



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ IV: ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ
ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΡΟΦΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΩΝ ΣΕ ΝΗΣΙΩΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΓΙΑ
ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΔΑΦΟΒΕΛΤΙΩΤΙΚΟΥ**

Γεωργία Αλεξάνδρα Κολαζά

Επιβλέπων

Καθηγητής ΕΜΠ Γεράσιμος Λυμπεράτος

- ΑΘΗΝΑ -
Σεπτέμβριος 2021

Ευχαριστίες

Η ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας σηματοδοτεί την περάτωση των προπτυχιακών σπουδών μου, καθ' όλη τη διάρκεια των οποίων γνώρισα πολλούς και ιδιαίτερους ανθρώπους που βοήθησαν στην εξέλιξη της προσωπικότητας και του χαρακτήρα μου, ενώ απέκτησα καίριες γνώσεις και αμέτρητες εμπειρίες που θα με καθοδηγούν στην μετέπειτα πορεία μου.

Κατά τη διάρκεια της φοίτησής μου έλαβα αμέριστη βοήθεια και υποστήριξη από πολλούς ανθρώπους, στους οποίους οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ.

Πρώτα από όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Γεράσιμο Λυμπεράτο, Καθηγητή ΕΜΠ και την κα. Κωνσταντίνα Παπαδοπούλου επιβλέπουσα της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν αναθέτοντάς μου το εν λόγω θέμα. Σε μια περίοδο όπου οι διαπροσωπικές επαφές, και άρα η εύρυθμη καθοδήγηση, ήταν τόσο δύσκολη όσο και περιορισμένη.

Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δημοσθένη Τσιβά, διδάκτορα της σχολής Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ, για τις γνώσεις που μου μετέδωσε, για τις συνεχείς συμβουλές του, αλλά και την επίλυση κάθε είδους απορίας που είχα προς την επιτυχημένη ολοκλήρωση της διπλωματικής μου.

Ακόμα, χρωστάω ένα ευχαριστώ προς τους διδάκτορες της σχολής Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ, του εργαστηρίου Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας, για το άψογο κλίμα συνεργασίας μεταξύ μας και για τις αμέτρητες συμβουλές και βοήθειες που μου προσέφεραν όλο το χρονικό διάστημα της παρουσίας μου στο εργαστήριο. Ονομαστικά αναφέρομαι στον Αχιλλέα Ζαρκαλίου, τον Χάρη Παυλόπουλο, τον Γεράσιμο Κανέλλο, τον Θεόφιλο Καμπερίδη και την Κωνσταντίνα Φιλίππου.

Εν συνεχεία, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους μου τους φίλους, οι οποίοι με στηρίζουν όλα αυτά τα χρόνια και με τους οποίους έχουμε μοιραστεί αμέτρητες όμορφες στιγμές, σκέψεις, ανησυχίες και ιδέες. Οι ώρες που βρεθήκαμε μαζί διαβάζοντας, συγγράφοντας εργασίες και συζητώντας επί παντός επιστητού είναι αμέτρητες. Αποτελούν ένα αναπόσπαστο κομμάτι των ιδιαίτερων αυτών φοιτητικών χρόνων και τους ευχαριστώ θερμά μέσα από την καρδιά μου.

Τέλος, θα ήθελα να πω ένα τεράστιο ευχαριστώ στην οικογένεια μου, τους γονείς μου, Αντώνη και Βούλα, και τα αδέρφια μου, Νίκο και Πέρσα, για την αδιάλειπτη στήριξη, τη συμπαράσταση, την υπομονή και την αγάπη που μου προσέφεραν απλόχερα κάθε στιγμή της φοιτητικής μου πορείας.

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια η διαχείριση των στερεών αποβλήτων έχει αποτελέσει ένα σημαντικό πρόβλημα εξαιτίας της συνεχόμενης αύξησης των απορριμμάτων. Για αυτό το λόγο η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θεσπίσει νέους νόμους σχετικά με τη διαχείριση τους, ένας εκ των οποίων αναφέρει πως πρέπει να μειωθεί το ποσοστό των οργανικών αποβλήτων που καταλήγουν στα ΧΥΤΑ. Στην Ελλάδα, το πρόβλημα αυτό επεκτείνεται σε μεγαλύτερο όμως βαθμό στις νησιωτικές περιοχές. Η Άνδρος, ένα νησί με υψηλή τουριστική κίνηση, εντάχθηκε στο πρόγραμμα SIRCLES ENI CBC MED με σκοπό την ολοκληρωμένη και αποτελεσματική διαχείριση των τροφικών υπολειμμάτων που παράγονται.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής είναι η διεξαγωγή μιας πιλοτικής μονάδας κομποστοποίησης, στην οποία ως πρώτες ύλες χρησιμοποιήθηκαν τροφικά υπολείμματα και κλαδέματα από το δήμο Χαλανδρίου. Η κομποστοποίηση είναι μία ελεγχόμενη βιολογική αποσύνθεση της οργανικής ύλης που πραγματοποιείται κάτω από αερόβιες συνθήκες με στόχο την παραγωγή σταθεροποιημένου υλικού. Από την διεργασία αυτή παράγεται διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), νερό και εκλύεται ένα μεγάλο ποσό θερμότητας. Το σημαντικότερο ρόλο στην κομποστοποίηση έχουν οι μικροοργανισμοί, που αποτελούνται από βακτήρια, μύκητες και ακτινομύκητες, και δρουν αναλόγως με τη φάση της διεργασίας. Στο τέλος, παράγεται ένα προϊόν απαλλαγμένο από παθογόνους μικροοργανισμούς που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό.

Καινοτομία στην παρούσα εργασία αποτέλεσε η 5ωρη ξήρανση και τεμαχισμός των τροφικών υπολειμμάτων, έναντι της 9ωρης ξήρανσης, με απώτερο σκοπό την εξοικονόμηση κατανάλωσης ρεύματος και νερού. Σε κάθε εγχείρημα που πραγματοποιείται σε μεγάλη κλίμακα είναι σημαντική η μείωση του κόστους με ταυτόχρονη παραγωγή ενός αξιόπιστου προϊόντος.

Οι σημαντικότεροι παράμετροι ελέγχου κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης είναι η μορφή και η ποιότητα του υποστρώματος, το ποσοστό υγρασίας, ο αερισμός, το pH και η αναλογία C/N. Για τον έλεγχο της διεργασίας διεξήχθησαν αναλύσεις, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν για χρονικό διάστημα 3 μηνών και βοήθησαν στην εξαγωγή συμπερασμάτων. Πραγματοποιήθηκαν δύο πειράματα, ένα με αναλογία 50 : 50 και ένα 75 : 25 τροφικών υπολειμμάτων και κλαδέματα αντίστοιχα. Σε οικιακό κομποστοποιητή, που τοποθετήθηκε έξω από το Εργαστήριο Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας, προστέθηκαν οι παραπάνω αναλογίες με συνολική μάζα 50 kg και στις δύο περιπτώσεις. Οι σωροί 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 ώστε να επανέλθει στα επιθυμητά επίπεδα, συγκεκριμένα σε

ποσοστό 50%. Η παρακολούθηση της θερμοκρασίας πραγματοποιήθηκε με ηλεκτρονικό θερμόμετρο σε καθημερινή βάση. Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για τον έλεγχο της διεργασίας είναι οι εξής : Θερμοκρασία, Υγρασία, pH, Ηλεκτρική Αγωγιμότητα, Πτητικά Στερεά, Ολικό Άζωτο κατά Kjeldahl, Ολικός Οργανικός Άνθρακας, Δείκτης Φυτοτοξικότητας, Χουμικά και Φουλβικά Οξέα.

Σύμφωνα με τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια των δύο κομποστοποιήσεων, όλα έδειξαν πως οι λειτουργικές παράμετροι κυμάνθηκαν στα επιθυμητά επίπεδα. Και στις δύο περιπτώσεις, το βιολογικά σταθεροποιημένο προϊόν μπορεί να διατεθεί στο χώμα ως μη φυτοτοξικό compost. Πιο συγκεκριμένα, η οργανική ύλη μειώθηκε, πράγμα το οποίο διαπιστώθηκε από την μείωση των πτητικών στερεών, του οργανικού άνθρακα και του λόγου C/N. Επιπλέον η θερμόφιλη φάση και στις δύο περιπτώσεις διήρκησε για χρονικό διάστημα το οποίο κρίνεται αρκετό ώστε να εξοντωθούν οι παθογόνοι μικροοργανισμοί. Το pH και η ηλεκτρική αγωγιμότητα αυξήθηκαν, ενώ κατά τις μετρήσεις του δείκτη φυτοτοξικότητας έδειξαν πως το παραγόμενο προϊόν μπορεί να εφαρμοστεί στο χώμα χωρίς καμία αρνητική επίπτωση.

Τέλος στην παρούσα διπλωματική έγινε προσπάθεια για προσομοίωση των πειραματικών δεδομένων στο πρόγραμμα Aquasim. Τα αποτελέσματα που διεξήχθησαν ήταν ικανοποιητικά και φάνηκαν να ακολουθούν το μοντέλο της κομποστοποίησης. Η εν λόγω προσομοίωση θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και σε άλλες διεργασίες κομποστοποίησης με σκοπό να βοηθήσει στο σχεδιασμό της.

Abstract

In recent years, solid waste management has become a major problem due to the continuous increase in waste. This is the reason why the European Union has enacted new laws on their management, one of which states that the percentage of organic waste that ends up in landfills must be reduced. In Greece, this problem extends to the island areas. Andros, an island with high tourist traffic, joined the program SIRCLES ENI CBC MED with the aim of integrated and efficient management of food waste generated.

The aim of this dissertation is to conduct a pilot composting unit, in which food waste and pruning from the municipality of Halandri were used as raw materials. Composting is a controlled biological decomposition of organic matter that takes place under aerobic conditions to produce stabilized material. This process produces carbon dioxide (CO₂), water and releases a large amount of heat. The most important role in composting is played by microorganisms, which consist of bacteria, fungi and actinomycetes, and act depending on the phase of the process. In the end, a product free of pathogenic microorganisms is produced that can be used as a soil amendment.

An innovation in the present work was the 5-hour drying and shredding of food waste, compared to the 9-hour drying, with the ultimate goal of saving electricity and water consumption. In any large-scale project, it is important to reduce costs while producing a reliable product.

The most important control parameters during the composting process are the shape and quality of the substrate, the moisture content, the aeration, the pH and the C/N ratio. To control the process, analyzes were transacted, which were performed for a period of 3 months and helped to draw conclusions. Two experiments were performed, one with a ratio of 50: 50 and one with a ratio of 75:25 of food residues and pruning respectively. To a home composter, placed outside the Organic Chemical Technology Laboratory, the above proportions with a total mass of 50 kg were added in both cases. The piles in both experiments were stirred daily with mechanical agitation to ensure the supply of oxygen to the microorganisms. Also, when the humidity was low, water was added to return it to the desired levels, specifically at a rate of 50%. Temperature monitoring was performed with an electronic thermometer on a daily basis. The measurements performed to control the process are: Temperature, Humidity, pH, Electrical Conductivity, Volatile Solids, Total Nitrogen by Kjeldahl, Total Organic Carbon, Phytotoxicity Index, Humic and Fulvic Acids.

According to the measurements made during the two composting processes, everything showed that the operating parameters ranged to the desired levels. In

both cases, the biologically stabilized product can be disposed of in the soil as a non-phytotoxic compost. More specifically, organic matter decreased, as evidenced by the reduction of volatile solids, organic carbon and the C / N ratio. In addition, the thermophilic phase in both cases lasted for a period of time which is considered long enough to kill pathogenic microorganisms. The pH and electrical conductivity increased, while during the measurements of the phytotoxicity index they showed that the produced product can be applied to the soil without any negative effects.

Finally, in this dissertation, an attempt was made to simulate the experimental data in the Aquasim program. The results performed were satisfactory and appeared to follow the composting model. This simulation could be used in other composting processes to help design it.

Πίνακας περιεχομένων

Ευχαριστίες.....	2
Περίληψη.....	3
Abstract.....	5
Περιεχόμενα Διαγραμμάτων.....	10
Περιεχόμενα Εικόνων.....	10
Περιεχόμενα Πινάκων.....	11
Κεφάλαιο 1ο : Εισαγωγή στη Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων.....	13
1.1. Στερεά Απόβλητα – Βασικοί Ορισμοί.....	13
1.2. Έννοια της Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων.....	13
1.3. Μέθοδοι Επεξεργασίας Στερεών Αποβλήτων.....	16
1.3.1. Ανακύκλωση και Ανάκτηση υλικών.....	16
1.3.2. Βιολογική Επεξεργασία.....	17
1.3.3. Θερμική Επεξεργασία.....	18
1.3.4. Χώροι Υγειονομική Ταφής Απορριμμάτων (Χ.Υ.Τ.Α.).....	19
1.4. Κυκλική Οικονομία.....	19
1.5. Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων σε νησιωτικές περιοχές.....	20
Κεφάλαιο 2ο : Κομποστοποίηση.....	25
2.1. Η διαδικασία της Κομποστοποίησης.....	25
2.2. Φάσεις Κομποστοποίησης.....	25
2.2.1. Μεσόφιλη Φάση – Φάση Υστέρησης.....	26
2.2.2. Θερμόφιλη Φάση – Ενεργός Φάση.....	26
2.2.3. Ψυχρόφιλη Φάση – Σταθεροποίηση.....	27
2.2.4. Φάση Ωρίμανσης.....	27
2.3. Μικροοργανισμοί.....	28
2.3.1. Βακτήρια.....	28
2.3.2. Μύκητες.....	29
2.3.3. Αρχαία.....	29
2.4. Μεταβολή της Οργανική Ύλης.....	31

2.4.1.	Άζωτο	31
2.4.2.	Άνθρακας	32
2.4.3.	Χουμικές ουσίες.....	33
2.5.	Παράμετροι Ελέγχου της Διεργασίας	34
2.5.1.	Θερμοκρασία	34
2.5.2.	Αερισμός	34
2.5.3.	Υγρασία	34
2.5.4.	pH	35
2.5.5.	Λόγος C/N	35
2.5.6.	Φυτοτοξικότητα	36
2.5.7.	Μέγεθος σωματιδίων	36
Κεφάλαιο 3ο :	Πειραματικό Μέρος.....	37
3.1.	Πρώτες Ύλες	37
3.1.1.	Υπολείμματα Τροφών.....	37
3.1.2.	Παράγοντας Διόγκωσης (Bulking Agent).....	37
3.2.	Διάταξη Κομποστοποίησης.....	38
3.2.1.	Αναλογία Τροφικών Υπολειμμάτων : Κλαδέμματα – 50:50 (Compost 1) 40	
3.2.2.	Αναλογία Τροφικών Υπολειμμάτων : Κλαδέμματα – 75:25 (Compost 2) 40	
3.3.	Μέθοδοι ανάλυσης.....	41
3.2.1	Διαχείριση δείγματος	42
3.2.2.	Μέτρηση Θερμοκρασίας (Temperature).....	42
3.2.3.	Προσδιορισμός Υγρασίας (Moisture)	42
3.2.4.	Προσδιορισμός Ολικών Στερεών (Total Solids – TS)	43
3.2.5.	Προσδιορισμός Πτητικών Στερεών (Volatile Solids – VS).....	44
3.2.6.	Προσδιορισμός pH.....	45
3.2.7.	Προσδιορισμός Αγωγιμότητας (Electrical Conductivity).....	45
3.2.8.	Προσδιορισμός Ολικού Αζώτου κατά Kjeldahl - TKN	45
3.2.9.	Προσδιορισμός Ολικού Οργανικού Άνθρακα – TOC.....	50
3.2.10.	Προσδιορισμό λόγου C/N	51

3.2.11.	Προσδιορισμός Φυτοτοξικότητας (Germination Index (GI)).....	51
3.2.12.	Προσδιορισμός Χουμικών και Φουβλικών Οξέων (Humic and Fulvic Acids) 53	
Κεφάλαιο 4ο :	Αποτελέσματα	55
4.1.	Οικονομική και Ενεργειακή Κατανάλωση	55
4.2.	Παράμετροι Ελέγχου.....	57
4.2.1.	Θερμοκρασία	57
4.2.2.	Υγρασία.....	59
4.2.3.	Πτητικά Στερεά	63
4.2.4.	pH.....	64
4.2.5.	Αγωγιμότητα.....	65
4.2.6.	Ολικό Άζωτο κατά Kjeldahl –TKN.....	67
4.2.7.	Ολικός Οργανικός Άνθρακας – TOC.....	69
4.2.8.	Λόγος C/N	71
4.2.9.	Φυτοτοξικότητα – Germination Index.....	72
4.2.10.	Χουμικά και Φουβλικά Οξέα (Humic and Fulvic Acids)	74
4.3.	Αξιολόγηση τελικού προϊόντος.....	75
4.3.1.	Compost 1	76
4.3.2.	Compost 2	78
Κεφάλαιο 5ο :	Μοντελοποίηση Κομποστοποίησης – Aquasim.....	80
5.1.	Περιγραφή Μοντέλου	80
5.1.1.	Μεταβλητές	80
5.1.2.	Σταθερές	81
5.1.3.	Ισοζύγια.....	82
5.2.	Αξιολόγηση αποτελεσμάτων του Aquasim.....	83
5.2.1.	Θερμοκρασία	83
5.2.2.	Πτητικά στερεά	84
5.2.3.	Ρυθμός Βιοαποδόμησης.....	86
Κεφάλαιο 6ο :	Συμπεράσματα και Προτάσεις	88
Βιβλιογραφία		90

Περιεχόμενα Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1 : Συνολική κατανάλωση ξηραντήρα.....	55
Διάγραμμα 2 : Διάγραμμα Θερμοκρασίας Compost 1.	58
Διάγραμμα 3 : Διάγραμμα Θερμοκρασίας Compost 2.	58
Διάγραμμα 4 : Διάγραμμα % Υγρασίας Compost 1.	60
Διάγραμμα 5 : Διάγραμμα Προσθήκης Νερού Compost 1.	61
Διάγραμμα 6 : Διάγραμμα % Υγρασίας Compost 2.	62
Διάγραμμα 7 : Διάγραμμα Προσθήκης Νερού Compost 2.	62
Διάγραμμα 8: Διάγραμμα % Πτητικών Στερεών Compost 1.....	63
Διάγραμμα 9 : Διάγραμμα % Πτητικών Στερεών Compost 2.....	64
Διάγραμμα 10 : Διάγραμμα pH Compost 1.....	65
Διάγραμμα 11 : Διάγραμμα pH Compost 2.....	65
Διάγραμμα 12 : Διάγραμμα Αγωγιμότητας Compost 1.	66
Διάγραμμα 13 : Διάγραμμα Αγωγιμότητας Compost 2.	67
Διάγραμμα 14 : Διάγραμμα Αζώτου (TKN) Compost 1.	68
Διάγραμμα 15 : Διάγραμμα Αζώτου (TKN) Compost 2.	69
Διάγραμμα 16 : Διάγραμμα Ολικού Οργανικού Άνθρακα (TOC) Compost 1.....	70
Διάγραμμα 17 : Διάγραμμα Ολικού Οργανικού Άνθρακα (TOC) Compost 2.....	70
Διάγραμμα 18 : Διάγραμμα C/N Compost 1.....	71
Διάγραμμα 19 : Διάγραμμα C/N Compost 2.	72
Διάγραμμα 20 : Διάγραμμα Θερμοκρασίας Compost 1 - Προσομοίωση Aquasim.	84
Διάγραμμα 21 : Διάγραμμα Θερμοκρασίας Compost 2 - Προσομοίωση Aquasim.	84
Διάγραμμα 22 : Διάγραμμα % Πτητικών Στερεών Compost 1 - Προσομοίωση Aquasim.....	85
Διάγραμμα 23: Διάγραμμα % Πτητικών Στερεών Compost 2 - Προσομοίωση Aquasim.	86
Διάγραμμα 24 : Διάγραμμα Ρυθμού Βιοαποδόμησης Compost 1 - Προσομοίωση Aquasim.	86
Διάγραμμα 25 : Διάγραμμα Ρυθμού Βιοαποδόμησης Compost 2 - Προσομοίωση Aquasim.	87

Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1 : Ιεράρχηση επιλογών για τη διαχείριση των στερεών αποβλήτων (Λυμπεράτος, 2018).....	14
Εικόνα 2 : Διάγραμμα διαχείρισης Στερεών αποβλήτων (Sabbas et al., 2003).	15
Εικόνα 3 : Μοντέλο Κυκλικής Οικονομίας (European Parliament, 2018).	20

Εικόνα 4 : Η διαδικασία της Κομποστοποίησης (Hall, 2004).	25
Εικόνα 5 : Χαρακτηριστική καμπύλη θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια των διαφόρων φάσεων της κομποστοποίησης (Tchobanoglous & Kreith, 1994).	28
Εικόνα 6 : Κύκλος Αζώτου κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης (Cáceres & Malin, 2018).	32
Εικόνα 7 : Τροφικά Υπολείμματα και Κλαδέματα.....	38
Εικόνα 8 : Οικιακοί Κομποστοποιητές.	39
Εικόνα 9 : Θερμοζυγός	43
Εικόνα 10 : Συσκευή Kjelflex K-360 Buchi – Συσκευή Απόσταξης.....	47
Εικόνα 11 : Φλάσκες πριν την χώνευση.....	47
Εικόνα 12 : Φλάσκες μετά από την χώνευση.....	49
Εικόνα 13 : Συσκευή μέτρησης Ολικού Άνθρακα.....	51
Εικόνα 14 : Ανάλυση Φυτοτοξικότητας.	53
Εικόνα 15 : Αποτέλεσμα της φυτοτοξικότητας.	73
Εικόνα 16 : Διαχωρισμός Χουμικών και Φουλβικών.	75
Εικόνα 17 : Συγκριτική εικόνα αρχή και τέλος Compost 1.....	76
Εικόνα 18 : Τελική μορφή Compost 1.	77
Εικόνα 19 : Συγκριτική εικόνα αρχή και τέλος Compost 2.....	78
Εικόνα 20 : Τελική Μορφή Compost 2.	79

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1 : Πληθυσμιακή εξέλιξη Άνδρου (ΕΛΣΤΑΤ).....	22
Πίνακας 2 : Απαιτήσεις Θερμόφιλης φάσης για κάθε χώρα (William F. Brinton, 2000).	27
Πίνακας 3 : Πίνακας Μικροοργανισμών (Sánchez et al., 2017).	30
Πίνακας 4 : Αρχικός χαρακτηρισμός Compost 1.....	40
Πίνακας 5 : Αρχικός χαρακτηρισμός Compost 2.	41
Πίνακας 6 : Αναλύσεις Compost.	41
Πίνακας 7 : Αντιδραστήρια στις φλάσκες - Μέθοδος Kjeldahl.	48
Πίνακας 8 : Τιμές αγωγιμότητας και εφαρμογής στο έδαφος στην Αυστραλία(William F. Brinton, 2000).....	67
Πίνακας 9 : Δείκτης φυτοτοξικότητας	73
Πίνακας 10 : Κατηγορίες δείκτη Φυτοτοξικότητας (Cui et al., 2017).	74
Πίνακας 11 : Αποτελέσματα % Χουμικών και % Φουλβικών στις δύο κομποστοποιήσεις....	75
Πίνακας 12 : Σταθερές του Μοντέλου (Αριστείδης Δ. Ραψωματιώτης, 2016).	82

Πίνακας 13 : Σταθερές Ισοζυγίου Μάζας Βιοαποδομήσιμων..... 83

Κεφάλαιο 1ο : Εισαγωγή στη Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων

1.1. Στερεά Απόβλητα – Βασικοί Ορισμοί

Ως «**Στερεά Απόβλητα**» ορίζονται (α) τα στερεά ή ημι-στερεά αντικείμενα τα οποία, κάτω από ορισμένες συνθήκες, δεν έχουν επαρκή αξία ή χρησιμότητα για τον κάτοχο τους ώστε αυτός να συνεχίσει να υφίσταται τη δαπάνη ή τη μέριμνα της διατήρησης τους και (β) τα στερεά ή ημι-στερεά υλικά που ανακύπτουν ως ανεπιθύμητα υπολείμματα από τις δραστηριότητες των νοικοκυριών, των εμπορικών και βιομηχανικών εγκαταστάσεων, των γεωργικών και εξορυκτικών δραστηριοτήτων κ.α. Πρόκειται για αντικείμενα ή υλικά από τα οποία ο κάτοχος τους προτίθεται ή πρέπει ή υποχρεούνται να απαλλαγεί. (Παναγιωτακόπουλος, 2007)

Παρακάτω παρουσιάζονται μερικοί από τους σημαντικότερους ορισμούς που έχουν να κάνουν με τα στερεά απόβλητα (Gilbert M. & Wendell P., 2008).

«Απόβλητο» : Ένα υλικό του οποίου ο κάτοχος θεωρεί ότι δεν έχει αρκετή αξία για να το κρατήσει.

«Αστικά Στερεά Απόβλητα (ΑΣΑ)» : είναι στερεά απόβλητα από νοικοκυριά, κρατικούς οργανισμούς και ιδρύματα, εμπορικές επιχειρήσεις, αλλά δεν συμπεριλαμβάνουν αμαξώματα αυτοκινήτων, αστικές λάσπες, οικοδομικά απόβλητα, τέφρες καύσης και απόβλητα βιομηχανικών διεργασιών, παρόλα που αυτού του είδους τα απόβλητα μπορούν να διατεθούν σε χώρους υγειονομικής ταφής ή αποτεφρωτήρες.

«Υπολείμματα (garbage) ή απόβλητα τροφίμων (food waste)» : είναι τα ζωικά ή φυτικά κατάλοιπα που προκύπτουν από την προετοιμασία, το μαγείρεμα και την κατανάλωση τροφίμων. Αυτά τα απόβλητα αποτελούνται σε μεγάλο βαθμό από βιοαποδομήσιμες οργανικές ουσίες και υγρασία. Πηγές μπορεί να είναι κουζίνες, εστιατόρια και αγορές τροφίμων αλλά ο όρος δεν συμπεριλαμβάνει απόβλητα από μεγάλες εγκαταστάσεις επεξεργασίας τροφίμων, όπως μονάδες συσκευασίας, σφαγεία κ.α.

«Καύσιμα αστικά απόβλητα (trash)» : -εκτός των τροφίμων- είναι όσα μπορούν να καούν.

«Ανάκτηση υλικών» : ο όρος χρησιμοποιείται για την αφαίρεση υλικών από το ρεύμα των αποβλήτων για σκοπούς ανακύκλωσης ή κομποστοποίησης.

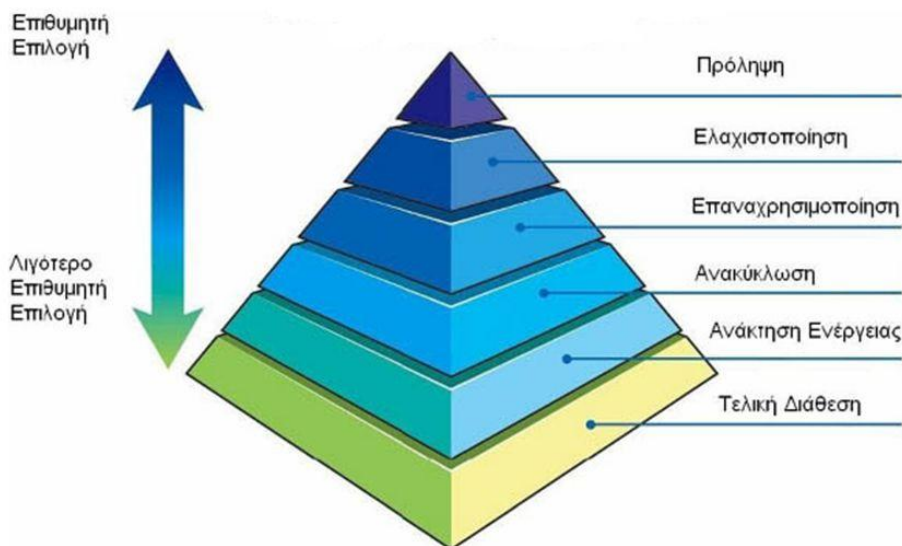
«Απορρίψεις ή απορριπτόμενα απόβλητα (discards)» : είναι τα στερεά απόβλητα τα οποία απομένουν μετά την αφαίρεση των υλικών που προορίζονται για ανακύκλωση ή κομποστοποίηση. Αυτά τα υλικά καίγονται ή θάβονται.

1.2. Έννοια της Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων

Η διαχείριση των στερεών αποβλήτων είναι το σύνολο των δραστηριοτήτων από τη φάση της παραγωγής τους ως και τη φάση της τελικής διάθεσης τους στο περιβάλλον, με ή

χωρίς προηγούμενη βιομηχανική επεξεργασία. (Χαραλάμπους, 2018). Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή ένωση έχουν ιεραρχηθεί οι τρόποι με τους οποίους πρέπει να γίνεται η διαχείριση των στερεών αποβλήτων.

Ιεράρχηση επιλογών για τη διαχείριση των στερεών αποβλήτων

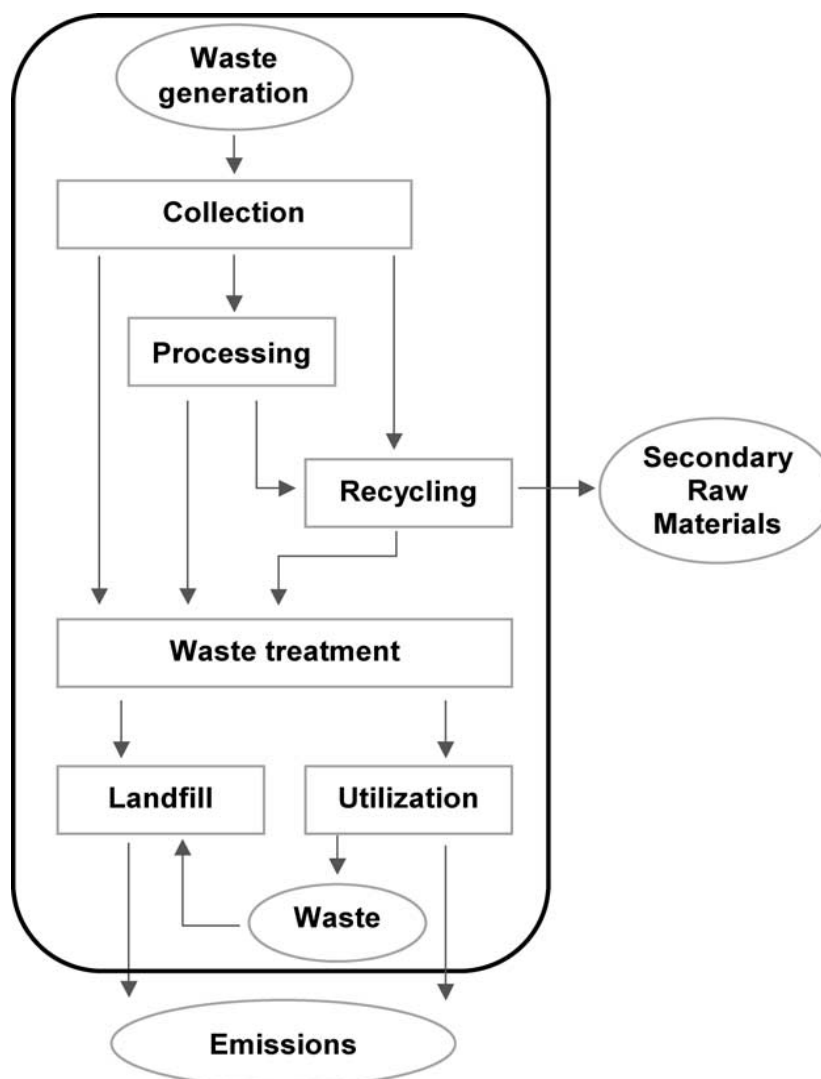


Εικόνα 1 : Ιεράρχηση επιλογών για τη διαχείριση των στερεών αποβλήτων (Λυμπεράτος, 2018).

Πιο συγκεκριμένα οι επιλογές είναι οι εξής (Παπαγιάννης, 2015):

- Πρόληψη : Μείωση των παραγόμενων αποβλήτων, ενώ βασικό ζήτημα είναι να εκτιμηθούν οι επιπτώσεις που προκαλεί η παραγωγή, η επεξεργασία, η μεταφορά και η χρήση του εκάστοτε προϊόντος.
- Ελαχιστοποίηση : Μείωση των ρύπων και των πρώτων υλών που χρειάζονται οι βιομηχανίες για την παραγωγή ενός προϊόντος.
- Επαναχρησιμοποίηση : Ο παραγωγός πρέπει να εξασφαλίζει για τον περιορισμό δημιουργία αποβλήτων καθώς και για την διευκόλυνση της επαναχρησιμοποίησης και ανάκτησης του προϊόντος.
- Ανακύκλωση : Το απόβλητο που έχει προκύψει μετατρέπεται εκ νέου σε προϊόν, υλικά ή ουσίες που προορίζονται για χρήση στην ίδια ή σε άλλη μορφή.
- Ανάκτηση ενέργειας : Σε περιπτώσεις που δεν είναι δυνατή η ανάκτηση υλικών λόγω τεχνικών περιορισμών, τα απόβλητα οδηγούνται σε μονάδες καύσης με στόχο την ανάκτηση ενέργειας.
- Διάθεση : Η απόρριψη των αποβλήτων σε χώρους υγειονομικής ταφής είναι η έσχατη λύση, παρόλο που αποτελεί την οικονομικότερη λύση για την διαχείριση των στερεών αποβλήτων.

Παρά τις ιδανικές επιλογές διαχείρισης των αποβλήτων, στόχος της ολοκληρωμένης διαχείρισης στερεών αποβλήτων είναι να αντιμετωπιστούν τα απορρίμματα της κοινωνίας με όσο το δυνατόν περιβαλλοντικά και οικονομικά βιώσιμο τρόπο (Sabbas et al., 2003).



Εικόνα 2 : Διάγραμμα διαχείρισης Στερεών αποβλήτων (Sabbas et al., 2003).

Όπως φαίνεται στην παριστάνεται το ολικό διάγραμμα ροής διαχείρισης στερεών αποβλήτων και τα στάδια από τα οποία αποτελείται είναι τα εξής (Sabbas et al., 2003) :

Παραγωγή Αποβλήτων (Waste Generation) : περιέχει όλες τις διεργασίες που παράγουν απόβλητα είτε είναι από την βιομηχανία (παραγωγή και διάθεση προϊόντων) είτε από τα νοικοκυριά (κατανάλωση προϊόντων).

