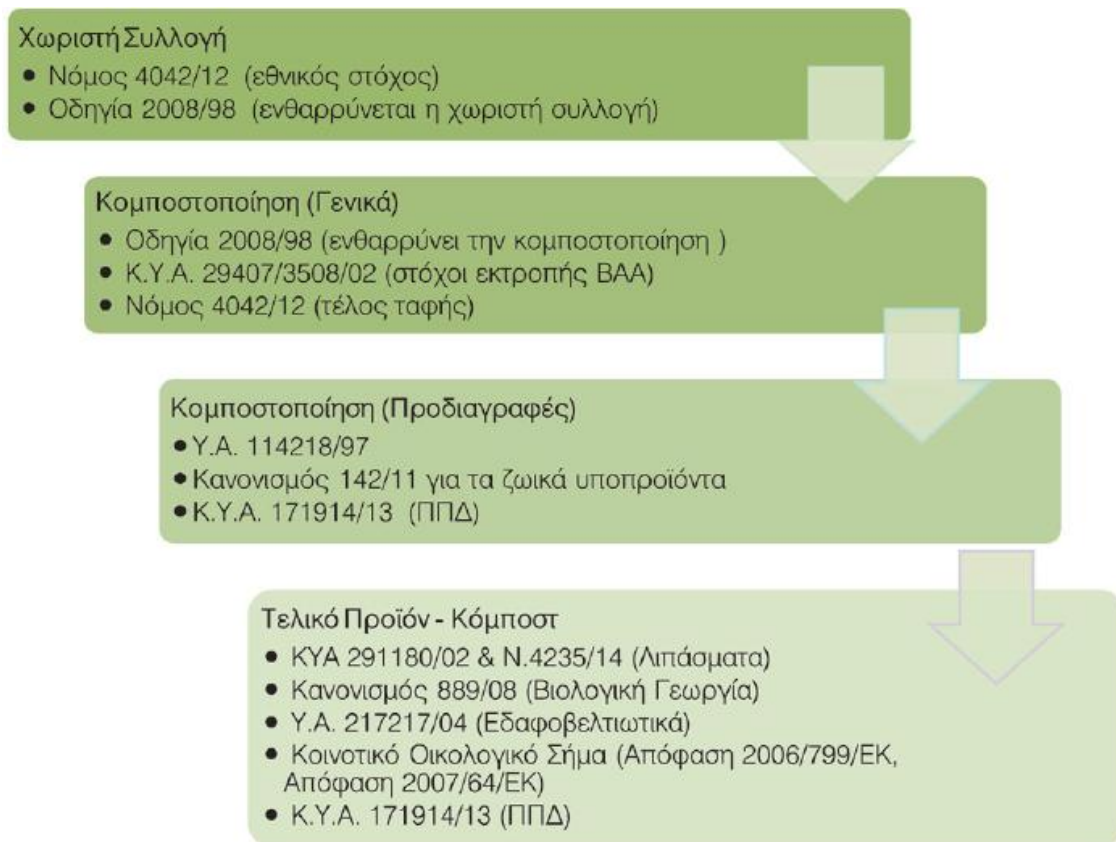
-Ανάπτυξη προγραμμάτων οικιακής/επιτόπιας κομποστοποίησης σε πανελλαδικό επίπεδο, με έμφαση σε περιοχές με αγροτικό/ημιαστικό χαρακτήρα.

-Ανάπτυξη δικτύου χωριστής συλλογής βιοαποβλήτων για την εξυπηρέτηση των προβλεπόμενων μονάδων ανάκτησης βιοαποβλήτων ή και των μονάδων δημοτικής κομποστοποίησης. Εκτός από τα νοικοκυριά, το δίκτυο περιλαμβάνει τους "μεγάλους" παραγωγούς (χώρους πρασίνου, χώρους μαζικής εστίασης, ξενοδοχεία, υγειονομικές μονάδες, στρατόπεδα, λαχαναγορές, κ.λ.π.)

-Διεύρυνση δικτύου χωριστής συλλογής αποβλήτων βρώσιμων ελαίων και λιπών κατά προτεραιότητα για την παραγωγή βιοκαυσίμων.

-Προώθηση συμφωνιών με άλλους παραγωγικούς κλάδους ή διαπεριφερειακές συμφωνίες για την συνεπεξεργασία οργανικών αποβλήτων. [ΕΠΠΕΡΑΑ 2014]

Στο παρακάτω σχήμα αναλύεται το υπάρχον θεσμικό πλαίσιο για την συλλογή βιοαποβλήτων και την κομποστοποίησή τους.



Σχήμα 5 Θεσμικό πλαίσιο βιοαποβλήτων και κομποστοποίησης (ΕΠΠΕΡΑΑ 2014)



## 2. Κομποστοποίηση

### 2.1 Απόβλητα κατάλληλα για κομποστοποίηση

Η κομποστοποίηση έχει προσελκύσει ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια καθώς έχει εφαρμογές σε αγροτικά, αστικά και βιομηχανικά απόβλητα. Τα οργανικά υποστρώματα και οι διογκωτικοί παράγοντες (bulking agents) που χρησιμοποιούνται έχουν συνήθως φυτική προέλευση. Παραδείγματα υποστρωμάτων που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι ξυλώδη και φυλώδη κλαδέματα, φύλλα, αστικά οργανικά απόβλητα, λυματολάσπη, πριονίδι, και κοπριές από οικόσιτα ζώα.[Cohen et al. 2001]

### 2.2 Περιγραφή Διεργασίας

Ο ορισμός της κομποστοποίησης όταν αυτή εφαρμόζεται στα αστικά απόβλητα είναι: κομποστοποίηση είναι η βιολογική αποσύνθεση του βιοαποδομήσιμου οργανικού κλάσματος των αστικών αποβλήτων υπό ελεγχόμενες συνθήκες προς ένα ικανοποιητικά σταθερό προϊόν το οποίο μπορεί να αποθηκευτεί χωρίς προβλήματα και να είναι αρκετά ασφαλές ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί με ασφάλεια στο έδαφος. Ο όρος "υπό ελεγχόμενες συνθήκες" διαχωρίζει την κομποστοποίηση από την απλή αποσύνθεση της οργανικής ύλης που παρατηρείται σε ανοιχτές χωματερές ή σε χωράφια. Είναι μια οικολογική εναλλαγή μικροβιακών πληθυσμών οι οποίοι υπάρχουν στα απόβλητα. Η εναλλαγή ξεκινάει με την εγκατάσταση κατάλληλων συνθηκών για την κομποστοποίηση. Τα προϋπάρχοντα μικρόβια που μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα θρεπτικά συστατικά των αποβλήτων αρχίζουν να πολλαπλασιάζονται. Η δραστηριότητα αυτών των βακτηρίων δημιουργεί καλές συνθήκες και για άλλα προϋπάρχοντα μικρόβια.

Κύρια προϊόντα της κομποστοποίησης είναι νερό, CO<sub>2</sub>, αλλά κυρίως το κομπόστ: ένα πλούσιο σε οργανική ουσία υλικό, με υψηλό χουμικό περιεχόμενο. Ανεπιθύμητα «παραπροϊόντα» είναι οι οσμές, ο θόρυβος, οι σκόνες, παθογόνοι μικροοργανισμοί, πτητική οργανική ύλη, στραγγίσματα, κ.α. Κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης, έχουμε «απώλεια» μάζας της τάξης του 50%. Το προϊόν της κομποστοποίησης προσθέτει χούμους και άλλα χρήσιμα στοιχεία στο έδαφος, όταν χρησιμοποιηθεί σαν βιολογικό λίπασμα. Αυτό σήμερα με τη μείωση της παραγωγικότητας του εδάφους και τον υπερπληθυσμό, αποτελεί μια πρόσφορη λύση για τόνωση στην παραγωγή γεωργικών προϊόντων. Η ανάγκη για προαγωγή του χούμους του εδάφους έχει ειδικά αναγνωριστεί στις θερμότερες χώρες, στις οποίες οι υψηλότερες θερμοκρασίες και η θερινή ξηρασία προκαλούν γρήγορη καταστροφή του χούμους με διαρρήξεις στη συνοχή του εδάφους.

Η κομποστοποίηση των οργανικών απορριμμάτων είναι γνωστή από το 1935, πάρα αυτά δεν είναι διαδεδομένη, ειδικά στην Ελλάδα. Τούτο οφείλεται στην κακή αποδοχή του προϊόντος από τους γεωργούς από αμφιβολίες για τοξικότητα και περιεκτικότητα σε παθογόνα. Πράγματι, η καταγωγή των απορριμμάτων δεν πείθει για σταθερή σύσταση και η παρουσία μετάλλων, όπως χαλκού, μολύβδου, νικελίου και ψευδαργύρου μπορεί να είναι καταστρεπτικά υψηλή, όπως και οι οσμές σημαντικά απωθητικές. Στο μεταξύ όμως, η τεχνολογία της κομποστοποίησης έχει σημαντικά βελτιωθεί και τα παραγόμενα προϊόντα μπορεί να είναι ελεύθερα από τοξικά μέταλλα και από παθογόνους μικροοργανισμούς. [Βαλκανάς 2002, Diaz et al. 1994, Παναγιωτακόπουλος 2007]

### 2.3 Μικροοργανισμοί

Οι οργανισμοί που συμμετέχουν ενεργά στην κομποστοποίηση μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε 6 ομάδες: βακτήρια, ακτινομύκητες, μύκητες, πρωτόζωα, σκώληκες και κάποιες νύμφες εντόμων.

## **Βακτήρια**

Περιλαμβάνονται πολλά είδη βακτηρίων (βλέπε παράρτημα), για παράδειγμα έχει απομονωθεί και ταυτοποιηθεί μέχρι το επίπεδο του γένους το *pseudomonas*. Τα βακτήρια είναι οι πιο σημαντικοί μικροοργανισμοί στη διεργασία και τα πρώτα που πολλαπλασιάζονται. Το θερμοκρασιακό διάστημα 50-60°C ευνοεί τα βακτήρια ειδικότερα το γένος *Bacillus*. Όταν η θερμοκρασία υπερβαίνει τους 65 °C κυριαρχεί το *B. stearothermophilus*. Το είδος *Thermus* που παλαιότερα είχε βρεθεί σε γεωθερμικές πηγές βρέθηκε και σε κομπόστ, έχει προσαρμοστεί στη θερμοφιλή φάση της κομποστοποίησης. Η ιδανική θερμοκρασία για το *Thermus* είναι 65-75 °C. Επίσης βρέθηκαν και αυτότροφα βακτήρια που μοιάζουν με το *Hydrogenobacter*, που συνήθως συναντάται σε γεωθερμικές πηγές, ιδανική θερμοκρασία για αυτά είναι 70-75 °C. Παράγουν ενέργεια οξειδώνοντας θείο ή υδρογόνο και συνθέτουν οργανική ύλη από το CO<sub>2</sub> (Beffa et al. 1996).

## **Ακτινομύκητες**

Παρόλο που οι ακτινομύκητες είναι βακτήρια, παρουσιάζονται χωριστά λόγω του σημαντικού ρόλου που έχουν στο στάδιο της ωρίμανσης. Έχουν απομονωθεί και ταυτοποιηθεί δύο είδη ακτινομυκήτων, το *Actinomyces* και το *Streptomyces*. Προτιμούν ουδέτερο ή ελαφρά βασικό pH και μπορούν να αποικοδομήσουν περίπλοκες ουσίες. Ευημερούν σε συνθήκες υψηλής υγρασίας, σε περιβάλλον πλούσιο σε οξυγόνο και σε θερμοκρασίες 50-60 °C. Συνήθως εμφανίζονται όταν έχει ήδη ξεκινήσει η αποδόμηση της οργανικής ύλης από τα βακτήρια και η θερμοκρασία έχει ανέβει πάνω από 45 °C, παραμένουν μέχρι τα τελευταία στάδια.

## **Μύκητες**

Οι μύκητες είναι εξίσου σημαντικοί με τα βακτήρια για την κομποστοποίηση. Στα αρχικά στάδια της κομποστοποίησης είναι λιγότεροι από τα βακτήρια. Τα βακτήρια έχουν γρηγορότερο ρυθμό ανάπτυξης, είναι θερμοάντοχα και δεν χρειάζονται τόσο οξυγόνο όσο οι μύκητες. Αντίθετα στα τελευταία στάδια της κομποστοποίησης που ο σωρός δεν έχει πολύ υγρασία, κυριαρχούν οι μύκητες καθώς είναι πιο ανθεκτικοί από τα βακτήρια σε συνθήκες χαμηλής υγρασίας. Οι κυρίαρχοι μεσοφιλικόι μύκητες στο ενεργό κομπόστ είναι ο *Geotrichum*spp. και ο *Aspergillus fumigatus* (Tuomela et al., 2000). Όταν το υπόστρωμα είναι πλούσιο σε κυτταρίνη και λιγνίνη οι μύκητες είναι πιο σημαντικοί από τα βακτήρια καθ' όλη τη διάρκεια της διεργασίας.

## **Πρωτόζωα**

Τα πρωτόζωα είναι μονοκύτταροι ζωικοί οργανισμοί και συνήθως τρέφονται με βακτήρια. Βρίσκονται σε φιλμ νερού μέσα στο σωρό του κομπόστ. Δεν εμπλέκονται άμεσα στην αποδόμηση της πρώτης ύλης αλλά απελευθερώνουν θρεπτικά συστατικά από τη βακτηριακή βιομάζα με την οποία τρέφονται.

## **Σκώληκες**

Κυρίως νηματοειδή και γαιοσκώληκες (είδος: *annelids*)

## **Νύμφες**

Εμφανίζονται νύμφες από διάφορα είδη μυγών

Οι παραπάνω οργανισμοί υπάρχουν σε όλα τα απόβλητα, ειδικά στα αστικά απόβλητα και στα κλαδέματα. Τα συγκεκριμένα είδη οργανισμών εξαρτώνται από τις εκάστοτε περιβαλλοντικές και κλιματολογικές συνθήκες. [Insam et al. 2007, Diaz et al. 1994, Cohen et al. 2001, Clarholm et al. 2007]

## 2.4 Μεταβολή οργανικής ύλης

Η οργανική ύλη κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης υφίσταται διάφορες μεταβολές μέσω διαφορετικών μεταβολικών μονοπατιών: ανοργανοποίηση, χουμοποίηση, μερική αποδόμηση. Όλες οι διεργασίες αζώτου που υπάρχουν στη φύση συμβαίνουν και στην κομποστοποίηση αλλά με διαφορετικό ρυθμό. Οι πιο σημαντικές διεργασίες αζώτου στην κομποστοποίηση είναι η αμμωνιοποίηση, η νιτροποίηση και η μικροβιακή ακινητοποίηση. Η αφομοίωση νιτρικών ιόντων από τους μικροοργανισμούς και η μετατροπή τους σε οργανικό άζωτο είναι πολύ σημαντική καθώς μειώνει τις απώλειες αζώτου στο κομπόστ και στο χώμα. [Insam et al. 2007]

### 2.4.1 Άζωτο

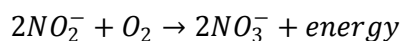
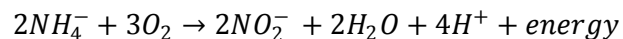
*Αμμωνιοποίηση (ammonification-mineralization):*

Αμμωνιοποίηση είναι η μετατροπή του οργανικού αζώτου σε αμμώνιο και πραγματοποιείται από ετερότροφους μικροοργανισμούς του χώματος. Αυτή η μορφή του αζώτου είναι διαθέσιμη σε κάποια φυτά (π.χ. ρύζι) και δεν στραγγίζεται καθώς το κατιόν του αμμωνίου κρατείται στην επιφάνεια ανιόντων του χώματος.

*Νιτροποίηση (nitrification):*

Νιτροποίηση είναι η μετατροπή του αμμωνίου σε νιτρώδη και νιτρικά ιόντα. Τα νιτρικά είναι διαθέσιμα σε όλα τα φυτά και λόγω του αρνητικού φορτίου δεν απορροφώνται από τα σωματίδια του χώματος. Μπορούν εύκολα να στραγγιστούν και να περάσουν στον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα.

Το αμμώνιο οξειδώνεται σε νιτρικά μέσω της δραστηριότητας δύο βακτηρίων του χώματος. Τα βακτήρια αυτά είναι αυτοτροφικά, δηλαδή παίρνουν τον άνθρακα που χρειάζονται από το CO<sub>2</sub> και ενέργεια από την οξείδωση των αμμωνιακών σε νιτρικά και νιτρώδη, είναι υποχρεωτικά αερόβια. Η οξείδωση γίνεται σε δύο βήματα, πρώτα τα αμμωνιακά μετατρέπονται σε νιτρώδη και μετά σε νιτρικά. Οι αντιδράσεις παρουσιάζονται παρακάτω:



Η πρώτη αντίδραση πραγματοποιείται κυρίως από τα *Nitrosomonas* αλλά και τα *Nitrosospira*, *Nitrosolobus*, *Nitrosovibrios* μπορούν να οξειδώσουν τα αμμωνιακά προς νιτρώδη. Η δεύτερη αντίδραση πραγματοποιείται από τα *Nitrobacter* και από *Nitrospora*-like βακτήρια (Schmidt 1982; Bartosch et al. 2002). Είναι πολύ γρήγορη, με αποτέλεσμα τα νιτρώδη να μην συσσωρεύονται στο χώμα. Τα βακτήρια που οξειδώνουν το αμμώνιο και αυτά που οξειδώνουν τα νιτρώδη συνήθως βρίσκονται μαζί (Paul and Clark 1996).

Ο ρυθμός με τον οποίο πραγματοποιείται η νιτροποίηση επηρεάζεται από τις συνθήκες του χώματος, όπως την υγρασία, το pH, και τα θρεπτικά συστατικά. Η νιτροποίηση επιφέρει όξυνση του χώματος.

#### *Ακίνητοποίηση (immobilization):*

Ακίνητοποίηση είναι η δέσμευση του αζώτου από μικροοργανισμούς του χώματος. Όταν προστίθεται στο χώμα ύλη πλούσια σε άνθρακα οι μικροοργανισμοί δεσμεύουν άζωτο για να την αποσυνθέσουν και μπορεί να προκαλέσουν έλλειψη αζώτου στα φυτά. Για παράδειγμα αν προστεθεί ανώριμο κομπόστ στο χώμα, θα συνεχίσει η αποσύνθεση της ύλης και μπορεί να γίνει ακίνητοποίηση αζώτου. Όταν τελειώσει η αποσύνθεση το άζωτο θα αποδεσμευθεί.

#### *Απονιτροποίηση (denitrification):*

Απονιτροποίηση είναι η βιολογική αναγωγή των νιτρικών και νιτρωδών προς αέριες μορφές αζώτου (N<sub>2</sub>, NO, N<sub>2</sub>O). Είναι πολύ γρήγορη και πραγματοποιείται κυρίως από τα *Pseudomonas* ή τα *Alcaligenes* (Tate, 1995). Κάτω από αναερόβιες συνθήκες και παρουσία οργανικής ύλης το άζωτο του χώματος γίνεται ατμοσφαιρικό άζωτο και απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα. Τα νιτρικά απορροφώνται από τα φυτά ενώ το αέριο άζωτο χάνεται στην ατμόσφαιρα.

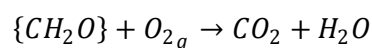
#### *Απώλεια αμμωνίας (volatilization):*

Όταν αμμωνία τοποθετείται στο χώμα, ένα μέρος της μπορεί να αεριοποιηθεί και να μην είναι πλέον διαθέσιμη στα φυτά.

[McLaren et al. 1996, Manahan 1994, Epstein 2003, Curtin et al. 2008, Drury et al. 2008]

### **2.4.2 Άνθρακας**

Οι μικροοργανισμοί που αποσυνθέτουν την ύλη μετατρέπουν τον οργανικό άνθρακα σε ανόργανο και μέσω της αναπνοής απελευθερώνουν CO<sub>2</sub> ως μεταβολικό παραπροϊόν σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση:



Αρχικά αποικοδομούνται τα απλά οργανικά μόρια (διαλυτά σάκχαρα, οργανικά οξέα) από την ετεροτροφική, ετερογενή μικροχλωρίδα. Τα μεγάλα πολυμερή διασπώνται αργότερα από διαφορετικούς μικροβιακούς πληθυσμούς (μύκητες-ακτινομύκητες). [Manahan 1994, Bertoldi et al. 1983]

### **2.4.3 Χουμικές ουσίες**

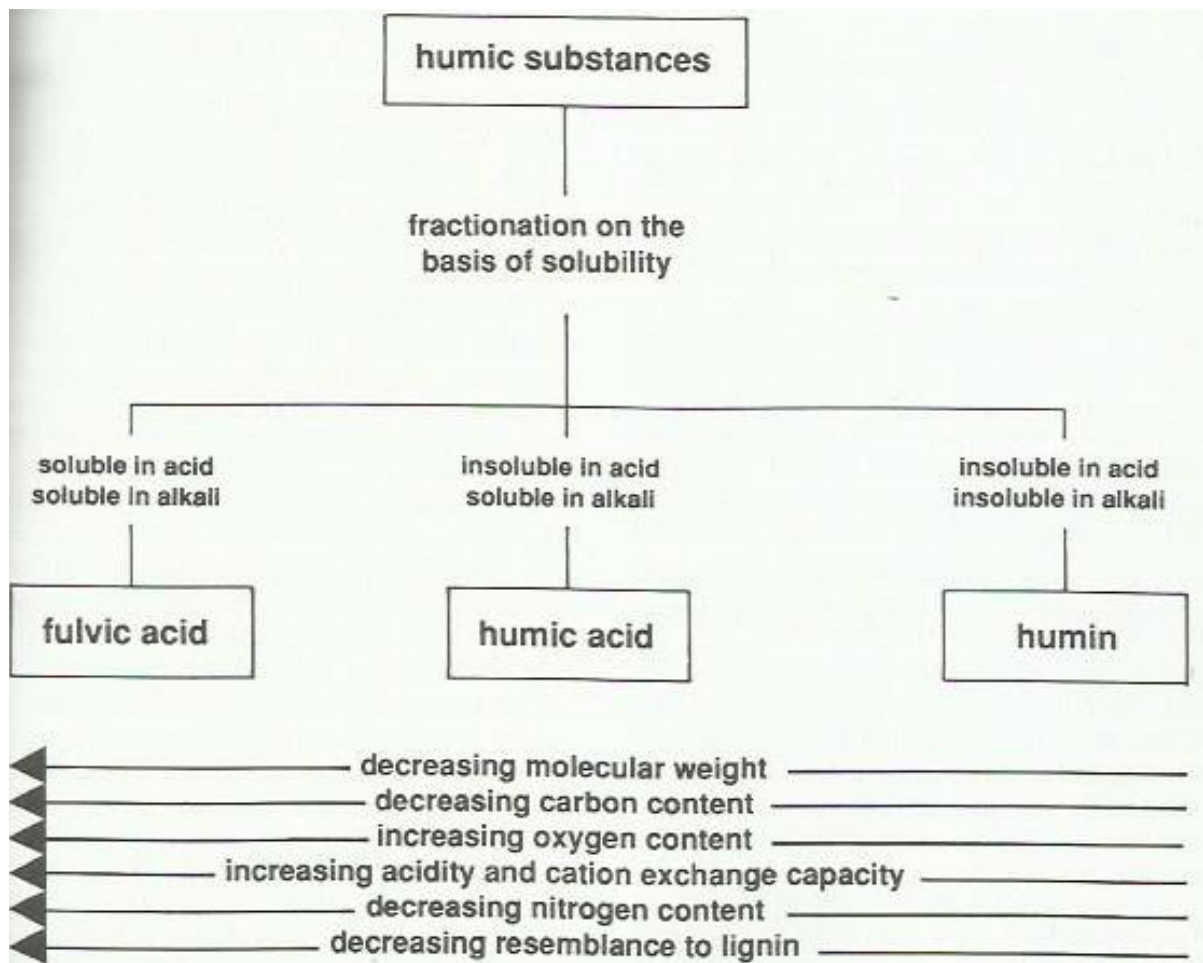
Η χουμοποίηση γίνεται κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης, περιλαμβάνει πολυμερισμό αρωματικών συστατικών και τροποποίηση της λιγνίνης. Η οξείδωση των φαινολών μπορεί να είναι από τα βασικά στάδια της χουμοποίησης.

Ο όρος χουμικές ουσίες χαρακτηρίζει μια μεγάλη ομάδα άμορφων, κολλοειδών, οργανικών πολυμερών που έχουν δημιουργηθεί με τις διαδικασίες που αναφέρθηκαν παραπάνω. Τα πολυμερή παρουσιάζουν μεγάλη διαβάθμιση σε μοριακά βάρη και μελέτες έχουν δείξει ότι αποτελούνται από ένα σκελετό από μονούς αρωματικούς δακτυλίους με πολλούς υποκατάστατες που συνδέονται κυρίως με δεσμούς C-C και C-O. Γενικώς έχουν σχετικά μεγάλη περιεκτικότητα σε

οργανικά δεσμευμένο άζωτο. Επιπλέον θραύσματα πεπτιδίων και σακχάρων ενσωματώνονται στη μοριακή δομή.

Οι χουμικές ουσίες επηρεάζουν τις ιδιότητες του χώματος σε πολύ μεγάλο βαθμό παρόλο που το ποσοστό τους είναι μικρό. Προσδίδουν θρεπτικές ουσίες στο χώμα όπως κατιόντα ασβεστίου, μαγνησίου, καλίου, τα οποία βρίσκονται στα όξινα άκρα των χαρακτηριστικών ομάδων των χουμικών οξέων. Κατά την αποσύνθεση τους απελευθερώνουν άζωτο, φώσφορο, θείο και ιχνοστοιχεία. Προωθούν την μικροβιακή δραστηριότητα του χώματος. Προσδίδουν σταθεροποίηση της δομής του χώματος, η συσχέτιση των επιπέδων του χούμου με φυσικές ιδιότητες του χώματος όπως η συσσωμάτωση και η πλαστικότητα είναι μεγάλη. Δημιουργούν ισχυρούς δεσμούς με μέταλλα και δεσμεύουν τα ιχνοστοιχεία αποτρέποντας το στράγγισμα τους. Επίσης ρυθμίζουν το pH του χώματος και αυξάνουν την ικανότητα κατακράτησης νερού (water holding capacity) και οργανικών ουσιών, μπορούν να κατακρατήσουν πέντε φορές το βάρος τους σε νερό. Έχουν υψηλή ροφητική ικανότητα για ουσίες δυσδιάλυτες στο νερό όπως το DDT και το Atrazine (παρασιτοκτόνο) και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να καθαρίσουν το νερό από αυτές τις ουσίες.

