



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος

Κατεύθυνση: Μηχανικών Περιβάλλοντος

ΜΕΛΕΤΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΛΑΦΟΒΕΛΤΙΩΤΙΚΟΥ ΑΠΟ ΑΠΟΒΛΗΤΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ
ΔΑΦΝΗΣ ΜΠΑΧΛΙΤΖΑΝΑΚΗΣ**



ΧΑΝΙΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ, 2024



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος

Κατεύθυνση: Μηχανικών Περιβάλλοντος

ΜΕΛΕΤΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΛΑΦΟΒΕΛΤΙΩΤΙΚΟΥ ΑΠΟ ΑΠΌΒΛΗΤΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΪΟΥ

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ
ΔΑΦΝΗΣ ΜΠΑΧΛΙΤΖΑΝΑΚΗΣ**

Τριμελής επιτροπή,

Γιαννής Απόστολος (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

Στεφανάκης Αλέξανδρος

Λαζαρίδης Μιχαήλ

‘Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης.’

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα θερμά να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες προς όλους όσους στήριξαν την πορεία μου κατά τη σύνταξη της διπλωματικής μου εργασίας. Αρχικά, ευχαριστώ τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, κύριο Γιάννη Απόστολο, για την παραχώρηση του θέματος για τον πολύτιμο καθοδηγητικό ρόλο του πειραματιστή και να ανακαλύψω.

Επίσης, εκφράζω τις ευγνωμοσύνες μου προς την υπεύθυνη του εργαστηρίου, κυρία Καστανάκη Ελένη οποία με την επιδέξια βοήθειά της στο εργαστήριο, συνέβαλε σημαντικά στην ομαλή διεξαγωγή της μελέτης μου.

Εκφράζω επίσης την ευγνωμοσύνη μου προς τον συνάδελφο Χημικό Μηχανικό, Λουκάκη Χαράλαμπο. Οι γνώσεις και η διαυγής εξηγήσεις του, ανοίγουν νέες προοπτικές και ενισχύουν την επιστημονική μου πορεία. Η συνεχής υποστήριξή του αποτελεί πηγή έμπνευσης και εμπιστοσύνης, και γι' αυτό τον ευχαριστώ θερμά.

Ευχαριστώ την οικογένειά μου για την αφοσίωση και τη συνεχή υποστήριξή της, οικονομική και ψυχική, κατά τη διάρκεια όλων των μαθητικών και φοιτητικών μου χρόνων. Θα ήθελα ακόμα να εκφράζω τις θερμές μου ευχαριστίες προς την εταιρία κομποστοποίησης Green Mountain Project για τον μηχανολογικό εξοπλισμό, τον παρεχόμενο χώρο, την οικονομική συνεισφορά, και τον αφοσιωμένο εργασιακό όμιλο που συνέβαλε στην επιτυχή υλοποίηση της έρευνάς μου. Ευχαριστώ επίσης, όλους τους εργαζομένους που συνέβαλαν με τον επαγγελματισμό και την αφοσίωσή τους.

Τέλος, ευχαριστώ τον δάσκαλο και φίλο μου Γιώργο Γκουντουλογιάννη, που ενώ έφυγε από την ζωή νωρίς βρισκόταν εκεί στα πρώτα βήματα μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η διεργασία της κομποστοποίησης ανοικτού συστήματος με αναδεδυόμενους σωρούς. Η μελέτη εστιάζει στην παραγωγή εδαφοβελτιωτικού από απόβλητα θερμοκηπίου και την ανίχνευση των βέλτιστων συνθήκων κομποστοποίησης, για δύο ρεύματα φυτικών αποβλήτων (τομάτας και πράσινης μίξης). Τα φυτικά υπολείμματα υποβλήθηκαν σε θρυμματισμό και στοιβάχτηκαν σε σωρούς σχήματος κόλουρου κώνου. Στους σωρούς επιτυγχάνεται φυσικός αερισμός μέσω ανάδευσης του υλικού με φορτωτή, πετυχαίνοντας ζύμωση για 95 ημέρες και ωρίμανση για ένα μήνα. Μελετήθηκαν διαφορετικοί παράγοντες κομποστοποίησης ώστε να εντοπιστούν οι συνθήκες βέλτιστης αποδόμησης. Οι παράγοντες που εξετάστηκαν ήταν η σύνθεση του αρχικού υλικού, η συχνότητα ανάδευσης, το μέγεθος σωματιδίων και το ύψος των σωρών. Η απόδοση της κομποστοποίησης ελέγχθηκε μέσω της παρακολούθησης μεταβλητών όπως θερμοκρασία, υγρασία και άλλων φυσικοχημικών παραμέτρων. Οι μετρήσεις εξετάζονται και για όμοιους σωρούς, όπου δηλαδή διαφέρουν κατά ένα παράγοντα κομποστοποίησης. Στην συνέχεια δύναται να αναγνωριστεί η ποιότητα του εδαφοβελτιωτικού (τελικό προϊόν), με δοκιμές δεικτών βλαστικότητας και σε καλλιέργεια μαρουλιών. Ο υψηλότερος δείκτης βλαστικότητας εντοπίστηκε σε σωρό από ρεύμα τομάτας μεγάλου ύψους ήπιας ανάδευσης και μικρού μεγέθους σωματιδίων. Στην καλλιέργεια μαρουλιού την μεγαλύτερη απόδοση παρουσίασε σωρός από ρεύμα πράσινης μίξης, με μεγάλο ύψος και ήπιας ανάδευσης. Ειδικότερα, η προσθήκη εδαφοβελτιωτικού στο χώμα επέφερε 65% αύξηση της μάζας των φυτών και 40% αύξηση μήκους του ριζικού συστήματος, σε σχέση με την τυφή καλλιέργεια. Στα συμπεράσματα της μελέτης δίνονται οι κρίσιμες συνθήκες λειτουργίας για αερόβια κομποστοποίηση με αναδεδυόμενους σωρούς για την βελτίωση της ποιότητας του παραγόμενου προϊόντος.

ABSTRACT

In this study, it was investigated the process of composting in open systems made of piles. The study focused on the production of soil amendments (compost) from greenhouse waste and the investigation of optimal composting conditions of two waste streams (tomato and green mix). Initially the plant residues were shredded and stacked into piles in a conical shape. Natural aeration was achieved through periodic turning of the material with a loader, inducing fermentation for 95 days followed by maturation for one month. Various composting factors were studied to reveal the optimal decomposition conditions. Factors examined included the composition of the initial material, turning frequency, particle size, and pile height. The decomposition efficiency was assessed by monitoring parameters like temperature, moisture, and other physicochemical analyses. Comparison was also conducted for similar windrows, differing by one composting factor. Subsequently, the quality of the soil amendments was evaluated through germination tests and plant cultivation (lettuce). The highest germination index was identified in the pile composed of tomato waste having 3m pile height and moderate turning frequency. In the plant cultivation, the highest performance was observed in the pile with green mix waste, having 3 m pile height and moderate turning frequency. Specifically, it resulted in a 65% increase in plant mass and a 40% increase in root system length compared to control cultivation. This study provides critical operational conditions for aerobic composting to enhance the quality of the produced compost.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1-Εισαγωγή	13
Κεφάλαιο 2-Θεωρητικό υπόβαθρο	14
2.1 Αγροβιομηχανικά απόβλητα	14
2.1.1 Ρεύμα πράσινων αποβλήτων	14
2.1.2 Ρεύμα ζωικών αποβλήτων	14
2.1.3 Ρεύμα συσκευασίας και επεξεργασίας	15
2.2 Επεξεργασία αγροβιομηχανικών αποβλήτων	16
2.2.1 Θερμικές επεξεργασίες	16
2.2.2 Βιολογικές επεξεργασίες	17
2.3 Κομποστοποίηση	20
2.3.1 Συστήματα κομποστοποίησης	20
2.3.2 Φάσεις κομποστοποίησης	24
2.3.3 Καταστάσεις υλικού στο εσωτερικό του σωρού	26
2.3.4 Χημικές αντιδράσεις κατά την διεργασία της κομποστοποίησης	27
2.3.5 Παράμετροι κομποστοποίησης	28
2.3.6 Οφέλη κομποστοποίησης	31
2.3.7 Εγκατάσταση κομποστοποίησης	32
Κεφάλαιο 3- Πείραμα κομποστοποίησης	34
3.1 Αντικείμενο μελέτης	34
3.2 Υλικά και μέθοδοι	34
3.3 Χρονοδιάγραμμα εργασιών	40
Κεφάλαιο 4-Αποτελέσματα	45
4.1 Παρακολούθηση θερμοκρασίας	46
4.1.1 Συγκεντρωτικά διαγράμματα θερμοκρασίας	53
4.1.2 Συγκεντρωτικά διαγράμματα θερμοκρασίας για πράσινη μίξη	54
4.2 Φυτικοχημική ανάλυση	56
4.2.1 Φυτικοχημική ανάλυση σωρών τομάτας	56
4.2.2 Φυτικοχημική ανάλυση σωρών πράσινης μίξης	58
4.3 Χημική Ανάλυση	61
4.3.1 Μέτρηση πτητικών στερεών	61
4.3.2 Μέτρηση στοιχειακού άνθρακα	62
4.3.3 Μέτρηση στοιχειακού αζώτου	64
4.3.4 Μέτρηση λόγου άνθρακα-αζώτου	65
4.4 Έλεγχος βλαστικότητας	67
4.4.1 Έλεγχος βλαστικότητας για εδαφοβελτιωτικά τομάτας	67

4.4.2 Έλεγχος βλαστικότητα σε εδαφοβελτιωτικά πράσινης μίξης	69
4.5 Δοκιμή σε καλλιέργεια.....	72
4.5.1 Δοκιμή εδαφοβελτιωτικών τομάτας.....	72
4.5.2 Δοκιμή εδαφοβελτιωτικού πράσινης μίξης.....	74
Κεφάλαιο 5-Συγκρίσεις όμοιων σωρών	78
5.1 Σύγκριση βάσει υλικού.....	78
5.2 Σύγκριση βάσει σωματιδίων άλεσης.....	83
5.3 Σύγκριση βάσει ύψους σωρών	88
5.4 Σύγκριση βάσει συχνότητας αερισμού	93
Κεφάλαιο 6 – Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα	100
6.1 Θερμοκρασία	100
6.2 Υγρασία.....	100
6.3 Μέγεθος σωματιδίων άλεσης	100
6.4 Συχνότητα αερισμού	101
6.5 Ύψος σωρού	101
6.6 Μελλοντική έρευνα	102
6.7 Προτεινόμενες συνθήκες κομποστοποίησης	102
Βιβλιογραφία	104
Παραρτήματα	108

Περιεχόμενα πινάκων

Πίνακας 1-Απαίτηση οξυγόνου κατά τις θερμικές διεργασίες	16
Πίνακας 2-Μικροβιακή κοινότητα στην μεσόφιλη φάση	24
Πίνακας 3-Μικροβιακή κοινότητα στην θερμοφιλή φάση	25
Πίνακας 4- Χαρακτηριστικά σωρών πειράματος	45
Πίνακας 5- Αποτελέσματα από σύγκριση βάσει υλικού.....	83
Πίνακας 6-Σύγκριση βάσει μεγέθους σωματιδίων.....	88
Πίνακας 7-Σύγκριση βάσει ύψους	93
Πίνακας 8-Σύγκρισης βάσει συχνότητας αερισμού	99
Πίνακας 9- Προτεινόμενες συνθήκες κομποστοποίησης.....	103

Περιεχόμενα διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1-Παρακολούθηση θερμοκρασίας σωρού Νο1	48
Διάγραμμα 2-Παρακολούθηση θερμοκρασίας Σωρού Νο2.....	48
Διάγραμμα 3-Παρακολούθηση θερμοκρασίας Σωρού Νο3.....	49
Διάγραμμα 4-Παρακολούθηση θερμοκρασίας Σωρού Νο4.....	49
Διάγραμμα 5-Παρακολούθηση θερμοκρασίας Σωρού Νο5.....	50
Διάγραμμα 6-Παρακολούθηση θερμοκρασίας Σωρού Νο6.....	50
Διάγραμμα 7-Παρακολούθηση θερμοκρασίας Σωρού Νο7.....	51
Διάγραμμα 8-Παρακολούθηση θερμοκρασίας Σωρού Νο8.....	51
Διάγραμμα 9-Παρακολούθηση θερμοκρασίας Σωρού Νο9.....	52
Διάγραμμα 10-Θερμοκρασία σωρών τομάτας με ήπια ανάδευση	53
Διάγραμμα 11-Θερμοκρασία σωρών τομάτας με έντονη ανάδευση	54
Διάγραμμα 13-Θερμοκρασία σωρών μίξης με έντονη ανάδευση.....	55
Διάγραμμα 12-Θερμοκρασία σωρών μίξης με ήπια ανάδευση.....	55
Διάγραμμα 14-pH σε σωρούς τομάτας	56
Διάγραμμα 15 – Αγωγιμότητα σε σωρούς τομάτας.....	57
Διάγραμμα 18-Αγωγιμότητα σε σωρούς πράσινης μίξης	59
Διάγραμμα 19-Υγρασία σε σωρούς πράσινης μίξης.....	60
Διάγραμμα 20-Πτητικών στερεών σε σωρούς τομάτας.....	61
Διάγραμμα 21 -Πτητικών στερεών σε σωρούς πράσινης μίξης	62
Διάγραμμα 22-Στοιχειακός άνθρακας σε σωρούς τομάτας	63
Διάγραμμα 23-Στοιχειακός άνθρακας σε σωρούς πράσινης μίξης.....	63
Διάγραμμα 24-Στοιχειακό άζωτο σε σωρούς τομάτας	64
Διάγραμμα 25-Στοιχειακό άζωτο σε σωρούς πράσινης μίξης.	65
Διάγραμμα 28-Δείκτες βλαστικότητας σε ραπάνι για υποστρώματα τομάτας	67
Διάγραμμα 29-Δείκτες βλαστικότητας σε μαρούλι για υποστρώματα τομάτας.....	68
Διάγραμμα 30-Δείκτες βλαστικότητας σε κάρδαμο για υποστρώματα τομάτας.....	68
Διάγραμμα 31-Δείκτες βλαστικότητας σε ραπάνι για υποστρώματα μίξης.....	69
Διάγραμμα 32-Δείκτες βλαστικότητας σε μαρούλι για υποστρώματα μίξης	69
Διάγραμμα 33-Δείκτες βλαστικότητας σε κάρδαμο για υποστρώματα μίξης	70
Διάγραμμα 34-Μήκος βλαστού φυτών σε υποστρώματα τομάτας.....	72
Διάγραμμα 35-Ριζικό σύστημα φυτών σε υποστρώματα τομάτας.....	73
Διάγραμμα 36-Μήκος φυτών σε υποστρώματα τομάτας.....	73
Διάγραμμα 37-Μάζα φυτών σε υποστρώματα τομάτας	74
Διάγραμμα 38-Ριζικό σύστημα φυτών σε υποστρώματα μίξης.....	773
Διάγραμμα 39-Μήκος φυτών σε υποστρώματα μίξης.....	73

Διάγραμμα 42-Μάζα φυτών σε υποστρώματα μίξης.....	77
Διάγραμμα 43-Αραχνοειδές διάγραμμα άυξηση μάζας.....	773
Διάγραμμα 44 – Σύγκριση υγρασίας βάσει υλικού.....	78
Διάγραμμα 45 – Σύγκριση θερμοκρασίας βάσει υλικού.....	79
Διάγραμμα 46-Σύγκριση πτητικών στερεών βάσει υλικού.....	80
Διάγραμμα 47 – Σύγκριση λόγου άνθρακα αζώτου βάσει υλικού.....	80
Διάγραμμα 48 – Σύγκριση ανάπτυξης φυτών βάσει υλικού.....	81
Διάγραμμα 49-Σύγκριση δεικτών βλαστικότητας βάσει υλικού	82
Διάγραμμα 50-Σύγκριση υγρασίας βάσει μεγέθους σωματιδίων	84
Διάγραμμα 51- Σύγκριση θερμοκρασίας βάσει μεγέθους σωματιδίων	84
Διάγραμμα 52-Σύγκριση πτητικών στερεών βάσει μεγέθους σωματιδίων.....	85
Διάγραμμα 53 – Σύγκριση λόγου άνθρακα-αζώτου βάσει μεγέθους σωματιδίων.....	85
Διάγραμμα 54 – Σύγκριση ανάπτυξης φυτών βάσει μεγέθους σωματιδίων	86
Διάγραμμα 55 – Δείκτες βλαστικότητας για την σύγκριση βάσει μεγέθους σωματιδίων	87
Διάγραμμα 56 – Σύγκριση υγρασίας βάσει ύψους	89
Διάγραμμα 57- Σύγκριση θερμοκρασίας βάσει ύψους	89
Διάγραμμα 59-Λόγος άνθρακα αζώτου για σύγκριση βάσει ύψους.....	90
Διάγραμμα 58 – Σύγκριση πτητικών στερεών βάσει ύψους.....	90
Διάγραμμα 60 – Σύγκριση ανάπτυξης φυτών βάσει ύψους.....	91
Διάγραμμα 61 -Σύγκριση δεικτών βλαστικότητας βάσει ύψους	92
Διάγραμμα 62- Σύγκριση υγρασίας βάσει συχνότητα αερισμού	94
Διάγραμμα 64 -Σύγκριση πτητικών στερεών βάσει συχνότητας αερισμού.....	95
Διάγραμμα 63-Σύγκριση θερμοκρασίας βάσει συχνότητας αερισμού	95
Διάγραμμα 65-Σύγκριση πτητικών στερεών βάσει συχνότητας αερισμού.....	96
Διάγραμμα 66 – Σύγκριση ανάπτυξης φυτών βάσει συχνότητας αερισμού	97
Διάγραμμα 67- Σύγκριση δεικτών βλαστικότητας βάσει συχνότητας αερισμού.....	98

Πίνακας εικόνων

Εικόνα 1-Ρεύματα αγροβιομηχανικών αποβλήτων	15
Εικόνα 2-Φωτογραφία από εγκατάσταση κομποστοποίησης	19
Εικόνα 3-Κλειστό κάθετο σύστημα κομποστοποίησης	21
Εικόνα 4-Κλειστό οριζόντιο σύστημα κομποστοποίησης	21
Εικόνα 5 – Ανάδευση σωρών με φορτωτή	22
Εικόνα 6 – Αερισμός σε στατικούς σωρούς	23
Εικόνα 7-Μικροσκοπική εικόνα σωματιδίων κομποστοποίησης.	26
Εικόνα 8 – Μεταβολή παραμέτρων κατά την διάρκεια της κομποστοποίησης.....	29
Εικόνα 9-Σχήμα κόλουρου κώνου	36
Εικόνα 10-Συλλογή ρεύματος μίξης	40
Εικόνα 11-Συλλογή ρεύματος τομάτας.....	40
Εικόνα 12 – Έξοδος υλικού από τον σπαστήρα	41
Εικόνα 13-Είσοδος υλικού στον σπαστήρα.....	41
Εικόνα 14 – Σωροί κατά την ανάδευση	42
Εικόνα 15-Κάπνισμα σωρών	42
Εικόνα 16-Δοκιμή σε καλλιέργεια μαρουλιών	44
Εικόνα 17 – Ανάπτυξη φυτού με υπόστρωμα μίξης σε σχέση με τυφλή καλλιέργεια	44
Εικόνα 18-Σύγκριση ανάπτυξης φυτών	44
Εικόνα 19-Θερμοκρασία τομής κατά την διεργασία	47
Εικόνα 20-Τοποθεσία εγκατάστασης κομποστοποίησης.....	108
Εικόνα 21- Σωροί πειράματος.....	110
Εικόνα 22-Μέτρηση θερμοκρασίας από στην τομή	111
Εικόνα 23 – Μέτρηση θερμοκρασίας από την επιφάνεια.....	112
Εικόνα 24-Βήματα δοκιμής βλαστικότητας	113
Εικόνα 25- Υλικό πριν το ραφινάρισμα.....	114

Κεφάλαιο 1-Εισαγωγή

Η ραγδαία αύξηση του πληθυσμού, οι ρυθμοί της σύγχρονης κοινωνίας σε παραγωγή και κατανάλωση, οδηγούν στην τεραστία παραγωγή αποβλήτων. Όσο ο πληθυσμός αυξάνεται και η κοινωνία εξελίσσεται, αναμένεται ομοίως να αυξάνονται τα απόβλητα. Το Εθνικό Σχέδιο Διαχείρισης Αποβλήτων [ΕΣΔΑ 2020-2030], αναφέρει πως το οργανικό μέρος των αποβλήτων αποτελεί το 80% των αστικών στερεών αποβλήτων. Το 78% του οργανικού μέρους, δεν διαχειρίζεται και καταλήγει σε χωματερές και ΧΥΤΑ (Χώρος Υγειονομικής Ταφής Αποβλήτων). Για την διασφάλιση της προστασίας του περιβάλλοντος, είναι αναγκαία η χάραξη βιώσιμων συστημάτων διαχείρισης, ώστε αποτρέψει την επικείμενη περιβαλλοντική καταστροφή.

Μια μέθοδος διαχείρισης βιώσιμη και φιλική προς το περιβάλλον των οργανικών αποβλήτων αποτελεί η διεργασία της κομποστοποίησης. Κατά την κομποστοποίηση, οι μικροοργανισμοί αποδομούν την οργανική ύλη σε μία βιολογικά σταθεροποιημένη ύλη με οργανική σύσταση, το κομπόστ. Το προϊόν της κομποστοποίησης συνήθως χρησιμοποιείται ως εδαφοβελτιωτικό σε καλλιέργειες που υπολείπονται σε οργανική ουσία. Χαρακτηρίζεται από έντονο καφέ χρώμα, τους ωφέλιμους μικροοργανισμούς και τα θρεπτικά συστατικά για τα φυτά που περιέχει. Ενδείκνυται διατήρηση υγείας του εδάφους και με την προσθήκη του στην καλλιέργεια δημιουργεί έναν κλειστό κύκλο διαχείρισης αποβλήτων, συνεισφέροντας στην κυκλική οικονομία ιδίως σε αγροτικές περιοχές.

Η πόλη της Ιεράπετρας συνεισφέρει στο 30% της συνολικής παραγωγής κηπευτικών της Ελλάδας. Η παραγωγή γίνεται δυνατή με την καλλιέργεια σε θερμοκήπια. Κατά την μεγάλη παραγωγή κηπευτικών, παράγονται επίσης χιλιάδες τόνοι οργανικών αποβλήτων όπου δεν διαχειρίζονται καταλλήλως. Το μέρος αυτό αποτελείται από υπολείμματα όπως κλαδιά, φύλλα, καρποί διαφόρων κηπευτικών και άλλα φυτικά μέρη. Συνήθως τα απόβλητα οδηγούνται σε χωματερές, καίγονται, είτε πετιούνται παράνομα σε ρέματα ή στα περίχωρα της πόλης.

Η παρούσα διπλωματική αποσκοπεί στην μελέτη και βελτιστοποίηση διαχείρισης των οργανικών αποβλήτων θερμοκηπίων Ιεράπετρας, με σκοπό την παραγωγή εδαφοβελτιωτικού μέσω ανοικτού συστήματος κομποστοποίησης. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζονται οι κατάλληλες συνθήκες κομποστοποίησης για την παραγωγή προϊόντος υψηλής εδαφοβελτιωτικής αξίας. Οι εξεταζόμενοι παράγοντες είναι η σύνθεση του αρχικού υλικού, η συχνότητα αερισμού, το ύψος των σωρών και το μέγεθος σωματιδίων άλεσης. Για την ανίχνευση της επίδρασης των παραπάνω παραγόντων στη κομποστοποίηση, παρακολουθήθηκαν τα εξής χαρακτηριστικά θερμοκρασία, υγρασία και pH. Η επίδραση των παραγόντων εντοπίζεται από τα αποτελέσματα των φυσικοχημικών αναλύσεων και των δοκιμών δεικτών βλαστικότητας σε τρία είδη φυτών. Τα τελικά προϊόντα της κομποστοποίησης, επιβάλλονται σε μία ακόμα δοκιμή ανάπτυξης σε καλλιέργεια μαρουλιών για τον εντοπισμό του αποδοτικότερου προϊόντος.

Κεφάλαιο 2-Θεωρητικό υπόβαθρο

2.1 Αγροβιομηχανικά απόβλητα

Τα αγροβιομηχανικά απόβλητα ορίζονται ως τα υπολείμματα και απορρίμματα που προκύπτουν από την γεωργία και τη βιομηχανία τροφίμων. Ανάλογα με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά τους, τα αγροβιομηχανικά απόβλητα διακρίνονται σε διάφορα ρεύματα απορριμμάτων. Η διαχείριση και η επεξεργασία διαφέρει για το κάθε ρεύμα. Τα κύρια ρεύματα που προκύπτουν είναι το ρεύμα των φυτικών αποβλήτων, ρεύμα ζωικών αποβλήτων και το ρεύμα συσκευασίας και επεξεργασίας.

2.1.1 Ρεύμα πράσινων αποβλήτων

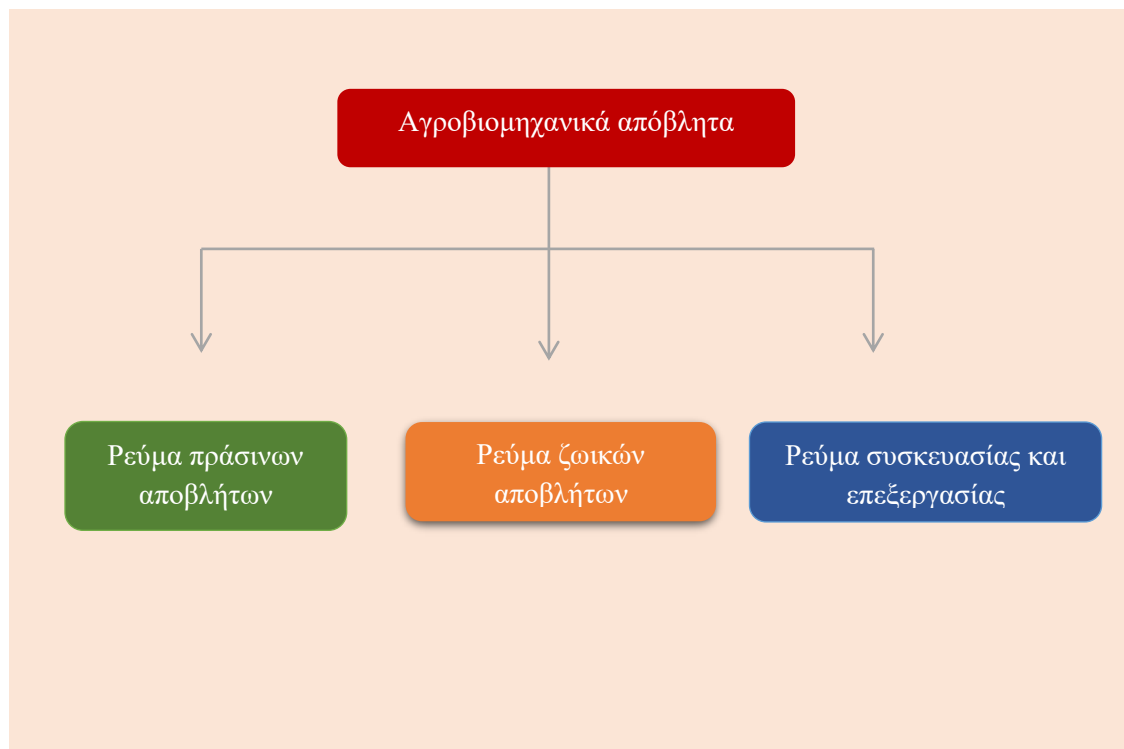
Το ρεύμα φυτικών υπολειμμάτων αποτελείται από οργανικά, μη επικίνδυνα απόβλητα που χαρακτηρίζονται και ως βιοαπόβλητα. Ο χαρακτηρισμός προκύπτει από την ικανότητα τους να βιοαποδομούνται. Ο προτεινόμενος τρόπος επεξεργασίας για το ρεύμα πράσινων αποβλήτων είναι μέσω βιολογικών επεξεργασιών καθώς αποτελούν την οικονομικότερη μέθοδο. Παρότι δεν χαρακτηρίζονται ως επικίνδυνα απόβλητα, η επεξεργασία τους κρίνεται απαραίτητη. Η όξυνση της χρήσης χημικών φυτοφαρμάκων και λιπασμάτων σε αγροκαλλιέργειες, έχει ως αποτέλεσμα πλέον στα πράσινα απόβλητα να εντοπίζονται βαρέα μέταλλα και επικίνδυνες χημικές ενώσεις (φυτοφάρμακα, παρασιτοκτόνα). Επιπλέον κατά την αποδόμηση των πράσινων αποβλήτων, παράγονται οργανικές ενώσεις όπως χούμους (humins). Η ιδιαιτερότητα των ενώσεων αυτών, είναι πώς διαθέτουν υψηλή ικανότητα δέσμευσης μετάλλων λόγω αρκετών αντιδραστικών ομάδων, όπως Humic-COOH και phenolic-OH [Yuquan, 2019]. Με αποτέλεσμα, να τίθεται κίνδυνος όταν οι επιβαρυνμένες οργανικές ενώσεις που προκύπτουν από την αποδόμηση διαφύγουν στο έδαφος ή στα υπόγεια ύδατα.

2.1.2 Ρεύμα ζωικών αποβλήτων

Στα ζωικά απόβλητα συγκαταλέγονται τα απορρίμματα που προκύπτουν από την εκτροφή και τη διαχείριση των ζώων σε αγροκτήματα και κτηνοτροφικές επιχειρήσεις. Στα ζωικά απόβλητα περιλαμβάνονται περιττώματα ζώων και άλλων υλικών που προκύπτουν από τη φροντίδα και την τροφοδοσία των ζώων. Από τα ζωικά απόβλητα ενδέχεται κίνδυνος μετάδοσης ασθενειών στον άνθρωπο λόγω του έντονου μικροβιακού φορτίου. Η διαχείριση τους αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι για την δημόσια υγεία και το περιβάλλον. Οι συμβατικές μέθοδοι επεξεργασίας για το ρεύμα αυτό, είναι η θερμική επεξεργασία και η διεργασία αναερόβιας χώνευσης με σκοπό την παραγωγή ενέργειας [Τουρναβίτη, 2022].

2.1.3 Ρεύμα συσκευασίας και επεξεργασίας

Εξορισμού το ρεύμα συσκευασίας και επεξεργασίας αφορά υλικά συσκευασίας και απόβλητα που προκύπτουν κατά την επεξεργασία τροφίμων. Μεγάλο μέρος των αποβλήτων αυτών αποτελείται από πλαστικό που μπορεί να ανακυκλωθεί [ΕΣΔΑ, 2015]. Παρόλα αυτά, μέρος των συσκευασιών περιέχουν υπολείμματα τοξικών χημικών που απαιτούν θερμική επεξεργασία. Για παράδειγμα, οι συσκευασίες των παρασιτοκτόνων και τα κτηνιατρικά φάρμακα που δεν μπορούν να ανακυκλωθούν και χρήζουν μια θερμική μέθοδο επεξεργασίας [Kannan, 2021].



Εικόνα 1-Ρεύματα αγροβιομηχανικών αποβλήτων

2.2 Επεξεργασία αγροβιομηχανικών αποβλήτων

2.2.1 Θερμικές επεξεργασίες

Οι θερμικές επεξεργασίες αφορούν τις διεργασίες μετατροπής των στερεών αποβλήτων σε υγρά, αέρια ή στερεά προϊόντα. Οι μετατροπές προκύπτουν μέσω της αποδέσμευσης θερμικής ενέργειας που υπάρχει στα απόβλητα [Ibrahim, 2023]. Ανάλογα με την απαίτηση σε οξυγόνο οι θερμικές διεργασίες κατηγοριοποιούνται σε καύση, πυρόλυση και αεριοποίηση.

Πίνακας 1-Απαίτηση οξυγόνου κατά τις θερμικές διεργασίες

Διεργασία	Απαίτηση σε οξυγόνο
Αποτέφρωση (Καύση)	Στοιχειομετρική καύση : απαιτούμενη ακριβή ποσότητα οξυγόνου
	Περίσσεια οξυγόνου : περισσότερο οξυγόνο από το αναγκαίο
Πυρόλυση	Απουσία οξυγόνου
Αεριοποίηση	Ατελής καύση : Αυστηρή αναλογία οξυγόνου και οργανικού άνθρακα αποβλήτων.

2.2.1.1 Αποτέφρωση

Η αποτέφρωση αποτελεί μια από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους θερμικής επεξεργασίας. Πιο αναλυτικά, με το όρο αποτέφρωση εννοείται η οξείδωση αποβλήτων με οξυγόνο [Tchobanoglous, 2018]. Σκοπός της διεργασίας είναι η αδρανοποίηση απορριμμάτων, μείωση του όγκου, και η εκμετάλλευση της περιεχόμενης ενέργειας τους. Κατά την αποτέφρωση εκλύονται αέρια προϊόντα, όπως διοξείδιο του άνθρακα, νερό, άζωτο και ιχνοενώσεις. Επιπλέον, το στερεό υπόλειμμα που παραμένει ονομάζεται τέφρα και σκωρία. Τα συστήματα αποτέφρωσης είναι δαπανηρά και συνήθως τα προϊόντα της διεργασίας χρήζουν περαιτέρω επεξεργασία.

2.2.1.2 Πυρόλυση

Η πυρόλυση ορίζεται η θερμική διάσπαση οργανικών ενώσεων σε απουσία οξυγόνου σε θερμοκρασίες 250 – 1000 °C. Κατά την επεξεργασία της πυρόλυσης παράγονται αέρια, υγρά και στερεά προϊόντα ανάλογα με το κλάσμα των αποβλήτων που επεξεργάζεται. Συνήθη αέρια προϊόντα είναι το υδρογόνο, το μονοξείδιο και το διοξείδιο του άνθρακα, και το μεθάνιο. Κατά το πέρας της πυρόλυσης παράγεται ένα υγρό κλάσμα πίσσας, το οποίο περιέχει οξυγονωμένους υδρογονάνθρακες και το στερεό προϊόν (char) αποτελείται σχεδόν εξ ολοκλήρου από άνθρακα.

2.2.1.3 Αεριοποίηση

Κατά την αεριοποίηση εξελίσσεται καύση με ποσότητα οξυγόνου λιγότερη από την στοιχειομετρική. Συνήθως τροφοδοτείται το 20–25% του οξυγόνου [Μαρνέλος, 2019] που απαιτείται για πλήρη καύση και η αεριοποίηση συμβαίνει σε συνθήκες μερικής οξείδωσης. Σκοπός της επεξεργασίας είναι η για την παραγωγή ενέργειας μέσω των απείρων. Ειδικότερα κατά την ατελής καύση παράγεται μεγάλη ποσότητα μονοξειδίου του άνθρακα και μεθανίου. Τα αέρια συλλέγονται και επεξεργάζονται ειδικά ώστε να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμο αέριο.

2.2.2 Βιολογικές επεξεργασίες

Οι βιολογικές μέθοδοι επεξεργασίας βασίζονται στην ελεγχόμενη δράση και ανάπτυξη μικροοργανισμών, οι οποίοι αποδομούν τα βιοδιασπώμενα απόβλητα [Nur et al., 2020]. Οι βιολογικές επεξεργασίες είναι οικονομικότερες και υπόσχονται μικρότερη βλάβη στο περιβάλλον σε σχέση με τις θερμικές επεξεργασίες, λόγω της απλότητας των συστημάτων και την χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Οι βιολογικές επεξεργασίες διαχωρίζονται από την παρουσία ή απουσία αέρα.