Συλλογή (Collection) : τα απόβλητα συλλέγονται και πραγματοποιείται ο διαχωρισμός τους σε διαφορετικά ρεύματα υλικών.

Επεξεργασία (Processing) : το στάδιο αυτό περιλαμβάνει την διαλογή απορριμμάτων, την αποσυναρμολόγηση των προϊόντων (κυρίως ηλεκτρονικού εξοπλισμού) και την παραγωγή του απορριπτόμενου παραγόμενου καυσίμου (RDF). Τα βήματα αυτά εξυπηρετούν είτε για

την άμεση επαναχρησιμοποίηση των αποβλήτων είτε για την τροποποίηση πριν υποστούν οποιαδήποτε επεξεργασία.

Ανακύκλωση (Recycling) : παραγωγή δευτερογενών υλικών από απόβλητα όπως χαρτί από χρησιμοποιημένο χαρτί, ατσάλι από θραύσματα σιδηρούχων μετάλλων κ.α.

Επεξεργασία αποβλήτων (Waste Treatment) : περιλαμβάνει τις μεθόδους επεξεργασίας των αποβλήτων όπως θερμική επεξεργασία και βιολογική επεξεργασία.

Αξιοποίηση Αποβλήτων (Utilization Waste) : περιλαμβάνει όλες τις χρήσεις για τις οποίες μπορούν να διατεθούν τα επεξεργασμένα απόβλητα όπως χρήση επεξεργασμένης τέφρας για κατασκευή οδοστρώματος, παραγωγή λιπάσματος για γεωργικές εφαρμογές ή θερμική αξιοποίηση του RDF.

Χώροι Υγειονομικής Ταφής (Landfills) : είναι το στάδιο ταφής στο οποίο καταλήγει το μεγαλύτερο μέρος των στερεών αποβλήτων είτε πριν είτε αφού υποστεί επεξεργασία.

1.3. Μέθοδοι Επεξεργασίας Στερεών Αποβλήτων

Τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται μία έντονη αύξηση των αποβλήτων, γεγονός το οποίο προέρχεται από την συνεχή παραγωγή και κατανάλωση προϊόντων. Εξαιτίας, λοιπόν, της αύξησης του όγκου των στερεών αποβλήτων κρίνεται απαραίτητη η επεξεργασία τους. Οι διαθέσιμοι μέθοδοι επεξεργασίας των στερεών αποβλήτων παρουσιάζονται παρακάτω :

1.3.1. Ανακύκλωση και Ανάκτηση υλικών

Βασικός στόχος της ανακύκλωσης είναι η διατήρηση των πρώτων υλών έτσι ώστε μέσω της διαδικασίας αυτής να επιστρέφουν στον παραγωγικό κύκλο και να έχουν έτσι μεγαλύτερο χρόνο ζωής. Οποιαδήποτε εργασία ανάκτησης με την οποία τα απόβλητα μετατρέπονται εκ νέου σε προϊόντα, υλικά ή ουσίες που προορίζονται είτε για να εξυπηρετήσουν τον αρχικό τους σκοπό είτε άλλους (Νταρακάς, 2014). Με αυτόν λοιπόν τον τρόπο μειώνεται η ρύπανση της ατμόσφαιρας, των υδάτων και του εδάφους καθώς τα απορρίμματα δεν διατίθενται ανεξέλεγκτα στα Χ.Υ.Τ.Α. αλλά αξιοποιούνται οι ιδιότητες τους. Επιπλέον η ανακύκλωση συμβάλει στην εξοικονόμηση ενέργειας, διότι ορισμένα υλικά όταν ανακυκλώνονται απαιτούν λιγότερη ενέργεια από ότι χρειάζονται για να παραχθούν εξ αρχής.

Πλεονεκτήματα ανακύκλωσης στερεών αποβλήτων (Lave et al., 1999):

- ✓ Η εξοικονόμηση χώρου στους Χώρους Υγειονομικής Ταφής
- ✓ Εξοικονόμηση χρημάτων από την διαχείριση των αστικών στερεών αποβλήτων
- ✓ Μείωση απόρριψης ρύπων που συνεπάγεται με την άμεση προστασία του περιβάλλοντος. Ειδικότερη έμφαση δίνεται στην εξάλειψη των τοξικών και επικίνδυνων υλικών

- ✓ Αύξηση της βιωσιμότητας της οικονομίας μέσω της ελαχιστοποίησης της χρήσης των μη ανανεώσιμων πόρων

1.3.2. Βιολογική Επεξεργασία

Οι μέθοδοι βιολογικής επεξεργασίας μπορούν να εφαρμοστούν σε απόβλητα που επιδέχονται τέτοιου είδους επεξεργασία, δηλαδή τα βιοαποδομήσιμα ή οργανικά απόβλητα. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν τα αγροτικά απόβλητα, πολλά στερεά απόβλητα και ιλείς από βιομηχανίες τροφίμων, η λύς από βιολογικούς καθαρισμούς καθώς και το κλάσμα των βιοαποδομήσιμων αποβλήτων που προέρχεται από τα αστικά απόβλητα.

Η βιολογική επεξεργασία βασίζεται στη δράση των μικροοργανισμών, οι οποίοι αναπτύσσονται ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν. Οι μικροοργανισμοί αναπαράγονται συνεχώς και συντελούν στη διάσπαση των αποβλήτων. Το βασικό όφελος των βιολογικών μεθόδων επεξεργασίας έγκειται στην ολοκλήρωση του οικολογικού κύκλου καθώς υπάρχει η δυνατότητα επιστροφής των οργανικών υλικών στο έδαφος ή ακόμα και η ανάκτηση ενέργειας μέσω παραγωγής βιοαερίου.

Οι δύο μορφές στις οποίες διακρίνεται η βιολογική επεξεργασία είναι οι εξής:

- Αερόβια Επεξεργασία – Κομποστοποίηση

Η κομποστοποίηση πρόκειται για μία ελεγχόμενη, αερόβια, βιολογική, οξειδωτική διαδικασία αποικοδόμησης και σταθεροποίησης των οργανικών υλικών που βρίσκονται μέσα στα βιοαποδομήσιμα απόβλητα. Πραγματοποιείται ανάπτυξη διαφόρων μικροοργανισμών και είναι μία από τις πιο αποτελεσματικές μεθόδους ανακύκλωσης οργανικών αποβλήτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πηγή εδαφοβελτιωτικού υλικού για τον εμπλουτισμό του εδάφους με θρεπτικά συστατικά (Antil et al., 2014).

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της κομποστοποίησης είναι τα εξής :

- ✓ Μειώνεται η χρήση των χώρων υγειονομικής ταφής, λόγω μικρότερης ποσότητας διάθεσης στερεών αποβλήτων, με αποτέλεσμα την επιμήκυνση του χρόνου λειτουργίας τους.
- ✓ Επακόλουθη είναι και η μείωση των στραγγισμάτων που παράγονται στα ΧΥΤΑ
- ✓ Μείωση των εκπομπών αερίων από τους χώρους διάθεσης
- ✓ Παραγωγή προϊόντος από απόβλητα, δηλαδή επαναφορά τους στον παραγωγικό κύκλο
- ✓ Μείωση χρήσης συνθετικών λιπασμάτων

- Αναερόβια Επεξεργασία

Η αναερόβια χώνευση αποτελείται από ελεγχόμενη βιολογική αποδόμηση των οργανικών αποβλήτων με τη βοήθεια μικροοργανισμών σε συνθήκες έλλειψης οξυγόνου. Η μέθοδος αυτή οδηγεί στο σχηματισμό βιοαερίου, μείγμα που κυρίως αποτελείται από διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) και μεθάνιο (CH₄), ενώ μπορεί να παραχθούν σε μικρές ποσότητες άζωτο (N₂), αμμωνία (NH₃), υδρογόνο (H₂) και υδρόθειο (H₂S) (Chen et al., 2008). Το βιοαέριο κατά τη διεργασία αυτή, μπορεί να συλλεχθεί και να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας (Βασίλειος Ν., 2020). Ακόμα ένα προϊόν της αναερόβιας χώνευσης είναι μια μικροβιακή βιομάζα, η οποία μπορεί να υποστεί περαιτέρω επεξεργασία, όπως κομποστοποίηση, έτσι ώστε να μετατραπεί σε εδαφοβελτιωτικό υλικό. (Chen et al., 2008)

Η αναερόβια χώνευση χρησιμοποιείται σε πολλές εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων ώστε να διαχειριστεί η βιολογική ιλύς, ενώ αποτελεί την κύρια βιολογική διεργασία που πραγματοποιείται στους χώρους υγειονομικής ταφής (Βασίλειος Ν., 2020).

Η βιολογική επεξεργασία με αναερόβιες συνθήκες αποτελείται από τέσσερα βασικά στάδια (Βασίλειος Ν., 2020):

- Υδρόλυση : διασπώνται μέσω υδρόλυσης οι πολυμερείς οργανικές ενώσεις σε προϊόντα μικρότερου μοριακού βάρους, όπως σάκχαρα, αμινοξέα, πεπτίδια κ.α.
- Οξεογένεση : τα μονομερή που παράχθηκαν στο προηγούμενο στάδιο δρουν ως υπόστρωμα για οξεογενή βακτήρια, τα οποία με τη σειρά τους παράγουν άλλα οργανικά οξέα
- Οξικογένεση : τα προϊόντα από την οξεογένεση που δεν αποτελούν μεθανογενή υποστρώματα, μετατρέπονται σε αυτό το στάδιο με τη βοήθεια οξικογόνων μικροοργανισμών
- Μεθανογένεση : η διαδικασία παραγωγής μεθανίου και διοξειδίου του άνθρακα από τα μεθανογενή βακτήρια

1.3.3. Θερμική Επεξεργασία

Η θερμική επεξεργασία είναι μία μέθοδος επεξεργασίας που συμβάλει στην μείωση του όγκου των στερεών αποβλήτων, την αδρανοποίηση των επιβλαβών συστατικών τους και στην ταυτόχρονη ανάκτηση ενέργειας μέσω εκμετάλλευσης της θερμογόνου δύναμης που περιέχουν.

Η κύρια θερμική επεξεργασία που πραγματοποιείται στα στερεά απόβλητα είναι ή αποτέφρωση ή αλλιώς καύση, η οποία περιλαμβάνει την ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασία (850 έως 1500 °C) με παρουσία φλόγας. Στόχος της εν λόγω διαδικασίας είναι η εξάτμιση, αποσύνθεση και η καταστροφής των οργανικών ενώσεων που περιέχονται στα απορρίμματα καθώς και η ταυτόχρονη μείωση του όγκου τους. Κατά τη διεργασία παράγονται αέριοι ρύποι όπως μονοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του άνθρακα, υποξείδια του αζώτου και του θείου, διοξίνες, βαρέα μέταλλα και σκόνη, ενώ σαν στερεό υπόλειμμα παραμένουν η τέφρα και η σκουριά που αποτελούνται από επικίνδυνες τοξικές ουσίες (Παπαγιάννης, 2015).

1.3.4. Χώροι Υγειονομική Ταφής Απορριμμάτων (Χ.Υ.Τ.Α.)

Με τον όρο Χ.Υ.Τ.Α. εννοούμε τη μέθοδο της ελεγχόμενης και οργανωμένης διάθεσης των αποβλήτων στο έδαφος σε συγκεκριμένους χώρους υγειονομικής ταφής. Πριν την μεταφορά τους στο τόπο διάθεσης γίνεται μία διαλογή των απορριμμάτων που θα πάνε για ταφή και εκείνων που θα πάνε για ανακύκλωση. Έπειτα η διαδικασία προβλέπει τη συμπίεση των απορριμμάτων και την αποστράγγιση τους σε ειδικά πλέγματα ώστε τα υγρά απόβλητα να μην πηγαίνουν στη γη. Στη συνέχεια καλύπτονται με ένα στρώμα από εδαφικό υλικό, το οποίο έχει προδιαγραφές ώστε να ελαχιστοποιείται η διείσδυση νερού στο εσωτερικό του χώρου διάθεσης (Παπαγιάννης, 2015).

Η ταφή των απορριμμάτων αποτελεί μία πλέον ολοκληρωμένη, οικονομική και περιβαλλοντικά δεκτή μέθοδο διαχείρισης στερεών αποβλήτων καθώς συνδυάζει την διαλογή στην πηγή. Συμβάλει δηλαδή στην ανακύκλωση, επαναχρησιμοποίηση και εναλλακτική διαχείριση υλικών (Παπαγιάννης, 2015).

Οι χώροι υγειονομικής ταφής θεωρούνται ενεργοί για το χρονικό διάστημα στο οποίο δέχονται απόβλητα, χρονικό διάστημα που μπορεί να διαρκέσει από 5 έως 30 χρόνια ανάλογα με την χωρητικότητα του Χ.Υ.Τ.Α.. Στη συνέχεια ακολουθεί μία φάση φροντίδας κατά την οποία λαμβάνονται μέτρα για την μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και την παρακολούθηση των εκπομπών μέχρις ότου θεωρηθούν αποδεκτές σε σχέση με το περιβάλλοντα χώρο (Sabbas et al., 2003).

Τα προβλήματα που προκύπτουν στους χώρους υγειονομικής ταφής είναι τα εξής (Sabbas et al., 2003) :

- Διαλογή και διαχωρισμός των αποβλήτων
- Συμπύκνωση των αποβλήτων
- Κάλυψη των αποβλήτων με εδαφικό υλικό
- Συλλογή και επεξεργασία υγρών αποβλήτων που προκύπτουν (στραγγίδια)
- Συλλογή του παραγόμενου βιοαερίου

1.4. Κυκλική Οικονομία

Η κυκλική οικονομία είναι ένα μοντέλο παραγωγής και κατανάλωσης, το οποίο περιλαμβάνει την ανταλλαγή, εκμίσθωση, επαναχρησιμοποίηση, επισκευή, ανακαίνιση και ανακύκλωση των υπαρχόντων υλικών και προϊόντων όσο το δυνατόν περισσότερο προκειμένου να παραταθεί ο κύκλος ζωής τους. Μια κυκλική οικονομία συνεπάγεται ότι τα απόβλητα θα γίνουν από μόνα τους πόροι, μειώνοντας κατά συνέπεια την πραγματική ποσότητα αποβλήτων. Στόχος είναι όταν ένα προϊόν φτάνει στο τέλος της ζωής του, τα υλικά κατασκευής του να διατηρούνται μέσα στην οικονομία και να χρησιμοποιηθούν όσο το δυνατόν περισσότερες φορές καθώς με τον τρόπο αυτό προστίθεται αξία στο προϊόν (European Parliament, 2018).

Στις μέρες μας πάνω από 2.5 δις τόνοι αποβλήτων παράγονται ετησίως στην Ευρωπαϊκή ένωση. Για το λόγο αυτό η Ευρωπαϊκή Επιτροπή παρουσίασε το νέο σχέδιο

δράσης για την κυκλική Οικονομία. Το σχέδιο αυτό περιλαμβάνει προτάσεις για οικολογικό σχεδιασμό προϊόντων, τη μείωση των αποβλήτων καθώς και την δραστηριοποίηση των πολιτών στο σοβαρό αυτό ζήτημα (European Parliament, 2018).



Εικόνα 3 : Μοντέλο Κυκλικής Οικονομίας (European Parliament, 2018).

Σε μία κυκλική οικονομία, τα προϊόντα και τα υλικά που περιέχουν, έχουν μεγάλη αξία, γεγονός το οποίο έρχεται σε αντίθεση με το παραδοσιακό γραμμικό οικονομικό μοντέλο το οποίο βασίζεται στο μοτίβο «Take – Make – Consume – Throw away». Με λίγα λόγια γίνεται προσπάθεια αλλαγής του καθιερωμένου συστήματος, στο οποίο κυριαρχεί η υπερκατανάλωση πρώτων υλών και ο μικρός κύκλος ζωής των προϊόντων (European Parliament, 2018).

Υλικά

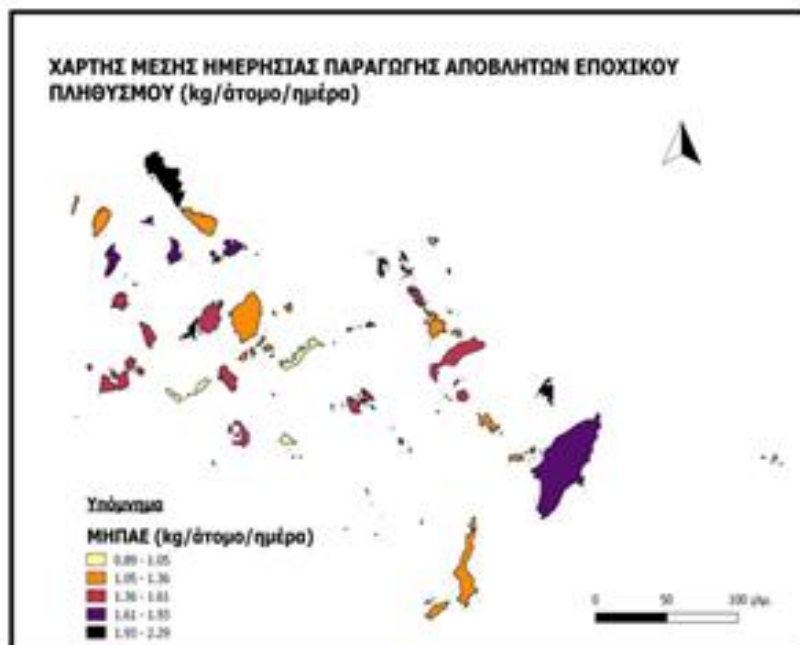
Η οικονομία χρησιμοποιεί υλικά που είτε εισάγονται είτε εξάγονται, ενώ ταυτόχρονα χρησιμοποιούνται για να παρέχουν ενέργεια, όπως τρόφιμα και καύσιμα, είτε για να χρησιμοποιηθούν ως υλικά αγαθά. Τα υλικά αυτά μπορούν είτε να καταναλωθούν γρήγορα, π.χ. εφημερίδες, συσκευασίες, μπαταρίες κ.α., είτε να διατηρηθούν για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, π.χ. ηλεκτρονικά, έπιπλα, κτίρια – υποδομές κ.α. Μετά τη χρήση ενέργεια ή την τελική επεξεργασία σε περίπτωση προϊόντων, τα υλικά εγκαταλείπουν την οικονομία ως εκπομπές και απόβλητα (Circular Economy, 2018).

1.5. Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων σε νησιωτικές περιοχές

Δήμος Άνδρου

Η Άνδρος είναι το δεύτερο μεγαλύτερο σε μέγεθος νησί των Κυκλάδων, μετά τη Νάξο. Αποτελεί φυσική συνέχεια της Εύβοιας. Η πρωτεύουσα του νησιού είναι η Άνδρος ή αλλιώς Χώρα. Ο Δήμος Άνδρου είναι δήμος της περιφέρειας Νοτίου Αιγαίου που περιλαμβάνει την Άνδρο και τις γειτονικές της νησίδες. Η έκταση του Δήμου είναι 379,21

τ.χλμ και ο πληθυσμός του 9.221 κάτοικοι σύμφωνα με την απογραφή του 2011. Έδρα του δήμου είναι η Άνδρος. Η δημοτική ενότητα Άνδρου καταλαμβάνει ολόκληρο το κεντρικό τμήμα του νησιού, και βρίσκεται ανάμεσα στις δημοτικές ενότητες Κορθίου και Υδρούσας. Όπως τα περισσότερα νησιά του Αιγαίου, έτσι και η Άνδρος εμφανίζει δύο κύριες τάσεις. Αρχικά την τάση συρρίκνωσης του πληθυσμού κατά τη χειμερινή περίοδο και αυξητική τάση κατά τους θερινούς μήνες, λόγω των εποχιακών θέσεων απασχόλησης στον τομέα τουρισμού και ταυτόχρονα των τουριστών. Συνεπώς, το καλοκαίρι στην Άνδρο η διαφορά ανάμεσα στον μόνιμο πληθυσμό και εποχικό τουρισμό είναι τεράστια. Ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος του εποχικού πληθυσμού φαίνεται στον παρακάτω χάρτη 1:



Χάρτης 1. Υπολογίζεται η Μέση Ημερήσια Παραγωγή Αποβλήτων του εποχικού πληθυσμού.

Στον παραπάνω Χάρτη 1, υπολογίζεται η Μέση Ημερήσια Παραγωγή Αποβλήτων του εποχικού πληθυσμού. Ο συντελεστής ΜΗΠΑ για τον εποχιακό πληθυσμό λήφθηκε 10% μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο των μόνιμων κατοίκων, θεωρώντας ότι οι τουρίστες παράγουν 10% περισσότερο από τους μόνιμους κατοίκους μίας περιοχής, γεγονός το οποίο

οφείλεται κυρίως στην αύξηση των καταναλωτικών συνηθειών των τουριστών η οποία οδηγεί σε αύξηση των υλικών συσκευασίας. Τα στοιχεία αυτά προέρχονται από το ΠΕΣΔΑ. Σύμφωνα με αυτόν, η Σύμη, η Άνδρος και η Αντίπαρος βρίσκονται στην κατηγορία με τον υψηλότερο συντελεστή ΜΗΠΑΕ, παράγοντας περίπου 2 kg/άτομο ημερησίως, γεγονός που αποδεικνύει τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο του τουρισμού στην παραγωγή αποβλήτων αυτών των νησιών.

ΕΤΟΣ	ΠΛΗΘΥΣΜΟΣ
1991	8781
2001	10009
2011	9128

Πίνακας 1 : Πληθυσμιακή εξέλιξη Άνδρου (ΕΛΣΤΑΤ).

Τέτοιου είδους πληθυσμιακές διακυμάνσεις έχουν ως αποτέλεσμα αντίστοιχες διακυμάνσεις στη παραγόμενη ποσότητα ΑΣΑ .

Υφιστάμενη Κατάσταση

Σύμφωνα με το Τ.Σ.Δ.Α Άνδρου, για το έτος 2013 η παραγωγή αποβλήτων ανέρχεται σε 510Kg/ κάτοικο/ ημέρα. Παράλληλα, ο Δήμος Άνδρου εφαρμόζει δράσεις για τη συλλογή και διαχείριση συγκεκριμένων ρευμάτων αποβλήτων. Στο νησί δεν υπάρχει ακόμη λειτουργία ακόμη ΧΥΤΑ (δεν έχει αποφασιστεί η χωροθέτησή του), ενώ οι εργασίες στον ΧΑΔΑ στην περιοχή Σταυροπέδα έχουν λήξει. Οι μεγάλες αποστάσεις μεταξύ των οικισμών και οι πληθυσμιακές μεταβολές που αποτελούν δυσκολίες που αυξάνουν το κόστος και την αποτελεσματικότητα του συστήματος διαχείρισης. Μετά την παύση λειτουργίας του ΧΑΔΑ αποφασίστηκε η προμήθεια, η εγκατάσταση και η λειτουργία δεματοποιητή απορριμμάτων στον οποίο θα υφίστανται διαχείριση τα αστικά απορρίμματα του Δήμου. Η προτεινόμενη διαχείριση συνίσταται στη δεματοποίηση απορριμμάτων, στην αεροστεγή και υγατοστεγή τους συσκευασία και στην προσωρινή τους αποθήκευση σε κατάλληλο χώρο στο πλάτωμα του ανενεργού λατομείου της εταιρείας «Λατοδομική Άνδρου» σε γήπεδο έκτασης 30003,17 m² . Τα δεμάτια θα παραμένουν στο χώρο προσωρινής απόθεσης απορριμμάτων του Δήμου. Αξίζει να σημειωθεί πως ο Δήμος Άνδρου έχει καταβάλει μεγάλες προσπάθειες για την εντατικοποίηση της ανακύκλωσης και της κομποστοποίησης. Μετά από τη διενέργεια διεθνούς διαγωνισμού ολοκληρώθηκαν οι διαδικασίες υπογραφής της σύμβασης για την προμήθεια εξοπλισμού ανακύκλωσης που θα χρησιμοποιηθεί για τη διαλογή στη πηγή από τους Δημότες, συλλογή, μεταφορά και περαιτέρω κομποστοποίηση του οργανικού βιοαποδομήσιμου κλάσματος των ΑΣΑ καθώς και για τη ριζική αναβάθμιση και περαιτέρω ορθολογικοποίηση της ανακύκλωσης μέσω του προγράμματος συλλογής τη

πηγή του χαρτιού, γυαλιού και λοιπών συσκευασιών (πλαστικά, λευκοσίδερα, tertarak κλπ). (ΤΣΔΑ ΑΝΔΡΟΥ)

- Ο Δήμος διαχειρίζεται τις ακόλουθες ροές αποβλήτων: ανάμεικτα οικιακά, μικρή ποσότητα χωριστών συλλεγόμενων αποβλήτων συσκευασίας χαρτιού, πράσινα απόβλητα (κλαδέματα), ογκώδη και οικοδομικά απόβλητα. (ΤΣΔΑ ΑΝΔΡΟΥ)
- Τα απόβλητα εκκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων (ΑΕΚΚ) διαχειρίζονται με σύμβαση από την εταιρεία ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΠΕΤΣΑΣ- Μονάδα ανάκτησης ΑΕΚΚ συμβεβλημένη με το ΣΣΕΔ ΑΕΚΚ ΑΑΝΕΛ. (ΤΣΔΑ ΑΝΔΡΟΥ)
- Τα απόβλητα ηλεκτρικού και ηλεκτρολογικού εξοπλισμού (ΑΗΗΕ) τα οποία για το 2014 υπολογίστηκαν 8.86tn διαχειρίζονται με σύμβαση από την εταιρεία ELECTRICA CENTERΚΑΣΣΙΔΩΝΗΣ ΙΩΑΝΗΣ ΚΑΙ ΣΙΑ ΟΕ Εταιρεία συμβεβλημένη με την ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΑΕ. (ΤΣΔΑ ΑΝΔΡΟΥ).



ENI CBC MED: SIRCLES

"Supporting Circular Economy Opportunities for Employment and Social Inclusion"

Το υψηλό ποσοστό ανεργίας στη Μεσόγειο, ιδίως μεταξύ των νέων και των γυναικών, έχει σοβαρές οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις, που έχει σημασία όχι μόνο για τις χώρες ξεχωριστά, αλλά έχει και ευρύτερες επιπτώσεις. Ταυτόχρονα, η περιοχή πάσχει από έναν συνδυασμό διαφορετικών περιβαλλοντικών προκλήσεων που επηρεάζουν περαιτέρω την επιβίωση των ανθρώπων. Λαμβάνοντας υπόψη την πολυπλοκότητα της κατάστασης, οι χώρες MED πρέπει να εξετάσουν νέες προσεγγίσεις που αντιμετωπίζουν αυτές τις προκλήσεις ολοκληρωτικά. Το ερευνητικό έργο με ακρωνύμιο "SIRCLES" και τίτλο "Υποστήριξη ευκαιριών για κυκλική οικονομία (CE) για απασχόληση και κοινωνική ένταξη" - είναι ένα εκτεταμένο έργο που συμβάλλει ακριβώς προς αυτή την κατεύθυνση, με φιλόδοξους στόχους και σαφή οφέλη. Το έργο παρέχει εμπορεύσιμες δεξιότητες για το μέλλον και νέες ευκαιρίες απασχόλησης στους τομείς διαχείρισης CE και βιολογικών αποβλήτων για τα άτομα NEET & Women. Το αναγνωρισμένο δυναμικό του τομέα CE να δημιουργήσει θέσεις εργασίας και να ενισχύσει την οικονομία, προστατεύοντας παράλληλα το περιβάλλον, ενθαρρύνοντας ταυτόχρονα αυτήν τη μεγάλη εταιρική σχέση κοινωνικών φορέων και οργανώσεων της κοινωνίας των πολιτών, του δημόσιου και του ιδιωτικού τομέα που προέρχονται από την Ελλάδα (GR), Ιταλία (IT), Ιορδανία (JO), Λίβανος (LB), Παλαιστίνη (PS), Ισπανία (SP) & Τυνησία (TN). Σε όλες αυτές τις χώρες, στα άτομα

NEET & Γυναίκες θα προσφέρονται εξατομικευμένες εκπαιδεύσεις στη διαχείριση βιοαποβλήτων. Ο Ελληνικός πιλότος θα πραγματοποιηθεί στο νησί της Άνδρου με έμφαση στα βιοαπόβλητα από δύο περιοχές (Μπατοσί και Γαύριο), ξενοδοχεία, εστιατόρια και πλοία και επίσης θα δώσει ευκαιρίες σε άτομα NEET & Γυναίκες και θα περιλαμβάνει το διαχωρισμό, τη συλλογή, την προεπεξεργασία, τη κομποστοποίηση και την βιολογική καλλιέργεια.

Στο νησί της Άνδρου θα τοποθετηθούν 36 λαχανί κάδοι των 80 λίτρων (με κλειδί), στο Μπατοσί και στο Γαύριο (συνολικά για 500 κατοικίες, περίπου 1550 πολίτες), καθώς και σε ξενοδοχεία, εστιατόρια και super market.

Η συλλογή των αποβλήτων θα γίνεται 3 φορές την εβδομάδα. Τους καλοκαιρινούς μήνες, ο πληθυσμός διπλασιάζεται λόγω του τουρισμού, έτσι η καινοτομία του έργου SIRCLES είναι πως τους καλοκαιρινούς μήνες τα τροφικά υπολείμματα θα συλλέγονται και θα ξηραίνονται/τεμαχίζονται για την παραγωγή βιομάζας και την κομποστοποίηση με κλαδέματα του Δήμου.

Προηγούμενη εμπειρία

Το εργαστήριο Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας στα πλαίσια ενός ευρωπαϊκού προγράμματος Waste4think (2016-2019) είχε ως στόχο την συλλογή τροφικών υπολειμμάτων από το Δήμο Χαλανδρίου και περαιτέρω (9ωρη ξήρανση, τεμαχισμός), με στόχο την δημιουργία μιας βιομάζας όπου ονομάζεται FORBI (Food Residue Biomass).

Το 2019 ολοκληρώθηκε η διπλωματική εργασία της φοιτήτρια Μαρίας Μπατσαλιάς. Ο στόχος της διπλωματικής ήταν η βελτιστοποίηση της αξιοποίησης του προϊόντος βιομάζας FORBI από τα προδιαλεγμένα τροφικών υπολειμμάτων με στόχο την παραγωγή κομπόστ.

Πραγματοποιήθηκαν δύο πειράματα, ένα μικρής κλίμακας και ένα μεγάλης κλίμακας. Το πείραμα μικρής κλίμακας έγινε σε οικιακό κομποστοποιητή με κλαδέματα-FORBI (1:1). Το πείραμα μεγάλης κλίμακας πραγματοποιήθηκε σε στεγασμένο σειράδι με 4 τόνους υλικού. 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.

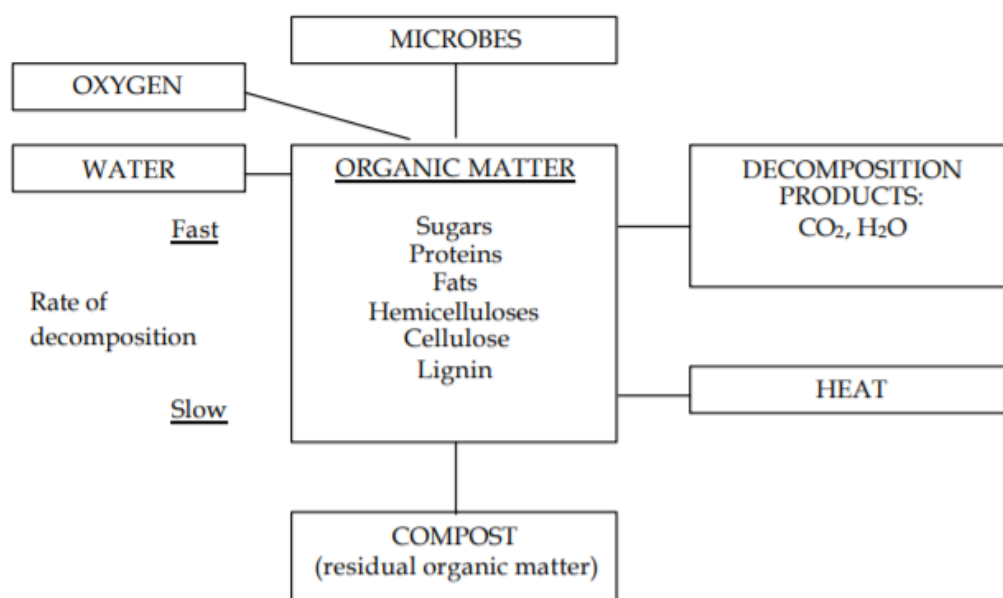
Καινοτομία παρούσας διπλωματικής

Καινοτομία στην παρούσα εργασία αποτέλεσε η 5ωρη ξήρανση και τεμαχισμός των τροφικών υπολειμμάτων, έναντι της 9ωρης ξήρανσης, με απώτερο σκοπό την εξοικονόμηση κατανάλωσης ρεύματος και νερού. Σε κάθε εγχείρημα που πραγματοποιείται σε μεγάλη κλίμακα είναι σημαντική η μείωση του κόστους με ταυτόχρονη παραγωγή ενός αξιόπιστου προϊόντος.

Κεφάλαιο 2ο : Κομποστοποίηση

2.1. Η διαδικασία της Κομποστοποίησης

Η **κομποστοποίηση βιοαποβλήτων** είναι μία βίο-οξειδωτική διαδικασία που οδηγεί σε ένα σταθεροποιημένο τελικό προϊόν, απαλλαγμένο από φυτοτοξικότητα και παθογόνους παράγοντες. Είναι μία ελεγχόμενη αερόβια διαδικασία που πραγματοποιείται από διαδοχικούς μικροβιακούς πληθυσμούς που συνδυάζουν μεσοφιλικές και θερμοφιλικές δραστηριότητες με αποτέλεσμα να παραχθεί διοξείδιο του άνθρακα, νερό, μέταλλα και η σταθεροποιημένη οργανική ύλη (Antil et al., 2014).



Εικόνα 4 : Η διαδικασία της Κομποστοποίησης (Hall, 2004).

Κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης η συμβολή των μικροοργανισμών είναι αναγκαία για την πραγματοποίηση των περίπλοκων μεταβολικών διαδικασιών ώστε να παράγουν την δική τους μικροβιακή βιομάζα. Το οργανικό φορτίο υφίσταται βιοαποδόμηση και ανασυντάσσονται οι ουσίες που περιέχει, κυρίως άνθρακας και άζωτο, με σκοπό την σταθεροποίηση τους. Στη διαδικασία αυτή παράγεται θερμότητα, γεγονός στο οποίο οφείλεται και η μεταβολή της θερμοκρασίας, ενώ σημαντικοί παράμετροι είναι η παροχή οξυγόνου και η περιεχόμενη υγρασία (Meena et al., 2021).

2.2. Φάσεις Κομποστοποίησης

Η πλήρης αποικοδόμηση του οργανικού φορτίου και η παραγωγή ενός σταθεροποιημένου υλικού, πραγματοποιείται σύμφωνα με μία σειρά από φάσεις, στις οποίες διαφορετικές ομάδες μικροοργανισμών λειτουργούν για να φέρουν το

επιθυμητό αποτέλεσμα. Οι τρεις κύριες φάσεις της κομποστοποίησης έχουν προσδιοριστεί με βάση τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, ενώ η τέταρτη είναι ξεχωριστή και αποτελείται από την ωρίμανση (Meena et al., 2021).

Πιο συγκεκριμένα οι φάσεις είναι οι εξής :

- Μεσόφιλη Φάση – Φάση Υστέρησης
- Θερμόφιλη Φάση - Ενεργός Φάση
- Ψυχρόφιλη Φάση - Σταθεροποίηση
- Φάση Ωρίμανσης

2.2.1. Μεσόφιλη Φάση – Φάση Υστέρησης

Η μεσόφιλη φάση είναι το πρώτο στάδιο της κομποστοποίησης όπου συνήθως το compost ξεκινάει έχοντας θερμοκρασία ίση με εκείνη του περιβάλλοντος και βαθμιαία αυξάνεται ώστε να ξεπεράσει τους 45 °C (Meena et al., 2021). Η φάση αυτή μπορεί να διαρκέσει από μερικές ώρες έως και 8 ημέρες, αναλόγως με τις συνθήκες, τη μεταβολική δραστηριότητα καθώς και τον ρυθμό με τον οποίο πολλαπλασιάζονται οι μικροοργανισμοί (Tchobanoglous & Kreith, 1994). Στην μεσόφιλη φάση επικρατούν διάφορες ομάδες μικροοργανισμών, οι οποίες αποσυνθέτουν πρώτα τις πιο εύκολα αποικοδομήσιμες ουσίες και χρησιμοποιούν το άζωτο και τον άνθρακα που υπάρχουν στην οργανική ύλη με σκοπό την αφομοίωση του σώματός τους. Τέλος, η αποσύνθεση σε αυτό το στάδιο έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή οργανικών οξέων, γεγονός το οποίο μειώνει το pH του compost και μπορεί να φτάσει σε χαμηλές τιμές (περίπου 4,0 ή 4,5) (Meena et al., 2021).

2.2.2. Θερμόφιλη Φάση – Ενεργός Φάση

Η φάση αυτή χαρακτηρίζεται από μια εκθετική αύξηση στους αριθμούς των μικροβίων και μία αντίστοιχη ενδυνάμωση της μικροβιακής τους δραστηριότητας. Απόρροια της αύξησης αυτής είναι και η άνοδος της θερμοκρασίας της μάζας της κομποστοποίησης, ενώ η θερμοκρασία εκκίνησης της θερμόφιλης φάσης θεωρείται από 50 έως 55 °C. Η υψηλή θερμοκρασία παραμένει έως ότου αρχίσει να ελαττώνεται η παροχή των διαθέσιμων θρεπτικών ουσιών και των εύκολα αποικοδομήσιμων υλικών (Tchobanoglous & Kreith, 1994). Επιπλέον, στο στάδιο αυτό το άζωτο μετατρέπεται σε αμμωνία με αποτέλεσμα την αύξηση του pH της σωρού της κομποστοποίησης. Η θερμοκρασία στη θερμόφιλη φάση μπορεί να φτάσει ακόμα και τους 70 °C, ενώ είναι σημαντικό να ληφθούν μέτρα ώστε να περιοριστεί η άνοδος αυτή καθώς μπορεί να προκαλέσει θανάτωση των μικροοργανισμών και διακοπή της διαδικασίας της κομποστοποίησης. Τέλος, ένας από τους πιο σημαντικούς λόγους ύπαρξης της ενεργούς φάσης είναι η αποβολή των παθογόνων και μολυσματικών ουσιών που περιέχονται στη σωρό, οι οποίοι αν

δεν εξοντωθούν μπορούν να προκαλέσουν επικίνδυνες επιπτώσεις στο χώμα και την βλάστηση (Meena et al., 2021).

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται οι απαιτήσεις για τη θερμόφιλη ανά χώρα έτσι ώστε να είναι απαλλαγμένο το compost από παθογόνους μικροοργανισμούς.

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

Πίνακας 2 : Απαιτήσεις Θερμόφιλης φάσης για κάθε χώρα (William F. Brinton, 2000).

2.2.3. Ψυχρόφιλη Φάση – Σταθεροποίηση

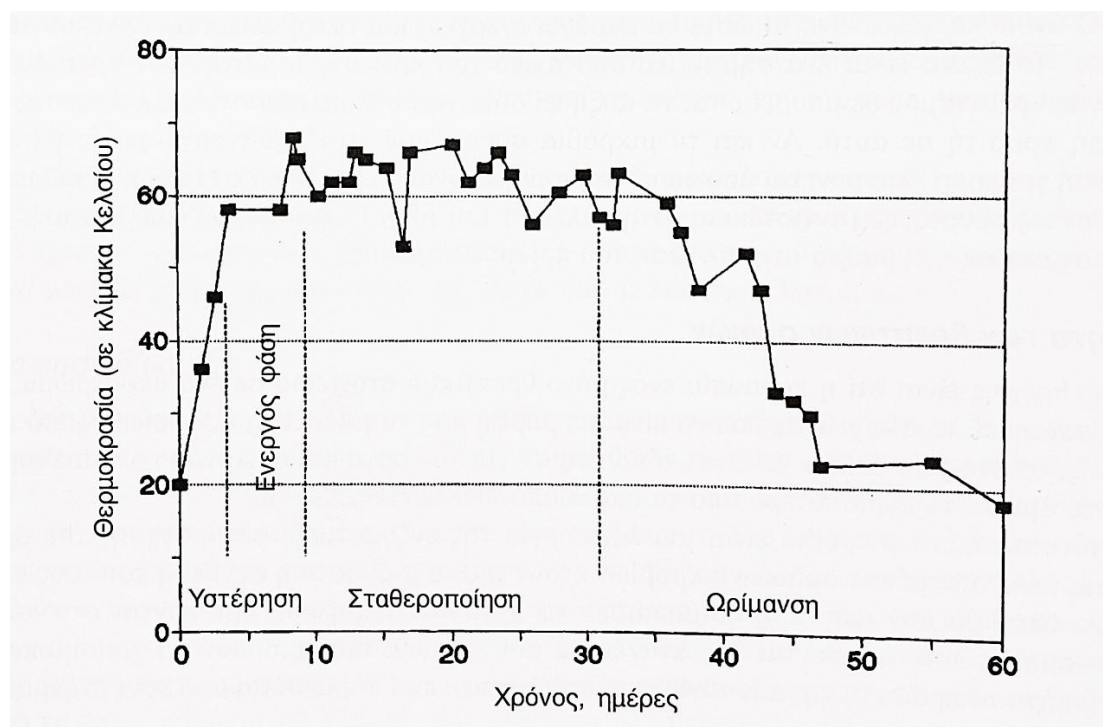
Όταν η δραστηριότητα των θερμόφιλων οργανισμών σταματήσει λόγω εξάντλησης των υποστρωμάτων, αυτοί εξολοθρεύονται και η θερμοκρασία αρχίζει να μειώνεται μέχρις ότου επανέλθει στους 40-45 °C. Οι μεσόφιλοι οργανισμοί αρχίζουν να εξαπλώνονται στην σωρό και οι νέοι πληθυσμοί αποτελούνται κυρίως από μύκητες (Insam & De Bertoldi, 2007). Κατά τη διάρκεια της ψυχρόφιλης φάσης, η αποδόμηση των πολυμερών συνεχίζεται και το pH μειώνεται λίγο, όμως παραμένει αλκαλικό. Αυτή η φάση ψύξης απαιτεί αρκετές εβδομάδες και μπορεί να συγχέεται με τη φάση ωρίμανσης (Meena et al., 2021).

2.2.4. Φάση Ωρίμανσης

Κατά τη διάρκεια της φάσης ωρίμανσης η θερμοκρασία αρχίζει να μειώνεται έως ότου επιτευχθεί η θερμοκρασία περιβάλλοντος. Το ποσοστό των μυκήτων αυξάνεται ενώ τα βακτήρια αρχίζουν και υποχωρούν (Insam & De Bertoldi, 2007). Τέλος, στο στάδιο αυτό γίνεται και η κύρια παραγωγή ανθρακούχων ενώσεων, των

οποίων ο πολυμερισμός οδηγεί στην σύνθεση χουμικών και φουλβικών οξέων (Meena et al., 2021).

Στην Εικόνα 5 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα που αποτυπώνει την θερμοκρασία του compost κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Παράλληλα φαίνεται και οι φάσεις της κομποστοποίησης καθώς και το θερμοκρασιακό εύρος της κάθε μίας.



Εικόνα 5 : Χαρακτηριστική καμπύλη θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια των διαφόρων φάσεων της κομποστοποίησης (Tchobanoglous & Kreith, 1994).

2.3. Μικροοργανισμοί

Η βιολογική ανακύκλωση των θρεπτικών συστατικών είναι απαραίτητα για τη ζωή και πραγματοποιείται με τη βοήθεια μικροοργανισμών. Ο βιοσχηματισμός είναι μία βιολογική διεργασία που αλλάζει την δομή μιας χημικής ουσίας και μπορεί να την απλουστεύσει ή να την κάνει πιο πολύπλοκη (Insam & De Bertoldi, 2007).

2.3.1. Βακτήρια

Σε ορισμένες διαδικασίες κομποστοποίησης, π.χ. στην κομποστοποίηση της ύλης λυμάτων, τα βακτήρια είναι πιο σημαντικά από τους μύκητες από την αρχή. Εάν οι θερμοκρασίες διατηρούνται κάτω από τους 60 °C, περισσότερο από το 40% των στερεών διασπώνται μέσα στις πρώτες 7 ημέρες, σχεδόν εξ ολοκλήρου μέσω βακτηριακής δραστηριότητας. Το εύρος θερμοκρασιών από 50 έως 65 °C, είναι επιλεκτικό πλεονέκτημα για βακτήρια, και ιδιαίτερα για το γένος Bacillus. Όταν οι

Θερμοκρασίες ξεπερνούν τους 65°C τότε το γένος *B. Stearothermophilus* είναι συχνά κυρίαρχο (Insam & De Bertoldi, 2007).

Ακτινοβακτήρια

Τα ακτινοβακτήρια μπορούν να αναπτυχθούν σε μεσόφιλες και θερμόφιλες συνθήκες, δηλαδή μεταξύ 50 °C και 60 °C, σε αλκαλικό και ουδέτερο pH, ενώ ακόμα έχουν την ικανότητα αποδόμησης σύνθετων υποστρωμάτων όπως λιγνοκυτταρινικών υλικών. Η σημασία των ακτινοβακτηρίων στη διαδικασία της κομποστοποίησης είναι λόγω της ικανότητάς τους να αναπτύσσονται σε υψηλές θερμοκρασίες και να υποβαθμίζουν τις πολύπλοκες ενώσεις (Insam & De Bertoldi, 2007).

2.3.2. Μύκητες

Κατά τη φάση έναρξης, οι μύκητες ανταγωνίζονται τα βακτήρια για τα εύκολα διαθέσιμα υποστρώματα. Δεδομένου ότι οι μέγιστοι ειδικοί ρυθμοί ανάπτυξης των βακτηρίων υπερβαίνουν αυτόν των μυκήτων κατά μία τάξη μεγέθους, οι μύκητες σταματάνε να τα ανταγωνίζονται. Επίσης, μια καλή παροχή οξυγόνου είναι πιο σημαντική για τους μύκητες παρά για τα βακτήρια, καθώς ακόμα και σε συστήματα που αερίζονται με δύναμη, μπορεί να εμφανιστούν προσωρινές ανοξικές συνθήκες. Για αυτούς τους λόγους, αλλά και λόγω της χαμηλότερης θερμοανεκτικότητας, οι μύκητες παίζουν αμελητέο ρόλο κατά τη διάρκεια της θερμόφιλης φάσης. Μια εξαίρεση είναι η κομποστοποίηση υποστρωμάτων που είναι ιδιαίτερα πλούσια σε κυτταρίνη και λιγνίνη. Σε αυτή την περίπτωση, οι μύκητες παραμένουν οι πιο σημαντικοί σε όλη τη διαδικασία. Στις μεταγενέστερες φάσεις της κομποστοποίησης, όπου η υγρασία που περιέχει το compost μειώνεται, γεγονός που αποτελεί πλεονέκτημα για την ενίσχυση της δράσης των μυκήτων (Insam & De Bertoldi, 2007).

2.3.3. Αρχαία

Είναι γνωστό ότι πολλά αρχαία είναι θερμόφιλα ή ακόμη και υπερθερμόφιλα. Κυρίως, τα αρχαία συμβάλλουν στην μεθανογένεση η οποία υφίσταται όταν το compost βρεθεί σε ανοξικές συνθήκες. Σε κάποιες περιπτώσεις, όπου έχει παρατηρηθεί σημαντική μεθανογένεση σε σωρούς compost, είναι πιθανό ότι τα μεθανογενή αρχαία μπορούν να βρεθούν εάν πραγματοποιηθεί στοχευμένη αναζήτηση. Ο λόγος για το σχετικά χαμηλό αριθμό των αρχαίων είναι ότι είναι συνήθως ολιγοτροφικά και οι χρόνοι παραγωγής τους είναι πολύ υψηλότεροι από αυτούς των βακτηρίων, γεγονός που τα καθιστά ακατάλληλα για διαδικασίες στις οποίες οι συνθήκες μεταβάλλονται με ταχύς ρυθμούς (Insam & De Bertoldi, 2007).

Οι βασικοί μικροοργανισμοί οι οποίοι δρουν στην διαδικασία της κομποστοποίησης είναι τα βακτήρια και οι μύκητες. Οι δύο αυτές κατηγορίες

μπορούν να μοιραστούν σε μικρότερες σύμφωνα με τις λειτουργίες τις οποίες εκτελούν οι μικροοργανισμοί. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι βασικότερες υποκατηγορίες καθώς και οι λειτουργίες και το αντιπροσωπευτικό γένος κάθε μίας.

Μικροοργανισμοί	Λειτουργίες	Αντιπροσωπευτικό γένος
Ακτινοβακτήρια	Σημαντικά για την υποβάθμιση της οργανικής ύλης και τα ανυποχώρητα πολυμερή όπως λιγνίνη και κυτταρίνη. Ανοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και pH. Διακλαδισμένη ανάπτυξη Προάγουν την ανάπτυξη των φυτών.	Nocardia spp. Streptomyces spp. Thermoactinomyces spp.
Βακτήρια Μεταφορά Αζώτου	Στερέωση Αζώτου Μείωση Νιτρικών Οξειδωση οργανικού αζώτου	Pseudomonas spp., Kebsiella spp., Xanthomonas spp., Alcaligenes spp. Bacillus spp. Nitrobacter spp., Nitrosomonas spp., Nitrospira spp., Nitrosococcus spp., Nitrosolobus spp., Nitrococcus spp.
Βακτήρια Διαλυτοποίησης Φωσφορικών	Διαλυτοποίηση φωσφόρου Απελευθέρωση φωσφορικών με παραγωγή ενζύμων	Pseudomonas spp., Bacillus spp., Enterobacter spp., Burkholderia fungorum Bacillus spp.
Μύκητες Διαλυτοποίησης Φωσφορικών	Διαλυτοποίηση φωσφόρου	Penicillium spp., Aspergillus spp. Ulocladium atrum
Βακτήρια Διαλυτοποίησης Καλίου	Διαλυτοποίηση των ορυκτών του εδάφους και συμβολή στην αύξηση του διαθέσιμου καλίου για τα φυτά	Bacillus spp.

Πίνακας 3 : Πίνακας Μικροοργανισμών (Sánchez et al., 2017).

2.4. Μεταβολή της Οργανική Ύλης

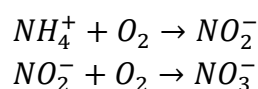
Κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης πραγματοποιούνται πολλές αλλαγές με τη βοήθεια των μεταβολικών διεργασιών που εκτελούν οι μικροοργανισμοί. Οι κυριότερες μεταβολές είναι η μετατροπή του αζώτου και του άνθρακα για τον σχηματισμό των χουμικών ουσιών.

2.4.1. Άζωτο

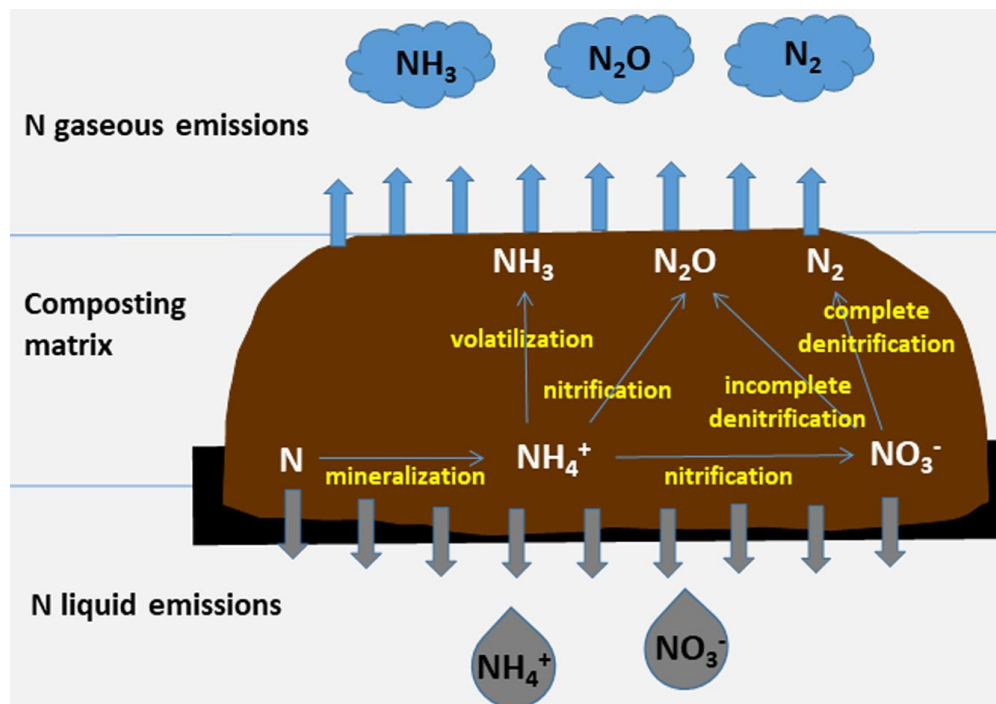
Το άζωτο στις πρώτες ύλες υπάρχει κυρίως σε οργανική μορφή και οι κύριες διαδικασίες που μπορούν να συμβούν κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης είναι οι εξής (Cáceres & Malin, 2018):

- Η αμμωνιοποίηση (ammonification - mineralization) δηλαδή η μετατροπή του οργανικού αζώτου σε αμμώνιο (NH_4^+)
- Η νιτροποίηση (nitrification), είναι η μετατροπή του αμμωνίου σε νιτρώδη και νιτρικά
- Η απονιτροποίηση (denitrification), είναι η μετατροπή των νιτρωδών και των νιτρικών σε αέριες μορφές αζώτου, όπως N_2 και NO_2
- Η ακινητοποίηση (immobilization) του αζώτου, όπου στην περίπτωση αυτή σχηματίζονται νέα οργανικά μόρια που περιέχουν άζωτο και δύσκολα διασπώνται

Με την παρουσία οξυγόνου το αμμώνιο (NH_4^+) οξειδώνεται διαδοχικά σε νιτρικά (NO_3^-) από συγκεκριμένες ομάδες βακτηρίων και αρχαίων. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει δύο στάδια, την αμμωνιοποίηση (απελευθέρωση αμμωνίου από οργανικό άζωτο) και την νιτροποίηση (περαιτέρω οξείδωση του αμμωνίου σε νιτρικά) (Cáceres & Malin, 2018).



Στη συνέχεια, το νιτρικό ή το αμμώνιο μπορούν να απορροφηθούν από τα φυτά για να συνθέσουν νέες οργανικές ενώσεις N που είναι απαραίτητες για τους ζωντανούς οργανισμούς. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται ο κύκλος του αζώτου κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης.



Εικόνα 6 : Κύκλος Αζώτου κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης (Cáceres & Malin, 2018).

2.4.2. Άνθρακας

Η οργανική ύλη είναι ετερογενής που αποτελείται από βασικά χημικά και δομικά στοιχεία. Τα κυριότερα στοιχεία που αποτελούν την οργανική ύλη είναι (Erstein, 1996):

- Υδατάνθρακες και Σάκχαρα
- Πρωτεΐνη
- Λιπαρά
- Ημικυτταρίνη
- Κυτταρίνη
- Λιγνίνη

Κατά τη θερμόφιλη φάση της διεργασίας η ποσότητα του οργανικού άνθρακα που υπάρχει στο διαθέσιμο υπόστρωμα μειώνεται λόγω της βιοαποδόμησης από τους μικροοργανισμούς (Μαργαρίτης, 2012). Στη διάρκεια της φάσης αυτής οι παραπάνω οργανικές ενώσεις διασπώνται οι πρώτες τρεις γρήγορα και οι επόμενες με μικρότερους ρυθμούς (Erstein, 1996). Κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης ο ρυθμός με τον οποίο διασπάται ο άνθρακας μειώνεται σταδιακά εξαιτίας της ελάττωσης των διαθέσιμων προς άμεση κατανάλωση οργανικών ενώσεων. Έτσι λοιπόν ξεκινάει το στάδιο της χουμοποίησης, δηλαδή η δημιουργία νέων πολύπλοκων οργανικών ενώσεων οι οποίες επικρατούν κυρίως κατά το στάδιο της ωρίμανσης. Η μείωση του άνθρακα οφείλεται στην μετατροπή της οργανικής ύλης σε άλλα ανόργανα συστατικά, κυρίως διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) το οποίο απομακρύνεται σε αέρια μορφή, και την ταυτόχρονη σταθεροποίηση των εναπομεινάντων οργανικών ενώσεων (Μαργαρίτης, 2012).

2.4.3. Χουμικές ουσίες

Οι χουμικές ουσίες σχηματίζονται από διαδικασία που ονομάζεται Χουμοποίηση, διαδικασία που είναι χασοτική, με αναρίθμητες αντιδράσεις να συμβαίνουν κάτω από αμέτρητες συνθήκες. Οι χουμικές ουσίες είναι κρίσιμα συστατικά των οικοσυστημάτων νερού και εδάφους, τα οποία είναι απαραίτητα για τη γένεση του εδάφους και την παγκόσμια διάθεση άνθρακα και θρεπτικών συστατικών (Mayhew, 2004).

Ο όρος «χούμος» έχει χρησιμοποιηθεί για να σημαίνει πολλά διαφορετικά πράγματα, με αποτέλεσμα τη σύγχυση. Μία από τις σημαντικότερες δυσκολίες που σχετίζονται με το «χούμο» είναι ότι δεν είναι μια συγκεκριμένη, αναγνωρίσιμη ένωση. Αντίθετα, αποτελείται από πολλά πολύπλοκα, αδιαχώριστα μίγματα μορίων, τα οποία μπορεί να διαφέρουν από πηγή σε πηγή (Malan, 2015). Οι χουμικές ουσίες μπορούν να χαρακτηριστούν ως μία κατηγορία οργανικών ουσιών που αποτελούνται από υψηλά μοριακά βάρη, τα οποία μπορούν να ξεκινάνε από 2.000 έως και 300.000. Οι κύριες κατηγορίες των χουμικών ουσιών είναι τα χουμικά οξέα και τα φουλβικά οξέα (Hall, 2004).

Η σημαντικότητα της ύπαρξης των χουμικών στοιχείων οφείλεται στα εξής (Epstein, 1996) :

- Βελτιώνουν τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους
- Προσθέτουν τα θρεπτικά συστατικά των φυτών στο έδαφος
- Αυξάνουν την ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων στο έδαφος
- Αυξάνουν την ικανότητα του εδάφους να κατακρατεί το νερό
- Το σκούρο χρώμα παρέχει θέρμανση στο έδαφος κατά τη πρώιμη άνοιξη
- Υποστηρίζουν και ενισχύουν τους μικροβιακούς πληθυσμούς
- Μειώνουν την τοξικότητα στο έδαφος

Χουμικά Οξέα

Τα χουμικά οξέα θεωρούνται εκείνα με το υψηλό μοριακό βάρος, λιγότερο οξειδωμένες μαύρες έως σκούρες καφέ ουσίες και το οποίο είναι το κλάσμα που δεν είναι διαλυτό στο νερό υπό όξινες συνθήκες (pH <2) αλλά είναι διαλυτό σε υψηλότερες τιμές pH. Τα χουμικά οξέα είναι το σημαντικότερο εξαγόμενο συστατικό των χουμικών συστατικών του εδάφους και είναι οι κύριες οργανικές ενώσεις του (Malan, 2015).

Φουλβικά Οξέα

Τα φουλβικά οξέα είναι διαλυτά στο νερό υπό όλες τις συνθήκες pH και παραμένουν σε διάλυμα μετά την απομάκρυνση του χουμικού οξέος με οξίνιση. Τα φουλβικά οξέα μπορούν επίσης να περιγραφούν ως «χουμικά οξέα» χαμηλότερου

μοριακού βάρους και υψηλότερης περιεκτικότητας σε οξυγόνο. Το χρώμα των φουλβικών οξέων μπορεί να ποικίλει από ανοιχτό κίτρινο έως καφέ (Malan, 2015).

2.5. Παράμετροι Ελέγχου της Διεργασίας

2.5.1. Θερμοκρασία

Η κομποστοποίηση είναι μια βίο-οξειδωτική διαδικασία μικροβιακής αποικοδόμησης μικτής οργανικής ύλης. Αυτή η εξώθερμη διαδικασία παράγει μια σχετικά μεγάλη ποσότητα ενέργειας. Μόνο το 40-50% αυτής της ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί από μικροοργανισμούς, ενώ η υπόλοιπη ενέργεια χάνεται ως θερμότητα στη μάζα. Αυτή η μεγάλη ποσότητα θερμότητας προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας στη μάζα και μπορεί να φτάσει θερμοκρασίες της τάξης των 70-90 °C. Για να υπάρχει υψηλό ποσοστό βιοαποδόμησης και μέγιστη μικροβιακή ποικιλομορφία, η θερμοκρασία πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 30 και 45 °C (Diaz & Savage, 2007). Ωστόσο, σε μια διαδικασία κομποστοποίησης, η θερμοφιλή φάση δεν πρέπει να εξαλειφθεί εντελώς επειδή είναι η πιο σημαντική φάση στη μείωση των παθογόνων μικροοργανισμών, η οποία συνήθως πρέπει να διατηρείται στους 55 °C για 3 έως 5 ημέρες τουλάχιστον (Azim et al., 2018). Επιπλέον, η θερμοφιλή φάση πρέπει να διατηρείται κατά την έναρξη της διαδικασίας, όταν η διαθεσιμότητα των άμεσα αποικοδομήσιμων μορίων επιτρέπει στις θερμοκρασίες να φτάσουν τους 70 °C (Diaz & Savage, 2007).

2.5.2. Αερισμός

Η παροχή οξυγόνου αποτελεί έναν πολύ σημαντικό παράγοντα για την διαδικασία της κομποστοποίησης, καθώς είναι απαραίτητο για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών. Με την βιολογική δράση των μικροοργανισμών το διαθέσιμο οξυγόνο αντικαθίσταται με το παραγόμενο διοξείδιο του άνθρακα (CO₂). Η παροχή του οξυγόνου με οποιοδήποτε τρόπο μπορεί να παρέχει τον «φρέσκο αέρα» τον οποίο χρειάζονται οι μικροοργανισμοί ώστε να μην επικρατήσουν αναερόβιες συνθήκες (Diaz et al., 2007).

2.5.3. Υγρασία

Το νερό είναι απαραίτητος παράγοντας για κάθε μικροβιακή δραστηριότητα και θα πρέπει να υπάρχει σε κατάλληλες ποσότητες σε όλη τη διάρκεια του κύκλου της κομποστοποίησης. Η βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρασία στο αρχικό υλικό ποικίλει και κυρίως εξαρτάται από τη φυσική κατάσταση, το μέγεθος των σωματιδίων και από το χρησιμοποιούμενο σύστημα κομποστοποίησης. Έχει βρεθεί ότι μία ιδανική περιεκτικότητα σε υγρασία του αρχικού υλικού της κομποστοποίησης είναι περίπου στο 60%. Επειδή υπάρχουν πολλοί συνδυασμοί πρώτων υλών, οι οποίες έχουν διαφορετικές ικανότητες συγκράτησης νερού, δεν

μπορεί να γίνει ακριβής γενίκευση σχετικά με τα βέλτιστα επίπεδα υγρασίας εκκίνησης ή χρονικής πορείας. Πολύ λίγη υγρασία σημαίνει πρώιμη αφυδάτωση της μάζας, η οποία σταματά τη βιολογική διαδικασία δίνοντας από την μία ένα φυσικώς σταθερό λίπασμα αλλά από την άλλη βιολογικά ασταθές (Diaz & Savage, 2007). Το υπερβολικό νερό τείνει να κλείσει τους πόρους, εμποδίζει την ανταλλαγή αερίων με αποτέλεσμα να δημιουργούνται αναερόβιες δραστηριότητες και να σταματούν οι υπάρχουσες της κομποστοποίησης (Makan et al., 2013).

Για τη διατήρηση της υγρασίας στα επιθυμητά επίπεδα, μπορεί να χρειαστεί περιοδική προσθήκη νερού για τη διατήρηση υψηλών επιπέδων μικροβιακής δραστηριότητας. Στο τέλος της διαδικασίας κομποστοποίησης, η περιεκτικότητα σε νερό θα πρέπει να είναι αρκετά χαμηλή (περίπου 30%) προκειμένου να αποφευχθεί οποιαδήποτε περαιτέρω βιολογική δραστηριότητα στο σταθεροποιημένο υλικό (Diaz & Savage, 2007).

2.5.4. pH

Η διαδικασία της κομποστοποίησης όσον αφορά το pH είναι αρκετά εύελικτη καθώς μπορεί το οργανικό υλικό να αποδομηθεί σε ένα ευρύ φάσμα pH, δηλαδή από 3 έως 11. Παρόλα αυτά, οι βέλτιστες τιμές είναι εκείνες μεταξύ 5,5 και 8, ενώ οι μικροοργανισμοί αναπτύσσονται με ταχύτερους ρυθμούς όταν το pH είναι ουδέτερο. Στην αρχή της διαδικασίας, το pH μπορεί να μειωθεί εξαιτίας των οργανικών οξέων που απελευθερώνονται κατά την αποσύνθεση απλών οργανικών υποστρωμάτων και πτητικοποίηση της αρχικής αμμωνίας. Μετά το τελείωμα των εύκολα αποικοδομήσιμων οργανικών υλικών, η παραγωγή μετάλλων οδηγεί στην αύξηση του pH. Μετά το πέρας της κομποστοποίησης αναλόγως με τις συνθήκες που επικρατούσαν το pH μπορεί να πάρει διάφορες τιμές, π.χ. εάν υπήρχε αποτελεσματικός αερισμός κατά τη διάρκεια της αποικοδόμησης τότε θα είχε πραγματοποιηθεί καλύτερη υποβάθμιση του οργανικού υλικού (Azim et al., 2018).

2.5.5. Λόγος C/N

Ο λόγος Άνθρακας προς Άζωτο (C/N) είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες ελέγχου της παραγωγής και της βελτιστοποίησης της ποιότητας του compost. Γενικότερα, ο αρχικός λόγος C/N προτείνεται να είναι ανάμεσα στις τιμές 20 με 40, ενώ η ελάττωση του είναι ένας τρόπος ελέγχου της ωρίμανσης του compost (Mortula et al., 2020). Σε compost όπου ο λόγος C/N είναι υψηλός, σημαίνει ότι η αποσύνθεση εξελίσσεται γρήγορα, γεγονός το οποίο μπορεί να προκαλέσει έλλειψη αζώτου για την ανάπτυξη των φυτών. Από την άλλη σε χαμηλούς λόγους C/N, η αμμωνία που απελευθερώνεται μπορεί να είναι τοξική για τα φυτά (Diaz & Savage, 2007). Έρευνες έχουν δείξει ότι για περιπτώσεις στις οποίες ως πρώτες ύλες χρησιμοποιούνται κλαδέματα και υπολείμματα φαγητών, η κομποστοποίηση μπορεί να λειτουργήσει ακόμα και σε λόγο C/N χαμηλότερο από 15 (Kumar et al., 2010). Η μείωση του λόγου C/N οφείλεται στην μείωση του ολικού

οργανικού άνθρακα, λόγω αποδόμησης του οργανικού φορτίου από τις βιολογικές διεργασίες που πραγματοποιούνται, και αύξηση του αζώτου, λόγω αποσύνθεσης των μικροοργανισμών που ήταν συστατικό των σωμάτων τους (Mortula et al., 2020).