Κατηγοριοποιούνται σε κλάσματα ανάλογα με τις διαλυτότητες τους σε όξινα και βασικά διαλύματα σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα. Η τεχνική κλασματοποίησης τους βασίζεται στην απομόνωση αρχικά με βασικό διαλύτη, ακολουθεί διαχωρισμός του υγρού διαλυτού εκχυλίσματος από το στερεό υπόλειμμα και όξυνση του εκχυλίσματος. Αυτή η διεργασία δημιουργεί τρία κλάσματα: τα φουλβικά οξέα που είναι διαλυτά σε οξύ και σε βάση, τα χουμικά οξέα που είναι διαλυτά σε βάση αλλά καταβυθίζονται σε οξύ και τις χουμίνες που είναι δυσδιάλυτες και σε οξύ και σε βάση. Συνήθως τα φουλβικά οξέα έχουν χαμηλότερα μοριακά βάρη και χαμηλότερη περιεκτικότητα σε άζωτο και θείο από τα χουμικά οξέα. Τα φουλβικά οξέα έχουν περισσότερες χαρακτηριστικές ομάδες με οξυγόνο από τα χουμικά οξέα. [McLaren et al. 1996, Manahan 1994, Cohen et al. 2001]

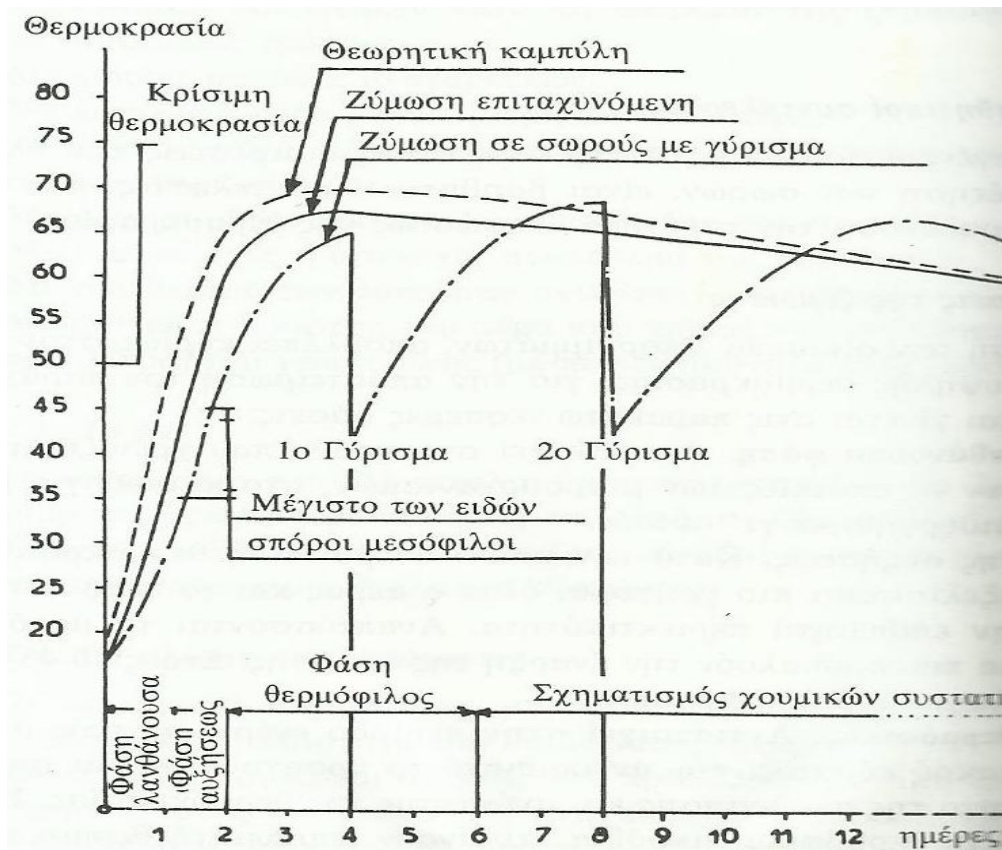


Σχήμα 6 Διαλυτότητα χουμικών ουσιών (McLaren 1996)

## 2.5 Φάσεις κομποστοποίησης

Η καμπύλη θερμοκρασίας-χρόνου παρουσιάζει τρεις κύριες φάσεις, την αρχική λανθάνουσα φάση (lag phase) την ενεργή φάση (active phase) και την φάση της ωρίμανσης (maturation phase). Εάν παρατηρηθεί απότομη μείωση της θερμοκρασίας σημαίνει ότι υπάρχει κάποια δυσλειτουργία και όταν επιδιορθωθεί η διεργασία συνεχίζεται κανονικά.

Η ζύμωση σε συνήθη θερμοκρασία στην επιφάνεια του εδάφους οφείλεται σε δραστηριοποίηση των μεσόφιλων μικροοργανισμών με διάσπαση υδατανθράκων και πρωτεϊνών. Όταν η ζύμωση γίνει σε κλειστό μονωμένο σύστημα, η θερμότητα που παράγεται διατηρείται με συνέπεια την αύξηση θερμοκρασίας μέχρι και 75°C.



Σχήμα 7 Φάσεις κομποστοποίησης- Θερμοκρασία/Χρόνος (Κόλλιας 1993)

**Λανθάνουσα φάση:** (θερμοκρασία περιβάλλοντος-22°C) Η λανθάνουσα φάση ξεκινάει όταν καθιερωθούν οι συνθήκες κομποστοποίησης. Είναι μια περίοδος προσαρμογής για τους μικροοργανισμούς που υπάρχουν στα απόβλητα, εγκλιματίζονται στο υλικό και τις νέες συνθήκες και δημιουργούν αποικίες. Τα μικρόβια αρχίζουν να ευημερούν, καταναλώνουν σάκχαρα, υδατάνθρακες, απλές κυτταρίνες και αμινοξέα που υπάρχουν στα απόβλητα. Λόγω της αυξημένης μικροβιακής δραστηριότητας, αυξάνεται η θερμοκρασία. Τα βακτήρια *pseudomonas* είναι η πιο πολυπληθέστερη ομάδα μικροοργανισμών σε αυτή τη φάση. Η λανθάνουσα φάση είναι γρήγορη όταν υπάρχουν πράσινα απόβλητα (π.χ. πράσινα φύλλα) και πιο αργή όταν υπάρχει ξεραμένη φυτική ύλη (π.χ. ξερά φύλλα, ροκανίδια). Στην αρχή, σε συνήθη θερμοκρασία, το προϊόν είναι ελαφρά όξινο και προσφέρεται για δραστηριοποίηση των μεσόφιλων μικροοργανισμών που ευνοούνται σε θερμοκρασίες 25-45°C και όξινο περιβάλλον.

#### **Ενεργή φάση:**

α) Μεσόφιλη φάση (22°C-40°C): Αναπτύσσονται τα μεσόφιλα μικρόβια που προκαλούν την έναρξη της ζύμωσης. Στην ενεργή φάση ο αριθμός των μικροοργανισμών αυξάνεται εκθετικά με ταυτόχρονη αύξηση της μικροβιακής δραστηριότητας και της κατανάλωσης οξυγόνου. Αυτό αντικατοπτρίζεται στην αδιάλειπτη αύξηση της θερμοκρασίας. Σταδιακά το προϊόν γίνεται αλκαλικό με παραγωγή μικρών ποσοτήτων αμμωνίας. Οι περισσότεροι μύκητες είναι μεσοφιλοι με ιδανική θερμοκρασία τους 25-30 °C (Dix & Webster, 1995) και αφθονούν όταν η θερμοκρασία δεν είναι πολύ υψηλή.

β)Θερμόφιλη φάση (40°C-60°C): Η θερμοκρασία συνεχίζει να αυξάνεται μέχρι να εξαντληθούν τα ευχερώς διασπώμενα συστατικά και δεν μπορεί πλέον να συντηρηθεί η έντονη μικροβιακή ανάπτυξη και δραστηριότητα. Στους 40-45°C πεθαίνουν οι μεσόφιλοι μικροοργανισμοί και αναπτύσσονται οι θερμόφιλοι. Το κομπόστ φτάνει την μέγιστη θερμοκρασία και την μέγιστη απολύμανση από τους παθογόνους μικροοργανισμούς. Στους 60-70°C τα θερμόφιλα πεθαίνουν όπως και οι παθογόνοι και τα διάφορα παράσιτα. Σε θερμοκρασία ανώτερη από 60°C η θερμόφιλη καλλιέργεια αντικαθίσταται από σπορο-βακτήρια και ακτινομύκητες. Οι ακτινομύκητες είναι υπεύθυνοι για τη διάσπαση της κυτταρίνης και της λιγνίνης. Με προσφορά οξυγόνου η θερμοκρασία μπορεί να ανέλθει στους 75°C, ακολούθως όμως σταδιακά μειώνεται στους 60°C οπότε αρχίζει πάλι η δραστηριότητα των θερμόφιλων καλλιιεργειών με μείωση του pH, που πάντοτε όμως διατηρείται ελαφρά αλκαλικό. Θερμόφιλοι και θερμοάντοχοι μύκητες που διασπούν την κυτταρίνη και την λιγνίνη έχουν βρεθεί σε κομπόστ για παράδειγμα *Talaromyces emersonii*, *Thermoascus auranticus*, *Thermomyces lanuginosus*, *Coprinu ssp.* (Tuomela et al., 2000). Οι Chefetz, Chen&Hadar (1998α) απομόνωσαν λακκάση από κομπόστ αστικών απορριμμάτων κατά τη διάρκεια της θερμόφιλης φάσης. Η λακκάση έδειξε μεγάλη καταλυτική ικανότητα για πολλά φαινολικά υποστρώματα.

Η διάρκεια της ενεργής φάσης εξαρτάται από το υπόστρωμα και τις περιβαλλοντικές και λειτουργικές συνθήκες. Μπορεί να είναι από 5 ή 6 μέρες μέχρι 2 με 5 εβδομάδες. Μια ξαφνική και απότομη μείωση της θερμοκρασίας είναι ένδειξη δυσλειτουργίας που χρειάζεται άμεση επιδιόρθωση (ανεπάρκεια οξυγόνου, υπερβολική υγρασία κ.α.). Η μείωση της θερμοκρασίας λόγω ανάδευσης έχει μικρή διάρκεια.

**Φάση ωρίμανσης:**(40°C-θερμοκρασία περιβάλλοντος) Όταν εξαντληθούν τα ευχερώς αποδομήσιμα υλικά ξεκινάει ή φάση της ωρίμανσης, είναι η δεύτερη μεσόφιλη φάση.Οι κυρίαρχοι μύκητες όταν έχει αρχίσει η μείωση της θερμοκρασίας είναι οι *Asperigillus spp*, ή *T. lanuginosus*. Οι *Paneolus spp*, *Corticum coronilla* και πιθανόν *Mycena spp* είναι βασιδιομύκητες που υπάρχουν στο κομπόστ. Έχουν απομονωθεί από την φάση ωρίμανσης ή από ώριμο κομπόστ. Στη φάση της ωρίμανσης αυξάνεται το ποσοστό του υλικού που είναι ανθεκτικό στον μικροβιακό μεταβολισμό με αποτέλεσμα να μειωθεί η μικροβιακή δραστηριότητα. Η θερμοκρασία μειώνεται και φτάνει τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Πολύπλοκες οργανικές ουσίες μετατρέπονται σε χουμικές ουσίες και υπολειπόμενη αμμωνία νιτροποιείται προς νιτρώδη και έπειτα νιτρικά.

Η διάρκεια της ωρίμανσης εξαρτάται από το υπόστρωμα και από τις περιβαλλοντικές και λειτουργικές συνθήκες, μπορεί να διαρκέσει από λίγες βδομάδες μέχρι και ένα ή δύο χρόνια. Το υλικό αποκτά ιδιότητες εμφάνισης και οσμής που διευκολύνουν την αποδοχή του για γεωργικές χρήσεις.[Βαλκανάς 1992, Diaz et al. 1994, Evans et al. 2003, Κόλλιας 1993, Cohen et al. 2001]

**Εξευγενισμός:**Στη μονάδα του εξευγενισμού, το προϊόν καθαρίζεται με μηχανικούς διαχωριστές από ξένες προσμίξεις (αδρανή, χαρτί, χαλίκια, πλαστικά, κ.α.) καθώς και από μη αποδομημένα οργανικά (πλαστικά, λάστιχα, συνθετικές ίνες από υφάσματα, μη επαρκώς τεμαχισμένο χαρτί, κτλ.). Επιπλέον γίνεται κατάλληλος τεμαχισμός ανάλογα με την προβλεπόμενη χρήση. Ο πιο συνηθισμένος τρόπος εξευγενισμού είναι το κοσκίνισμα αλλά το υλικό μπορεί να αφεθεί ως έχει. [Παναγιωτακόπουλος 2007, Schleiss 2003]



## 2.6 Λειτουργικοί παράγοντες

### 2.6.1 Σύσταση πρώτης ύλης

Στην κομποστοποίηση αστικών αποβλήτων το υπόστρωμα είναι το οργανικό κλάσμα βιολογικής προέλευσης που περιέχεται στα απόβλητα. Παραδείγματα οργανικών αποβλήτων είναι το ξύλο, το χαρτί, τα γεωργικά υπολείμματα. Παρόλο που ιδανικά, το απόβλητο θα περιείχε όλα τα απαραίτητα θρεπτικά συστατικά για τους οργανισμούς, μερικές φορές χρειάζεται κάποια προσθήκη. Τα νωπά οικιακά απορρίμματα περιέχουν πολλά είδη υλικών, φυσικών ή συνθέτων, που μπορούν να προσβληθούν από τους μικροοργανισμούς π.χ. άλλοι μικροοργανισμοί αποσυνθέτουν χαρτιά κουζίνας και άλλοι τρόφιμα.

Η σωστή προετοιμασία του οργανικού κλάσματος των οικιακών αποβλήτων είναι πολύ σημαντική, γίνεται είτε μόνο μηχανικά (τεμαχισμός) είτε με συνδυασμό μηχανικών και βιολογικών διεργασιών. [Díaz et al. 1994, Κόλλιας 1993, Cohen et al. 2001]

#### 2.6.1.1 Θρεπτικά συστατικά

Τα κύρια χημικά στοιχεία που χρειάζονται οι μικροοργανισμοί (macronutrients) είναι άνθρακας (C), άζωτο (N), φώσφορος (P) και κάλιο (K). Τα στοιχεία που χρειάζονται σε μικρότερες ποσότητες (micronutrients) είναι κοβάλτιο (Co), μαγγάνιο (Mn), μαγνήσιο (Mg), χαλκός (Cu) και ασβέστιο (Ca). Το ασβέστιο χρειάζεται σε μεγαλύτερες ποσότητες από τα υπόλοιπα micronutrients. Ο άνθρακας οξειδώνεται μέσω της αναπνοής για να παραχθεί ενέργεια και μεταβολίζεται για να παραχθούν κυτταρικές ουσίες. Το άζωτο είναι βασικό συστατικό του πρωτοπλάσματος και των πρωτεϊνών. Ένας οργανισμός δεν μπορεί να ευημερήσει και να πολλαπλασιαστεί αν δεν υπάρχει μορφή αζώτου που είναι διαθέσιμη σε αυτόν. Ο φώσφορος συμμετέχει στην αποθήκευση ενέργειας και στην δημιουργία του πρωτοπλάσματος.

Η απλή παρουσία ενός θρεπτικού συστατικού δεν αρκεί, πρέπει να είναι σε μορφή που να μπορεί να αφομοιωθεί από τον οργανισμό, δηλαδή πρέπει να είναι "διαθέσιμο". Η διαθεσιμότητα κάποιου συστατικού εξαρτάται από τα ένζυμα που διαθέτει ο κάθε μικροοργανισμός. Συγκεκριμένες ομάδες μικροοργανισμών μπορούν να επεξεργαστούν ανεπεξέργαστα απόβλητα, ενώ άλλες τα ενδιάμεσα μεταβολικά προϊόντα των αρχικών μικροοργανισμών. Οι αρχικοί μικροοργανισμοί προετοιμάζουν τις συνθήκες για τους επόμενους και η κομποστοποίηση είναι το αποτέλεσμα αυτής της εναλλαγής διαφόρων μικροβιακών πληθυσμών.

Μερικές ουσίες όπως η λιγνίνη (συστατικό του ξύλου) και η χυτίνη (συστατικό των φτερών και των εξωσκελετών) είναι δύσκολα αποδομήσιμες ακόμα και για τους οργανισμούς που έχουν τα κατάλληλα ένζυμα, αυτές οι ουσίες αποδομούνται αργά ακόμα και στις βέλτιστες συνθήκες.

Ο άνθρακας της κυτταρίνης στο ξύλο και στο άχυρο είναι διαθέσιμος σε κάποιους μύκητες αλλά όχι στα περισσότερα μικρόβια. Το άζωτο είναι διαθέσιμο όταν είναι σε μορφή πρωτεϊνών, αμινοξέων, ή πεπτιδίων.

#### 2.6.1.2 Λόγος άνθρακα αζώτου

Ο λόγος διαθέσιμου άνθρακα προς το διαθέσιμο άζωτο είναι από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που αναφέρονται στα θρεπτικά συστατικά, καθώς τις περισσότερες φορές τα υπόλοιπα θρεπτικά συστατικά υπάρχουν σε επαρκή ποσότητες. Η ιδανική αναλογία άνθρακα-αζώτου είναι 20:1 με 25:1, εάν είναι πάνω από 30:1 η διεργασία είναι πολύ αργή ενώ αν είναι κάτω από 15:1

υπάρχει απώλεια αμμωνίας. Προσθήκη άνθρακα ή αζώτου μπορεί να βελτιώσει την αναλογία C:N. Παραδείγματα αποβλήτων πλούσια σε άζωτο είναι το γρασίδι, τα πράσινα φυτά, τα τρόφιμα και η λάσπη από βιολογικό καθαρισμό. Παραδείγματα αποβλήτων πλούσιων σε άνθρακα είναι τα ξερά χόρτα, τα κλαδέματα και το χαρτί. Ο άνθρακας στο ξύλο δεν είναι εύκολα διαθέσιμος, για αυτό το λόγο δεν θεωρείται ως πηγή άνθρακα. Ο άνθρακας στα ξερά φύλλα και στα κομμένα κλαδέματα μπορεί να λειτουργήσει ως πηγή άνθρακα σε περιορισμένο βαθμό καθώς είναι αργά διαθέσιμος.

Κατά τη διάρκεια της διεργασίας εκτός από την αποδόμηση της οργανικής ύλης, αλλάζει και ο λόγος C:N καθώς σημαντικές ποσότητες άνθρακα μετατρέπονται σε CO<sub>2</sub>. Η αρχική αναλογία είναι πολύ σημαντική για την επιτυχία του τελικού προϊόντος, αναλογία C:N κατά πολύ μεγαλύτερη από 25:1 μπορεί να περιορίσει την νιτροποίηση του αζώτου και να επηρεάσει αρνητικά την ωρίμανση του κομπόστ στα τελικά στάδια. Αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία όταν το προϊόν προορίζεται για χρήση ως εδαφοβελτιωτικό. Για αυτό το λόγο γίνεται επιλεκτική ανάμιξη των αρχικών υλικών για να έχουν σωστή αναλογία C:N. Αναλογίες C:N για διάφορες κατηγορίες αποβλήτων παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα.

**Πίνακας 4 Αναλογία C/N διαφόρων πρώτων υλών (Diaz 1994)**

Material	C:N
Food wastes	15:1
Sewage sludge (digested)	16:1
Grass clippings	19:1
Cow manure	20:1
Horse manure	25:1
Leaves and foliage	60:1
Bark	120:1
Paper	170:1
Wood and sawdust	500:1

Τα περισσότερα φυτά απορροφούν άζωτο με τη μορφή νιτρικών. Η νιτροποίηση πραγματοποιείται από δύο γένη βακτηρίων, τα *Nitrosomonas* που μετατρέπουν την αμμωνία σε νιτρώδη και τα *Nitrobacter* που ολοκληρώνουν την νιτροποίηση. Αυτά τα βακτήρια απενεργοποιούνται πάνω από τους 40°C και έχουν αργό ρυθμό ανάπτυξης, δραστηριοποιούνται κυρίως στη φάση της ωρίμανσης. Για αυτούς τους λόγους νιτροποίηση του αζώτου γίνεται στα τελευταία στάδια, μετά την θερμοφιλή φάση. Συνολικά ο λόγος C:N πρέπει να είναι ο κατάλληλος για τους μικροοργανισμούς και στα αρχικά αλλά και στα τελικά στάδια της διεργασίας.

### 2.6.2 Μέγεθος σωματιδίων

Θεωρητικά όσο πιο μικρό είναι το μέγεθος σωματιδίων τόσο πιο γρήγορα θα γίνει η μικροβιακή αποσύνθεση. Όμως υπάρχει ένα ελάχιστο μέγεθος σωματιδίου, κάτω από το οποίο μειώνεται ο αερισμός μέσα στο υλικό. Το βέλτιστο μέγεθος σωματιδίου εξαρτάται από την πρώτη ύλη, το σύστημα κομποστοποίησης και την μέθοδο αερισμού που έχει επιλεγεί.

### 2.6.3 Υγρασία

Η υγρασία είναι από τις πιο σημαντικές παραμέτρους για τη μικροβιακή δραστηριότητα καθώς το νερό είναι το μέσο μεταφοράς θρεπτικών συστατικών. Η κομποστοποίηση είναι εφικτή όταν το

ποσοστό υγρασίας είναι 40-70% αλλά το ιδανικό ποσοστό εξαρτάται από τη φύση της πρώτης ύλης και το πορώδες του σωρού, συνήθως είναι κοντά στο 50%. Ο λόγος που η ιδανική υγρασία διαφέρει ανάλογα με το υπόστρωμα είναι η διαφορετική διαθεσιμότητα του νερού. Το νερό βρίσκεται σε διάφορες μορφές : σε φιλμ γύρω από στερεά σωματίδια, σε τριχοειδή μορφή κ.α. Η κάθε μορφή του νερού έχει διαφορετική διαθεσιμότητα στους μικροοργανισμούς, για αυτό το λόγο η βέλτιστη υγρασία διαφέρει από υλικό σε υλικό. Κάποια απόβλητα έχουν αρκετή υγρασία αλλά εάν είναι κάτω από 25-30% χρειάζεται προσθήκη νερού. Αντίστοιχα εάν η υγρασία είναι πολύ υψηλή περιορίζεται το διαθέσιμο οξυγόνο και δημιουργούνται στραγγίσματα και σταδιακά αναερόβιες συνθήκες. Ο συνδυασμός υψηλών θερμοκρασιών και αερισμού οδηγεί στην εξάτμιση του νερού με αποτέλεσμα τη μείωση της υγρασίας του σωρού. Υπερβολικά χαμηλή υγρασία αναστέλλει τη μικροβιακή δραστηριότητα, για παράδειγμα θεωρείται ότι όλη η βιολογική δραστηριότητα σταματάει όταν η υγρασία είναι κάτω από 12%. Για μια αποδοτική διεργασία η υγρασία πρέπει να είναι τουλάχιστον ή παραπάνω από 45-50%. Για αυτό το λόγο η υγρασία πρέπει να παρακολουθείται και να γίνεται προσθήκη νερού έτσι ώστε να παραμένει στα ιδανικά επίπεδα. [Evans et al. 2003, Diaz et al. 1994, Μαργαρίτης 2012, Kützner 2000]

#### **2.6.4 Αερισμός-Οξυγόνο**

Η διαθεσιμότητα του οξυγόνου είναι από τους πιο σημαντικούς παράγοντες καθώς η κομποστοποίηση είναι αερόβια διεργασία. Το οξυγόνο είναι βασικό στοιχείο της αναπνοής και του μεταβολισμού των μικροοργανισμών, εάν δεν είναι αρκετό κυριαρχούν αναερόβιοι μικροοργανισμοί και εκλύονται δυσάρεστες οσμές. Οι μικροοργανισμοί παίρνουν το οξυγόνο από τον αέρα που τους περιβάλλει, για αυτό το λόγο είναι απαραίτητη ή ανανέωση του αέρα ή του οξυγόνου μέσα στο σωρό. Επίσης ο αερισμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μειώσει τη θερμοκρασία όταν έχει φτάσει ανασταλτικά υψηλά επίπεδα και για να ξηράνει τον σωρό, όταν η υγρασία είναι πολύ υψηλή.