2.2.2.1 Αναερόβια χώνευση

Στην αναερόβια χώνευση το οργανικό υλικό επεξεργάζεται σε απουσία αέρα, με σκοπό την δημιουργία εδαφοβελτιωτικού και βιοαερίου. Η διεργασία λαμβάνει μέρος σε κλειστό αντιδραστήρα (χωνευτή). Στον χωνευτή είναι δυνατόν να ρυθμιστεί το pH και να διατηρηθούν ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκρασίας (55- 60° C) [Σάκκας, 2020]. Η βιοδιάσπαση εξελίσσεται σε δύο στάδια το οξυγενές και το μεθανογενές. Κατά το οξυγενές στάδιο, το οργανικό αποδομείται δημιουργώντας διάφορα οργανικά οξέα, διοξείδιο του άνθρακα, νερό και άλλες ενδιάμεσες οργανικές ενώσεις. Στην συνέχεια κατά το μεθανογενές στάδιο, παράγεται μεθάνιο, διοξείδιο του άνθρακα και μεγαλομοριακές ενώσεις. Ο ρυθμός αποδόμησης στο στάδιο μεθανογένεσης, είναι άμεσα συνδεδεμένος με τον ρυθμό παραγωγής μεθανίου. Μετά την ολοκλήρωση της αναερόβιας χώνευσης, το βιοαέριο που παράχθηκε συλλέγεται και διαχωρίζεται από αυτό το μεθάνιο. Το υγρό παραπροϊόν της αναερόβιας χώνευσης που απομένει στον αντιδραστήρα ονομάζεται “digaste” και αποτελείται από αιωρούμενα στερεά, βιομάζα και οργανικά υπολείμματα αποσύνθεσης. Το παραπροϊόν ανάλογα με τα ποιοτικά του χαρακτηριστικά, μπορεί να ξεραθεί και να χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό. Πολλές φορές, συναντάται συνδυασμός μεθόδων αναερόβιας χώνευσης και επεξεργασίας του παραπροϊόντος με αερόβια βιολογική επεξεργασία.

2.2.2.2 Βιολογική ξήρανση

Κατά την βιολογική ξήρανση απομακρύνεται το νερό που περιέχεται στα απόβλητα μέσω της βιοθερμικής ενέργειας. Η ξήρανση επιτυγχάνεται μέσω της αερόβιας αποδόμησης σε συνδυασμό με παροχή εξωτερικής ενέργειας για εξάτμιση μέρους της περιεχόμενης υγρασίας. Η τεχνική της βιολογικής ξήρανσης αποσκοπεί στην μείωση του όγκου των απορριμμάτων και στην διευκόλυνση διαχωρισμού των υλικών. Η ξήρανση λαμβάνει χώρα σε αεροστεγώς κλειστές δεξαμενές ή κουτιά ορθογώνιου σχήματος (bio-boxes). Τα συστήματα βιολογικής ξήρανσης εντοπίζονται συνήθως στην προεπεξεργασία των ΑΣΑ (Αστικά Στερεά Απόβλητα) ώστε να καταστούν κατάλληλα για θερμική αξιοποίηση (SRF, solid recovered fuel) [Σάκκας, 2017]. Το περιεχόμενο ποσοστό υγρασίας των ΑΣΑ στην Ελλάδα είναι περίπου 40% και η θερμογόνος δύναμη είναι χαμηλή. Έπειτα την βιολογική ξήρανση το ποσοστό υγρασίας βρίσκεται συνήθως 12-15% και η θερμογόνος δύναμη είναι υψηλότερη.

2.2.2.3 Κομποστοποίηση

Κομποστοποίηση ορίζεται η βιολογική διαδικασία αποσύνθεσης οργανικών υλικών με σκοπό την δημιουργία ενός σταθεροποιημένου υλικού με εδαφοβελτιωτική ικανότητα, το κόμποστ [Nur et al., 2020]. Τα οργανικά υλικά διασπώνται από μικροοργανισμούς, όπως μύκητες και βακτήρια, σε απλούστερες μορφές. Ανάλογα με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του αρχικού υλικού επιλέγεται το κατάλληλο σύστημα κομποστοποίησης. Τα συστήματα κομποστοποίησης κατηγοριοποιούνται ως εξής [Μουτάφης, 2018] :

- Ανοικτά συστήματα (Κομποστοποίηση σε ανοικτό πεδίο)
- Κλειστά συστήματα (Κομποστοποίηση σε αντιδραστήρα)
- Μικτά συστήματα (Συνδυασμός μεθόδων)

Στα κλειστά συστήματα η αποδόμηση συμβαίνει υπό ελεγχόμενες συνθήκες και απαιτείται μηχανολογικός εξοπλισμός. Σε αντίθεση με τα ανοικτά συστήματα, το υλικό αποδομείται σε ανοικτούς χώρους, χωρίς την χρήση σοβαρού μηχανικού εξοπλισμού [Rynk, 2022]. Στην παρούσα διπλωματική, επιλέχθηκε ανοικτό σύστημα κομποστοποίησης με σωρούς. Δηλαδή, το αρχικό υλικό θρυμματίζεται και στοιβάζεται σε σωρούς με τραπεζοειδή διατομή. Το ανοικτό σύστημα που επιλέχθηκε βασίζεται στον φυσικό αερισμό που επιτυγχάνεται με συχνή αναστροφή μέσω φορτωτή. Με τον τρόπο αυτό, δημιουργούνται αερόβιες συνθήκες, απαραίτητες για την διάσπαση των οργανικών υλικών. Η αποδόμηση των οργανικών υλικών πραγματοποιείται σε ένα θερμό, υγρό περιβάλλον στο εσωτερικό του σωρού από μικροβιακούς πληθυσμούς. Οι πληθυσμοί αυτοί, μπορεί να είναι αερόβιοι και

αναερόβιοι ανάλογα με το ρυθμό ανάδευσης και το ύψος του σωρού. Οι αναερόβιες συνθήκες γίνονται αντιληπτές από την έντονη οσμή αμμωνίας [Peizhen, 2021].



Εικόνα 2-Φωτογραφία από εγκατάσταση κομποστοποίησης

2.3 Κομποστοποίηση

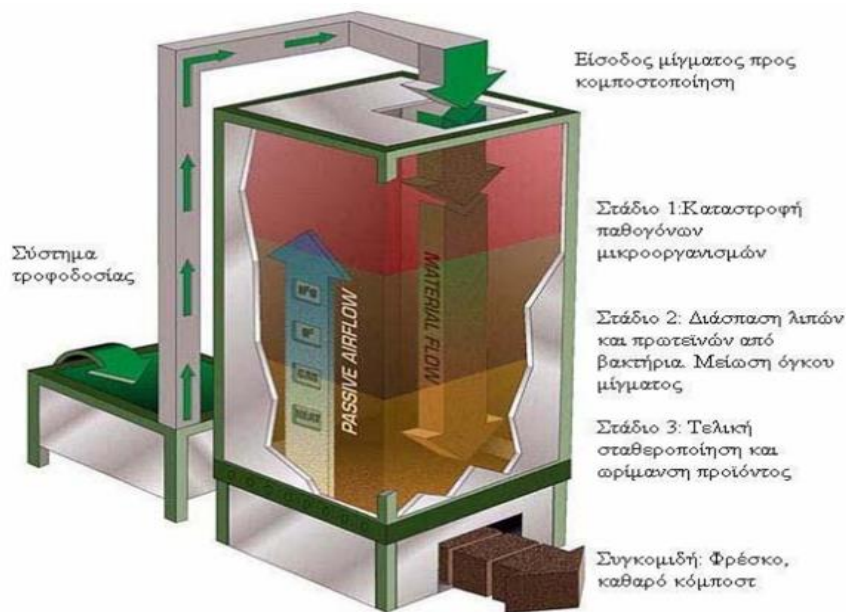
2.3.1 Συστήματα κομποστοποίησης

2.3.1.1 Κλειστά συστήματα

Η διεργασία της κομποστοποίησης σε ένα κλειστό σύστημα πραγματοποιείται στο εσωτερικό ενός αντιδραστήρα. Οι αντιδραστήρες που χρησιμοποιούνται στα κλειστά συστήματα κομποστοποίησης διακρίνονται σε κατακόρυφες και οριζόντιες διατάξεις [Μουτάφης, 2018, Καραγλάνης, 2013]. Σε αντίθεση με τα ανοικτά συστήματα οι συνθήκες (θερμοκρασία, pH, υγρασία κ.α.) είναι ελεγχόμενες. Με αποτέλεσμα να επιταχύνονται τα αρχικά στάδια αποδόμησης του οργανικού υλικού και να επεξεργάζονται τα αέρια που προκύπτουν από την διεργασία. Η επιλογή του συστήματος εξαρτάται κυρίως από το κόστος επένδυσης και λειτουργίας, όπως και τις νομοθετικές απαιτήσεις και τις συνθήκες στην αγορά. Συνήθως ο χρόνος παραμονής του υλικού στα κλειστά συστήματα είναι μικρός και η ωρίμανση του γίνεται σε ανοικτά συστήματα για την ελαχιστοποίηση του κόστους διεργασίας [Πεζούλας 2012, Αναγνωστόπουλος 2010].

Κάθετη διάταξη

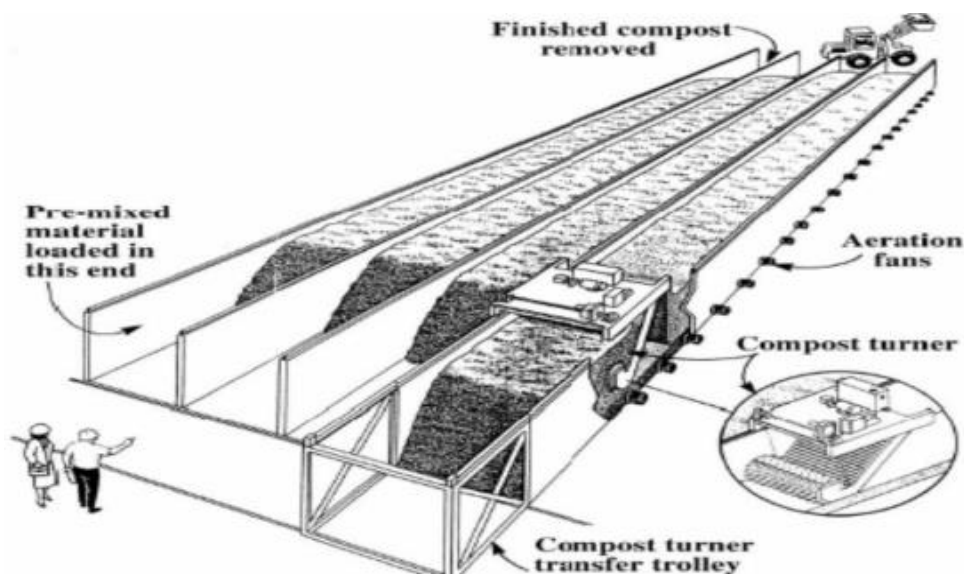
Στην Εικόνα 3 περιγράφεται μια συμβατική κάθετη διάταξη αντιδραστήρα [Λουκάς, 2008], [Μουτάφης 2018]. Στον αντιδραστήρα το υλικό τροφοδοτείται από ψηλά και έπειτα μέσω της βαρυτικής δύναμης εξέρχεται από την βάση του αντιδραστήρα. Στο εσωτερικό του αντιδραστήρα, βρίσκεται μια κυλινδρική δεξαμενή στην οποία είναι ενσωματωμένη μια περιστρεφόμενη γέφυρα με ατέρμονες κοχλίες στο μισό της μήκος [Καραγλάνης, 2013]. Το υλικό εισάγεται στο κέντρο περιστροφής της γέφυρας και με τη βοήθεια των κοχλίων μετατοπίζεται προς την περίμετρο του αντιδραστήρα ενώ κινείται προς τα κάτω. Ταυτόχρονα το υλικό αερίζεται μέσω δίκτυο σωληνώσεων. Τέλος, υλικό αφαιρείται από τον πυθμένα και ανάλογα τον χρόνο παραμονής στην διάταξη εξάγεται ως σταθεροποιημένο ή μη σταθεροποιημένο προϊόν.



Εικόνα 3-Κλειστό κάθετο σύστημα κομποστοποίησης

Οριζόντια διάταξη

Σε μια οριζόντια διάταξη η αποδόμηση εκτελείται σε οριζόντια εγκιβωτισμένα συστήματα, δεξαμενές κομποστοποίησης, οι τράπεζες κομποστοποίησης και οι περιστρεφόμενοι κύλινδροι [Στεργίουλας, 2022]. Τα παραπάνω συστήματα είναι αεροστεγώς κλεισμένα χωρίς αλληλεπίδραση με την ατμόσφαιρα. Η τροφοδοσία του αέρα γίνεται ελεγχόμενα με δίκτυο σωληνώσεων στον πυθμένα της διάταξης. Σε αντίθεση με τις κάθετες διατάξεις, η παροχή του αέρα δεν είναι ομοιόμορφη για όλα τα σημεία του αντιδραστήρα [Μουτάφης, 2018]. Ακόμα, στο επάνω μέρος των οριζόντιων διατάξεων συνήθως συλλέγονται τα απαέρια της διεργασίας.



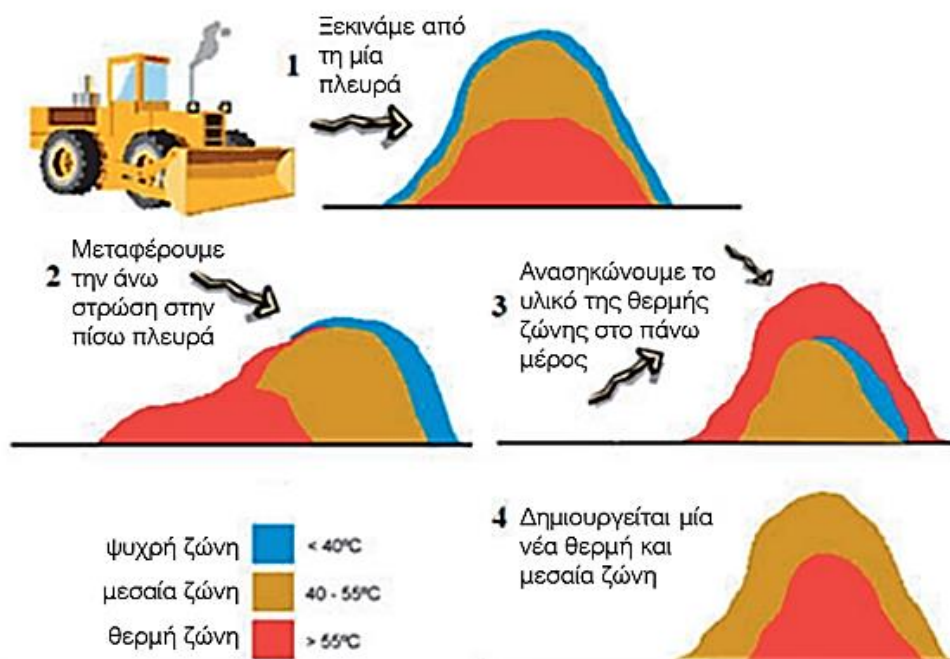
Εικόνα 4-Κλειστό οριζόντιο σύστημα κομποστοποίησης

2.3.1.2 Ανοικτά συστήματα

Η διαδικασία της κομποστοποίησης σε ανοικτά συστήματα εκτελείται σε σωρούς. Αρχικά τα οργανικά υλικά υποβάλλονται σε θρυμματισμό και έπειτα στοιβάζονται σε τραπέζια σχήματα σε ανοικτούς χώρους. Στο πλαίσιο αυτών των ανοικτών συστημάτων, διακρίνονται δύο τεχνικές βάσει του τρόπου αερισμού των σωρών. Το βασικότερο μειονέκτημα των ανοικτών συστημάτων είναι πως τα απαέρια της διεργασίας εκλύονται στην ατμόσφαιρα.

Αναδεδυόμενοι σωροί

Για την ανάδευση των αναδεδυμένων σωρών απαιτείται μηχανολογικός εξοπλισμός. Κατά την ανάδευση του υλικού επιτυγχάνεται φυσικός αερισμός και εξασφαλίζονται οι αερόβιες συνθήκες. Επιπλέον, κατά την ανάδευση ομογενοποιείται το υλικό καταστρέφοντας συσσωματώματα οργανικών ουσιών που προκύπτουν από την διαφυγή υγρασίας [ΕΠΠΕΡΑΑ, 2014]. Στο παρόν πείραμα, ο αερισμός επιτεύχθηκε με τη χρήση φορτωτή. Ο φορτωτής ανασκόνει το υλικό και το ανακατεύει, αναδιαμορφώνοντας τον σωρό. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι γενικά ο αερισμός μέσω φορτωτή δεν θεωρείται η ιδανική επιλογή λόγω του υψηλού κόστους λειτουργίας και προτείνεται η χρήση αναστροφέα. Ωστόσο, τα ρεύματα απόβλητων που κλήθηκαν να επεξεργαστούν περιείχαν σπάγκο από τις καλλιέργειες. Ο σπάγκος προσκολλάται κατά την ανάδευση με αναστροφέα, όποτε η μέθοδος ανάδευσης με φορτωτή μπορεί να αποτελέσει πρακτική επιλογή.



Εικόνα 5 – Ανάδευση σωρών με φορτωτή

Στατικοί σωροί

Στους στατικούς σωρούς το υλικό δεν αναδεύεται και ο αερισμός γίνεται μηχανικά μέσω διάτρητου αγωγού. Κατά την τροφοδοσία αέρα, η θερμοκρασία μειώνεται ενώ κατά την αναρρόφηση αέρα η θερμοκρασία αυξάνεται. Ακόμη στην επιφάνεια του διάτρητου αγωγού τοποθετούνται αισθητήρες για τον έλεγχο της θερμοκρασίας και του οξυγόνου. Το υλικό δεν ανακατεύεται με αποτέλεσμα η διεργασία να λειτουργεί διαφορετικά στα διάφορα σημεία του σωρού. Αναλυτικότερα το υλικό που βρίσκεται στην εξωτερική επιφάνεια του σωρού, ενδέχεται να μην κομποστοποιείται. Στο σημείο αυτό, η θερμοκρασία δεν μπορεί να μην φτάσει τα επιθυμητά επίπεδα για αποδόμηση του υλικού. Συνήθως για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου προβλήματος, ο σωρός καλύπτεται με έτοιμο κομπόστ, που λειτουργεί ως υλικό μόνωσης.



Εικόνα 6 – Αερισμός σε στατικούς σωρούς

2.3.2 Φάσεις κομποστοποίησης

Οι οργανικές ενώσεις διασπώνται διαδοχικά από τους μικροοργανισμούς σε τέσσερις φάσεις. Σε κάθε μια από τις φάσεις αναπτύσσεται μια μικροβιακή κοινότητα, της οποίας η δυναμικότητα και η επιτυχία στην αποσύνθεση επηρεάζει ενεργά την διαδικασία της κομποστοποίησης. Πιο αναλυτικά για την μετατροπή του οργανικού υλικού σε σταθεροποιημένο υλικό έχουν προηγηθεί η μεσόφιλη, θερμόφιλη, η φάση πτώση θερμοκρασίας και η φάση ωρίμανσης.

2.3.2.1 Μεσόφιλη φάση

Η εκκίνηση της ζύμωσης σηματοδοτείται από το μεσόφιλο στάδιο, το οποίο διαρκεί λίγες ημέρες. Η θερμοκρασία στο στάδιο αυτό αναμένεται να φτάσει το επίπεδο των 20 έως 50° C. Η συγκεκριμένη φάση της διεργασίας έχει μικρή διάρκεια, χάρη στην ταχεία πολλαπλασιαστική ικανότητα των μεσόφιλων βακτηριδίων [Nemet, 2021]. Η ικανότητα τους είναι άμεσα συσχετισμένη με την ύπαρξη αρχικών, απλών οργανικών ενώσεων που αποτελούν τροφή για τα βακτήρια. Ενώσεις τέτοιες είναι το άμυλο, σάκχαρα, αμινοξέα [Miller, 1996]. Σε συνδυασμό με τα βακτήρια δρουν ακόμα μύκητες, οι οποίοι πολλαπλασιάζονται εκθετικά. Η δράση των βακτηριδίων και των μυκήτων είναι όμοια, παράγουν ένζυμα που βοηθούν στην διάσπαση περίπλοκων οργανικών ενώσεων. Κατά την μεσόφιλη φάση είναι σημαντική η αναλογία υγρασίας-αέρα, έτσι ώστε να αυξηθεί η θερμοκρασία και να προχωρήσει η ζύμωση στην επόμενη φάση. Η άνοδος της θερμοκρασίας προκύπτει από την δράση των παραπάνω μικροοργανισμών. Αναλυτικότερα, οι μικροοργανισμοί μέσω των μεταβολικών οδών τους παράγουν θερμότητα που περιορίζεται στον σωρό, αυξάνοντας ως αποτέλεσμα την θερμοκρασία [Rynks, 2022].

Πίνακας 2-Μικροβιακή κοινότητα στην μεσόφιλη φάση

Μικροβιακή κοινότητα στην μεσόφιλη φάση	[Lin et al., 2020], [Liu et al., 2018], [Zhang et al., 2021]
Μεσόφιλα βακτήρια	<i>Bacteria phyla (Firmicutes, Bacteroidetes, Proteobacteria)</i> Είναι ένα γραμ-θετικό βακτήριο.
	<i>Pseudomonasputida</i> Ένα γραμ-αρνητικό βακτήριο που είναι ευέλικτο και ικανό να αναπτύσσεται σε διάφορες πηγές υδατάνθρακα.
Μεσόφιλοι μύκητες	<i>Rhizopuspp.</i>
	<i>Trichodermaspp.</i>

2.3.2.2 Θερμόφιλη φάση

Έπειτα από τους 45° C το μεγαλύτερο μέρος των μεσόφιλων μικροοργανισμών αδρανοποιούνται ή πεθαίνουν [Κομίλης, 2021]. Η θερμοκρασία στην φάση αυτή συνεχίζει να αυξάνεται ως τους 70° C. Η δράση των θερμόφιλων μικροοργανισμών αναστέλλεται σε θερμοκρασίες άνω των 65° C. Οι μικροοργανισμοί που εντοπίζονται πλέον είναι ανθεκτικότεροι και έχουν την ιδιότητα να διασπούν περιπλοκές οργανικές ενώσεις όπως λίπη και πρωτεΐνες. Τα βακτήρια ανταγωνίζονται με τους μύκητες για την τροφή, δηλαδή, την υπολειπόμενη οργανική ουσία. Οι μύκητες είναι αρκετά ανθεκτικότεροι από τα βακτήρια, με αποτέλεσμα να υπερτερούν σε αριθμό κατά την θερμόφιλη φάση. Εντοπίζονται ακόμα στο στάδιο αυτό, θερμόφιλοι ακτινομύκητες που δρουν συνεργατικά με αλλά γένη μυκήτων για την διάσπαση της λιγνίνης και της κυτταρίνης. Τέλος, κατά την θερμόφιλη φάση εξολοθρεύονται παθογόνοι μικροοργανισμοί και παράσιτα.

Πίνακας 3-Μικροβιακή κοινότητα στην θερμόφιλη φάση

Μικροβιακή κοινότητα στην θερμόφιλη φάση	[Z. Xu et al., 2021]
Ακτινομύκητες	<i>Streptomyces</i>
	<i>Thermoactinomyces.</i>
Μυκήτων	<i>Penicillium</i>
	<i>Aspergillus.</i>

2.3.2.3 Φάση πτώσης θερμοκρασίας

Σε αυτό το στάδιο της διεργασίας παρατηρείται πτώση της θερμοκρασίας. Συνήθως κατά την τέταρτη με έκτη εβδομάδα της ζύμωσης αναμένεται πτώση της θερμοκρασίας που φθάνει σταδιακά στους 40° C [Rynk, 2022]. Η πτώση της θερμοκρασίας προκύπτει από την ελάττωση της μικροβιακής δραστηριότητας. Στην φάση αυτή υπάρχει πτώση και της υγρασίας και συνήθως απαιτείται διαβροχή. Ακόμα σταθεροποιείται το pH και ολοκληρώνεται ο σχηματισμός του χουμικού οξέος [Εξάρχου, 2017].

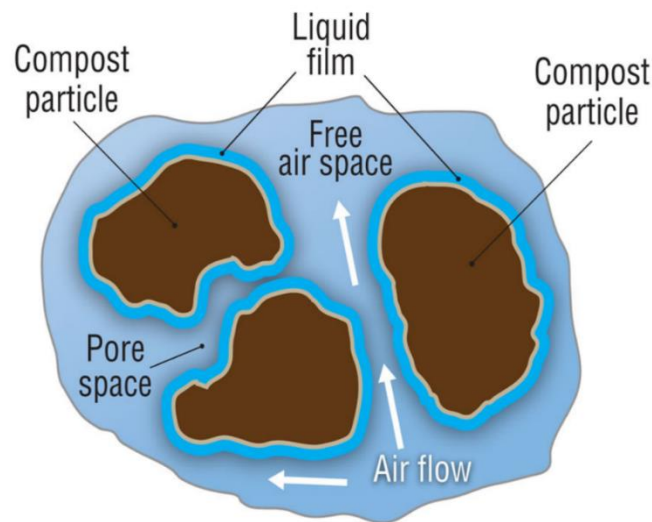
2.3.2.4 Φάση ωρίμανσης

Η ωρίμανση σηματοδοτεί το τέλος της ενεργής φάσης της κομποστοποίησης κατά την οποία οι μικροοργανισμοί κάνουν την διάσπαση των οργανικών υλικών. Αναλυτικότερα στο στάδιο της ωρίμανσης αναμένεται αδρανοποίηση των υπολειπόμενων τοξικών ενώσεων από προηγούμενες φάσεις και η σταθεροποίηση του προϊόντος. Η μικροβιακή δράση σημειώνεται με ασθενέστερους ρυθμούς. Κατά την ωρίμανση, η οσμή του κομπόστ μειώνεται σημαντικά. Οι άσχημες οσμές που σχετίζονται με την αποσύνθεση των οργανικών υλικών εξασθενούν, και το κομπόστ αποκτά μια πιο ευχάριστη μυρωδιά.

2.3.3 Καταστάσεις υλικού στο εσωτερικό του σωρού

Το υλικό στον σωρό κομποστοποίησης βρίσκεται σε τρεις καταστάσεις [Coker, 2017][Sauer, 2013]

- Την στερεή κατάσταση, που ορίζουν τα οργανικά και ανόργανα σωματίδια.
- Την υγρή κατάσταση, που είναι τα στραγγίσματα και η υγρασία.
- Την αέρια κατάσταση, που εννοείται ο εγκλωβισμένος αέρας στους κενούς χώρους που δημιουργούνται μεταξύ των σωματιδίων.



Εικόνα 7-Μικροσκοπική εικόνα σωματιδίων κομποστοποίησης.

Τα στερεά σωματίδια, απεικονίζονται στην Εικόνα 7 με καφέ σχήμα. Τα στερεά περιβάλλονται από ένα λεπτό στρώμα νερού (μπλε γραμμή). Επάνω στο λεπτό στρώμα νερού βιώνουν οι μικροοργανισμοί. Στον κενό χώρο του σχήματος ορίζεται η αέρια φάση. Οι μικροοργανισμοί της υγρής φάσης καταναλώνουν το οξυγόνο της αέριας φάσης για την επιβίωση και την ανάπτυξη τους. Η υγρή και αέρια φάση είναι απαραίτητη για την επιβίωση και αποσύνθεση της οργανικής ουσίας μέσω των μικροοργανισμών.

2.3.4 Χημικές αντιδράσεις κατά την διεργασία της κομποστοποίησης

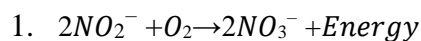
Κατά την διεργασία της κομποστοποίησης συμβαίνουν παράλληλα διάφορες χημικές αντιδράσεις. Η μελέτη στην παρούσα διπλωματική θα περιοριστεί στις βασικές αντιδράσεις κατά την αποδόμηση του οργανικού φορτίου. Οι κυριότερες διεργασίες περιλαμβάνουν την αμμωνιοποίηση, την νιτροποίηση, την απονιτροποίηση και την μικροβιακή ακινητοποίηση.

2.3.4.1 Αμμωνιοποίηση

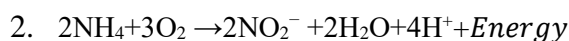
Το οργανικό άζωτο είναι δεσμευμένο ενώ το ανόργανο άζωτο είναι διαλυτό και μπορεί να διατεθεί στα φυτά. Κατά το στάδιο της αμμωνιοποίησης το οργανικό άζωτο μετατρέπεται σε ανόργανο μέσω ετερότροφων μικροοργανισμών. Πιο ειδικά, η αμμωνιοποίηση μετατρέπει το οργανικό άζωτο σε αμμωνία (NH_3).

2.3.4.2 Νιτροποίηση

Κατά την νιτροποίηση το παραγόμενο αμμώνιο μετατρέπεται σε νιτρώδη και ύστερα σε νιτρικά ιόντα. Λόγω του αρνητικού φορτίου τα νιτρικά δεσμεύονται από τα φυτά με αποτέλεσμα την επιθυμητή διάθεση αζώτου στο φυτό. Παρακάτω περιγράφονται τα δύο στάδια οξείδωσης κατά την νιτροποίηση [Schmidt, Bartoschet al., 2002],



(βακτήρια *Nitrosomonas*, *Nitrosospira*, *Nitrosolobus*, *Nitrosovibrios*)



(βακτήρια *Nitrobacter*, *Nitrospora*)

Η ταχύτητα των αντιδράσεων είναι εξαρτημένη από τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Οι βασικότεροι παράγοντες είναι η υγρασία, τα θρεπτικά συστατικά καθώς και το pH.

2.3.4.3 Ακινητοποίηση

Η διεργασία της ακινητοποίησης περιγράφεται από την δέσμευση του αζώτου μέσω μικροοργανισμών. Η αποσύνθεση της οργανικής ουσίας τερματίζεται όταν ξεκινά η ακινητοποίηση. Η δέσμευση του αζώτου συνεχίζεται και μετέπειτα.

2.3.4.4 Απονιτροποίηση (denitrification)

Κατά την απονιτροποίηση το ανόργανο άζωτο μετατρέπεται σε εκλυόμενο άζωτο και έπειτα απορρέει στην ατμόσφαιρα. Το φαινόμενο αυτό γίνεται εντονότερο κατά αναερόβιες συνθήκες. Πιο ειδικά, στην φάση αυτή, γίνεται βιολογική αναγωγή στα νιτρικά και τα νιτρώδη που παράχθηκαν κατά την νιτροποίηση. Στην βιολογική αναγωγή συμβάλλουν τα βακτήρια των *Pseudomonas* ή *Alcaligenes* [Rynk,2022], με αποτέλεσμα την παραγωγή αέριων του αζώτου. Το σημείο αυτό είναι κρίσιμο για την κομποστοποίηση καθώς παρατηρείται η μεγαλύτερη απώλεια αζώτου (volatilization) με αποτέλεσμα να ελαττώνεται η εδαφοβελτιωτική ικανότητα του τελικού προϊόντος.

2.3.5. Παράμετροι κομποστοποίησης

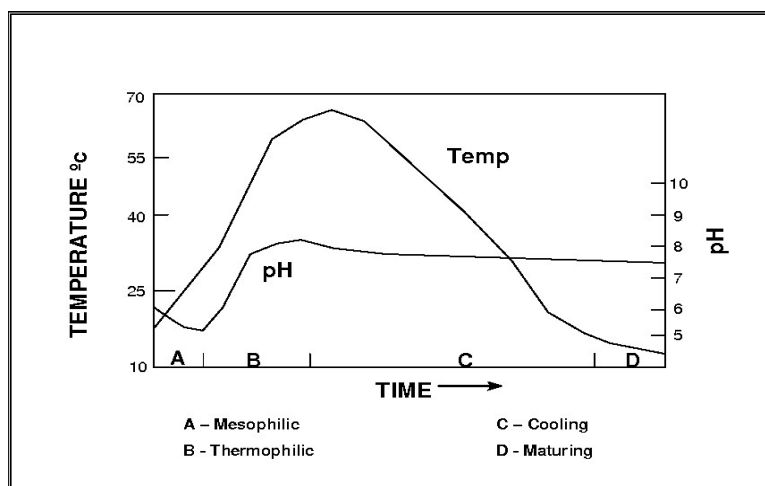
2.3.5.1 Θερμοκρασία

Μέσω της θερμοκρασίας είναι εφικτός ο προσδιορισμός του σταδίου της διεργασίας. Νομοθετικά είναι υποχρεωμένη η κάθε εγκατάσταση να σημειώνει καθημερινά την μέτρηση της θερμοκρασίας ως απόδειξη απολύμανσης από παθογόνους ιούς και μικροοργανισμούς [ΕΣΔΑ, 2020]. Εκτιμάται πως ο μέγιστος ρυθμός αποδόμησης βρίσκεται κατά το θερμοκρασιακό εύρος 45 έως 65° C. Η άνοδος της θερμοκρασίας άνω των 65° C συνεπάγεται μείωση του ρυθμού αποδόμησης, καθώς εξολοθρεύονται οι ωφέλιμοι μικροοργανισμοί που συντελούν την διεργασία. Έπειτά από την φάση ωρίμανσης, το υλικό έχει σταθεροποιηθεί και η θερμοκρασία του υλικού κυμαίνεται στους 20° C με 30° C, ανάλογα με την θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

2.3.5.2 pH

Στα αρχικά στάδια της κομποστοποίησης το pH είναι όξινο ($\text{pH} < 7$). Το χαμηλό pH μπορεί να δικαιολογηθεί από την παρουσία οργανικού οξέος, που παράγεται κατά την αποσύνθεση της βιομάζας. Οι μύκητες στο όξινο περιβάλλον είναι ανθεκτικότεροι από τα βακτήρια και επικρατούν. Σε μετέπειτα φάση της διεργασίας και ύστερα από την διάσπαση των οργανικών οξέων, το pH κυμαίνεται στην ουδέτερη περιοχή ($\text{pH} = 7$). Το βέλτιστο εύρος pH για αποδόμηση είναι μεταξύ 6,5 και 8,0, ώστε να ευνοεί την δράση των βακτηρίων χωρίς να περιορίζει σημαντικά εκείνη των μυκήτων [Στεργίουπουλος, 2022]. Όσο η τιμή του pH αυξάνεται, τόσο αυξάνεται και ο ρόλος των βακτηρίων στην κομποστοποίηση [Nemet, 2021].

- Στην περίπτωση όπου η τιμή του pH είναι μικρότερη από 5, δηλαδή έντονα όξινη, τότε αδρανοποιούνται ή πεθαίνουν τα βακτήρια. Συνεπώς μειώνεται και η ταχύτητα της κομποστοποίησης.
- Αν η τιμή του pH είναι έντονα αλκαλική, δηλαδή μεγαλύτερη από 9, το άζωτο μετατρέπεται σε αμμωνία. Αυτό μπορεί να επιφέρει έντονη οσμή και να μειώσει του ρυθμού της κομποστοποίησης [Κωνσταντάκου,2010].



Εικόνα 8 – Μεταβολή παραμέτρων κατά την διάρκεια της κομποστοποίησης

2.3.5.3 Υγρασία

Η ιδανική υγρασία για την κομποστοποίηση κυμαίνεται κατά προσέγγιση από 40% έως 60% (ξηρής μάζας) [Στεργιόπουλος, 2022]. Η χαμηλή υγρασία δύναται οδηγήσει στη αποτελεσματική δράση των μικροοργανισμών. Συγχρόνως αν το ποσοστό υγρασίας κυμαίνεται άνω των 60% ενδέχεται να λειτουργήσει σαν παρεμποδιστικός παράγοντας αερισμού στην διαδικασία καθώς το υλικό πακτώνει με αποτέλεσμα να δημιουργούνται αναερόβιες συνθήκες.