2.5.6. Φυτοτοξικότητα

Το τελικό προϊόν κομποστοποίησης είναι ευεργετικό για την ανάπτυξη των φυτών, ενώ αν δεν έχει πραγματοποιηθεί η βιολογική σταθεροποίηση του μπορεί να αναπτυχθούν άσχημες οσμές και μικροοργανισμοί που είναι τοξικοί για τα φυτά (William F. Brinton, 2000). Παρόλο που συχνά χρησιμοποιούνται διαφορετικές διαδικασίες για την περιγραφή του βαθμού ωρίμανσης του compost, συνήθως αξιολογείται με δοκιμές φυτοτοξικότητας (Cesaro et al., 2015). Η εφαρμογή compost υψηλής φυτοτοξικότητας θα οδηγούσε στην αναστολή της βλάστησης των σπόρων, καταστροφή της ρίζας των φυτών, μείωση της ανάπτυξης τους και καταστροφή των καλλιεργειών λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε φυτοτοξίνη. Ως εκ τούτου, η αξιολόγηση του βαθμού φυτοτοξικότητας των προϊόντων κομποστοποίησης είναι απαραίτητη για επίτευξη κομποστοποίησης υψηλής ποιότητας. Ο δείκτης βλάστησης (GI) έχει χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του επιπέδου φυτοτοξικότητας του υλικά κομποστοποίησης (Cui et al., 2017).

2.5.7. Μέγεθος σωματιδίων

Η μικροβιακή δραστηριότητα σχετίζεται με το μέγεθος των σωματιδίων και πιο συγκεκριμένα έχει να κάνει με την εύκολη ή δύσκολη πρόσβαση των μικροοργανισμών στο εκάστοτε υπόστρωμα. Όταν το μέγεθος των σωματιδίων είναι μικρό, αυτό σημαίνει ότι αυξάνεται η συγκεκριμένη επιφάνεια με αποτέλεσμα την ευκολότερη διείσδυση των μικροοργανισμών στο υπόστρωμα. Το ιδανικό μέγεθος σωματιδίων των υλικών που χρησιμοποιούνται για κομποστοποίηση είναι μεταξύ των 5 έως 20 cm. Για τιμές μεγαλύτερες των 30cm, εμποδίζεται ο αερισμός με συνέπεια την μείωση της θερμοκρασίας και καθυστέρηση της όλης διαδικασίας. Από την άλλη, για τιμές μικρότερες των 5cm, τα μικρά σωματίδια σχηματίζουν μικρούς πόρους που γεμίζουν νερό και διευκολύνουν την συμπύκνωση του υλικού με αποτέλεσμα την δημιουργία αναερόβιων συνθηκών (Meena et al., 2021).

Κεφάλαιο 3ο : Πειραματικό Μέρος

Στόχος της παρούσας διπλωματικής είναι η παρακολούθηση των κρίσιμων παραμέτρων σε κομποστοποιήσεις με διαφορετικές αναλογίες τροφικών υπολείμματων και κλαδεμάτων, με βασική διαφορά το γεγονός ότι τα υπολείμματα τροφών είναι semi-dry (5ώρη ξήρανση).

3.1. Πρώτες Ύλες

3.1.1. Υπολείμματα Τροφών

Τα υπολείμματα τροφών είναι ένα μεγάλο μέρος των στερεών αποβλήτων που προκύπτουν καθημερινά ενώ η χρήση τους για την παραγωγή compost είναι μία αρκετά αποδοτική μέθοδος ώστε να αξιοποιηθούν και να ανακυκλωθούν.

Σε συνεργασία με τον Δήμο Χαλανδρίου πραγματοποιήθηκε συλλογή τροφικών υπολειμμάτων, με τη βοήθεια των καφέ κάδων που έχουν τοποθετηθεί στον δήμο. Μετά τη συλλογή τους, τα απόβλητα μεταφέρθηκαν στο Πολυτεχνείο όπου έχει τοποθετηθεί ξηραντήρας χωρητικότητας 150 kg. Ο ξηραντήρας λειτουργεί στους 170 °C και συνεχώς αναδύει και τεμαχίζει το περιεχόμενο έτσι ώστε να ομογενοποιηθεί. Με αυτόν τον τρόπο, πραγματοποιήθηκε 5ώρη ξήρανση των τροφικών υπολειμμάτων ώστε να παραχθεί ένα semi-dry προϊόν, το οποίο φαίνεται στην Εικόνα 7. Η ξήρανση είναι ένα κομμάτι που βοηθάει στην κομποστοποίηση ώστε να μειωθεί ο όγκος της πρώτης ύλης. Επιπλέον, η 5ωρη ξήρανση αποτέλεσε μία καινοτομία με στόχους : πρώτον την μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης, λιγότερη χρήση του ξηραντήρα, και δεύτερον την ανάγκη για υψηλότερο περιεχόμενο σε υγρασία.

3.1.2. Παράγοντας Διόγκωσης (Bulking Agent)

Ο παράγοντας διόγκωσης είναι απαραίτητος ώστε να επιτυγχάνεται αποτελεσματική διάθεση χώρου και να επικρατούν αερόβιες συνθήκες. Επιπλέον, βοηθάει στην διαφυγή των εκπομπών της αμμωνίας και των πτητικών στερεών, ενώ ταυτόχρονα ρυθμίζει τον λόγο C/N και την περιεχόμενη υγρασία λόγω των κενών που δημιουργούνται (Iqbal et al., 2010).

Για την παρούσα διπλωματική ως παράγοντας διόγκωσης χρησιμοποιήθηκαν κλαδέματα, κομμένα κλαδιά και φύλλα τα οποία μαζεύτηκαν και τεμαχίστηκαν με τη βοήθεια του δήμου Χαλανδρίου. Τα κλαδέματα είναι ένα υλικό που είναι εύκολα διαθέσιμο και μπορεί να προσφέρει όλα τα παραπάνω ώστε να επιτευχθεί η κομποστοποίηση.

Στην Εικόνα 7 φαίνονται οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιήθηκαν για την κομποστοποίηση.



Εικόνα 7 : Τροφικά Υπολείμματα και Κλαδέματα.

3.2. Διάταξη Κομποστοποίησης

Σε οικιακούς κομποστοποιητές χωρητικότητας 280L, της εταιρείας Garantia, πραγματοποιήθηκαν ταυτόχρονα και οι δύο κομποστοποιήσεις με διαφορά μίας εβδομάδας. Οι διατάξεις στήθηκαν έξω από το εργαστήριο της Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας, σε μέρος στο οποίο οι κλιματικές συνθήκες επηρέαζαν την κομποστοποίηση. Οι δύο κομποστοποιήσεις διαφέρουν στις αναλογίες των τροφικών υπολειμμάτων και των κλαδεμάτων, ενώ η συνολική αρχική μάζα που προστέθηκε στους κομποστοποιητές ήταν ίδια και στις δύο περιπτώσεις.



Εικόνα 8 : Οικιακοί Κομποστοποιητές.

Η διάταξη υφίσταται καθημερινή μηχανική ανάδευση ώστε να επιτευχθεί ο απαραίτητος αερισμός για την κομποστοποίηση. Η θερμοκρασία του compost καθώς και η θερμοκρασία του περιβάλλοντος καταγραφόταν καθημερινά. Επιπλέον σημαντικό ήταν η υγρασία του compost να παραμένει κοντά στο 50%, πράγμα το οποίο επιτεύχθηκε με την προσθήκη νερού. Έπειτα από τον υπολογισμό της υγρασίας με τη μέθοδο της ξήρανσης, ώστε να είναι πιο ακριβής η μέτρηση, υπολογιζόταν η μάζα του νερού όπου έπρεπε να προστεθεί σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο :

$$m_{ολικό} \cdot W_{επιθυμητό} = m_{compost} \cdot W_{compost} + m_{νερό} \cdot W_{νερού}$$

Όπου :

$m_{ολικό}$: η ολική μάζα του compost, δηλαδή $m_{compost}$ και $m_{νερού}$ [kg]

$W_{επιθυμητό}$: η επιθυμητή υγρασία, δηλαδή 50% [%]

$m_{compost}$: η μάζα του compost [kg]

$W_{compost}$: η υγρασία που μετρήθηκε [%]

$m_{νερού}$: η μάζα του νερού που πρέπει να προστεθεί [kg]

$W_{νερού}$: η υγρασία του νερού, δηλαδή 100% [%]

3.2.1. Αναλογία Τροφικών Υπολειμμάτων : Κλαδέματα – 50:50 (Compost 1)

Η έναρξης της πρώτης κομποστοποίησης ξεκίνησε στις 10 Ιουνίου και τελείωσε στις 10 Σεπτεμβρίου, κράτησε συνολικά 92 ημέρες. Στη διάταξη αυτή τοποθετήθηκαν 25 kg τροφικών υπολειμμάτων και 25 kg κλαδέματα, αμέσως μετά την ξήρανση, με τρόπο τέτοιο ώστε να δημιουργηθούν εναλλάξ στρώσεις των πρώτων υλών. Με την διαμόρφωση αυτή πραγματοποιείται μεγαλύτερη ομοιογένεια και εξασφαλίζονται τα κενά που χρειάζονται για να πραγματοποιηθεί αερόβια αποικοδόμηση. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε έντονη ανάδευση και έγινε δειγματοληψία για τον χαρακτηρισμό της πρώτης μέρας. Στο παρακάτω πίνακα φαίνονται τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά του compost.

Παράμετρος	Compost	Food Waste	Κλαδέματα
Θερμοκρασία	37	80	25
Υγρασία	31,2 %	47,9%	14,8%
Πτητικά Στερεά	59,0 % (d.b.)	47,0%	74,3%
pH	6,7	-	-
Αγωγιμότητα	2,1 mS/cm	-	-
C/N	19,0	-	-

Πίνακας 4 : Αρχικός χαρακτηρισμός Compost 1.

3.2.2. Αναλογία Τροφικών Υπολειμμάτων : Κλαδέματα – 75:25 (Compost 2)

Η έναρξης της δεύτερης κομποστοποίησης ξεκίνησε στις 17 Ιουνίου και τελείωσε στις 10 Σεπτεμβρίου, κράτησε συνολικά 85 ημέρες. Στη διάταξη αυτή τοποθετήθηκαν 37,5 kg τροφικών υπολειμμάτων και 12,5 kg κλαδέματα, έπειτα από την ξήρανση, με τρόπο τέτοιο ώστε να δημιουργηθούν εναλλάξ στρώσεις των πρώτων υλών, όμοια με την πρώτη ώστε να υπάρξει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ομοιογένεια. Ακολούθησε ανάδευση και πραγματοποίηση δειγματοληψίας για τον χαρακτηρισμό της πρώτης μέρας. Στο παρακάτω πίνακα φαίνονται τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά του compost.

Παράμετρος	Compost	Food Waste	Κλαδέματα
------------	---------	------------	-----------

Θερμοκρασία	25	25	25
Υγρασία	50,0 %	58,5%	24,8%
Πτητικά Στερεά	56,0 %	-	-
pH	6,0	-	-
Αγωγιμότητα	2,3 mS/cm	-	-
C/N	18,8	-	-

Πίνακας 5 : Αρχικός χαρακτηρισμός Compost 2.

3.3. Μέθοδοι ανάλυσης

Οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν είναι πρότυπες μέθοδοι προσδιορισμού και βασίζονται στις μεθόδους ανάλυσης του compost (Quality, 2002).

Παρακάτω παριστάνονται συνοπτικά οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν με βάση την φυσική κατάσταση του δείγματος.

Αναλύσεις	
Αναλύσεις σε υγρό δείγμα	pH
	Αγωγιμότητα
	Υγρασία
	Φυτοτοξικότητα
Αναλύσεις σε ξηρό δείγμα (2 ημέρες στους 45 °C)	Πτητικά Στερεά
	TOC
	TKN
	Χουμικά - Φουλβικά

Πίνακας 6 : Αναλύσεις Compost.

Η υγρασία και τα πτητικά στερεά ήταν προγραμματισμένα να μετριοούνται δύο φορές την εβδομάδα όπως και το pH και η αγωγιμότητα. Για τον ολικό οργανικό άνθρακα και το ολικό άζωτο κατά Kjeldahl πραγματοποιούνταν μετρήσεις μία φορά την εβδομάδα. Τέλος, τα χουμικά – φουλβικά και η φυτοτοξικότητα ήταν μετρήσεις που ξεκίνησαν τον τελευταίο μήνα, για να ελεγχθεί κατά πόσο έχει ωριμάσει το compost και να εκτιμηθεί η ποιότητα του.

3.2.1 Διαχείριση δείγματος

Η δειγματοληψία, η προετοιμασία του προς ανάλυση δείγματος καθώς και η αποθήκευση του αποτελούν ένα σημαντικό κομμάτι για εγκυρότητα των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στην εν λόγω εργασία. Συγκεκριμένα, η δειγματοληψία κάθε φορά γινόταν με την μέθοδο “Triple Sampling” σύμφωνα με την οποία λαμβάνονται τρία δείγματα από το διαφορετικά σημεία, έτσι ώστε να αποφευχθούν τυχόν διαφοροποιήσεις και ανομοιογένειες.

Μετά την συλλογή τους, το δείγμα τοποθετούνταν σε «μπλέντερ» έτσι ώστε να ομογενοποιηθεί όσο το δυνατόν περισσότερο. Η προετοιμασία του δείγματος εξαρτάται από την μέθοδο ανάλυσης, σε κάποιες μετρήσεις χρησιμοποιείται νωπό, ενώ σε άλλες απαιτείται ξήρανση σε θερμοκρασίες 45°C , 105°C ή 550°C.

Τέλος, για την διασφάλιση της εγκυρότητας των μετρήσεων, καθημερινά συλλεγόταν ενδεικτική ποσότητα δείγματος, η οποία τοποθετούνταν στο ψυγείο μέσα σε αεροστεγώς κλεισμένα σακουλάκια ώστε να μην αλλοιωθεί το δείγμα. Η αποθήκευση είχε ως πρωταρχικό σκοπό την επανάληψη των μετρήσεων για υλικό προηγούμενων ημερών, σε περίπτωση που οι αναλύσεις της ίδιας μέρα δεν πετύχαιναν.

3.2.2. Μέτρηση Θερμοκρασίας (Temperature)

Η θερμοκρασία μέσα στον αντιδραστήρα μετρήθηκε με τη βοήθεια ηλεκτρονικού θερμομέτρου, Laboratory Thermometer LT-101, το οποίο περιέχει αισθητήρα για γρήγορη και ακριβή μέτρηση. Οι τιμές θερμοκρασίας περιβάλλοντος είναι από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών από το σταθμό Αμπελοκήπων καθώς αυτοί ήταν οι πλησιέστεροι σταθμοί στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου.

3.2.3. Προσδιορισμός Υγρασίας (Moisture)

Η μέτρηση της υγρασίας πραγματοποιήθηκε με δύο τρόπους, η πρώτη είναι ο θερμοζυγός, μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για άμεση εκτίμηση της θερμοκρασίας και η δεύτερη είναι μέσω ξήρανσης.

Μέθοδος 1^η : Θερμοβαρυμετρία

Η θερμοβαρυμετρία αποτελεί βασική μέθοδο θερμικής ανάλυσης, κατά την οποία προσμετρείται η μεταβολή μάζας δείγματος σε σχέση με την πάροδο του χρόνου και τη μεταβολή της θερμοκρασίας. Συγκεκριμένα, το δείγμα θερμαίνεται, έως περίπου τους 120°C, ενώ παράλληλα υπολογίζεται και η διαφορά μάζας την οποία έχει υποστεί. Η μέτρηση σταματάει όταν η τιμή της μάζας σταθεροποιηθεί, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι έχει αφαιρεθεί όλη η ποσότητα νερού που υπήρχε στο δείγμα. Για την μέτρηση χρησιμοποιήθηκε θερμοζυγός (μοντέλο Adam AMB 50 - Moisture Balance) για την γρήγορη εκτίμηση της υγρασίας των δειγμάτων. Η

μέτρηση μπορεί να διαρκέσει έως και 1 ώρα, αν και δεν είναι όσο ακριβής είναι η δεύτερη μέθοδος, δίνει μία αρκετά προσεγγιστική τιμή του ποσοστού υγρασίας. Στην Εικόνα 9 απεικονίζεται ο θερμοζυγός που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια των αναλύσεων.



Εικόνα 9 : Θερμοζυγός

Μέθοδος 2^η : Ξήρανση

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη ξήρανση των δειγμάτων σε θερμοκρασία 103 - 105 °C, θερμοκρασία στην οποία έχει εξατμιστεί όλη η περιεχόμενη υγρασία. Ο προσδιορισμός της υγρασίας γίνεται με βάση την μέθοδο που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των ολικών στερεών. Έπειτα από τον υπολογισμό των ολικών στερεών υπολογίζεται και η συνολική υγρασία σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο :

$$\% \text{ Moisture} = 100 - \% \text{ Total Solids}$$

3.2.4. Προσδιορισμός Ολικών Στερεών (Total Solids – TS)

Ο προσδιορισμός των ολικών στερεών βασίζεται στη ξήρανση των δειγμάτων σε θερμοκρασία 103 - 105 °C, θερμοκρασία στην οποία έχει εξατμιστεί όλη η περιεχόμενη υγρασία και παραμένουν μόνο τα ξηρά στερεά. Πιο αναλυτικά, κάψα

τοποθετείται στο φούρνο των 550 °C για 20 min και στη συνέχεια αφήνεται στον ξηραντήρα μέχρι να κρυώσει. Ζυγίζεται η μάζα της η οποία καταγράφεται και στη συνέχεια μηδενίζοντας τον ζυγό προθέτουμε το δείγμα, του οποίου η μάζα επίσης καταγράφεται. Το δείγμα τοποθετείται στο φούρνο των 105 °C για 24 ώρες, ένα χρονικό διάστημα στο οποίο έχει αφαιρεθεί όλη η ποσότητα της περιεχόμενης υγρασίας. Αφού η κάψα βγει από τον φούρνο τοποθετείται στον ξηραντήρα για λίγη λεπτά και στη συνέχεια τοποθετείται στο ζυγό και καταγράφεται η μάζα της.

Το περιεχόμενο ποσοστό των ολικών στερεών υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο :

$$\% \text{ Total Solids} = \frac{m_{1050C} - m_{\kappa}}{m_{\delta} - m_{\kappa}}$$

Όπου :

m_{κ} : μάζα της κάψας [g]

m_{δ} : μάζα του νωπού δείγματος [g]

m_{1050C} : μάζα του δείγματος έπειτα από ξήρανση στους 105 °C για 24 ώρες [g]

3.2.5. Προσδιορισμός Πτητικών Στερεών (Volatile Solids – VS)

Τα πτητικά στερεά είναι ένας δείκτης της οργανικής ύλης καθώς στην θερμοκρασία των 550 °C εξαερώνονται όλες τα οργανικά στερεά που περιέχονται στο δείγμα. Πιο αναλυτικά, το δείγμα και η κάψα που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των ολικών στερεών τοποθετούνται στον φούρνο των 550 °C για 2 ώρες. Στη συνέχεια η κάψα τοποθετείται στο ξηραντήρα και μετά από περίπου 30 min, όπου θα έχει κρυώσει η κάψα, ζυγίζεται και καταγράφεται η τιμή της μάζας του.

Το περιεχόμενο ποσοστό των πτητικών στερεών υπολογίζεται με δύο τρόπους :

- i. $\% \text{ Volatile Solids} = \frac{m_{1050C} - m_{5500C}}{m_{1050C}}$, σε ξηρή βάση (dry base)
- ii. $\% \text{ Volatile Solids} = \frac{m_{1050C} - m_{5500C}}{m_{\delta}}$, σε νωπή βάση (wet base)

Όπου :

m_{δ} : μάζα του νωπού δείγματος

m_{1050C} : μάζα του δείγματος έπειτα από ξήρανση στους 105 °C για 24 ώρες

m_{5500C} : μάζα του δείγματος έπειτα από ξήρανση στους 550 °C για 2 ώρες

Τα αποτελέσματα στα διαγράμματα υπολογίζονται σε ξηρή βάση διότι η υγρασία δεν παραμένει σταθερή και είναι πιο κατανοητό τα πτητικά στερεά να εκφράζεται ως ποσοστό των ολικών στερεών.

3.2.6. Προσδιορισμός pH

Για τη μέτρηση του pH διαλύεται μικρή ποσότητα δείγματος, αφού έχει ομογενοποιηθεί, σε απιονισμένο νερό σε αναλογία 1:10. Σε ένα ποτήρι ζέσεως τοποθετούνται 5gr δείγματος και προστίθενται 50ml απιονισμένου νερού. Στη συνέχεια τοποθετείται σε μαγνητικό αναδευτήρα για 30 λεπτά. Μετά την ανάδευση ακολουθεί η διήθηση του, έτσι ώστε να συλλεχθεί το υγρό και να μετρηθεί το pH του.

3.2.7. Προσδιορισμός Αγωγιμότητας (Electrical Conductivity)

Για τη μέτρηση της αγωγιμότητας διαλύεται μικρή ποσότητα δείγματος, αφού έχει ομογενοποιηθεί, σε απιονισμένο νερό σε αναλογία 1:10. Σε ένα ποτήρι ζέσεως τοποθετούνται 5gr δείγματος και προστίθενται 50ml απιονισμένου νερού. Στη συνέχεια τοποθετείται σε μαγνητικό αναδευτήρα για 30 λεπτά. Μετά την ανάδευση ακολουθεί η διήθηση του, έτσι ώστε να συλλεχθεί το υγρό και να μετρηθεί η αγωγιμότητα του.

Η μέτρηση pH και αγωγιμότητας πραγματοποιούνταν μαζί καθώς η διαχείριση του δείγματος ήταν ακριβώς η ίδια.

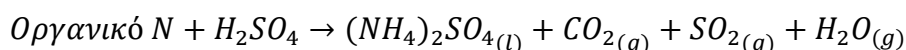
3.2.8. Προσδιορισμός Ολικού Αζώτου κατά Kjeldahl - TKN

Η μέθοδος ανάλυσης Ολικού Αζώτου κατά Kjeldahl βασίζεται στην 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.

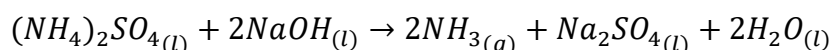
Θεωρία Μεθόδου

Παρακάτω παριστάνονται με την σειρά οι χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται :

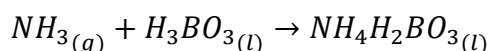
- Χώνευση οργανικής ύλης



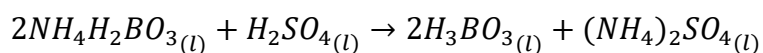
- Αλκαλική απόσταξη



- Παγίδευση αποστάγματος



- Τίτλοδότηση



Συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν :

- i. SpeedDigester K-425 Buchi (Συσκευή χώνευσης)
- ii. Scrubber K-415 Buchi (Συσκευή διαχείρισης απαερίων της χώνευσης)
- iii. Kjelflex K-360 Buchi (Συσκευή απόσταξης)
- iv. Φλάσκες των 300ml

Αντιδραστήρια που χρησιμοποιήθηκαν και τρόπος παρασκευής τους :

- i. Καταλύτης χώνευσης
Παρασκευή : K_2SO_4 - $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ - TiO_2 με αναλογία μάζας 100:3:3
- ii. H_2SO_4 98%
- iii. CH_4N_2O (ουρία) 1.056 g/L (492,5 mgN/L)
Παρασκευή : Διαλύονται 1.056 g ουρίας (>99.0%) σε 1 L απιονισμένο νερό
- iv. NaOH 32%
Παρασκευή: 320 g NaOH διαλύονται σε 1 L απιονισμένο νερό
- v. NaOH 0.1 M
Παρασκευή : 4 g NaOH διαλύονται σε 1 L απιονισμένο νερό
- vi. H_3BO_3 2%+ KCl (3g/L)
Παρασκευή : 20 g H_3BO_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
- vii. H_2SO_4 0.01 M για την τιτλοδότηση
Παρασκευή: 100 ml H_2SO_4 0.1 M και 900ml απιονισμένο νερό
- viii. Δείκτης τιτλοδότησης : Bromocresol Green/Methyl Red, mixed indicator solution

Παρακάτω στις εικόνες φαίνονται οι συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν.



Εικόνα 10 : Συσσκευή Kjelflex K-360 Buchi – Συσσκευή Απόσταξης.



Εικόνα 11 : Φιάσκες πριν την χώνευση.

Προετοιμασία δείγματος

Μικρή ποσότητα δείγματος συλλέγεται και χρησιμοποιείται το μπλέντερ ώστε να ομογενοποιηθεί και στη συνέχεια το δείγμα τοποθετείται στους 45 °C για 48 ώρες. Η ξήρανση σε υψηλές θερμοκρασίες δεν είναι επιθυμητή για τη μέτρηση αζώτου. Μετά το τέλος της ξήρανσης το δείγμα ομογενοποιείται πάλι στο μπλέντερ

και κοσκινίζεται με κόσκινο 710μm ώστε να συλλεχθεί λεπτόκοκκη σκόνη, η οποία χρησιμοποιείται για την μέτρηση.

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 ένα 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 compost 0,15 g δείγμα.

Αρχικά με πιπέτα των 5ml τοποθετούνται 25ml απιονισμένου νερού στην πρώτη φιάσκα και 20ml στη δεύτερη, ακολουθεί η προσθήκη 5ml του πρότυπου διαλύματος ουρίας στην δεύτερη φιάσκα και 0,15 g δείγματος στις υπόλοιπες φιάσκες. Τίθεται σε λειτουργία ο SpeedDigester, με το διακόπτη στο 7 (στους 410 °C) και το χρονόμετρο στα 75 λεπτά.

Περιεχόμενο	Απιονισμένο νερό (mL)	Standard Ουρίας (mL)	Καταλύτης (g)	Πυκνό H ₂ SO ₄ (mL)	Sample (g)
Blank	25	-	3,72	8	-
Standard	20	5	3,72	8	-
Sample	-	-	3,72	8	0,15

Πίνακας 7 : Αντιδραστήρια στις φιάσκες - Μέθοδος Kjeldahl.

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 οι φιάσκες έχουν αποκτήσει θερμοκρασία περιβάλλοντος και έχουν αποχρωματιστεί.



Εικόνα 12 : Φιάσκες μετά από την χώνευση.

Τοποθετείται ο Kjelflex στη θέση ON και έπειτα ακολουθεί η προθέρμανση της συσκευής, το priming και ο καθαρισμός. Εφόσον οι φιάσκες έχουν αποκτήσει θερμοκρασία περιβάλλοντος ξεκινάει η απόσταξη με τη μέθοδο TKNs – NEW. Έπειτα τιτλοδοτούνται τα δείγματα με H_2SO_4 0,01 M και δείκτη Bromocresol Green/ Methyl Red.

Παρακάτω φαίνεται ο τύπος υπολογισμού του ποσοστού TKN :

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

Όπου :

V_{sample} : όγκος του θεικού οξέος που κατανάλωσε το δείγμα [mL]

V_{blank} : όγκος του θεικού οξέος που κατανάλωσε το blank [mL]

Ar_N : μοριακό βάρος αζώτου, 14,007 mol/L

$N_{H_2SO_4}$: κανονικότητα διαλύματος θεικού οξέος, 0,02 N [mol/L]

m_{sample} : μάζα του δείγματος [g]

Επιπλέον υπολογίζεται και η ανάκτηση – Recovery Rate σύμφωνα με τον τύπο :

$$Recovery = \frac{N_{actual}}{N_{theoretical}} \cdot 100$$

Όπου :

N_{actual} : πραγματική τιμή περιεχομένου αζώτου στο διάλυμα ουρίας

$N_{\text{theoretical}}$: θεωρητική τιμή περιεχομένου αζώτου στο διάλυμα ουρίας

Στο τέλος το %TKN διαιρείται με το Recovery. Το %TKN είναι υπολογισμένο σε ξηρή βάση καθώς το δείγμα που μετρήθηκε είχε υποστεί ξήρανση.

3.2.9. Προσδιορισμός Ολικού Οργανικού Άνθρακα – TOC

Προετοιμασία δείγματος

Μικρή ποσότητα δείγματος συλλέγεται και χρησιμοποιείται το μπλέντερ ώστε να ομογενοποιηθεί και στη συνέχεια το δείγμα τοποθετείται στους 45 °C για 48 ώρες. Η ξήρανση σε υψηλές θερμοκρασίες δεν είναι επιθυμητή για τη μέτρηση αζώτου. Μετά το τέλος της ξήρανσης το δείγμα ομογενοποιείται πάλι στο μπλέντερ και κοσκινίζεται με κόσκινο 710μm ώστε να συλλεχθεί λεπτόκοκκη σκόνη, η οποία χρησιμοποιείται για την μέτρηση.

Πειραματική διαδικασία

Ποσότητα ξηραμένου και τεμαχισμένου δείγματος, περίπου 40 με 50 mg, ζυγίζεται μέσα σε προξηραμένες κάψες και σημειώνεται ακριβώς η μάζα του. Στη συνέχεια αφού έχει προθερμανθεί ο TOC analyzer (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 CO₂ (Total Carbon). Πραγματοποιείται μέτρηση του ολικού άνθρακα (Total Carbon) και του ανόργανου άνθρακα (Inorganic Carbon) και ο ολικός οργανικός άνθρακας (Total Organic Carbon) προκύπτει από τη διαφορά του ολικού άνθρακα από τον ανόργανο άνθρακα. Δηλαδή :

$$TOC = TC - IC$$

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ανόργανου άνθρακα στα δείγματα του compost και παρατηρήθηκε ότι το ποσοστό του είναι πολύ μικρό σε σχέση με τον ολικό άνθρακα, συγκεκριμένα είναι της τάξης των 0,5%. Για αυτό το λόγο θεωρήθηκε αμελητέος ο ανόργανος άνθρακας.

Για κάθε δείγμα compost πραγματοποιήθηκαν διπλές επαναλήψεις για να είναι πιο σίγουρη η μέτρηση. Το %TOC είναι υπολογισμένο σε ξηρή βάση καθώς το δείγμα που μετρήθηκε είχε υποστεί ξήρανση.



Εικόνα 13 : Συσκευή μέτρησης Ολικού Άνθρακα.

3.2.10. Προσδιορισμό λόγου C/N

Ο λόγος C/N όπως έχει αναφερθεί είναι μία πολύ σημαντική παράμετρος η οποία υπολογίζεται με τη βοήθεια του προσδιορισμού του Ολικού Αζώτου κατά Kjeldahl και του Ολικού Οργανικού Άνθρακα. Συγκεκριμένα χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος :

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

3.2.11. Προσδιορισμός Φυτοτοξικότητας (Germination Index (GI))

Η φυτοτοξικότητα είναι ένας σημαντικός παράγοντας ελέγχου για την ωρίμανση του compost καθώς ανιχνεύει την αρνητική επίπτωση που μπορεί να έχει η πρώιμη χρήση του compost στην ανάπτυξη των φυτών.

Η μέτρηση αποτελείται από τρία στάδια : την παρασκευή του υδατικού διαλύματος του compost, τη χρήση του υδατικού διαλύματος στους σπόρους του κάρδαμου και τέλος την μέτρηση των σπόρων και τον υπολογισμό των δεικτών που χρειάζονται για τη μέτρηση του δείκτη φυτοτοξικότητας.

Πειραματική διαδικασία

Ζυγίζονται 10 g υγρού δείγματος compost και προστίθεται 100 mL απιονισμένο νερό, ώστε να επιτευχθεί αναλογία 1:10. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται 1 ώρα ανάδευση με μαγνητικό αναδευτήρα, ενώ ακολουθεί φυγοκέντρηση σε 3000 rpm για 15 λεπτά. Το υγρό συλλέγεται και διηθείται υπό κενό με διηθητικό χαρτί.

Σε petri τρυβλία των 9 cm τοποθετούνται 4 στρώσεις διηθητικού χαρτιού ώστε να καλύπτονται τα τοιχώματα. Σε κάθε ένα από τα τρυβλία τοποθετούνται 10 σπόροι από κάρδαμο και 10 mL από το διήθημα με πιπέτα των 5 mL. Αντίστοιχα παρασκευάζονται και τρυβλία με 10 mL απιονισμένο νερό, τα οποία θεωρούνται blank. Συνολικά παρασκευάζονται 4 επαναλήψεις με το διήθημα του compost (Sample) και 3 με απιονισμένο νερό (Blank). Τα τρυβλία στη συνέχεια τοποθετούνται σε μέρος όπου δεν τα βλέπει το φως και σε σταθερή θερμοκρασία 22 – 25 °C για 5 ημέρες. Μετά το πέρας των ημερών αφαιρούνται τα φυτά από τα τρυβλία, μετριοούνται αυτά που έχουν βλαστήσει καθώς και το μήκος των ριζών τους.

Υπολογισμός

Για τον υπολογισμό του δείκτη φυτοτοξικότητας χρησιμοποιούνται οι παρακάτω τύποι :

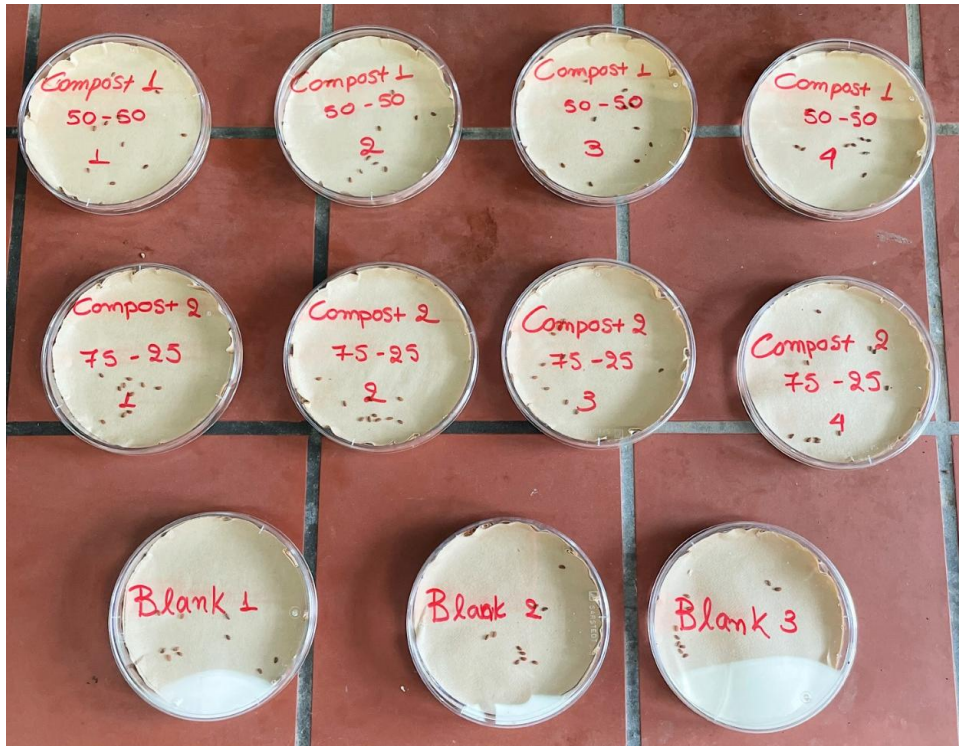
$$\text{Relative Seed Growth} = \frac{\text{Number of germinated seeds (Sample)}}{\text{Number of germinated seeds (Blank)}}$$

$$\begin{aligned} \text{Relative Radicle Growth} \\ = \frac{\text{Total radicle length of germinated seeds (Sample)}}{\text{Total radicle length of germinated seeds (Blank)}} \end{aligned}$$

$$\text{Germination Index} = \text{RSG} \cdot \text{RRG} \cdot 100\%$$

Πιο συγκεκριμένα για τον υπολογισμό του RSG μετριοούνται οι σπόροι που άνθισαν από κάθε τρυβλίο και για κάθε δείγμα βγαίνει ένας μέσος όρος από τις 4 επαναλήψεις. Επιπλέον για τον RRG μετριοείται το μήκος όλων των σπόρων που άνθισαν μέσα στο τρυβλίο με τη βοήθεια ενός χάρακα. Στη συνέχεια βγαίνει ο μέσος όρος για το μήκος των σπόρων για κάθε τρυβλίο και στη συνέχεια ο μέσος όρος κάθε δείγματος για τις 4 επαναλήψεις. Ομοίως γίνεται και στην περίπτωση του Blank ενώ για τον υπολογισμό των παραπάνω δεικτών διαιρούνται οι μέσοι όροι που βρέθηκαν από το κάθε δείγμα προς εκείνο που βγήκε από το Blank.