Ο αερισμός γίνεται με διάφορους τρόπους, με ειδικές μηχανές αναταράξεως, διάτρητους σωλήνες, έγχυση αέρα, ελαφρά αποσυμπίεση, συνεχές ή ασυνεχές ανακάτεμα, συνδυασμό τεχνικών. Η μεταβολή των παραμέτρων που επηρεάζουν την ποσότητα οξυγόνου που χρειάζονται οι μικροοργανισμοί δυσκολεύουν τον υπολογισμό μιας τιμής που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μεταβλητή σχεδιασμού. Η ποσότητα οξυγόνου/μάζα επηρεάζεται από τη μέθοδο αερισμού και από τη διάταξη κομποστοποίησης, μια τυπική τιμή είναι 4,5-5 λίτρα αέρα/kg νωπής ύλης (45% υγρασία)/ώρα. [Diaz et al. 1994, Κόλλιας 1993, Λυμπεράτος και Βαγενάς 2012, Haug et al. 1992]

#### **2.6.5 pH**

Το αποδεκτό αρχικό pH της πρώτης ύλης κυμαίνεται από το 5-7, τα οικιακά απορρίμματα συνήθως είναι μέσα σε αυτό το διάστημα. Το ιδανικό pH για τα βακτήρια είναι 6-7,5 ενώ για τους μύκητες 5,5-8. Αρχικά το pH μειώνεται λόγω της δραστηριότητας των οξυγενετικών βακτηρίων και στη συνέχεια ανεβαίνει προς ουδέτερες ή αλκαλικές τιμές καθώς τα οξέα καταναλώνονται από άλλα βακτήρια, μπορεί να φτάσει μέχρι και το 8-9. Η ρύθμιση του pH είναι σπανίως απαραίτητη, μόνο σε περιπτώσεις με υψηλά ποσοστά σακχάρων και εύκολα διασπώμενων υδατανθράκων γίνεται προσθήκη  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  αλλά οδηγεί σε απώλειες αζώτου. [Diaz et al. 1994, Κόλλιας 1993]

#### **2.6.6 Θερμοκρασία**

Οι αλλαγές της θερμοκρασίας στα στάδια της κομποστοποίησης επηρεάζουν την αποδοτικότητα της διεργασίας, για ικανοποιητική απολύμανση πρέπει η θερμοκρασία του σωρού να φτάσει και να

παραμένει στους 55°C για κάποιο χρονικό διάστημα. Η ανάπτυξη και καθιέρωση έντονου βιολογικού μεταβολισμού κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης είναι πολύ σημαντική, υποστηρίζεται από την υγρασία, την παροχή οξυγόνου και τα θρεπτικά στοιχεία. Η ανάπτυξη πολύ υψηλών θερμοκρασιών (>60, 65°C) μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις στη διεργασία της κομποστοποίησης καθώς μπορεί δημιουργηθούν ενδιάμεσα προϊόντα τα οποία μπορεί να εκλύουν οσμές σε ανοιχτές διεργασίες είτε κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης του προϊόντος. Εάν αυτές οι θερμοκρασίες διατηρηθούν για μεγάλο χρονικό διάστημα επηρεάζουν αρνητικά τη δημιουργία και σταθεροποίηση των χουμικών ενώσεων. [Evans et al. 2003, ECN 2013]

## 2.7 Συστήματα Κομποστοποίησης

Υπάρχουν τρία κύρια συστήματα κομποστοποίησης: τα σειράδια (windrows), οι στατικοί αεριζόμενοι σωροί (static aeration piles) και οι κλειστοί βιοαντιδραστήρες. Ο σωρός πρέπει να πάρει μια μορφή κατάλληλη για το κλίμα, την πρώτη ύλη και τις δυνατότητες των χώρων λιπασματοποίησης.

Το σύστημα των σειραδιών συνίσταται στην τοποθέτηση των τεμαχισμένων απορριμμάτων σε παράλληλους σωρούς σε σχήμα τραπεζίου και στην μηχανική ανάδευση τους ανά τακτά χρονικά διαστήματα έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η παροχή του οξυγόνου. Το διάστημα μεταξύ των αναδεύσεων στην αρχή είναι μικρό καθώς οι ανάγκες σε οξυγόνο είναι μεγάλες και μετά αραιώνει όσο προχωράει η διεργασία. Ο μηχανικός αερισμός γίνεται με ανάδευση του σωρού, ο σωρός καταστρέφεται και ξαναφτιάχνεται έτσι ώστε το εσωτερικό υλικό να είναι εξωτερικό και αντίθετα. Έχουν πλάτος διατομής 4 έως 5 m και ύψος 2 m, το μήκος τους μπορεί να ξεπεράσει τα 100 m. Ο όγκος του σειραδιού μειώνεται κατά τη διάρκεια της ζύμωσης κατά 1/3 περίπου. Μπορεί να γίνει ανακυκλοφορία του έτοιμου υλικού ή να προστεθεί διογκωτικό υλικό για αύξηση του πορώδους του σωρού. Ένα μειονέκτημα των σειραδιών είναι η έκθεση τους στις καιρικές συνθήκες όπως ισχυρή βροχόπτωση. Άλλα μειονεκτήματα είναι η μεγάλη επιφάνεια που καταλαμβάνουν και οι οσμές που μπορεί να εκλυθούν.



Εικόνα 1 Κομποστοποίηση σε σειράδι ανοιχτού τύπου (biocycle)

Το σύστημα του αεριζόμενου στατικού σωρού έχει συνεχή παροχή αέρα δια μέσω του σωρού και όχι μηχανική ανάδευση. Όταν τα εμβαδά αερόβιας ζύμωσης είναι πολύ μικρά ή σε ψυχρές χώρες η λιπασματοποίηση γίνεται σε στατικό σωρό. Επειδή ο αερισμός δεν γίνεται μηχανικά αλλά από το έδαφος με σωλήνες, οι διαστάσεις του σωρού μπορούν να είναι μεγαλύτερες.

Οι κλειστοί βιοαντιδραστήρες με ή χωρίς ανάδευση όπως κινούμενη αναδευόμενη κλίνη, κινούμενη στερεά κλίνη, περιστρεφόμενο τύμπανο, κινούμενη στερεά κλίνη. Ο έλεγχος της διεργασίας είναι ευκολότερος αλλά η δυναμική των κλειστών συστημάτων είναι μικρότερη. Τις περισσότερες φορές λόγω του κόστους των κλειστών συστημάτων, χρησιμοποιούνται κατά τις πρώτες 4-20 μέρες κατά τη θερμόφιλη φάση και έπειτα το προϊόν αφήνεται να ωριμάσει σε σωρούς κάτω από υπόστεγα.

Συνήθως η πιο οικονομική λύση είναι τα σειράδια σε υπόστεγο για προστασία από τις καιρικές συνθήκες και με δυνατότητα πρόσθετου αερισμού με φυσητήρες.

Η κομποστοποίηση μπορεί να γίνει και σε μικρότερη κλίμακα, σε μεμονωμένες κατοικίες ή σε μικρούς οικισμούς με διαλογή στην πηγή και σειράδια.

[Diaz et al. 1994, Evans et al. 2003, Κόλλιας 1993, Λυμπεράτος και Βαγενάς 2012, Παναγιωτακόπουλος 2007]

## **2.8 Προϊόν κομποστοποίησης**

### **2.8.1 Οργανικά Εδαφοβελτιωτικά**

Η εντατική καλλιέργεια της γης με συνεχή αύξηση της κατανάλωσης λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων, οδηγεί στην αλλοίωση του εδάφους και στην ελάττωση της εδαφικής γονιμότητας και επειδή η κατανάλωση λιπασμάτων θα είναι αυξητική στο μέλλον με επικράτηση υπερλιπασμάτωσης, η επίπτωση στην ρύπανση του περιβάλλοντος αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά. Η ρύπανση του περιβάλλοντος από τη χρήση των λιπασμάτων αναφέρεται κυρίως στην υπερλίπανση, που οδηγεί σε γρήγορη αλλοίωση του εδάφους και σε μέγιστη ρύπανση των υπογείων και υπέργειων νερών με την παραλαβή των περισσευμάτων των λιπασμάτων από το νερό της βροχής και κατά την άρδευση. Σήμερα ειδικά έχει δημιουργηθεί εκτεταμένη ρύπανση υπογείου και επίγειου νερού από τα αζωτούχα λιπάσματα, που σε μορφή νιτρικών αλάτων εισάγουν μέγιστη τοξικότητα στο νερό. Σε αντίθεση με τα χημικά λιπάσματα τα οργανικά εδαφοβελτιωτικά είναι αργής αποδέσμευσης, δηλαδή απελευθερώνουν τα θρεπτικά συστατικά πιο αργά με αποτέλεσμα να αποφεύγεται η αποστράγγιση τους. Όμως το κύριο πλεονέκτημα των οργανικών λιπασμάτων δεν είναι η προσθήκη θρεπτικών συστατικών στο έδαφος (N-P-K) αλλά η βελτίωση της ισορροπίας χουμικών ουσιών στο έδαφος και η βελτίωση της δομής του.

Η χρήση κομπόστ μπορεί να βελτιώσει σχεδόν όλες τις πτυχές της αγροτικής παραγωγής ανάλογα με την ποσότητα και διάρκεια εφαρμογής.

Οικονομικά οφέλη: αύξηση παραγωγής, πιο αποδοτική και μειωμένη χρήση λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων, αυξημένη αντίσταση των φυτών σε παθογόνους και παράσιτα

Οφέλη στο χώμα: αύξηση οργανικής ύλης του χώματος, αύξηση διαθέσιμου νερού στα φυτά, αυξημένη διαθεσιμότητα θρεπτικών συστατικών και κατακράτηση τους, βελτιωμένη δομή χώματος, μειωμένα επίπεδα φυτοπαθογόνων και παρασίτων.

Ανάπτυξη αγροτικού τομέα : αυξημένη ικανότητα τήρησης των προϋποθέσεων για πώληση αγροτικών προϊόντων στην ταχύτατα αναπτυσσόμενη αγορά των βιολογικών προϊόντων, μείωση των αρνητικών επιπτώσεων της γεωργίας στο περιβάλλον συμπεριλαμβανομένης της μείωσης των νιτρικών στραγγισμάτων, αυξημένη ικανότητα εξασφάλισης πρόσβασης σε επιπλέον πόρους (χώμα, νερό). [Paulin et al., Βαλκανάς 1992, Bertoldi et al. 1983]

### **2.8.2 Καταστροφή παθογόνων**

Κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης καταστρέφονται οι παθογόνοι μικροοργανισμοί, σε αυτό συμβάλουν οι παράγοντες:

1. Χρόνος-Θερμοκρασία
2. Παραγωγή αμμωνίας
3. Παρουσία ανταγωνιστικών μικροβιακών πληθυσμών

Η συχνή ανάδευση αποτρέπει την επιβίωση παθογόνων στις εξωτερικές στοιβάδες του σωρού. Επιπλέον στη φάση της ωρίμανσης έχει μειωθεί η πηγή τροφής αρκετά με αποτέλεσμα οι παθογόνοι μικροοργανισμοί να μην μπορούν να ανταγωνιστούν τους ενδημικούς μικροβιακούς πληθυσμούς για την τροφή που έχει απομείνει. [Cohen et al. 2001]

### **2.8.3 Εφαρμογές προϊόντος**

Το κομπόστ εφόσον πληροί τις προϋποθέσεις χρησιμοποιείται ως εδαφοβελτιωτικό (ιδιαίτερα για αμμόδη, αργιλώδη, όξινα, πορώδη και ασβεστώδη εδάφη) ή ως υπόστρωμα για την καλλιέργεια των φυτών. Χρησιμοποιείται επίσης ως βιόφιλτρο , ως ηχομονωτικό υλικό, για αναπλάσεις τοπίων, για αποκαταστάσεις λατομείων, για έλεγχο της διάβρωσης πρανών, κτλ. Αν προέρχεται από σύμμεικτα απόβλητα, και ο στόχος είναι η μείωση των ποσοτήτων στο χώρο εδαφικής διάθεσης τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για κάλυψη των ημερήσιων κελιών του ΧΥΤΑ.

Η περιεκτικότητα σε μέταλλα πρέπει να είναι χαμηλή. Πάντως με πλήρη κύκλο κατεργασίας το τελικό προϊόν δεν εμφανίζει οσμές ούτε έχει παθογόνα μικρόβια, γιατί αυτά καταστρέφονται σε θερμοκρασίες πάνω από 65°C αλλά και σε πολύ κατώτερες ακόμη θερμοκρασίες, όταν η θέρμανση διαρκεί πολύ χρόνο.

Για τη χρήση του κομπόστ σε καλλιέργειες πρέπει να αντιμετωπιστούν οι αυστηρές προϋποθέσεις για τοξικές ουσίες και βαρέα μέταλλα, κάτι που είναι εφικτό μόνο με διαλογή στην πηγή. Επίσης πρέπει να αντιμετωπιστεί η αρνητική στάση των αγροτών για εδαφοβελτιωτικό που προέρχεται από «σκουπίδια». [Βαλκανάς 1992, Παναγιωτακόπουλος 2007]

### **2.8.4 Μικροβιολογικό ενδιαφέρον**

Ένα φαινόμενο που σχετίζεται με την ωρίμανση του κομπόστ είναι η συσσώρευση ανταγωνιστικών μικροοργανισμών ικανών να καταστέλλουν φυτο-παθογόνους μικροοργανισμούς που υπάρχουν στο χώμα. Οι Hadar & Gorodecki (1991) τοποθέτησαν σκληρώτια (μορφή που παίρνουν κάποιοι μύκητες όταν οι περιβαλλοντικές συνθήκες δεν είναι ευνοϊκές) από *S.rolfsii* (παθογόνος μικροοργανισμός) σε κομπόστ από στέμφυλα, μετά από 4 ώρες τα βιώσιμα σκληρώτια μειώθηκαν από 100% σε 10%. Βρέθηκε ότι τα *Penicillium* και *Fusarium spp* αποίκησαν τα σκληρώτια. Ένα άλλο είδος που καταστέλλει τους παθογόνους μικροοργανισμούς είναι το *Trichoderma hamatum* (Kwok et al., 1987). [Cohen et al. 2001]

Η μικροβιολογική διάσταση του κομπόστ έχει ιδιαίτερη μελλοντική προοπτική ως μέτρο της ποιότητας του προϊόντος. Μέχρι σήμερα αξιολογούμε το κομπόστ και τα χημικά λιπάσματα με τον ίδιο τρόπο αλλά μια απλή χημική ανάλυση αζώτου φωσφόρου και καλίου δεν αρκεί για να περιγράψει τις περίπλοκες ιδιότητες αυτού του βιολογικού υλικού. Τα πιθανά οφέλη που έχει το κομπόστ για τους μικροοργανισμούς του χώματος και η ιδιότητα του να καταστέλλει τους βλαβερούς για τα φυτά μικροοργανισμούς δεν μπορεί να αποτυπωθεί από μια ανάλυση των ανόργανων συστατικών του, για αυτό το λόγο κάποιοι παραγωγοί και χρήστες του υλικού έχουν καταστρώσει μια μέθοδο χαρακτηρισμού του υλικού με βάση το μικροβιακό προφίλ του. Η καινοτόμα μέθοδος χαρακτηρισμού του κομπόστ αναπτύχθηκε από τα BBC Laboratories της Arizona και το αξιολογεί με βάση τη συγκέντρωση έξι κατηγοριών μικροοργανισμών (Bess 1999). Ο συνδυασμός μικροβιολογικών αναλύσεων μαζί με τις παραδοσιακές χημικές αναλύσεις και αναλύσεις ωριμότητας μπορεί να κάνουν το προϊόν πιο αποδεκτό στην αγορά. [Evans et al. 1994]

### 3. Πειραματικό μέρος

Ο στόχος του πειραματικού μέρους της παρούσας διπλωματικής ήταν η παρακολούθηση των κρίσιμων παραμέτρων της διεργασίας και ο έλεγχος του τελικού προϊόντος της κομποστοποίησης.

#### 3.1 Διάταξη Κομποστοποίησης

##### 3.1.1 FORBI

Τα υπολείμματα τροφών είναι ένα δύσκολο υλικό στην διαχείριση του καθώς έχει πολύ υψηλή υγρασία, υψηλό οργανικό φορτίο, είναι αρκετά ανομοιόμορφο και έχει μεγάλο εύρος κοκκομετρίας. Λόγω του υψηλού οργανικού φορτίου και της υψηλής υγρασίας του υλικού αλλοιώνεται γρήγορα.

Στα πλαίσια του προγράμματος Waste4Think αναπτύχθηκε μια διεργασία επεξεργασίας υπολειμμάτων τροφών με σκοπό να γίνει πιο εύκολη η αξιοποίησή τους. Το πρόγραμμα εφαρμόζεται στο Δήμο Χαλανδρίου με διαλογή στην πηγή (source separation) των υπολειμμάτων τροφών. Οι κάτοικοι που συμμετέχουν στο πρόγραμμα (περίπου 1000 άτομα) δεν πετούν τα οικιακά απορρίμματα της κουζίνας στους πράσινους-γκρί κάδους αλλά σε ειδικούς καφέ κάδους, χωρητικότητας 30 λίτρων. Στους καφέ κάδους μπορούν να πετούν υπολείμματα τροφών (εξαιρούνται τα κόκκαλα), φρούτων, λαχανικών και χαρτιών κουζίνας που έχουν χρησιμοποιηθεί. Οι κάτοικοι είναι ενημερωμένοι και γνωρίζουν τι μπορεί να πετούν στους καφέ κάδους και τι όχι και χρησιμοποιούν βιοδιασπώμενες σακούλες κατάλληλες για κομποστοποίηση.

Μετά τη συλλογή των υπολειμμάτων τροφών, αυτά εισάγονται σε ξηραντήρα, όπου και τεμαχίζονται. Το τελικό προϊόν που ονομάζεται **FORBI** (Food Residue Biomass) είναι ομοιόμορφο, έχει υγρασία της τάξης του 10% και μπορεί να μεταφερθεί και να αποθηκευτεί εύκολα.



Εικόνα 2 FORBI (Food Residue Biomass)

##### 3.1.2 Παράγοντας διόγκωσης- Bulking agent

Τα διογκωτικά υλικά είναι απαραίτητα όταν η πρώτη ύλη είναι τα προδιαλεγμένα βιοαπόβλητα. Χρησιμοποιούνται για την ρύθμιση κρίσιμων παραμέτρων (C/N, πορώδες, υγρασία) και την αποφυγή δημιουργίας αναερόβιων συνθηκών και οσμών. Προτείνεται ποσοστό 40-60% κ.ο. του



αρχικού μείγματος κομποστοποίησης. Παραδείγματα bulking agents είναι: τεμαχισμένα κλαδιά, φλοιοί, άχυρο, πριονίδια. (ΕΠΠΕΡΑΑ 2014)

Τα ξυλώδη υλικά όπως τα πριονίδια, προσδίδουν καλό πορώδες στο σωρό. Ο άνθρακας που περιέχουν δεν είναι εύκολα βιοδιαθέσιμος και δεν πρέπει να αντιμετωπίζονται σαν πηγή άνθρακα (Adhikari et al. 2009).

Στα συγκεκριμένα πειράματα επιλέχτηκαν τα κλαδέματα καθώς είναι εύκολα διαθέσιμα (από το Δήμο Χαλανδρίου) και ευρέως χρησιμοποιούμενα στην κομποστοποίηση. Στην κομποστοποίηση μικρής κλίμακας προστέθηκε και γρασίδι που ήταν διαθέσιμο τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο.

### 3.1.3 Κομποστοποίηση μικρής κλίμακας



Εικόνα 3 Οικιακός κομποστοποιητής 280 L

Χρησιμοποιήθηκε οικιακός κομποστοποιητής 280 λίτρων, της εταιρίας Garantia. Προστέθηκαν 12.3 kg FORBI, 4.1 kg γρασίδι και 21 kg κλαδέματα, με συνολικό βάρος 37.5 kg (κλαδέματα : FORBI: γρασίδι 5 : 3 : 1) με στόχο ο λόγος C/N να είναι 25-30 καθώς έχει αποδειχθεί ότι είναι η ιδανική αναλογία C/N. Ακολούθησε μηχανική ανάδευση του μίγματος. Το ποσοστό υγρασίας των υλικών ήταν για το FORBI 15%, για το γρασίδι 69% και για τα κλαδέματα 57%, το μίγμα είχε 42% υγρασία οπότε δεν προστέθηκε νερό. Η θερμοκρασία καταγραφόταν κάθε μισή ώρα από καταγραφικό τοποθετημένο στο κέντρο του κομποστοποιητή. Το κομπόστ αναδεύονταν καθημερινά. Μετρήσεις υγρασίας, ολικών και πτητικών στερεών (TS-VS), pH, αγωγιμότητας (EC), ολικού οργανικού άνθρακα (TOC) και αζώτου (TKN) πραγματοποιούνταν καθημερινά για τον πρώτο μήνα και έπειτα τρεις φορές την βδομάδα. Τέλος προσδιορίστηκε η φυτοτοξικότητα του τελικού προϊόντος.

Ο οικιακός κομποστοποιητής τοποθετήθηκε έξω από το Εργαστήριο Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας.



Εικόνα 4 Κομπόστ στη θερμόφιλη και μετά τη θερμόφιλη φάση

Η αριστερή εικόνα είναι από τη θερμόφιλη φάση ενώ η δεξιά από το τέλος της θερμόφιλης. Φαίνεται η μείωση της μάζας των υλικών κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης.

### 3.1.4 Κομποστοποίηση μεγάλης κλίμακας



Εικόνα 5 Σειράδι της κομποστοποίησης μεγάλης κλίμακας

Το scale-up της κομποστοποίησης μικρής κλίμακας πραγματοποιήθηκε με τη μορφή στεγασμένων σειραδιών, το σειράδι είχε πλάτος 2 μέτρα και ύψος 1 μέτρο. Αποτελούνταν από FORBI και

κλαδέματα σε αναλογία 1:1 με συνολικό βάρος 4 τόνους, προστέθηκαν 2.2 τόνοι νερού, καθώς η αρχική υγρασία του σειραδιού ήταν 16.4%. Καθημερινά πραγματοποιούνταν ανάδευση του σωρού. Η θερμοκρασία καταγραφόταν από καταγραφικό κάθε μισή ώρα. Μετρήσεις ολικών και πτητικών στερεών (TS-VS), pH, αγωγιμότητας (EC), οργανικού άνθρακα (TOC) και αζώτου (TKN) πραγματοποιούνταν εβδομαδιαία. Προς τα τελικά στάδια της διεργασίας προσδιορίστηκαν η φυτοτοξικότητα του υλικού και τα χουμικά οξέα.

Η κομποστοποίηση μεγάλης κλίμακας πραγματοποιήθηκε σε συνεργασία με την εταιρία RAMEurope στον Ορχομενό Βοιωτίας.

## 3.2 Μέθοδοι Ανάλυσης

### Προετοιμασία δειγμάτων

Η προετοιμασία του δείγματος διαφέρει ανάλογα τη μέτρηση και περιγράφεται στην αντίστοιχη παράγραφο. Συνήθως περιλαμβάνει ξήρανση και τεμαχισμό.

### Αποθήκευση δειγμάτων

Τα δείγματα τοποθετούνται σε πλαστικές σακούλες (κατάψυξης) που κλείνουν αεροστεγώς και εάν οι μετρήσεις δεν πραγματοποιηθούν την ίδια μέρα της δειγματοληψίας τοποθετούνται στο ψυγείο (4°C). Τα δείγματα που έχουν ξηρανθεί έχουν υγρασία κάτω από 10% αποθηκεύονται σε κλειστή σακούλα σε σκοτεινό μέρος σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

### 3.2.1 Πειραματικές μέθοδοι

Οι πειραματικές μέθοδοι που εφαρμόστηκαν και ο κύριος εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζονται παρακάτω.

Πίνακας 5 Πειραματικές μέθοδοι

Παράμετρος	Συσκευή
Θερμοκρασία	Ψηφιακό θερμομέτρο
Υγρασία	Θερμοζυγός Ζυγός ακριβείας Φούρνος
Πτητικά Στερεά	Ζυγός ακριβείας Φούρνος
pH	Πεχάμετρο
Αγωγιμότητα (EC)	Αγωγιμόμετρο
Ολικό Άζωτο-Kjeldahl (TKN)	Συσκευή χώνευσης Συσκευή διαχείρισης απαερίων Συσκευή απόσταξης
Ολικός άνθρακας (TOC)	Συσκευή ανάφλεξης-μέτρησης TOC
Φυτοτοξικότητα	Φυγόκεντρος Διήθηση υπό κενό
Χουμικά Οξέα	Φυγόκεντρος Διήθηση υπό κενό Φούρνος

### 3.2.2 Μέτρηση θερμοκρασίας

Για την μέτρηση της θερμοκρασίας χρησιμοποιήθηκε καταγραφικό θερμοκρασίας ellitech RC, με ρύθμιση να καταγράφει την θερμοκρασία του σωρού κάθε μισή ώρα. Στο κομπόστ μικρής κλίμακας είχε τοποθετηθεί ένα καταγραφικό, ενώ στο scale-up 3 καταγραφικά. Οι τιμές που παρουσιάζονται στα διαγράμματα θερμοκρασίας είναι οι μέσοι όροι των τιμών της θερμοκρασίας για κάθε ημέρα. Οι τιμές θερμοκρασίας περιβάλλοντος είναι από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών από το σταθμό Αμπελοκήπων και από τον σταθμό Κωπαΐδας καθώς αυτοί ήταν οι πλησιέστεροι σταθμοί στην πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου και στον Ορχομενό Βοιωτίας αντίστοιχα.

### 3.2.3 Προσδιορισμός υγρασίας (water content)

#### Μέθοδος 1

Χρησιμοποιήθηκε θερμοζυγός (μοντέλο Adam AMB moisture balance) για μια άμεση και γρήγορη εκτίμηση της υγρασίας του κομπόστ, καθώς η μέτρηση διαρκεί μόνο 30 λεπτά αλλά είναι λιγότερο ακριβής σε σχέση με τη δεύτερη μέθοδο. Ο θερμοζυγός θερμαίνει σταδιακά το δείγμα με θερμαντήρα αλογόνου με αποτέλεσμα την ξήρανση του δείγματος και καταγράφει συνεχώς τη μάζα μέχρι να σταθεροποιηθεί η τιμή της.