2.3.5.4 Αγωγιμότητα

Με τον όρο ηλεκτρική αγωγιμότητα εκφράζεται η συγκέντρωση των διαλυτών αλάτων στο οργανικό υπόστρωμα. Η αγωγιμότητα του τελικού προϊόντος καθορίζει την ποσότητα του υλικού που θα εφαρμοστεί ανά στρέμμα. Ειδικότερα, η υψηλή τιμή ηλεκτρικής αγωγιμότητας δεν εκδηλώνει πρόβλημα στο προϊόν αλλά απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή στην εφαρμογή στην καλλιέργεια. Η αγωγιμότητα είναι ένας παράγοντας όπου μπορεί να επηρεάσει την κομποστοποίηση, ωστόσο δεν είναι άμεσα σχετική με τη διεργασία. Η χρήση κόμποστ σε γεωργικές καλλιέργειες έχει ανώτατο όριο εφαρμογής την τιμή 4 mS/cm [Μανιός, 2009], [Ξεζάκης, 2012]. Σε υψηλότερες τιμές αγωγιμότητας υπάρχει κίνδυνος παρεμπόδισης απορρόφησης νερού στο ριζικό σύστημα από ανόργανα στοιχεία.

2.3.5.5. Ολικός άνθρακας

Ολικός άνθρακας ορίζεται ως το σύνολο του άνθρακα που περιέχεται σε μια οργανική ουσία. Στην κομποστοποίηση ο ολικός άνθρακας (TOC) αποτελεί μια άμεση μέτρηση όλου του οργανικού και ανόργανου άνθρακα στο δείγμα κομπόστ. Ο οργανικός άνθρακας διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην διαδικασία αποτελεί πηγή ενέργειας για τους μικροοργανισμούς [Ibanez et.al, 2016]. Συνήθως ο ολικός άνθρακας σε φυτικά απόβλητα πριν επεξεργαστούν βρίσκεται στο 40%-55% κατά βάρος. Έπειτα το πέρας της κομποστοποίησης υπολογίζεται στο 10%-25%.

2.3.5.6. Ολικό άζωτο

Το ολικό άζωτο ορίζεται ως το σύνολο του αζώτου που περιέχεται στην οργανική ουσία (TN). Το ολικό άζωτο μειώνεται κατά την διάρκεια της κομποστοποίησης. Η ελάττωση αυτή οφείλεται στη δράση πρωτεολυτικών βακτηρίων και την αύξηση της θερμοκρασίας. Κατά την αύξηση της θερμότητας και σε ανοξικές συνθήκες το άζωτο απομακρύνεται στην ατμόσφαιρα [Reizhen, 2023]. Πιο αναλυτικά, το νερό που παράγεται από την διεργασία μετατρέπεται σε ατμό υπό τις υψηλές θερμοκρασίες. Με αποτέλεσμα να προκαλείται το φαινόμενο απογύμνωσης της αμμωνίας και ελευθέρωση διαφορών ενώσεων. Για την σύνθεση βιομορίων και γενικά για την διεργασία χρησιμοποιείται ένα μικρό ποσοστό οργανικού αζώτου σε σχέση με ότι απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα.

2.3.5.7. Πτητικά στερεά (VS)

Με τον όρο πτητικά στερεά ορίζεται το ποσοστό των ξηρών στερεών που χάνονται με ανάφλεξη στους 550° C. Η μέτρηση των πτητικών στερεών αποτελεί παράμετρο για την μέτρηση της οργανικής ύλης. Η ανάφλεξη δειγμάτων κόμποστ στους 550° C οδηγεί στην παραγωγή οξειδωμένων πτητικών ενώσεων που προέρχονται 99% από οργανικές ενώσεις. Το ποσοστό που σχηματίζεται από ανόργανες ενώσεις θεωρείται αμελητέο. Η μείωση των πτητικών στερεών είναι δείκτης αποσύνθεσης οργανικής ουσίας κατά την διαδικασία κομποστοποίησης [Rynk, 2022]. Για τον υπολογισμό των πτητικών στερεών θεωρείται πως η συγκέντρωση τέφρας παραμένει σταθερή κατά την εξέλιξη της κομποστοποίησης.

2.3.5.8. Λόγος άνθρακα-άζωτου

Παραπάνω τονίστηκε η σημαντικότητα του άνθρακα και του άζωτου στη διαδικασία της κομποστοποίησης. Τα δύο στοιχεία επηρεάζουν την ανάπτυξη και τη δραστηριότητα των μικροοργανισμών που συμμετέχουν στην διαδικασία. Ομοίως και η αναλογία μεταξύ τους είναι καθοριστική για την πορεία της κομποστοποίησης [Artemio et. al, 2018]. Ο βέλτιστος λόγος C/N για την κομποστοποίηση είναι από 25:1-35:1 [Στεργιόπουλος, 2022]. Η αναλογία αυτή παρέχει τις βέλτιστες συνθήκες για τη δραστηριότητα των μικροοργανισμών.

- Στην περίπτωση όπου η αναλογία C/N είναι μεγαλύτερη από το επιθυμητό όριο, αναμένεται κατακόρυφη μείωση της ταχύτητας της κομποστοποίησης, αφού το άζωτο λειτουργεί ως περιοριστικός παράγοντας της διεργασίας [Müller-Kopp, 2005].
- Ενώ στην περίπτωση όπου η αναλογία είναι μικρότερη, παρατηρούνται απώλειες του αζώτου λόγω της αδυναμίας δέσμευσης στην κυτταρική μάζα.

2.3.6 Οφέλη κομποστοποίησης

Με τον όρο κομποστοποίηση περιγράφεται η βιολογική διεργασία μετατροπής οργανικών αποβλήτων σε εδαφικό υπόστρωμα πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά. Χαρακτηρίζεται ως πρακτική βιώσιμης ανάπτυξης, καθώς αποτελεί μια μορφή ανακύκλωσης. Κατά την κομποστοποίηση τα οργανικά απόβλητα ανακυκλώνονται, μετατρέπονται σε λίπασμα και επαναχρησιμοποιούνται. Με την εφαρμογή συστημάτων κομποστοποίησης, ελαχιστοποιείται ο όγκος των οργανικών αποβλήτων που οδηγούνται σε χώρους υγειονομικής ταφής (Χ.Υ.Τ.Α) και χωματερές. Σύμφωνα με το Εθνικό σχέδιο διαχείρισης αποβλήτων [ΕΣΔΑ 2020-2030], υπολογίζεται πως το οργανικό κλάσμα των αστικών αποβλήτων το 2025, 4.896.460 τόνους [Eurostat, 2023], πλην Βιομηχανικών & Εμπορικών Απόβλητων Συσκευασίας (ΒΕΑΣ). Ωστόσο, το 78,4% των οργανικών αποβλήτων εναποθέτονται κυρίως σε ΧΥΤΑ και μονάχα το 5,1% κομποστοποιείται.

Κατά την ταφή αυτών των αποβλήτων, επικρατούν αναερόβιες συνθήκες με αποτέλεσμα κατά την αποδόμηση τους να παράγεται μεθάνιο. Το παραγόμενο μεθάνιο, εκλύεται στην ατμόσφαιρα συμβάλλοντας στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και στην κλιματική αλλαγή. Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως το μεθάνιο διαθέτει δυναμικό παγκόσμιας θέρμανσης 31 φορές μεγαλύτερο από το διοξείδιο του άνθρακα (Global Warming Potential, GWP) [Τσουρδαλάκη, 2017]. Πιο αναλυτικά, το

μεθάνιο ενδέχεται να συνεισφέρει εντονότερα στο φαινόμενο του θερμοκηπίου από ότι το διοξείδιο του άνθρακα σε ένα κοινό χρονικό ορίζοντα. Γεγονός που επισημαίνει την αναγκαιότητα διαχείρισης των αερίων που δημιουργούνται από την διάσπαση των οργανικών αποβλήτων, ενδεχομένως μέσω ενός καταλλήλου συστήματος κομποστοποίησης. Κατά την κομποστοποίηση δεσμεύεται ο εκπεμπόμενος άνθρακας και έτσι αμβλύνεται η αέρια ρύπανση [Rynk, 2022]. Ακόμη κατά την ταφή, είναι πιθανό να διαφύγουν υγρά στραγγίσματα που φέρουν τοξικές ουσίες στα υπόγεια ύδατα, ιδίως στην περίπτωση εναπόθεσης σε χωματερές όπου δεν διαθέτουν σχέδιο διαχείρισης στραγγισμάτων.

Επιπλέον με την χρήση του τελικού προϊόντος της διεργασίας, μειώνεται η ανάγκη σε χημικά λιπάσματα και φυτοφάρμακα. Προστατεύοντας έτσι το έδαφος και τα υπόγεια ύδατα από επιπλέον ρύπανση. Το προϊόν της κομποστοποίησης ενδείκνυται για βελτίωση της ποιότητας του εδάφους. Η ενσωμάτωση στην καλλιέργεια κλείνει τον κύκλο ανακύκλωσης και το έδαφος εμπλουτίζεται σε άνθρακα, άζωτο, φωσφόρο και κάλιο, θρεπτικά στοιχεία που χρειάζονται όλες οι καλλιέργειες για την ανάπτυξη τους. Ακόμη, λόγω της δομής του κόμποστ αυξάνεται η ικανότητα του εδάφους σε συγκράτηση νερού. Επιτυγχάνοντας με αυτόν τον τρόπο εξοικονόμηση του αρδευτικού νερού.

Τέλος, μέσω της εφαρμογής συστημάτων κομποστοποίησης προωθείται η ιδέα της ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης. Προάγεται η αειφόρος ανάπτυξη και ενισχύεται η περιβαλλοντική ισορροπία. Μεγάλο προτέρημα των συστημάτων κομποστοποίησης, σε σχέση με άλλες μεθόδους διαχείρισης αποβλήτων, είναι το χαμηλό κόστος λειτουργίας και δημιουργίας μια μονάδας κομποστοποίησης. Συνεπώς, δυνητικά θα ήταν εφικτή η δημιουργία μικρών τοπικών εγκαταστάσεων κομποστοποίησης όπου θα αντικαθιστούσαν χωματερές και ΧΥΤΑ. Με τον τρόπο αυτό, είναι πιθανό να ενισχυθεί η τοπική οικονομία της περιοχής από τις νέες θέσεις εργασίας, μειώνοντας το ποσοστό ανεργίας της. Οικονομικά θα επωφελούνταν με την χρήση κόμποστ και οι αγρότες καθώς το προϊόν είναι οικονομικότερο από τα χημικά, επικίνδυνα, σκευάσματα που εισάγονται.

2.3.7 Εγκατάσταση κομποστοποίησης

Το παρών πείραμα φιλοξενήθηκε σε εγκατάσταση κομποστοποίησης στην περιοχή Σταυρού, Ιεράπετρας. Πέρα από τον χώρο παραχωρήθηκε για τις ανάγκες του πειράματος ο απαραίτητος μηχανολογικός και εργαστηριακός εξοπλισμός.

2.3.7.1 Τα θερμοκήπια της Ιεράπετρας

Η Ιεράπετρα είναι η νοτιότερη πόλη της Ευρώπης. Βρίσκεται στο νοτιοανατολικό άκρο της Κρήτης και βρέχεται από το Λιβυκό πέλαγος. Είναι η τέταρτη μεγαλύτερη πόλη της Κρήτης, με πληθυσμό 17.710 κατοίκων. Το κλίμα χαρακτηρίζεται ήπιο, με χαμηλές βροχοπτώσεις και υψηλές

θερμοκρασίες. Οι κάτοικοι της Ιεράπετρας απασχολούνται κυρίως με τη γεωργία, την καλλιέργεια της ελιάς και την αλιεία. Η πόλη της Ιεράπετρας συνεισφέρει το 30% της συνολικής παραγωγής κηπευτικών της Ελλάδας. Η τεράστια παραγωγή γίνεται δυνατή με την καλλιέργεια σε θερμοκήπια. Η περιοχή αποτελεί την μεγαλύτερη συγκέντρωση θερμοκηπιακών κατασκευών σε όλη την Ελλάδα, και κατατάσσεται ανάμεσα στις δέκα μεγαλύτερες συγκεντρώσεις θερμοκηπίων στη Μεσόγειο. Συνολικά για το έτος 2013, το σύνολο στρεμμάτων θερμοκηπιακών καλλιεργειών στην Ελλάδα υπολογίστηκε στα 60.550 στρέμματα και η ειδικότερα για την πόλη της Ιεράπετρας υπολογίστηκε 18.000-20.000 στρέμματα, σύμφωνα με στοιχεία του Ενιαίου Αγροτικού Συλλόγου Ιεράπετρας (ΕΑΣΙ).

2.3.7.2 Απόβλητα από θερμοκήπια Ιεράπετρας

Ανόργανα απόβλητα θερμοκηπίων

Στα ανόργανα απόβλητα θερμοκηπίων συγκαταλέγονται κυρίως πλαστικά. Τα πλαστικά αυτά προέρχονται από συσκευασίες, πλαστικά ένδυσης θερμοκηπίων, σπάγκους στήριξης φυτών και σωλήνες για άρδευση (PVC). Τα υλικά αυτά δεν κομποστοποιούνται και είναι χρέος του αγρότη να τα εναποθέσει σε μονάδα διαχείρισης τους.

Οργανικά απόβλητα θερμοκηπίων

Τα οργανικά απόβλητα θερμοκηπίων χαρακτηρίζονται διαφορετικά και ως πράσινα απόβλητα λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε οργανικής ουσίας και της απουσίας παθογόνων μικροοργανισμών για τον άνθρωπο. Μερικές από τις οργανικές ενώσεις που εντοπίζονται στο αρχικό υλικό είναι πρωτεΐνες, λιπίδια, υδατάνθρακες, κυτταρίνη, αμινοξέα, λιγνίνη και οργανικά οξέα. Για τις ανάγκες του πειράματος έγινε συγκομιδή αποβλήτων από τα θερμοκήπια της πόλης της Ιεράπετρας. Επεξεργάστηκαν δύο ρεύματα αποβλήτων θερμοκηπίου, ένα που περιείχε εξολοκλήρου οργανικά απόβλητα από φυτό τομάτας και ένα με μίξη υλικών. Η μίξη υλικών αποτελούνταν από τομάτα αγγούρι, πιπεριές, μελιτζάνες και ξυλώδες υλικό.

Κεφάλαιο 3- Πείραμα κομποστοποίησης

3.1 Αντικείμενο μελέτης

Η παρούσα διπλωματική αφορά συγκριτικά πειράματα, ανοικτού συστήματος κομποστοποίησης με αναδεδυόμενους σωρούς. Για τις ανάγκες της εργασίας δημιουργήθηκαν εννέα συγκρίσιμοι σωροί. Στον κάθε ένα αναδεδυόμενο σωρό, έχει επιβληθεί ένας διαφορετικός παράγοντας κομποστοποίησης. Οι παράγοντες κομποστοποίησης που εξετάστηκαν είναι το αρχικό υλικό, το ύψος, το μέγεθος σωματιδίων άλεσης και ο ρυθμός αερισμού. Μετά το πέρας της διεργασίας τα προϊόντα κομποστοποίησης συγκρίνονται ως προς τα ποιοτικά χαρακτηριστικά, την φυτοθεραπευτικότητα και την απόδοση στην καλλιέργεια. του τελικού προϊόντος για την εύρεση του πιο αποδοτικού εδαφοβελτιωτικού.

3.2 Υλικά και μέθοδοι

3.2.1 Μέθοδος ελέγχου και διατήρησης υγρασίας

Η υγρασία αντιπροσωπεύει έναν ακόμη κρίσιμο παράγοντα κατά τη διαδικασία της κομποστοποίησης. Η ιδανική υγρασία στο εσωτερικό των σωρών κινείται μεταξύ 40% και 60%. Κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης, το υλικό θρυμματίζεται και αναδεδύεται με αποτέλεσμα την απώλεια μεγάλου μέρους της αρχικής υγρασίας του. Η χαμηλή περιεκτικότητα σε υγρασία επιβραδύνει τη διεργασία και οδηγεί σε αυξημένες θερμοκρασίες, οι οποίες επιβαρύνουν τη μικροβιακή κοινότητα. Προκειμένου να διατηρηθεί η επιθυμητή υγρασία στον σωρό, ο σωρός εφοδιάζεται με νερό πριν από την ανάδευση. Ωστόσο, η υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία μπορεί να αποτελέσει παρεμποδιστικό παράγοντα για τη διαδικασία, καθώς το νερό αποκλείει τις αεραγωγούς διόδους εντός του σωρού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον ανεπαρκή αερισμό και την εκδήλωση ανοξικών συνθηκών.

Η ποσότητα υγρασίας που περιέχεται στο δείγμα μπορεί να υπολογιστεί μετά από τη διαδικασία ξήρανσης για τουλάχιστον 24 ώρες στους 105 °C σε φούρνο ξήρανσης DHG-9025, βάση της οδηγίας EPA SW846 – TestMethod 150.1. Αρχικά, καταγράφεται η μάζα του δείγματος πριν τη διαδικασία της ξήρανσης, και έπειτα η μάζα του δείγματος μετά την ολοκλήρωση της ξήρανσης. Το ποσοστό υγρασίας του δείγματος υπολογίζεται με βάση τον ακόλουθο επίσημο τύπο,

$$Moisture (\%) = \frac{Mass_{before} - Mass_{after}}{Mass_{before}} \times 100\%$$

3.2.2 Μέθοδος μέτρησης θερμοκρασίας

3.2.2.1 Μέτρηση θερμοκρασίας στην επιφάνεια

Με την μέτρηση θερμοκρασίας δίνονται δεδομένα για το στάδιο της κομποστοποίησης. Συνεπώς, για την διεξαγωγή του πειράματος, η συχνή και αντιπροσωπευτική μέτρηση θερμοκρασίας είναι απαραίτητη. Η λήψη μετρήσεων θερμοκρασίας έγινε με τον ψηφιακό θερμόμετρο από ανοξείδωτος χάλυβας με μήκος 1200 mm βάσει οδηγίας [ΕΠΠΕΡΑ, 2020]. Η μέτρηση θερμοκρασίας του σωρού απαιτείται να είναι αντιπροσωπευτική. Η θερμοκρασία υπολογίζεται από την μέση τιμή μετρήσεων θερμοκρασίας σε πέντε σημεία στην επιφάνεια του σωρού.

Από προκαταρκτικές μετρήσεις διαπιστώθηκε πως οι μετρήσεις θερμοκρασίας στα πέντε σημεία μέτρησης δεν είχαν σημαντικές διακυμάνσεις. Η κάθε μέτρηση αντιστοιχεί στο σημείο όπου βρίσκεται το ηλεκτρόδιο του θερμομέτρου, δηλαδή σε ογδόντα εκατοστά βάθος από τη επιφάνεια. Στην περίπτωση όμως, που η απόσταση από την εξωτερική επιφάνεια δεν παράμενε σταθερή, οι μετρήσεις θερμοκρασίας διέφεραν αρκετά. Γενικότερα, παρατηρήθηκε πως η θερμοκρασία είναι ανάλογη της απόστασης από την επιφάνεια.

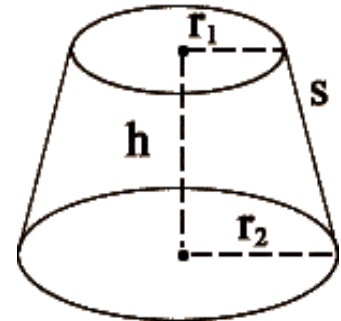
3.2.2.2 Μέτρηση θερμοκρασίας στην τομή των σωρών

Η μέση θερμοκρασία από την επιφάνεια του σωρού δεν είναι αντιπροσωπευτική αφού με τον τρόπο αυτό υπολογίζεται η μέση θερμοκρασία σε μια ζώνη 80 εκατοστών βάθους, όπου δηλαδή φθάνει το ηλεκτρόδιο του θερμομέτρου. Για τον υπολογισμό μιας πραγματικής μέτρησης θερμοκρασίας πάρθηκε επιπλέον μια οριζόντια μέτρηση θερμοκρασίας στην τομή. Πιο ειδικά, ο κάθε σωρός διαιρέθηκε σε ζώνες πάχους 0,5 μέτρων. Η κάθε ζώνη αντιπροσωπεύει ένα ποσοστό όγκου του σωρού. Ανά δέκα περίπου ημέρες, πριν από την ανάδευση και έπειτα από τις μετρήσεις θερμοκρασίας στα πέντε σημεία στην επιφάνεια, δημιουργήθηκε κατακόρυφη τομή για τον κάθε σωρό. Στην τομή αυτή, πάρθηκαν οριζόντιες μετρήσεις θερμοκρασίας. Για κάθε ζώνη πάχους 0,5 μέτρα λήφθηκαν τρεις μετρήσεις περιμετρικά και ο μέσος όρος των μετρήσεων αυτών θεωρήθηκε η αντιπροσωπευτική θερμοκρασία της κάθε ζώνης. Το θερμόμετρο για την μέτρηση στις ζώνες τοποθετήθηκε στο οριζόντιο άξονα σε βάθος 5 εκατοστών. Από αυτή τη μέτρηση θερμοκρασίας και το ποσοστό όγκου της κάθε ζώνης, υπολογίστηκε η πραγματική θερμοκρασία σωρού. Η διαφορά της πραγματικής θερμοκρασίας από αυτή που μετρήθηκε πριν από την ανάδευση ορίστηκε σαν διόρθωση θερμοκρασίας για τον σωρό, για το διάστημα πριν την ανάδευση.

Για τον υπολογισμό του ολικού όγκου θεωρήθηκε πως όλοι οι σωροί πως έχουν σχήμα κώλουρου κώνου και πως οι σωροί κοινού ύψους έχουν τον ίδιο αρχικό όγκο. Ο ολικός όγκος του κάθε σωρού υπολογίζεται από τον τύπο του όγκου του Αρχιμήδη για τους κώλουρους κώνους,

$$V = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot H \cdot (r_1^2 + r_2^2 + (r_1 \cdot r_2)),$$

- H, το ύψος του σχήματος
- r_1 , η ακτίνα της πάνω βάσης
- r_2 , η ακτίνα της κάτω βάσης



Εικόνα 9-Σχήμα κώλουρου κώνου

Για τον υπολογισμό του όγκου της κάθε ζώνης θεωρήθηκε πως οι πλευρές των ζωνών είναι παράλληλες μεταξύ τους και οι γωνίες μεταξύ τους παραμένουν ίδιες. Δηλαδή, η κλίση είναι σε όλες τις ζώνες η ίδια. Από σχέσεις με όμοια τρίγωνα γίνεται δυνατός ο υπολογισμός των διαστάσεων των εσωτερικών ζωνών. Βρίσκεται ο όγκος για την κάθε ζώνη, V_i , και υπολογίζεται η μέση θερμοκρασία της T_i .

Ο ολικός όγκος του κάθε σωρού ορίζεται από το άθροισμα των όγκων των ζωνών και η σχέση αυτή περιγράφεται μαθηματικά ως,

$$V_{total} = \sum_{i=1} V_i$$

Επιπλέον, σε έναν σωρό ο όγκος της ζώνης αντιπροσωπεύει ένα ποσοστό του ολικού όγκου, αλλιώς η διαίρεση του όγκου της ζώνης προς τον ολικό όγκο δίνει ένα ποσοστό συνεισφοράς της ζώνης προς τον ολικό όγκο,

$$volume\ contribution_i (\%) = \frac{V_i}{V_{total}}$$

Δεδομένου ότι ο όγκος της ζώνης συνεισφέρει στον ολικό όγκο με ένα ποσοστό, μπορεί να θεωρηθεί πως η θερμοκρασία της ζώνης αυτής συνεισφέρει ομοίως στην ολική θερμοκρασία του σωρού. Με την θεώρηση αυτή, βρίσκεται μια νέα σχέση υπολογισμού της θερμοκρασία του σωρού.

$$T = \sum_{i=1} \%volume\ contribution_i \cdot T_i$$

Με τον υπολογισμό της μέσης θερμοκρασίας από μετρήσεις κατά την τομή ανιχνεύεται η θερμοκρασία σε όλο τον όγκο του σωρού και η μέτρηση της θερμοκρασίας που προκύπτει θεωρείται πιο αντιπροσωπευτική.

Διαπιστώθηκε ότι η δημιουργία ίδιων διαστάσεων κόλινων κώνων σε κάθε σωρό ήταν αδύνατη κατά το πέρας των αναδεύσεων. Για τον λόγο αυτό, μετρήθηκαν οι εξωτερικές διαστάσεις σε κάθε σωρό και δημιουργήθηκε μοντέλο υπολογισμού κατανομής όγκου σε κάθε σωρό με βήμα ζώνης 0,5 μέτρα. Επιπλέον, οι διαφορές στην ποσοστιαία κατανομή του όγκου από τις διαφορές στις εξωτερικές διαστάσεις των σωρών, δεν προκύψαν σημαντικές διακυμάνσεις στην διορθωμένη θερμοκρασία συνήθως η ζώνη με τη μεγαλύτερη διακύμανση στον υπολογισμό του όγκου της, είχε μικρή συνεισφορά στον συνολικό όγκο του σωρού), οπότε χρησιμοποιήθηκε ο μέσος όρος των κατανομών όγκου, για όλες τις διορθώσεις θερμοκρασίας σε όλους τους σωρούς.

3.2.3 Μέθοδος μέτρησης pH-Αγωγιμότητας

Η δειγματοληψία του υλικού διενεργήθηκε έπειτα από την ανάδευση του υλικού, έχοντας εξασφαλίσει την ομοιογενοποίησή του. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν τυχαία δείγματα από 10 σημεία του υλικού αυτού, τα οποία στη συνέχεια συλλέγονται και μεταφέρονται στο εργαστήριο για περαιτέρω ανάλυση. Είναι αναγκαίο, το δείγμα να παρουσιάζει αντιπροσωπευτικότητα και ομοιογενή χαρακτηριστικά, ώστε να διασφαλιστεί η αναγνώριση του φάσματος της διαδικασίας. Για τη μέτρηση του pH και της αγωγιμότητας χρησιμοποιήθηκε κοινό όργανο πεχάμετρο-αγωγιμόμετρο HANNA μοντέλου HI98107 πραγματοποιώντας τη μέτρηση σε υγρό δείγμα. Συνεπώς, από κάθε υλικό σωρό αποσταγμάτωθηκε 1 γραμμάριο δείγματος, το οποίο στη συνέχεια αραιώθηκε σε 0,1 γραμμάρια απιονισμένου νερού. Το διάλυμα αναδεύτηκε για περίπου 30 δευτερόλεπτα, έπειτα απομονώθηκε το υπερκείμενο μέρος. Τέλος, στο υπερκείμενο μέρος τοποθετήθηκε το όργανο προκειμένου να πραγματοποιηθεί η μέτρηση.

3.2.4 Μέθοδος μέτρησης πτητικών στερεών

Πτητικά στερεά ορίζεται το ποσοστό των ξηρών στερεών που απομένουν μετά την ανάφλεξη του δείγματος στους 550° C. Η μέτρηση των πτητικών προκύπτει βάση της οδηγίας EPA SW846 – TestMethod 160.4. Συγκεκριμένα, για την καθορισμένη διαδικασία, λαμβάνεται 1 γραμμάριο από το ήδη ξηρό δείγμα, το οποίο τοποθετείται σε κλίβανο που θερμαίνεται στους 550° C για μια ώρα. Μετά την περίοδο αυτή, το δείγμα έχει αποτεφρωθεί πλήρως, και στη συνέχεια ζυγίζεται. Η διαφορά μάζας μεταξύ του ξηρού υλικού και του αποτεφρωμένου αποτελεί την ποσότητα των οξειδωμένων πτητικών ενώσεων, οι οποίες προέρχονται κατά 99% από οργανικές ενώσεις. Το αποτεφρωμένο υλικό είναι ικανό να απορροφήσει υγρασία και να προκαλέσει ανακρίβειες στη ζύγιση. Για να αποφευχθεί αυτό, το υλικό αφήνεται να επανακτήσει θερμοκρασία δωματίου στον ξηραντήρα και στη συνέχεια ζυγίζεται. Με τον τρόπο αυτό, εξασφαλίζεται η ακρίβεια της μέτρησης, απομακρύνοντας τυχόν

πτητικές ενώσεις που ενδέχεται να προκαλέσουν ανομοιογενείς μετρήσεις λόγω απορρόφησης υγρασίας.

3.2.5 Μέθοδος μέτρησης παράμετρου C/N

Για τον προσδιορισμό του λόγου μεταξύ άνθρακα και αζώτου, πραγματοποιήθηκε αρχικά η υπολογιστική ανάλυση του στοιχειομετρικού άνθρακα και του στοιχειομετρικού άζωτου με τη χρήση ενός στοιχειακού αναλυτή στο εργαστήριο βάση αναλυτικής μεθόδου CHNS-O Elemental Analysis σε αναλυτή Euro Vector EA 3000. Η μέθοδος της στοιχειακής ανάλυσης εφαρμόζεται με σκοπό τον προσδιορισμό της στοιχειομετρικής σύνθεσης χημικών ενώσεων. Πρόκειται για μια αναλυτική τεχνική, μέσω της οποίας καθορίζονται τα ποσοστά των στοιχείων σε σχέση με το συνολικό βάρος του δείγματος που εξετάζεται. Η στοιχειακή ανάλυση βασίζεται στην ελεγχόμενη και εντατική καύση των δειγμάτων, καθώς και στη μέτρηση των παραγόμενων οξειδίων. Η θερμοκρασία της καύσης αυξάνεται μέχρι τους 1800°C προκειμένου να διασφαλιστεί η πλήρης ανάλυση. Τα δείγματα υπό εξέταση τοποθετούνται σε κάψουλες και στη συνέχεια εισάγονται στον στοιχειακό αναλυτή για τη διεξαγωγή της ανάλυσης.

3.2.6 Μέθοδος υπολογισμού δείκτη βλαστικότητας

Ο έλεγχος της φυτοτοξικότητας είναι δυνατός μέσω του υπολογισμού του δείκτη βλαστικότητας (GI). Στην περίπτωση που ο δείκτης βλαστικότητας είναι μικρότερος από 80%, το εκχύλισμα θεωρείται φυτοτοξικό (ή μη ωριμασμένο). Στην περίπτωση που ο δείκτης βλαστικότητας κυμαίνεται ανάμεσα σε 80% και 100%, το εξεταζόμενο εδαφικό υπόστρωμα θεωρείται ουδέτερο. Ενώ όταν ο δείκτης υπερβαίνει το 100%, το εκχύλισμα χαρακτηρίζεται φυτοθρεπτικό. Ο προσδιορισμός της φυτοτοξικότητας του κόμποστ πραγματοποιείται σύμφωνα με το πρωτόκολλο που εφαρμόζεται από το Εθνικό Ίδρυμα Αγροτικής Έρευνας (ΕΙΑΕ) για τον υπολογισμό βλαστικότητας. Για τον υπολογισμό του δείκτη βλαστικότητας πραγματοποιείται το εκχύλισμα ενός γραμμαρίου κόμποστ σε 0,1 λίτρα απιονισμένου νερού. Το μείγμα ομοιογενοποιείται και στη συνέχεια τοποθετείται σε τριβλίο Petri, όπου προστίθεται υπόστρωμα βαμβακιού. Το υπόστρωμα βαμβακιού χρησιμοποιείται για την διασφάλιση της κατάλληλης διαβροχής του σπόρου, επιτρέποντας την προσκόλληση του σπόρου στην επιφάνεια. Για τη δοκιμή χρησιμοποιούνται τρία διαφορετικά είδη σπόρων. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται σπόροι μαρουλιού, καρδάμου και ραπανιού, τα οποία πληρούν τις απαιτήσεις των προαναφερθέντων προτύπων. Το κάθε προϊόν κομποστοποίησης δοκιμάζεται στα τρία είδη σπόρων για τον εντοπισμό του δείκτη βλαστικότητας. Η κάθε δοκιμή επαναλαμβάνεται τρεις φορές για την μείωση του σφάλματος. Επιπλέον γίνεται και μία "τυφλή" δοκιμή, που το εκχύλισμα περιέχει μόνο απιονισμένο νερό. Ο δείκτης βλαστικότητας υπολογίζεται βάσει της "τυφλής" δοκιμής. Τα τριβλία τοποθετήθηκαν σε σκιαρό μέρος για επτά ημέρες και στη συνέχεια, μετρήθηκε η φυτοτροφικότητα των σπόρων και το μέσο μήκος των βλαστών τους, για να αξιολογηθεί η επίδραση του κόμποστ στη βλαστικότητα των σπόρων. Με τον όρο φυτοτροφικότητα εννοείται το ποσοστό των σπόρων που έχουν βλαστήσει σε σχέση με το τυφλό.

Το ποσοστό των σπόρων που βλάστησαν σε σχέση με τους σπόρους στην τυφλή δοκιμή ονομάζεται φυτοτροφικότητα (G).

$$G(\%) = \frac{\text{Number of germinated seeds in compost extract}}{\text{Number of germinated seeds in control}} \times 100\%$$

Στην συνέχεια υπολογίζεται το ποσοστιαίο μέσο μήκος των βλαστών σε σχέση με το τυφλό (I).

$$I(\%) = \frac{\text{Radicle length of all seeds in compost extract}}{\text{Radicle length of all seeds in control}} \times 100\%$$

Το γινόμενο φυτοτροφικότητας και μέσου μήκους βλαστών ονομάζεται δείκτης βλαστικότητας.

$$GI(\%) = \frac{G(\%) \times I(\%)}{100}$$

Ανάλογα την τιμή τον δείκτη βλαστικότητας μπορεί να γίνει χαρακτηρισμός του εδαφοβελτιωτικού σε φυτοτοξικό, ουδέτερο ή φυτοθεραπευτικό.

1. Αν $\Delta B < 80\%$ τότε το εδαφοβελτιωτικό θεωρείται **φυτοτοξικό**
2. Αν $\Delta B \in [80\%, 100\%]$, τότε το εδαφοβελτιωτικό θεωρείται **ουδέτερο**
3. Αν $\Delta B > 100\%$, τότε το εδαφοβελτιωτικό θεωρείται **φυτοθεραπευτικό**

3.2.7 Δοκιμή φυτοκαλλιέργειας

Κατά την δοκιμή φυτοκαλλιέργειας τα προϊόντα της κομποστοποίησης αξιολογούνται ως προς την εδαφοβελτιωτική τους ικανότητα. Ειδικότερα, τα προϊόντα ενσωματώνονται στην καλλιέργεια και συγκρίνεται η ανάπτυξη των φυτών. Για τη σύγκριση, επιλέγεται κεφαλωτό μαρούλι, το οποίο είναι ιδανικό για καλοκαιρινή καλλιέργεια. Το μαρούλι επιλέγεται συχνά για πειράματα σύγκρισης λόγω της ευαίσθητης φύσης του. Συγκεκριμένα, είναι ευάλωτο στην ανάπτυξή του, και η επίδραση του κόμποστ μπορεί να παρατηρηθεί εύκολα. Επιπλέον, προτείνεται για πειράματα σύγκρισης λόγω του σύντομου κύκλου ζωής του. Για την δοκιμή κατασκευάστηκαν δύο μικρά θερμοκήπια, στα όποια προστέθηκαν ίδιου όγκου και μεγέθους γλάστρες, ώστε η καλλιέργεια να εξάγεται υπό ίδιες συνθήκες. Για το κάθε προϊόν δημιουργήθηκε ένα μείγμα ξανθιάς τύρφης και 5% (κατά βάρος) κόμποστ. Στο μείγμα αυτό, τοποθετήθηκαν νεογνά φυτά μαρουλιού, ίδιου μεγέθους και ποικιλίας, και παρακολουθήθηκε η ανάπτυξη τους. Έπειτα από 30 ημέρες καλλιέργειας, μετρήθηκε το ριζικό σύστημα, ο αριθμός φύλλων, το μέσο μήκος φύλλων και η μάζα των φυτών.