Στην Εικόνα 14 φαίνονται τα τρυβλία petri που χρησιμοποιήθηκαν για την μέτρηση του δείκτη φυτοτοξικότητας.



Εικόνα 14 : Ανάλυση Φυτοτοξικότητας.

3.2.12. Προσδιορισμός Χουμικών και Φουβλικών Οξέων (Humic and Foulvic Acids)

Τα χουμικά και φουβλικά οξέα είναι δύσκολα υπολογίσιμα εξαιτίας της πολυπλοκότητας τους σαν ενώσεις. Από την βιβλιογραφία έχει βρεθεί πως ο μόνος τρόπος για να διαχωριστούν μεταξύ τους είναι η μεταβολή του pH από βασικό σε όξινο. Με αυτό τον τρόπο τα χουμικά που είναι διαλυμένα στο βασικό pH όταν βρεθούν σε όξινο pH πέφτουν στον πάτο σαν ίζημα, ενώ τα χουμικά που είναι διαλυτά σε όλο το εύρος pH παραμένουν στην επιφάνεια σε υγρή μορφή (Van Zomeren & Comans, 2007).

Πειραματική Διαδικασία

Ξηραίνεται αρκετή ποσότητα δείγματος compost (περίπου 3 - 5 g) για 2 ημέρες στους 45 °C. Στη συνέχεια το ξηρό δείγμα εισάγεται και μπλέντερ και κοσκινίζεται με κόσκινο των 710μm.

Σε ποτήρι ζέσεως ζυγίζουμε 3 g δείγματος και τοποθετούνται 50 mL διαλύματος NaOH 0,1M. Το ποτήρι ζέσεως καλύπτεται με parafilm και αφήνεται υπό ανάδευση για 24 ώρες. Μετά την ανάδευση ακολουθεί φυγοκέντρηση σε 4100 rpm για 30 λεπτά. Το υγρό κλάσμα τοποθετείται σε ποτήρι ζέσεως με προσοχή έτσι ώστε να μην παρασυρθούν τυχόν στερεά.

Το στερεό ίζημα που βρίσκεται στις φιάλες falcon (φυγοκέντρησης) εισάγεται σε φούρνο στους 45 °C για 2 ημέρες και μετά την ξήρανση υπολογίζεται

το βάρος του. Για τα άδεια φιαλίδια έχει προηγηθεί ξήρανση και ζύγιση του καθαρού τους βάρους.

Στο υγρό διάλυμα η αρχική τιμή του pH είναι κάπου στο 12 και ρυθμίζεται στο 1,5 με τη προσθήκη διαλύματος HCL 6N. Η προσθήκη του υδροχλωρικού οξέος γίνεται με μεγάλη προσοχή και σιγά σιγά. Μετά την όξυνση του διαλύματος, το ποτήρι καλύπτεται ξανά με parafilm και ακολουθεί ανάδευση για 30 λεπτά. Έπειτα από την ανάδευση το διάλυμα αφήνεται να ηρεμήσει για 24 ώρες.

Ακολουθεί διήθηση υπό κενό με φιλτράκια 55 mm. Το υγρό απορρίπτεται ενώ το στερεό μέρος με τα φιλτράκια τοποθετείται σε φούρνο για ξήρανση στους 45 °C για 2 ημέρες. Τα φίλτρα έχουν προηγουμένως τοποθετηθεί για ξήρανση και έχει ζυγιστεί η μάζα τους.

Υπολογισμός

Ο υπολογισμός της μάζας των χουμικών οξέων γίνεται μέσω της διαφοράς του βάρους των φίλτρων πριν και μετά τη διήθηση.

$$m_{\text{χουμικά}} = m_{\text{τελικό φίλτράκι}} - m_{\text{αρχικό φίλτράκι}}$$
$$\% \text{ Περιεκτικότητα Χουμικών} = \frac{m_{\text{χουμικά}}}{m_{\text{αρχικής ποσότητας}}} \cdot 100\%$$

Ο υπολογισμός της μάζας των φουλβικών οξέων υπολογίζεται μέσω της διαφοράς βάρους της αρχικής ποσότητας ξηρού δείγματος και των μαζών του υπολείμματος και των χουμικών οξέων.

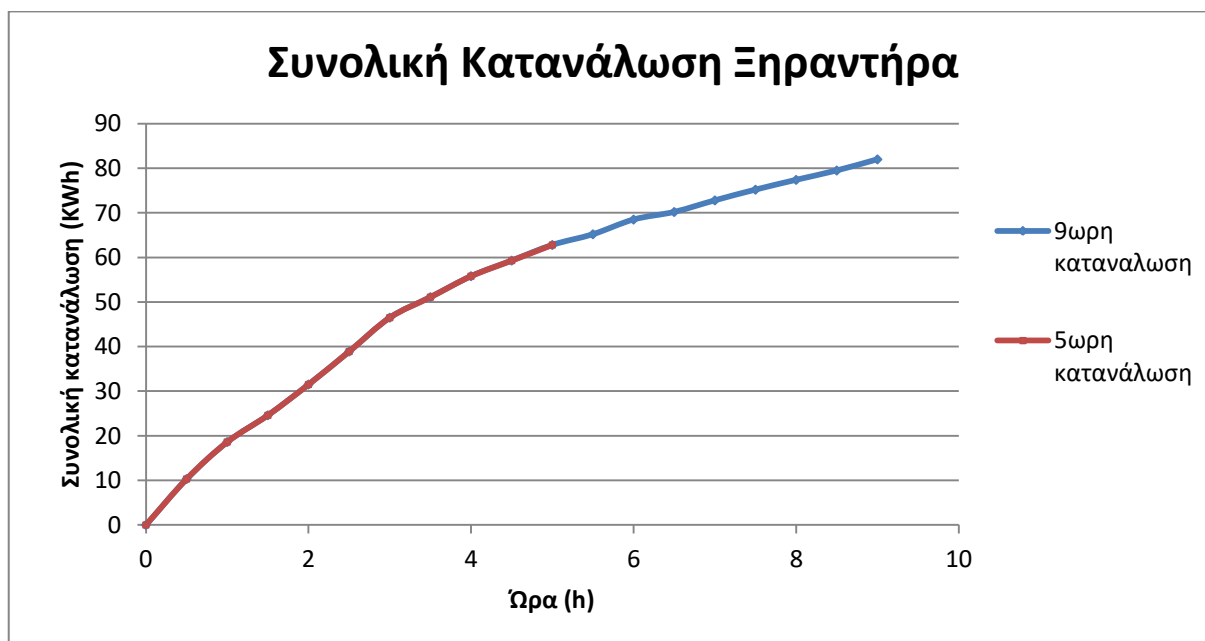
$$m_{\text{φουλβικά}} = m_{\text{αρχικής ποσότητας}} - m_{\text{χουμικά}} - m_{\text{στερεού υπολείμματος}}$$
$$\% \text{ Περιεκτικότητα Φουλβικών} = \frac{m_{\text{φουλβικά}}}{m_{\text{αρχικής ποσότητας}}} \cdot 100\%$$

Κεφάλαιο 4ο : Αποτελέσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής καθώς και κάποια σχόλια και παρατηρήσεις τα οποία εξήχθησαν κατά τη διάρκεια και στο τέλος των πειραμάτων.

4.1. Οικονομική και Ενεργειακή Κατανάλωση

Σε κάθε διεργασία η οποία επρόκειτο να πραγματοποιηθεί σε μεγάλη κλίμακα είναι σημαντική η μελέτη κατανάλωσης και κόστους ώστε να υλοποιηθεί. Για την κομποστοποίηση που μελετήθηκε στο εργαστήριο, εφαρμόστηκε 5ωρη ξήρανση των τροφικών υπολειμμάτων έναντι 9ωρης που γινόταν πριν. Με έναν μετρητή κατανάλωσης καταγράφηκε η κατανάλωση ρεύματος που πραγματοποίησε ο ξηραντήρας ανά μισή ώρα, για την ξήρανση μάζας 100 kg τροφικών υπολειμμάτων. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 1 : Συνολική κατανάλωση ξηραντήρα.

Όπως ήταν λογικό η κατανάλωση της 5ωρης ξήρανσης είναι αρκετά μικρότερη από εκείνη της 9ωρης και συγκεκριμένα καταναλώθηκαν 82 KWh για την 9ωρη και 62,8 KWh για την 5ωρη ξήρανση. Αυτό σημαίνει πως για κάθε 100 kg τροφικών υπολειμμάτων εξοικονομείται ενέργεια της τάξης των 19,2 KWh, αν εφαρμοστεί η 5ωρη ξήρανση.

Η πιλοτική αυτή μελέτη μόλις εφαρμοστεί σε μεγάλη κλίμακα, συγκεκριμένα στην περιοχή της Άνδρου, η οικονομική και ενεργειακή εξοικονόμηση θα είναι πολύ μεγαλύτερη. Παρακάτω φαίνονται οι υπολογισμοί που προκύπτουν στην περίπτωση του scale up.

Για την περίπτωση της Άνδρου, εξαιτίας του τουρισμού, υπάρχει μεγαλύτερη παραγωγή αποβλήτων κατά τη θερινή περίοδο. Με υπόθεση ότι η ροή των αποβλήτων αυξάνεται κατά τους 6 μήνες του καλοκαιριού, ενώ του υπόλοιπους 6 μήνες υπάρχει μία χαμηλότερη ροή, προκύπτουν τα εξής :

Έστω A η σταθερή παραγωγή βιοαποβλήτων που προκύπτει από από τους μόνιμους κατοίκους του νησιού
 Τότε η επιπλέον ροή την θερινή περίοδο είναι $C \cdot A$

Όπου C ο συντελεστής που δίνει τον αριθμό με τον οποίο πολλαπλασιάζεται η σταθερή ποσότητα A για να προκύψει η επιπλέον ροή βιοαποβλήτων. Επομένως προκύπτει :

$$\begin{aligned} \text{Χειμερινή Περίοδος} &: A \\ \text{Θερινή Περίοδος} &: A + C \cdot A \end{aligned}$$

Επειδή πρέπει να υπάρχει σταθερή ροή κατά τη διάρκεια του έτους στην επεξεργασία των αποβλήτων, η περισσευούμενη ποσότητα ξεραίνεται πλήρως (με 9ωρη ξήρανση), ώστε να αποθηκευτεί και να διατεθεί την χειμερινή περίοδο. Υπολογίζονται λοιπόν τα εξής :

$$\begin{aligned} \text{Συνολική ποσότητα διαχείρισης} &: A + (A + C \cdot A) = (2 + C) \cdot A \\ \text{Διαχειρίσιμη ποσότητα ανά εξάμηνο} &: \frac{(2 + C) \cdot A}{2} = A + \frac{C \cdot A}{2} \\ \text{Περισσευούμενη ποσότητα από τη θερινή περίοδο} &: \frac{C \cdot A}{2} \end{aligned}$$

Με ένα ρεαλιστικό σενάριο στο οποίο ο συντελεστής C είναι 2, δηλαδή η επιπλέον ποσότητα κατά τη θερινή περίοδο είναι διπλάσια από την ήδη υπάρχουσα, πραγματοποιούνται οι υπολογισμοί. Επιπλέον έχει βρεθεί πως οι μόνιμοι κάτοικοι του νησιού είναι 1550 με ημερήσια παραγωγή τροφικών υπολειμμάτων 310 kg. Η σταθερή λοιπόν ποσότητα A που παράγεται στους 6 μήνες είναι συνολικά $310 \cdot \frac{365}{2} = 56.575 \text{ kg}$.

Επομένως η ετήσια ποσότητα τροφικών υπολειμμάτων στο νησί είναι ίση με $(2 + 2) \cdot 56.575 = 226.300 \text{ kg/y} = 226,3 \text{ tn/y}$, εκ των οποίων τα $\frac{2 \cdot 56.575}{2} = 56.575 \text{ kg}$ θα ξηραίνονται πλήρως, με 9ωρη ξήρανση.

$$\begin{aligned} \text{Ενεργειακή εξοικονόμηση} &= \frac{19,2 \text{ KWh} \cdot (226.300 - 56.575) \text{ kg}}{100 \text{ kg}} \\ &\cong 32,6 \cdot 10^3 \text{ KWh} = 32,6 \text{ MWh ετησίως} \end{aligned}$$

Ενώ για την παραπάνω ενεργειακή εξοικονόμηση, υπολογίζεται το χρηματικό ποσό το οποίο εξοικονομείτε, χρησιμοποιώντας την τιμή που χρεώνει η ΔΕΗ την kWh. Πιο συγκεκριμένα :

$$\text{Οικονομικό όφελος} = 32,6 \cdot 10^3 \text{ kWh} \cdot 0,21985 \text{ €/kWh} = 7.1677,11\text{€ ετησίως}$$

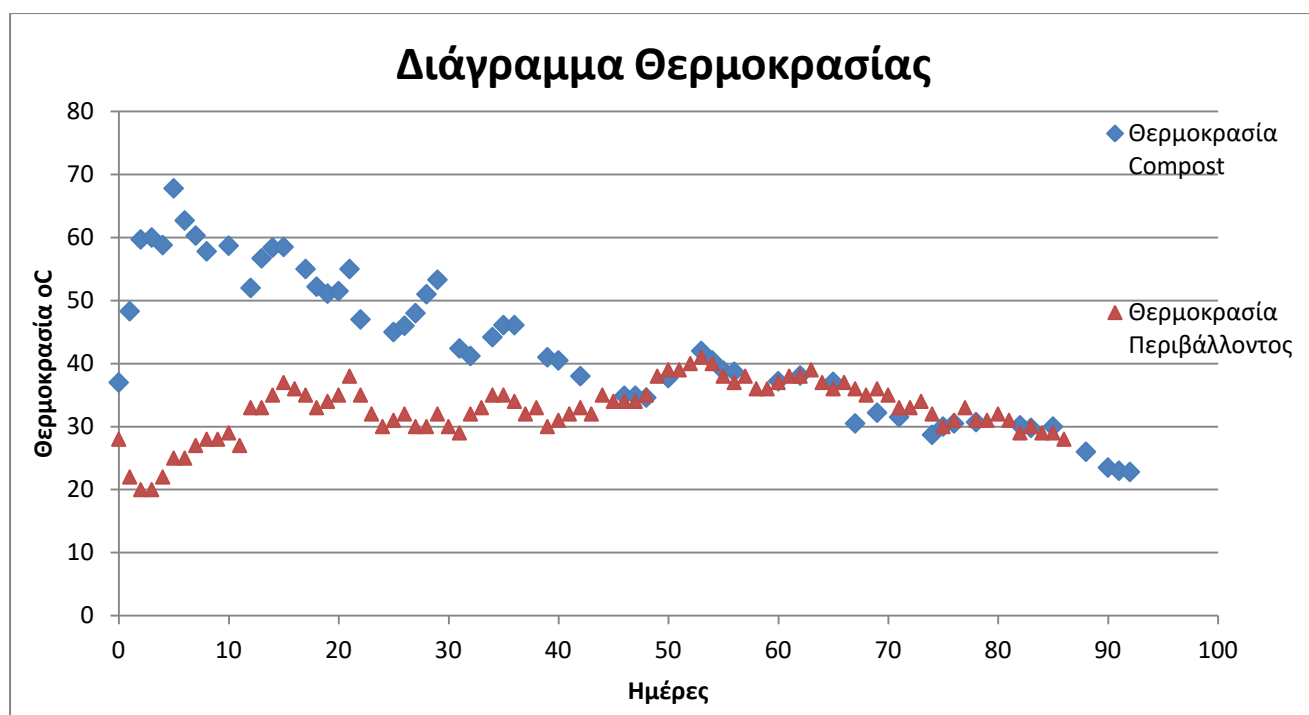
Όπως φαίνεται το ποσό το οποίο εξοικονομείτε ετησίως είναι αρκετά υψηλό, ενώ εξίσου σημαντική είναι η βελτιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης. Ένας μηχανικός οφείλει να λαμβάνει υπόψη κάθε μορφής ανάγκη που μπορεί να έχει ένα εγχείρημα, δηλαδή οικονομικές, ενεργειακές και υλικές ανάγκες, και να στοχεύει στην ελαχιστοποίησή τους. Συμπερασματικά, το πείραμα που πραγματοποιήθηκε εκτός από την επιτυχημένη διεργασία, είναι κατάλληλο για εφαρμογή σε μεγάλη κλίμακα καθώς αποτελεί μια αρκετά βελτιωμένη μέθοδο σε οικονομικό και ενεργειακό επίπεδο.

4.2. Παράμετροι Ελέγχου

4.2.1. Θερμοκρασία

Όπως έχει αναφερθεί, η θερμοκρασία είναι μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους για την εξέλιξη της κομποστοποίησης καθώς αποδεικνύει την λειτουργία των μικροοργανισμών και ταυτόχρονα από τις μεταβολές της μπορούν να ελεγχθούν και να διορθωθούν άλλοι παράμετροι ελέγχου, δηλαδή η υγρασία και ο αερισμός.

Compost 1

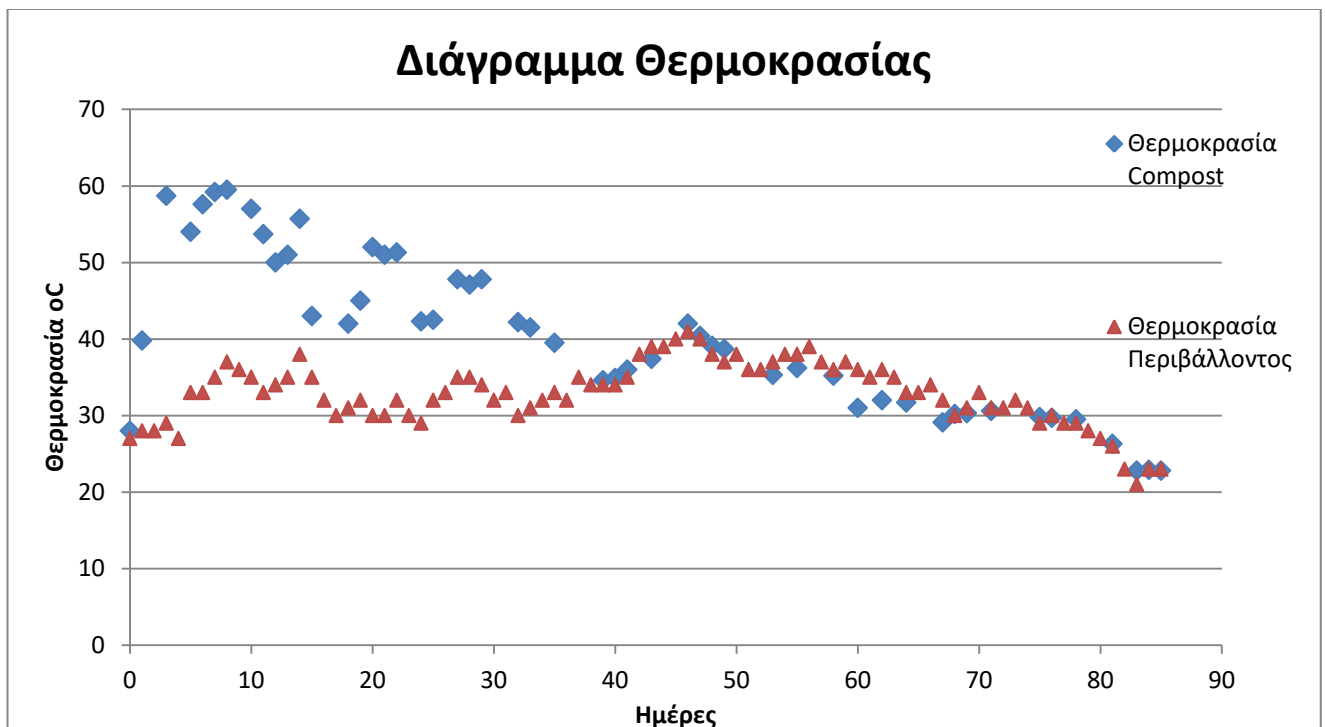


Διάγραμμα 2 : Διάγραμμα Θερμοκρασίας Compost 1.

Στο παραπάνω διάγραμμα μπορούν να διακριθούν οι φάσεις της κομποστοποίησης, θερμόφιλη, σταθεροποίηση και ωρίμανση του compost. Πιο συγκεκριμένα, η θερμόφιλη φάση (θερμοκρασία μεγαλύτερη από 50 °C) διήρκεσε 20 ημέρες, χρονικό διάστημα το οποίο θεωρείται αρκετό για την εξόντωση των παθογόνων μικροοργανισμών. Επιπλέον, σημαντικό ρόλο της γρήγορης ανάπτυξης των μικροοργανισμών έπαιξε το γεγονός τα τροφικά υπολείμματα που τοποθετήθηκαν στον κομποστοποιητή είχαν υψηλή θερμοκρασία, η οποία βοήθησε στην γρήγορη έναρξη της κομποστοποίησης. Αυτός είναι και ο λόγος που η φάση υστέρησης δεν είναι διακριτή στο παραπάνω διάγραμμα. Τέλος, στην γρήγορη άνοδο της θερμοκρασίας συντέλεσαν και οι κλιματικές συνθήκες, καθώς κατά τους θερινούς μήνες όπου και πραγματοποιήθηκε το πείραμα, η θερμοκρασία του περιβάλλοντος ήταν ήδη αρκετά υψηλή.

Στη φάση της σταθεροποίησης διακρίνονται κάποιες διακυμάνσεις στη θερμοκρασία, δηλαδή ενώ η θερμοκρασία ελαττωνόταν, σταδιακά για κάποιες ημέρες αυξανόταν. Αυτό παρατηρήθηκε στις περιπτώσεις όπου πραγματοποιούνταν προσθήκη νερού για την διατήρηση της υγρασίας στα επιθυμητά επίπεδα. Αυτή είναι και μία επιβεβαίωση στη σημαντικότητα της διατήρησης της υγρασίας κατά της διάρκειας της κομποστοποίησης ώστε οι μικροοργανισμοί να συνεχίζουν την διεργασία της αποδόμησης.

Compost 2



Διάγραμμα 3 : Διάγραμμα Θερμοκρασίας Compost 2.

Ομοίως στο δεύτερο πείραμα μπορούν να διακριθούν οι φάσεις της κομποστοποίησης, ενώ η θερμοφίλη φάση διήρκησε 12 ημέρες, λιγότερες από εκείνες του πρώτου πειράματος. Μία βασική διαφορά μεταξύ των δύο σωρών είναι ότι στο δεύτερο πείραμα τα τροφικά υπολείμματα τοποθετήθηκαν στον κομποστοποιητή μία μέρα αφού πραγματοποιήθηκε η ξήρανση τους. Το γεγονός αυτό έπαιξε σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη της κομποστοποίησης, και για αυτό δεν υπήρξε τόσο μεγάλη και μακροχρόνια αύξηση της θερμοκρασίας. Παρόλα αυτά, οι ημέρες στις οποίες η σωρός παρέμεινε στη θερμοφίλη φάση είναι ικανοποιητικές ώστε να εξοντωθούν οι παθογόνοι μικροοργανισμοί. Τέλος, επηρέασαν σημαντικά οι κλιματικές συνθήκες που επικρατούσαν ενώ και σε αυτό το πείραμα παρατηρήθηκε η επάνοδος της θερμοκρασίας έπειτα από προσθήκη νερού.

Συμπερασματικά να σημειωθεί πως οι μέγιστες θερμοκρασίες στις οποίες έφτασαν οι σωροί, 67,8 °C και 59,5 °C αντίστοιχα, είναι τιμές οι οποίες είναι αρκετά δύσκολο να επιτευχθούν σε οικιακούς κομποστοποιητές, λόγω της χαμηλής ποσότητας μάζας που περιέχεται σε αυτούς. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι κομποστοποιήσεις κρίνονται επιτυχημένες όσον αφορά την θερμοκρασία και την περίοδο της θερμοφίλης φάσης.

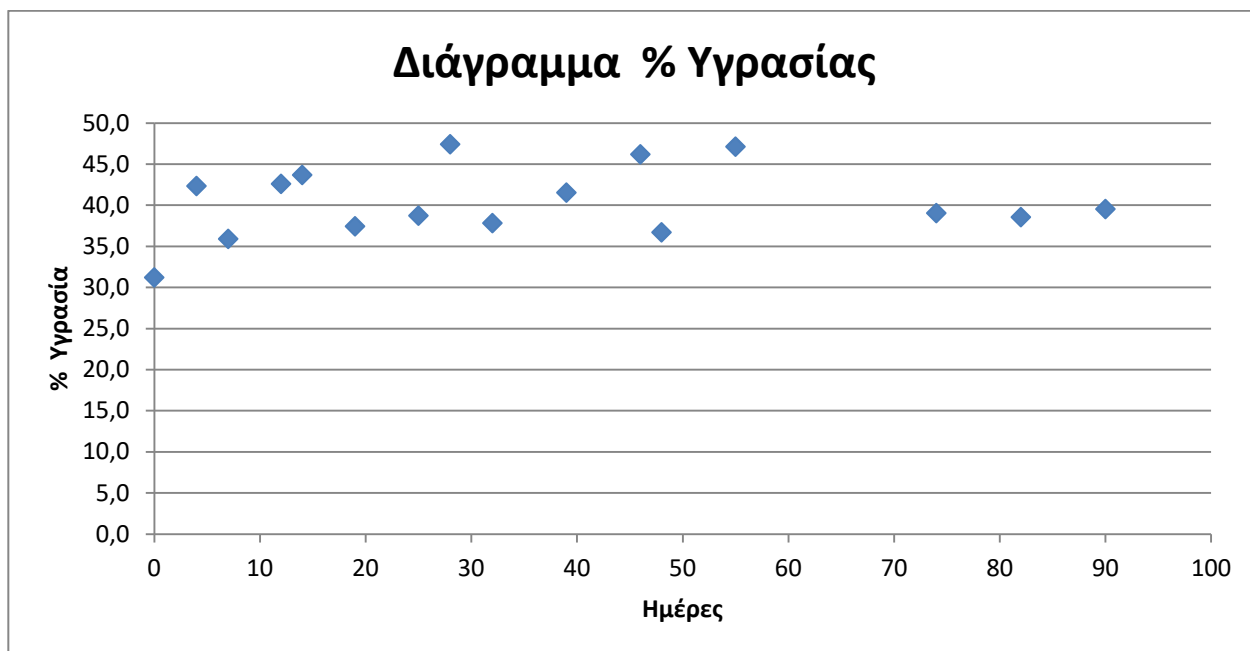
4.2.2. Υγρασία

Η περιεκτικότητα σε υγρασία επηρεάζει τη μικροβιακή δραστηριότητα, καθώς και τη φυσική δομή, κατά τη διαδικασία της κομποστοποίησης, και έτσι έχει κεντρική επιρροή στη βιοαποδόμηση οργανικών υλικών. Οι πολύ χαμηλές τιμές περιεκτικότητας σε υγρασία θα προκαλούσαν πρόωμη αφυδάτωση κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης, η οποία θα σταματήσει τη βιολογική διαδικασία, δίνοντας έτσι φυσικά σταθερά αλλά βιολογικά ασταθή compost. Από την άλλη πλευρά, η υψηλή υγρασία μπορεί να δημιουργήσει αναερόβιες συνθήκες εξαιτίας της έλλειψης οξυγόνου, γεγονός που θα αποτρέψει και θα σταματήσει τις τρέχουσες δραστηριότητες κομποστοποίησης.

Στόχος της παρούσας πειραματικής διαδικασίας ήταν η διατήρηση της υγρασίας στο 50% καθώς είναι ένα ικανοποιητικό ποσοστό ώστε η διεργασία να πραγματοποιηθεί γρήγορα και με επιτυχία. Για αυτό λοιπόν το λόγο πραγματοποιούνταν προσθήκη νερού κάθε φορά που η υγρασία μετριούνταν με την μέθοδο της ξήρανσης και ήταν κάτω από τα επιθυμητά επίπεδα. Η μέθοδος της ξήρανσης ήταν βασική προϋπόθεση για την προσθήκη νερού καθώς δίνει ακριβή αποτελέσματα, ενώ σχεδόν καθημερινά ελεγχόταν με τη βοήθεια του θερμοζυγού ώστε να μην υπάρξει απότομη μείωση υγρασίας στις σωρούς.

Compost 1

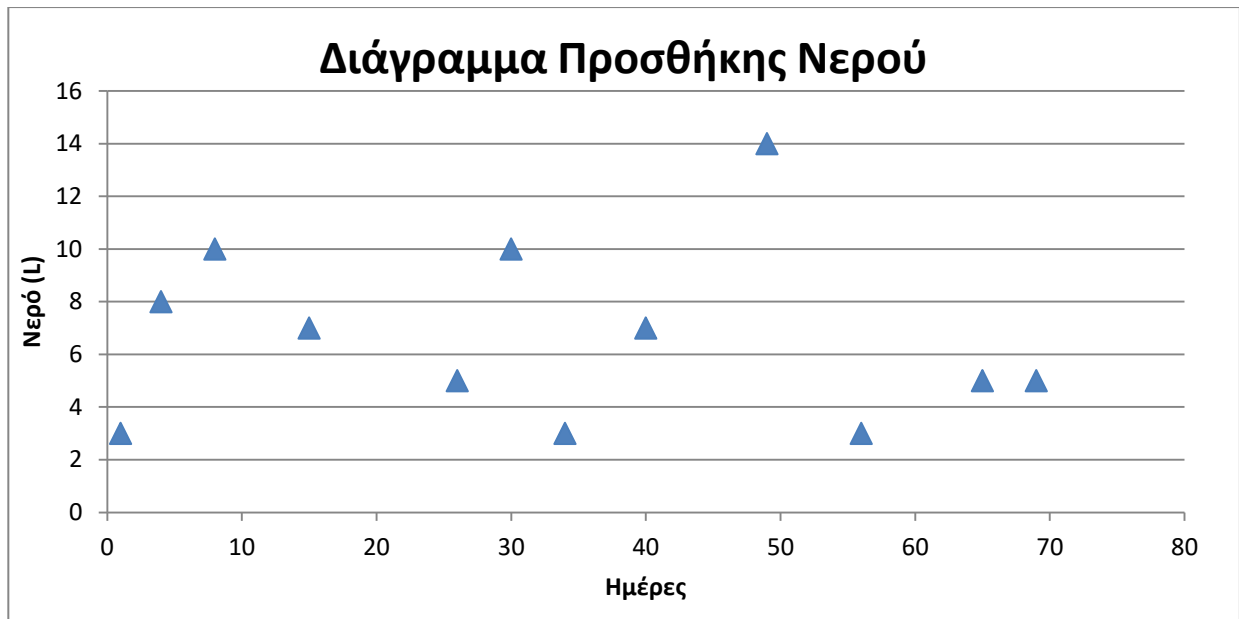
Η αρχική υγρασία που μετρήθηκε στη σωρό έπειτα από τοποθέτηση των πρώτων υλών και καλή ανάδευση ήταν 31%, ενώ ξεχωριστά τα τροφικά υπολείμματα και τα κλαδέματα είχαν 48% και 15% αντίστοιχα. Στο Διάγραμμα 4 παριστάνονται οι τιμές της υγρασίας που μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.



Διάγραμμα 4 : Διάγραμμα % Υγρασίας Compost 1.

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω διάγραμμα η υγρασία κυμάνθηκε μεταξύ των τιμών 37 – 48%, τιμές οι οποίες είναι στο εύρος των επιθυμητών επιπέδων υγρασίας. Την 92^η ημέρα όπου και σταμάτησε το πείραμα η υγρασία του compost ήταν 39,5%, τιμή που ενδεχομένως οφείλεται στο γεγονός ότι δύο ημέρες πριν την μέτρηση έβρεξε και αυξήθηκε η υγρασία της σωρού.

Σημαντικό να αναφερθεί είναι ότι η προσθήκη νερού πραγματοποιούνταν σταδιακά με ταυτόχρονη ανάδευση έτσι ώστε να κατακρατηθεί όσο το δυνατόν περισσότερο νερό και να κατατεθεί ομοιόμορφα σε όλη τη μάζα του compost. Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα με τις ποσότητες νερού που προστέθηκαν κατά τη διάρκεια διεξαγωγής της κομποστοποίησης.