#### Μέθοδος 2

Αυτή η μέθοδος (EPA-method 1684) βασίζεται στην ξήρανση του δείγματος σε φούρνο των 105°C για 24 ώρες. Κάψα τοποθετείται στο φούρνο των 550°C για μισή ώρα για να απομακρυνθεί η υγρασία, έπειτα τοποθετείται στον αφυγραντήρα μέχρι να αποκτήσει θερμοκρασία περιβάλλοντος και καταγράφεται η μάζα της ως  $W_{dish}$ . Στη συνέχεια τοποθετείται νωπό δείγμα στην κάψα και καταγράφεται η συνολική μάζα του δείγματος και της κάψας ως  $W_{sample}$ . Το δείγμα τοποθετείται στο φούρνο των 105 °C για 24 ώρες καθώς αυτό είναι το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την απομάκρυνση της υγρασίας και μετά τοποθετείται στον αφυγραντήρα και καταγράφεται η μάζα του ως  $W_{dry}$ . Το περιεχόμενο της υγρασίας προκύπτει από τη διαφορά της μάζας του δείγματος πριν και μετά την ξήρανση:

$$\% \text{ water content} = \frac{W_{sample} - W_{dry}}{W_{sample} - W_{dish}} * 100\%$$

όπου  $W_{sample}$ : η μάζα του νωπού δείγματος και της κάψας

$W_{dry}$ : η μάζα του ξηρού δείγματος και της κάψας

$W_{dish}$ : η μάζα της κάψας

Αντίστοιχα τα ολικά στερεά του δείγματος υπολογίζονται ως:

$$\% \text{ total solids} = 100 - \% \text{ water content}$$

### 3.2.4 Προσδιορισμός πτητικών στερεών (volatile solids)

Τα πτητικά στερεά χρησιμοποιούνται ως δείκτης για την οργανική ύλη. Υπολογίζονται ως ποσοστό των ολικών στερεών του δείγματος. Το ίδιο δείγμα, στην ίδια κάψα που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της υγρασίας χρησιμοποιείται και για τον υπολογισμό των πτητικών στερεών. Το δείγμα αφού ξηρανθεί στον φούρνο των 105°C για να απομακρυνθεί το περιεχόμενο νερό, ζυγίζεται

και η μάζα του σημειώνεται ως  $W_{dry}$ . Έπειτα τοποθετείται στον φούρνο των 550°C για 1.5 ώρα, στη συνέχεια όταν να αποκτήσει θερμοκρασία περιβάλλοντος σημειώνεται η μάζα του ως  $W_{volatile}$

$$\% \text{ volatile solids} = \frac{W_{dry} - W_{volatile}}{W_{dry} - W_{dish}}$$

όπου  $W_{dry}$ : η μάζα του ξηρού δείγματος και της κάψας

$W_{volatile}$ : μάζα του υπολείμματος ανάφλεξης στους 550°C και της κάψας

$W_{dish}$ : η μάζα της κάψας

### 3.2.5 Μέτρηση pH

Για τη μέτρηση pH διαλύεται ποσότητα κόμποστ σε απιονισμένο νερό με αναλογία κόμποστ-νερού 1:10. Το κόμποστ είναι ένα αρκετά υγροσκοπικό υλικό, για αυτό το λόγο επιλέγεται μεγάλη αναλογία νερού-κόμποστ. Σε ένα ποτήρι ζέσεως ζυγίζονται 3 g από το κόμποστ μικρής κλίμακας και 6 g από το κόμποστ μεγάλης κλίμακας και προστίθεται αντίστοιχα 30 και 60 ml νερού. Το μίγμα νερού κόμποστ αναδεύεται σε μαγνητικό αναδευτήρα για 30 λεπτά. Έπειτα το υγρό απομακρύνεται με μια πιπέτα και τοποθετείται σε ένα άλλο ποτήρι ζέσεως όπου και μετριέται το pH με πεχάμετρο της εταιρίας Sanxin (PHS-ED pH Meter).

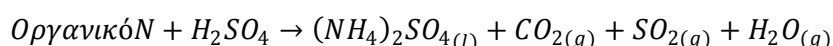
### 3.2.6 Μέτρηση ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC)

Η μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (electrical conductivity-EC) υποδεικνύει την ευκολία με την οποία ρέει το ηλεκτρικό ρεύμα μέσα σε ένα διάλυμα. Στο κόμποστ η αγωγιμότητα είναι μια χρήσιμη μέτρηση καθώς εκφράζει τα διαλυτά άλατα (soluble salts) που περιέχονται σε αυτό. Ανάλογα με την αγωγιμότητα που έχει το κάθε κόμποστ, ορίζεται αντίστοιχα η κατάλληλη ποσότητα και το κατάλληλο χρώμα στο οποίο μπορεί να προστεθεί το κομπόστ. Η προετοιμασία του δείγματος είναι ίδια για τη μέτρηση pH και αγωγιμότητας, δηλαδή αναλογία κομπόστ-νερού 1:10 και ανάδευση 30 λεπτά. Στο ίδιο δείγμα μετά τη μέτρηση pH ακολουθεί μέτρηση αγωγιμότητας με αγωγιμόμετρο WTW inolab Cond Level1.

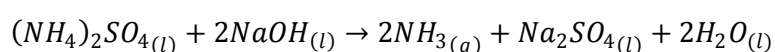
### 3.2.7 Προσδιορισμός ολικού αζώτου κατά Kjeldahl-TKN

Η αρχή της μεθόδου είναι η καταλυτική χώνευση του δείγματος σε υψηλή θερμοκρασία με πυκνό θειικό οξύ. Με την απόσταξη το θειικό αμμώνιο μετατρέπεται σε αμμωνία η οποία παγιδεύεται από περίσσεια βορικού οξέος. Η μέθοδος TKN βασίζεται στα πρότυπα EN 13342 και DIN ISO 11261 για τον προσδιορισμό αζώτου στο χρώμα. Η προετοιμασία των δειγμάτων που αναλύονται αναφέρεται στα DIN ISO 11464 ή 11465, EN 12880, EN ISO 5667-13.

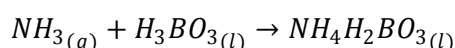
Χώνευση οργανικής ύλης



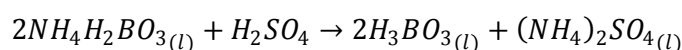
Αλκαλική απόσταξη



Παγίδευση αποστάγματος



## Τιτλοδότηση



### Συσκευές:

- SpeedDigester K-425 Buchi(συσκευή χώνευσης)
- Scrubber K-415 Buchi(συσκευή διαχείρισης απαερίων της χώνευσης)
- Kjelflex K-360 Buchi(συσκευή απόσταξης)
- φλάσκες των 300 ml

### Αντιδραστήρια:

- Καταλύτης χώνευσης  
Παρασκευή:  $\text{K}_2\text{SO}_4\text{-CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O-TiO}_2$  με αναλογία μάζας 100:3:3
- $\text{H}_2\text{SO}_4$  98%
- $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$  (ουρία) 1.056 g/L (492,5 mgN/L)  
Παρασκευή: Διαλύονται 1.056 g ουρίας (>99.0%) σε 1 L απιονισμένο νερό
- NaOH 32%  
Παρασκευή: 320 g NaOH διαλύονται σε 1 L απιονισμένο νερό
- NaOH 0.1 M  
Παρασκευή: 4 g NaOH διαλύονται σε 1 L απιονισμένο νερό
- $\text{H}_3\text{BO}_3$  2%+ KCl ( 3g/l)  
Παρασκευή: 20 g  $\text{H}_3\text{BO}_3$  και 3 g διαλύονται σε 1 L απιονισμένο νερό, προστίθεται μικρή ποσότητα NaOH 0.1 M μέχρι το pH του διαλύματος βορικού οξέος είναι 4.65
- $\text{H}_2\text{SO}_4$  0.01 M για την τιτλοδότηση  
Παρασκευή: 100 ml  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0.1 M και 900 ml απιονισμένο νερό
- Δείκτης τιτλοδότησης: Bromocresol Green/Methyl Red, mixed indicator solution
- Διάλυμα εξουδετέρωσης απαερίων Scrubber  
Παρασκευή: 600 g  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , 2 ml αιθανόλη, άκρη σπάτουλας bromthymol blue διαλύονται σε 3 L απιονισμένο νερό.



Εικόνα 6 Scrubber K-415, SpeedDigester K-425



Εικόνα 7 Kjelflex K-360

Προετοιμασία δείγματος: Δείγμα κομπόστ ξηραίνεται σε φούρνο στους 45°C για 48 ώρες. Η ξήρανση σε υψηλές θερμοκρασίες δεν είναι επιθυμητή για τη μέτρηση αζώτου (το εγχειρίδιο της συσκευής προτείνει 40 °C). Έπειτα το δείγμα ομογενοποιείται σε μπλέντερ και τεμαχιστή κόκκων

καφέ έως ότου να είναι σε μορφή λεπτόκοκκης σκόνης. Ποσότητα του δείγματος χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της υπολειπόμενης υγρασίας του. Τα δείγματα αποθηκεύονται σε πλαστικές σακούλες τύπου κατάψυξης με αεροστεγές κλείσιμο.



Εικόνα 8 Φιάσκες με δείγμα αμέσως μετά τη χώνευση

Πειραματική διαδικασία: Η μέθοδος πραγματοποιείται με ένα blank που περιέχει όλα τα αντιδραστήρια και απιονισμένο νερό και με ένα standard που περιέχει όλα τα αντιδραστήρια και το πρότυπο διάλυμα ουρίας 1.056 g/L. Η ποσότητα του δείγματος προκύπτει ανάλογα με την αναμενόμενη ποσότητα αζώτου του δείγματος και με τη βοήθεια της εφαρμογής KjelOptimizer, για τα δείγματα του κομπόστ 0.15 g από το κάθε δείγμα.

Αρχικά με πιπέτα των 5 ml τοποθετούνται 25 ml απιονισμένου νερού στην πρώτη φιάσκα και 20 ml στη δεύτερη, ακολουθεί η προσθήκη 5 ml του πρότυπου διαλύματος ουρίας στην δεύτερη φιάσκα και 0.15 g δείγματος στις υπόλοιπες φιάσκες. Τίθεται σε λειτουργία ο SpeedDigester K-425 στη θέση 5 (προθέρμανση στους 250°C). Τοποθετούνται 3.72 g καταλύτη σε κάθε φιάσκα και 8 ml H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> με σιφώνιο των 10 ml και συνδέονται οι φιάσκες με τον Scrubber K-415 για τη συλλογή των απαερίων. Εισάγονται οι φιάσκες στον SpeedDigester, με τον διακόπτη στο 7 (στους 410 °C) και το χρονόμετρο στα 75 λεπτά.

Πίνακας 6 Περιεχόμενο στις φιάσκες

Περιεχόμενο δείγμα	Απιονισμένο νερό (ml)	Standard Ουρίας (ml)	Καταλύτης (g)	Πυκνό H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ml)	Sample (g)
blank	25	-	3.72	8	-
standard	20	5	3.72	8	-
sample	-	-	3.72	8	0.15

Στα 50 λεπτά ελέγχεται η πορεία της χώνευσης και στα 75 λεπτά εφόσον τα δείγματα είναι διαυγή και έχουν πράσινο χρώμα αφαιρούνται οι φιάσκες από τον SpeedDigester αλλά ο Scrubber παραμένει συνδεδεμένος. Μετά από 35 λεπτά (cooling) οι φιάσκες έχουν αποκτήσει θερμοκρασία περιβάλλοντος και έχουν αποχρωματιστεί, τότε αποσυνδέεται ο Scrubber.



Πίνακας 7 Παράμετροι μεθόδου για στερεά δείγματα (TKNS-new)

Παράμετρος	Τιμή παραμέτρου
H <sub>2</sub> O	34 ml
NaOH	42 ml
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	60 ml
Reaction time	5 s
Steam Power	100%
Distillation time	240 s

Τοποθετείται ο Kjelflex στη θέση ON και έπειτα ακολουθεί η προθέρμανση της συσκευής, το priming και ο καθαρισμός. Εφόσον οι φλάσκες έχουν αποκτήσει θερμοκρασία περιβάλλοντος ξεκινάει η απόσταξη με τη μέθοδο TKNS-new. Έπειτα τιτλοδοτούνται τα δείγματα με H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.01 M και δείκτη Bromocresol Green/Methyl Red.

$$\%TKN = \frac{(V_{sample} - V_{blank}) \cdot M_N \cdot N_{H_2SO_4}}{m_{sample} \cdot 10}$$

V<sub>sample</sub>: όγκος θειικού που κατανάλωσε το δείγμα (ml)

V<sub>blank</sub>: όγκος θειικού που κατανάλωσε το blank (ml)

M<sub>N</sub>: μοριακό βάρος αζώτου, 14.007 mol/L

N<sub>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></sub>: κανονικότητα διαλύματος θειικού, 0.02 N (mol/L)

m<sub>sample</sub>: μάζα δείγματος (g) -υπολειπόμενη υγρασία δείγματος

Υπολογίζεται το recovery rate:  $Recovery = \frac{N_{actual}}{N_{theoretical}} \cdot 100$

N<sub>actual</sub>: πραγματική τιμή περιεχόμενου αζώτου στο διάλυμα ουρίας

N<sub>theoretical</sub>: θεωρητική τιμή περιεχόμενου αζώτου στο διάλυμα ουρίας

Τέλος διαιρείται το TKN % με το Recovery. Το TKN % είναι υπολογισμένο σε ξηρή βάση καθώς μετρήθηκε και αφαιρέθηκε η υγρασία του δείγματος.

### 3.2.8 Προσδιορισμός ολικού οργανικού άνθρακα TOC

Προετοιμασία Δείγματος: Η προετοιμασία δείγματος είναι η ίδια με αυτή που αναφέρθηκε για τη μέτρηση του αζώτου κατά κένταλ. Δείγμα κόμποστ ξηραίνεται σε φούρνο στους 45°C για 48 ώρες. Έπειτα το δείγμα ομογενοποιείται σε μπλέντερ και τεμαχιστή κόκκων καφέ έως ότου να είναι σε μορφή λεπτόκοκκης σκόνης. Ποσότητα του δείγματος χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της υγρασίας του. Τα δείγματα αποθηκεύονται σε πλαστικές σακούλες τύπου κατάψυξης με αεροστεγές κλείσιμο.

Πειραματική διαδικασία: Ποσότητα (40 mg) ξηραμένου και τεμαχισμένου δείγματος ζυγίζεται μέσα σε προξηραμένες κάψες και σημειώνεται ακριβώς η μάζα του. Στη συνέχεια αφού έχει προθερμανθεί ο TOC analyser (Shimadzu), το δείγμα εισάγεται στο θάλαμο του SSM-5000A και

αναφλέγεται στους 900°C, το TOC Vsch υπολογίζει το ποσοστό του άνθρακα από το παραγόμενο CO<sub>2</sub> (Total Carbon). Πραγματοποιείται μέτρηση του ολικού άνθρακα (Total Carbon) και του ανόργανου άνθρακα (Inorganic Carbon) και ο ολικός οργανικός άνθρακας (Total organic carbon) προκύπτει ως η διαφορά του ολικού από τον ανόργανο άνθρακα, TOC=TC-IC. Στα δείγματα κόμποστ το ποσοστό του ανόργανου άνθρακα είναι πολύ μικρό (<1%). Για κάθε δείγμα πραγματοποιήθηκαν 2 επαναλήψεις. Τέλος γίνεται αναγωγή σε ξηρό βάρος της τελικής τιμής χρησιμοποιώντας την υγρασία που υπολογίστηκε στο πρώτο βήμα.

### 3.2.9 Υπολογισμός λόγου άνθρακα/αζώτου- C/N

Ο υπολογισμός C/N γίνεται με βάση τον τύπο:

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

όπου TOC και TKN όπως προσδιορίστηκαν στις δύο προηγούμενες παραγράφους.

### 3.2.10 Προσδιορισμός φυτοτοξικότητας (germination index)

Ένας πολύ σημαντικός δείκτης για την ποιότητα του κομπόστ είναι ο δείκτης βλάστησης germination index καθώς ανιχνεύει την ύπαρξη χημικών ουσιών με αρνητικές επιπτώσεις στην ανάπτυξη των φυτών.

Η μέτρηση αποτελείται από τρία στάδια: παρασκευή υδατικού διαλύματος του κομπόστ, βλάστηση των σπόρων στο υδατικό διάλυμα, μέτρηση των σπόρων και υπολογισμός των δεικτών Relative Seed Germination (RSG), Relative Radicle Growth (RRG) και Seed Germination Index (GI) όπως παρουσιάζονται παρακάτω.

$$Relative\ Seed\ Growth = \frac{Number\ of\ germinated\ seeds\ (sample)}{Number\ of\ germinated\ seeds\ (control)} * 100\%$$

$$Relative\ Radicle\ Growth = \frac{Total\ radicle\ length\ of\ germinated\ seeds\ (sample)}{Total\ radicle\ length\ of\ germinated\ seeds\ (control)} * 100\%$$

$$Germination\ Index = RSG * RRG * 100\%$$

Καθώς δεν υπάρχει παγκοσμίως αποδεκτή μέθοδος για τον υπολογισμό της φυτοτοξικότητας, είναι πολύ σημαντική η αναφορά του σπόρου που χρησιμοποιήθηκε και η ακριβής πειραματική διαδικασία. Ο σπόρος που επιλέχθηκε για τη μέτρηση είναι το κάρδαμο (*Lepidium sativum*) επειδή ο πιο ευρέα χρησιμοποιούμενος για αυτή τη μέτρηση στη βιβλιογραφία. Το κάρδαμο αναπτύσσεται γρήγορα και είναι αρκετά ευαίσθητο άρα καθίσταται κατάλληλο φυτό για τη μέτρηση φυτοτοξικότητας.

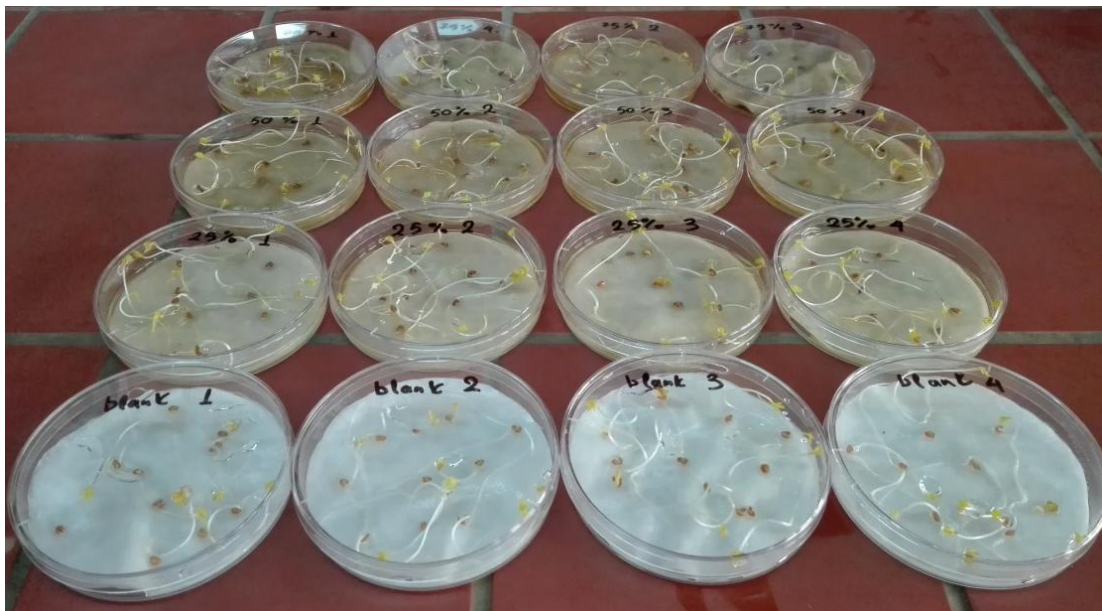
Προετοιμασία δείγματος: Δείγμα κόμποστ ξηραίνεται σε φούρνο στους 50°C για 48 ώρες.

Πειραματική διαδικασία: Ζυγίζονται 25 g δείγματος και προστίθενται 250 ml απιονισμένο νερό. Μετά από 1 ώρα ανάδευση ακολουθεί φυγοκέντρηση σε 3000 rpm για 30 λεπτά (φυγόκεντρος

Erpendorf 5702). Το υγρό διηθείται υπό κενό με διηθητικό χαρτί. Από αυτό το διάλυμα παρασκευάζονται αραιώσεις 25%, 50% και 75% με απιονισμένο νερό.

Σε τρυβλία petri (d=10 cm) τοποθετούνται τέσσερις στρώσεις διηθητικού χαρτιού ως βάση για τους σπόρους, 10 σπόροι κάρδαμου και 10 ml από την κάθε αραιώση με πιπέτα των 5 ml, με τέσσερις επαναλήψεις για την κάθε αραιώση. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για το blank με απιονισμένο νερό, με τέσσερις επαναλήψεις. Τα τρυβλία κλείνονται με parafilm και τοποθετούνται σε χώρο μακριά από το ηλιακό φως για μια εβδομάδα.

Μετά το πέρας της βδομάδας αφαιρούνται τα φυτά από τα τρυβλία, μετρούνται αυτά που έχουν φυτρώσει και υπολογίζεται ο μέσος όρος της κάθε αραιώσης και του blank και υπολογίζεται ο δείκτης RSG, έπειτα μετριέται το μήκος της ρίζας του κάθε φυτού της κάθε αραιώσης και του blank και υπολογίζεται ο δείκτης RRG. Ο δείκτης GI προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό των δεικτών RSG και RRG. Η πειραματική διαδικασία βασίστηκε στους Luo et al. (2017) και Sánchez-Monedero et al. (2002) και είναι παραλλαγή της μεθόδου Zucconi et al. (1981).



Εικόνα 9 Μέτρηση φυτοτοξικότητας

### 3.2.11 Χουμικά Οξέα (humic acids)

Μέρος της οργανικής ύλης του κομπόστ είναι τα χουμικά οξέα, έχουν σκούρο καφέ προς μαύρο χρώμα και μεγάλο μοριακό βάρος.

Προετοιμασία Δείγματος: Ακολουθείται ίδια προετοιμασία δείγματος με τον προσδιορισμό αζώτου κατά κένταλ (TKN) και του ολικού οργανικού άνθρακα (TOC) δηλαδή ξήρανση και ομογενοποίηση/τεμαχισμός. Μια μέρα πριν τη μέτρηση τοποθετείται το δείγμα στους 105 °C για να απομακρυνθεί όλη η υγρασία που μπορεί να έχει παραμείνει.

Αρχή μεθόδου: Σκοπός της μεθόδου είναι η απομόνωση και καταβύθιση των χουμικών οξέων με επαναλαμβανόμενη εναλλαγή του pH του διαλύματος από βασικό σε όξινο, καθώς τα χουμικά οξέα είναι διαλυτά σε pH=12, ενώ στερεοποιούνται σε pH=1.

Αντιδραστήρια:

- H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 6N  
Παρασκευή: σε ογκομετρική φιάλη των 500 ml τοποθετούνται 83 ml πυκνό H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (97 %) και απιονισμένο νερού μέχρι τη χαραγή.
- NaOH 0.5 M  
Παρασκευή: 20 g NaOH διαλύονται σε 1 l νερό

Πειραματική Διαδικασία: Ζυγίζεται 1 g δείγματος σε ένα ποτήρι ζέσεως και διαλύεται σε 100 ml NaOH 0.5 M. Το ποτήρι καλύπτεται με parafilm και αναδεύεται σε μαγνητικό αναδευτήρα για 24 ώρες. Ακολουθεί φυγοκέντρηση στα 3500 rpm για 30 λεπτά έτσι ώστε να διαχωριστεί το υγρό από το στερεό και δεύτερη φυγοκέντρηση μόνο του υγρού. Το στερεό υπόλειμμα είναι η χουμίνη και τα άλλα αδιάλυτα συστατικά του κομπόστ, τα χουμικά και φουλβικά οξέα περιέχονται στο υγρό. Αποχύνεται προσεκτικά το υγρό σε ένα ποτήρι ζέσης και το στερεό απορρίπτεται. Πραγματοποιείται όξυνση του διαλύματος με θειικό οξύ 6N, μέχρι το pH να είναι 1 και αναδεύεται για 24 ώρες.

Ακολουθεί φυγοκέντρηση στα 3500 rpm για 30 λεπτά, το στερεό περιέχει τα χουμικά και το υγρό τα φουλβικά. Αποχύνεται προσεκτικά το υγρό και απορρίπτεται. Προστίθεται διάλυμα NaOH με πιπέτα μέσα στους σωλήνες της φυγοκέντρησης που υπάρχει το στερεό μέχρι να διαλυθεί (περίπου 5 ml NaOH σε κάθε σωλήνα). Όταν διαλυθεί το στερεό τοποθετείται σε ένα ποτήρι ζέσεως και ελέγχεται το pH, πρέπει να είναι 12, αν δεν είναι ρυθμίζεται είτε με NaOH ή με θειικό μέχρι να είναι 12 και αφήνεται σε ανάδευση για 24 ώρες.

Έπειτα φυγοκεντρείται το υγρό στα 3500 rpm για 30 λεπτά, αποχύνεται προσεκτικά σε ένα ποτήρι ζέσεως και απορρίπτεται το στερεό, το στερεό μπορεί να περιέχει τα εναπομείναντα αδιάλυτα συστατικά (πρέπει να είναι ελάχιστο).

Πραγματοποιείται όξυνση με το θειικό 6N μέχρι pH 1 και αναδεύεται για ένα 24ωρο. Έπειτα πραγματοποιείται διήθηση υπό κενό με φιλτράκι 1.2 μm Whatman glass microfiber filter, διαμέτρου 90 mm. Τα χουμικά ξεπλένονται με απιονισμένο νερό με pH<2, το οποίο έχει ρυθμιστεί με θειικό οξύ. Το φιλτράκι είχε τοποθετηθεί στον φούρνο των 550°C για 20 λεπτά για να απομακρυνθεί η υγρασία και έχει σημειωθεί το καθαρό βάρος του. Μετά τη διήθηση το φιλτράκι τοποθετείται στον φούρνο των 105°C για 24 ώρες, έπειτα στον αφυγραντήρα και σημειώνεται το βάρος του. Τα χουμικά υπολογίζονται σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$\text{Humic Acids \%} = [(\text{φιλτράκι} + \text{δείγμα}) - \text{φιλτράκι καθαρό βάρος}] * 100\%$$

Υπολογίστηκαν και τα πτητικά στερεά των χουμικών στους 550 °C για 20 λεπτά, με τη μέθοδο: προσδιορισμός πτητικών στερεών.