3.3 Χρονοδιάγραμμα εργασιών

3.3.1 Προεπεξεργασία

3.3.1.1 Συλλογή υλικού

Πριν την έναρξη του πειράματος, συλλέχθηκαν φυτικά οργανικά απόβλητα από τα θερμοκήπια της Ιεράπετρας. Για τις ανάγκες του πειράματος συγκεντρώθηκαν συνολικά:

- 99 κυβικά μέτρα απόβλητων τομάτας (φύλλων, βλαστών και καρπών)
- 108 κυβικά μέτρα αποβλήτων μίξης υλικών (τομάτα, πιπεριά, μελιτζάνα)

Συνολικά συλλέχθηκαν 207 κυβικά μέτρα φυτικών αποβλήτων από θερμοκήπια



Εικόνα 10-Συλλογή ρεύματος μίξης



Εικόνα 11-Συλλογή ρεύματος τομάτας

3.3.1.2 Θρυμματισμός

Στη συνέχεια, το υλικό που συλλέχθηκε, υποβλήθηκε σε θρυμματισμό σε κινητό σπαστήρα. Στο εσωτερικό του σπαστήρα περιέχονται ειδικά σφυριά που τεμαχίζουν το υλικό. Με την κατάλληλη ρύθμιση δίνεται η δυνατότητα προσαρμογής του μεγέθους άλεσης. Για τις ανάγκες του πειράματος επιλέχθηκαν δύο μεγέθη τεμαχισμού (μικρότερο από πέντε εκατοστά και μικρότερο από είκοσι εκατοστά) για τον εντοπισμό του βέλτιστου μεγέθους.



Εικόνα 13-Είσοδος υλικού στον σπαστήρα



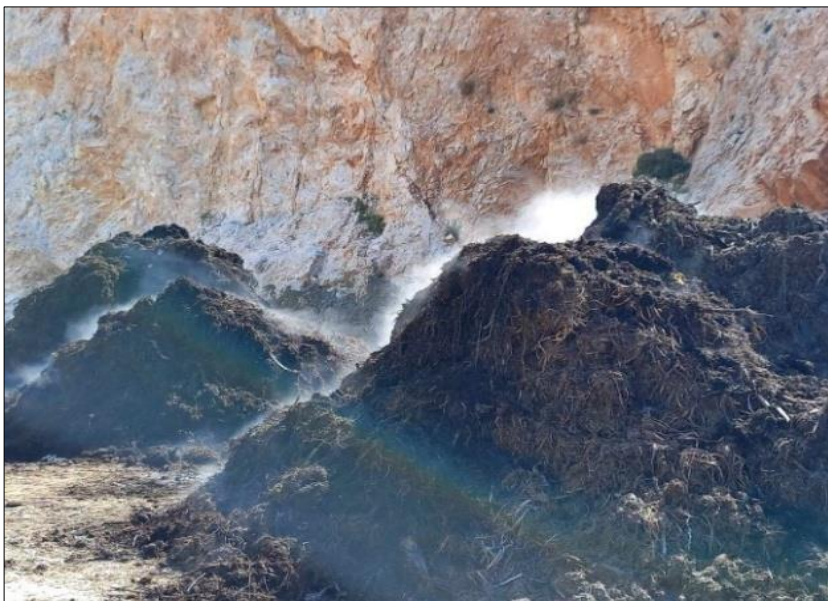
Εικόνα 12 –Έξοδος υλικού από τον σπαστήρα

3.3.2 Ενεργή φάση κομποστοποίησης

Οι σωροί στοιβάχθηκαν σε γεωμετρικό σχήμα όμοιο με κόλουρου κώνου. Το στήσιμο των σωρών αντιπροσωπεύει την έναρξη της ενεργής φάσης της κομποστοποίησης. Κατά την διάρκεια της φάσης αυτής, το υλικό αναδεύονταν και επιφέροντας τον φυσικό αερισμό. Επιπλέον παρακολουθήθηκε η θερμοκρασία, υγρασία, το pH και λήφθηκε η δειγματοληψία. Το υλικό ζυμώθηκε για 95 ημέρες (3 μήνες) και έπειτα το υλικό αφέθηκε για ωρίμανση για επιπλέον ένα μήνα.



Εικόνα 14 – Σωροί κατά την ανάδευση



Εικόνα 15-Κάπνισμα σωρών

3.3.3 Επεξεργασία τελικού προϊόντος

Στο πέρας της ωρίμανσης, το υλικό πλέον έχει σταθεροποιηθεί. Το παραγόμενο εδαφοβελτιωτικό οδηγείται σε περιστροφικό κόσκινο για την απομάκρυνση μεγαλύτερων σωματιδίων και σπάγκου. Έπειτα από το κοσκίνισμα το υλικό είναι έτοιμο για διάθεση.



Εικόνα 16-Περιστροφικό κόσκινο



Εικόνα 17 – Έξοδος από υλικού από περιστροφικό κόσκινο

3.3.4 Δοκιμή σε καλλιέργεια

Το τελικό προϊόν είναι σταθεροποιημένο και έτοιμο για ενσωμάτωση στην καλλιέργεια. Η πειραματική διαδικασία ολοκληρώνεται με ακόμη μια δοκιμή σε καλλιέργεια μαρουλιών. Σκοπός της δοκιμής είναι να εντοπιστεί η αποτελεσματικότητα των παραγόμενων εδαφοβελτιωτικών και η εύρεση του αποδοτικότερου. Έπειτα από ένα μήνα καλλιέργειας, μετρήθηκαν και συγκρίθηκαν τα χαρακτηριστικά των φυτών.



Εικόνα 16-Δοκιμή σε καλλιέργεια μαρουλιών



Εικόνα 17 – Ανάπτυξη φυτού με υπόστρωμα μίξης σε σχέση με τυφλή καλλιέργεια



Εικόνα 18-Σύγκριση ανάπτυξης φυτών

Κεφάλαιο 4-Αποτελέσματα

Στον παρακάτω πίνακα 4 αναγράφονται τα χαρακτηριστικά των σωρών του πειράματος. Κατά τον σχεδιασμό του πειράματος επιλέχθηκαν τα χαρακτηριστικά (παράγοντες) των σωρών με τέτοιο τρόπο ώστε για κάθε σωρό, να υπάρχει όμοιος όπου διαφέρει κατά ένα παράγοντα. Η επίδρασή των παραγόντων επρόκειτο να αναγνωριστεί από

- Παρακολούθηση θερμοκρασίας
- Δειγματοληψία
- Εργαστηριακές δοκιμές
- Δοκιμές δείκτη βλαστικότητας
- Δοκιμή σε καλλιέργεια μαρουλιών

Πίνακας 4- Χαρακτηριστικά σωρών πειράματος

Σωρός	Υλικό	Μέγεθος σωματιδίων άλεσης (cm)	Ύψος (m)	Συχνότητα αερισμού (Per week)
1	Τομάτα	< 20	2	1
2	Τομάτα	< 20	2	2
3	Μίξη	< 5	3	1
4	Μίξη	< 5	2	1
5	Μίξη	< 5	3	2
6	Μίξη	< 5	2	2
7	Τομάτα	< 5	3	1
8	Τομάτα	< 5	2	1
9	Τομάτα	< 5	2	2

4.1 Παρακολούθηση θερμοκρασίας

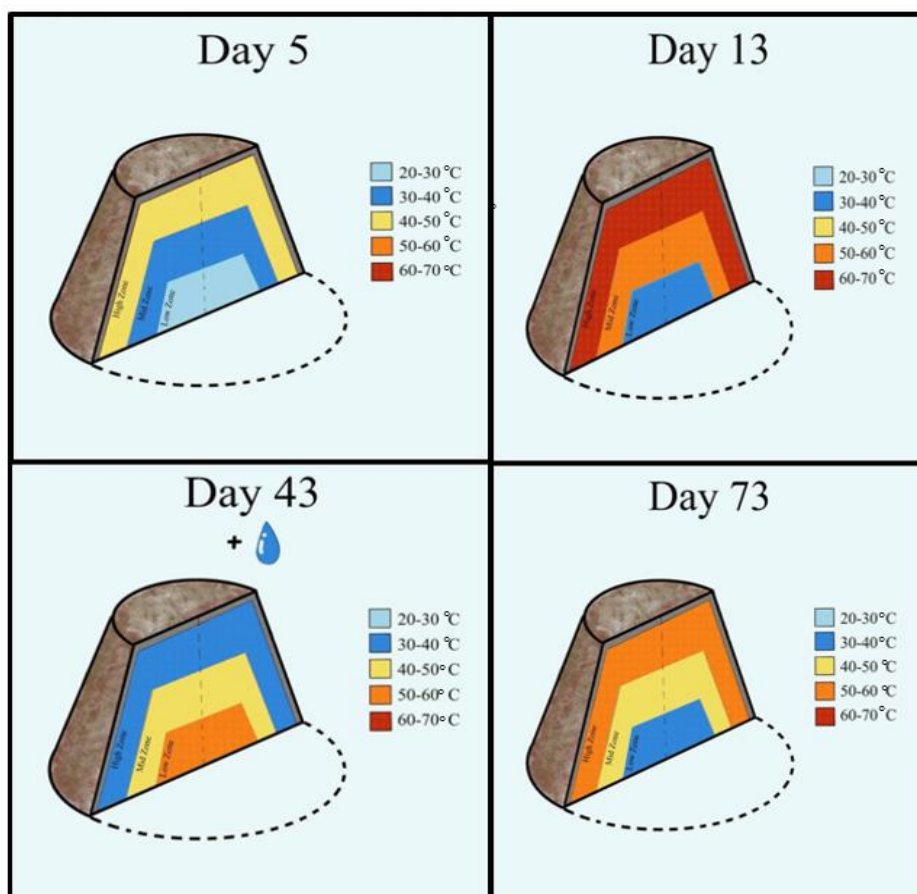
Η έναρξη της ενεργού φάσης της κομποστοποίησης σηματοδοτείται με το στήσιμο των σωρών. Από τις πρώτες ώρες, οι σωροί παρουσιάζουν υψηλές θερμοκρασίες. Ενδέχεται οι θερμές καιρικές συνθήκες και η υψηλή ηλιακή ακτινοβολία να συνέβαλαν στην αύξηση της θερμοκρασίας. Κατά τη διάρκεια της ενεργής φάσης της κομποστοποίησης, παρακολουθήθηκε καθημερινά η θερμοκρασία. Η μέτρηση της μέσης θερμοκρασίας προκύπτει από πέντε μετρήσεις θερμοκρασίας που πάρθηκαν κατακόρυφα στην επιφάνεια του κάθε σωρού. Οι μετρήσεις από την επιφάνεια εστιάστηκαν σε βάθος 80 εκατοστών, ισότιμο με το βάθος του ηλεκτροδίου του θερμομέτρου.

Για τον εντοπισμό της μέσης θερμοκρασίας σε ολόκληρο το σωρό, πραγματοποιήθηκαν πρόσθετες μετρήσεις της θερμοκρασίας, κατά μήκος της κάθετης τομής του σωρού, ανά εβδομάδα. Ο κάθε σωρός διαμερίστηκε σε ζώνες ύψους πενήντα εκατοστών. Σε κάθε ζώνη πάρθηκαν μετρήσεις θερμοκρασίας σε τέσσερα σημεία που βρισκόντουσαν αντιδιαμετρικά. Με τη χρήση αυτής της μεθόδου, υπολογίστηκε η μέση θερμοκρασία κάθε ζώνης. Επιπλέον, με τον υπολογισμό του όγκου κάθε ζώνης και του ποσοστού της στον συνολικό όγκο, ανακύπτει εκ νέου η μέση θερμοκρασία. Η νέα μέτρηση μέσης θερμοκρασίας του σωρού που προκύπτει εξετάζεται σε παρακάτω διαγράμματα για τον κάθε σωρό.

Στην Εικόνα 21 βρίσκεται σκίτσο με τις μέσες θερμοκρασίες των ζωνών κατά την πορεία της διεργασίας. Η θερμοκρασία που λαμβάνεται από την τομή του σωρού, διαφοροποιείται σημαντικά στα διάφορα ύψη μέτρησης. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε πως στα πέντε εκατοστά από την επιφάνεια, η θερμοκρασία της ζώνης ισορροπεί με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και το υλικό παραμένει πλήρως ξηρό. Η διαδικασία της κομποστοποίησης δεν εκτυλίσσεται στο επιφανειακό στρώμα.

Στη συνέχεια, ακολουθεί ένα στρώμα με χαμηλή υγρασία, προστατευμένο από το επιφανειακό στρώμα. Σε αυτήν τη ζώνη, ιδίως στα 2/3 του ύψους του σωρού, εντοπίζοταν η υψηλότερη θερμοκρασία. Η αύξηση της θερμοκρασίας αιτιολογείται από τον παθητικό αερισμό στον σωρό. Πιο ειδικά, ζεστό αέριο θερμαίνεται από τη μικροβιακή δραστηριότητα και αναδύεται στην κορυφή του σωρού, ενώ δροσερός αέρας εισέρχεται από τα πλαϊνά και το κάτω μέρος του σωρού για να το αντικαταστήσει. Το φαινόμενο που επιγράφηκε είναι γνωστό ως "φαινόμενο καμινάδας" [EPA,2023]. Οι ατμοί από το φαινόμενο της καμινάδας σε συνδυασμό με την χαμηλή υγρασία έχουν ως αποτέλεσμα να θερμαίνουν την υψηλή ζώνη. Βαθύτερα στον σωρό εντοπίζεται η μέση ζώνη με μεγαλύτερη υγρασία και χαμηλότερο αερισμό από την υψηλή ζώνη. Στην ζώνη αυτή παρατηρήθηκαν αποικίες μυκήτων που επωφελούνται από την υψηλότερη υγρασία.

Τέλος, στην βάση του σωρού οι δύο παραπάνω ζώνες στραγγίζουν προς τη χαμηλότερη ζώνη λόγω βαρυτικών δυνάμεων, εμποδίζοντας την αύξηση της θερμοκρασίας σε αυτή. Η εξάρτηση της θερμοκρασία με την απόσταση από την επιφάνεια δικαιολογείται από την αδυναμία του σωρού να συμπεριφερθεί σαν ομογενοποιημένο υλικό. Ανάλογα με το βάθος από την επιφάνεια κυριαρχεί διαφορετική κατάσταση και συνεπώς και άλλο θερμοκρασιακό εύρος.

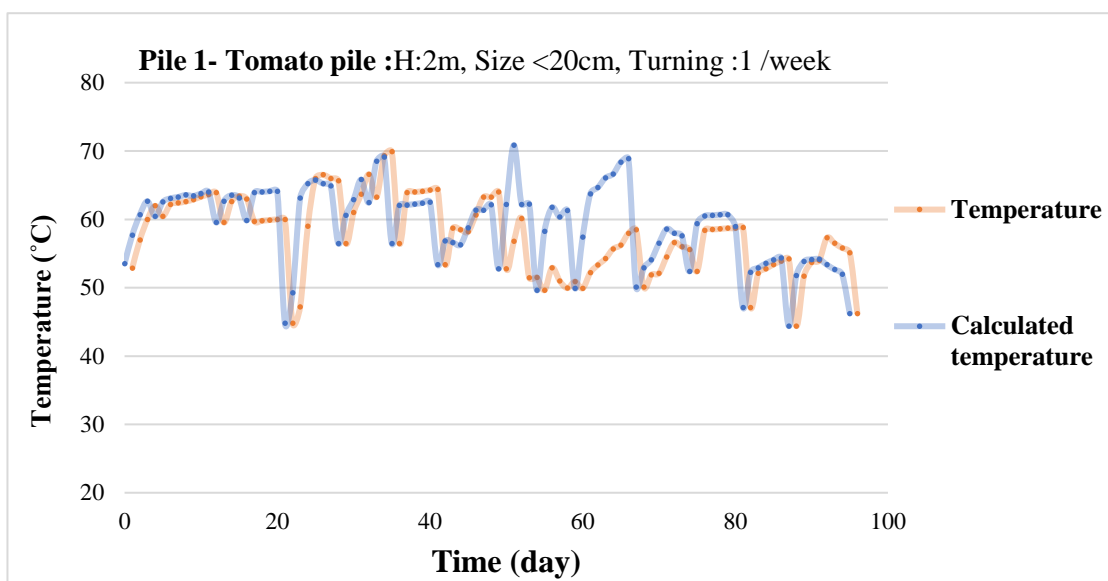


Εικόνα 19-Θερμοκρασία τομής κατά την διεργασία

Παρακάτω διαγράμματα εντοπίζονται τα διαγράμματα μέσης θερμοκρασίας των σωρών με τις δύο μεθόδους υπολογισμού. Η θερμοκρασία από την μέτρηση από την επιφάνεια και η υπολογισμένη θερμοκρασία συμπίπτουν για πολλές ημερομηνίες. Ιδίως στο Διαγράμματα 5, 8, 9 για τους σωρού No9, No5, No8 οι μέσες θερμοκρασίες ταυτίζονται των δύο μεθόδων ταυτίζονται. Ενώ για τους σωρούς No1, No4, No3 στα Διαγράμματα 1, 4, 3 η μέση θερμοκρασία διαφοροποιείται.

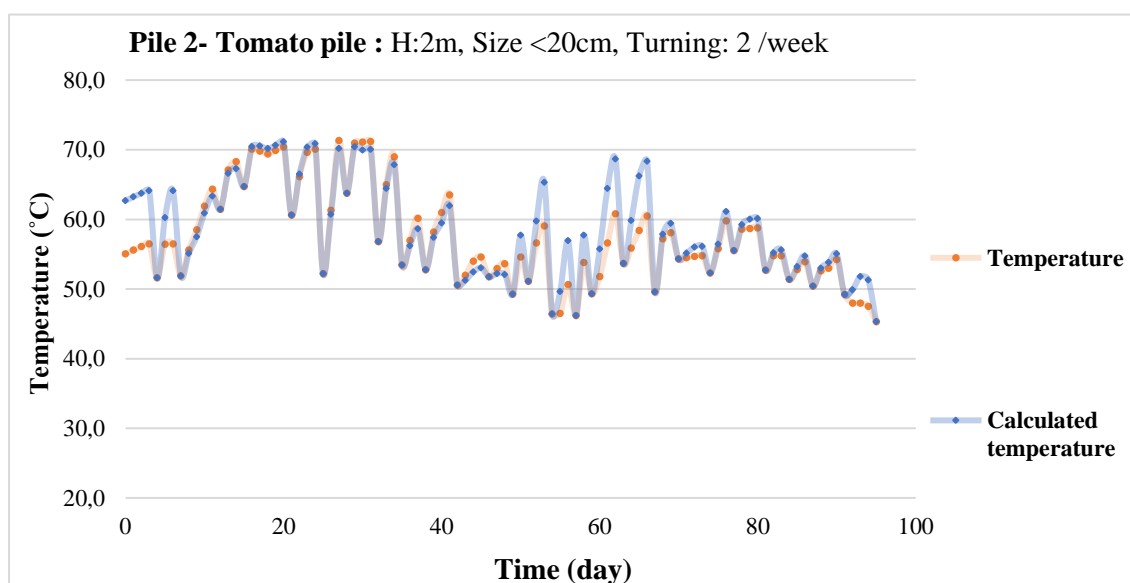
Στο Διάγραμμα 1 περιγράφονται οι μέσες θερμοκρασίες με τις δυο μεθόδους υπολογισμού. Η μέση θερμοκρασία για την μέτρηση από την επιφάνεια είναι μικρότερη από ότι την μέση θερμοκρασία από την τομή. Το μεγάλο μέγεθος σωματιδίων του σωρού No1 φαίνεται να συνέβαλε στον ανεπαρκή αερισμό του σωρού. Παρατηρήθηκε πως στους σωρούς με μεγαλύτερα σωματίδια, υπήρξε ανομοιογένεια υγρασίας, ιδίως στο κέντρο σωρού. Το υλικό στα σημεία αυτά, είχε συμπιεστεί με αποτέλεσμα, στρώματα στο εσωτερικού του σωρού να δέχονται ανεπαρκή αερισμό. Γενικότερα, ο

αερισμός λειτουργεί σαν παράγοντας ελέγχου για την θερμοκρασία. Οι αυξομειώσεις στην θερμοκρασία στα διαγράμματα αντιπροσωπεύουν τις μέρες ανάδευσης.



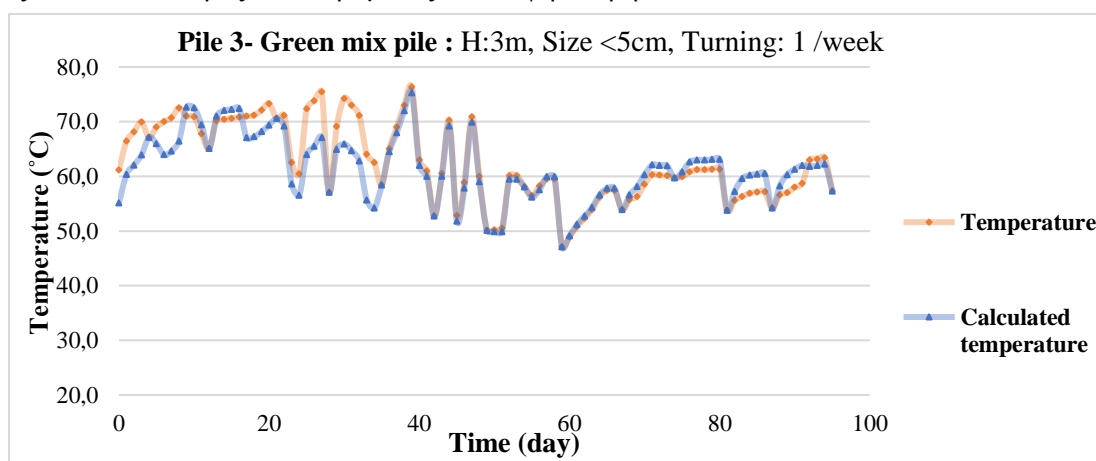
Διάγραμμα 1-Παρακολούθηση θερμοκρασίας σωρού Νο1

Στο Διάγραμμα 2 η μέση θερμοκρασία από την μέθοδο στην τομή είναι έντονα αυξημένη. Όπως και στον όμοιο σωρό Νο1, το μέγεθος σωματιδίων στον σωρό Νο2 είναι μεγάλο. Επιπλέον, εντονότερος αερισμός έχει ως αποτέλεσμα την πτώση της υγρασίας. Συνεπώς η θερμοκρασία στο εσωτερικό του σωρού παραμένει υψηλή λόγω της εξαφάνισης των ψυχρών ζωνών.



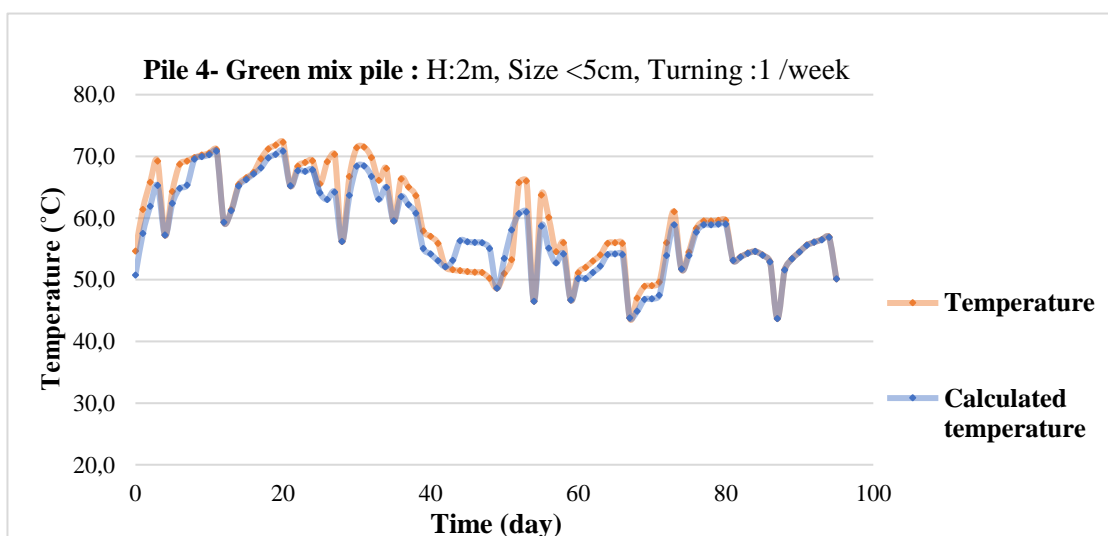
Διάγραμμα 2-Παρακολούθηση θερμοκρασίας Σωρού Νο2

Στο Διάγραμμα 3 η μέση θερμοκρασία από την μέθοδο στην επιφάνεια είναι υψηλότερη από την μέθοδο στην τομή. Οι θερμοκρασίες αφορούν σωρό πράσινης μίζης Νο3 με υψηλό ύψος, μικρό μέγεθος σωματιδίων και ήπια ανάδευση. Το μικρό μέγεθος σωματιδίων συμβάλει στον καλύτερο αερισμό καθώς το υλικό είναι ομοιογενές. Σε παρακάτω διάγραμμα υγρασίας παρατηρείται πως η υγρασία τις πρώτες 3 εβδομάδες διατηρείται υψηλή. Η θερμοκρασία από την μέθοδο στην τομή υπολογίζεται μικρότερη από την μέθοδο στην επιφάνεια. Η περιεχόμενη υγρασία σε συνδυασμό με το μικρό μέγεθος σωματιδίων συμβάλει στην ρύθμιση της θερμοκρασία στο εσωτερικό του σωρού. Έπειτα από τις 30 ημέρες, η περιεχόμενη υγρασία δεν διατηρείται και η θερμοκρασία από την τομή αρχικά ταυτίζεται και στο πέρας του πειράματος είναι υψηλότερη.



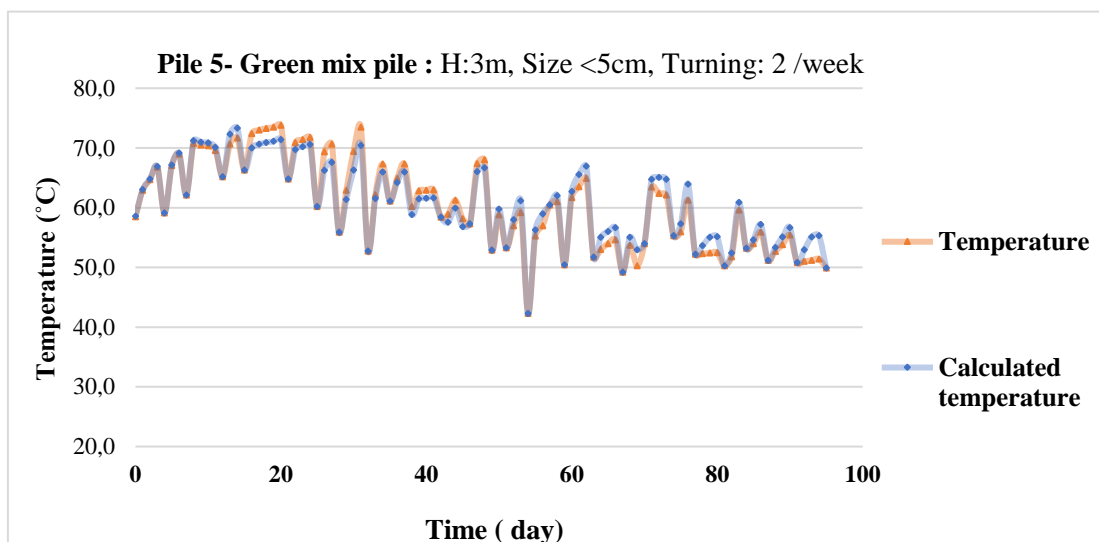
Διάγραμμα 3-Παρακολούθηση θερμοκρασίας Σωρού Νο3

Στο Διάγραμμα 4 εντοπίζεται η θερμοκρασία για σωρό πράσινης μίζης Νο4, με χαμηλό ύψος, μικρό μέγεθος σωματιδίων και ήπια ανάδευση. Η μέση θερμοκρασία από την τομή προκύπτει χαμηλότερη από την θερμοκρασία στην επιφάνεια. Όπως και για τον σωρό Νο3 η θερμοκρασία υπολογίζεται χαμηλότερη στο εσωτερικού του σωρού από ότι στα 80 εκατοστά από την επιφάνεια. Στο πέρας του πειράματος, το υλικό είναι πιο ομοιογενοποιημένο και οι μικροβιακές δραστηριότητες επιβραδύνονται και οι ζώνες αποκτούν κοινή θερμοκρασία.



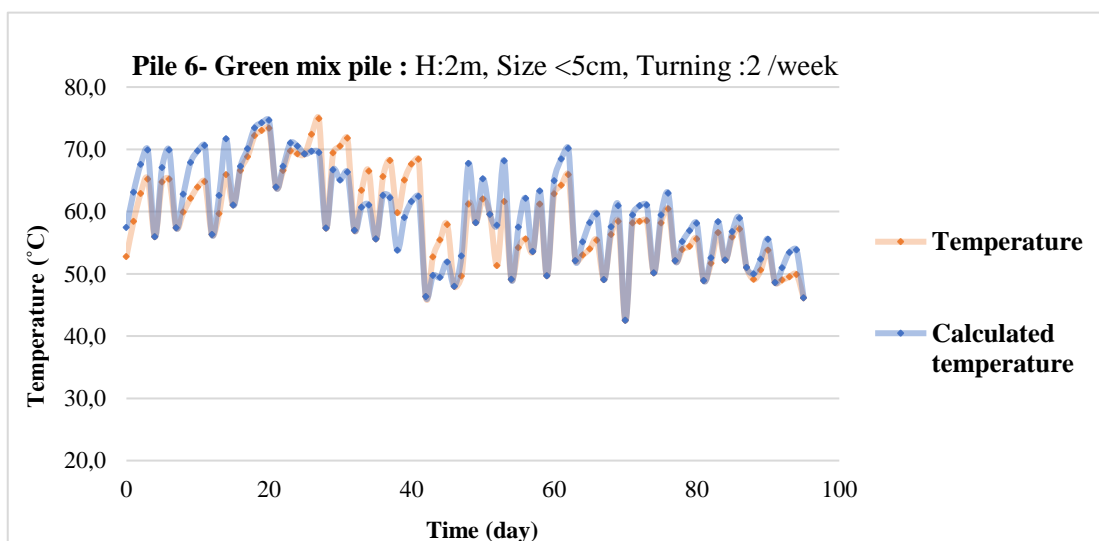
Διάγραμμα 4-Παρακολούθηση θερμοκρασίας Σωρού Νο4

Στο Διάγραμμα 5 αποτυπώνεται η θερμοκρασία για σωρό Νο5, υψηλού σωρού πράσινης μίξης, μικρού μεγέθους σωματιδίων και έντονης ανάδευσης. Ο σωρός Νο5 είναι όμοιος με τον Νο3, που η μέση θερμοκρασία του περιγράφεται από το Διάγραμμα 3. Οι σωροί διαφέρουν στην ανάδευση. Κατά την εντονότερη ανάδευση μέρος της υγρασίας χάνεται, με αποτέλεσμα οι μέσες θερμοκρασίες από τις δύο μεθόδους να μην παρουσιάζουν σημαντική διαφορά.



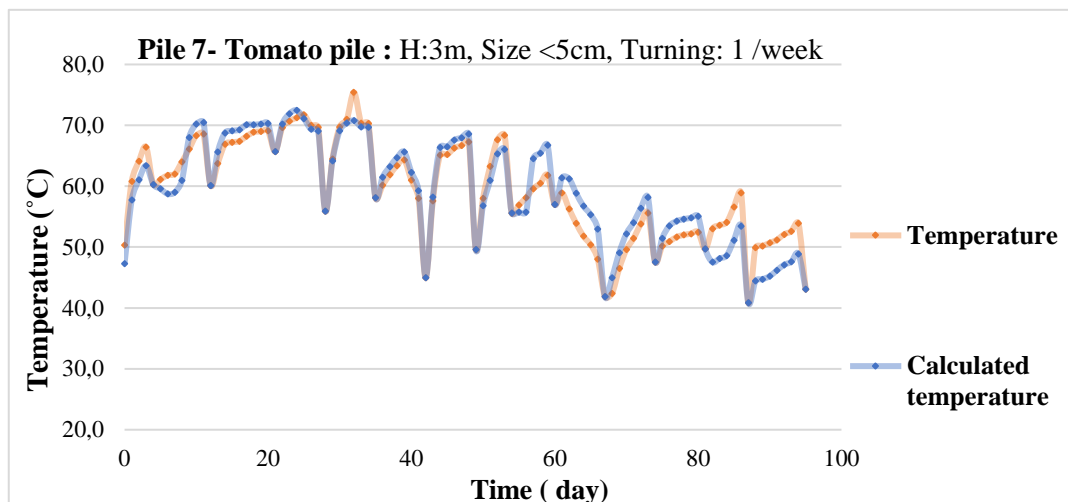
Διάγραμμα 5-Παρακολούθηση θερμοκρασίας Σωρού Νο5

Στο Διάγραμμα 6 περιγράφεται η μέση θερμοκρασία για τον σωρό Νο6, πράσινης μίξης, μικρού μεγέθους και έντονης ανάδευσης. Ο σωρός Νο6 είναι όμοιος με τον σωρό Νο4 αλλά με εντονότερη ανάδευση. Αξίζει να σημειωθεί πως έπειτα από τις 60 ημέρες ο σωρός Νο6 εμφανίζει μικρότερη υγρασία από τον σωρό Νο4. Θα μπορούσε να είναι το αίτιο που μέση υπολογιζόμενη θερμοκρασία στην τομή να είναι αυξημένη.



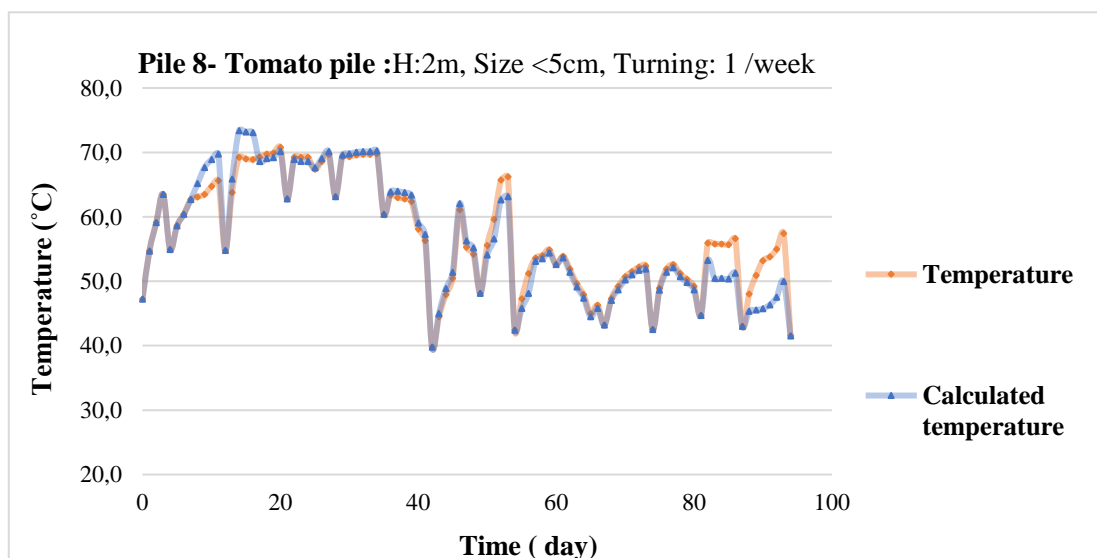
Διάγραμμα 6-Παρακολούθηση θερμοκρασίας Σωρού Νο6

Στο Διάγραμμα 7 για τον σωρό Νο7, με μικρό μέγεθος σωματιδίων και υψηλό ύψος, η θερμοκρασία της τομής είναι ψυχρότερη από την μέση θερμοκρασία στην ζώνη των 80 εκατοστών από την επιφάνεια. Η διαφορά των μέσων θερμοκρασιών είναι μικρή, σημαντική όμως για την κατανόηση της διεργασίας και του τρόπου συμπεριφοράς του υλικού.