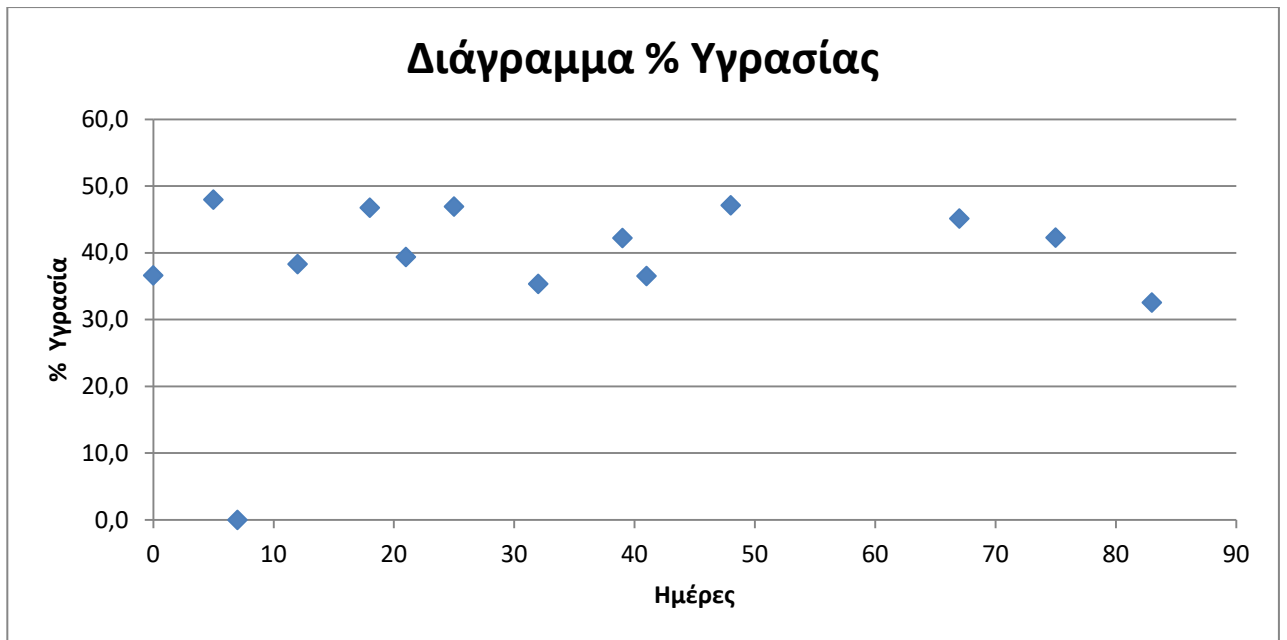


Διάγραμμα 5 : Διάγραμμα Προσθήκης Νερού Compost 1.

Η συνολική ποσότητα νερού που προστέθηκε κατά τη διάρκεια της πρώτης κομποστοποίησης είναι 80 L. Η προσθήκη νερού σταμάτησε μόλις παρατηρήθηκε μία σταθεροποίηση στις τιμές των πτητικών στερεών, δηλαδή όταν η κομποστοποίηση περνάει στο στάδιο της ωρίμανσης. Αυτό συνέβη διότι στο στάδιο αυτό το compost σταματάει την διαδικασία της αποδόμησης του οργανικού φορτίου και το τελικό προϊόν πρέπει να έχει χαμηλά επίπεδα υγρασίας.

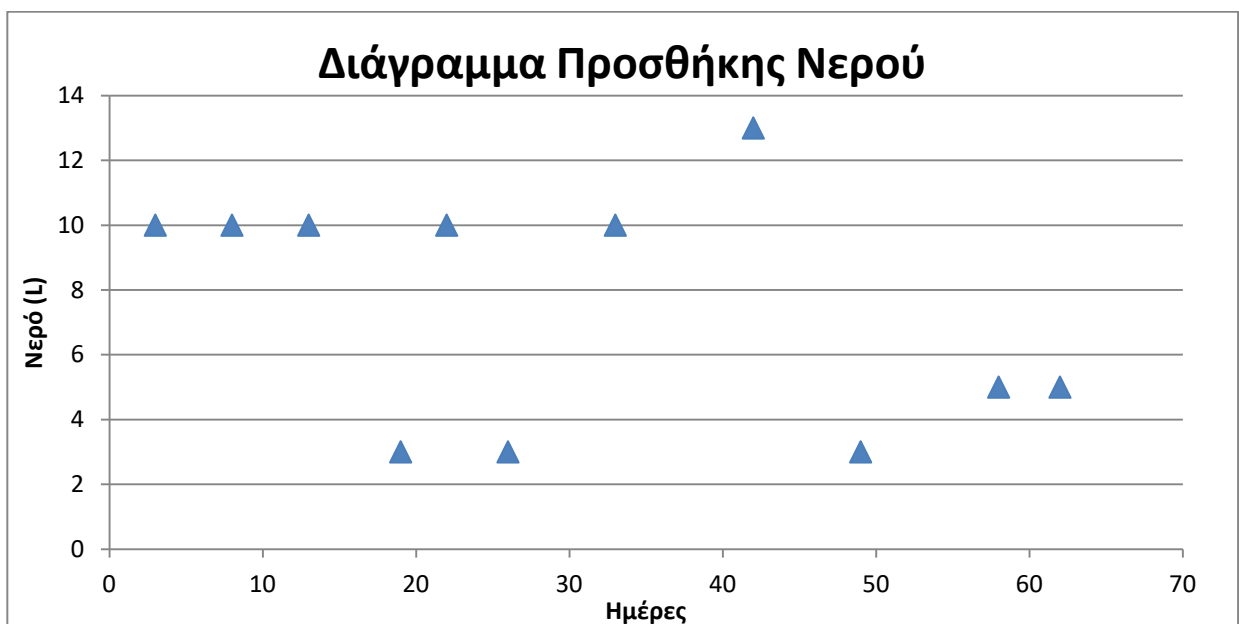
Compost 2

Η αρχική υγρασία που μετρήθηκε στη σωρό έπειτα από τοποθέτηση των πρώτων υλών και καλή ανάδευση ήταν 36%, ενώ ξεχωριστά τα τροφικά υπολείμματα και τα κλαδέματα είχαν 42% και 19% αντίστοιχα. Στο Διάγραμμα 6 παριστάνονται οι τιμές της υγρασίας που μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.



Διάγραμμα 6 : Διάγραμμα % Υγρασίας Compost 2.

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω διάγραμμα η υγρασία κυμάνθηκε μεταξύ των τιμών 36 – 48%, τιμές οι οποίες είναι στο εύρος των επιθυμητών επιπέδων υγρασίας. Την 85^η ημέρα όπου και σταμάτησε το πείραμα η υγρασία του compost ήταν 32,5%, τιμή που είναι λίγο υψηλότερη από την αποδεκτή για το προς διάθεση compost, ενδεχομένως λόγω της βροχής που προηγήθηκε. Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα της προσθήκης νερού, η οποία έγινε υπό ανάδευση και σταδιακά, κατά τη διάρκεια της δεύτερης κομποστοποίησης.



Διάγραμμα 7 : Διάγραμμα Προσθήκης Νερού Compost 2.

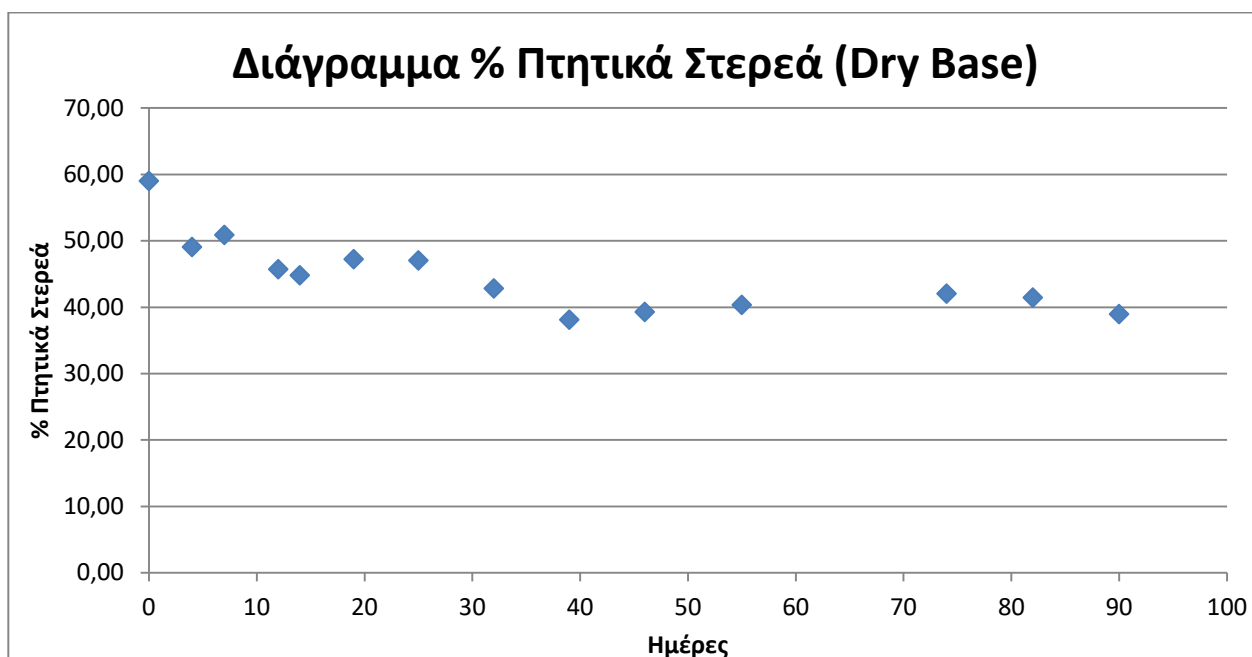
Η συνολική ποσότητα νερού που προστέθηκε κατά τη διάρκεια της πρώτης κομποστοποίησης είναι 82 L. Ομοίως με την πρώτη κομποστοποίηση, η προσθήκη νερού σταμάτησε μόλις παρατηρήθηκε μία σταθεροποίηση στις τιμές των πτητικών στερεών.

4.2.3. Πτητικά Στερεά

Η μέτρηση των πτητικών στερεών σχετίζεται άμεσα με την μείωση του οργανικού άνθρακα και βοηθάει στην επιβεβαίωση ότι η μικροβιακή διεργασία προχωράει. Κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης είναι σημαντική η ελάττωση των πτητικών στερεών και ιδιαίτερα στην θερμόφιλη φάση που πραγματοποιείται και το μεγαλύτερο μέρος της βιοαποδόμησης. Πιο συγκεκριμένα, στους 550 °C που πραγματοποιείται η ξήρανση απομακρύνονται όλες οι οργανικές ενώσεις με αποτέλεσμα να είναι εφικτός ο υπολογισμός τους μέσω διαφοράς μάζας.

Compost 1

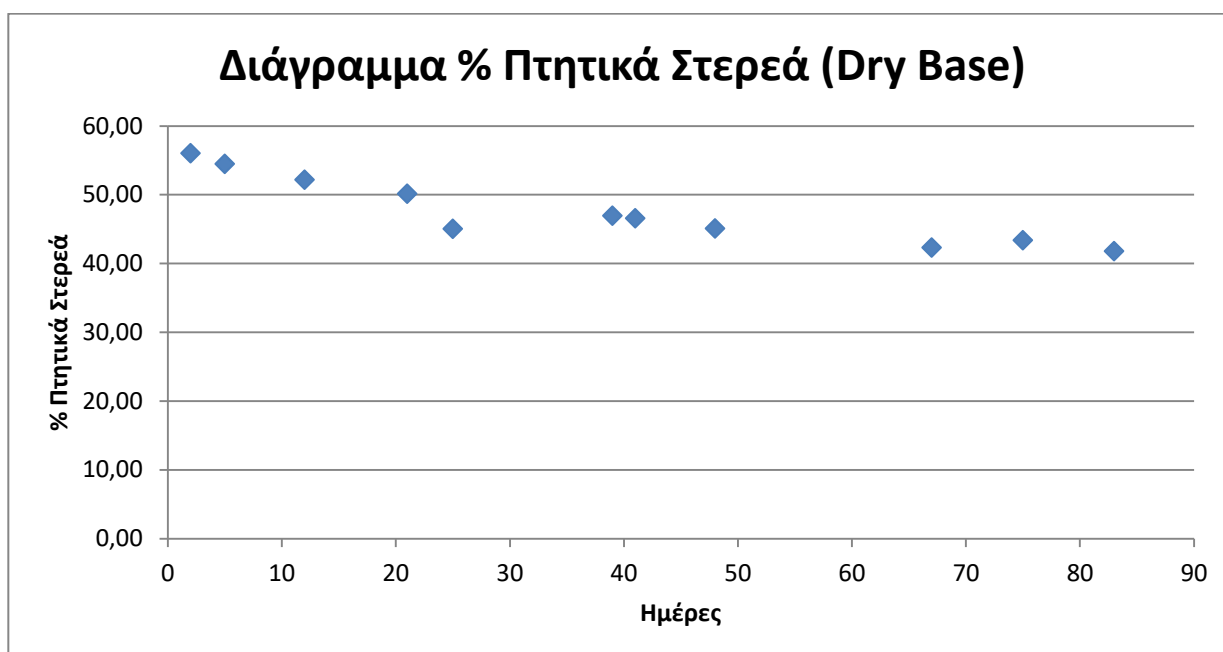
Στην περίπτωση της πρώτης κομποστοποίησης όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 8 τα πτητικά στερεά ξεκίνησαν να μειώνονται από τις πρώτες κιόλας ημέρες. Πιο συγκεκριμένα, η ραγδαία μείωση τους πραγματοποιήθηκε κατά τις πρώτες 30 ημέρες όπου και επικρατούσε η θερμόφιλη φάση. Με την υψηλή θερμοκρασία που επικρατούσε, αποτέλεσμα της μικροβιακής δράσης, σημαντικό μέρος των οργανικών ουσιών διασπάστηκε. Η συνολική μείωση των πτητικών στερεών κατά τη διάρκεια της πρώτης κομποστοποίησης ανέρχεται στο 34% καθώς από το 59% που ήταν το ποσοστό των αρχικών πτητικών στερεών μειώθηκε στο 39%.



Διάγραμμα 8: Διάγραμμα % Πτητικών Στερεών Compost 1.

Compost 2

Στην περίπτωση της δεύτερης κομποστοποίησης όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 9 τα πτητικά στερεά μειώθηκαν σταδιακά τις πρώτες 40 ημέρες, ενώ και αυτή την περίπτωση η μεγάλη μείωση τους πραγματοποιήθηκε κατά τη θερμοφίλη φάση. Η συνολική μείωση των πτητικών στερεών κατά τη διάρκεια της πρώτης κομποστοποίησης ανέρχεται στο 25% καθώς από το 56% που ήταν το ποσοστό των πτητικών στερεών την τρίτη ημέρα μειώθηκε στο 42%.



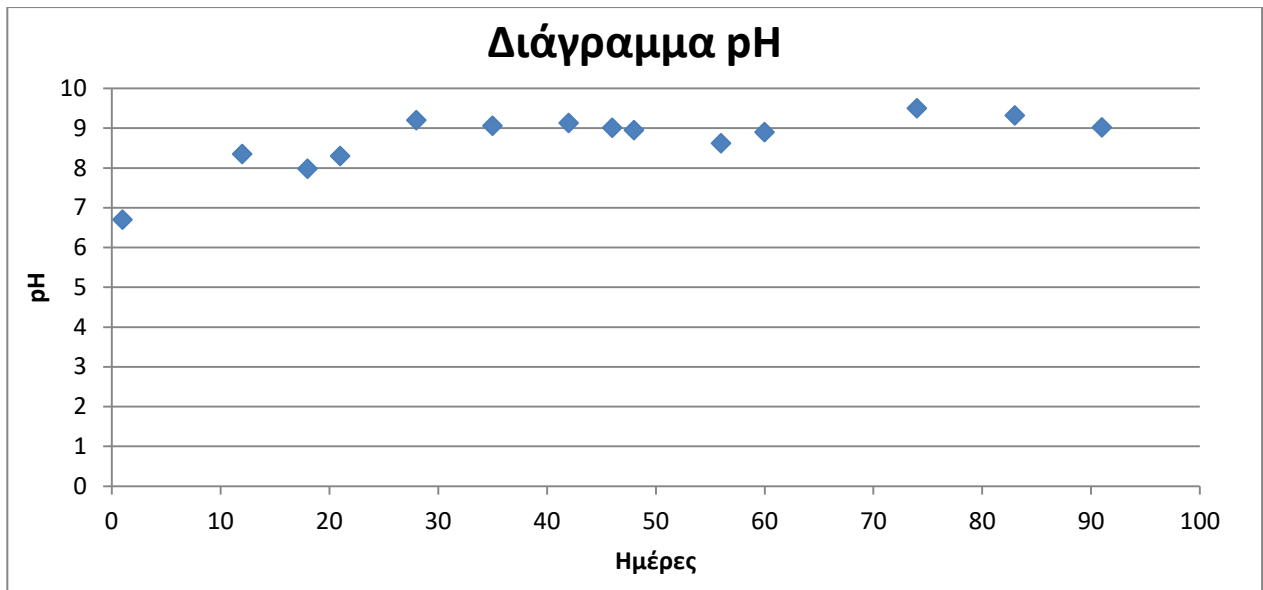
Διάγραμμα 9 : Διάγραμμα % Πτητικών Στερεών Compost 2.

4.2.4. pH

Το pH είναι μία παράμετρος που εξαρτάται από τα υλικά προέλευσης και ποικίλει σε κατά τη διάρκειας μιας κομποστοποίησης. Αρχικά το pH αυξάνεται λόγω κατανάλωσης των οργανικών οξέων και παραγωγής αζώτου και αμμωνίας, ενώ στη φάση της ωρίμανσης τείνει να μειωθεί εξαιτίας της παραγωγής νιτρικών. Γενικότερα είναι κρίσιμος παράγοντας αφού σηματοδοτεί την λήξη της μικροβιακής δραστηριότητας και την ωρίμανση του compost.

Compost 1

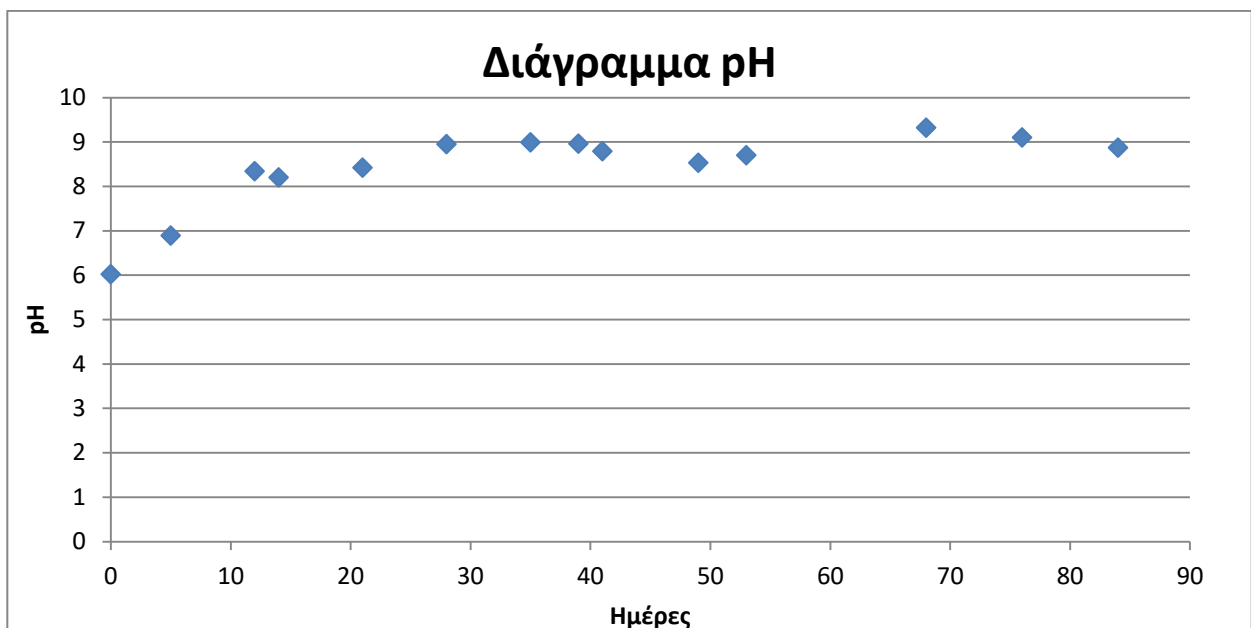
Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 10 η τιμή του pH της πρώτης κομποστοποίησης ακολουθεί το μοτίβο που επικρατεί στις κομποστοποιήσεις, δηλαδή την αύξηση του pH και στη συνέχεια την μείωση του κατά το στάδιο της ωρίμανσης. Η αρχική τιμή που μετρήθηκε ήταν 6,7, δικαιολογημένη καθώς τα τροφικά υπολείμματα περιέχουν οξέα, και κατέληξε σε pH ίσο με 9.



Διάγραμμα 10 : Διάγραμμα pH Compost 1.

Compost 2

Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 11 η τιμή του pH της δεύτερης κομποστοποίησης ακολουθεί και αυτή την πορεία της αύξησης και έπειτα της μείωσης του pH. Η αρχική τιμή που μετρήθηκε ήταν 6, εξαιτίας των οξέων που περιέχονται, και κατέληξε σε pH ίσο με 8,9.



Διάγραμμα 11 : Διάγραμμα pH Compost 2.

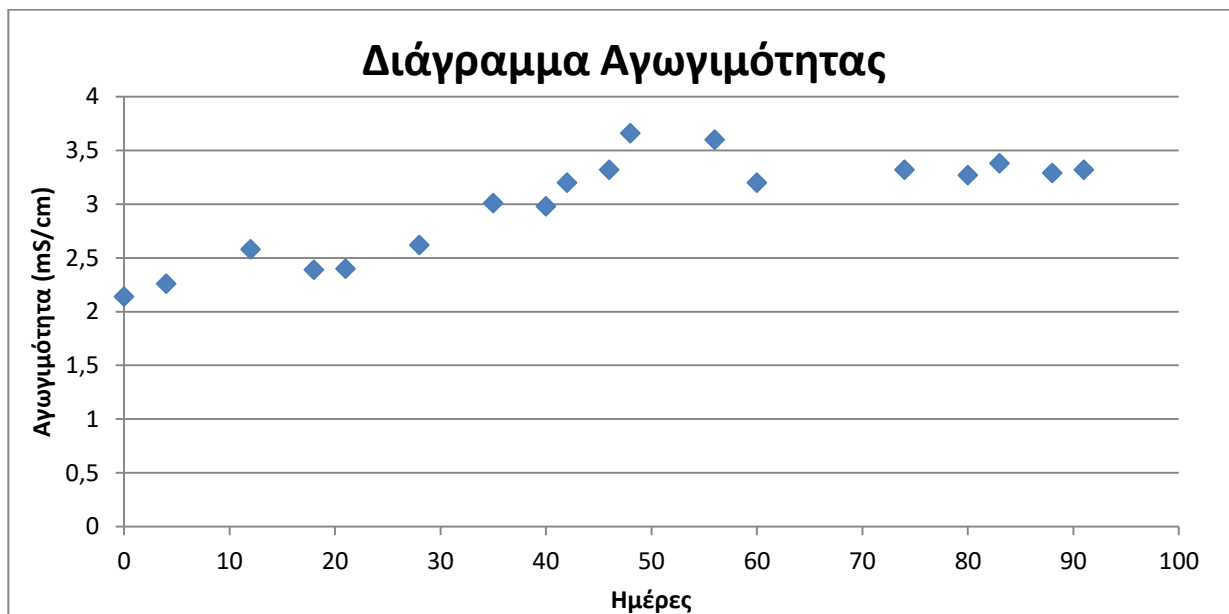
4.2.5. Αγωγιμότητα

Η αγωγιμότητα υποδεικνύει την ευκολία με την οποία διέρχεται το ηλεκτρικό ρεύμα, ενώ παράλληλα εκφράζει τα διαλυτά άλατα που περιέχονται στο δείγμα. Τα άλατα αυτά είναι χρήσιμα μέχρι ενός σημείου ενώ αναλόγως με την τιμή της αγωγιμότητας ορίζεται και η ποσότητα του compost που θα προστεθεί στο

χώμα. Η άνοδος της αγωγιμότητας μπορεί να οδηγήσει σε αλάτωση του εδάφους και σε εξάντληση του αζώτου, μειωμένη ανακύκλωση θρεπτικών ουσιών και μειωμένη ανάπτυξη των καλλιεργειών (Stamatiadis et al., 1999).

Compost 1

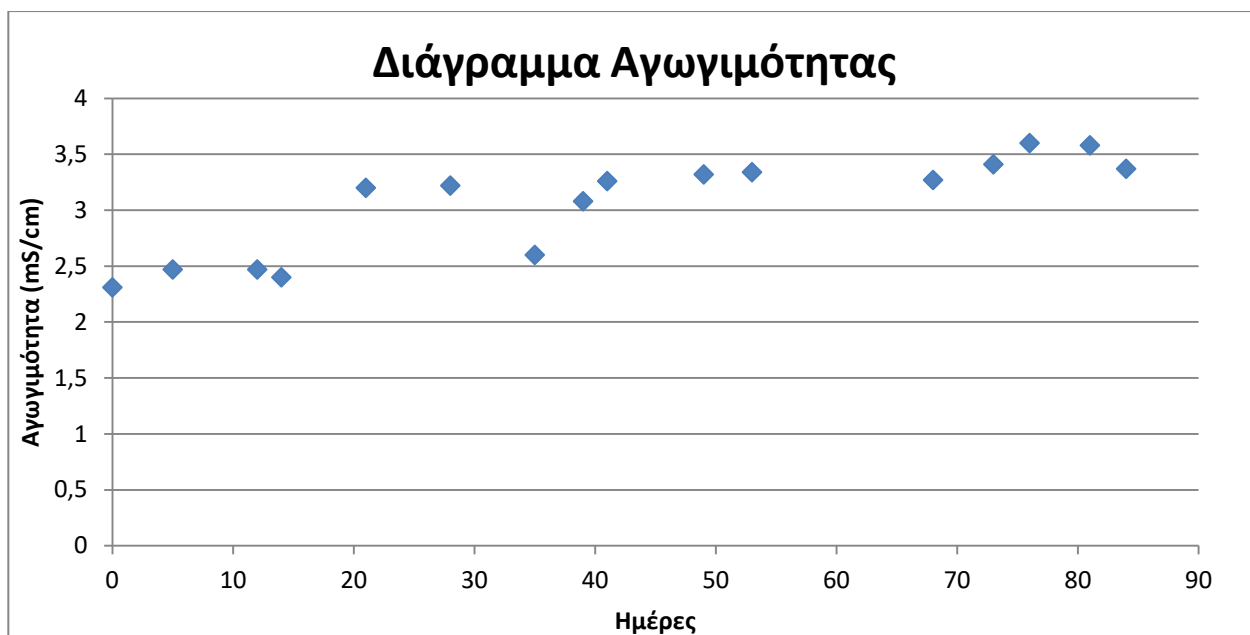
Όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 12 η αγωγιμότητα ξεκινάει από χαμηλές τιμές και σταδιακά αυξάνεται έως ότου σταθεροποιηθεί προς το τέλος της κομποστοποίησης. Πιο συγκεκριμένα, η αγωγιμότητα της πρώτης κομποστοποίησης ξεκινάει από 2,1 mS/cm και καταλήγει στην τιμή 3,3 mS/cm. Σύμφωνα με



Διάγραμμα 12 : Διάγραμμα Αγωγιμότητας Compost 1.

Compost 2

Όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 13 η αγωγιμότητα στην δεύτερη κομποστοποίηση ξεκινάει εξίσου από χαμηλές τιμές και σταδιακά αυξάνεται έως ότου σταθεροποιηθεί προς το τέλος της κομποστοποίησης. Πιο συγκεκριμένα, η αγωγιμότητα της πρώτης κομποστοποίησης ξεκινάει από 2,3 mS/cm και καταλήγει στην τιμή 3,4 mS/cm.



Διάγραμμα 13 : Διάγραμμα Αγωγιμότητας Compost 2.

Σε γενικότερο πλαίσιο το εύρος της τιμής της αγωγιμότητας που είναι αποδεκτό είναι αρκετά μεγάλο, ενώ σε πολλές μελέτες έχει παρατηρηθεί διαφορετική συμπεριφορά κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Σύμφωνα με τον Πίνακα 8 που αντιστοιχεί στις τιμές που έχουν θεσπίσει στην Αυστραλία για την εφαρμογή του compost στο έδαφος ανάλογα με την τιμή της αγωγιμότητας, οι δύο κομποστοποιήσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο έδαφος.

EC of Compost	rate for sensitive plants	rate for tolerant plants
	liters / m ² (gal / 100 ft. ²)	
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.

Πίνακας 8 : Τιμές αγωγιμότητας και εφαρμογής στο έδαφος στην Αυστραλία (William F. Brinton, 2000).

4.2.6. Ολικό Άζωτο κατά Kjeldahl –TKN

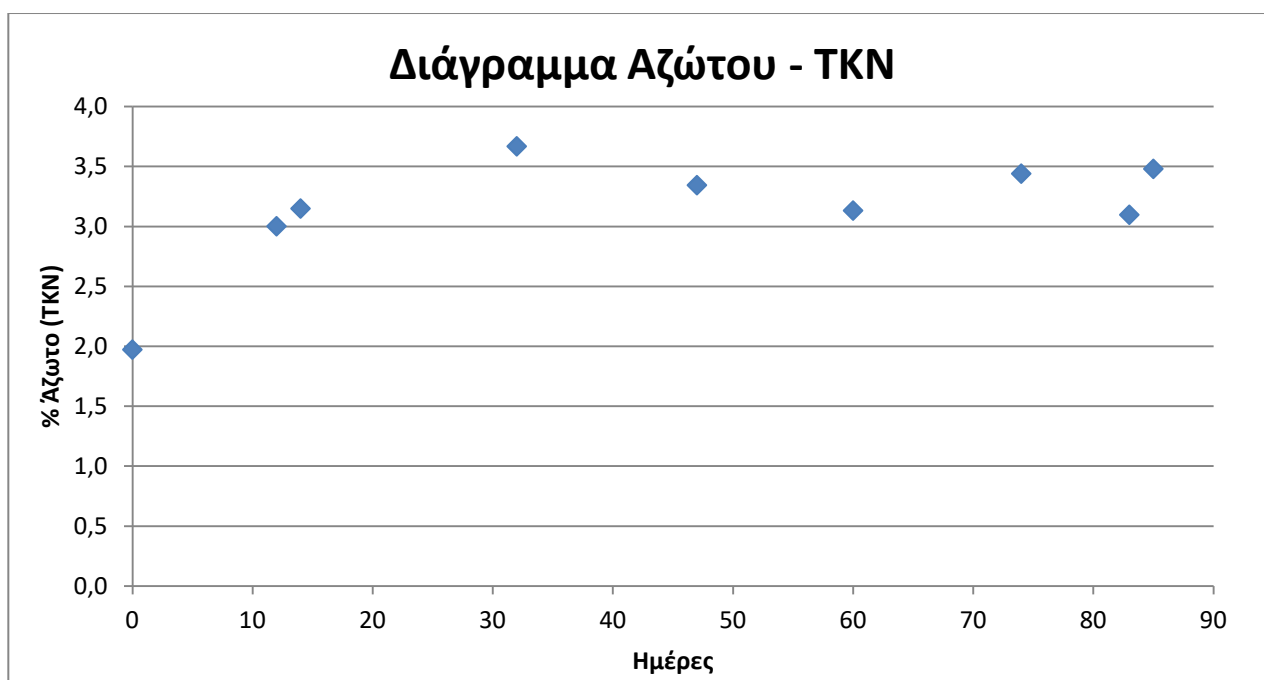
Η μέτρηση αζώτου κατά Kjeldahl υπολογίζει το ολικό οργανικό άζωτο, την αμμωνία και το αμμώνιο, ενώ δεν προσμετρείται το ανόργανο άζωτο και τα νιτρικά

ιόντα. Κατά τη διεργασία της βιοσταθεροποίησης, το οργανικό άζωτο μειώνεται εξαιτίας της μικροβιακής δράσης καθώς μετατρέπεται σε αμμωνία που διαφεύγει στην ατμόσφαιρα. Πέραν από τη απώλεια της αμμωνίας, η οργανική ύλη που υπάρχει στο compost υφίσταται μείωση με την μετατροπή της σε διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) και νερό (H₂O). Τέλος, η άμεση μείωση του οργανικού άνθρακα κατά τη βιοξείδωση της οργανικής ουσίας τις πρώτες ημέρες της διεργασίας, συντελούν στην αύξηση του ποσοστού του αζώτου στο υπόστρωμα.

Το άζωτο υπάρχει σε μορφές χρήσιμες για την καλή ποιότητα του compost, καθώς οι μορφές αυτές αποτελούν κάποια από τα θρεπτικά συστατικά για την βλάστηση των φυτών. Το δύσκολο κομμάτι της κομποστοποίησης είναι η μείωση της απώλειας του αζώτου, μέσω πτητικοποίησης της αμμωνίας, με ταυτόχρονη μείωση του οργανικού άνθρακα.

Compost 1

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί στο Διάγραμμα 14 το ολικό άζωτο κατά Kjeldahl τείνει να αυξηθεί, καθώς ξεκινάει από 2% και καταλήγει σε τιμές κοντά στο 3,5%. Η αύξηση αυτή δεν σημαίνει ότι αυξήθηκε το άζωτο που υπήρχε μέσα στη σωρό, αλλά δείχνει πως κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης διατηρήθηκε ένα ποσοστό αζώτου παρά την έντονη αποδόμηση του οργανικού φορτίου.