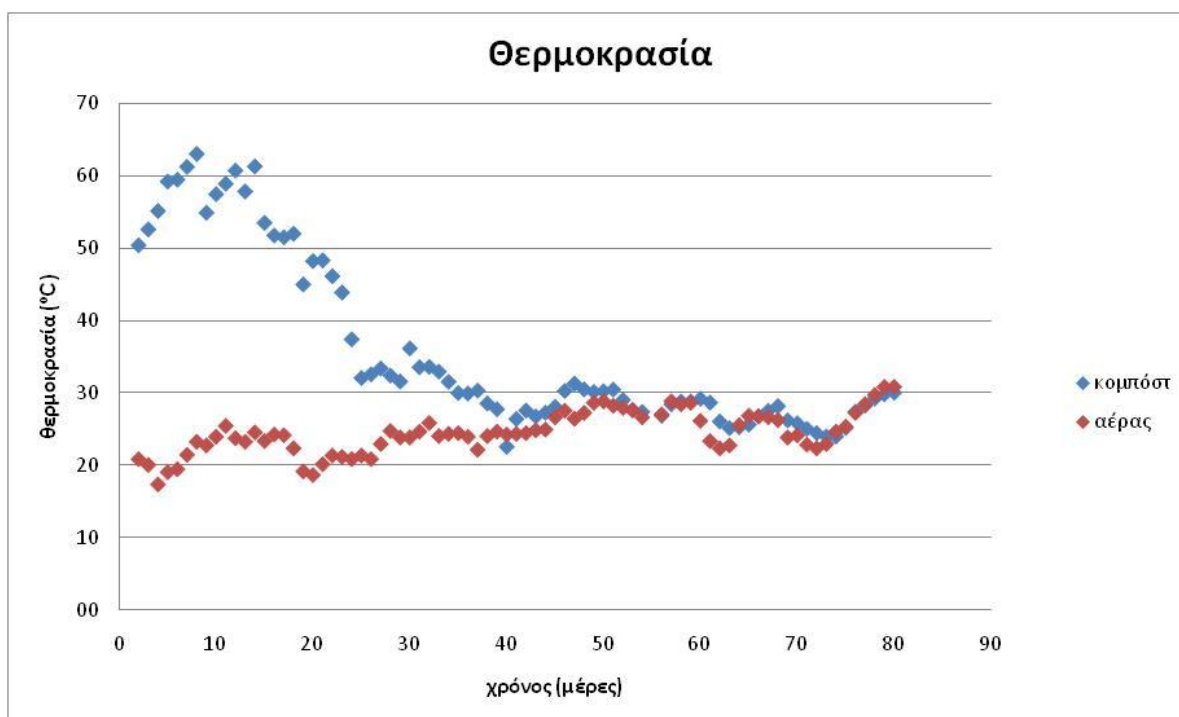
Η μέθοδος απομόνωσης των χουμικών οξέων βασίστηκε σε συνδυασμό μεθόδων από τους Lamar et al. (2014), Baglieri et al. (2007) και το California Department of Food and Agriculture (humic acid method).

## 4. Αποτελέσματα

### 4.1 Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία είναι από τις πιο σημαντικές παραμέτρους στην κομποστοποίηση. Είναι από τα πιο βασικά κριτήρια για την αποστείρωση των αποβλήτων και υποδεικνύει την πορεία της διεργασίας και αν κάποια λειτουργική παράμετρος δεν είναι ικανοποιητική (αερισμός, υγρασία).

κομποστοποίηση μικρής κλίμακας



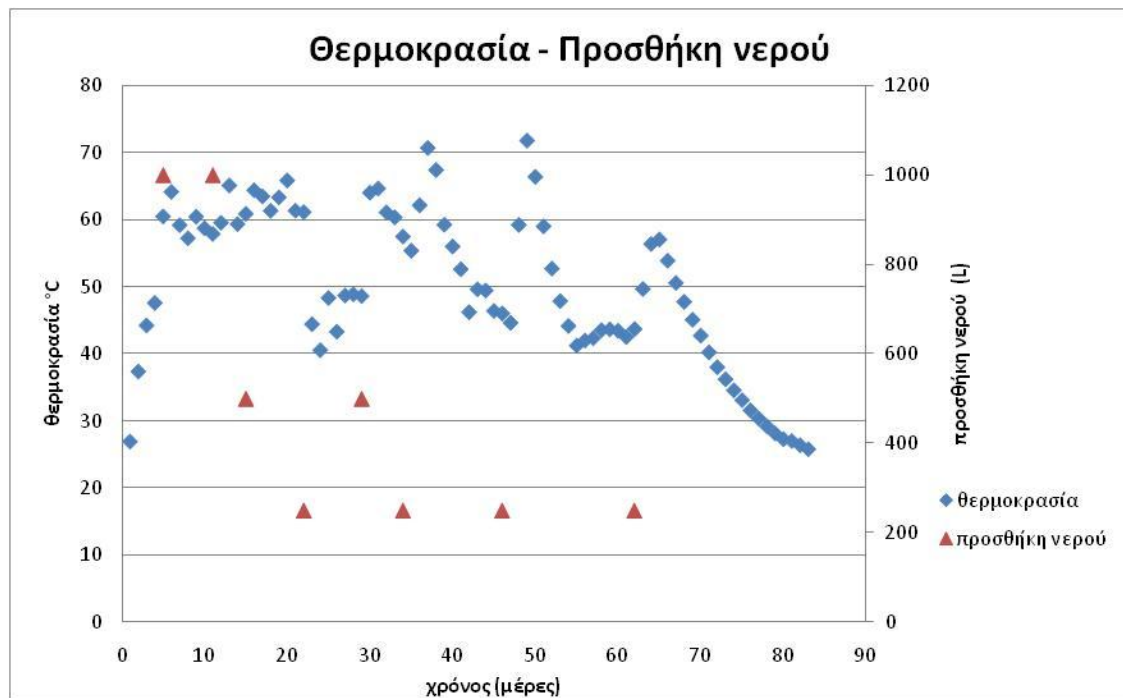
Διάγραμμα 1 Θερμοκρασία-Χρόνος μικρής κλίμακας

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνονται καθαρά η θερμόφιλη φάση και η φάση της ωρίμανσης που το κομπόστ αποκτάει σταδιακά θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η λανθάνουσα φάση είναι πολύ μικρή και οι μικροοργανισμοί προσαρμόστηκαν πολύ γρήγορα στο νέο περιβάλλον, αυτό μπορεί να οφείλεται στο γρασίδι που είχε κοπεί την προηγούμενη μέρα, είχε υψηλή υγρασία και είχε ήδη αναπτύξει μεσόφιλες θερμοκρασίες πριν να τοποθετηθεί στον κομποστοποιητή.

Η θερμόφιλη φάση ( $T > 55^{\circ}\text{C}$ ) έχει διάρκεια 11 μέρες με μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία  $63^{\circ}\text{C}$  την 8η μέρα. Επιπλέον η θερμοκρασία ήταν πάνω από  $50^{\circ}\text{C}$  για 17 μέρες. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία και την Υ.Α. οικ. 56366/4351/2014 για το κομπόστ τύπου Α οι υγειονομικές απαιτήσεις είναι : η θερμόφιλη φάση να έχει διάρκεια δύο βδομάδων. Το κομπόστ από τον οικιακό κομποστοποιητή δεν πληροί αυτήν την απαίτηση, πιθανότητα λόγω μικρής μάζας (μέγεθος 280 L) δεν μπόρεσε να διατηρήσει υψηλή θερμοκρασία για μεγάλο χρονικό διάστημα. Έχει παρατηρηθεί ότι σε κάποιες περιπτώσεις οι οικιακοί κομποστοποιητές δεν εμφανίζουν υψηλές θερμοκρασίες ή δεν τις διατηρούν για πολλές μέρες, για παράδειγμα οικιακοί κομποστοποιητές 340 και 350 λίτρων

παρουσίασαν εύρος θερμοκρασιών 7-35 °C (Vasquez et al. 2017) και 300 λίτρων διατήρησαν θερμοκρασία 50°C για 20 μέρες (Muscolo et al. 2018).

#### κομποστοποίηση μεγάλης κλίμακας



**Διάγραμμα 2** Θερμοκρασία- Προσθήκη νερού, μεγάλης κλίμακας

Στην κομποστοποίηση μεγάλης κλίμακας φαίνεται καθαρά η σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας ξεκινώντας από 27°C (λανθάνουσα φάση), την πέμπτη μέρα έχει φτάσει στους 60°C. Η πρώτη θερμοφιλική φάση ( $T > 55^{\circ}\text{C}$ ) έχει διάρκεια 18 μέρες, έπειτα πέφτει στους 45°C και ξανανεβαίνει με μια δεύτερη θερμοφιλική φάση που διήρκησε 12 μέρες. Υπάρχει και μια τρίτη θερμοφιλική φάση με διάρκεια 4 ημερών. Η μέγιστη θερμοκρασία καταγράφηκε την 49η ημέρα στους 71,7 °C. Αυτές οι πτώσεις της θερμοκρασίας οφείλονται σε έλλειψη κάποιου παράγοντα (υγρασία ή αερισμός). Από το διάγραμμα φαίνεται ότι όταν προστίθεται νερό, ξανανεβαίνει η θερμοκρασία άρα η χαμηλή υγρασία είναι περιοριστικός παράγοντας για τη μικροβιακή δραστηριότητα όπως υποδεικνύεται και από τη βιβλιογραφία. Οι υγειονομικές απαιτήσεις καλύπτονται από την πρώτη θερμοφιλική φάση καθώς έχει διάρκεια πάνω από δύο βδομάδες, συνολικά υπερκαλύπτονται από τις τρεις θερμοφιλικές φάσεις και από τις υψηλές θερμοκρασίες (60-70°C) όπως και αποδείχθηκε από διαπιστευμένο εργαστήριο με μικροβιακό έλεγχο. Το κομπόστ αυτό είναι πλήρως απαλλαγμένο από παθογόνους μικροοργανισμούς.

**Πίνακας 8 Θερμοκρασιακές απαιτήσεις ανά χώρα (Brinton 2000)**

Country	Compost Method	Temperature / Pathogens
Australia	All methods	> 55C for atleast 3 days; allowance for variation and lower temperatures
Germany	Open Windrow Closed/ In-Vessel  PLUS All New Facilities: no presence in 25 g of:  No-survival of added:	> 55C 2 weeks or > 65C for 1 week >60C for 1 week  Human/Veterinary Hygiene: S. senftenberg W775 Phyto-hygiene: Tobacco-mosaic Virus (TMV) & Plas- modiophora brassicae
Austria	all composts	> 60 C 6 days or > 65C 3 days, or >65C 2 x 3 days
Switzerland		> 55C for 3 weeks, or > 60C for 1 week, or proven time temperature relationship
Denmark	all composts	> 55C for 2 weeks

## 4.2 Υγρασία

Η υγρασία είναι ένας από τους δύο παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη των μικροβιακών πληθυσμών που είναι υπεύθυνοι για την κομποστοποίηση. Έλλειψη νερού παρεμποδίζει την κομποστοποίηση όμως υπερβολική υγρασία εμποδίζει τον αερισμό και δημιουργεί αναερόβιες συνθήκες. Ιδανική υγρασία σύμφωνα με τον οδηγό λειτουργίας ανοιχτών εγκαταστάσεων κομποστοποίησης (ΕΠΠΕΡΑΑ) είναι 45-60% και αποδεκτή 40-65% αλλά εξαρτάται από την πρώτη ύλη και το σύστημα κομποστοποίησης που επιλέχθηκε. Προτείνεται προσθήκη νερού για να διατηρηθεί η υγρασία στα επιθυμητά επίπεδα.

Ως τελικό προϊόν το κομπόστ δεν πρέπει να έχει υψηλή υγρασία, χαρακτηριστικά η Υ.Α. οικ. 56366/4351/2014 θέτει ως προδιαγραφή υγρασία κάτω από 40%.

Οι Muscolo et al. (2018) σε κομποστοποίηση λαχανικών και αποβλήτων ελαιотριβείων διατηρούσαν την υγρασία σταθερή στο 50% κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης. Οι Neugebauer et al. (2017) είχαν ως κατώτερο όριο υγρασίας το 55% για οικιακά απορρίμματα.

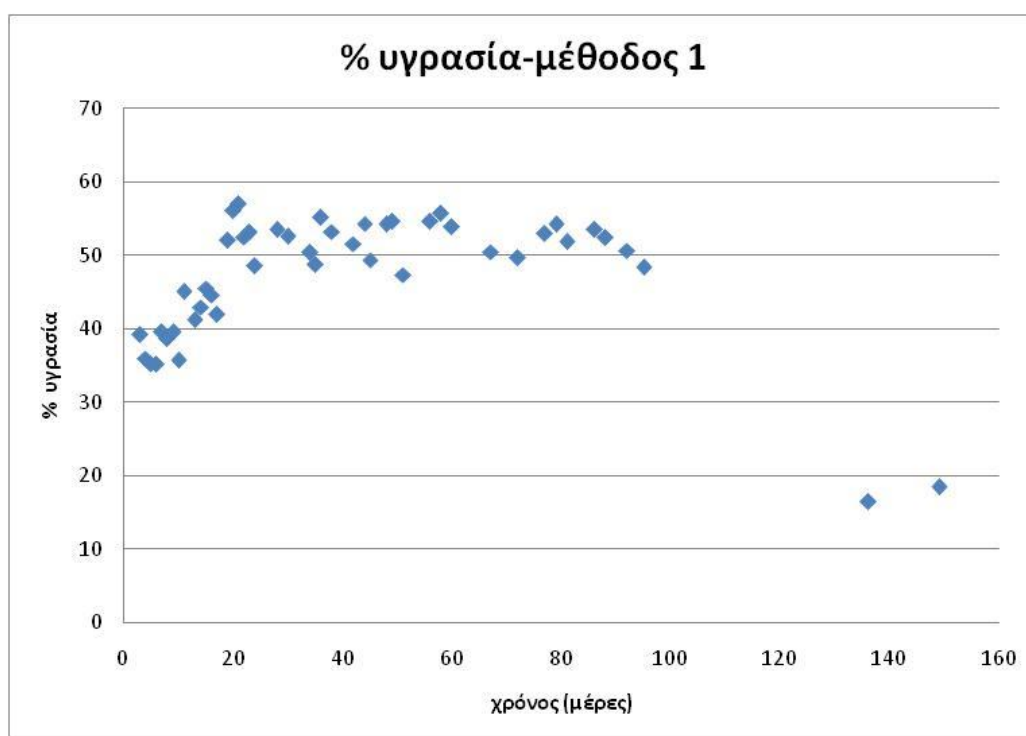
### Κομποστοποίηση μικρής κλίμακας

Η υγρασία των αρχικών υλικών και το ποσοστό τους στον οικιακό κομποστοποιητή χωρίς (dry weight) και με την υγρασία (wet weight) παρουσιάζεται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 9 Υγρασία-ποσοστό αρχικών υλικών

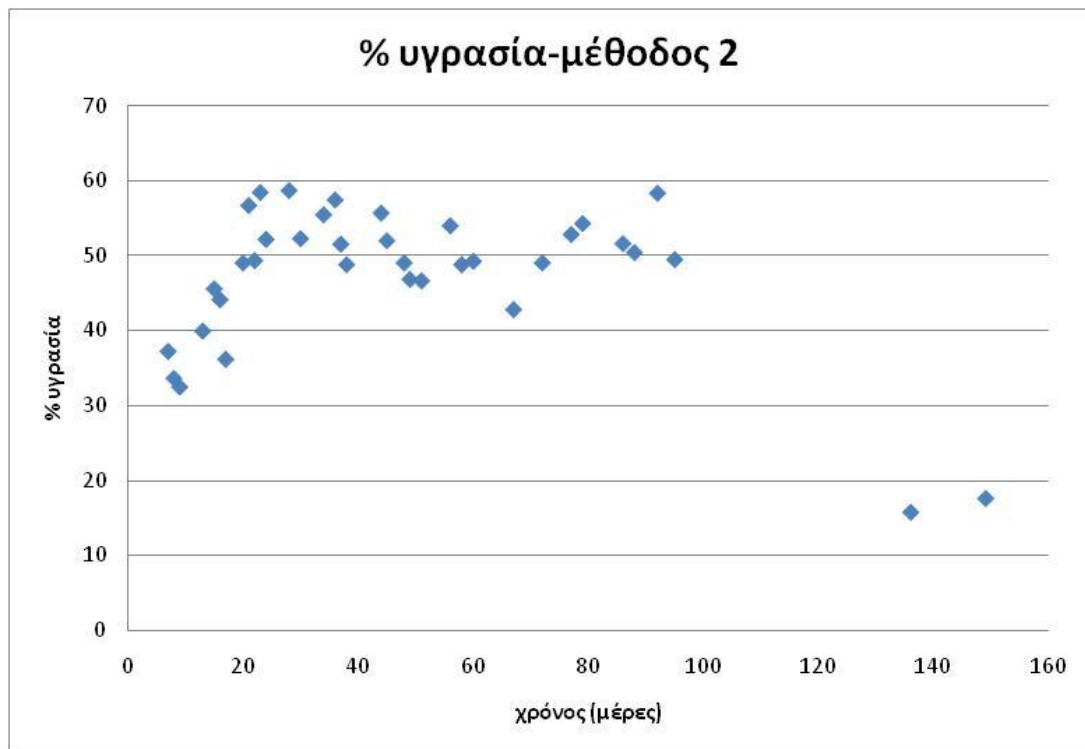
materials	water content %	Percentage wet weight	percentage dry weight
FORBI	15	33	49
grass	69	11	6
prunings	54	56	45

Στόχος ήταν να διατηρηθεί σταθερή η υγρασία στον οικιακό κομποστοποιητή κοντά στην τιμή 50% κατά τη διάρκεια της ενεργής φάσης, με αποδεκτά όρια 45-55%. Αυτό ήταν εφικτό με συχνή προσθήκη μικρών ποσοτήτων νερού και καθημερινή ανάδευση.



Διάγραμμα 3 Υγρασία- 1η μέθοδος-μικρής κλίμακας



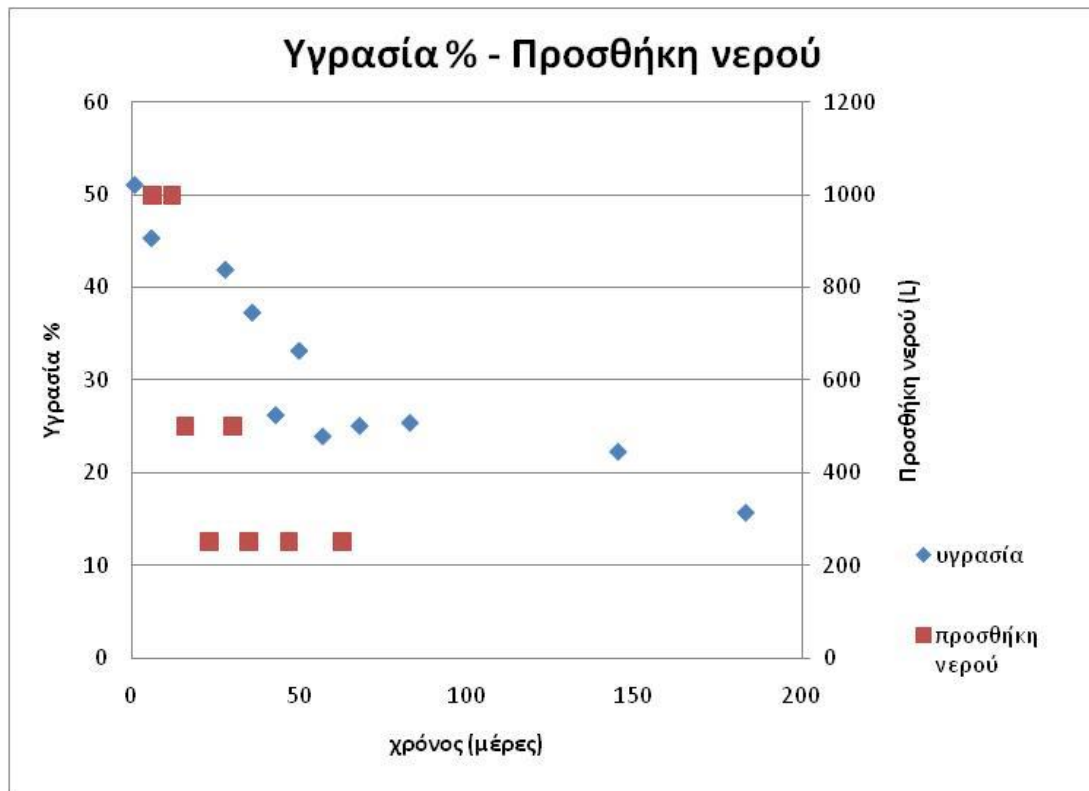


**Διάγραμμα 4 Υγρασία-2η μέθοδος- μικρής κλίμακας**

Από τα δύο διαγράμματα φαίνεται ότι η υγρασία κυμαίνονταν κοντά στο 50 %, με δύο αποκλίσεις στο 60 % που είναι υπερβολικά υψηλές τιμές. Μετά την 100στη μέρα είχε τελειώσει η ενεργή και η μεσόφιλη φάση και σταμάτησε η προσθήκη νερού. Λόγω των καλοκαιρινών μηνών η υγρασία έπεσε στο 20 %, τιμή αποδεκτή για τελικό προϊόν κομποστοποίησης.

Η σύγκριση των δύο διαγραμμάτων δείχνει ότι η μικρή και συχνή προσθήκη νερού ήταν αποτελεσματική στη διατήρηση της υγρασίας μέσα στο επιθυμητό διάστημα.

## κομποστοποίηση μεγάλης κλίμακας



Διάγραμμα 5 Υγρασία- μεγάλης κλίμακας

Στόχος του πειράματος scale up ήταν υγρασία κοντά στο 45%. Εφαρμόστηκε μόνο η πιο ακριβής μέθοδος (μέθοδος 2) για τον προσδιορισμό υγρασίας. Η πορεία μείωσης της υγρασίας συμφωνεί με την μείωση της υγρασίας στα σειράδια ανοιχτού τύπου.

Σε κομποστοποίηση σειραδιών αποβλήτων πτηνοτροφείου και φλοιών ρυζιού (Kong et al. 2017) η υγρασία μειώθηκε από 62.92% σε 23.93%.

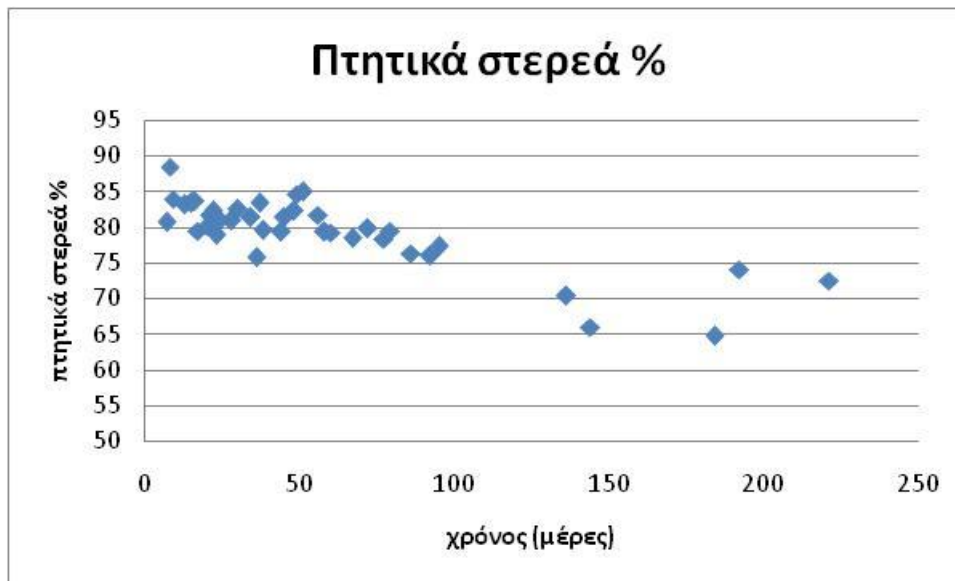
Η τελική υγρασία της τάξης του 15% είναι αποδεκτή για τελικό προϊόν κομποστοποίησης.

### 4.3 Πτητικά Στερεά

Τα πτητικά στερεά (volatile solids) είναι δείκτης της οργανικής ύλης και υφίστανται μείωση κατά τη διάρκεια της διεργασίας, της τάξης του 20-30%. Μετατρέπονται σε κομπόστ, διοξείδιο του άνθρακα, νερό και χουμικά (Βλυσίδης, Γρηγοροπούλου, Λυμπεράτος 2016).

Εκφράζονται σε ξηρή βάση ως ποσοστό των ολικών στερεών (total solids).