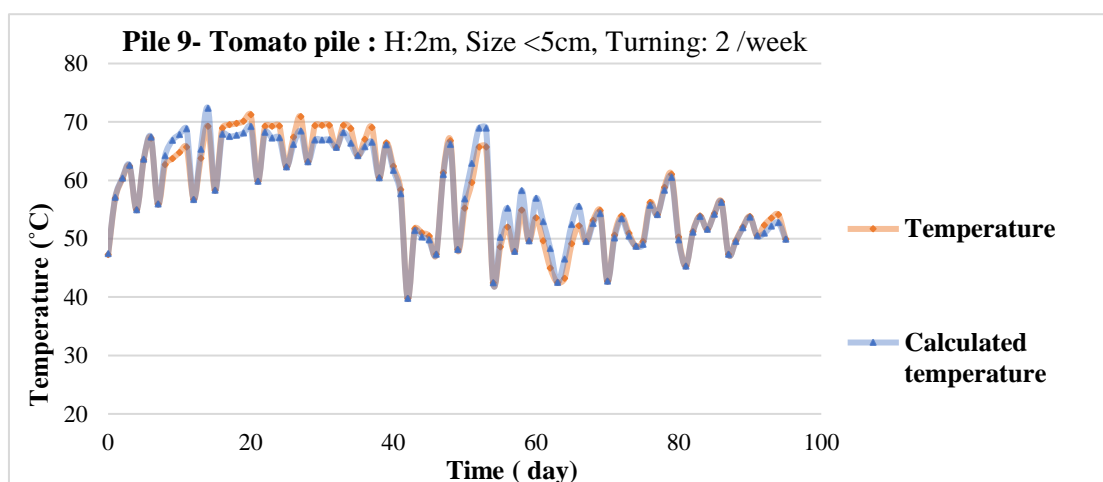
Διάγραμμα 7-Παρακολούθηση θερμοκρασίας Σωρού Νο7

Όμοιος με τον παραπάνω σωρό Νο7 είναι ο σωρός Νο8, όμως με μικρότερο ύψος. Η μέση θερμοκρασία για τις δύο μεθόδους βρίσκεται στο Διάγραμμα 8. Με την μέθοδο των ζωνών προκύπτει όμοια και ελαφρώς χαμηλότερη προς το πέρας της διεργασίας.



Διάγραμμα 8-Παρακολούθηση θερμοκρασίας Σωρού Νο8

Τέλος, στο Διάγραμμα 9 παρουσιάζονται οι μέσες θερμοκρασίες για σωρό τομάτας Νο9, χαμηλού ύψους, μικρού μεγέθους σωματιδίων και έντονης ανάδευσης. Ο σωρός αυτός είναι όμοιος με τον σωρό Νο8 αλλά με εντονότερη ανάδευση. Όπως και σε προηγούμενα διαγράμματα για σωρούς με έντονη ανάδευση, λόγω της μικρής παρουσίας υγρασίας, οι ψυχρές ζώνες θερμαίνονται. Με αποτέλεσμα, η θερμοκρασία από την μέθοδο τομής να προκύπτει όμοια ή υψηλότερη με θερμοκρασία από την μέθοδο από τη επιφάνεια.



Διάγραμμα 9-Παρακολούθηση θερμοκρασίας Σωρού Νο9

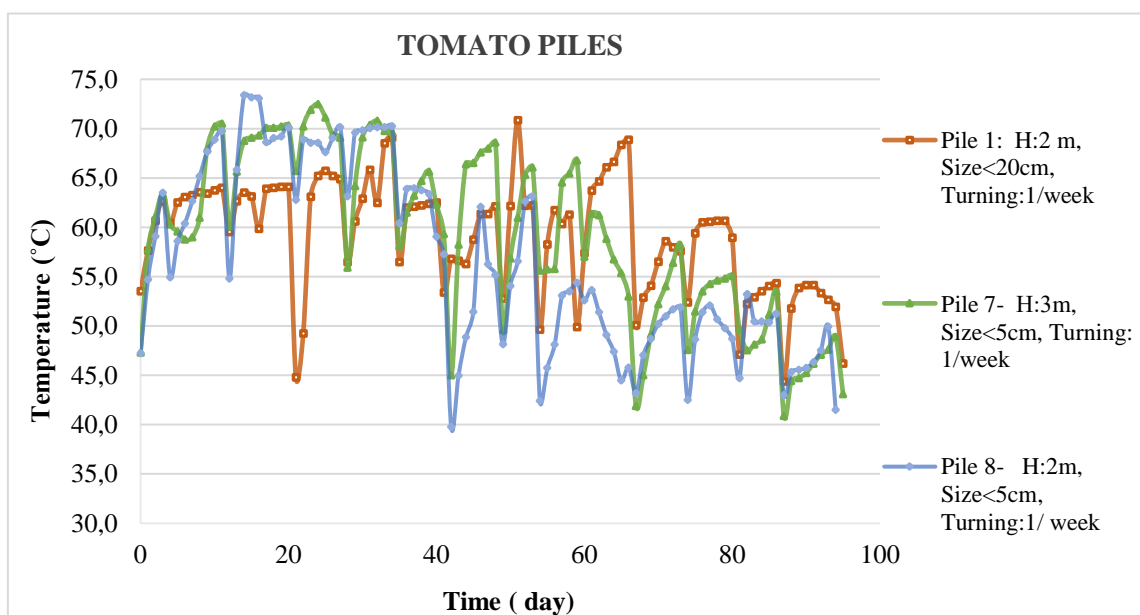
Κατά την παρακολούθηση της θερμοκρασίας στην τομή παρατηρείται πως το υλικό σχηματίζει ζώνες διαφορετικής θερμοκρασίας. Η υγρασία συγκεντρώνεται λόγω βαρύτητας στο κάτω μέρος του σωρού. Με αποτέλεσμα οι κάτω ζώνες να ψύχονται. Η περιεχόμενη υγρασία στον σωρό δημιουργεί της ψυχρές ζώνες με αποτέλεσμα η μέση θερμοκρασία από την μέθοδο της τομής ενδέχεται να προκύπτει ψυχρότερη. Ωστόσο το ποσοστό υγρασίας που λειτούργησε η διεργασία ήταν ανεπαρκής (< 25 % ξηρή μάζα) και δεν διατηρήθηκαν οι ψυχρές ζώνες. Θεωρείται πως κατά την αύξηση του ποσοστού υγρασίας η διαφοροποίηση στις δύο μεθόδους θα είναι εντονότερες και αξίζει να μελετηθεί στο μέλλον.

4.1.1 Συγκεντρωτικά διαγράμματα θερμοκρασίας

Χρησιμοποιώντας την οδηγία μέτρησης θερμοκρασίας [ΕΠΠΕΡΑ,2014], σχεδιάζονται τα παρακάτω συγκεντρωτικά διαγράμματα μέσης θερμοκρασίας για τους σωρούς τομάτας. Τα διαγράμματα χωρίζονται ανάλογα με την ένταση αερισμού. Για τον εντοπισμό της επίδρασης ύψους και μεγέθους σωματιδίων στην θερμοκρασία.

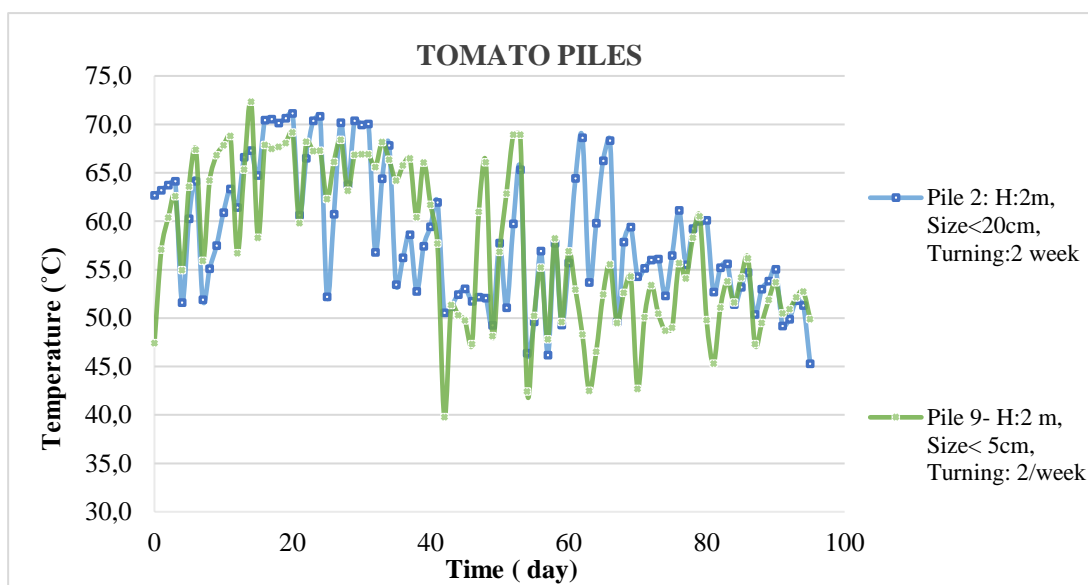
Στο Διάγραμμα 10 περιγράφεται η διακύμανση της θερμοκρασίας σε σωρούς τομάτας με ήπια ανάδευση (1/week). Αρχικά, ο σωρός Νο7 με το μεγαλύτερο ύψος κυμαίνεται σε υψηλές θερμοκρασίες. Ο όγκος του σωρού αυτού, είναι μεγαλύτερος από τους σωρούς με το μικρότερο ύψος με αποτέλεσμα ο αερισμός να είναι λιγότερο αποτελεσματικός. Δεδομένου πως ο αερισμός είναι κατασταλτικός παράγοντας άνοδου της θερμοκρασίας [Rynks,2022], ο ανεπαρκής αερισμός του Νο7 αποτυπώνεται ως άνοδο στην θερμοκρασία. Ο σωρός Νο8 κομποστοποιείται σε μικρότερες θερμοκρασίες και η θερμοκρασία ελαττώνεται γρηγορότερα. Εξαιτίας του χαμηλό ύψος αρά και μικρού όγκου επιτυγχάνεται αποτελεσματικός αερισμός. Παρατηρείται πτώση θερμοκρασίας γρηγορότερα από τους υπόλοιπους σωρούς ένδειξη πως η αποδόμηση πραγματοποιείται γρηγορότερα.

Η θερμοκρασία του Νο1 παρουσιάζει άνοδο έπειτα από τις 20 πρώτες ημέρες. Στον σωρό αυτό επιβλήθηκε διαφορετικός θρυμματισμός και το μέγεθος σωματιδίων είναι μεγαλύτερο από τους υπόλοιπους σωρούς. Το μεγάλο μέγεθος σωματιδίων, έχει ως αποτέλεσμα την μικρή ενεργή επιφάνεια. Την επιφάνεια δηλαδή, που λειτουργεί η διάσπαση της οργανικής ουσίας από τους μικροοργανισμούς. Με αποτέλεσμα να καθυστερείτε η διεργασία και με αυτόν τον τρόπο δικαιολογείται η υψηλή θερμοκρασία έπειτα το πέρας των 60 ημερών.



Διάγραμμα 10-Θερμοκρασία σωρών τομάτας με ήπια ανάδευση

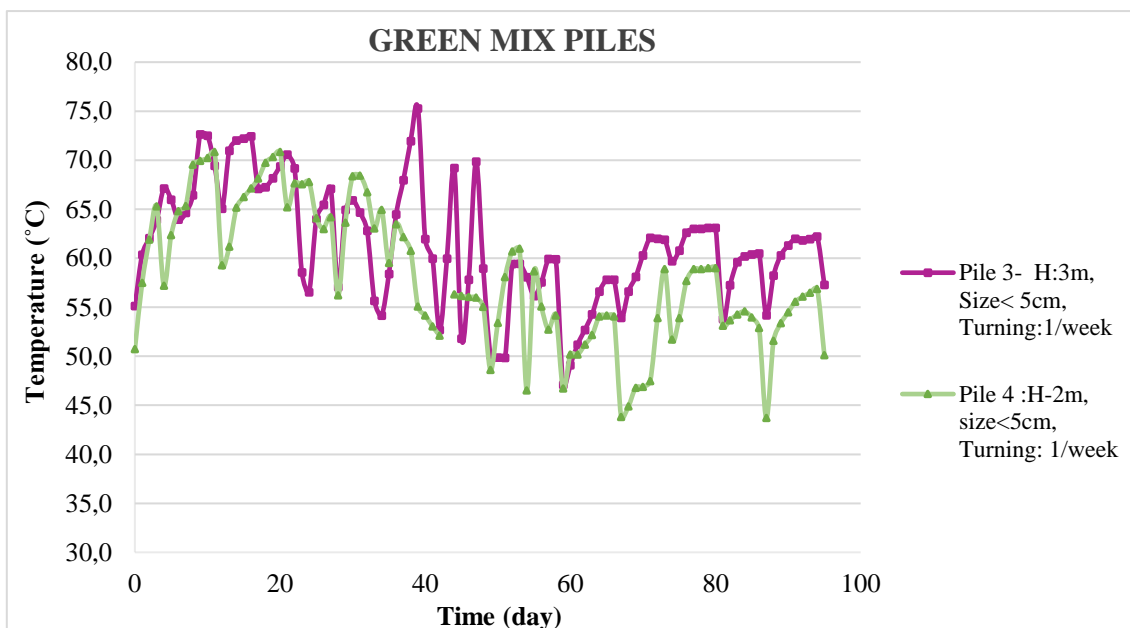
Όπως και στον αντίστοιχο σωρό Νο1, ο σωρός Νο2 διαθέτει μεγαλύτερο μέγεθος σωματιδίων. Στο Διάγραμμα 11 εντοπίζεται η θερμοκρασία για σωρούς με έντονο αερισμό. Είναι φανερό πως η θερμοκρασία παρουσιάζει άνοδο από τη πρώτη εβδομάδα και διατηρείται αυξημένη σε όλη την διεργασία. Ο έντονος αερισμός επιφέρει πτώση της υγρασίας, με αποτέλεσμα την αύξηση θερμοκρασίας. Η απότομη άνοδος και διατήρηση της θερμοκρασίας σε υψηλές τιμές δεν είναι επιθυμητές συνθήκες για την μικροβιακή κοινότητα [Nemet, 2201]. Καθώς αδρανοποιούνται τα ωφέλιμα μικρόβια και πραγματοποιείται μη αποτελεσματική αποδόμηση.



Διάγραμμα 11-Θερμοκρασία σωρών τομάτας με έντονη ανάδευση

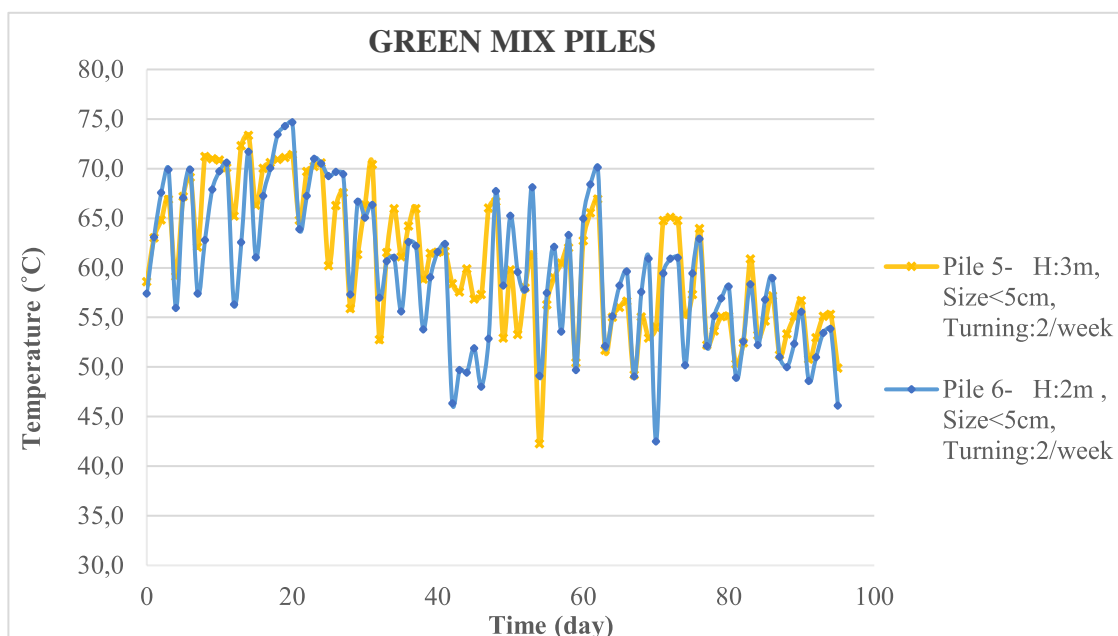
4.1.2 Συγκεντρωτικά διαγράμματα θερμοκρασίας για πράσινη μίξη.

Στο παρακάτω Διάγραμμα 12 παρουσιάζονται οι μέσες θερμοκρασίες σωρών πράσινης μίξης με ήπια συχνότητα αερισμού. Γενικότερα, για τους σωρούς μίξης το θερμοκρασιακό εύρος είναι υψηλότερο. Οι παρατηρήσεις που εντοπίστηκαν στους σωρούς τομάτας, εντοπίζονται και για το υλικό πράσινης μίξης. Ο σωρός Νο3 με το μεγαλύτερο ύψος και συνεπώς τον μεγαλύτερο όγκο κυμαίνεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Επιπλέον, κατά την εργασία στο πεδίο, διαπιστώθηκε οσμή αμμωνίας από τον σωρό Νο3. Πιθανή ένδειξη παρουσίας αναερόβιων συνθηκών. Όσον αφορά τον σωρό Νο4, με το χαμηλότερο ύψος, η μέση θερμοκρασία κυμαίνεται σε μικρότερα εύρη. Σε σύγκριση με αντίστοιχο σωρό τομάτας Νο8 που η θερμοκρασία του περιγράφεται στο Διάγραμμα 10, η θερμοκρασία για το υλικό μίξης είναι υψηλότερη.



Διάγραμμα 13-Θερμοκρασία σωρών μίξης με ήπια ανάδευση

Για τους σωρούς πράσινης μίξης και έντονης ανάδευσης περιγράφεται η διακύμανση της μέσης θερμοκρασίας στο Διάγραμμα 13. Ο έντονος αερισμός και σε αυτήν την περίπτωση, έχει ως αποτέλεσμα την πτώση της υγρασίας που συνεπάγεται και την άνοδο της θερμοκρασίας. Στους πρώτους δύο μήνες η θερμοκρασία είναι υψηλή και ξεπερνά τους 65 ° C. Στο πέρας του πειράματος, η θερμοκρασία για τους σωρούς πράσινης μίξης με την έντονη ανάδευση ελαττώνεται σημαντικά.



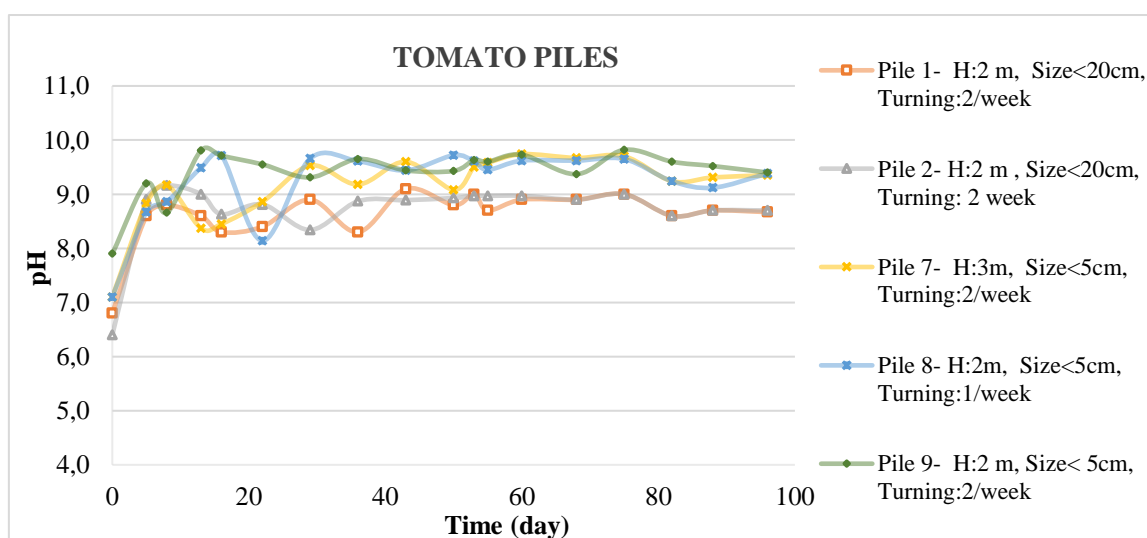
Διάγραμμα 12-Θερμοκρασία σωρών μίξης με έντονη ανάδευση

4.2 Φυσικοχημική ανάλυση

Κατά την διάρκεια της ενεργούς φάσης της κομποστοποίησης μελετήθηκαν οι φυσικοχημικές παράμετροι. Οι διαβαθμίσεις των παραμέτρων καθορίζουν την πρόοδο της διαδικασίας κομποστοποίησης [Scarlet, 2022]. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε εργαστήριο της εγκατάστασης έπειτα από δειγματοληψία. Τα δείγματα πάρθηκαν από δέκα τυχαία σημεία στον εκάστοτε σωρό έπειτα από την ανάδευση, όπου το υλικό ήταν ομογενοποιημένο. Το συλλεγμένο υλικό τοποθετήθηκε σε σακουλάκια δειγματοληψίας και αναδεύτηκε για την επιπλέον ομοιογενοποίησή του. Ύστερα, το υλικό από τον κάθε σωρό εξετάστηκε σε pH, αγωγιμότητα και υγρασία.

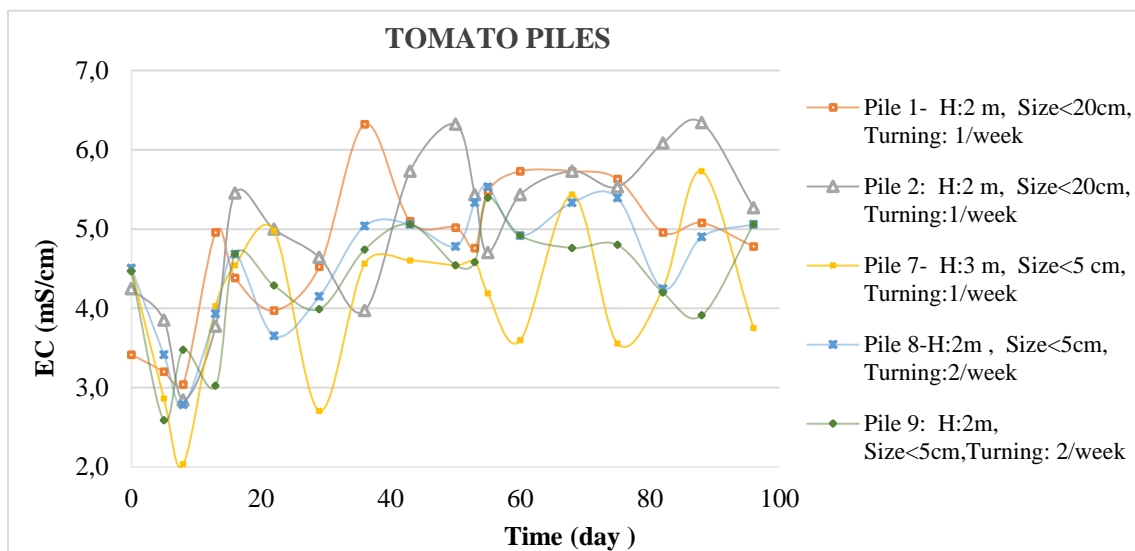
4.2.1 Φυσικοχημική ανάλυση σωρών τομάτας

Στο Διάγραμμα 14 απεικονίζεται η μεταβολή του pH κατά την κομποστοποίηση σε σωρούς τομάτας. Η διαβάθμιση του pH κατά την πορεία ευθύνεται από την διάσπαση της οργανικής ύλης και την υδρόλυση της αμμωνίας. Στα αρχικά στάδια της κομποστοποίησης το pH είναι όξινο, λόγω της απελευθέρωσης οξέων κατά την διάρκεια της αποσύνθεσης βιομάζας. Στην συνέχεια, καταναλώνονται τα οργανικά οξέα από τους μικροοργανισμούς με αποτέλεσμα την παραγωγή αζώτου αμμωνίας [Reizhen, 2023]. Οι σωροί με το μικρότερο μέγεθος σωματιδίων άλεσης No7, No8, No9 παρουσιάζουν κοινό pH (pH:9,4). Ενώ, για τους σωρούς No1, No2 με το μεγαλύτερο μέγεθος σωματιδίων προκύπτει τελικό προϊόν με μικρότερο pH (pH:8,7). Η διαφοροποίηση που παρατηρείται που μπορεί να δικαιολογηθεί από τον ανεπαρκή αερισμό των σωρών. Πιο ειδικά, το μεγαλύτερο μέγεθος δυσχεραίνει τον ομοιόμορφο αερισμό με αποτέλεσμα την παρουσία αναερόβιων βακτηριδίων. Τα ανόργανα βακτήρια τα οποία επιβιώνουν και χωρίς την παρουσία αέρα συνεισφέρουν στην παραγωγή οργανικών οξέων τα οποία ρίχνουν τις τιμές του pH [Scarlet, 2022]



Διάγραμμα 14-pH σε σωρούς τομάτας

Στο Διάγραμμα 15 παρουσιάζονται οι μετρήσεις της ηλεκτρικής αγωγιμότητας κατά την διάρκεια της διεργασίας στους σωρούς τομάτας. Η αγωγιμότητα δηλώνει την ποσότητα του τελικού υλικού που θα εφαρμοστεί ανά στρέμμα. Ειδικότερα, η υψηλή τιμή ηλεκτρικής αγωγιμότητας δεν εκδηλώνει πρόβλημα στη διαδικασία αλλά απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή στην εφαρμογή [ΕΠΠΕΡΑ,2014].

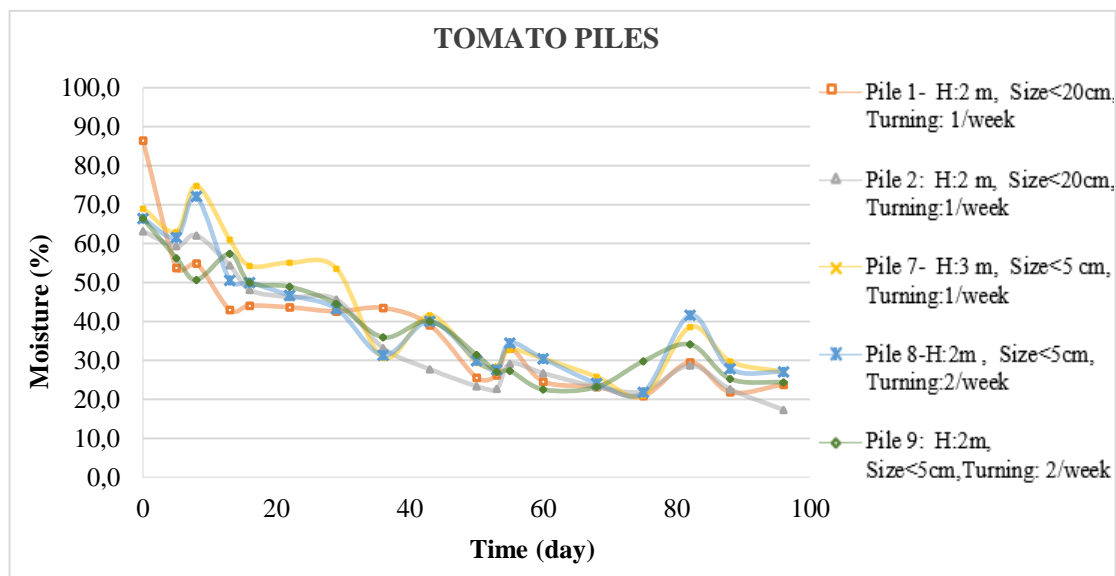


Διάγραμμα 15 – Αγωγιμότητα σε σωρούς τομάτας

Ακόμα οι μετρήσεις αγωγιμότητας παρουσίασαν έντονες διαβαθμίσεις κατά την διάρκεια του πειράματος. Στο τελικό προϊόν, για τους περισσότερους σωρούς τομάτας No1, No2, No8, No9 η αγωγιμότητά βρέθηκε 5 mS/cm. Ενώ, για τον σωρό No7 μετρήθηκε αγωγιμότητα στο 3,75 mS/cm .Από περαιτέρω αναλύσεις δειγμάτων της εγκατάστασης παρατηρήθηκε πως το υλικό είναι πλούσιο σε ιόντα καλίου $[K^+]$. Τα ιόντα καλίου είναι φορείς ηλεκτρικού φορτίου που επιτρέπουν την μεταφορά φορτίων, συμβάλλοντας στην άνοδο της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του υλικού. Η υψηλή αγωγιμότητα, δεν υποβιβάζει την ποιότητα του παραγόμενου προϊόντος αλλά ορίζει την δοσολογία του ανά στρέμμα [Μάνιος, 2009].

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενα κεφάλαια η υγρασία αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την επιτυχημένη κομποστοποίηση. Στο Διάγραμμα 16 αποτυπώνονται οι μετρήσεις υγρασίας του κάθε σωρού τομάτας, ως προς τον χρόνο. Η υγρασία κατά την διάρκεια της κομποστοποίησης ελαττώνεται. Η αύξηση της υγρασίας προκύπτει κυρίως από πότισμα των σωρών (Day: 43, 55, 83), ενώ ακόμα μικρή ποσότητα νερού προστέθηκε από ελαφριές βροχοπτώσεις . Παρατηρείται πτώση υγρασίας στους σωρούς με την εντονότερη ανάδευση No2, No9. Κατά την ανάδευση του υλικού, μέρους της περιεχομένης υγρασίας χάνεται κατά επαφή με τον αέρα. Η μικρότερη υγρασία εντοπίστηκε από τον σωρό No2 με το μεγαλύτερο μέγεθος σωματιδίων. Με το μεγαλύτερο μέγεθος σωματιδίων

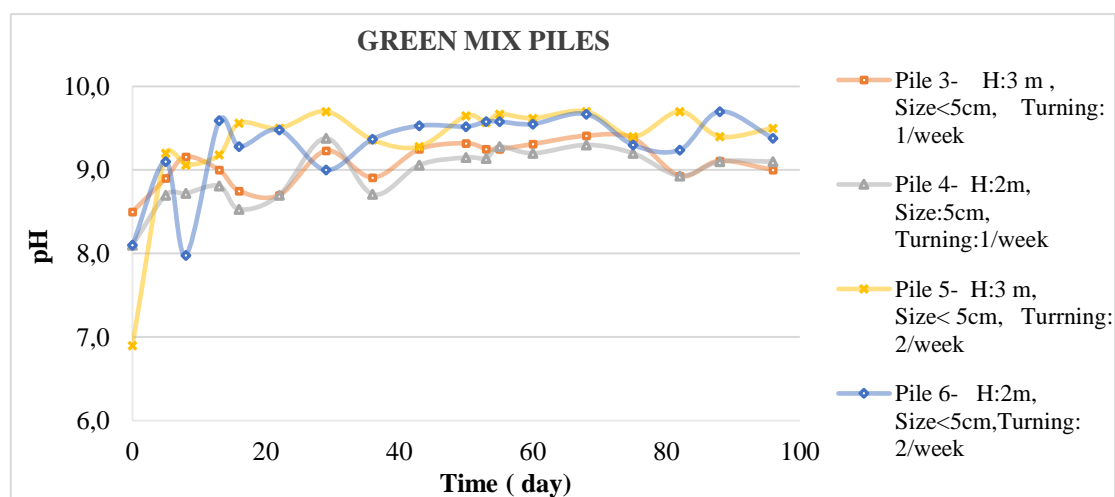
άλεσης δημιουργούνται μεγαλύτεροι δίοδοι αέρα, χωρίς απαραίτητα να υπονοείται ομοιόμορφος αερισμός. Με αποτέλεσμα, μέρος του υλικού να είναι ξηρό, ιδίως στις υψηλότερες ζώνες.



Διάγραμμα 16-Υγρασία σε σωρούς τομάτας

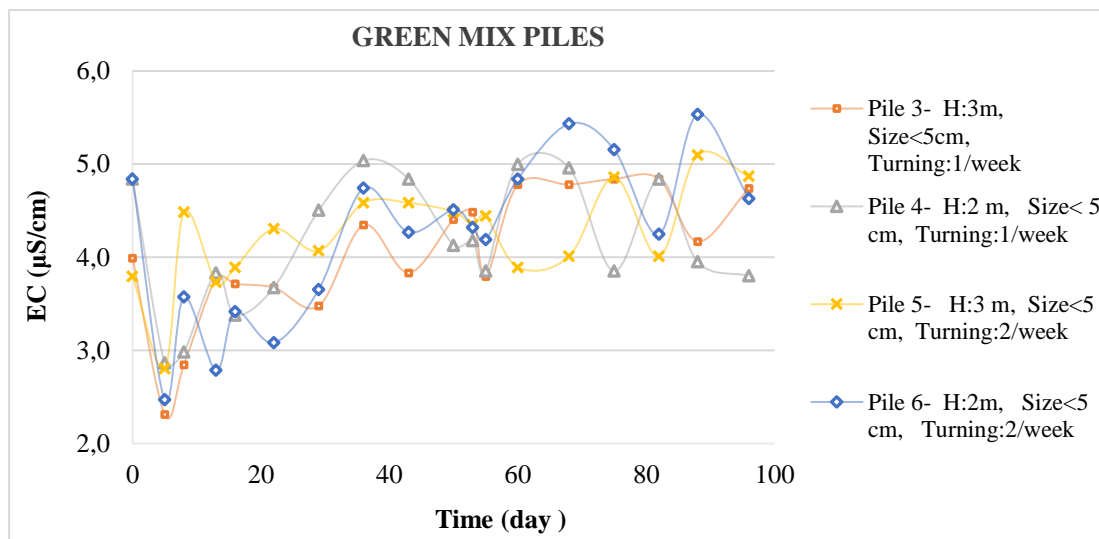
4.2.2 Φυσικοχημική ανάλυση σωρών πράσινης μίξης.

Επιπρόσθετα, παρακολούθηθηκαν οι φυσικοχημικοί παράμετροι για τους σωρούς πράσινης μίξης. Στο Διάγραμμα 17 αποτυπώνεται η μεταβολή του pH κατά την κομποστοποίηση στους σωρούς πράσινης μίξης. Η μεταβολή του pH κατά την διεργασία είναι όμοια και με τους σωρούς τομάτας. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η τιμή του pH αναμένεται να πέσει κατά έπειτα σταθεροποιείται στο 9. Οι σωροί πράσινης μίξης, Νο4, Νο5, με την υψηλότερη ανάδευση έχουν ελαφρώς πιο βασικότερο pH από ότι τους σωρούς με την ηπιότερη ανάδευση. Ενδεχομένως, ο αερισμός να υπήρξε ανεπαρκής με αποτέλεσμα την δράση αναερόβιων βακτηριδίων [Scarlet et al, 2022].