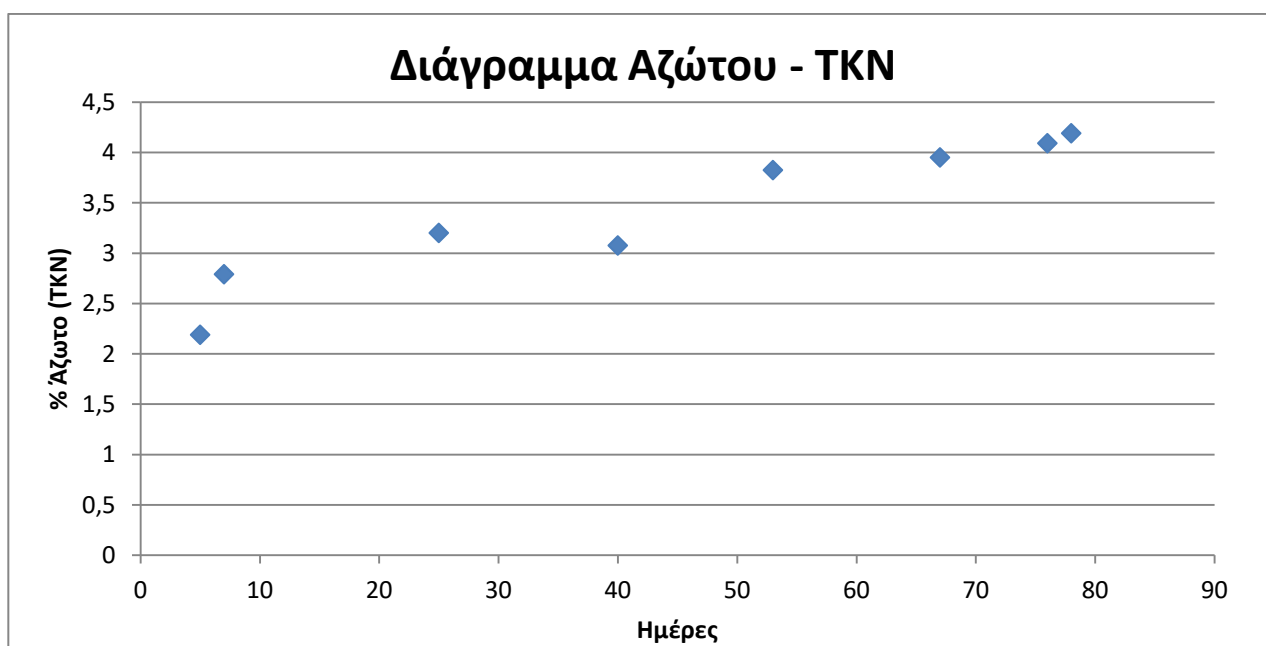


Διάγραμμα 14 : Διάγραμμα Αζώτου (TKN) Compost 1.

Compost 2

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί στο Διάγραμμα 15 το ολικό άζωτο κατά Kjeldahl τείνει να αυξηθεί, καθώς ξεκινάει από 2,2% και καταλήγει σε τιμές κοντά στο 4,2%. Αντίστοιχα με την πρώτη κομποστοποίηση, η αύξηση αυτή σημαίνει πως

κατά τη διάρκεια της βιοαποδόμησης του οργανικού φορτίου, ένα ποσοστό του οργανικού αζώτου δεν μετατράπηκε σε αμμωνία ώστε να διαφύγει, αλλά παρέμεινε στη σωρό.



Διάγραμμα 15 : Διάγραμμα Αζώτου (TKN) Compost 2.

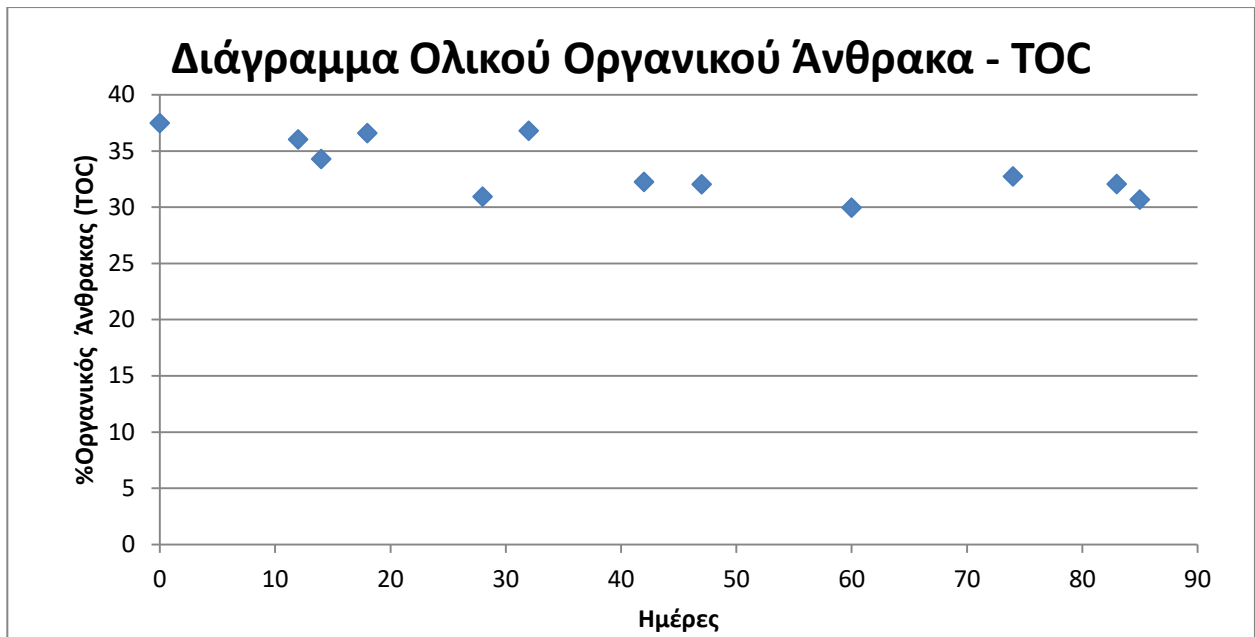
Κατά τη διάρκεια της διεργασίας υπάρχει μεγάλη μείωση της μάζας της σωρού, λόγω μικροβιακής δραστηριότητας. Καθώς λοιπόν τα ποσοστά του αζώτου κατά Kjeldahl υπολογίζονται σε ξηρή βάση αξίζει να σημειωθεί ότι η αύξηση της περιεκτικότητας του αζώτου είναι πιο σημαντική όταν υπάρχει μεγάλη αποδόμηση στο οργανικό φορτίο.

4.2.7. Ολικός Οργανικός Άνθρακας – TOC

Η μείωση του οργανικού άνθρακα κατά τα εξελικτικά στάδια της διεργασίας της κομποστοποίησης οφείλεται στη μετατροπή του άνθρακα σε ανόργανες ενώσεις, κυρίως διοξείδιο του άνθρακα (CO₂). Η μεγαλύτερη μεταβολή του οργανικού άνθρακα πραγματοποιείται κατά τη θερμόφιλη φάση, ενώ η διάσπαση ελαττώνεται εξαιτίας της μείωσης της μικροβιακής δραστηριότητας.

Compost 1

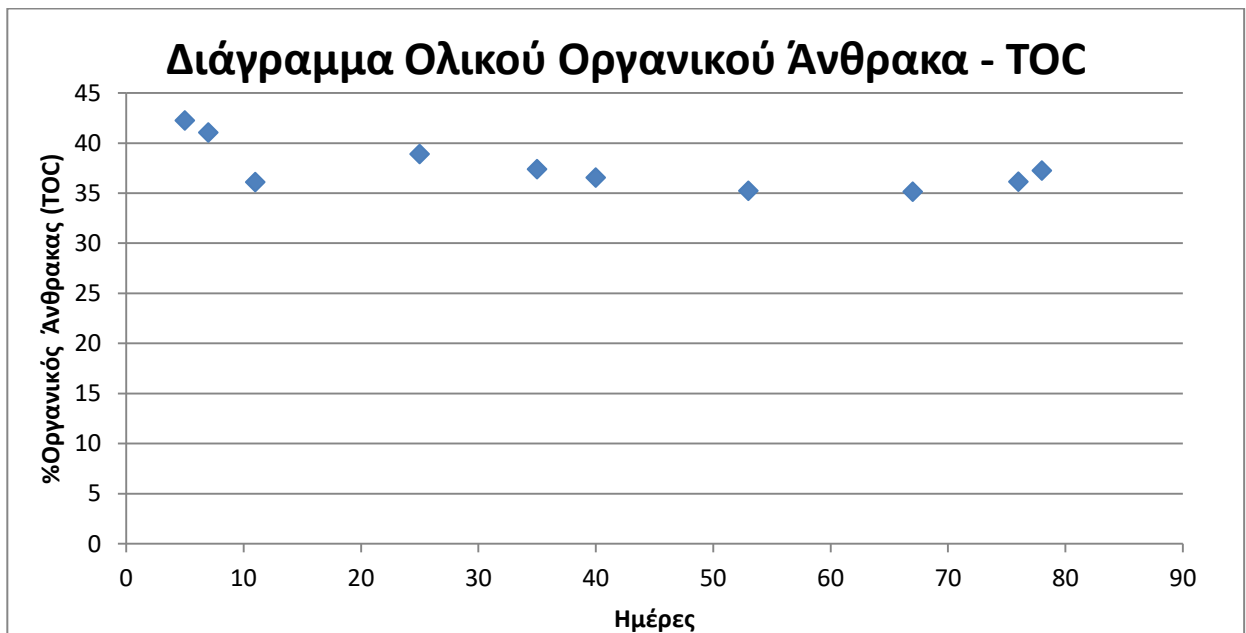
Όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 16 ο ολικός οργανικός άνθρακας ελαττώνεται κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης, συγκεκριμένα από το 37,5% μειώθηκε στο 30,7%. Το ποσοστό του ανόργανου άνθρακα ήταν της τάξης του 0,1% και για αυτό το λόγο θεωρήθηκε αμελητέο στους υπολογισμούς.



Διάγραμμα 16 : Διάγραμμα Ολικού Οργανικού Άνθρακα (TOC) Compost 1.

Compost 2

Όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 17 ο ολικός οργανικός άνθρακας ελαττώνεται κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης, συγκεκριμένα από το 42,2% μειώθηκε στο 35,2%. Το ποσοστό του ανόργανου άνθρακα ήταν της τάξης του 0,1% και για αυτό το λόγο θεωρήθηκε αμελητέο στους υπολογισμούς.



Διάγραμμα 17 : Διάγραμμα Ολικού Οργανικού Άνθρακα (TOC) Compost 2.

Στα δύο παραπάνω διαγράμματα παρατηρούνται κάποιες ανομοιομορφίες στις τιμές του οργανικού άνθρακα, οι οποίες μπορεί να οφείλονται στην δειγματοληψία είτε στην μείωση της μάζας της σορού. Επειδή το ποσοστό εκφράζεται σε ξηρή βάση της συνολικής μάζας και με την αποδόμηση

πραγματοποιείται η μείωση της, είναι λογικό το ποσοστό να έχει κάποιες διακυμάνσεις.

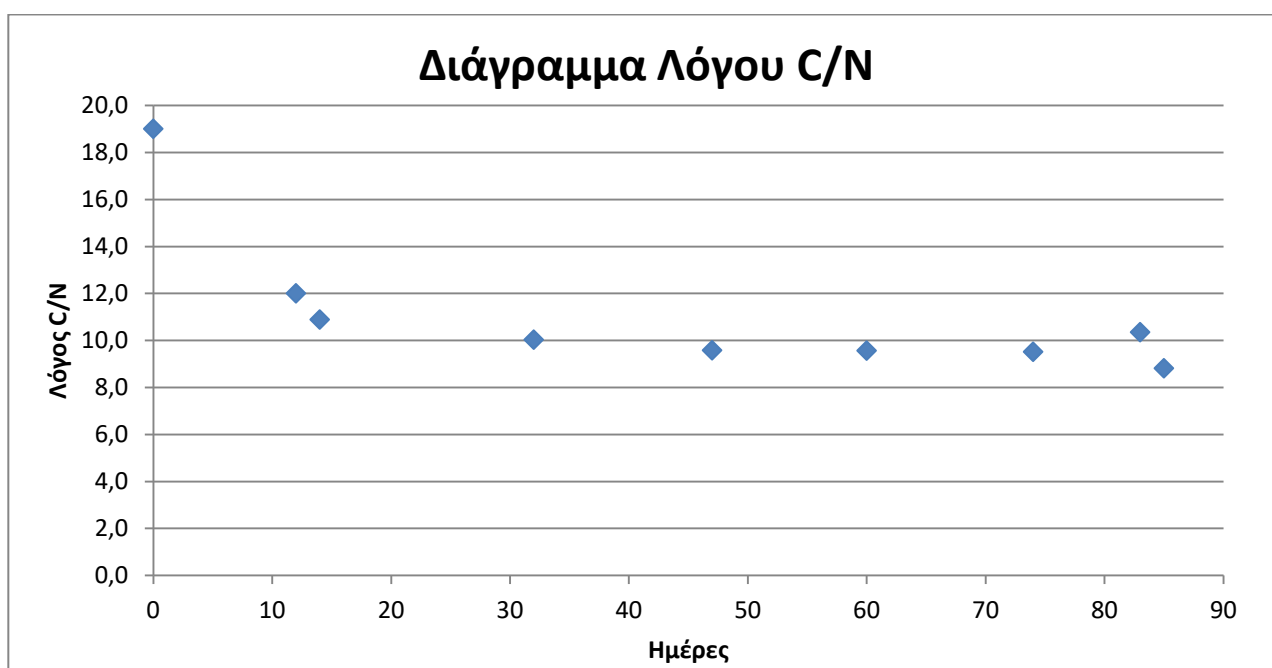
4.2.8. Λόγος C/N

Η αναλογία C/N χρησιμοποιείται από πολλούς ερευνητές ως μία από τις βασικές χημικές παραμέτρους ελέγχου και αξιολόγησης της ποιότητας του τελικού προϊόντος καθότι ο άνθρακας και το άζωτο αποτελούν τα πλέον σημαντικά στοιχεία αναφορικά με τη θρεπτική αξία του compost. Εντούτοις, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως απόλυτος δείκτης ωρίμανσης του compost, καθότι παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση στις τιμές του εξαρτώμενο από τα χαρακτηριστικά του αρχικού υποστρώματος.

Σε όλους τους πειραματικούς κύκλους κομποστοποίησης η αναλογία C/N στο τελικό προϊόν κυμαίνεται από 8,86-11,28 ανάλογα με το αρχικό υπόστρωμα (Μαργαρίτης, 2012). Κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης η αναλογία C/N μειώνεται, γεγονός αναμενόμενο αφού ο οργανικός άνθρακας τείνει να μειωθεί και η περιεκτικότητα σε άζωτο αυξάνεται στη μάζα της σωρού.

Compost 1

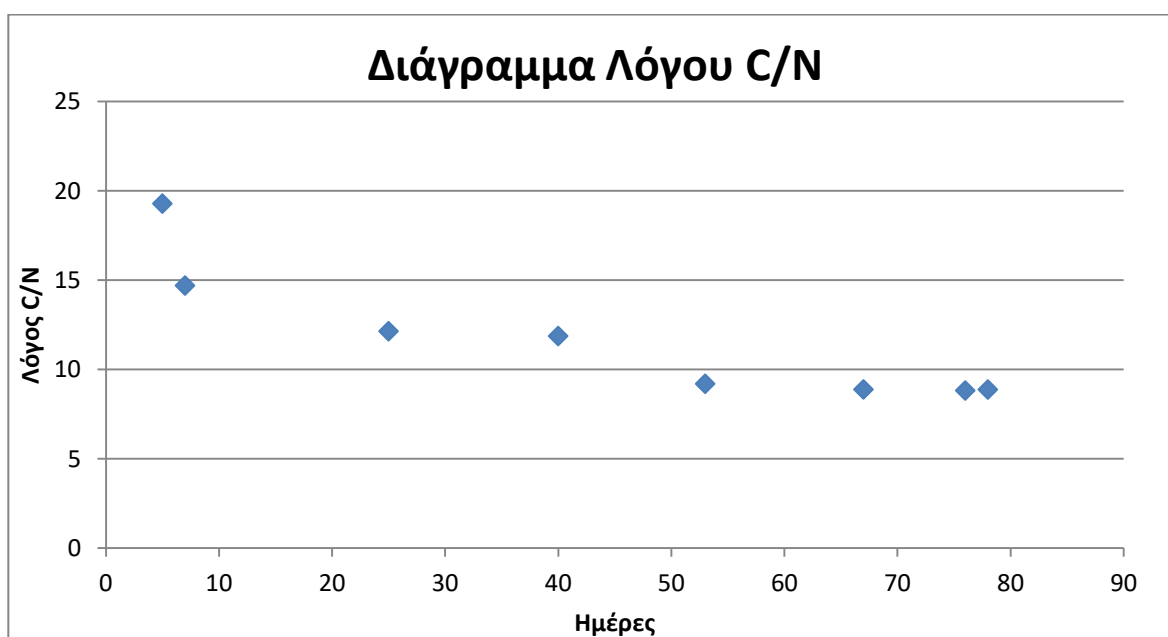
Όπως μπορεί να παρατηρηθεί στο Διάγραμμα 18 η αναλογία C/N κατά τη διάρκεια της πρώτης κομποστοποίησης μειώθηκε αισθητά. Πιο συγκεκριμένα, ξεκίνησε από την τιμή 19 και έφτασε στο 8,8 μετά από 85 ημέρες, ενώ η μεγαλύτερη μείωση παρατηρήθηκε κατά τις πρώτες 10 ημέρες. Επιπλέον, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία η αρχική τιμή του λόγου C/N είναι χαμηλή και αυτό οφείλεται στην χαμηλό ποσοστό οργανικού άνθρακα στο αρχικό υπόστρωμα.



Διάγραμμα 18 : Διάγραμμα C/N Compost 1.

Compost 2

Στο Διάγραμμα 19 φαίνονται οι τιμές της αναλογίας C/N, οι οποίες υπολογίστηκαν για την δεύτερη κομποστοποίηση. Η 5^η ημέρα είναι η πρώτη τιμή που του λόγου που υπολογίστηκε, η οποία έχει την τιμή 19,3 και έπειτα από 78 ημέρες μειώθηκε στο 8,9. Καθώς οι δύο κομποστοποιήσεις διέθεταν το ίδιο υπόστρωμα με διαφορετική αναλογία, μπορεί να παρατηρηθεί πως οι τιμές του λόγου κυμάνθηκαν στα ίδια επίπεδα. Ομοίως λοιπόν και στη δεύτερη σωρό η αρχική τιμή ήταν χαμηλή εξαιτίας του αρχικού ποσοστού οργανικού άνθρακα που υπολογίστηκε.



Διάγραμμα 19 : Διάγραμμα C/N Compost 2.

4.2.9. Φυτοτοξικότητα – Germination Index

Πραγματοποιήθηκε ανάλυση φυτοτοξικότητας και για τα δύο compost στις 9 Σεπτεμβρίου δηλαδή την 91^η ημέρα και 84^η ημέρα για τις δύο σωρούς αντίστοιχα. Ο δείκτης αυτός έχει μεγάλη σημασία ώστε να διαπιστωθεί η ωρίμανση του προϊόντος καθώς και η τοξική ή θρεπτική επίδραση που θα έχει όταν χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό. Για την μέτρηση της φυτοτοξικότητας χρησιμοποιήθηκαν σπόροι από κάρδαμο καθώς έχει την μεγαλύτερη ευαισθησία στην πλειοψηφία των αποβλήτων.

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 15 τα δείγματα που προστέθηκαν στα τρυβλία petri με τους σπόρους από κάρδαμο άνθισαν μέσα σε μόλις 5 ημέρες.



Εικόνα 15 : Αποτέλεσμα της φυτοτοξικότητας.

Στον Πίνακα 9 παριστάνονται οι τιμές που υπολογίστηκαν για τους δείκτες RSG, RRG και GI για τις δύο κομποστοποιήσεις. Επιπλέον έχουν υπολογιστεί οι ίδιοι δείκτες για αραιώση του διηθήματος με απιονισμένο νερό με αναλογία 1:1. Η δοκιμή αυτή πραγματοποιήθηκε ώστε να ελεγχθεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων αναμένοντας ότι ο δείκτης φυτοτοξικότητας θα ήταν μεγαλύτερος στην αραιώση εξαιτίας του απιονισμένου νερού που περιέχει. Πράγματι, στις περιπτώσεις που έγινε αραιώση ο δείκτης φυτοτοξικότητας βρέθηκε υψηλότερος, γεγονός το οποίο παριστάνεται και στον παρακάτω πίνακα.

	RSG	RRG	GI %
Compost 1	1	0,81	80,71
Compost 1 αναλογία 1:1	1,29	1,17	150,74
Compost 2	1,14	0,75	85,92
Compost 2 αναλογία 1:1	1,21	0,90	109,03

Πίνακας 9 : Δείκτης φυτοτοξικότητας.

Σημαντικό είναι το compost όχι μόνο να είναι ώριμο αλλά και να μην προκαλέσει ζημιές στο έδαφος μετά την τοποθέτηση του, εξαιτίας των τοξικών ουσιών που μπορεί να έχει. Οι τοξικές αυτές ουσίες διεισδύουν στο έδαφος και

εμποδίζουν την ανάπτυξη των φυτών και των μικροοργανισμών που βρίσκονται σε αυτό. Για αυτό το λόγο έχουν δημιουργεί κατηγορίες στις οποίες εντάσσονται τα προϊόντα της κομποστοποιήσεως σύμφωνα με την τοξικότητά τους.

Grade	Δείκτης Φυτοτοξικότητας [%]	Τοξικότητα	Εφαρμογή
IV	$GI \leq 50$	Υψηλή	Δεν μπορεί να εφαρμοστεί
III	$50 \leq GI < 65$	Μεσαία	Μπορεί να εφαρμοστεί σε φτωχό έδαφος για την βελτίωση του
II	$65 \leq GI < 80$	Χαμηλή	Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μακροπρόθεσμη απελευθέρωση θρεπτικών συστατικών
I	$80 \leq GI$	Καθόλου	Μπορεί να εφαρμοστεί για επιτάχυνση της βλάστησης

Πίνακας 10 : Κατηγορίες δείκτη Φυτοτοξικότητας (Cui et al., 2017).

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν και για τα δύο compost σύμφωνα με τον Πίνακα 10 είναι πως και στις δύο κομποστοποιήσεις το τελικό προϊόν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εδάφη για μακροπρόθεσμη απελευθέρωση θρεπτικών συστατικών. Αυτό σημαίνει ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν εδαφοβελτιωτικά καθώς έχουν απομακρυνθεί τυχόν τοξικές ουσίες που θα μπορούσαν να προκαλέσουν ζημιά στο έδαφος.

4.2.10. Χουμικά και Φουλβικά Οξέα (Humic and Fulvic Acids)

Τα Χουμικά και τα Φουλβικά οξέα είναι ενώσεις δύσκολα υπολογίσιμες εξαιτίας της ποικιλομορφίας που διαθέτουν σαν κατηγορίες ενώσεων. Παρόλα αυτά γνωρίζουμε από την βιβλιογραφία (Van Zomeren & Comans, 2007), τα χουμικά οξέα είναι διαλυτά σε όξινο pH (δηλαδή μικρότερο από 2) οπότε με την αλλαγή του pH διευκολύνεται ο διαχωρισμός τους από τα φουλβικά και ο υπολογισμός τους. Στην Εικόνα 16 φαίνονται τα δύο κλάσματα που έχουν σχηματιστεί στο ποτήρι ζέσεως εξαιτίας του όξινου pH.



Εικόνα 16 : Διαχωρισμός Χουμικών και Φουλβικών.

Αφού πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις στις μάζες των falcon και στα φιλτράκια προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα.

Κομποστοποίηση	% Χουμικά Οξέα	% Φουλβικά Οξέα
Compost 1	11,2	7,6
Compost 2	12,9	9,7

Πίνακας 11 : Αποτελέσματα % Χουμικών και % Φουλβικών στις δύο κομποστοποιήσεις.

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 11 τα χουμικά οξέα και στις δύο κομποστοποιήσεις υπερτερούν έναντι των φουλβικών οξέων. Αυτό σημαίνει πως έχει ξεκινήσει η χουμοποίηση, διότι κατά τη διαδικασία αυτή τα φουλβικά οξέα μετατρέπονται σε χουμικά. Σύμφωνα με άλλες έρευνες στα πρώτα στάδια της κομποστοποίησης τα φουλβικά είναι περισσότερα από τα χουμικά οξέα.

4.3. Αξιολόγηση τελικού προϊόντος

4.3.1. Compost 1



Εικόνα 17 : Συγκριτική εικόνα αρχή και τέλος Compost 1.

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί και στην Εικόνα 17 είναι εμφανής η μείωση του όγκου της σωρού, πράγμα το οποίο αναμενόταν να πραγματοποιηθεί λόγω αποδόμησης του οργανικού φορτίου και αύξησης της θερμοκρασίας. Επιπλέον, πραγματοποιείται ομογενοποίηση της σωρού μέσω ανάδευσης με αποτέλεσμα τα κενά που δημιουργήθηκαν από τα κλαδέματα, σε συνδυασμό με την μικροβιακή δράση, να μειώνονται και να μετατρέπονται σε χώμα. Τέλος, κατά τη διεργασία υπάρχει απώλεια διοξειδίου του άνθρακα και άλλων πτητικών συστατικών άρα και μείωση της μάζας της σωρού.

Στην περίπτωση της πρώτης κομποστοποίησης παρατηρήθηκαν τα εξής :

Οσμή

Κατά στην έναρξη της κομποστοποίησης υπήρχε έντονη δυσοσμία που οφειλόταν στα τροφικά υπολείμματα που είχαν ξηρανθεί. Η οσμή αυτή διήρκεσε περίπου 2 εβδομάδες ενώ μετά ξεκίνησε ελαττώνεται αισθητά, λόγω της καλής ανάδευσης που πραγματοποιούνταν καθημερινά.

Χρώμα

Το χρώμα της σωρού ξεκίνησε να μεταβάλλεται από την πρώτη κιόλας εβδομάδα και από πράσινο – καφέ, λόγω των κλαδεμάτων, να γίνεται καφέ. Στο τέλος της θερμόφιλης φάσης παρατηρήθηκε ένα αρκετά σκούρο χρώμα γεγονός που οφείλεται στην χουμποποίηση των οργανικών συστατικών.

Έντομα

Κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης υπήρξε η παρουσία εντόμων, η οποία ήταν έντονα αισθητή για τις πρώτες 2 εβδομάδες. Η ύπαρξη αυτή οφείλεται στα τροφικά υπολείμματα, τα οποία αποτέλεσαν πηγή έλξης των εντόμων, ενώ η εξαφάνισή τους έγινε όταν ξεκίνησε η μετατροπή της σωρού σε χώμα.

Κοκκομετρία

Στην αρχή της κομποστοποίησης υπήρχε έντονη ανομοιομορφία εξαιτίας των διαφορετικών υλικών που προστέθηκαν στον κομποστοποιητή, ενώ τα τροφικά υπολείμματα ήταν πιο συμπαγή. Με την καθημερινή ανάδευση και την μικροβιακή δραστηριότητα ξεκίνησαν να χωματοποιούνται κατά τις πρώτες 2 εβδομάδες. Στην Εικόνα 18 φαίνεται το τελικό υλικό που προέκυψε ενώ είναι διακριτά κάποια κλαδιά τα οποία δεν αποδομήθηκαν. Το γεγονός αυτό είναι λογικό διότι στα κλαδέματα υπήρχαν και αρκετά χοντρά κομμάτια ξύλου στα οποία οι μικροοργανισμοί δεν είχαν εύκολη πρόσβαση για να τα διασπάσουν.



Εικόνα 18 : Τελική μορφή Compost 1.

4.3.2. Compost 2



Εικόνα 19 : Συγκριτική εικόνα αρχή και τέλος Compost 2.

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί και στην Εικόνα 19 μειώθηκε ο όγκος της σωρού, πράγμα το οποίο είναι αναμενόμενο λόγω αποδόμησης του οργανικού φορτίου και αύξησης της θερμοκρασίας. Συγκριτικά με την πρώτη κομποστοποίηση, η δεύτερη από την αρχή είχε μικρότερο όγκο λόγω μικρότερου ποσοστού των κλαδεμάτων, που αποτελούν και τον διογκωτικό παράγοντα. Επιπλέον, στην εν λόγω σωρό η ανάδευση πραγματοποιούνταν με μεγαλύτερη δυσκολία καθώς τα τροφικά υπολείμματα δεν διέθεταν τόσο διαθέσιμο χώρο από τα κλαδέματα.

Στην περίπτωση της δεύτερης κομποστοποίησης παρατηρήθηκαν τα εξής :

Οσμή

Κατά στην έναρξη της κομποστοποίησης υπήρχε έντονη δυσοσμία που οφειλόταν στα τροφικά υπολείμματα που είχαν ξηρανθεί. Η οσμή αυτή διήρκεσε περίπου 2 με 3 εβδομάδες ενώ μετά ξεκίνησε ελαττώνεται. Η οσμή κράτησε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα ενδεχομένως επειδή τα τροφικά υπολείμματα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν περισσότερα και πιο συμπαγή.

Χρώμα

Παρομοίως το χρώμα της σωρού ξεκίνησε να μεταβάλλεται από την πρώτη κιόλας εβδομάδα προς το καφέ. Στο τέλος της θερμόφιλης φάσης παρατηρήθηκε ένα αρκετά σκούρο χρώμα εξαιτίας της χουμοποίησης των οργανικών συστατικών.

Έντομα

Η παρουσία εντόμων στην δεύτερη κομποστοποίηση διήρκησε περισσότερο, περίπου 3 εβδομάδες, καθώς τα τροφικά υπολείμματα κυριαρχούσαν στη μάζα της σωρού.

Κοκκομετρία

Στην αρχή της κομποστοποίησης υπήρχε έντονη ανομοιομορφία αν και τα τροφικά υπολείμματα που κατείχαν τον μεγαλύτερο όγκο του compost . Ομοίως με την πρώτη, στη δεύτερη κομποστοποίηση με τη βοήθεια της καθημερινής ανάδευσης και την μικροβιακή δραστηριότητα ξεκίνησαν να χωματοποιούνται κατά τις πρώτες 2 εβδομάδες. Στην Εικόνα 20 φαίνεται το τελικό υλικό που προέκυψε ενώ είναι διακριτά κάποια κλαδιά που δεν αποδομήθηκαν.



Εικόνα 20 : Τελική Μορφή Compost 2.

Κεφάλαιο 5ο : Μοντελοποίηση Κομποστοποίησης – Aquasim

Για την μοντελοποίηση του συγκεκριμένου πειράματος χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Aquasim, ένα πρόγραμμα ιδανικό για προσομοίωση (Simulation) χημικών και βιοχημικών διεργασιών αλλά και την εκτίμηση παραμέτρων (Parameter Estimation) με βάση πειραματικά δεδομένα.

Αρχικά το μοντέλο βασίστηκε σε ένα ήδη υπάρχων (Αριστείδης Δ. Ραψωματιώτης, 2016) ενώ έγιναν κάποιες τροποποιήσεις ώστε να περαστούν και οι δύο κομποστοποιήσεις στο πρόγραμμα. Πιο συγκεκριμένα προστέθηκαν περισσότερες μεταβλητές (Variables), οι οποίες περιέχουν τους δείκτες 1 και 2 για τα πειράματα με αναλογίες 50:50 και 75:25 αντίστοιχα. Το μοντέλο περιέχει ισοζύγια μάζας και ενέργειας ενώ τα αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν παρακάτω αποτελούν έναν συνδυασμό των πειραματικών δεδομένων και των εκτιμώμενων τιμών που εξάγει το Aquasim.

Τέλος, η προσομοίωση των αποτελεσμάτων στο πρόγραμμα Aquasim αποτελεί μία προσπάθεια για μοντελοποίηση της διεργασίας της κομποστοποίησης με απώτερο σκοπό την χρήση του στον σχεδιασμό παρόμοιων μονάδων μεγάλης κλίμακας.

5.1. Περιγραφή Μοντέλου

5.1.1. Μεταβλητές

- Θερμοκρασία

Οι μεταβλητές που αφορούν θερμοκρασίες είναι οι εξής :

T : η δυναμική μεταβλητή που εκφράζει την απόλυτη θερμοκρασία του compost [K]

T_a : η θερμοκρασία περιβάλλοντος [K]

T_{exp} : η πειραματική τιμή της θερμοκρασίας [K]

Στο Aquasim υπάρχουν οι αντίστοιχες μεταβλητές που εκφράζουν την θερμοκρασία σε °C.

- Υγρασία

Οι μεταβλητές που αφορούν την υγρασία είναι οι εξής :

moist : οι πειραματικές μετρήσεις της % υγρασίας [%], οι οποίες υπολογίστηκαν με τη μέθοδο της ξήρανσης

mw : η μάζα του περιεχόμενου νερού [kg], η μεταβλητή αυτή περιέχει έναν συντελεστή που αποτελείται από το πηλίκο της ελάχιστης υγρασίας προς της μέγιστης υγρασίας.

mw exp : η πειραματική τιμή της μάζας του νερού [kg], η οποία προκύπτει από το γινόμενο της πειραματικής τιμής της υγρασίας με τη συνολική μάζα του compost

- Πτητικά Στερεά

Οι μεταβλητές που αφορούν τα πτητικά στερεά είναι οι εξής :

VSexp : οι πειραματικές μετρήσεις των % πτητικών στερεών [%] που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της διεργασίας

VS : η μεταβλητή που υπολογίζει τα % πτητικά στερεά με βάση την μάζα των βιοαποδόμησιμων [%]

- Όγκος

V : είναι η μεταβλητή που υπολογίζει τον όγκο που περιέχεται στον αντιδραστήρα σύμφωνα με την μάζα (m) προς την πυκνότητα (d) των ανόργανων, βιοαποδομήσιμων και του νερού [m³]

- Απώλεια θερμότητας

Q_{loss} : είναι η θερμότητα [kJ/d] χάνεται από τα τοιχώματα του αντιδραστήρα και υπολογίζεται από τον τύπο $Q_{loss} = U \cdot A \cdot (T_a - T)$

5.1.2. Σταθερές

Οι σταθερές που χρησιμοποιήθηκαν στο Aquasim είναι βιβλιογραφικές και βασίζονται σε αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα (Αριστείδης Δ. Ραψωματιώτης, 2016). Με τη βοήθεια του προγράμματος και θέτοντας μέγιστη και ελάχιστη τιμή από τις βιβλιογραφικές τιμές, έγινε προσαρμογή των σταθερών στα πειραματικά δεδομένα της παρούσας διπλωματικής. Παρακάτω παριστάνεται ο πίνακας που περιέχει τις σταθερές και τις τιμές οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων του προγράμματος.

Σύμβολο	Περιγραφή	Μονάδα	Τιμή
RH	Σχετική υγρασία αέρα	%	0,4
Cp _b	Ειδική θερμοχωρητικότητα του προς κομποστοποίηση υλικού	kJ/kg	13,9
Cp _i	Ειδική θερμοχωρητικότητα	kJ/kg	12,2

αδρανών			
C _{pw}	Ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού (υγρασία)	kJ/kg	4,2
YH	Θερμότητα καύσης του υποστρώματος	kJ/kg	19565
UA	Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας * Εμβαδόν επιφάνειας	kJ/d*K	563

Πίνακας 12 : Σταθερές του Μοντέλου (Αριστείδης Δ. Ραψωματιώτης, 2016).