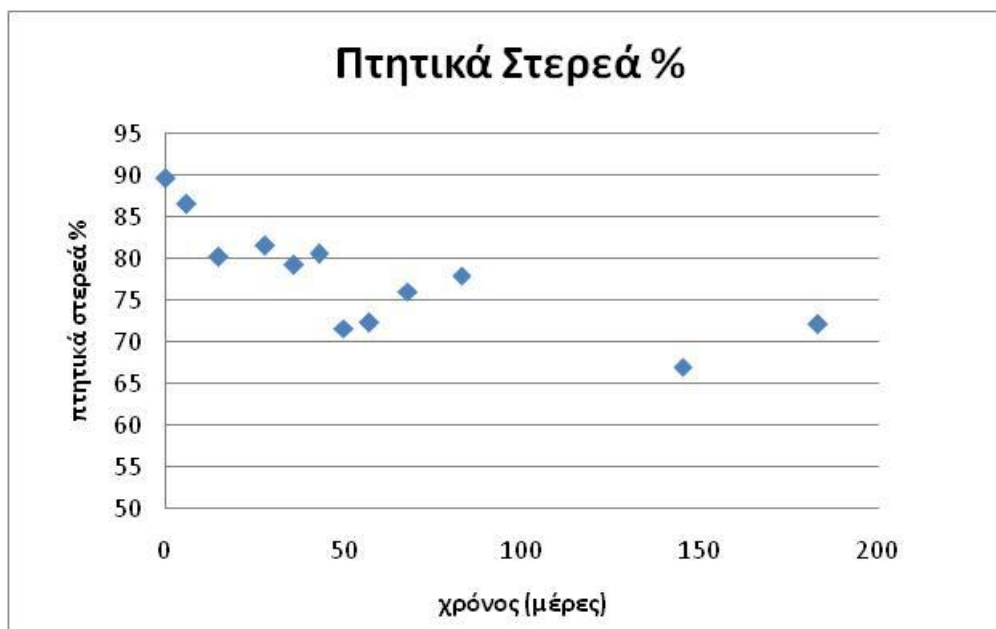
### κομποστοποίηση μικρής κλίμακας



Διάγραμμα 6 Πτητικά στερεά μικρής κλίμακας

Τα πτητικά στερεά της πρώτης ύλης είναι 88% και μέσω της κομποστοποίησης μειώνονται στο 72%, με συνολική μείωση της τάξης του 18%. Η ανομοιομορφία των πειραματικών τιμών μπορεί να οφείλεται σε ατελή καύση των πτητικών στερεών.

### κομποστοποίηση μεγάλης κλίμακας



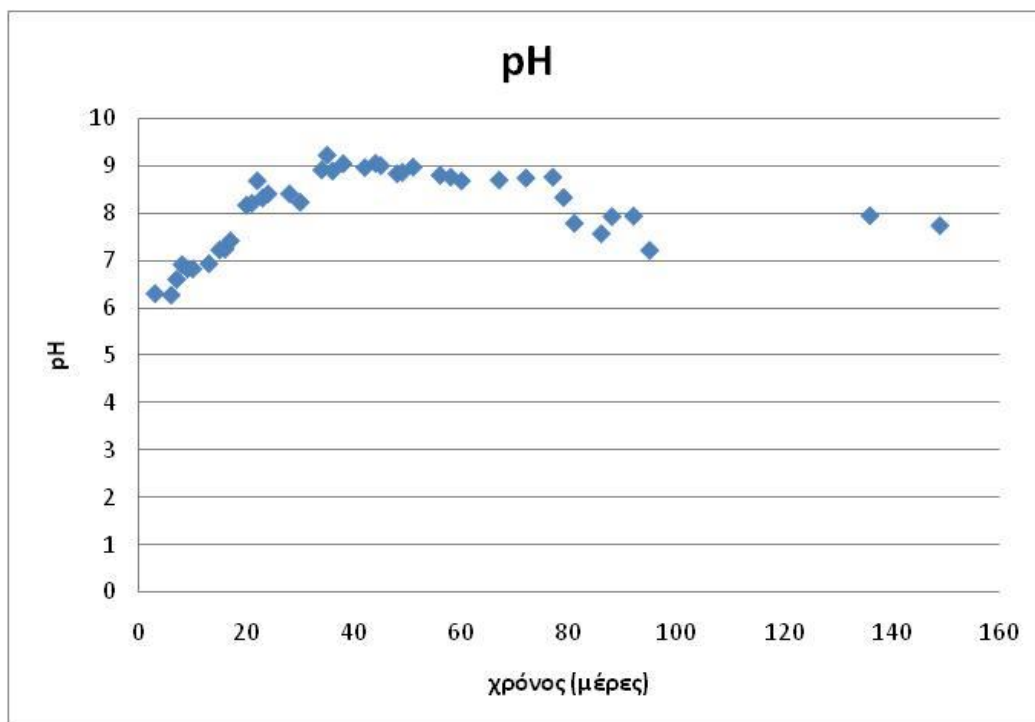
Διάγραμμα 7 Πτητικά στερεά- μεγάλης κλίμακας

Τα αρχικά πτητικά στερεά είναι 90% και μειώνονται μέχρι το 72%, δηλαδή συνολικά 20% μείωση. Η μείωση είναι απότομη στα αρχικά στάδια και έπειτα γίνεται πιο σταδιακή, καθώς αποικοδομείται η οργανική ύλη.

#### 4.4 pH

Το pH της οργανικής ύλης που μπορεί να κομποστοποιηθεί έχει μεγάλο εύρος, με βέλτιστες τιμές 5.5-8.5 (Λοιζίδου 2006). Το βέλτιστο pH για τα βακτήρια είναι ουδέτερο ενώ για τους μύκητες ελαφρά όξινο. Το pH ξεκινάει από χαμηλές τιμές (5-6) και καταλήγει σε βασικές (7-8). Η αύξηση του οφείλεται στην κατανάλωση οργανικών οξέων και στην παραγωγή αζώτου και αμμωνίας, σύμφωνα με τον οδηγό του ΕΠΠΕΡΑΑ. Έπειτα στη φάση της ωρίμανσης υπάρχει μείωση του pH λόγω της νιτροποίησης (κατανάλωση αμμωνιακών και δημιουργία νιτρικών) κάτι που επιβεβαιώθηκε πειραματικά από τους Sanchez-Monedero et al. (2000). Οι Franke-Whittle et al. (2014) παρατήρησαν τις μεγαλύτερες τιμές pH στη θερμοφιλή και στα αρχικά στάδια της μεσόφιλης φάσης.

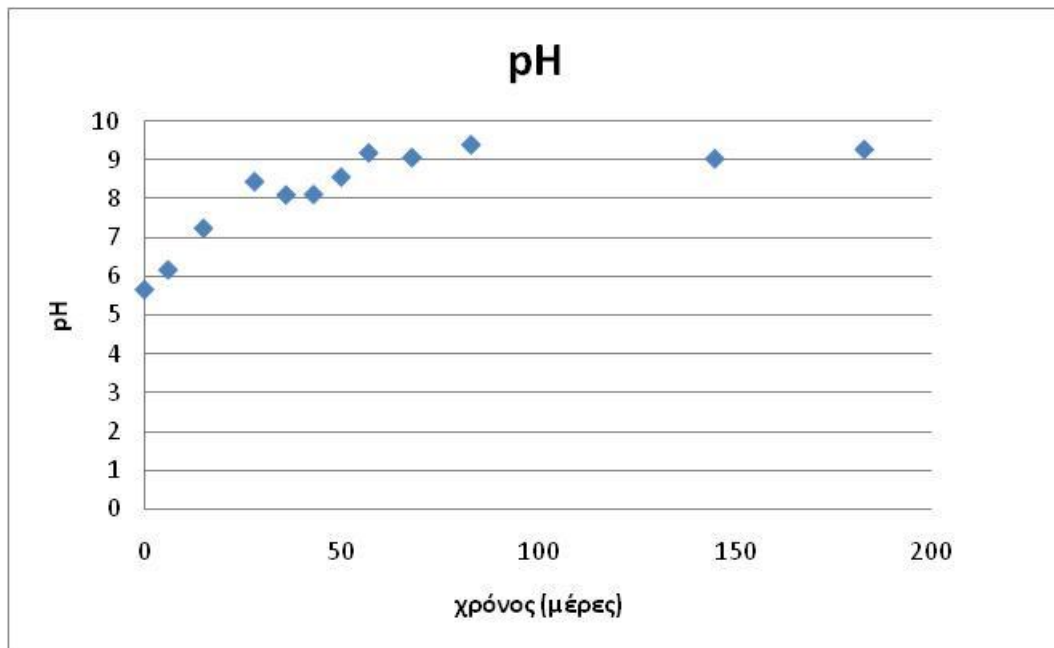
##### κομποστοποίηση μικρής κλίμακας



Διάγραμμα 8 pH μικρής κλίμακας

Παρουσιάζει αυξητική τάση με σταθεροποίηση κοντά στο 8, προς το τέλος εμφανίζεται μείωση του pH που οφείλεται στη νιτροποίηση. Η αρχική τιμή pH ήταν 6.30 και η τελική 8. Η μέγιστη τιμή pH παρατηρήθηκε την 35η μέρα και ήταν 9.21.

## κομποστοποίηση μεγάλης κλίμακας



Διάγραμμα 9 pH-μεγάλης κλίμακας

Παρατηρείται αυξητική τάση με σταθεροποίηση στο 9. Η αρχική τιμή pH είναι 5.7 και η τελική 9.2, παρόλο που η πρώτη ύλη ήταν πιο όξινη από το πείραμα μικρής κλίμακας, το τελικό προϊόν είναι πιο βασικό.

### **4.5 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα**

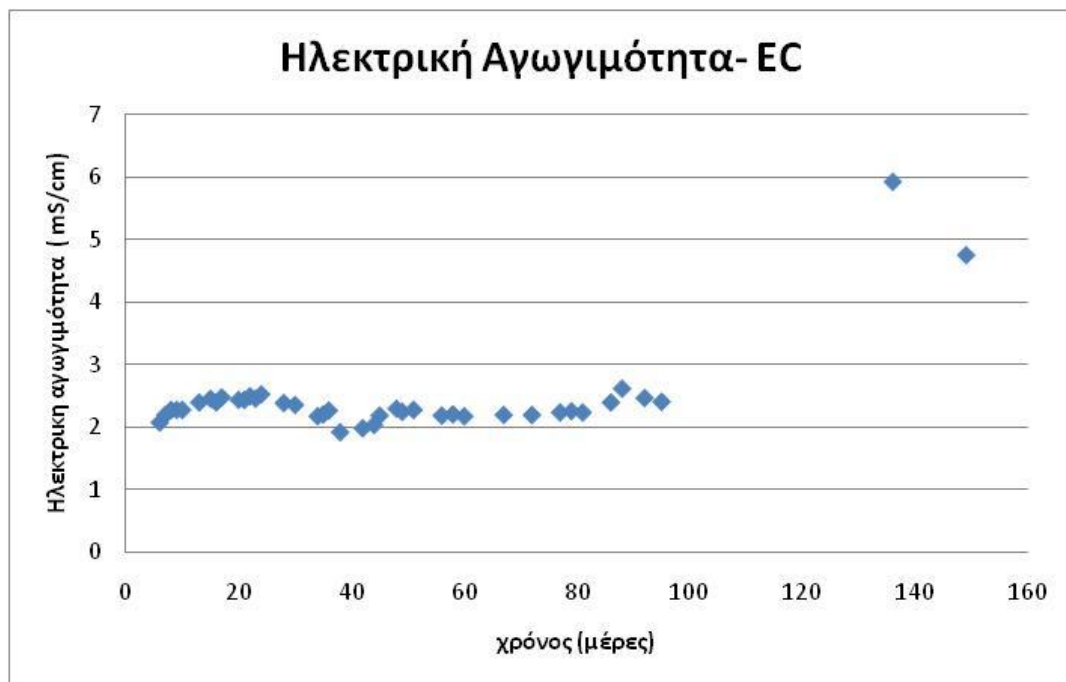
Η αγωγιμότητα συνδέεται με τα διαλυμένα άλατα που υπάρχουν στο χώμα, όταν προστίθεται κομπόστ με πολύ υψηλή αγωγιμότητα τότε θα αυξηθεί η αγωγιμότητα του χώματος και θα υπάρξουν αρνητικές επιπτώσεις στα φυτά. Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά οι ποσότητες κομπόστ που μπορούν να προστεθούν στο χώμα ανάλογα με την αγωγιμότητα τους.

Πίνακας 10 Αγωγιμότητα και εφαρμογή στο έδαφος, μονάδες dS/m=mS/cm, (Brinton 2000)

EC of Compost	rate for sensitive plants	rate for tolerant plants
	liters / m <sup>2</sup> (gal / 100 ft. <sup>2</sup> )	
0 - 1	unlimited	unlimited
1 - 2	< 15 ( 37 )	< 60 ( 150 )
2 - 4	< 8 ( 20 )	< 32 ( 78 )
4 - 8	< 4 ( 10 )	< 16 ( 39 )
8 - 12	< 2.5 ( 6 )	< 10 ( 24 )
> 12	< 2 ( 5 )	< 8 ( 20 )

a.Modified after Australia Standards, AS 4454-1999 based on rates mixed into the top 5cm (2") of soil.

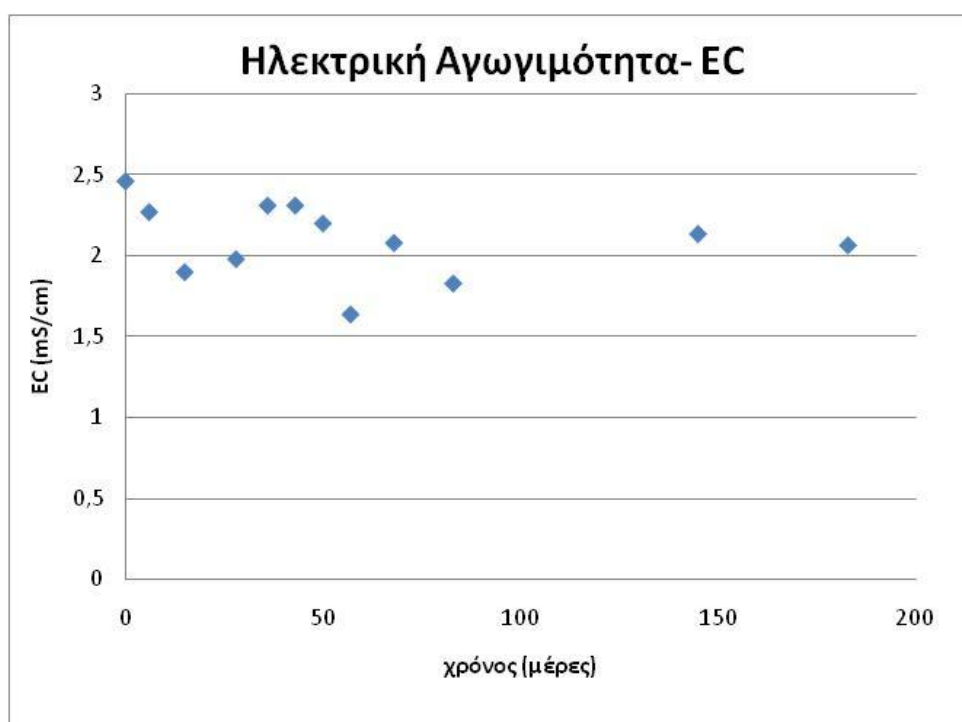
κομποστοποίηση μικρής κλίμακας



Διάγραμμα 10 αγωγιμότητα μικρής κλίμακας

Η αγωγιμότητα παραμένει σχετικά σταθερή στα 2 mS/cm στις πρώτες 100 μέρες της διεργασίας, έπειτα προς το τέλος εμφανίζει μια αύξηση κοντά στα 5 mS/cm. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε συνδυασμό των ακόλουθων παραγόντων: 1) μείωση της υγρασίας από το 50% στο 20%, 2) νιτροποίηση, η νιτροποίηση έχει αποδειχθεί ότι σχετίζεται με την αύξηση της αγωγιμότητας (Sanchez-Monedero, 2000).

## κομποστοποίηση μεγάλης κλίμακας



Διάγραμμα 11 αγωγιμότητα μεγάλης κλίμακας

Οι τιμές της αγωγιμότητας τείνουν στα 2 mS/cm και εμφανίζουν μικρή διακύμανση, το εύρος τους είναι 1.64-2.5 mS/cm. Αυτές οι τιμές αγωγιμότητας θεωρούνται αρκετά καλές.

Επιπλέον πραγματοποιήθηκαν τρία πειράματα με δύο διαφορετικές αραιώσεις για να βρεθεί το πόσο επηρεάζει ο λόγος αραιώσης την μέτρηση της αγωγιμότητας. Η πρώτη αραιώση είναι αυτή που εφαρμόστηκε στην παρούσα διπλωματική, 1:10 κόμποστ-νερό, και η δεύτερη 1:5. Μεγαλύτερη τιμή αγωγιμότητας της 1:5 εμφανίζεται στα 2 από τα τρία δείγματα αλλά δεν είναι αρκετά μεγάλη για να θεωρηθεί σημαντική.

Ο πιο σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τη μέτρηση είναι ο χρόνος ανάδευσης (Σγκούρη Σοφία, 2018).

Πίνακας 11 επιρροή λόγου αραιώσης στην αγωγιμότητα

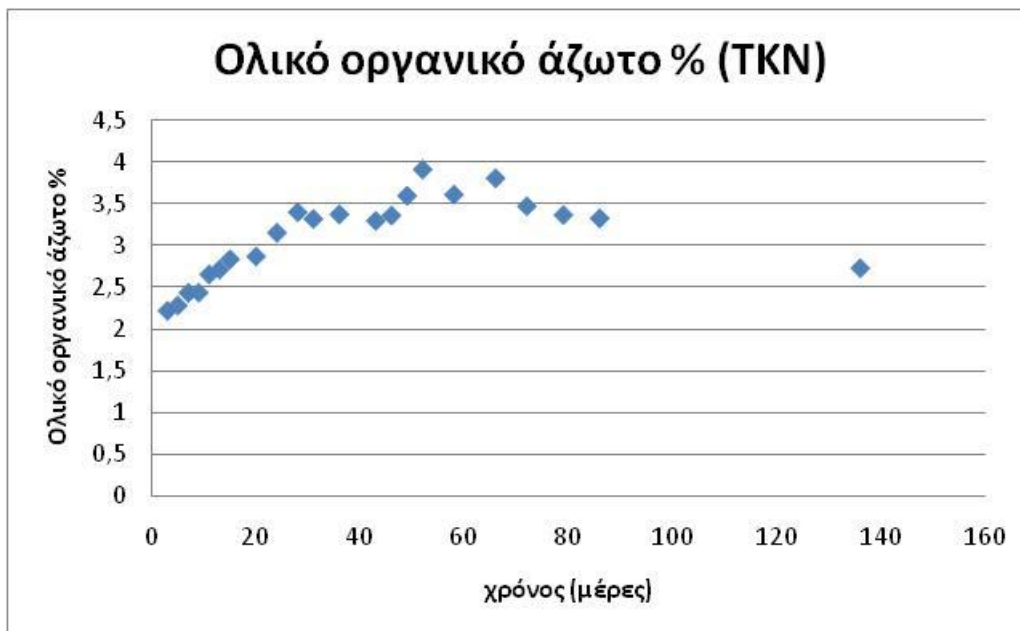
Μέρα/λόγος αραιώσης	1:10	1:5
36	2,31	2,30
43	2,31	2,35
68	2,08	2,42

## 4.6 Ολικό άζωτο κατά Kjeldahl

Το ολικό άζωτο κατά κένταλ συνυπολογίζει το οργανικό άζωτο με την αμμωνία/αμμωνικά, δεν προσμετράει τα νιτρικά ιόντα και το ανόργανο άζωτο. Το οργανικό άζωτο μειώνεται κατά απόλυτη τιμή καθώς υπάρχει απώλεια αμμωνίας στην ατμόσφαιρα (volatilization) αλλά σε ξηρή βάση παρατηρείται αύξηση καθώς αποσυντίθεται η οργανική ύλη και χάνεται οργανική μάζα μέσω απώλειας CO<sub>2</sub> και H<sub>2</sub>O (Bertoldi et al. 1983). Αυτό παρατηρείται και πειραματικά με το TKN να

παρουσιάζει μέγιστο την ημέρα 63 σε κομποστοποίηση χωνέματος αναερόβιας χώνευσης και πράσινων αποβλήτων (Franke-Whittle et al., 2014).

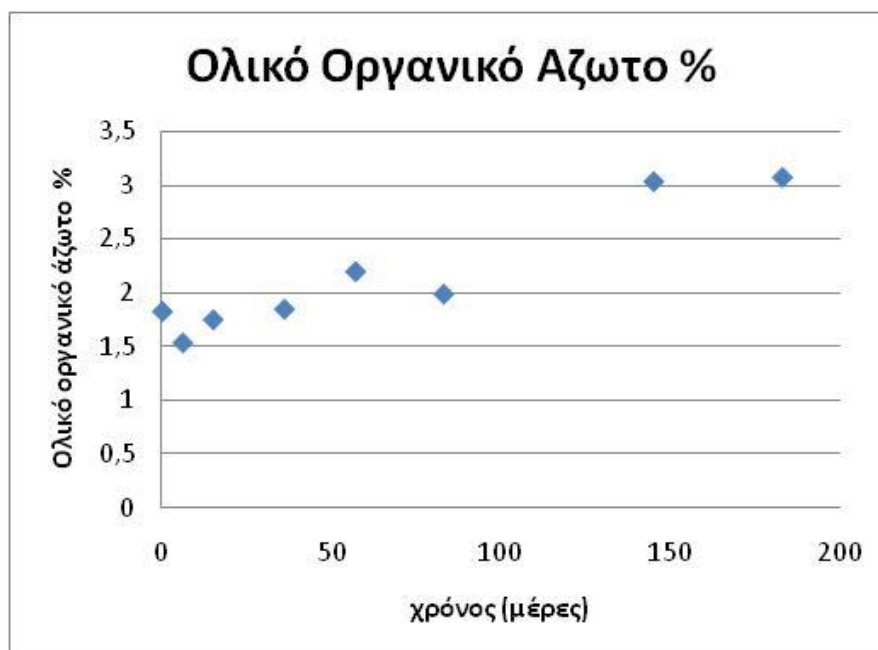
#### κομποστοποίηση μικρής κλίμακας



Διάγραμμα 12 TKN μικρής κλίμακας

Το TKN εμφανίζει μέγιστο την ημέρα 53 με τιμή 3.9 % σε ξηρή βάση. Η πρώτη ύλη περιέχει 2.2 % άζωτο και το τελικό προϊόν περιέχει 2.7 %.

#### κομποστοποίηση μεγάλης κλίμακας



Διάγραμμα 13 TKN μεγάλης κλίμακας

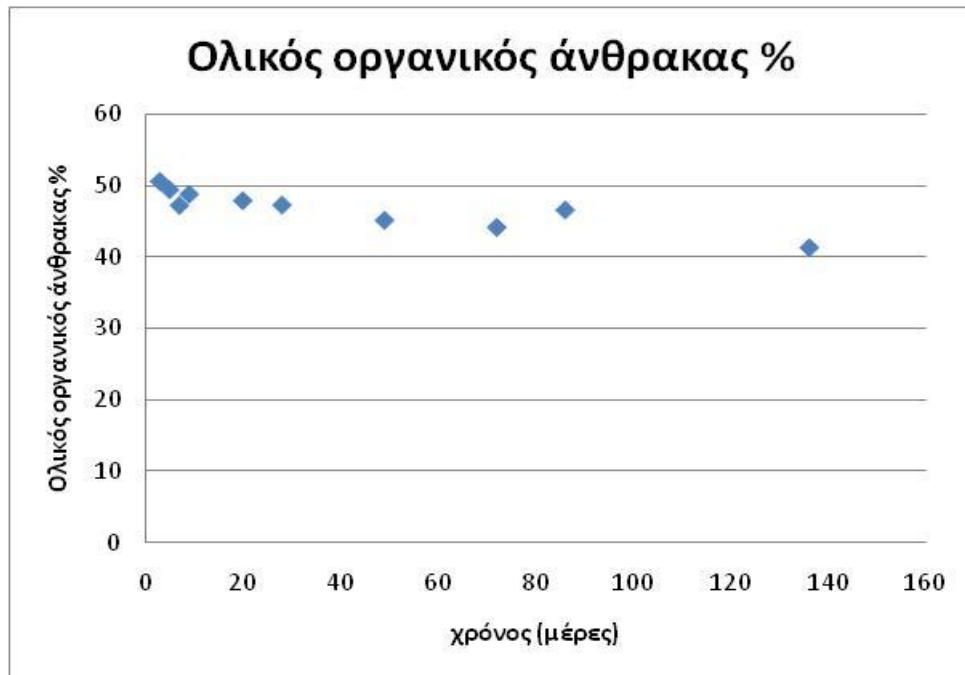


Παρατηρείται η αναμενόμενη αύξηση του TKN στα αρχικά στάδια της κομποστοποίησης αλλά δεν παρατηρείται μείωση στο στάδιο της ωρίμανσης. Το TKN της πρώτης ύλης είναι 1.8 % και του τελικού προϊόντος 3.1 %.

#### 4.7 Ολικός Οργανικός Άνθρακας - TOC

Ο οργανικός άνθρακας καταναλώνεται από τους μικροοργανισμούς και απελευθερώνεται CO<sub>2</sub>, με μεγαλύτερο ρυθμό από ότι αεριοποιείται και νιτροποιείται το άζωτο.

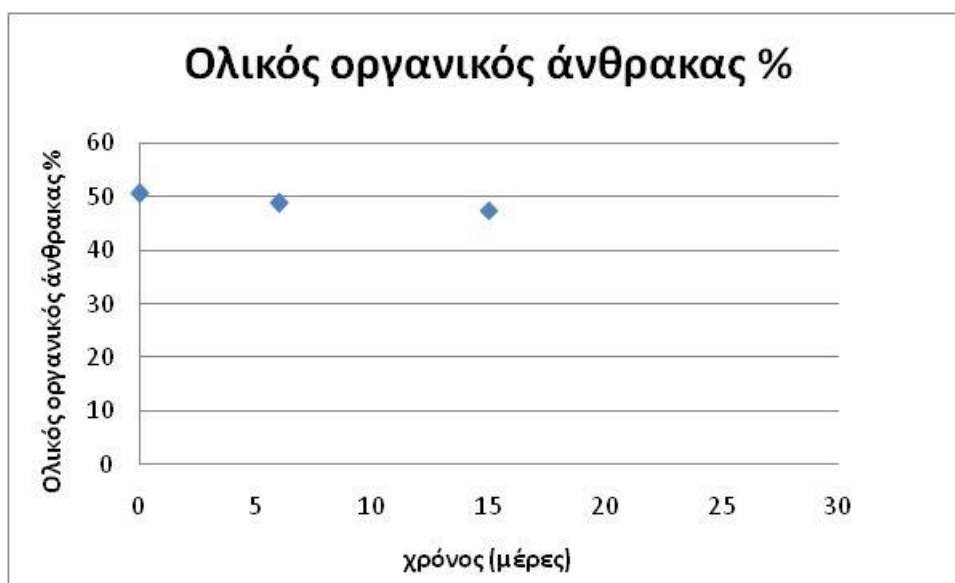
κομποστοποίηση μικρής κλίμακας



Διάγραμμα 14 TOC μικρής κλίμακας

Παρατηρείται πτώση του οργανικού άνθρακα, με αρχική τιμή 50.5% και τελική 41.2%, με συνολική μείωση 18%. Επίσης πραγματοποιήθηκαν κάποιες μετρήσεις ανόργανου άνθρακα και έδειξαν αμελητέα αποτελέσματα, συνεπώς γίνεται η παραδοχή ότι όλος ο άνθρακας είναι οργανικός.