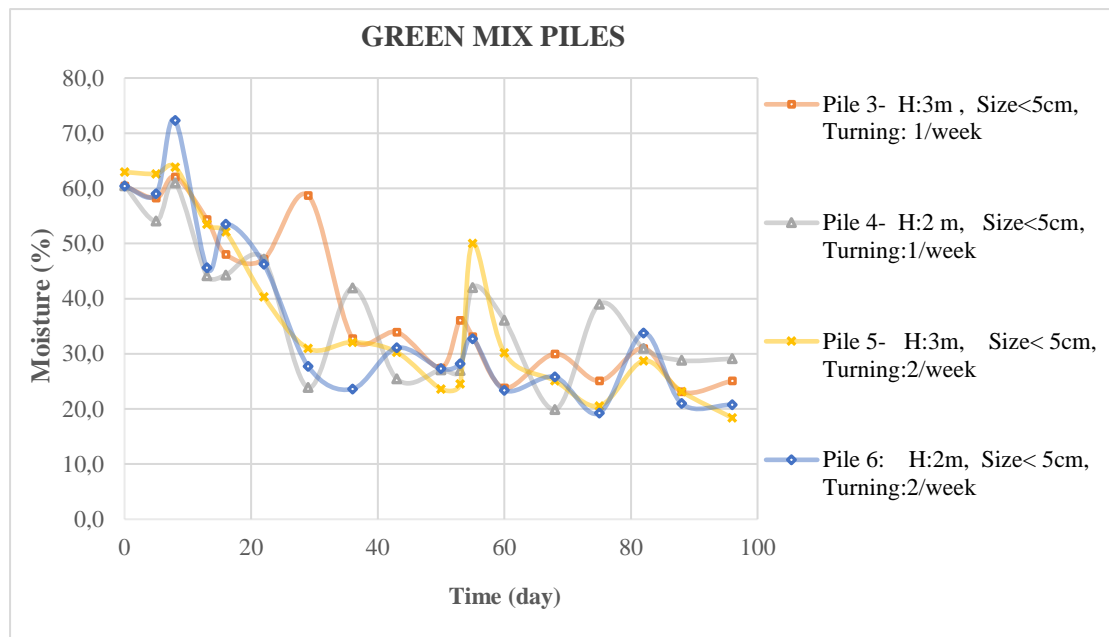
Διάγραμμα 17 – pH σε σωρούς πράσινης μίξης

Στο Διάγραμμα 18 παρουσιάζεται η μεταβολή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας κατά την διεργασία της κομποστοποίησης. Συγκρίνοντας το Διάγραμμα 15 παρατηρείται πως η ηλεκτρική αγωγιμότητα για τους πράσινους σωρούς έχει σταθερότερη διακύμανση από ότι για τους σωρούς τομάτας. Για τον προσδιορισμό του αίτιου της παραπάνω παρατήρησης, απαιτούνται χημικές αναλύσεις ως προς τα ιόντα και κατιόντα που περιέχονται στα δύο υλικά.



Διάγραμμα 16-Αγωγιμότητα σε σωρούς πράσινης μίξης

Τέλος στο Διάγραμμα 19 εμφανίζεται η μεταβολή της υγρασίας κατά την κομποστοποίηση σωρών πράσινης μίξης. Η περιεχόμενη αρχική υγρασία, για το υλικό μίξης είναι μικρότερη από ότι για το υλικό τομάτας. Η σχετική υγρασία για το πράσινο μέρος των φυτών είναι μικρότερη του 80% κατά μάζα. Σε αντίθεση με τους καρπούς τομάτας με σχετική υγρασία μεγαλύτερη από 90% κατά μάζα [Σάββας, 2016]. Ακόμα, εντοπίζεται ραγδαία πτώση της υγρασίας στους σωρούς με την εντονότερη ανάδευση. Εξετάζοντας τα διαγράμματα θερμοκρασίας και το διαγράμμά pH, προκύπτει πως είναι πιθανό οι σωροί με την ηπιότερη ανάδευση να παρουσίασαν αναερόβιες συνθήκες. Συνεπώς, ο έντονος αερισμός, ιδίως σε υψηλούς σωρούς (μεγάλου όγκου), είναι προτιμότερος με την προϋπόθεση διατήρησης υγρασίας 35-40% κατά μάζα. Με την προϋπόθεση αυτή υποπεύεται πως η κομποστοποίηση θα λειτουργήσει αποδοτικότερα, αφού το περιβάλλον θα είναι κατάλληλο για τους αερόβιους μικροοργανισμούς.

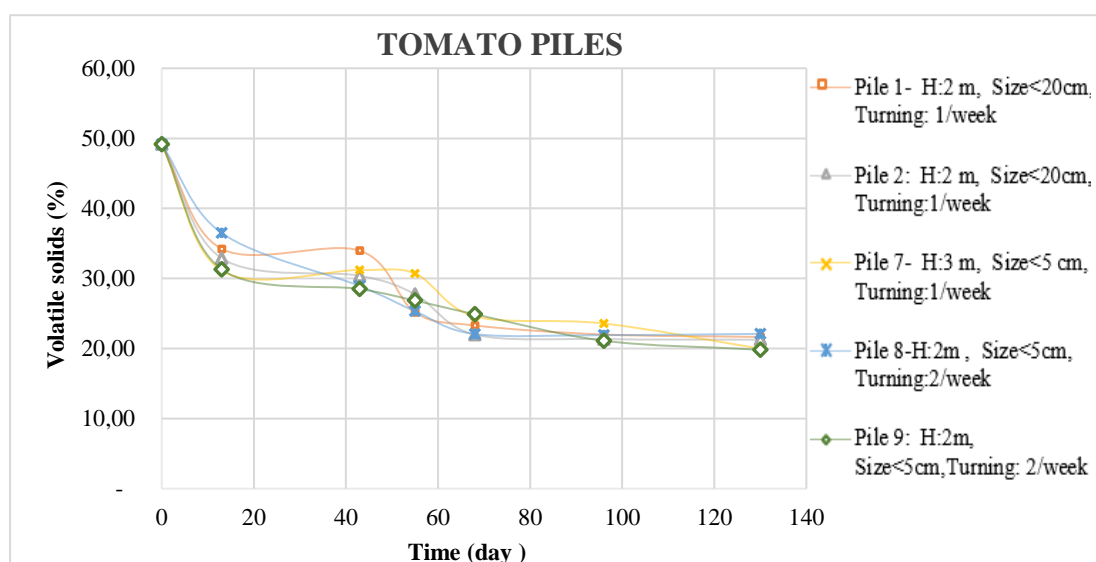


Διάγραμμα 17-Υγρασία σε σωρούς πράσινης μίξης

4.3 Χημική Ανάλυση

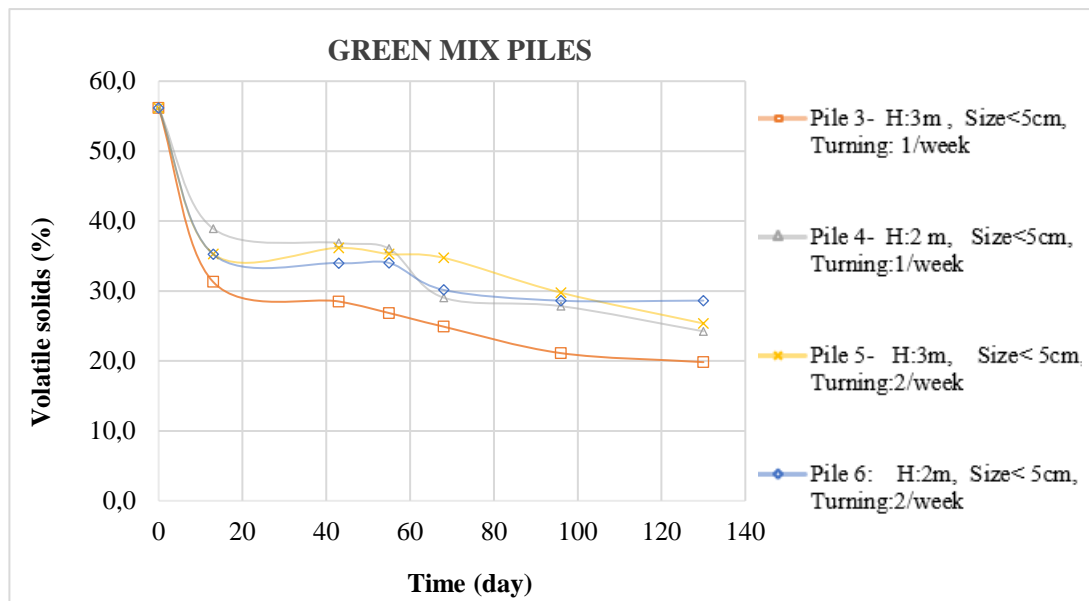
4.3.1 Μέτρηση πτητικών στερεών

Δείγματα των σωρών από επιλεγμένες ημέρες ξηράθηκαν και οδηγήθηκαν στο εργαστήριο του Πολυτεχνείου Κρήτης για περαιτέρω ανάλυση. Από τα συλλεγμένα δείγματα πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις πτητικών ουσιών, στοιχειακού άνθρακα και στοιχειακού αζώτου. Στα Διαγράμματα 20, 21 παρατηρείται η μεταβολή των πτητικών στερεών κατά την διεργασία της κομποστοποίησης. Τα πτητικά στερεά ορίζουν την οργανική ουσία που εξατμίζεται εύκολα σε υψηλές θερμοκρασίες [Yang, 2023]. Σύμφωνα με βιβλιογραφικά δεδομένα για τα φυτικά απόβλητα θερμοκηπίων [Σάκκας,2020], η οργανική ουσία στο αρχικό προϊόν αναμένεται 70% και άνω. Ωστόσο, η οργανική ουσία που εντοπίζεται για τους σωρούς τομάτας είναι 50% και για την μίξη 60%. Υποπτεύεται πως κατά τον θρυμματισμό και κατά την διάρκεια της διεργασίας το υλικό εμπλουτίστηκε με ανόργανο υλικό από το δάπεδο (σκόνη, χώμα, πέτρες). Με αποτέλεσμα, την ποσοστιαία μείωση της οργανικής ουσίας κατά μάζα.



Διάγραμμα 18-Πτητικών στερεών σε σωρούς τομάτας

Επιπλέον, παρατηρείται πως η οργανική ουσία σταθεροποιείται έπειτα από εβδομήντα ημέρες. Εφόσον σταθεροποιείται η οργανική ουσία, παύει να λειτουργεί η κομποστοποίηση και ορίζεται το τέλος της διεργασίας. Χαρακτηριστική δυσκολία στην κομποστοποίηση αποβλήτων θερμοκηπίων, αποτελεί η παρουσία φυτοφαρμάκων και παθογόνων μικροοργανισμών. Η απουσία τους, επιτυγχάνεται με κομποστοποίηση σε θερμές συνθήκες για συγκεκριμένο πλήθος ημερών [Χρόνη, 2017]. Ο χρόνος κομποστοποίησης θα μπορούσε να μειωθεί στις 70 ημέρες εφόσον έχουν εκπληρωθεί οι συνθήκες για τον έλεγχο ποιότητας [ΕΠΠΕΡΑ,2014]



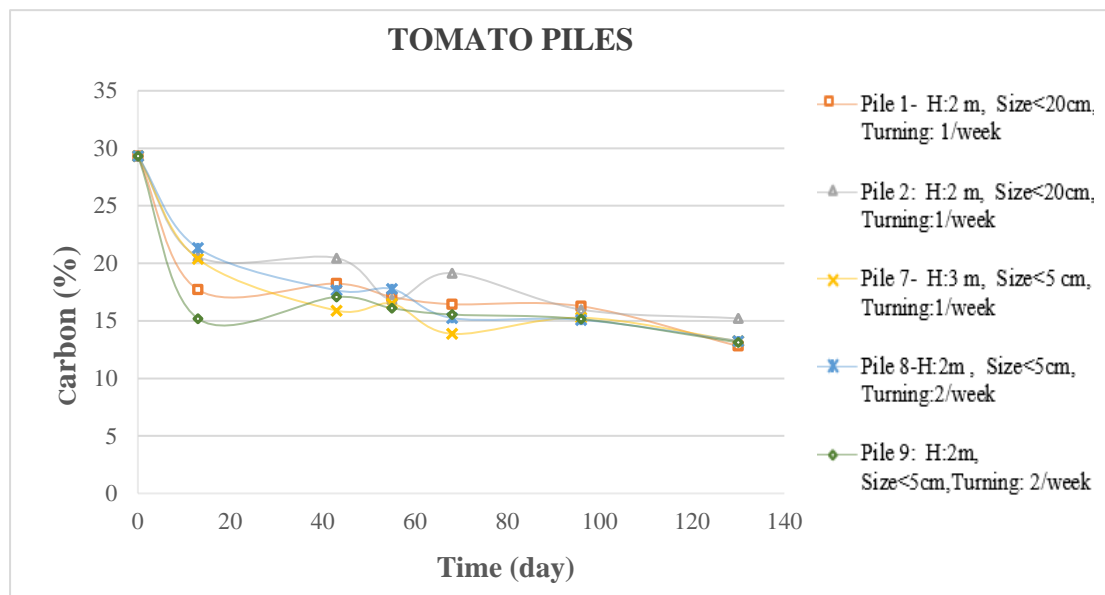
Διάγραμμα 19 -Πτητικών στερεών σε σωρούς πράσινης μίξης

4.3.2 Μέτρηση στοιχειακού άνθρακα

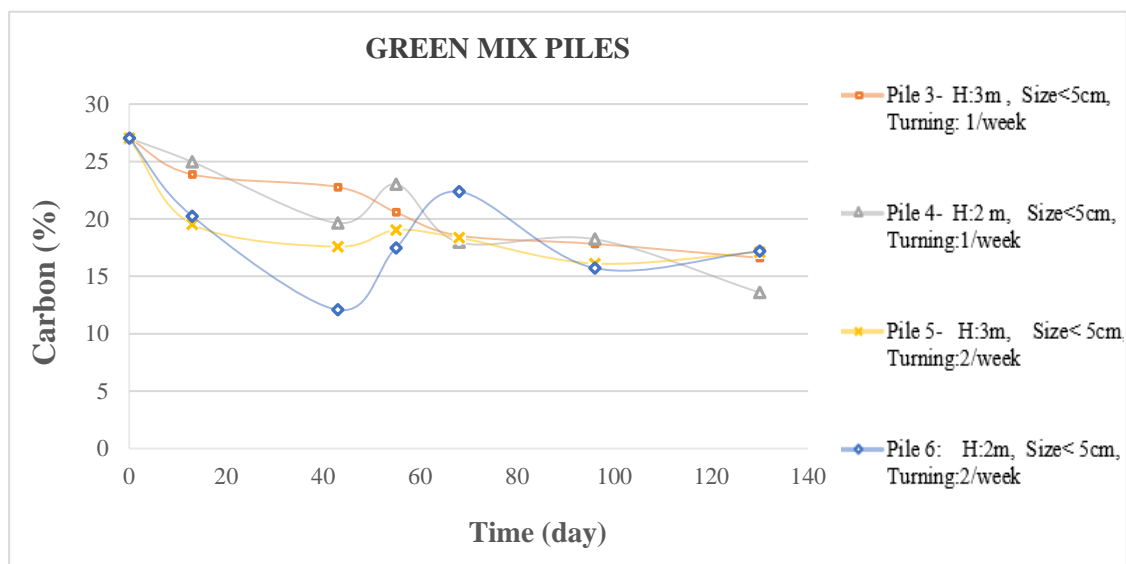
Στην συνέχεια, ξηρά δείγματα οδηγήθηκαν σε στοιχειακό αναλυτή για την μέτρηση του στοιχειακού άνθρακα και στοιχειακού αζώτου. Στα διαγράμματα 22 και 23 εντοπίζεται η περιεκτικότητα των σωρών σε στοιχειακό άνθρακα. Ο ρυθμός μείωσης του άνθρακα, είναι ανάλογος με την ελάττωση του ρυθμού της διεργασίας [Κομίλης,2023]. Ο στοιχειακός άνθρακας μειώνεται κατά την διάρκεια της κομποστοποίησης σε όλους τους σωρούς και σταθεροποιείται έπειτα την λήξη της διεργασίας.

Παρατηρώντας τα διαγράμματα προκύπτει πως ο στοιχειακός άνθρακας εμφανίζει αυξομειώσεις στις τιμές, για ορισμένες ημέρες. Η μείωση του ποσοστιαίου άνθρακα είναι αναμενόμενη και αποτελεί ένδειξη αποτελεσματικής αποσύνθεσης. Σε ορισμένες ημέρες εμφανίστηκαν αυξήσεις στον ποσοστιαίο άνθρακα. Τα δείγματα επανεξετάστηκαν και απορρίφθηκε το ενδεχόμενο σφάλματος. Ενδεχομένως, οι αυξήσεις στην περιεκτικότητα του άνθρακα να οφείλονται στην παρουσία ανόργανων ενώσεων που περιέχουν άνθρακα. Η επιμόλυνση από το δάπεδο συμβάλει στην προσθήκη ανόργανου άνθρακα στο υλικό. Το δάπεδο όπου διεξάχθηκε το πείραμα επιχωματώθηκε με αδρανή οδοποιίας (3Α) υψηλής περιεκτικότητας σε ασβεστίτης 97 % [Πετροχημική ανάλυση, (EN 196-21: 2005,mod.), ΛΑΤΟΜΕΙΑ ΙΕΡΑΠΕΤΡΑΣ, 2014]. Ο ασβεστίτης αποτελεί την κρυσταλλική μορφή ανθρακικού ασβέστιου (CaCO_3) και υφίσταται θερμική διάσπαση στον στοιχειακό αναλυτή. Το ανθρακικό ασβέστιο διασπάται θερμικά σε οξείδιο ασβεστίου (CaO) και διοξείδιο του άνθρακα (CO_2). Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται θερμόλυση και είναι εφικτό σε καύση απουσίας αέρα [Ψυχάρη, 2016], δηλαδή τις συνθήκες στοιχειακού αναλυτή.

Η μέτρηση στοιχειακού άνθρακα από τον στοιχειακό αναλυτή συνεκτίμα παραγόμενο διοξείδιο του άνθρακα από την θερμόλυση του ασβεστίτη. Με αποτέλεσμα να εμφανίζεται υψηλότερη μέτρηση ποσοστιαίου άνθρακα. Για την μέτρηση μονάχα οργανικού άνθρακα θα ήταν προτιμότερη η μέτρηση οργανικού άνθρακα με μέθοδο SW-846 9071B για εδαφικά υποστρώματα.



Διάγραμμα 20-Στοιχειακός άνθρακας σε σωρούς τομάτας



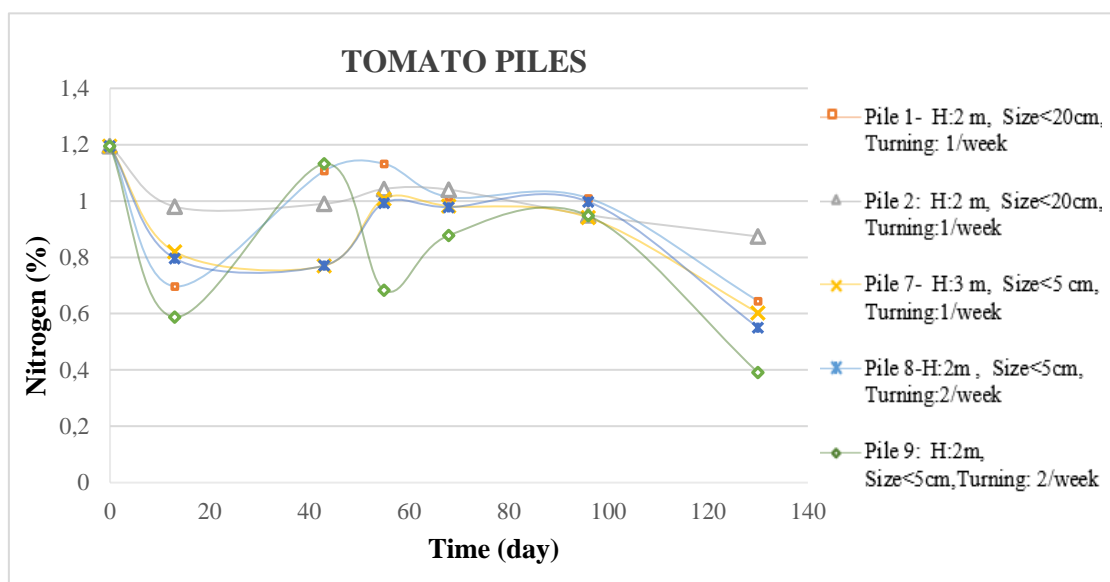
Διάγραμμα 21-Στοιχειακός άνθρακας σε σωρούς πράσινης μίξης

4.3.3 Μέτρηση στοιχειακού αζώτου

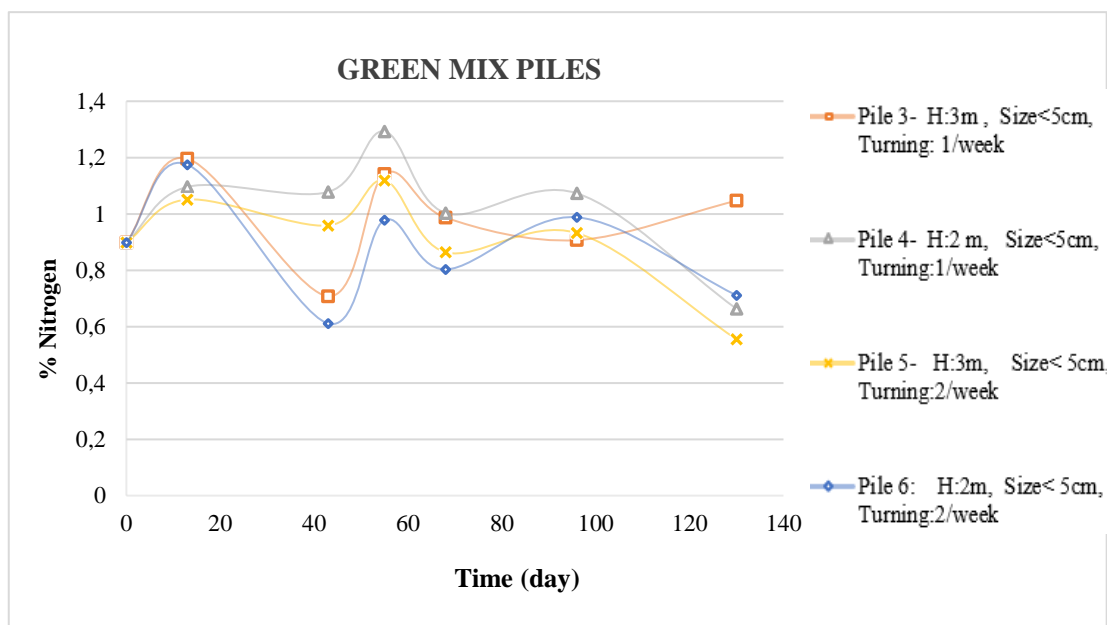
Κατά την κομποστοποίηση παράγεται φυσικά αμμωνία από την αποσύνθεση της οργανικής ύλης. Η αμμωνία αντιδρά με το νερό στον σωρό και παράγει αμμώνιο σταθερότερο από την αμμωνία που περιέχεται στο υδατικό μέρος. [Rynk,2022]. Σε υψηλές θερμοκρασίες και υπό το κατάλληλο pH, το αμμώνιο μετατρέπεται σε νιτρώδη και αέριο άζωτο που διαφεύγουν στην ατμόσφαιρα. Η διαφυγή της αμμωνίας εμφανίζεται εντονότερη παρουσία κατά αναερόβιες συνθήκες [Peizhen, 2023] και ενδέχεται να προκαλέσουν περιβαλλοντική μόλυνση.

Στα παρακάτω Διαγράμματα 24, 25 εμφανίζεται η περιεκτικότητα του αζώτου για τους σωρούς κατά την διάρκεια της κομποστοποίησης. Για τους σωρούς τομάτας και πράσινης μίξης η ενεργή φάση (έως 95 ημέρες) περιγράφεται από αυξομειώσεις στην περιεκτικότητα αζώτου. Οι μικροοργανισμοί συμβάλλουν στην μετατροπή του αζώτου και την μετέπειτα μείωση του. Η μικροβιακή δραστηριότητα είναι το κλειδί, για την συγκράτηση των ενώσεων αζώτου στους σωρούς και την παραγωγή προϊόντος υψηλής αξίας [Baskaran et al.2020]. Επιπλέον, έχει παρατηρηθεί πως ο έντονος αερισμός ενδέχεται να αυξήσει τις εκπομπές N_2O , NH_3 στην ατμόσφαιρα καθώς αναστέλλεται η μικροβιακή δραστηριότητα [Xiong,2017].

Έπειτα την φάση της ωρίμανσης (95 ημέρες έως και 130), παρατηρείται έντονη πτώση της περιεκτικότητας του αζώτου. Οι σωροί κατά την περίοδο της ωρίμανσης αφέθηκαν χωρίς αερισμό. Πιθανότατα με τις συνθήκες στο διάστημα αυτό, ευνοήθηκε η διαφυγή ενώσεων αζώτου [Peizhen, 2023].



Διάγραμμα 22-Στοιχειακό άζωτο σε σωρούς τομάτας



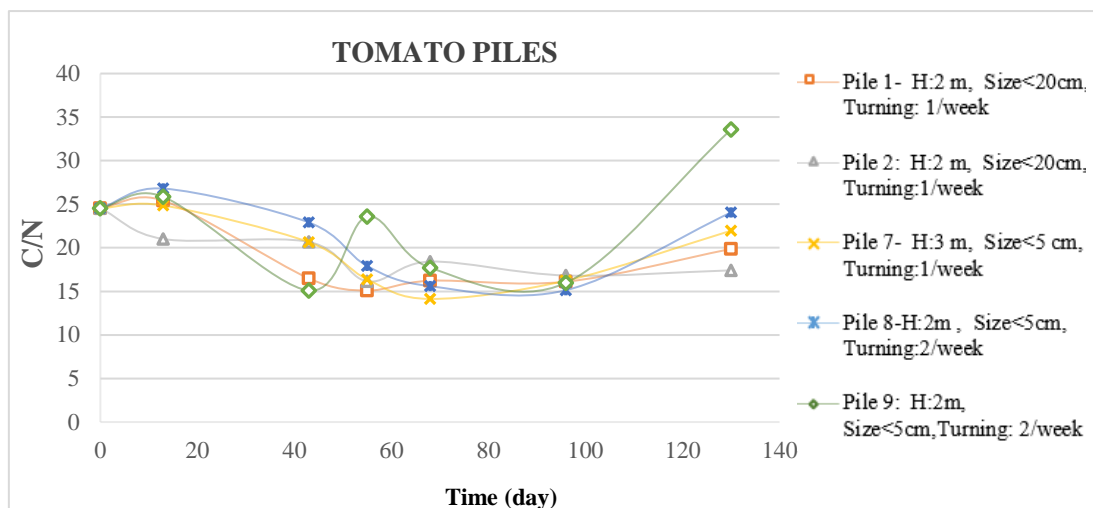
Διάγραμμα 23-Στοιχειακό άζωτο σε σωρούς πράσινης μίξης.

Για την διασφάλιση προϊόντος υψηλής ποιότητας, προτείνεται η διατήρηση αερόβιας μικροβιακής κοινότητας δηλαδή διατήρηση σε συνθήκες υψηλής υγρασίας και χαμηλής θερμοκρασίας. Οι ρόλοι των μικροβιακών ομάδων που εμπλέκονται στην μετατροπή του αζώτου δεν είναι επαρκώς κατανοητοί και θα μπορούσε να αποτελέσει αντικείμενο μελέτης στο μέλλον. Πρόσφατοι πειραματισμοί ερευνητών [Awasthi et al., 2020], με πρόσθετες φυσικές και χημικές διορθώσεις, ανέδειξαν πως η προσθήκη άνυδρου ξυλάνθρακα (biochar) μπορούν να συγκρατήσουν 67-70% της αμμωνίας.

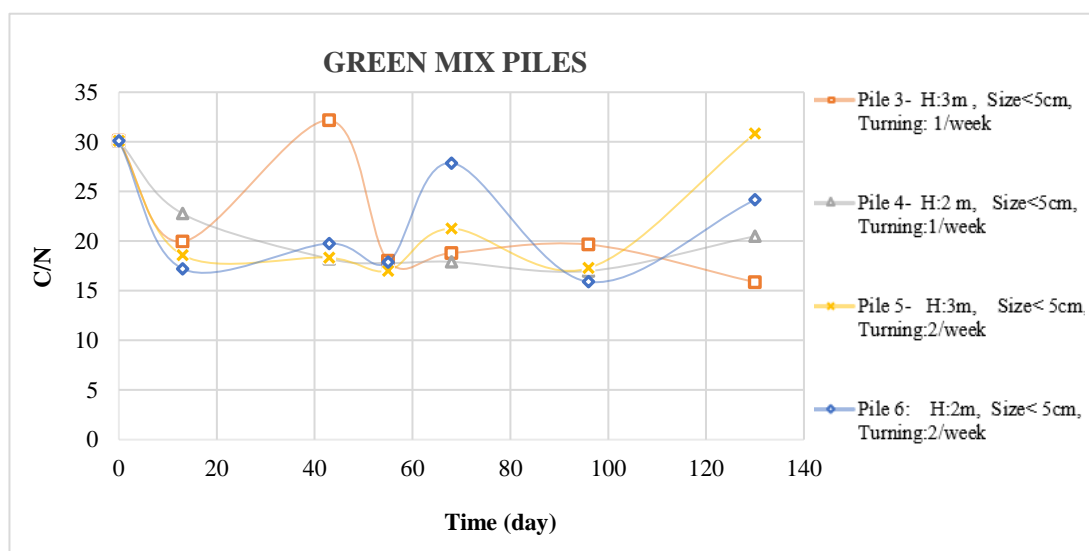
4.3.4 Μέτρηση λόγου άνθρακα-αζώτου

Οι μετρήσεις λόγου άνθρακα-αζώτου πάρθηκαν υπολογιστικά από τις μετρήσεις στοιχειακού άνθρακα και αζώτου από τον στοιχειακό αναλυτή. Ο λόγος περιγράφει την ισορροπία άνθρακα, αζώτου στο υλικό. Η βέλτιστη τιμή για τον λόγο κυμαίνεται από 25 έως 35 [Akratos, 2017].

Στα Διάγραμμα 26, 27 εντοπίζεται η διακύμανση του λόγου άνθρακα αζώτου. Για τους όλους τους σωρούς αρχικά εντοπίζεται μείωση του λόγου καθώς η αποδόμηση του οργανικού υλικού φέρει αρχικά πτώση ποσοστιαίου αζώτου και άνθρακα. Στην συνέχεια, όπως παρατηρείται και από τα διαγράμματα, ενώσεις αζώτου εκλύονται στην ατμόσφαιρα και η περιεκτικότητα του μειώνεται, ιδίως στο πέρας της ωρίμανσης. Η μείωση της περιεκτικότητας του αζώτου αποτυπώνεται σαν αύξηση της τιμής του λόγου άνθρακα- αζώτου.



Διάγραμμα 26-Λόγος άνθρακα-αζώτου σε σωρούς τομάτας



Διάγραμμα 27-Λόγος άνθρακα-αζώτου σε σωρούς τομάτας

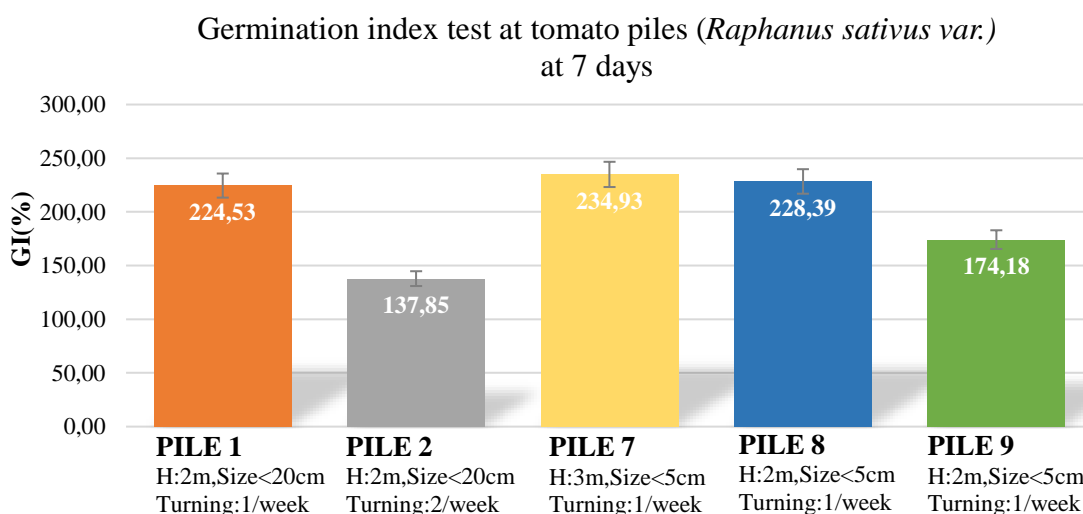
4.4 Έλεγχος βλαστικότητα

4.4.1 Έλεγχος βλαστικότητα για εδαφοβελτιωτικά τομάτας

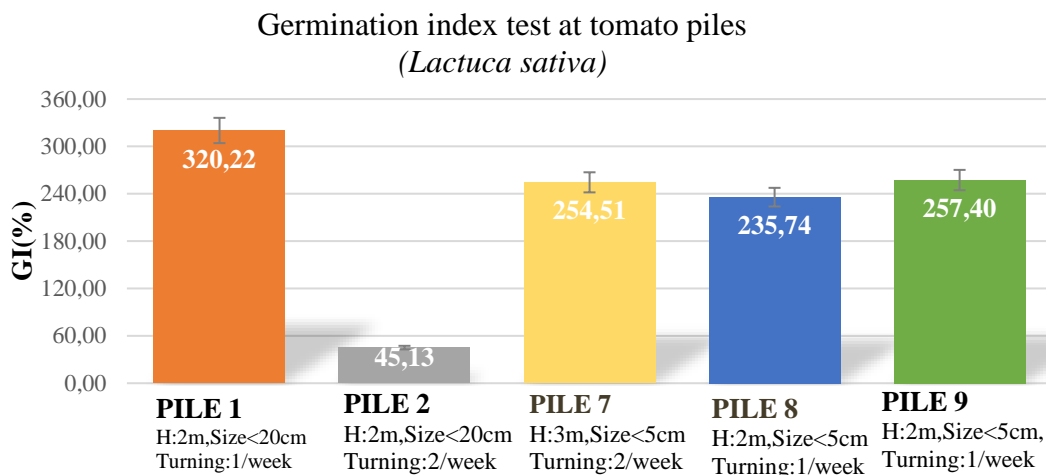
Στην παρούσα μελέτη, παράχθηκαν εννέα εδαφικά υποστρώματα μέσω διεργασίας κομποστοποίησης. Για την ανίχνευση της εδαφοβελτιωτικής τους ικανότητας, μετρήθηκε ο δείκτης βλαστικότητα. Ο δείκτης βλαστικότητα αποτελεί έλεγχο φυτοτοξικότητας στα εδαφικά υποστρώματα. Ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε σε τριβλίο Perri, με υπόστρωμα βαμβακιού, για τρία είδη φυτών (ραπάνι, μαρούλι, κάρδαμο) στο κάθε υλικό. Για την μείωση σφαλμάτων μέτρησης, η δοκιμή επαναλήφθηκε τρεις φορές στο κάθε εδαφικό υπόστρωμα. Ο δείκτης βλαστικότητα υπολογίζεται από την μέτρηση τυφλού δείκτη, με υπόστρωμα βαμβακιού και απιονισμένο νερό.