5.1.3. Ισοζύγια

Επιπλέον στην προσομοίωση του Aquasim χρησιμοποιήθηκε το ισοζύγιο μάζας των βιοαποδομήσιμων καθώς και το ισοζύγιο ενέργειας που παρουσιάζονται παρακάτω (Αριστείδης Δ. Ραψωματιώτης, 2016).

i. Ισοζύγιο Μάζας Βιοαποδομήσιμων

$$\frac{dm_b}{dt} = -k \cdot m_b$$

Όπου m_b : είναι η μάζα των βιοαποδομήσιμων

k : η κινητική σταθερά της διεργασίας

Η κινητική σταθερά εκφράζεται με τον εξής τύπο :

$$k = k_{20} \cdot \theta_1^{(T-20)} - k_{75} \cdot \theta_2^{(75-T)}$$

Όπου k_{20} , k_{75} , θ_1 και θ_2 σταθερές που εξαρτώνται από το υπόστρωμα.

k_{20} : σταθερά αύξησης της βιοαποδόμησης, με την άνοδο της θερμοκρασίας στη σωρό οι μικροοργανισμοί διασπούν το οργανικό φορτίο με αυξανόμενο ρυθμό

k_{75} : σταθερά ελάττωσης της βιοαποδόμησης, μετά τους 75 °C η μικροβιακή δραστηριότητα μειώνεται εξαιτίας της πρόωρης θανάτωσης των μικροοργανισμών

Οι σταθερές αυτές έπειτα από προσαρμογή τους στα πειραματικά δεδομένα οι σταθερές αυτές πήραν τις τιμές που φαίνονται στον Πίνακας 13.

Σταθερά	Τιμή
k_{20}	0,076739
k_{75}	0,043257
θ_1	0,99906
θ_2	0,99649

ii. Ισοζύγιο Ενέργειας

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Q_{loss} + (rate_b \cdot YH) - (T \cdot Cp_b \cdot rate_b)}{m_i \cdot Cp_i + m_b \cdot Cp_b + m_w \cdot Cp_w}$$

Όπου Q_{loss} : είναι η απώλεια θερμότητας από τα τοιχώματα του αντιδραστήρα

$Rate_b$: είναι ο ρυθμός της βιοαποδόμησης

m : είναι οι μάζες των ανόργανων, βιοαποδομήσιμων και του νερού

Cp : είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα των ανόργανων, βιοαποδομήσιμων και του νερού

YH : θερμότητα καύσης του υποστρώματος

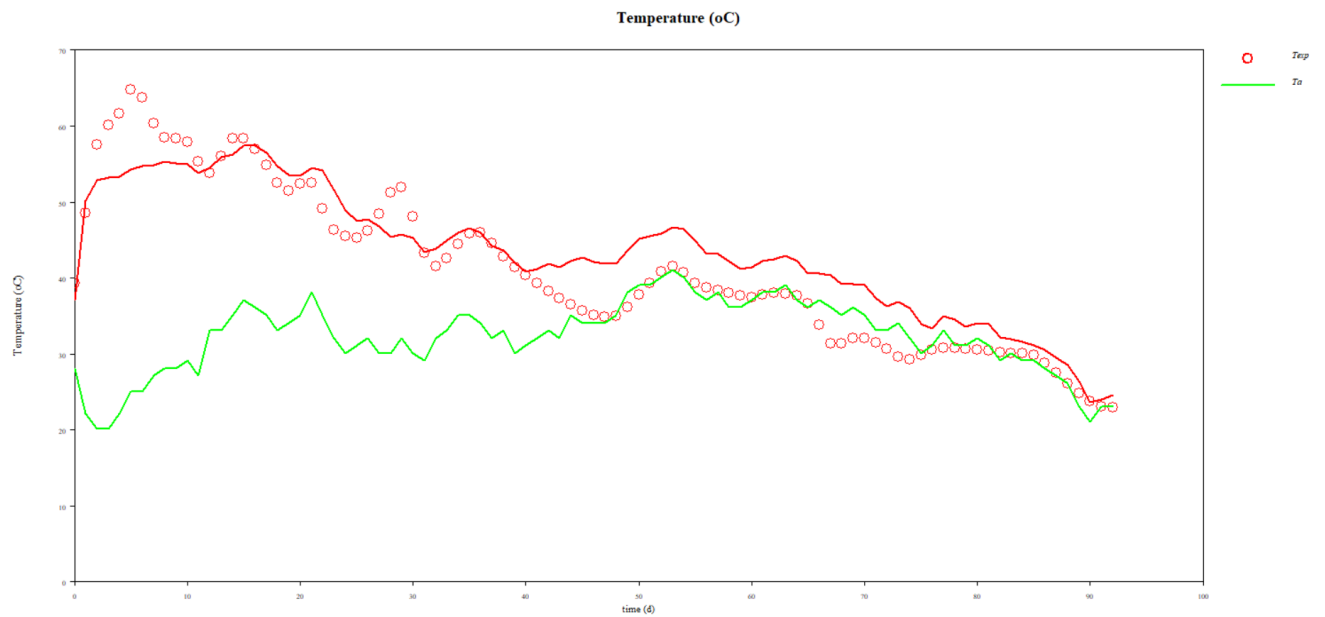
5.2. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων του Aquasim

Οι βασικοί παράμετροι που υπολογίστηκαν από το Aquasim και σχολιάζονται παρακάτω είναι η θερμοκρασία, τα % πτητικά στερεά και ο ρυθμός βιοαποδόμησης.

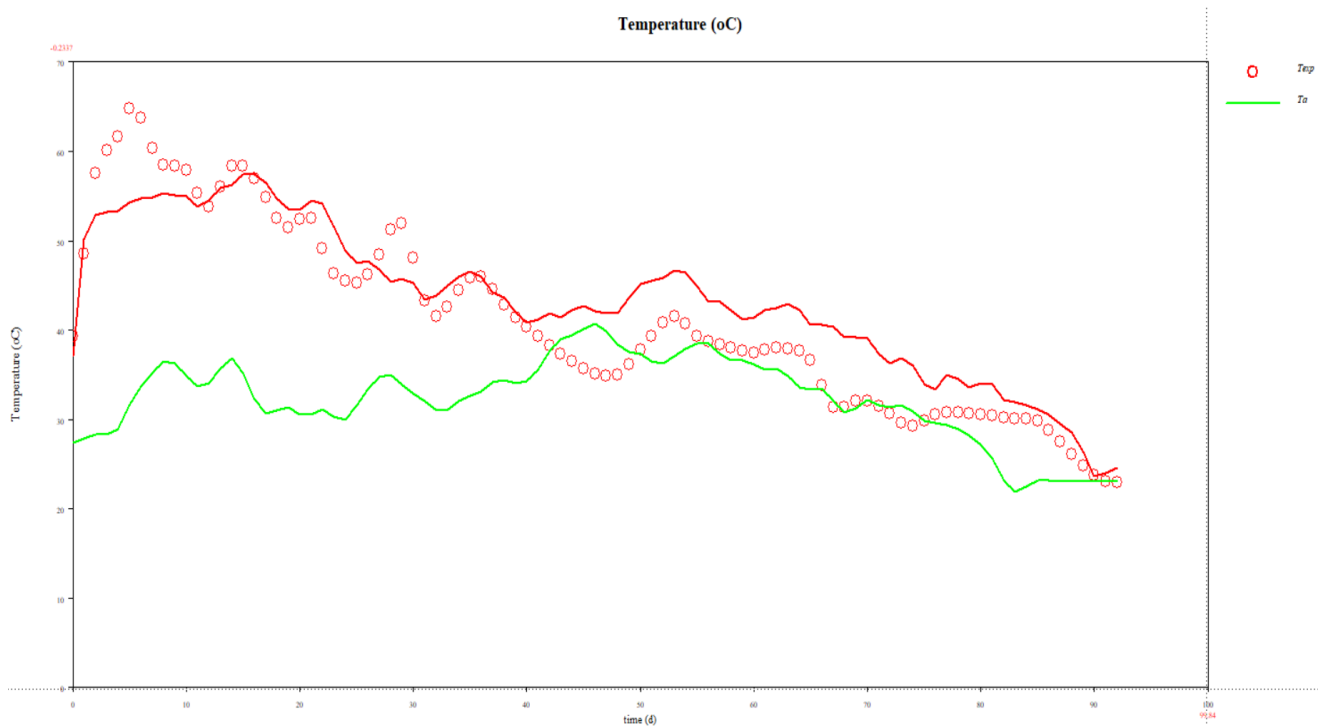
5.2.1. Θερμοκρασία

Τα διαγράμματα της θερμοκρασίας για τις δύο κομποστοποιήσεις φαίνονται παρακάτω. Η πράσινη γραμμή αντιπροσωπεύει την θερμοκρασία του περιβάλλοντος, τα κόκκινα σημεία είναι τα πειραματικά δεδομένα που προστέθηκαν στο πρόγραμμα, ενώ η κόκκινη καμπύλη είναι απόλυτη τιμή της θερμοκρασίας, την οποία το Aquasim έκανε προσαρμογή στα πειραματικά.

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί και στα δύο διαγράμματα είναι διακριτές οι φάσεις της κομποστοποίησης, θερμόφιλη, σταθεροποίησης και ωρίμανσης. Μια μικρή διαφορά των πειραματικών σε σχέση με το μοντέλο οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την προσθήκη νερού η θερμοκρασία των δύο σωρών αυξανόταν, μεταβολές τις οποίες δεν τις προσομοιάζει το Aquasim. Παρόλα αυτά η προσομοίωση έδωσε ένα ικανοποιητικό αποτέλεσμα για την παρακολούθηση των παραμέτρων ελέγχου κατά τη διάρκεια της βιοσταθεροποίησης.



Διάγραμμα 20 : Διάγραμμα Θερμοκρασίας Compost 1 - Προσομοίωση Aquasim.



Διάγραμμα 21 : Διάγραμμα Θερμοκρασίας Compost 2 - Προσομοίωση Aquasim.

5.2.2. Πτητικά στερεά

Τα πτητικά στερεά είναι η τιμή που περιγράφει το ποσοστό των οργανικών ενώσεων που περιέχονται στη μάζα του compost. Η τιμή αυτή, όπως διαπιστώθηκε από τα πειραματικά δεδομένα, αναμένεται να μειωθεί κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Τα διαγράμματα που προέκυψαν από την προσομοίωση στο Aquasim

φαίνεται να προσεγγίζουν σε μεγάλο βαθμό τα πειραματικά δεδομένα. Ο τύπος με τον οποίο περάστηκαν στο πρόγραμμα είναι ο εξής :

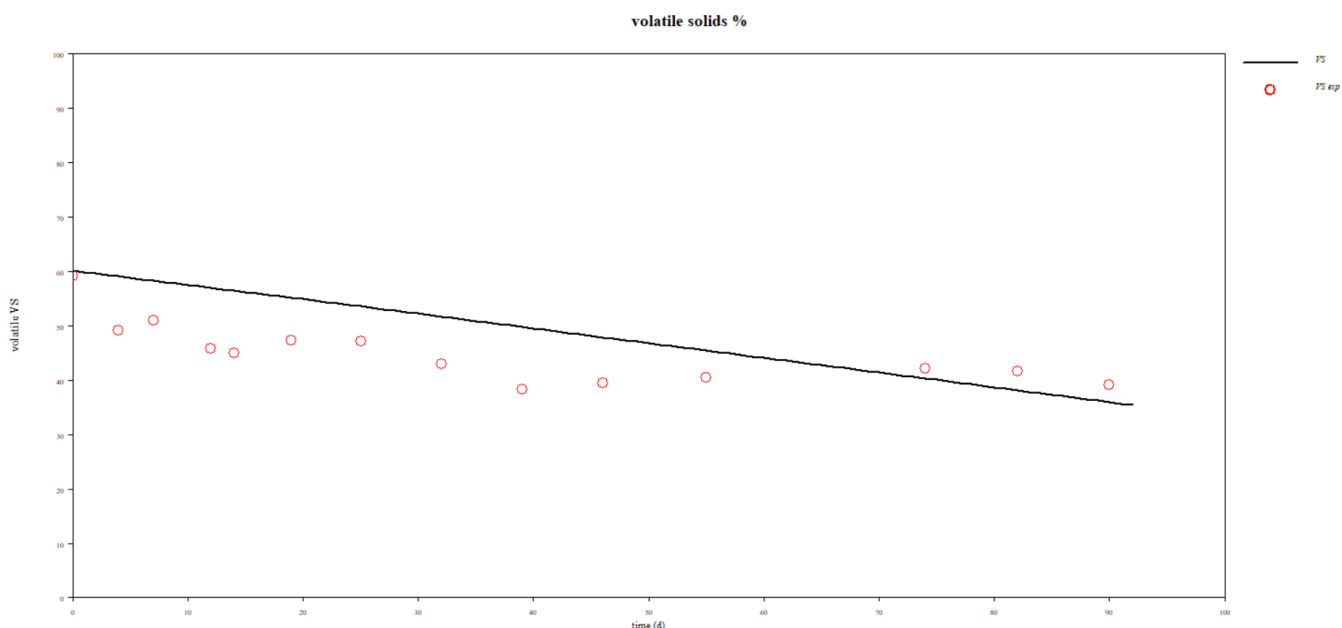
$$\text{Volatile Solids \%} = \frac{m_b}{m_b + m_i} \cdot 100\%$$

Όπου m_b η μάζα των βιοαποδομήσιμων

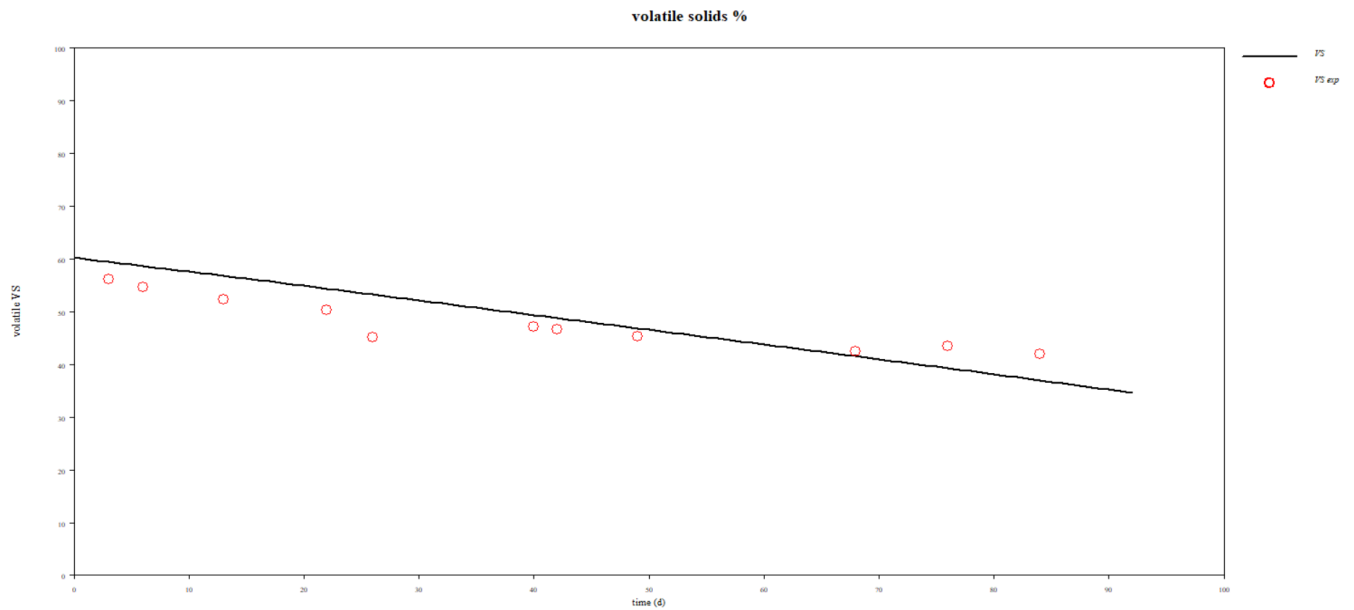
m_i η μάζα των ανόργανων

Επειδή υπολογίζονται σε ξηρή βάση δεν προστίθεται η μάζα του νερού στον τύπο.

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από τα δύο επόμενα διαγράμματα, η προσομοίωση του Aquasim είναι αρκετά κοντά στα πειραματικά δεδομένα. Τα πτητικά στερεά μειώνονται λόγω της βιοαποδόμησης του οργανικού φορτίου, ενώ φαίνεται να υπάρχει μία σχετικά γραμμική πορεία στην μείωση αυτή. Βέβαια και στα δύο διαγράμματα οι πειραματικές τιμές των πρώτων πενήντα ημερών βρίσκονται κάτω από τη γραμμή που υπολογίζει το πρόγραμμα, ενώ οι τελευταίες μετρήσεις βρίσκονται από πάνω. Το γεγονός αυτό εξηγείται από το ότι στη θερμόφιλη φάση, η μείωση των πτητικών στερεών είναι μεγαλύτερη λόγω αυξημένης μικροβιακής δραστηριότητας.



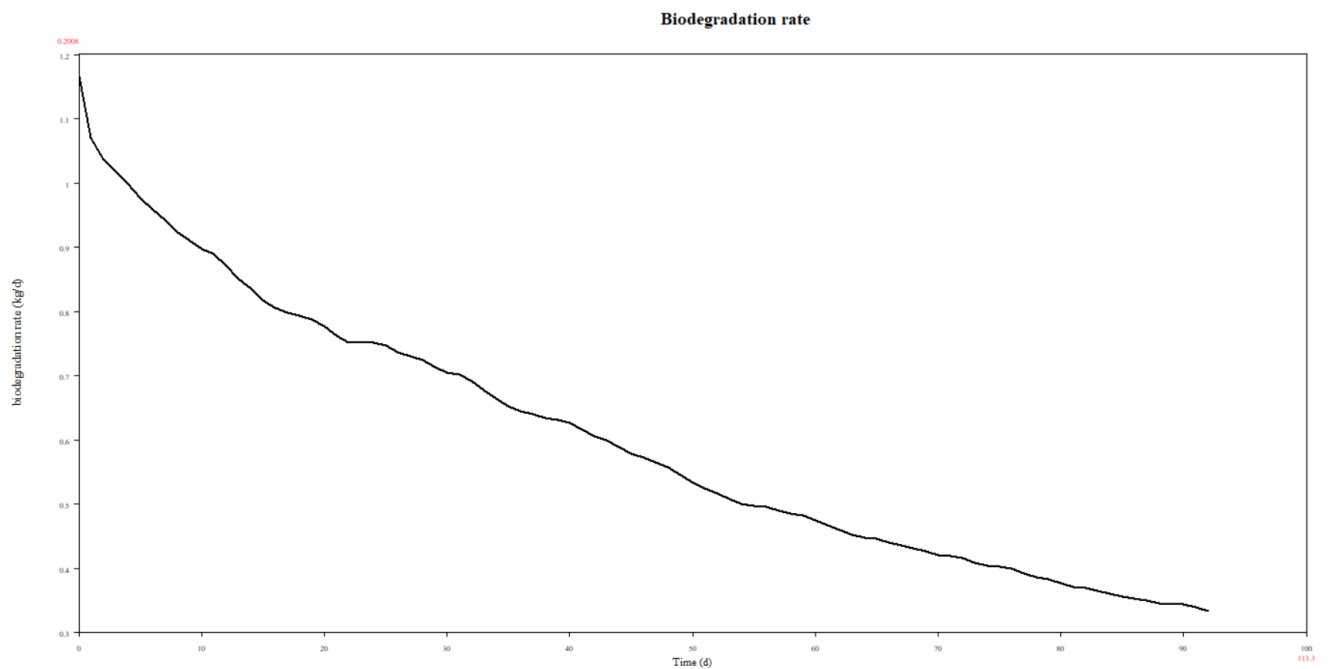
Διάγραμμα 22 : Διάγραμμα % Πτητικών Στερεών Compost 1 - Προσομοίωση Aquasim.



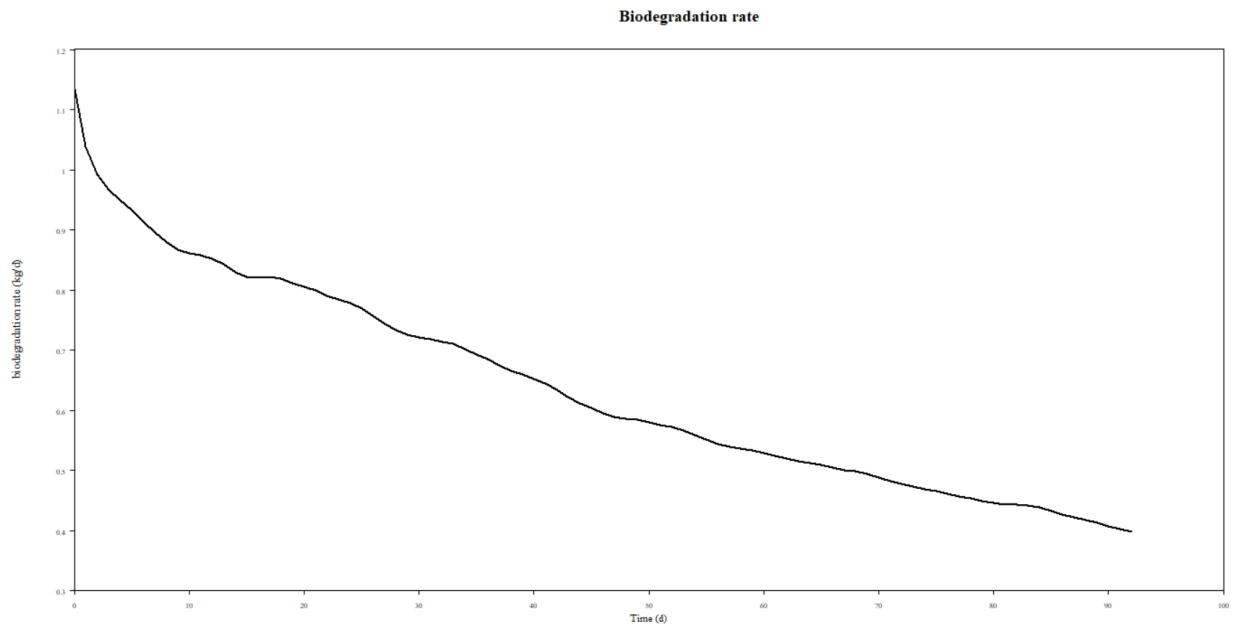
Διάγραμμα 23: Διάγραμμα % Πτητικών Στερεών Compost 2 - Προσομοίωση Aquasim.

5.2.3. Ρυθμός Βιοαποδόμησης

Ο ρυθμός βιοαποδόμησης των οργανικών συστατικών της σωρού είναι αναμενόμενο να μειώνεται κατά τη διάρκεια της διεργασίας εφόσον ελαττώνεται η θερμοκρασία άρα και η μικροβιακή δραστηριότητα. Η θερμοφιλή φάση είναι εκείνη στην οποία ο ρυθμός παίρνει την μέγιστη τιμή του, ενώ με τη σταδιακή ωρίμανση του compost οι μικροοργανισμοί δρουν όλο και λιγότερο εξαιτίας της εξαφάνισης των άμεσα βιοαποδομήσιμων ενώσεων.



Διάγραμμα 24 : Διάγραμμα Ρυθμού Βιοαποδόμησης Compost 1 - Προσομοίωση Aquasim.



Διάγραμμα 25 : Διάγραμμα Ρυθμού Βιοαποδόμησης Compost 2 - Προσομοίωση Aquasim.

Κεφάλαιο 6ο : Συμπεράσματα και Προτάσεις

Συμπεράσματα

Σύμφωνα με τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια των δύο κομποστοποιήσεων, όλα έδειξαν πως οι λειτουργικές παράμετροι κυμάνθηκαν στα επιθυμητά επίπεδα. Και στις δύο περιπτώσεις, το βιολογικά σταθεροποιημένο προϊόν μπορεί να διατεθεί στο χώμα ως μη φυτοτοξικό compost.

Αρχικά, με το διάγραμμα της θερμοκρασίας είναι διακριτές οι φάσεις της κομποστοποίησης, θερμόφιλη, σταθεροποίησης και ωρίμανσης, ενώ η διάρκεια που επικράτησε η θερμόφιλη φάση είναι αρκετή ώστε να απαλλαχτεί η σωρός από παθογόνους μικροοργανισμούς. Επιπλέον, παρατηρήθηκε έντονη μικροβιακή δράση και αποδόμηση του οργανικού φορτίου που φάνηκε με την απότομη αύξηση της θερμοκρασίας και την μείωση των ποσοστών σε πτητικά στερεά και ολικό οργανικό άνθρακα. Μία ακόμα παράμετρος που υπολογίστηκε ήταν ο λόγος C/N, ο οποίος παρά το γεγονός ότι ως αρχική τιμή ήταν αποδεκτή αλλά αρκετά χαμηλή, οι κομποστοποιήσεις πραγματοποιήθηκαν με επιτυχία και αρκετά γρήγορα.

Η πεντάωρη ξήρανση που πραγματοποιήθηκε στο αρχικό υλικό, ως μία νέα πρωτοβουλία, φαίνεται να απέδωσε όσον αφορά την εξέλιξη της διεργασίας, ενώ παράλληλα πραγματοποιήθηκε σημαντική εξοικονόμηση σε ρεύμα και νερό. Κατά την τοποθέτηση των τροφικών υπολειμμάτων φάνηκε να αυξάνεται αποτελεσματικά η μικροβιακή δραστηριότητα, ενώ η περιεχόμενη υγρασία που ήταν υψηλότερη από εκείνη της εννιάωρης ξήρανσης αποτέλεσε σημαντικό παράγοντα για τις πετυχημένες κομποστοποιήσεις.

Η κομποστοποίηση τροφικών υπολειμμάτων είναι μία διαδικασία κατά την οποία πραγματοποιείται ανακύκλωση των αποβλήτων, ενώ ταυτόχρονα παράγεται ένα προϊόν χρήσιμο για τον εμπλουτισμό του χώματος σε θρεπτικά συστατικά. Σύμφωνα με τα παραπάνω, η πραγματοποίηση της παρούσας μελέτης σε βιομηχανική κλίμακα θα μπορούσε να είναι εφικτή και αρκετά αποδοτική.

Τέλος όσον αφορά την προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα Aquasim, φαίνεται ότι τα αποτελέσματα που εξήχθησαν πλησιάζουν αρκετά τα πειραματικά. Επομένως, η εν λόγω προσομοίωση θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και σε άλλες διεργασίες κομποστοποίησης με σκοπό να βοηθήσει στο σχεδιασμό της.

Προτάσεις

Μία πρόταση η οποία θα μπορούσε να βοηθήσει στη βελτιστοποίηση της διεργασίας είναι ο καλύτερος τεμαχισμός των κλαδεμάτων και των τροφικών υπολειμμάτων. Όπως φάνηκε στο τελικό αποτέλεσμα, κάποια κλαδιά δεν

βιοαποδομήθηκαν, καθώς η οργανική ύλη από την οποία αποτελούνται δεν είναι άμεσα διαθέσιμη. Με την αύξηση της επιφάνειας των πρώτων υλών, θα διευκολυνθεί η μικροβιακή δράση και θα αυξηθεί η αποδοτικότητα της διεργασίας.

Βιβλιογραφία

- ANDROS PORTAL. (2020). *Τοπικό Σχέδιο Διαχείρισης Αποβλήτων Άνδρου : Στόχος η διαχείριση του μεγαλύτερου μέρους των απορριμμάτων σε επίπεδο του Δήμου*. <https://www.androsportal.gr/topiko-schedio-diachirisis-apovliton-androu-stochos-i-diachirisi-tou-megaliterou-merous-ton-aporrimmaton-se-epipedo-tou-dimou/>
- Antil, R. S., Raj, D., Abdalla, N., & Inubushi, K. (2014). *Physical, Chemical and Biological Parameters for Compost Maturity Assessment: A Review*. 83–101. https://doi.org/10.1007/978-3-319-08004-8_5
- Azim, K., Soudi, B., Boukhari, S., Perissol, C., Roussos, S., & Thami Alami, I. (2018). Composting parameters and compost quality: a literature review. *Organic Agriculture*, 8(2), 141–158. <https://doi.org/10.1007/s13165-017-0180-z>
- Cáceres, R., & Malin, K. (2018). *Nitrification within composting : A review*. 72, 119–137. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.10.049>
- Cesaro, A., Belgiorno, V., & Guida, M. (2015). Compost from organic solid waste: Quality assessment and European regulations for its sustainable use. *Resources, Conservation and Recycling*, 94, 72–79. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.11.003>
- Chen, Y., Cheng, J. J., & Creamer, K. S. (2008). Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology*, 99(10), 4044–4064. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.057>
- Circular Economy*. (2018). <https://www.europarl.europa.eu/thinktank/infographics/circulareconomy/public/index.html>
- Cui, H. Y., Zhao, Y., Chen, Y. N., Zhang, X., Wang, X. Q., Lu, Q., Jia, L. M., & Wei, Z. M. (2017). Assessment of phytotoxicity grade during composting based on EEM/PARAFAC combined with projection pursuit regression. *Journal of Hazardous Materials*, 326, 10–17. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.09.059>
- Diaz, L. F., & Savage, G. M. (2007). Factors that affect the process. *Waste Management Series*, 8, 49–65. [https://doi.org/10.1016/S1478-7482\(07\)80007-8](https://doi.org/10.1016/S1478-7482(07)80007-8)
- Diaz, L. F., Savage, G. M., Eggerth, L. L., & Chiumenti, A. (2007). Systems used in composting. *Waste Management Series*, 8, 67–87. [https://doi.org/10.1016/S1478-7482\(07\)80008-X](https://doi.org/10.1016/S1478-7482(07)80008-X)
- Epstein, E. (1996). *The science of composting*. European Parliament. (2018). <https://www.europarl.europa.eu/portal/el>
- Gilbert M., M., & Wendell P., E. (2008). *ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΙ ΕΠΙΣΤΗΜΗ*.
- Hall, B. (2004). *Niina Koivula Temporal Perspective of Humification of Organic Matter*

Temporal Perspective of Humification of Organic Matter.

- Insam, H., & De Bertoldi, M. (2007). Microbiology of the composting process. *Compost Science and Technology*, 26–45.
- Iqbal, M. K., Shafiq, T., & Ahmed, K. (2010). Characterization of bulking agents and its effects on physical properties of compost. *Bioresource Technology*, 101(6), 1913–1919. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.10.030>
- Kumar, M., Ou, Y. L., & Lin, J. G. (2010). Co-composting of green waste and food waste at low C/N ratio. *Waste Management*, 30(4), 602–609. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.11.023>
- Lave, B. L. B., Hendrickson, C. T., Conway-schempf, N. M., & Mcmichael, F. C. (1999). *Municipal Solid Waste Recycling Issues. October*, 944–949.
- Makan, A., Assobhei, O., & Mountadar, M. (2013). Effect of initial moisture content on the in-vessel composting under air pressure of organic fraction of municipal solid waste in Morocco. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 10(1), 1–9.
- Malan, C. (2015). Review: Humic and Fulvic Acids. A Practical Approach. *Fertiliser Association of Southern Africa Symposium, Fig 1, Paper 6.*
- Mayhew, L. (2004). Humic Substances in Biological Agricultural Systems. *Development*, 34.
- Meena, A. L., Karwal, M., & Dutta, D. (2021). *Composting : Phases and Factors Responsible for Efficient and Improved Composting. January.* <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.13546.95689>
- Mortula, M. M., Ahmed, A., Fattah, K. P., Zannerni, G., Shah, S. A., & Sharaby, A. M. (2020). Sustainable management of organic wastes in sharjah, uae through co-composting. *Methods and Protocols*, 3(4), 1–12. <https://doi.org/10.3390/mps3040076>
- Quality, F. C. (2002). *Methods Book for the Analysis of Compost.*
- Sabbas, T., Poletini, A., Pomi, R., Astrup, T., Hjelm, O., Mostbauer, P., Cappai, G., Magel, G., Salhofer, S., Speiser, C., Heuss-Assbichler, S., Klein, R., & Lechner, P. (2003). Management of municipal solid waste incineration residues. *Waste Management*, 23(1), 61–88. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(02\)00161-7](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(02)00161-7)
- Sánchez, Ó. J., Ospina, D. A., & Montoya, S. (2017). Compost supplementation with nutrients and microorganisms in composting process. *Waste Management*, 69(26), 136–153. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.012>
- Stamatiadis, S., Werner, M., & Buchanan, M. (1999). *Field assessment of soil quality as affected by compost and fertilizer application in a broccoli[®] eld (San Benito County, California). 12.*
- Tchobanoglous, G., & Kreith, F. (1994). *Εγχειρίδιο ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ* (2th ed.).
- Van Zomeren, A., & Comans, R. N. J. (2007). Measurement of humic and fulvic acid concentrations and dissolution properties by a rapid ratch procedure.

Environmental Science and Technology, 41(19), 6755–6761.
<https://doi.org/10.1021/es0709223>

William F. Brinton. (2000). COMPOST QUALITY STANDARDS & GUIDELINES. *New York State Association of Recyclers*.

Αριστείδης Δ. Ραψωματιώτης. (2016). *Διπλωματική Εργασία Ανάπτυξη μαθηματικού μοντέλου για την κομποστοποίηση*. 1–98.

Βασίλειος Ν., Μ. (2020). *ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΖΥΜΩΣΙΜΩΝ ΑΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΑΙΘΑΝΟΛΗΣ*.

Λυμπεράτος, Γ. (2018). *Διαχείριση στερεων αποβλητων*.

Μαργαρίτης, Μ. (2012). *Αξιοποίηση του βιοαποδομήσιμου κλάσματος απορριμμάτων με χρήση πρότυπου συστήματος οικιακού τύπου*.

Νταρακάς, Ε. (2014). *Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων*.

Παναγιωτακόπουλος, Δ. Χ. (2007). *Βιώσιμη Διαχείριση Αστικών Αποβλήτων*.

Παπαγιάννης, Π. (2015). *Μέθοδοι διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων και εντοπισμός τους στον Ευρωπαϊκό Χώρο*.

Χαραλάμπους, Α. (2018). *Δαχειριση στερεων αποβλητων*.