κομποστοποίηση μεγάλης κλίμακας



Διάγραμμα 15 TOC μεγάλης κλίμακας

Παρατηρείται πτώση του οργανικού άνθρακα από το 50.7% την 1η μέρα στο 47.5% τη 15η, με συνολική μείωση 6.3% τις πρώτες 15 μέρες. Αναμένεται περαιτέρω μείωση του άνθρακα.

#### 4.8 Λόγος άνθρακα-αζώτου C/N

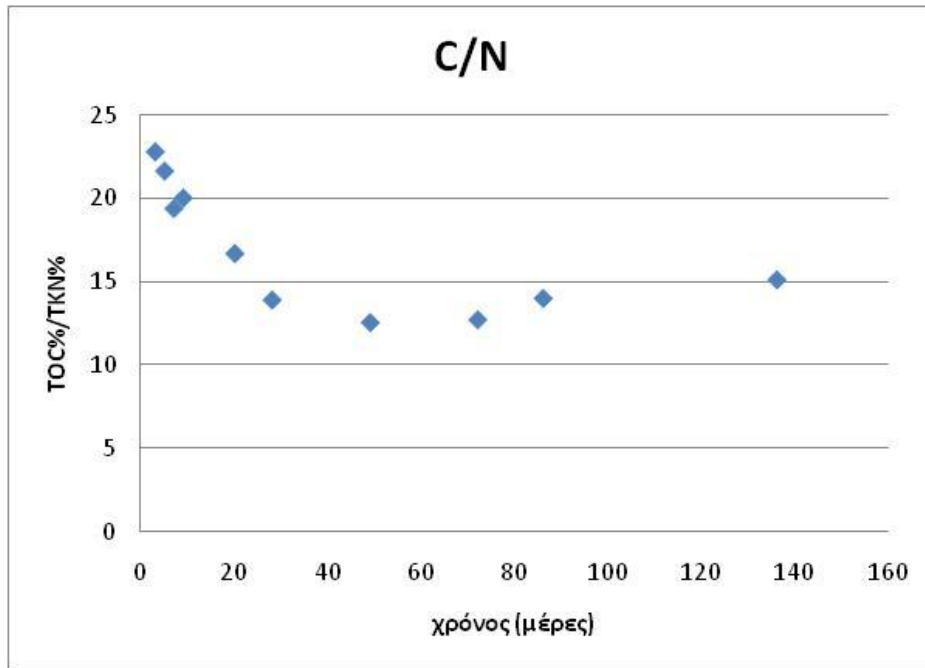
Ο λόγος άνθρακα-αζώτου είναι μια κρίσιμη παράμετρος καθώς υποδεικνύει την καταλληλότητα της πρώτης ύλης ως προς την αποικοδομησιμότητα της. Το άζωτο είναι δομικό στοιχείο ενώ ο άνθρακας παρέχει ενέργεια. Η ιδανική αναλογία C/N είναι 25-30 (Neugebauer et al. 2017, Cerda et al. 2017) αλλά έχουν παρατηρηθεί καλά αποτελέσματα με τιμές C/N μεταξύ 20-40 (Cerda et al. 2017). Το κομπόστ ως τελικό προϊόν συνήθως έχει λόγο C/N 10-15 και δείχνει καλή διατήρηση αζώτου και υψηλή αξία ως λίπασμα (Vazquez et al. 2017). Αποδεκτές τιμές είναι C/N<20 και προτεινόμενες C/N<10 (Bernal et al. 2009).

#### κομποστοποίηση μικρής κλίμακας

Ένας από τους στόχους της παρούσας διπλωματικής ήταν η βελτιστοποίηση του λόγου C/N στην κομποστοποίηση μικρής κλίμακας, συγκεκριμένα ο στόχος ήταν C/N=25. Σε προηγούμενες διπλωματικές εργασίες η κομποστοποίηση του FORBI σε οικιακό κομποστοποιητή έδειξε καλά αποτελέσματα αλλά ο λόγος C/N του τελικού προϊόντος ήταν χαμηλός, για αυτό επιχειρήθηκε κατάλληλη ανάμιξη των πρώτων υλών με συνυπολογισμό της υγρασίας τους έτσι ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή αναλογία άνθρακα-αζώτου. Αρχικά υπολογίστηκε το TKN και το TOC των πρώτων υλών και η υγρασία τους, με βάση αυτά τα στοιχεία και την επιθυμητή αναλογία C/N υπολογίστηκε το ποσοστό της κάθε πρώτης ύλης και κατά συνέπεια η ποσότητα τους κατά ξηρή βάση στον κομποστοποιητή.

Πίνακας 12 C/N αρχικών υλικών

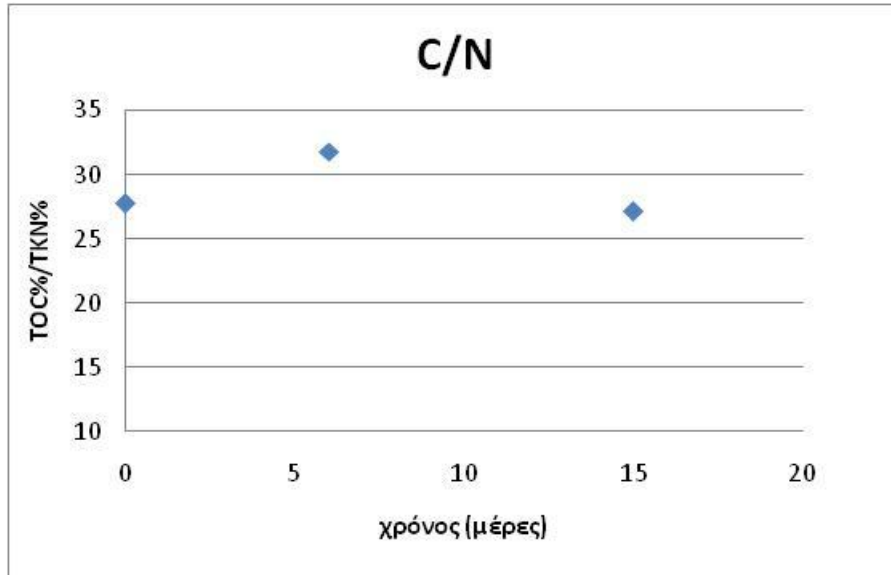
material	TKN% d.w.	TOC % d.w.	Percentage d.w.	C/N
FORBI	2.3	55.55	49	24.2
grass	2.39	54.51	6	22.8
prunings	1.77	53.04	45	29.9



Διάγραμμα 16 λόγος άνθρακα/αζώτου μικρής κλίμακας

Φαίνεται απότομη πτώση του λόγου C/N ξεκινώντας από 22.7 και έπειτα σταθεροποίηση στο 15, η τελική τιμή είναι ικανοποιητική για εδαφοβελτιωτικό και υποδεικνύει ομαλή διεργασία.

κομποστοποίηση μεγάλης κλίμακας



Διάγραμμα 17 λόγος άνθρακα/αζώτου μεγάλης κλίμακας

Ο αρχικός λόγος C/N είναι 27.7 και είναι μέσα στα όρια της ιδανικής αναλογίας άνθρακα/αζώτου.

#### 4.9 Φυτοτοξικότητα - Germination index

Επιλέχθηκε το κάρδαμο (*Lepidium sativum*) καθώς έχει τη μεγαλύτερη ευαισθησία στα περισσότερα είδη αποβλήτων συμπεριλαμβανομένων και των τροφικών υπολειμμάτων. Αιτίες φυτοτοξικότητας μπορεί να είναι πολύ υψηλή ή χαμηλή αναλογία C/N, υψηλά διαλυμένα άλατα (EC), οργανικά οξέα, αμμωνία και βαρέα μέταλλα αλλά οι πιο σημαντικοί παράγοντες που συνδέονται με την αύξηση της φυτοτοξικότητας είναι οι  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , Cu, και Zn, αντίθετα η αύξηση της συγκέντρωσης των νιτρικών μειώνει τη φυτοτοξικότητα (Τίγκια 2010).

Οι Muscolo et al. (2018) χρησιμοποίησαν *Cucumis Sativus* για τον υπολογισμό του G.I. με παραμονή 6 μερών, οι αραιώσεις 25, 50% είχαν  $\text{GI}>80\%$  οπότε θεωρήθηκε φυτοθρεπτικό.

Η Τίγκια (2010) με *Lepticum sativum*, αναλογία 1:10 w/v, ανάδευση 1 ώρα, διήθηση και παραμονή για 5 μέρες είχε μη φυτοτοξικό κομπόστ με τιμές  $80<\text{G.I.}<100$ .

Οι Cui et al. (2017) με cabbage seeds, αναλογία 1:10 w/v, παραμονή για 3 μέρες, προσδιόρισαν το G.I., έφτασε το 110% και παρέμεινε σταθερό. Θεωρητικά εάν το κομπόστ έχει  $\text{G.I.}<100$  είναι φυτοτοξικό αλλά στην πράξη  $\text{G.I.}>50$  υποδεικνύει σχετικά ώριμο κομπόστ. Προτείνουν την παρακάτω κατηγοριοποίηση ανάλογα με το δείκτη G.I.

Πίνακας 13 Κατηγοριοποίηση με βάση τη φυτοτοξικότητα (Cui et al. 2017)

Grade	Germination Index %	toxicity	application
IV	<50	high	Cannot be applied
III	50-60	medium	For improvement of poor soils
II	65-80	low	Long-term nutrient releasing
I	>80	-	Accelerating germination

Ο Μαργαρίτης (2012) χρησιμοποίησε σπόρους μαρουλιού, σε αναλογία 1:10 w/v με ανάδευση 30 λεπτών και παραμονή 5 μέρες,  $\text{G.I.}>66$  θεωρείται μη φυτοτοξικό.

0 < Δ.Β. < 25 → πολύ φυτοτοξικό
26 < Δ.Β. < 65 → φυτοτοξικό
66 < Δ.Β. < 100 → μή φυτοτοξικό
Δ.Β. > 101 → φυτοδιέγερση – φυτοθρεπτικό

Σχήμα 8 φυτοτοξικότητα ανάλογα με το δείκτη βλάστησης (Μαργαρίτης 2012)

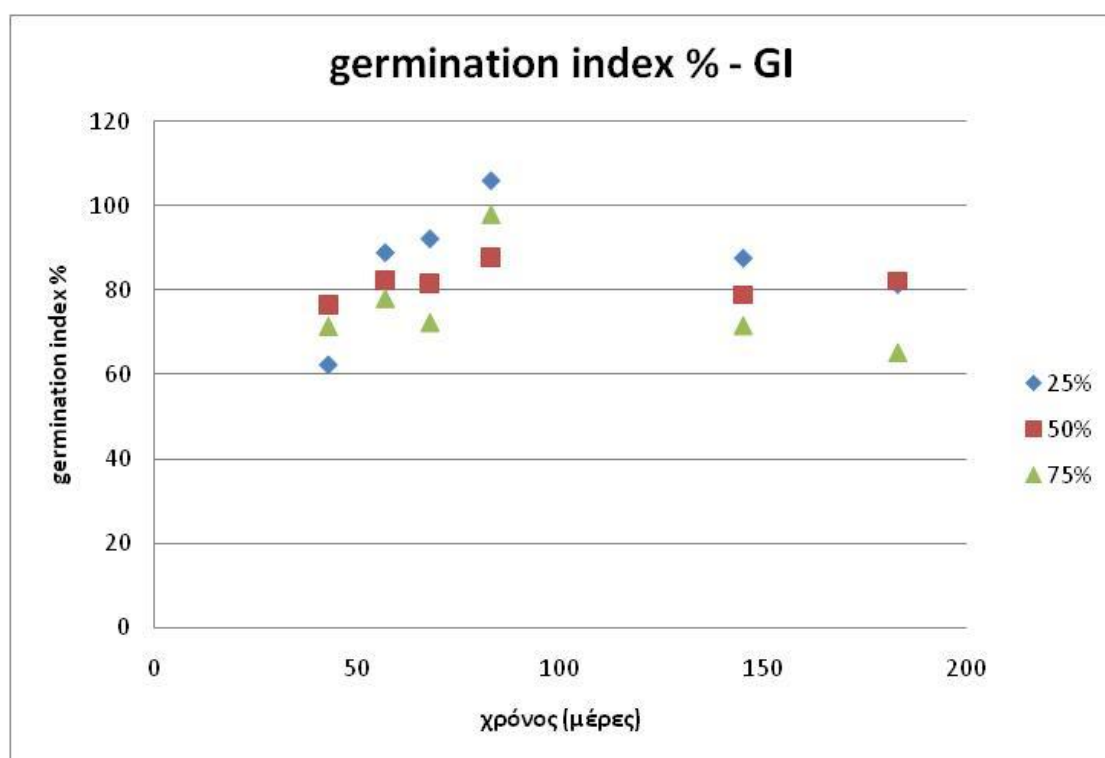
### κομποστοποίηση μικρής κλίμακας

Πίνακας 14 φυτοτοξικότητα κομπόστ μικρής κλίμακας

day	Λόγος αραίωσης %	Germinationindex %
184	25	48.26
	50	45.85
	75	42.62

Το κομπόστ μικρής κλίμακας αποδείχτηκε φυτοτοξικό με G.I.<50. Υπάρχουν πολλές αιτίες για τη φυτοτοξικότητα, στη συγκεκριμένη περίπτωση η πιο πιθανή αιτία είναι τα  $\text{NH}_4^+$  και η υψηλή αγωγιμότητα που παρουσιάστηκε στο τελευταίο στάδιο της κομποστοποίησης. Τα οργανικά οξέα θεωρητικά έχουν διασπαστεί στα αρχικά στάδια, η αναλογία C/N είναι φυσιολογική και η συγκέντρωση βαρέων μετάλλων στα προδιαλεγμένα τροφικά απορρίμματα είναι πολύ μικρή.

### κομποστοποίηση μεγάλης κλίμακας



Διάγραμμα 18 φυτοτοξικότητα κομπόστ μεγάλης κλίμακας

Παρατηρείται συσχέτιση της φυτοτοξικότητας με το βαθμό αραίωσης του υδατικού διαλύματος του κομπόστ, η αραίωση 25% εμφανίζει τα καλύτερα αποτελέσματα. Όμως αξίζει να σημειωθεί ότι την 83η μέρα η αραίωση 75% είχε G.I.=98 που θεωρείται υψηλή τιμή. Οι αυξομειώσεις στα τελευταία στάδια έχουν παρατηρηθεί και από τους Sánchez-Monedero et al. (2002) οι οποίοι παρατήρησαν G.I.>100 από την τρίτη βδομάδα κομποστοποίησης με αυξομειώσεις κάτω από το 100 την 6η και 10η βδομάδα. Συνολικά το κομπόστ θεωρείται μη-φυτοτοξικό.

#### 4.10 Χουμικά οξέα (humic acids)

Τα χουμικά οξέα είναι ένα μίγμα ασθενών αλειφατικών και αρωματικών οξέων που δεν είναι διαλυτά σε όξινες συνθήκες αλλά είναι σε βασικές, σε  $\text{pH} < 2$ . Έχουν μοριακό βάρος από 10.000-100.000 (Pettit)

Οι Veeken et al. (2000) βρήκαν ότι η απομόνωση των χουμικών με  $\text{NaOH}$  δεν είναι επιλεκτική καθώς απομονώθηκαν και άλλες ουσίες όπως φουλβικά οξέα και υδατάνθρακες. Για αυτό το λόγο προτείνουν ανάλυση της φύσεως των χουμικών ενώσεων εκτός από την ποσοτικοποίηση τους.

##### κομποστοποίηση μεγάλης κλίμακας

Πίνακας 15 Χουμικά οξέα στο κομπόστ μεγάλης κλίμακας

day	1st	83rd
humic acid %	10.42	18.59
Volatile solids%	91.27	74.45

Το περιεχόμενο του ώριμου κομπόστ σε χουμικά οξέα σε ξηρή βάση κυμαίνεται από 4-16% (Asing et al. 2009). Οι τιμές για την πρώτη μέρα 10.42% και για την 83η 18.59%, είναι υπερβολικά υψηλές. Αυτό που έχει νόημα είναι η σύγκριση τους, όχι η αναφορά τους ως μεμονωμένες τιμές. Παρατηρείται αύξηση των χουμικών οξέων με τον χρόνο κάτι που είναι αναμενόμενο εφόσον προχωράει η διαδικασία της χουμοποίησης. Επίσης παρατηρείται μείωση του πτητικού άνθρακα (ως Volatile Solids) με το χρόνο, ίσως λόγω σταθεροποίησης της δομής τους.



Εικόνα 10 Χουμικά οξέα

Αριστερά φαίνεται το φιλτράκι από την 1η μέρα και δεξιά από την 83η.

Οι Roletto et al. (1985) βρήκαν υψηλότερες τιμές χουμικών οξέων με διαλύτη το  $\text{NaOH}$  σε σχέση με άλλους διαλύτες. Η διαφορά ήταν πιο έντονη στα αρχικά στάδια της κομποστοποίησης και μπορεί να οφείλεται στην διαλυτοποίηση ουσιών (resins, waxes που υπάρχουν στα κλαδέματα) στο  $\text{NaOH}$ . Επίσης παρατήρησαν ότι η κατά τη διάρκεια της διεργασίας, οι χουμικές ενώσεις με μεγάλο μοριακό βάρος  $>10.000$  αυξήθηκαν.

#### 4.11 Τελικό προϊόν



Εικόνα 11 κομπόστ μικρής κλίμακας



Εικόνα 12 κομπόστ μεγάλης κλίμακας

Το τελικό προϊόν θα πρέπει να είναι σκούρο και να μην εμφανίζονται οργανικά υλικά εκτός από ξυλώδη υλικά (ΕΠΠΕΡΑΑ 2014). Επίσης όταν βρέχεται θα πρέπει να έχει οσμή ευχάριστη που παραπέμπει σε χώμα μετά από βροχή.

Όπως φαίνεται και τα δύο κομπόστ έχουν σκούρο χρώμα, ίσως το μεγάλης κλίμακας είναι πιο σκούρο. Η οσμή και η όψη τους παραπέμπουν σε χώμα όπως θα έπρεπε. Εκτός από τα κλαδιά δεν διακρίνεται άλλη οργανική ύλη.

#### 4.12 Χαρακτηρισμός προϊόντος

Η νομοθεσία επιβάλλει χαρακτηρισμό του τελικού προϊόντος από διαπιστευμένο εργαστήριο. Το δείγμα ήταν 2\*0,5 kg από το κομπόστ μεγάλης κλίμακας από την ημερομηνία 26/3/19 (day 183).

Πίνακας 16 Μετρήσεις κομπόστ μεγάλης κλίμακας από διαπιστευμένο εργαστήριο

α/α	Παράμετρος	Αποτέλεσμα	RL	Κωδ. Μεθόδου	Μέθοδος
1	pH (1%w/v)	9,34 / 25 <sup>0</sup> C	--	M90/F7	ISO 10390
2	Υγρασία (%w/w)	13,64	0,1	M39/F7	EN 12048
3	Οργανική ουσία (%w/w)	64,8	0,2	M89/F7	AOAC 967.05
4	Άζωτο N (%w/w)	2,63	0,10	M01/F7	Reg. 2003/2003/EC M.2.3
5	Φώσφορος %P2O5 (w/w)	0,71	0,01	M08/F7/ΔM	EN 15956 & EN 1595
6	Κάλιο %K2O (w/w)	1,79	0,01	M13/F7/ΔM	Εσωτ. μεθ. φλογοφωτομετρική βασισμένη στον Καν. 2003/2003/EE, M4.1
7	Escherichia coli (cfu/g)	<10	--	M101/F7	ISO 16649-1
8	Salmonella σε 25g (παρουσία/απουσία)	Απουσία	--	M103/F7	ISO 6579
9	Faecal coliforms (cfu /g)	<10	--	M102/F7	ISO 4831:2006
10	Enterobacteriaceae(cfu /g)	<10	--	M105/F7	ISO 21528-1:2017

Οι τιμές pH, υγρασίας και αζώτου είναι κοντά σε αυτές που υπολογίστηκαν στο εργαστήριο Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας ( pH=9.28, υγρασία=15.7%, άζωτο=3.07%).

Πίνακας 17 Θρεπτικά συστατικά κομπόστ (Βαλκανός 1992)

Παράμετρος	Περιεκτικότητα%
Οργανικά υλικά	25-50
Άνθρακας	8-50
Άζωτο (σαν N <sub>2</sub> )	0,4-3,5
Φώσφορος (σαν P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0,3-3,5
Κάλιο (σαν K <sub>2</sub> O)	0,5-1,8
Ασβέστιο σαν CaO	1,5-7,0

Το κομπόστ της μεγάλης κλίμακας έχει καλά ποσοστά θρεπτικών συστατικών (N,P,K) και είναι πλούσιο σε οργανική ουσία. Έχει υγρασία 13.6% και pH 9.34. Επιπλέον είναι απαλλαγμένο από παθογόνους μικροοργανισμούς.



**Πίνακας 18 Προδιαγραφές κομπόστ (ECN 2014)**

	Parameter	Assessment
Soil improvement	Organic matter	≥ 15 %, declaration
	Alcaline effective materials (CaO)	Declaration
Fertilisation	Nutrients (N, P, K, Mg, S)	Declaration
Material propertties	Plant compatibility	Benchmark accord. to the test on gemminable plants, declaration
	Water content	Benchmark for peak content, declaration
	Bulk density/volume weight	Declaration
	Grain size	Declaration
	pH-value	Declaration
	Electric conductivity	Declaration

**Πίνακας 19 Προδιαγραφές κομπόστ για βαρέα μέταλλα και παθογόνα (ECN 2014)**

	Parameter	Assessment
Hygienic aspects	Salmonellae	0 in 25 g DM
Undesired ingredients	Impurities (glass, metals, plastics)	≤ 0.5 % DM
	Weed seeds	≤ 2 per litre
Harmful matter Precautional limit values <sup>1)</sup>	<b>Heavy metals</b>	<b>mg / kg DM</b>
	Lead (Pb)	130
	Cadmium (Cd)	1.3
	Chromium (Cr)	60
	Copper (Cu) <sup>2)</sup>	300 <sup>3)</sup>
	Nickel (Ni)	40
	Mercury (Hg)	0.45
	Zinc (Zn) <sup>2)</sup>	600 <sup>3)</sup>
<sup>1)</sup> Amlinger, F. et al. 2004: Heavy metals and organic compounds in waste used as organic fertilisers. <sup>2)</sup> Copper and zinc are classified as essential nutrients. Values over 110 mg Cu kg <sup>-1</sup> DM and over 400 mg Zn kg <sup>-1</sup> DM must be declared. <sup>3)</sup> These values are classified as benchmarks		

Πίνακας 20 Προδιαγραφές κομπόστ (ΕΠΠΕΡΑΑ 2014)

Παράμετρος	Εδαφοβελτιωτικά/ Λιπίσματα, (Αποφάσεις 2006/799 & 2007/64 για το EcoLabel) <sup>2</sup>	Σχ έδιο Οδηγίας για τα Βιοσπόβλητα (2 <sup>nd</sup> draft) (τιμές κανονικοποιημένες για περιεχόμενη οργανική ουσία 30%)	ΚΥΑ 114218
------------	---	---	------------

		Κλάση 1	Κλάση 2	Σταθεροποιημένα Βιοσπόβλητα	
Cd (mg/kg dm)	1	0,7	1,5	5	10
Cr (mg/kg dm)	100	100	150	600	510
Cu (mg/kg dm)	100	100	150	600	500
Hg (mg/kg dm)	1	0,5	1	5	5
Ni (mg/kg dm)	50	50	75	150	200
Pb (mg/kg dm)	100	100	150	500	500
Zn (mg/kg dm)	300	200	400	1500	2000
As (mg/kg dm)	10	-	-	-	15
Mo (mg/kg dm)	2	-	-	-	-
Se (mg/kg dm)	1,5	-	-	-	-
F (mg/kg dm)	200	-	-	-	-
Salmonella	Απουσία στα 25g	Δες παρακάτω σχετικά με παραρτ. II του εγγράφου			-
Helminth Ova	Απουσία στα 1,5g	-	-	-	-
E. Coli (MPN)	<1000/g	-	-	-	0
PCB's (mg/kg)	-	-	-	0,4	-
PAHs (mg/kg)	-	-	-	3	-
Φυσικοί ρυπαντές > 2mm (ξ.β.)	<0,5%*	<0,5%	-	<3%	-
Πέτρες, χαλίκι > 5mm	-	<5%	<5%	-	-
Πλαστικό (% ξ.β.)	-	-	-	-	<0,3
Γυαλί (%ξ.β.)	-	-	-	-	<0,5
Υγρασία (%)	<75	-	-	-	<40
Οργανική Ουσία (%ξ.β.)	≥20	-	-	-	-
Total N (%)	≤3 (organic N ≥ 80%)	-	-	-	-
Electrical Conductivity, dS/m	<1,5 (applies to growing media)	-	-	-	-
Κοκκομετρική διαβάθμιση για το 90% κατά βάρος	-	-	-	-	<10 mm

\* τήλαστικό, γυαλί, μέταλλο, ξ.β.