Η τιμή του δείκτη, περιγράφει την επίδραση του εδαφοβελτιωτικού στους σπόρους των φυτών. Για να χαρακτηριστεί το εδαφικό υπόστρωμα φυτοθρεπτικό, η τιμή του δείκτη πρέπει να ξεπερνά το 100%.Ενώ αν ο δείκτης είναι μικρότερος από 80% θεωρείται φυτοτοξικό, το ενδιαμέσο διάστημα χαρακτηρίζεται ουδέτερο υπόστρωμα. Κατά την βλάστηση των σπόρων, το φυτό βρίσκεται σε ευάλωτη κατάσταση και η ενδεχόμενη συγκέντρωση φυτοτοξικών ενώσεων είναι βέβαιο πως θα το επηρεάσουν [Σάββας, Πασσάμ, 2015].

Στα διαγράμματα 28, 29, 30 αποτυπώνεται ο μέσος όρος δεικτών βλαστικότητα που υπολογίστηκαν για τα εδαφικά υποστρώματα τομάτας. Στο Διάγραμμα 28 τα υποστρώματα χαρακτηρίζονται από τον δείκτη ως φυτοθρεπτικά. για τους σπόρους ραπανιού. Ο μεγαλύτερος δείκτης βλαστικότητα σημειώνεται σε ψηλό σωρό No7, με ήπια ανάδευση και μικρό μέγεθος σωματιδίων. Ενώ ο μικρότερος δείκτης βλαστικότητα εντοπίζεται σε σωρό No2, με μεγάλο μέγεθος σωματιδίων, έντονο αερισμό και χαμηλό ύψος.



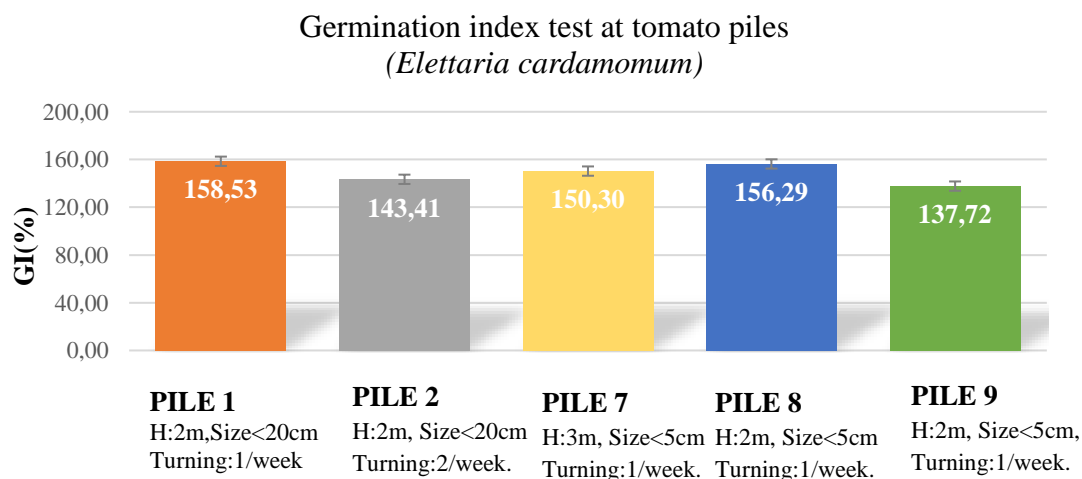
Διάγραμμα 24-Δείκτες βλαστικότητα σε ραπάνι για υποστρώματα τομάτας



Διάγραμμα 25-Δείκτες βλαστικότητα σε μαρούλι για υποστρώματα τομάτας

Μάλιστα, το προϊόν Νο2 στο Διάγραμμα 29 κρίθηκε από τον δείκτη ως φυτοτοξικό υπόστρωμα. Αντιθέτως, ο όμοιος σωρός Νο1, όπου διαφέρει μονάχα στον αερισμό είχε την υψηλότερη απόδοση. Η αντίθεση που προκύπτει, μπορεί να δικαιολογηθεί από την υψηλότερη υγρασία του τελικού προϊόντος Νο1. Κατά την ηπιότερη ανάδευση του σωρού Νο1 διατηρήθηκε στο τελικό προϊόν μεγαλύτερο ποσοστό υγρασίας (Υγρασία Νο1 :25,5%, Υγρασία Νο2 :17,5 %). Η υγρασία είναι απαραίτητη για φαινόμενα υδρόλυσης βαρέων χημικών ενώσεων, όπως αμμωνίας. Η χαμηλή περιεκτικότητα σε υγρασία ενδέχεται να περιορίσει τη δυνατότητα για χημική ανταλλαγή από τους μικροοργανισμούς, με αποτέλεσμα η διεργασία να μην εξελίσσεται αρμονικά [Kim,2016].

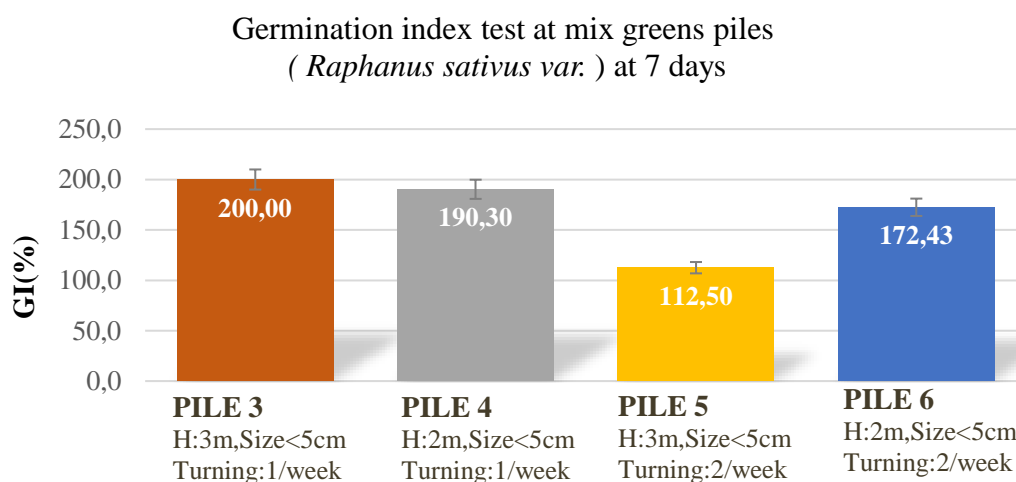
Τέλος, στο Διάγραμμα 30 παρατηρούνται οι δείκτες βλαστικότητα σε σπόρους κάρδαμου. Ο σπόρος κάρδαμου περιβάλλεται από έναν σκληρό φλοιό, με αποτέλεσμα να είναι πιο φυτοανθεκτικός σε ενώσεις που ίσως προσδίδουν φυτοτοξικότητα [Ifeoluwa,2015]. Ακόμα, μπορεί να παρατηρηθεί πως οι διαφορές για τα υποστρώματα δεν είναι σημαντικές. Ωστόσο, για όλα τα προϊόντα οι δείκτες βλαστικότητας ήταν φυτοθρεπτικοί.



Διάγραμμα 26-Δείκτες βλαστικότητα σε κάρδαμο για υποστρώματα τομάτας

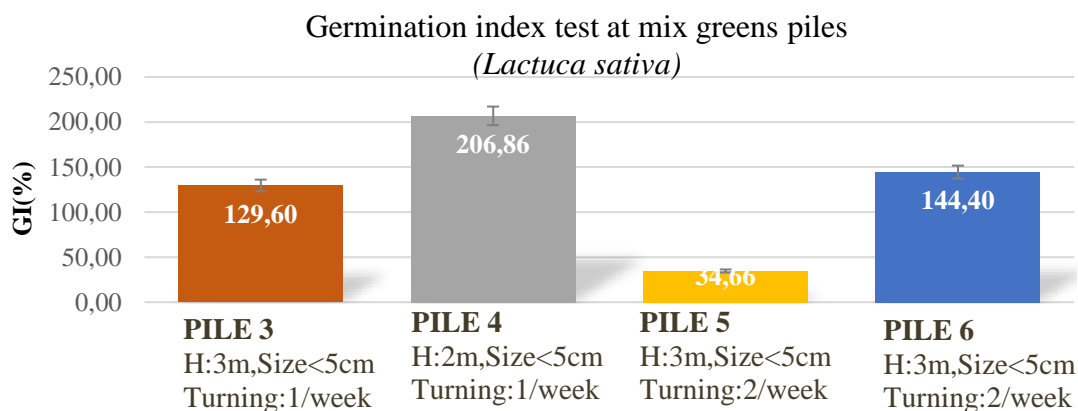
4.4.2 Έλεγχος βλαστικότητα σε εδαφοβελτιωτικά πράσινης μίξης

Η δοκιμή βλαστικότητα πραγματοποιήθηκε και για τα εδαφικά υποστρώματα πράσινης μίξης. Στο Διάγραμμα 31 απεικονίζονται οι μέσοι δείκτες βλαστικότητα για τους σπόρους ραπανιού. Οι δείκτες βλαστικότητα στο ραπάνι προέκυψαν μεγαλύτεροι από 100%, επομένως τα εδαφικά υποστρώματα πράσινης μίξης χαρακτηρίζονται φυτοθρεπτικά στο ραπάνι. Ο υψηλότερος δείκτης βλαστικότητα προέκυψε από υψηλό σωρό Νο3, με μικρό μέγεθος σωματιδίων και ήπια ανάδευση. Ενώ, ο όμοιος σωρός Νο5 στο οποίο επιβλήθηκε εντονότερη συχνότητα ανάδευσης σημείωσε την χαμηλότερη επίδοση στην δοκιμή. Το ίδιο συμπέρασμα, προκύπτει και από τις δοκιμές στους άλλους σπόρους μαρούλι και κάρδαμο.



Διάγραμμα 27-Δείκτες βλαστικότητα σε ραπάνι για υποστρώματα μίξης

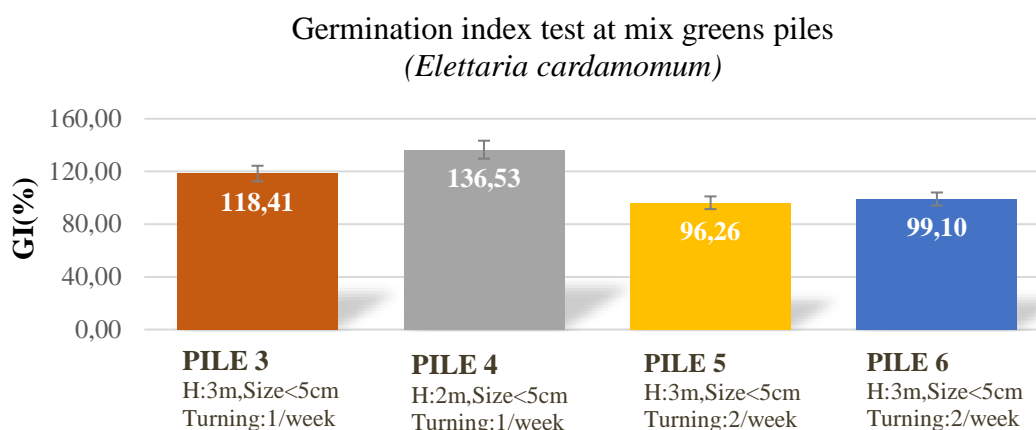
Τα αποτελέσματα δεικτών βλαστικότητα στο Διάγραμμα 32 για τους σπόρους μαρουλιού ορίζουν το σωρός Νο5 ως φυτοτοξικός. Από σύγκριση των φυσικοχημικών παραμέτρων των σωρών πράσινης μίξης, παρατηρείται πως το προϊόν Νο5, διαθέτει την μικρότερη υγρασία. Δύναται η μικρή ποσοστιαία υγρασία να υποδηλώνει πως η διεργασία της αποδόμησης να λειτούργησε ανεπαρκώς.



Διάγραμμα 28-Δείκτες βλαστικότητα σε μαρούλι για υποστρώματα μίξης

Καθώς το μικρό ποσοστό υγρασίας, ενδέχεται να λειτουργήσει ως παρεμποδιστικός παράγοντας των ενζυμικών δράσεων [Zhang, 2016].

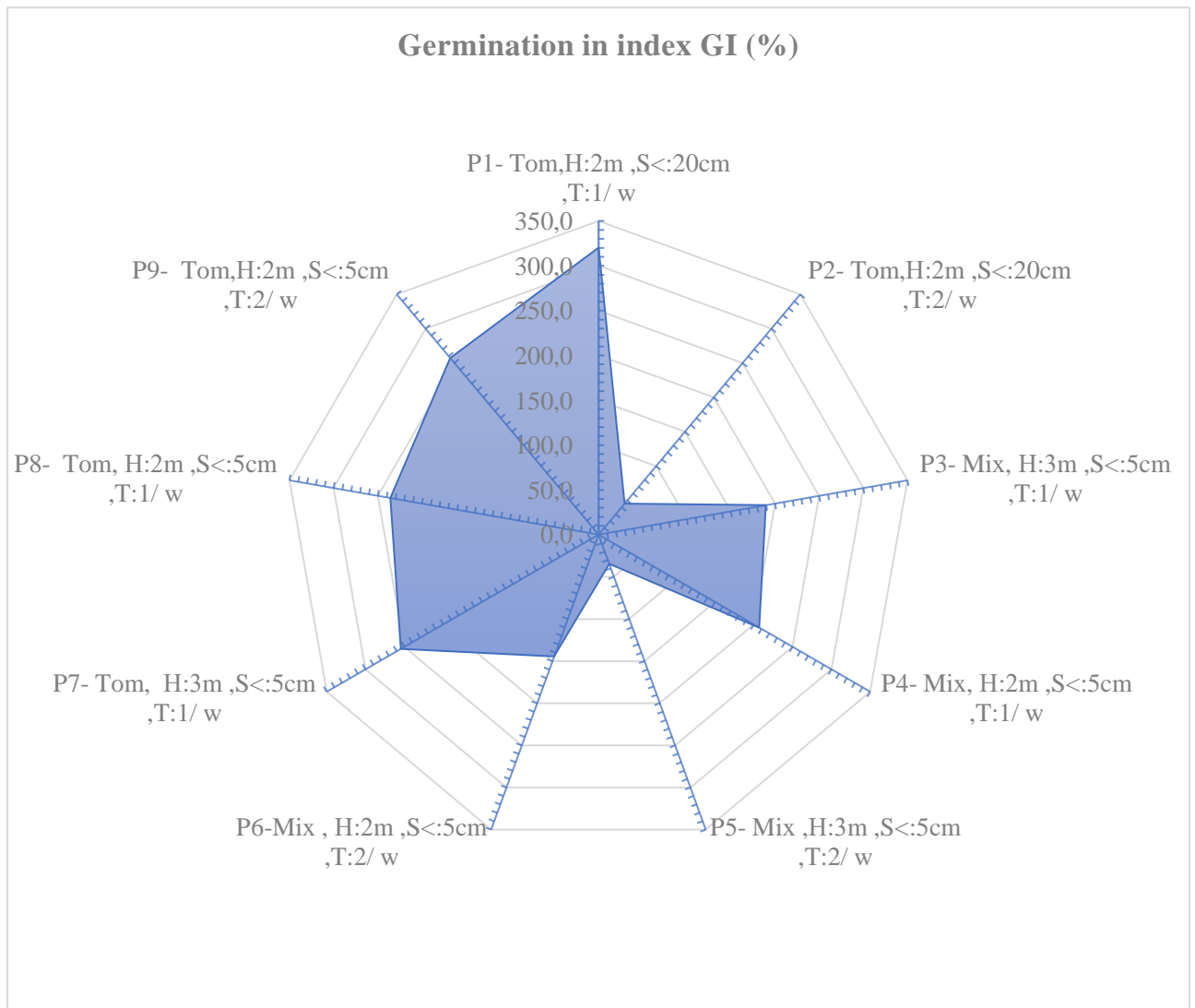
Τέλος στο διάγραμμα δεικτών βλαστικότητας για τους σπόρους καρδάμου τα προϊόντα των σωρών Νο5 και Νο6 περιγράφονται ως ουδέτερα. πως τα δύο προϊόντα αυτά, παρουσιάζουν τις μικρότερες υγρασίες με το προϊόν Νο6 να έχει ελαφρώς πιο αυξημένη υγρασία. Είναι εύκολό να παρατηρηθεί και στο Διάγραμμα 33 όπου ο σωρός με την ελαφρώς αυξημένη υγρασία παρουσιάζει και ελαφρώς αυξημένο δείκτη βλαστικότητας.



Διάγραμμα 29-Δείκτες βλαστικότητας σε κάρδαμο για υποστρώματα μίξης

Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα εντοπίζεται συσχέτιση του δείκτη βλαστικότητας με την υγρασία. Τα υποστρώματα τομάτας και πράσινης μίξης με την περισσότερη περιεχόμενη υγρασία σημείωσαν τους μεγαλύτερους δείκτες. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η περιεχόμενη υγρασία συμβάλλει στα φαινόμενα υδρόλυσης, παρεμποδίζει την αύξηση θερμοκρασίας και μειώνει την αδρανοποίηση ωφέλιμων μικροβίων [Σάκκας,2020].Κρίνεται απαραίτητη η διατήρηση της περιεχόμενης υγρασίας άνω τουλάχιστον 25% ώστε να μην εμφανίζεται φυτοτοξικότητα, ιδίως σε σπόρους μαρουλιού που είναι το πιο φυτοευαίσθητο.

Η τιμή του δείκτη βλαστικότητα χαρακτηρίζει την εδαφοβελτιωτική ικανότητα του προϊόντος. Ο σπόρος και ο βλαστός του μαρουλιού είναι λιγότερο ανθεκτικοί από τους άλλους σπόρους με αποτέλεσμα να εντοπίζεται η τοξικότητα ευκολότερα. Στο παρακάτω αραχνοειδές Διάγραμμα 42, αποτυπώνεται η κατανομή του δείκτη βλαστικότητα σε σπόρους μαρουλιού για τα προϊόντα του πειράματος. Οι μεγαλύτερες τιμές του δείκτη εντοπίζονται σε σωρούς τομάτας ήπιας ανάδευσης.



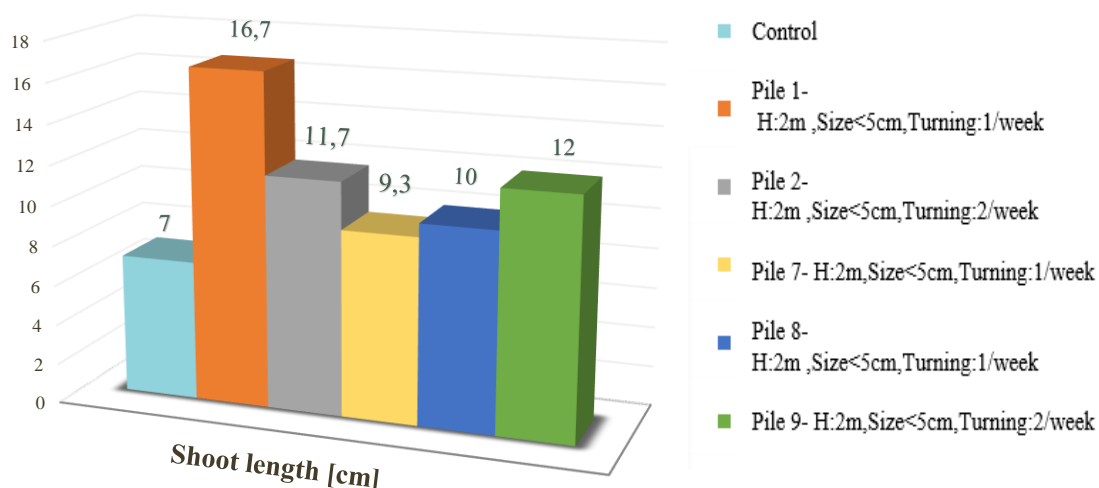
Διάγραμμα 34-Αραχνοειδές διάγραμμα κατανομής δείκτη βλαστικότητα στο μαρούλι

4.5 Δοκιμή σε καλλιέργεια

4.5.1 Δοκιμή εδαφοβελτιωτικών τομάτας

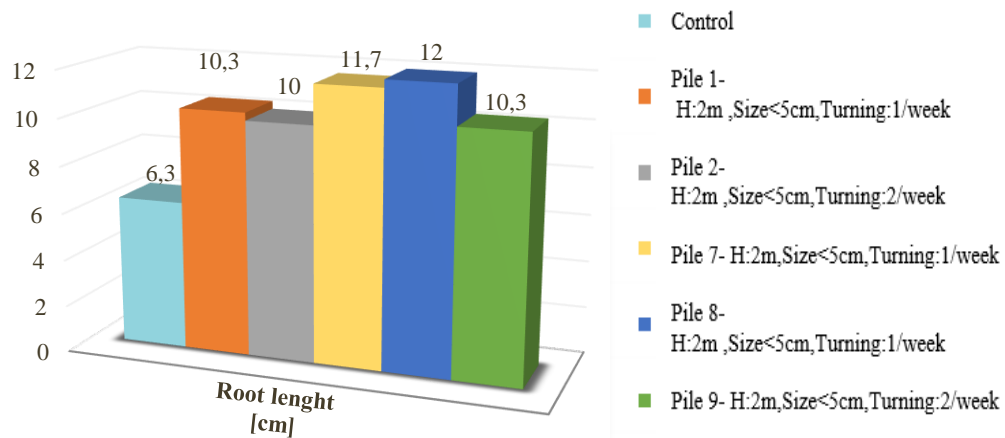
Έπειτα την δοκιμή δεικτών βλαστικότητας, η μελέτη εστιάζεται στην δοκιμή στην καλλιέργεια νεογνών φυτών μαρουλιών. Η δοκιμή έχει ως σκοπό, τον εντοπισμό της επίδρασης του υποστρώματος στη καλλιέργεια, και την αναζήτηση του εδαφοβελτιωτικού με την υψηλότερη εδαφοβελτιωτική ικανότητα. Η δοκιμή έλαβε χώρο σε θερμοκήπιο ώστε να διατηρηθούν ευνοϊκές καιρικές συνθήκες. Για την ορθότητα των αποτελεσμάτων η δοκιμή για το κάθε τελικό προϊόν επαναλήφθηκε τρεις φορές. Στο πέρας της μηνιαίας καλλιέργειας λήφθηκαν μετρήσεις μήκους βλαστού, φυλλώματος, ριζικού συστήματος και η μάζας. Σημείο αναφοράς των μετρήσεων είναι τα αποτελέσματα από φυτά που αναπτύχθηκαν σε ξανθιά τύρφη ως μοναδικό υπόστρωμα (τυφλή καλλιέργεια). Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

Στο Διάγραμμα 34 εντοπίζεται το μέσο μήκος βλαστού των φυτών για τα υποστρώματα από τομάτα. Συγκρίνοντας το μέσο μήκος βλαστού της τυφλής καλλιέργειας με τις υπόλοιπες καλλιέργειες, παρατηρείται αύξηση μήκους βλαστού κατά την ενσωμάτωση εδαφοβελτιωτικού. Η μεγαλύτερη αύξηση μήκους βλαστού εντοπίζεται για εδαφοβελτιωτικό από τον σωρό τομάτας Νο1, μεγάλου μεγέθους σωματιδίων άλεσης. Συγκρίνοντας βάσει την τυφλή καλλιέργεια, το μήκος βλαστού παρουσίασε αύξηση κατά 25% ελάχιστο. Ενώ η μικρότερη αύξηση, προκύπτει σε καλλιέργεια εδαφοβελτιωτικού Νο7 κατά 33%.



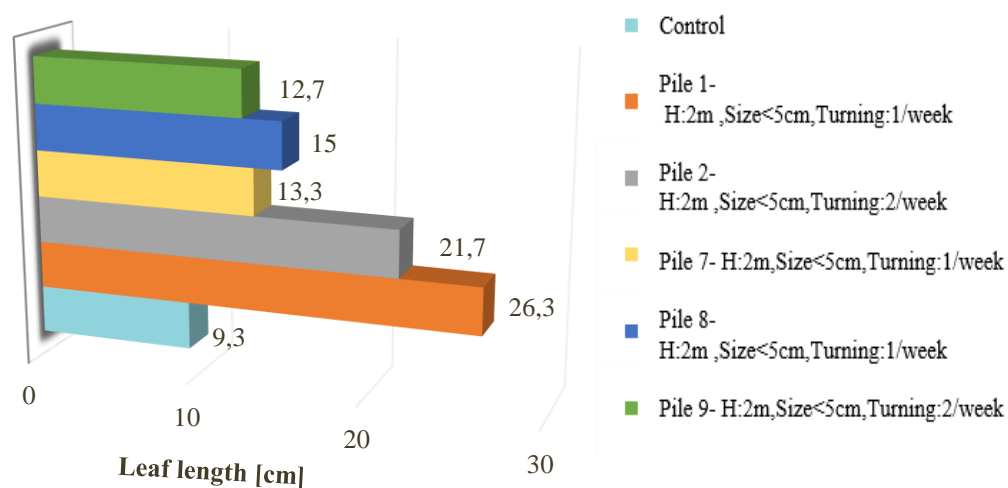
Διάγραμμα 35-Μήκος βλαστού φυτών σε υποστρώματα τομάτας

Στο Διάγραμμα 35 περιγράφεται το μέσο μήκος ριζικού συστήματος για τις καλλιέργειες με υποστρώματα τομάτας. Σε όλες τις δοκιμές εδαφοβελτιωτικού παρουσιάζεται αύξηση μήκους του ριζικού συστήματος 40% και άνω, σε σχέση με την τυφλή καλλιέργεια. Η μεγαλύτερη ανάπτυξη υπολογίζεται 47,5% και προκύπτει από εδαφοβελτιωτικό Νο8, μικρού μεγέθους σωματιδίων και χαμηλού ύψους.



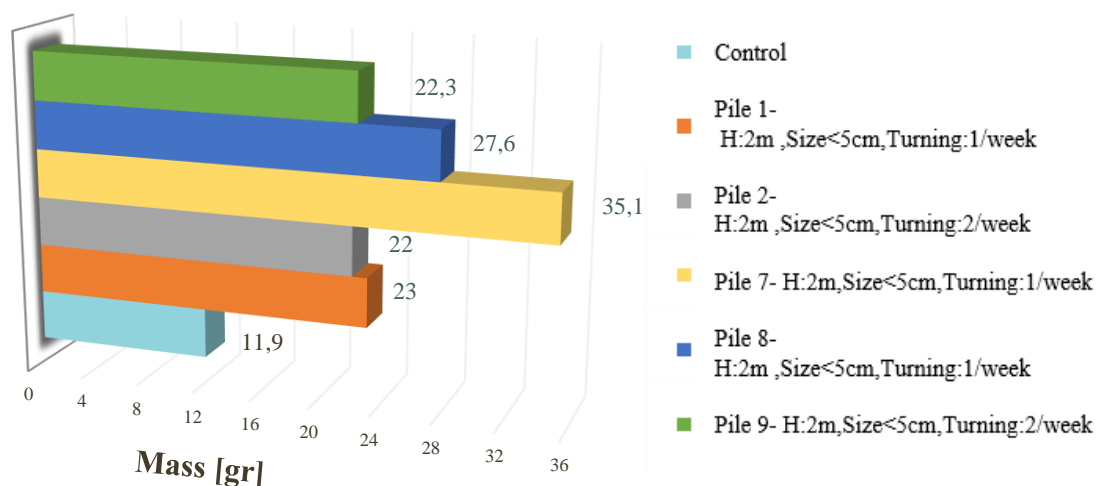
Διάγραμμα 36-Ριζικό σύστημα φυτών σε υποστρώματα τομάτας

Στο Διάγραμμα 36 απεικονίζονται τα αποτελέσματα μέσου μήκους φύλλων. Τα μακρύτερα φύλλα εντοπίζονται στην καλλιέργεια με εδαφοβελτιωτικό Νο1 όπου σε σχέση με την τυφλή καλλιέργεια εντοπίστηκαν μακρύτερα φύλλα κατά 65%.



Διάγραμμα 37-Μήκος φυτών σε υποστρώματα τομάτας

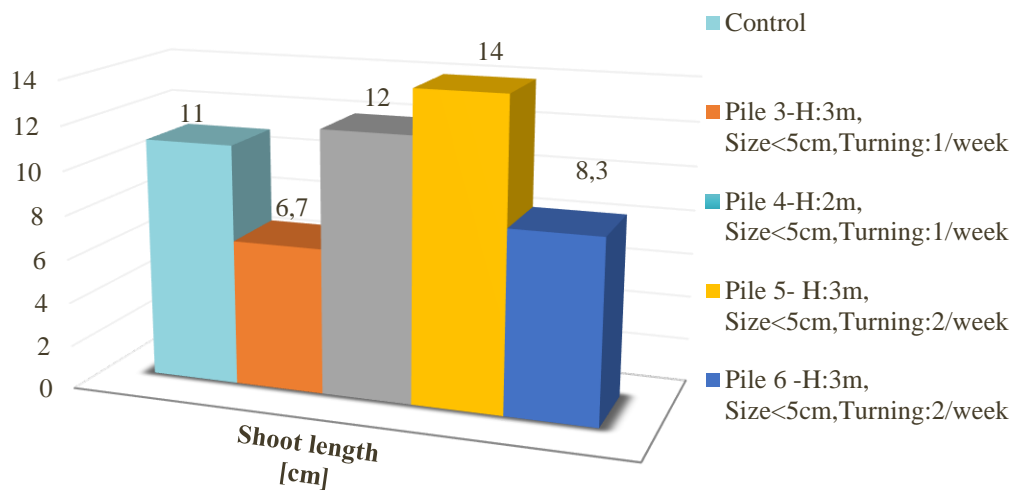
Τέλος και ίσως ο σημαντικότερος παράγοντας σύγκρισης είναι η μάζα των φυτών Διάγραμμα 37. Η μάζα φυτών, στα όποια ενσωματώθηκε υπόστρωμα τομάτας, εμφάνισε αύξηση στη μάζα κατά 45%, και άνω, σε σχέση με την τυφλή καλλιέργεια. Η μεγαλύτερη ποσοστιαία αύξησή μάζας σημειώθηκε από εδαφοβελτιωτικό Νο7 κατά 66%.



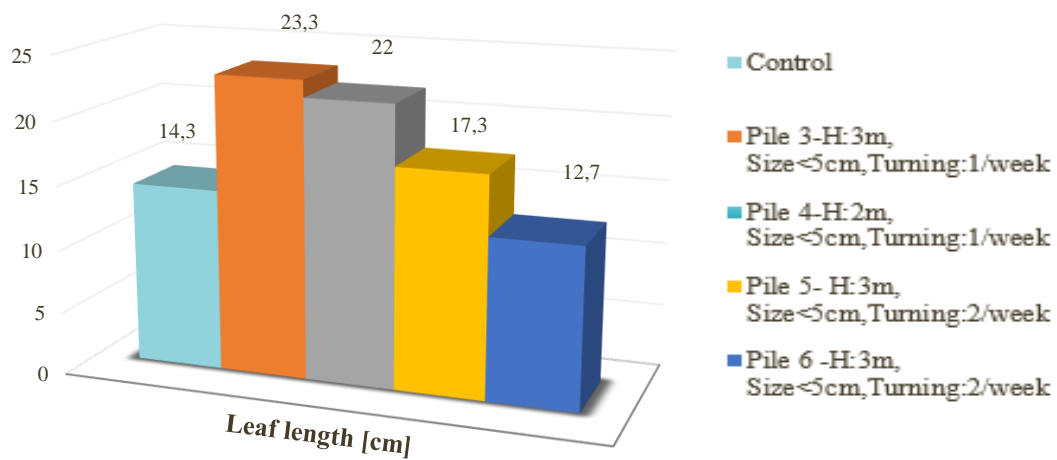
Διάγραμμα 38-Μάζα φυτών σε υποστρώματα τομάτας

4.5.2 Δοκιμή εδαφοβελτιωτικού πράσινης μίξης.

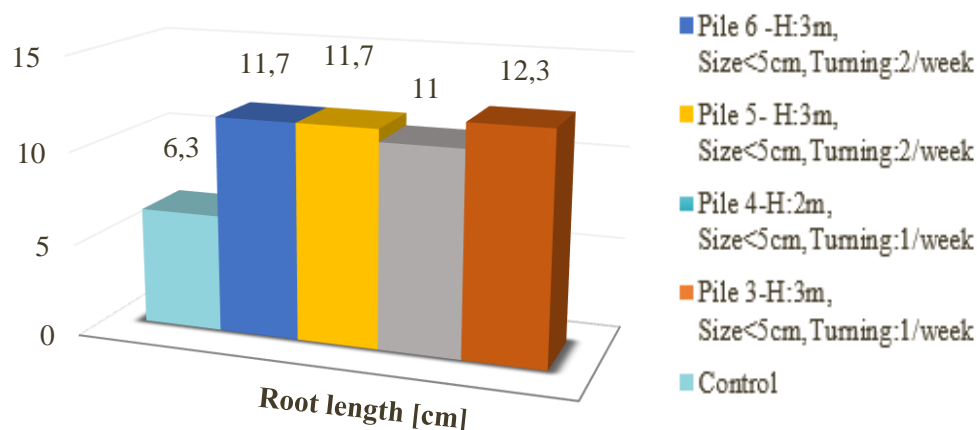
Ομοίως εξετάστηκαν τα εδαφοβελτιωτικά από σωρούς πράσινης μίξης. Στο Διάγραμμα 38 εντοπίζεται μέσο μήκος βλαστού των δοκιμών. Το μεγαλύτερο μήκος βλαστού σημειώνεται σε υψηλό σωρό Νο5, έντονης ανάδευσης. Παρατηρείται ακόμη πως για το μέσο μήκος βλαστού, η τυφλή καλλιέργεια μεγαλύτερο μήκος από σωρούς τους Νο3, Νο6. Τα αποτελέσματα από τα μήκη βλαστών και φύλλων, δεν επαρκούν για τον χαρακτηρισμό της εδαφοβελτιωτική ικανότητας των προϊόντων. Καθώς κατά την συγκομιδή των μαρουλιών, εντοπίστηκαν αδύναμα φυτά με αυξημένο μήκος βλαστών και φύλλων. Η μάζα των φυτών αυτών, ήταν αρκετά μικρότερη από ότι για φυτά που υστερούσαν σε μήκος βλαστού και φύλλων. Η παραπάνω παρατήρηση αποτυπώνεται και διαγραμματικά από στα Διαγράμματα 39, 40, 41.Μάλιστα, σωρός πράσινης μίξης Νο6, όπου εμφάνισε μικρότερο μήκος βλαστού και φύλλων από ότι την τυφλή καλλιέργεια, είχε την τριπλάσια μάζα από ότι την τυφλή καλλιέργεια ,ποσοστό αύξησης μάζας 64%.