Υγειονομικές απαιτήσεις για βιοαπόβλητα (κλάση 1, κλάση 2, σταθεροποιημένα βιοαπόβλητα)- συμπλήρωμα του πίνακα 20:

- Θερμοκρασία >55°C για δύο εβδομάδες ή >65°C για μια εβδομάδα, σε σειράδια με τουλάχιστον δύο αναδεύσεις σε αυτό το διάστημα.
- καθημερινή παρακολούθηση των κρίσιμων παραμέτρων (θερμοκρασία, υγρασία, συχνότητα ανάμιξης κατά τη διάρκεια της φάσης εξυγίανσης
- απουσία σαλμονέλας σε 25 g δείγματος, απουσία *Clostridium perfringens* σε 1 g, λιγότερο από 3 σπόροι ζιζανίων ανά λίτρο προϊόντος.

Οι πιο σημαντικές προδιαγραφές αφορούν τους παθογόνους μικροοργανισμούς και τα βαρέα μέταλλα. Αν το προϊόν δεν τις πληροί δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο έδαφος. Όσον αφορά τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά απαιτείται δήλωση τους (θρεπτικά συστατικά, υγρασία, pH, αγωγιμότητα κ.α.). Ανάλογα με τις τιμές των χαρακτηριστικών του, το προϊόν θεωρείται κατάλληλο για συγκεκριμένες χρήσεις από μέσο ανάπτυξης σπόρων μέχρι κάλυψη ΧΥΤΑ.

Όσον αφορά τα βαρέα μέταλλα, το FORBI είχε ελεγχθεί και παρουσίασε τιμές μέσα στα επιτρεπτά όρια, κάτι που εξηγείται από το γεγονός ότι τα τροφικά υπολείμματα είναι προδιαλεγμένα. Αυτό είναι και ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της διαλογής στην πηγή.

Συνολικά το κομπόστ μεγάλης κλίμακας από τον Ορχομενό πληροί τις υγειονομικές προϋποθέσεις, έχει καλή αναλογία αζώτου-φωσφόρου-καλίου και είναι πλούσιο σε οργανική ύλη.

## 5. Συμπεράσματα

Με βάση τα διαγράμματα θερμοκρασίας-χρόνου και τα δύο πειράματα εξελίχθηκαν ομαλά, με θερμοφιλή, μεσόφιλη και φάση ωρίμανσης. Το πείραμα μεγάλης κλίμακας κράτησε για πολύ μεγαλύτερο διάστημα την υψηλή θερμοκρασία δηλαδή αποδείχθηκε πιο αποδοτικό στην απολύμανση και στην αποδόμηση της οργανικής ύλης. Κανένα από τα δύο πειράματα δεν εμφάνισε στραγγίσματα και δυσάρεστες οσμές κάτι που υποδεικνύει σωστά επίπεδα υγρασίας, σωστή αναλογία C/N και συχνότητα ανάδευσης.

Τα υπολείμματα τροφίμων και τα κλαδέματα αποδείχθηκαν καλά υποστρώματα κομποστοποίησης. Επειδή είναι σχετικά καθαρά υλικά, δηλαδή δεν περιέχουν ρυπαντές όπως βαρέα μέταλλα και συνθετικές οργανικές ενώσεις, μπορεί αντίστοιχα να παραχθεί από αυτά προϊόν κομποστοποίησης που δεν έχει ανεπιθύμητους ρυπαντές.

Η διαλογή στην πηγή των τροφικών υπολειμμάτων αποδείχθηκε πολύ σημαντική στην παραγωγή ενός προϊόντος που δεν έχει ξένες προσμίξεις (γυαλιά, πλαστικά κ.α.) και έχει ευρέα γκάμα χρήσεων.

Το βασικό συμπέρασμα είναι ότι το scaleup της κομποστοποίησης ήταν επιτυχημένο, δηλαδή η κομποστοποίηση με αναλογία 1:1 FORBI-κλαδέματα μπορεί να εφαρμοστεί σε μεγάλη κλίμακα και να παραχθεί κομπόστ καλής ποιότητας.

Η πτώση και άνοδος της θερμοκρασίας στα αρχικά στάδια της κομποστοποίησης μεγάλης κλίμακας οφειλόταν στην έλλειψη υγρασίας. Με την προσθήκη νερού η διεργασία συνεχιζόταν κανονικά. Μάλιστα το προϊόν που παράχθηκε με χαμηλότερη υγρασία δεν ήταν φυτοτοξικό, ενώ αυτό που παράχθηκε με σταθερή υψηλή υγρασία ήταν φυτοτοξικό. Όμως δεν έχει εξακριβωθεί η αιτία φυτοτοξικότητας του κομπόστ μικρής κλίμακας.

## 6. Προτάσεις

Περαιτέρω ανάλυση των χουμικών ενώσεων, αμμωνιακών και νιτρικών ιόντων σε δείγματα κομπόστ. Εξέταση πιθανών αιτιών φυτοτοξικότητας και συσχέτιση τους με τους λειτουργικούς παράγοντες της διεργασίας και την πρώτη ύλη. Εξέταση του μικροβιολογικού προφίλ του κομπόστ και ταυτοποίηση των μικροοργανισμών που καταστέλλουν τους φυτοπαθογόνους.

## 7. Βιβλιογραφία

- Adhikari Bijaya K., Barrington Suzelle, Martinez Jose, King Susan,(2009).«Effectiveness of three bulking agents for food waste composting», *Waste Management*, vol.29, pages 197-203.
- Asing J., Wong N.C., Lau S., (2009).«Optimization of extraction method and characterization of humic acid derived from coals and composts», *J. Trop. Agric and F.Sc.* vol. 37, pages 211-223.
- Baglieri A. , Ioppolo A. , Negre M., Gennari M.,(2007). «A method for isolating soil organic matter after the extraction of humic and fulvic acids», *Organic Geochemistry* vol. 38, pages 140–150
- Bartosch S., Hartwig C., Spieck E., Bock E., (2002). «Immunological Detection of Nitrospora-like Bacteria in Various Soils», *Microbial Ecology* vol. 43, pages 26-33.
- Beffa Trello, Blanc Michael, Aragno Michael, (1996). «Obligately and facultatively autotrophic, sulfur- and hydrogen-oxidising thermophilic bacteria isolated from hot composts» *Archive Microbiology* vol. 165, pages 34-40, Springer-Verlag.
- Bernal M.P., Albuquerque J.A., Moral R.,(2009). «Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review», *Bioresource Technology* vol. 100, pages 5444–5453
- Bertoldi M. de, Vallini G., Pera A., (1983). «THE BIOLOGY OF COMPOSTING: A REVIEW», *Waste Management & Research*, vol. 1, pages 157-176
- Bess V. (1999)« Evaluating microbiology of compost». *Biocycle* vol. 40, pages 62-64.
- Brinton F. William, (2000),COMPOST QUALITY STANDARDS AND GUIDELINES, New York State Association of Recyclers
- Buchi, (2013). Application Note No. 124/2013, Nitrogen Determination in Soil
- California Department of Food and Agriculture, 2009, Humic acid method.
- Cerda Alejandra, Artola Adriana, Font Xavier, Barrena Raquel, Gea Teresa, Sánchez Antoni, (2017). «Composting of food wastes: Status and challenges», *Bioresource Technology* vol. 248 ,pages57–67
- Chefetz, Chen & Hadar, (1998) «Purification and Characterization of Laccase from *Chaetomium thermophilum* and Its Role in Humification», In *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 64, pages 3175-3179
- Clarholm Marianne, Bonkowski Michael, Griffiths Bryan, (2007), «Protozoa and Other Protista in Soil» In *Modern Soil Microbiology*, van Elsas J.D., Trevors J.T., Wellington E.M.H, Publisher Marcel Dekker, Amsterdam, pages 148-173.
- Cohen Roni, Hadar Yitzhak, (2001). «The roles of fungi in agricultural waste conversion» in *Fungi in Bioremediation*, G.M. Gadd, Cambridge university Press, chapter 11, pages 323-327.

- Cui Hong-Yang, Zhao Yue, Chen Yan-Ni, Zhang Xu, Wang Xue-Qin, Lu Qian, Jia Li-Ming, Wei Zi-Min, (2017). «Assessment of phytotoxicity grade during composting based on EEM/PARAFAC combined with projection pursuit regression», *Journal of Hazardous Materials* vol. 326 , 10–17
- Curtin Denis, Campbell C.A. (2008). «Mineralizable Nitrogen» In *Soil Sampling and Methods of Analysis-Second Edition*, Carter M.R., Gregorich E.G., Canadian Society of Soil Science, chapter 46, pages 599-605
- Diaz L., Savage G. M., Golueke C. G., (1994). «Composting of Municipal Solid Wastes» in *Handbook of solid waste management*, Frank Keith, McGraw-Hill Inc, Chapter 10, pages 10.3-10.15
- Dix Neville J., Webster John, (1995). «Fungal Ecology», Chapman & Hall.
- Drury C.F., S.C. Hart, Yang X.M. (2008). «Nitrification Techniques for soils». In *Soil Sampling and Methods of Analysis-Second Edition*, Carter M.R., Gregorich E.G., Canadian Society of Soil Science, chapter 38, pages 495-511.
- Environmental Protection Agency,2001, «method 1684: Total, Fixed and Volatile Solids in Water, Solids and Biosolids».
- Epstein Eliot (2003). «Land Application of Sewage Sludge and Biosolids», Lewis Publishers, chapter 3.
- European Compost Network, 2014, European Quality Scheme for compost and digestate.
- European Composting Network, (2013). Good Practice Guide-How to comply with the EU Animal By-products Regulations at Composting and Anaerobic Digestion Plants
- Evans Gareth M., Furlong Judith C.,(2003). «Environmental Biotechnology Theory and Application», John Wiley & Sons, LTD, chapter 8, pages 183-192
- Franke-Whittle Ingrid H., Confalonieri Alberto, Insam Heribert, Schlegelmilch Mirko, Korner Ina, (2014). «Changes in the microbial communities during co-composting of digestates», *Waste Management*, vol. 34, 632-641
- Hadar and Gorodecki, (1991). «Suppression of germination of sclerotia of *Sclerotium rolfsii* in compost» *Soil Biology and Biochemistry* vol. 23, pages 303-306.
- Haug Roger T., Kuchenrither Richard, Oerke David, Prakasam Tata B.S., Soszynski Stanley, Zenz David, (1992). «Sludge Processing Technology», in *Municipal Sewage Sludge Management: Processing, Utilization and Disposal*, Cecil Lue-Hing, David R. Zenz, Richard Kuchenrither, Technomic Publishing Co., Inc., pages 269-277.
- <http://meteosearch.meteo.gr/>
- <http://reports.weforum.org/toward-the-circular-economy-accelerating-the-scale-up-across-global-supply-chains/from-linear-to-circular-accelerating-a-proven-concept/> (W.E.F.)
- [http://www.wwf.gr/images/pdfs/fact\\_sheet\\_sterea\\_apovlita.pdf](http://www.wwf.gr/images/pdfs/fact_sheet_sterea_apovlita.pdf) (Διαχείριση Απορριμμάτων στην Ελλάδα, World Wildlife Fund Ελλάδας- W.W.F. Greece)

<https://ec.europa.eu/eurostat>

<https://plusgreen.wordpress.com/2015/09/13/solid-waste-management-with-source-separation-is-important/>

<https://www.biocycle.net/2014/01/20/county-yard-trimmings-facility-achieves-ems-certification/>

Insam H., Bertoldi M. de (2007), «Microbiology of the composting process», in *Compost Science and Technology*, Diaz L F, de Bertoldi M., Bidlingmaier W., Golueke C., Elsevier Waste Management Series vol. 8, pages 25-48.

Kong Zhijian, Wang Xuanqing, Liu Qiumei, Li Tuo, Chen Xing, Chai Lifang, Liu Dongyang, Shen Qirong, (2017). «Evolution of various fractions during the windrow composting of chicken manure with rice chaff», *Journal of Environmental Management*, vol.207,366-377

Kützner Hans Jurgen, (2000) «Microbiology of Composting» In *Biotechnology: Environmental Processes III*, Vol. 11, Second edition, Rehm H.j., Reed G., Puhler A., Stadler P., Wiley, pages 36-90.

Kwok O. C. H., Fahy P.C., Hoitink H.A.J. and Kuter G.A. 1987. «Interaction between bacteria and *Trichoderma hamatum* in suppression of Rhizoctonia damping-off in bark compost media». *Phytopathology* vol. 77, pages 1206-1212.

Lamar Richard T., Olk Daniel C., Mayhew Lawrence, Bloom Paul R., (2014). «A New Standardized Method for Quantification of Humic and Fulvic Acids in Humic Ores and Commercial Products» *Journal of AOAC International* Vol. 97, No. 3

Luo Yuan,Liang Jie, Zeng Guangming, Chen Ming, Mo Dan, Li Guoxue and Zhang Difang, (2017). «Seed germination test for toxicity evaluation of compost: Its roles, problems and prospects», *Waste Management*, vol. 71, pages 109–114

Manahan Stanley E.,(1994). «Environmental Chemistry», sixth edition, Lewis Publishers, chapter 15, 16

McLaren R.G, Cameron K.C., (1996). «Soil Science-Sustainable production and environmental protection», Oxford university press.

Muscolo Adele, Papalia Teresa, Settineri Giovanna, Mallamaci Carmelo, (2018). « Are raw materials or composting conditions and time that most influence the maturity and/or quality of composts? Comparison of obtained composts on soil properties», *Journal of Cleaner Production*, vol. 195, pages 93-101

Neugebauer Maciej, Solowiej Piotr, (2017).«The use of green waste to overcome the difficulty in small-scale composting of organic household waste», *Journal of Cleaner Production*, vol. 156, pages 865-875.

Paul E.A. and Clark F.E., (1996). «Soil Microbiology and Biochemistry», Cambridge University Press.

Paulin R., O'Malley P., Department of Agriculture, Government of Western Australia

- Pettit Robert E., ORGANIC MATTER, HUMUS, HUMATE, HUMIC ACID, FULVIC ACID AND HUMIN: THEIR IMPORTANCE IN SOIL FERTILITY AND PLANT HEALTH, Texas A&M University
- Roletto E., Cerruti M., (1985). «Investigation on Humic Substances from Decomposition Spruce Bark», *Agricultural Wastes* vol.13, pages 137-148.
- Sánchez-Monedero M. A., Roig A., Paredes C., Bernal M.P., (2000). «Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixture», *Bioresource Technology*, vol. 78, pages 301-308
- Sánchez-Monedero M.A., Urpilainen S.T., Cabañas-Vargas D.D., Kamilaki A., Stentiford E.I., (2002). ASSESSING THE STABILITY AND MATURITY OF COMPOST AT LARGE-SCALE PLANTS, Researchgate
- Schleiss Konrad (2003). «Composting and Anaerobic Digestion», in *Municipal Solid Waste Management-strategies and technologies for sustainable solutions*, Christian Ludwig, Stefanie Hellweg, Samuel Stucki, Springer, pages 138-141.
- Schmidt Edwin L., (1982). «Nitrification in soil» in *Nitrogen in Agricultural soils*, Frank J. Stevenson, American Society of Agronomy Inc, Crop Science Society of America Inc, Soil Science Society of America Inc, pages 253-283.
- Stucki Samuel, Christan Ludwig, (2003) Introduction to *Municipal Solid Waste Management-strategies and technologies for sustainable solutions*, Christian Ludwig, Stefanie Hellweg, Samuel Stucki, Springer, pages 2-13.
- Tate, R.L. III, (1995), «Soil Microbiology», John Wiley & Sons, New York.
- Tiquia S.M., (2010). «Reduction of compost phytotoxicity during the process of decomposition», *Chemosphere*, vol. 79, pages 506-512.
- Tuomela Marja, Vikman M., Hatakka Annele, Itävaara M., (2000). «Biodegradation of Lignin in a Compost Environment: A Review», *Bioresource Technology* vol. 72, pages 169-183.
- Vázquez M.A., Soto M., (2017). «The efficiency of home composting programmes and compost quality», *Waste Management* vol. 64 ,pages 39–50
- Veeken Adrie, Nierop Klaas, de Wilde Vinnie, Hamelers Bert, (2000), «Characterisation of NaOH-extracted humic acids during composting of a biowaste», *Bioresource Technology* vol. 72, pages 33-41.

### **Ελληνικήβιβλιογραφία**

- Βαλκανάς Γεώργιος, (1992). «Ρύπανση περιβάλλοντος, επιστήμη και τεχνική αντιμετώπισης», εκδόσεις Παπαζήση.
- Βλυσίδης Α., Γρηγοροπούλου Ε., Λυμπεράτος Γ.,(2016). Περιβαλλοντική Μηχανική-Σημειώσεις Παραδόσεων, Ε.Μ.Π. Αθήνα.



Εθνικό Σχέδιο Διαχείρισης Αποβλήτων, Ιούνιος 2015.

Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Περιβάλλον και Αειφόρος Ανάπτυξη, Δεκέμβριος 2014. Οδηγός λειτουργίας ανοιχτών εγκαταστάσεων κομποστοποίησης (αερόβια επεξεργασία) προδιαλεγμένων βιοαποβλήτων.

Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Περιβάλλον και Αειφόρος Ανάπτυξη, Ιούλιος 2012. Οδηγός εφαρμογής προγραμμάτων Διαλογή στην Πηγή και συστημάτων διαχείρισης των βιοαποβλήτων.

Κόλλια ΠαναγιώτουΣ., (1993). «Απορρίμματα Αστικά-Βιομηχανικά», Αθήνα.

Λοϊζίδου Μαρία, (2006), «Στερεά Απόβλητα», ΕΜΠ

Λυμπεράτος Γεράσιμος, Βαγενάς Δημήτριος, (2012). «Διαχείριση Υγρών Αποβλήτων», Εκδόσεις Τζιόλα, κεφ 13.9

Μαργαρίτης Μάρκος «Αξιοποίηση του βιοαποδομήσιμου κλάσματος απορριμμάτων με χρήση πρότυπου συστήματος οικιακού τύπου», Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, 2012.

Παναγιωτακόπουλος Δημήτριος Χ. , (2007). «Βιώσιμη Διαχείριση Αστικών Στερεών Αποβλήτων», εκδόσεις Ζυγός.

Σγκούρη Σοφία, «Παραγωγή κόμποστ από ζυμώσιμα οικιακά απορρίμματα», διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα 2018».

Σοφιανίδης Δημήτρης, (2015). «Μέθοδοι Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων και επιχειρηματικές ευκαιρίες-Σύνταξη επιχειρηματικού σχεδίου κατασκευής μονάδας ανακύκλωσης λαμπτήρων», Μεταπτυχιακή εργασία, ΕΜΠ, ΟΠΑ.

Τερζής Ευάγγελος, (2008), Διαχείριση Απορριμμάτων-Οδηγός για το Περιβάλλον, WWF Ελλάς.

Υ.Α. Η.Π. 29407/3508/2002 (ΦΕΚΒ-1572/16-12-2002)

Υ.Α. οικ. 56366/4351/2014 (ΦΕΚ 3339/Β-2014)

## Παράρτημα

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι μύκητες που απομονώθηκαν από το οργανικό κλάσμα αστικών στερεών απορριμμάτων (60%) μαζί με λάσπη βιολογικού καθαρισμού (40%). Οι μεσοφιλικί απομονώθηκαν στους 28°C και οι θερμοφιλικί στους 50°C.

Πίνακας 21 μύκητες σε κομπόστ (Bertoldi et al. 1983)

Thermophilic				
<i>Absidia ramosa</i>				<i>Humicola lanuginosa</i>
<i>Allescheria terrestris</i>				<i>Lenzites</i> sp.
<i>Mucor pusillus</i>				<i>Penicillium duponti</i>
<i>Chaetomium thermophilum</i>				<i>Scytalidium thermophilum</i>
<i>Talaromyces thermophilis</i>				<i>Sporotrichum thermophile</i>
<i>Aspergillus fumigatus</i>				<i>Thermoascus aurantiacus</i>
<i>Humicola insolens</i>				<i>Micelia sterilia</i>
Mesophilic				
	Cellulolytic	Pectinolytic	Amilolytic	Ligninolytic
<b>Ascomycotina</b>				
<i>Allescheria terrestris</i>	+			+
<i>Chaetomium</i> sp.	+			
<i>Dasyscypha</i> sp.				+
<i>Emericella nidulans</i>			+	
<i>Mollisia</i> sp.				+
<i>Thermoascus aurantiacus</i>	+			+
<b>Basidiomycotina</b>				
<i>Armillaria mellea</i>	+			+
<i>Clitopilus insitus</i>	+			+
<i>Coprinus cinereus</i>	+			+
<i>Fomes</i> sp.	+			+
<i>Lentinus lepideus</i>				+
<i>Lenzites trabea</i>	+			+
<i>Pleurotus ostreatus</i>	+			+
<i>Polyporus versicolor</i>	+			+
<b>Deuteromycotina</b>				
<i>Alternaria tenuis</i>	+			
<i>Artrobotrys oligospora</i>	+			
<i>Aspergillus amstelodami</i>	+			
<i>Aspergillus</i> sp.	+			
<i>Botryotrichum pituliferum</i>	+			
<i>Cephalophora tropica</i>	+			
<i>Cephalosporiopsis alpina</i>	+			
<i>Cephalosporium</i> sp. 1	+	+	+	
<i>Cephalosporium</i> sp. 2	+	+	+	
<i>Cephalosporium</i> sp. 3	+			
<i>Cephalosporium</i> sp. 4	+			
<i>Cladosporium herbarum</i>	+		+	
<i>Doratomyces</i> sp.	+			
<i>Geotrichum candidum</i>	+		+	
<i>Gliocladium</i> sp.				+
<i>Gliomastox murorum</i>	+		+	
<i>Graphium</i> sp.			+	
<i>Harpographium</i> sp.			+	
<i>Leptographium lundbergii</i>	+		+	
<i>Paecilomyces</i> sp.	+			
	Cellulolytic	Pectinolytic	Amilolytic	Ligninolytic
<i>Penicillium</i> sp. 1	+			
<i>Penicillium</i> sp. 2	+		+	
<i>Phlyctaena</i> sp.			+	
<i>Rhinoctadiella artrovirens</i>	+			
<i>Scopulariopsis brevicaulis</i>	+			
<i>Scopulariopsis</i> sp.	+			
<i>Sporotrichum thermophile</i>	+			+
<i>Stachybotrys</i> sp.	+	+	+	
<i>Trichoderma viride</i>	+		+	

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα βακτήρια που συμμετέχουν στην κομποστοποίηση.

Πίνακας 22 Βακτήρια στην κομποστοποίηση (Insam et al. 2007)

Phylogenetic group	Genus species	Ecological relevance	Succession stage	Reference	
Proteobacteria	Alpha	<i>Pseudomonas putida</i> strain ATCC 11172	Pathogenic		Alfreider et al. (2002)
		<i>Pseudomonas</i> sp.			Miller (1996)
		<i>Methylosinus trichosporium</i>	Methanotrophic		Murrell et al. (1998)
		<i>Caulobacter</i> spp.		Early	Michel et al. (2002)
		<i>Erythrobacter longus</i>		Early	Michel et al. (2002)
	Beta	<i>Nitrospira briensis</i>	Nitrifier		Murell et al. (1998), Kowalchuk et al. (1999)
		<i>Nitrosomonas europaea</i>	Nitrifier		Murell et al. (1998), Kowalchuk et al. (1999)
		<i>Nitrosolobus multififormis</i>	Nitrifier	Middle	Michel et al. (2002)
	Gamma	<i>Escherichia coli</i>	Potential pathogen		Lott Fischer (1998)
		<i>Methylomonas methanica</i>	Methanotroph		Murrell et al. (1998)
		<i>Azotobacter chroococcum</i>	N-fixer	Late	Bess (1999)
		<i>Salmonella</i> sp.	Pathogenic		Lott Fischer (1998)
<i>Streptomyces rectus</i>				Miller (1996)	
<i>S. thermofusus</i>				Miller (1996)	
<i>S. violaceus-ruber</i>				Miller (1996)	
<i>S. thermoviolaceus</i>				Miller (1996)	
<i>Streptomyces</i> sp.				Miller (1996)	
<i>Nocardia</i> sp.				Miller (1996)	
<i>Microbispora bispora</i>			Thermophilic	Miller (1996)	
<i>Actinomadura</i> sp.			Thermophilic	Degli-Innocenti et al. (2002)	

Phylogenetic group	Genus species	Ecological relevance	Succession stage	Reference	
Gram-positive bacteria	Endospore-forming, low GC	<i>Bacillus stearothermophilus</i>	Classic thermophilic bacterium in composts	Various	
		<i>B. thermodenitrificans</i>	Thermophilic, denitrifier	Blanc et al. (1997)	
		<i>B. brevis</i>		Miller (1996)	
		<i>B. circulans</i>			
		<i>B. coagulans</i>			
		<i>B. sphaericus</i>			
		<i>B. subtilis</i>			
		<i>B. licheniformis</i>			
		<i>Bacillus</i> sp.	Potential pathogen	Lott Fischer (1998)	
		<i>Clostridium thermocellum</i>			
	<i>Clostridium</i> spp.	Some are N-fixers	Anaerobic	de Bertoldi et al. (1983)	
	<i>Klebsiella</i> sp.	N-fixation		de Bertoldi et al. (1983)	
	Actinomycetes	<i>Saccharomonospora viridis</i>	Pathogenic		Lott Fischer (1998)
		<i>Streptomyces thermovulgaris</i>	Pathogenic	Thermophilic	
<i>Actinobifida chromogena</i>				Miller (1996)	
<i>Thermoactinomyces vulgaris</i>			Thermophilic	Miller (1996)	
<i>Microspolyspora faeni</i>				Miller (1996)	
<i>Pseudonocardia thermophila</i>				Miller (1996)	
<i>Thermomonospora curvata</i>				Miller (1996)	
<i>Th. viridis</i>					
<i>Th. sacchari</i>					
Deinococcus/ Thermus group		<i>Thermus</i> sp. <i>Hydrogenobacter</i>		Thermophilic	Beffa et al. (1996)

<sup>1</sup>Comprehensive compilation of microorganisms in compost may be found in Ryckeboer et al. (2003).