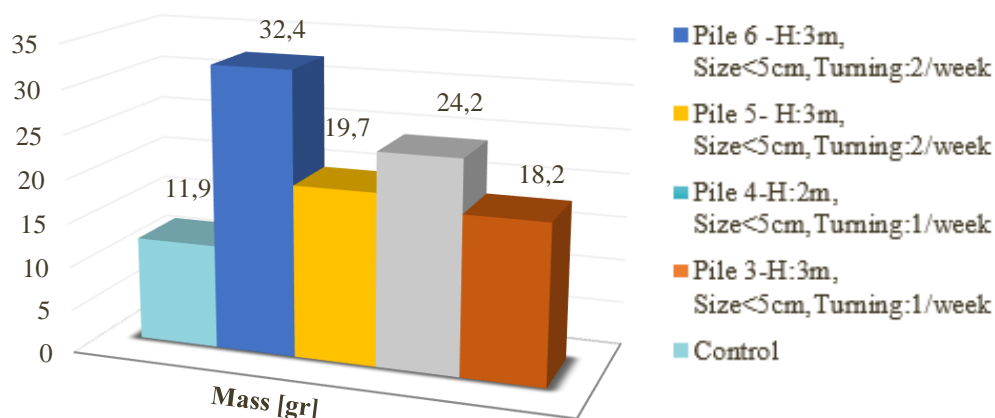
Διάγραμμα 39-Μήκος βλαστού φυτών σε υποστρώματα μίξης



Διάγραμμα 40 -Μήκους φύλλων φυτών σε υποστρώματα μίξης

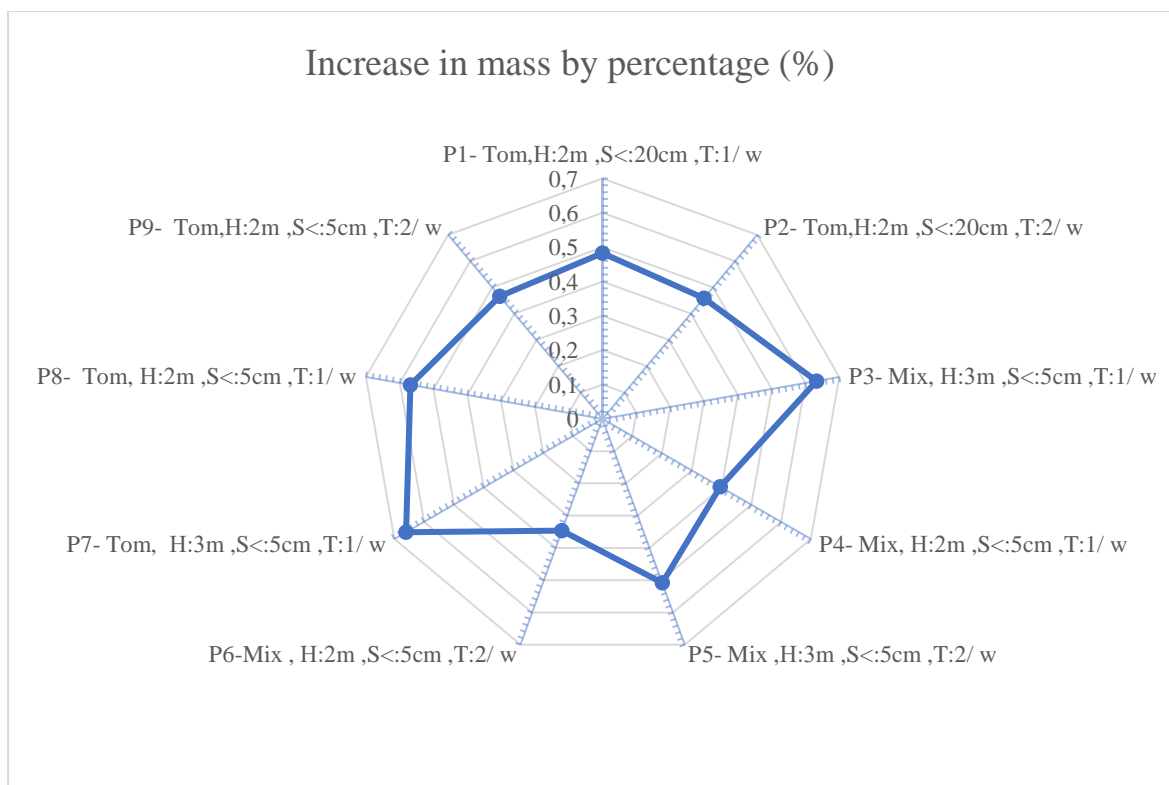


Διάγραμμα 41-Μήκος ριζικού συστήματος φυτών σε υποστρώματα μίξης



Διάγραμμα 42-Μάζα φυτών σε υποστρώματα μίξης

Η παράμετρος της μάζας περιγράφει την ανάπτυξη των φυτών. Η μάζα των βρώσιμων φυτών σχετίζεται άμεσα με την ποσότητα του παραγόμενου και καταναλωμένου προϊόντος. Επομένως, η μέτρηση της μάζα συμβάλει στην ανίχνευσή της αποδοτικότητας της καλλιέργειας. Στο παρακάτω αραχνοειδές Διάγραμμα 43, αποτυπώνεται η ποσοστιαία αύξηση μάζας φυτών σε σχέση με την τυφλή καλλιέργεια. Η μεγαλύτερη αύξηση εντοπίζεται σε υψηλούς σωρούς και με ήπια ανάδευση, με μέγιστη τιμή για υψηλό σωρό τομάτας με ήπια ανάδευση.



Διάγραμμα 43-Αραχνοειδές διάγραμμα απόδοσης στην μάζα φυτών

Κεφάλαιο 5-Συγκρίσεις όμοιων σωρών

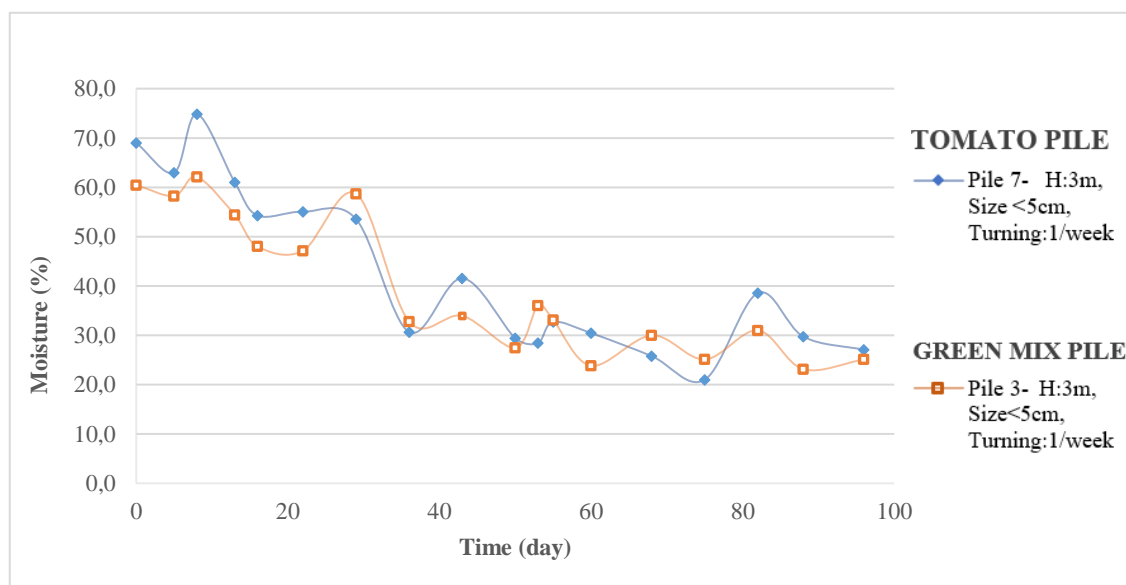
Συγκρίσιμοι σωροί

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων πρόκειται να συγκριθούν ανά όμοιους σωρούς. Οι σωροί αυτοί, διαφέρουν κατά ένα παράγοντα κομποστοποίησης. Σκοπός είναι ο εντοπισμός της επιρροής του κάθε παράγοντα στις μετρήσεις. Στην ενότητα αυτή, θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα και έπειτα θα εντοπιστούν οι διαφορές στα αποτελέσματα. Η σύγκριση θα γίνει βάσει αρχικού υλικού, ύψους, μεγέθους σωματιδίων άλεσης και συχνότητα αερισμού.

5.1 Σύγκριση βάσει υλικού

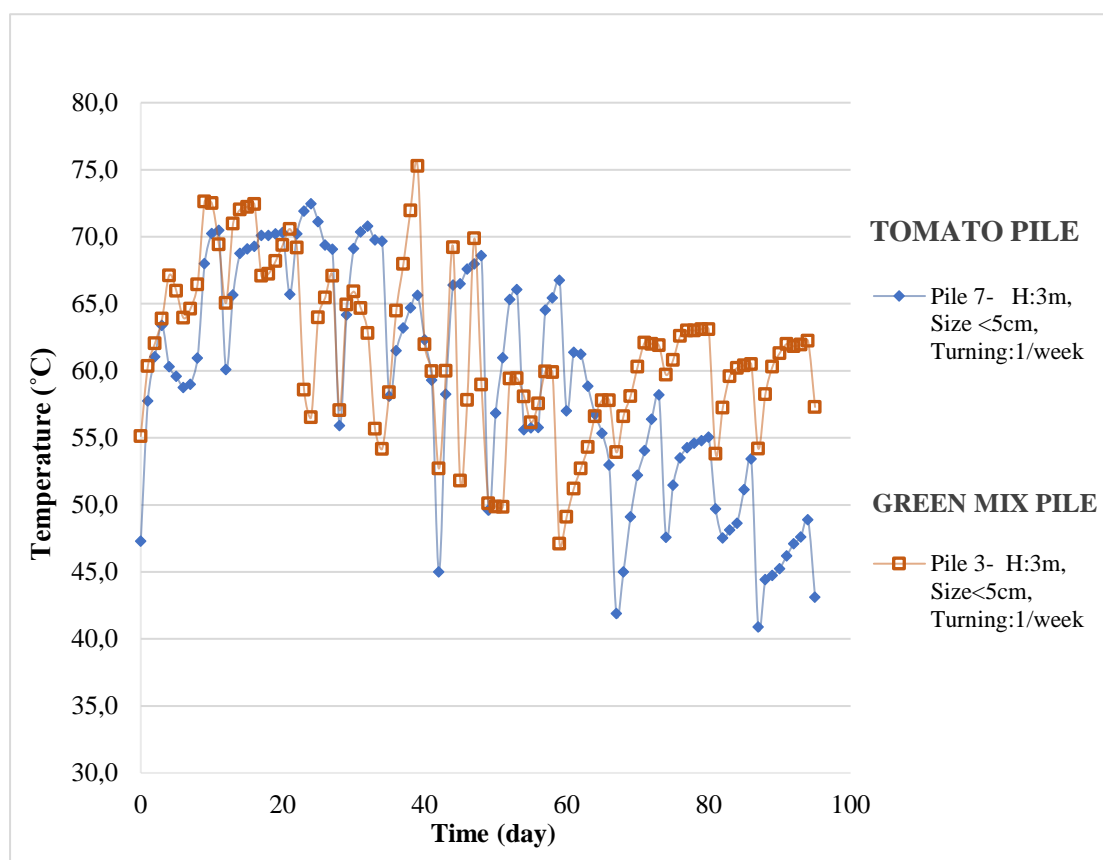
Στο σημείο αυτό πρόκειται να συγκριθούν σωροί τομάτας και μίξης με κοινά χαρακτηριστικά. Οι συγκρίσιμοι σωροί είναι,

1. **Σωρός 7, από υλικό τομάτας, ύψους 3 μέτρων, μέγεθος σωματιδίων μικρότερο από 5 εκατοστά, συχνότητα αερισμού μια φορά την εβδομάδα**
2. **Σωρός 3, από υλικό μίξης, ύψους 3 μέτρων, μέγεθος σωματιδίων μικρότερο από 5 εκατοστά, συχνότητα αερισμού μια φορά την εβδομάδα.**



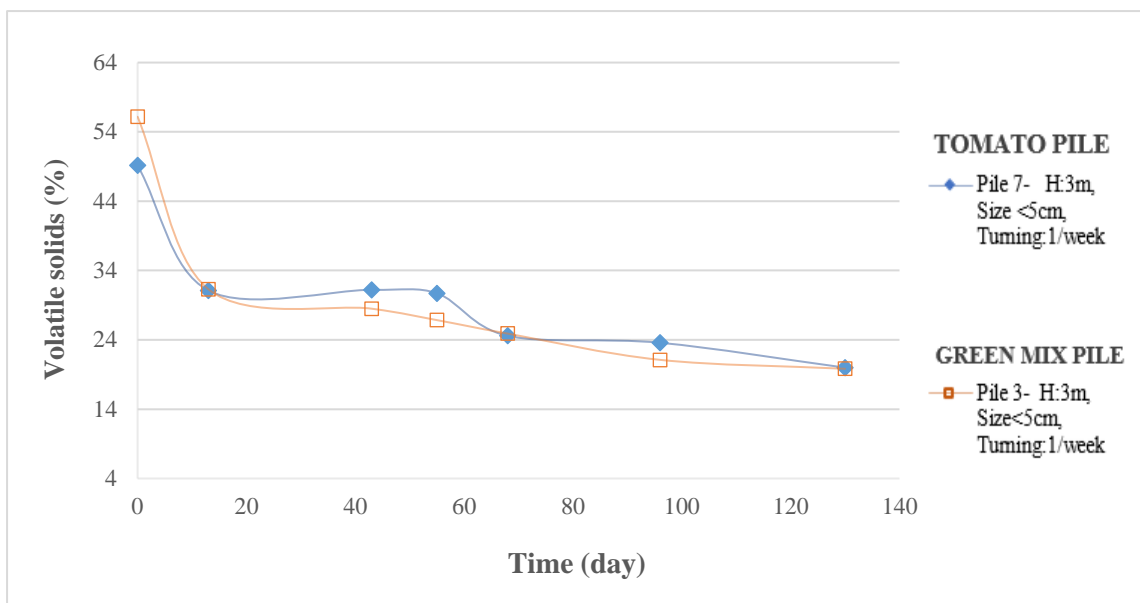
Διάγραμμα 44 – Σύγκριση υγρασίας βάσει υλικού

Συγκρίνοντας τους όμοιους αλλά από διαφορετικό υλικό σωρούς προκύπτουν οι εξής διαφοροποιήσεις. Αρχικά, στο Διάγραμμα 44 παρατηρείται πως στον σωρό τομάτας το αρχικό ποσοστό υγρασίας είναι μεγαλύτερο από ότι στον σωρό από υλικά πράσινης μίξης. Δικαιολογείται διότι το υλικό τομάτας έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε νερό από ότι η μίξη. Υποπτεύεται πως λόγω της υψηλότερης υγρασίας, η θερμοκρασία παρέμεινε χαμηλότερη στα αρχικά στάδια της διεργασίας, αφού η υγρασία δρα ως παρεμποδιστικός παράγοντας ανόδου της θερμοκρασίας όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 45. Οι υψηλές θερμοκρασίες εξολοθρεύουν τα ωφέλιμα μικρόβια, με αποτέλεσμα την μη αποδοτική διάσπαση οργανικής ύλης και τον αργό χρόνο κομποστοποίησης.



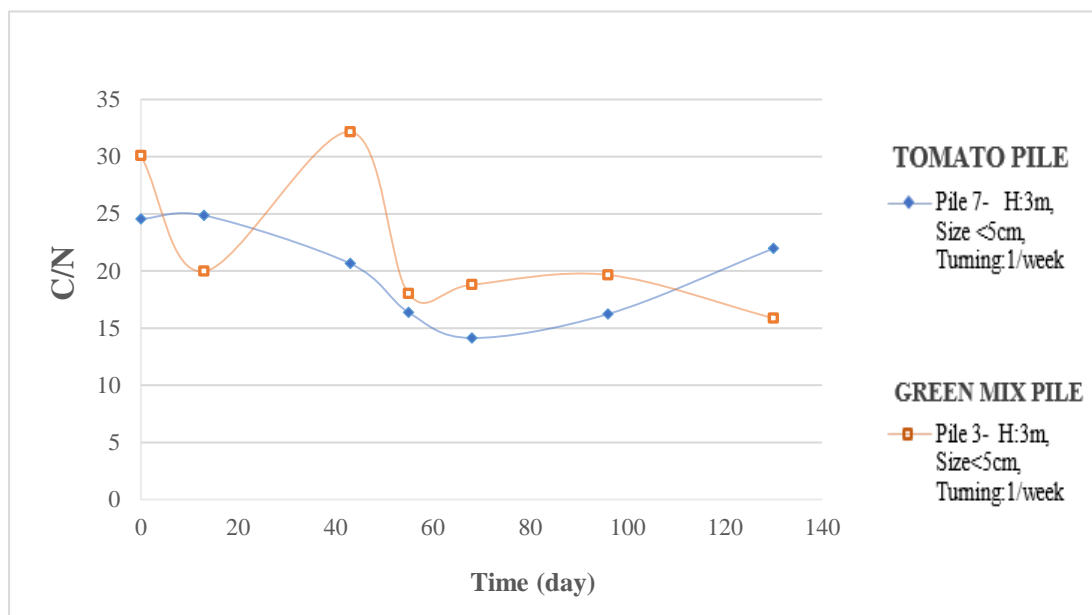
Διάγραμμα 30 – Σύγκριση θερμοκρασίας βάσει υλικού

Από το Διάγραμμα 46 μπορεί να εντοπιστεί η διάσπαση της οργανικής ουσίας για τα δύο ρεύματα επεξεργασίας. Για τα δύο ρεύματα η διάσπαση με όμοιο ρυθμό. Ωστόσο έχει ενδιαφέρον η παρατήρηση πως τα πτητικά στερεά για τον σωρό πράσινης μίξης εντοπίστηκαν ελαφρώς πιο αυξημένα στην αρχή του πειράματος.



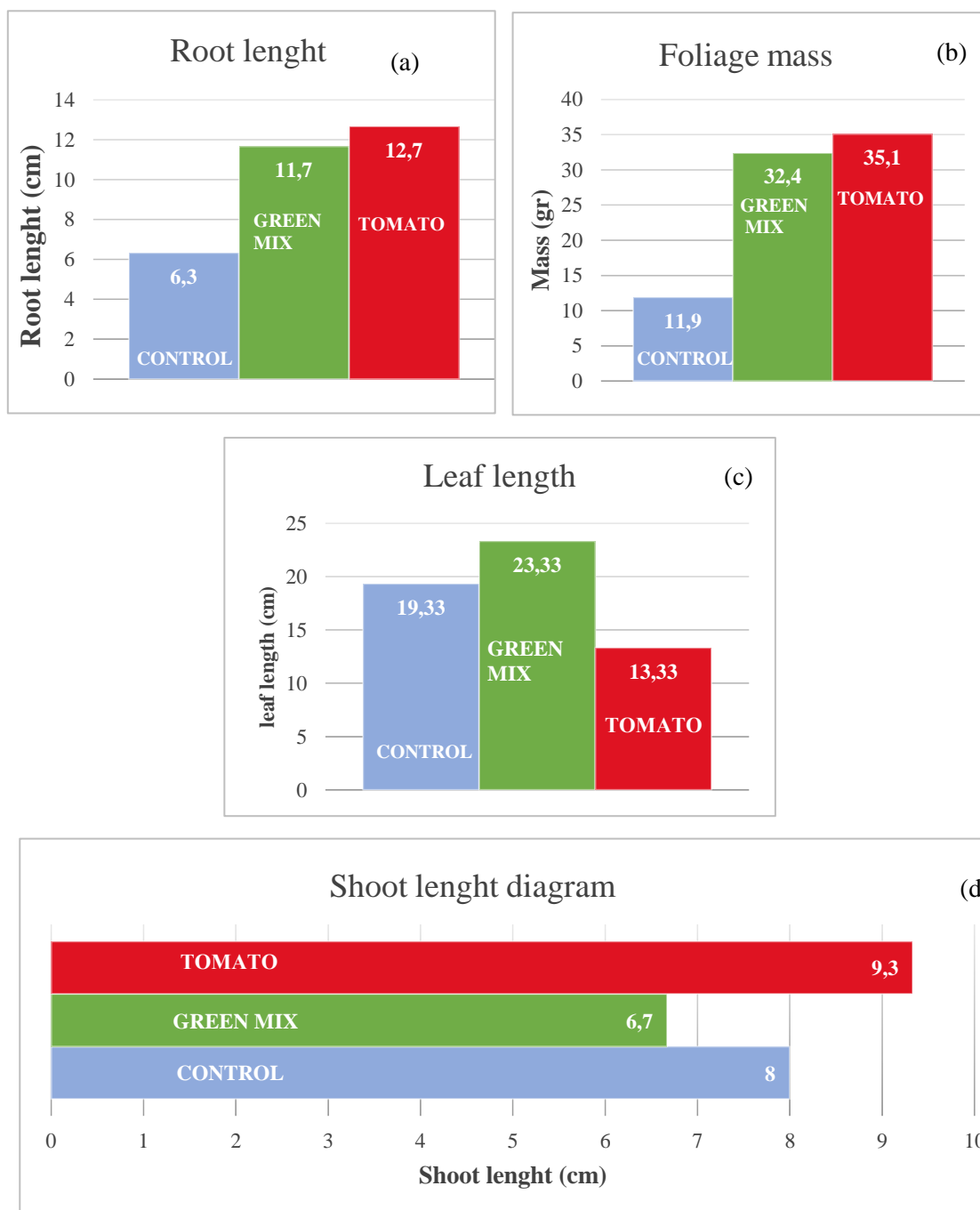
Διάγραμμα 31-Σύγκριση πτητικών στερεών βάσει υλικού

Ο λόγος άνθρακα προς άζωτο ορίζει την ποσότητα του άνθρακα σε σχέση με την ποσότητα του αζώτου που υπάρχει. Από το Διάγραμμα 47 προκύπτει πως για τον σωρό τομάτας, ο λόγος υπολογίζεται 22, δηλαδή υπάρχουν 22 γραμμάρια άνθρακα για κάθε 1 γραμμάριο αζώτου [Flavel, Murphy 2006] σε αυτήν την οργανική ύλη. Ο λόγος άνθρακα αζώτου για τον σωρό πράσινης μίξης προκύπτει 15.

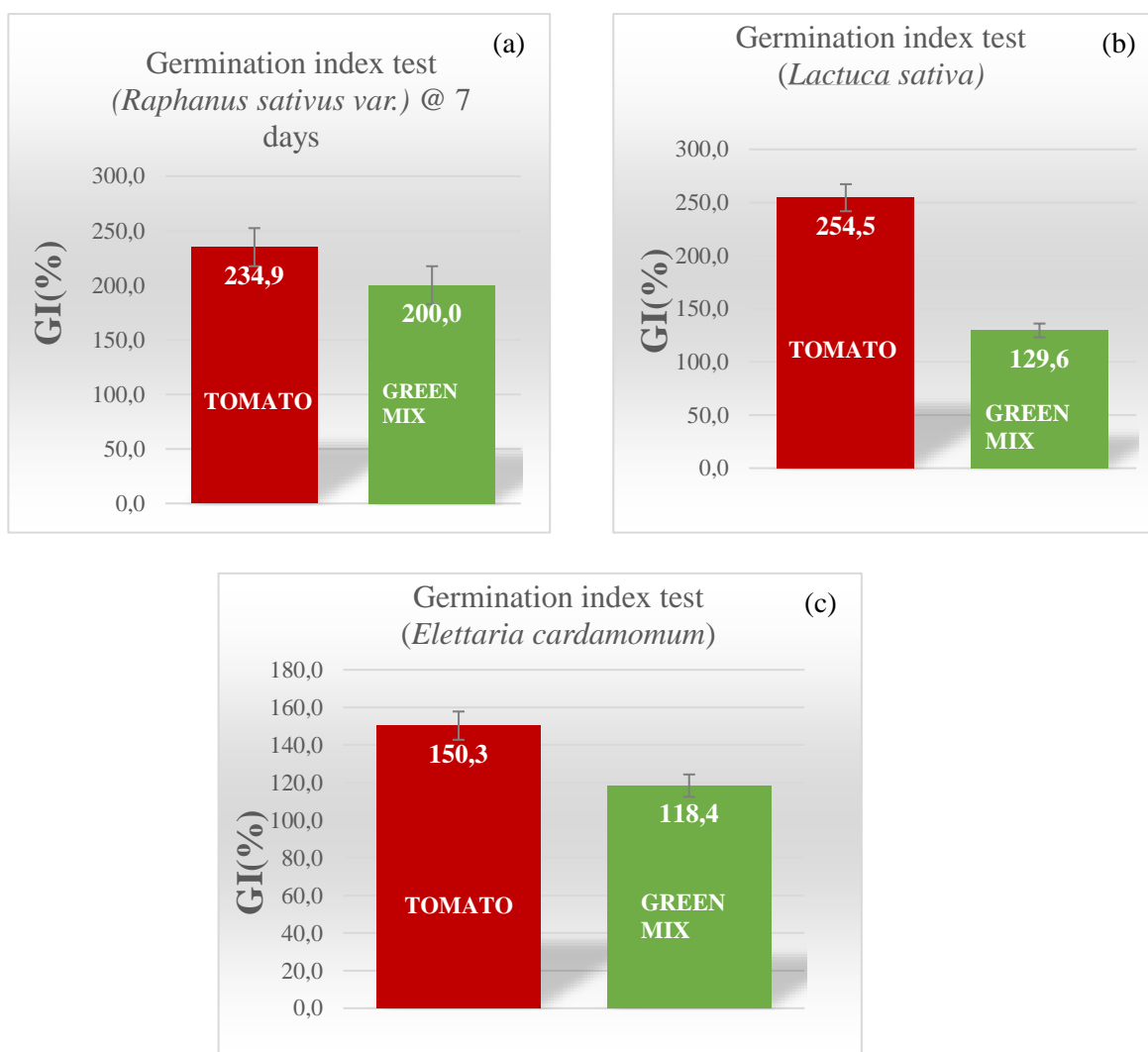


Διάγραμμα 32 – Σύγκριση λόγου άνθρακα αζώτου βάσει υλικού

Την υψηλότερη εδαφοβελτιωτική ικανότητα εμφάνισε το υλικό τομάτας, σε σχέση με το υλικό μίξης. Η καλλιέργεια μαρουλιών στην οποία τοποθετήθηκε εδαφοβελτιωτικό τομάτας εμφάνισε το μεγαλύτερο ριζικό σύστημα (Διάγραμμα 48.a) και τη μεγαλύτερη μάζα φυτών (Διάγραμμα 48.b). Ακόμα εντοπίστηκε πως στην καλλιέργεια μαρουλιών όπου ενσωματώθηκε εδαφοβελτιωτικό μίξης παρουσίασε μεγαλύτερα φύλλα. Ο χαμηλός λόγος άνθρακα αζώτου πιθανά να επέτρεψε την διαφυγή αζώτου στο χώμα και έπειτα στο φυτό. Με αποτέλεσμα το εδαφοβελτιωτικό μίξης να απέδωσε αποτελεσματικά στην καλλιέργεια μαρουλιών, σε σχέση με την τυφλή καλλιέργεια.



Διάγραμμα 33 – Σύγκριση ανάπτυξης φυτών βάσει υλικού



Διάγραμμα 34-Σύγκριση δεικτών βλαστικότητας βάσει υλικού

Τέλος οι δοκιμές βλαστικότητας που εντοπίζονται στα Διαγράμματα 49 φανέρωσαν υψηλότερη φυτοθεραπευτικότητα για την τομάτα. Στα παραπάνω διαγράμματα εντοπίζεται η βλαστικότητα σε ραπάνι, μαρούλι και κάρδαμο. Ενδιαφέρον προσδίδει η δοκιμή στους σπόρους μαρουλιού. Διότι ο σπόρος και το έμβρυο φυτό μαρουλιού είναι το πιο ευαίσθητο σε τοξικότητα, σε σχέση με τους άλλους εξεταζόμενους σπόρους δοκιμής [Ifeoluwa,2015]. Σε αυτή την δοκιμή εντοπίζονται και οι μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις βλαστικότητας (Tomato GI: 254,5 %, Green Mix GI: 129,6 %) Από παραπάνω αποτελέσματα εξάχθηκε το συμπέρασμα πως ο σωρός πράσινης μίξης δεν κομποστοποιήθηκε σε ιδανικές συνθήκες, με αποτέλεσμα την μη αποδοτική διάσπαση οργανικής ουσίας. Ενδεχομένως, η διαφοροποίηση που παρατηρείται να οφείλεται στις συνθήκες κομποστοποίησης του σωρού μίξης. Στον όμοιο σωρό τομάτας, όπου οι συνθήκες υψηλότερης υγρασίας απέδωσαν καλύτερα στην δοκιμή. Ωστόσο, και τα δύο υποστρώματα εμφάνισαν φυτοθεραπευτικότητα τους σπόρους δοκιμής (GI > 100%).

Στο παρακάτω Πίνακα 5 παραθέτονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα σύγκρισης,

Πίνακας 5- Αποτελέσματα από σύγκριση βάσει υλικού

Υλικό	Θερμοκρασία	Υγρασία (%)	pH	EC (mS/ cm)	VS (%)	C/N	Δείκτης βλαστικότητας (%)	Καλλιέργεια
Τομάτα	Χαμηλότερη	28	9,4	3,75	20	22	Ραπάνι : 235	Πιο αποδοτικό
							Μαρούλι: 254,5	
							Κάρδαμο : 150	
Μίξη	Υψηλότερη	24	9	4,87	20	15	Ραπάνι : 200	
							Μαρούλι: 130	
							Κάρδαμο : 118	

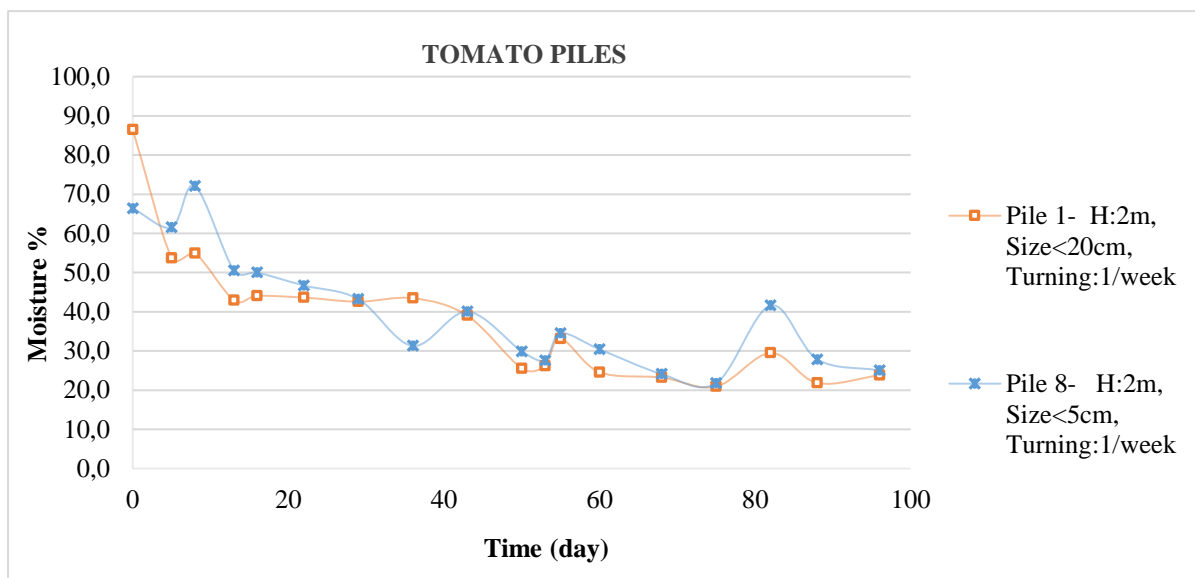
5.2 Σύγκριση βάσει σωματιδίων άλεσης

Οι σωροί που πρόκειται συγκριθούν αποτελούνται από το ίδιο υλικό, τους διαφέρουν στο μέγεθος σωματιδίων άλεσης. Πιο αναλυτικά, θα συγκριθούν,

Σωρός 1₁, ύψους 2 μέτρων, από υλικό τομάτας, με συχνότητα αερισμού μία φορά την εβδομάδα και μέγεθος σωματιδίων μικρότερο από 20 εκατοστά.

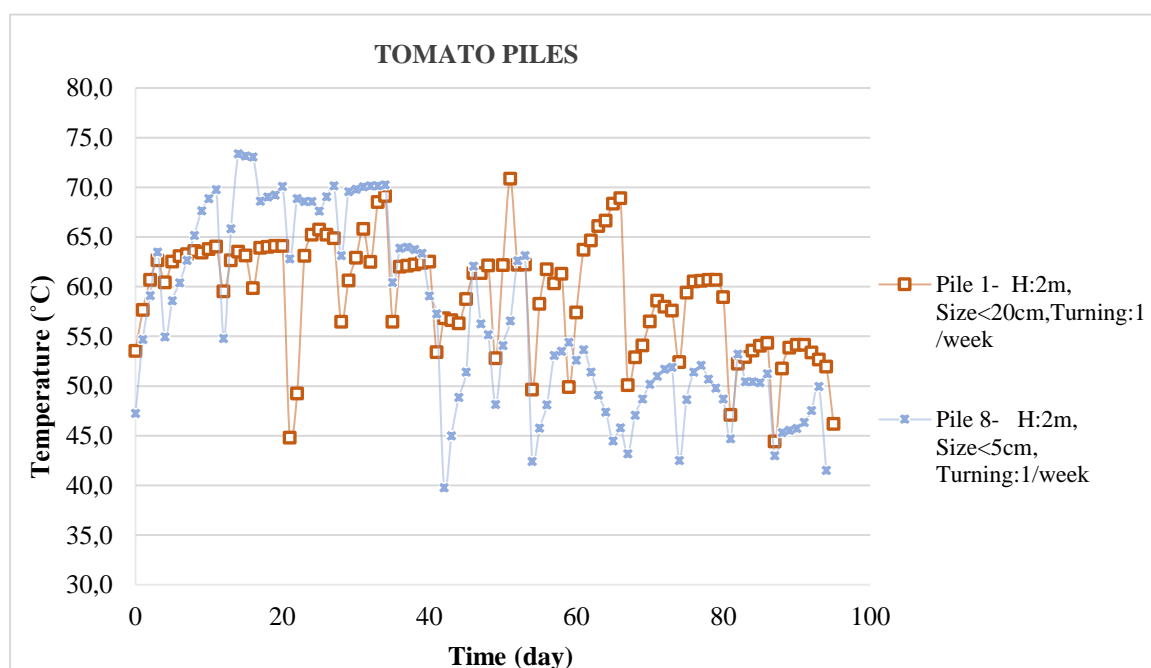
Σωρός 8, ύψους 2 μέτρων από υλικό τομάτας, με συχνότητα αερισμού μια φορά την εβδομάδα και μέγεθος σωματιδίων μικρότερο από 5 εκατοστά.

Στο διάγραμμα 50 αποτυπώνεται η διακύμανση της υγρασίας κατά την κομποστοποίηση των σωρών. Ο σωρός με τον μεγαλύτερο μέγεθος σωματιδίων άλεσης Νο1, έχει αρχικά υψηλότερη υγρασία. Το μεγαλύτερο μέγεθος σωματιδίων σημαίνει ηπιότερο θρυμματισμό, με αποτέλεσμα καλύτερη συγκράτηση της αρχικής υγρασίας. Τους η συγκράτηση δεν αποτυπώνεται κατά την διάρκεια του πειράματος καθώς τους περιγράφεται στο διάγραμμα(), η υγρασία έπειτα την 5^η ημέρα πέφτει κατακόρυφα. Επιπλέον, τους αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι μεγαλύτεροι δίοδοι αερισμού που δημιουργούνται, έχουν ως αποτέλεσμα το υλικό να αερίζεται έντονα τους εξωτερικές ζώνες και το υλικό να χάνει υγρασία εντονότερα. Στον σωρό με το μικρότερο μέγεθος σωματιδίων Νο8, το ποσοστό υγρασίας είναι ομοίως χαμηλό, ιδίως σε ημέρες όπου παρουσιάζεται άνοδος της θερμοκρασίας. Είναι σημαντική η διατήρηση της υγρασίας άνω του 35-40% και για τους δύο σωρούς σύγκρισης.

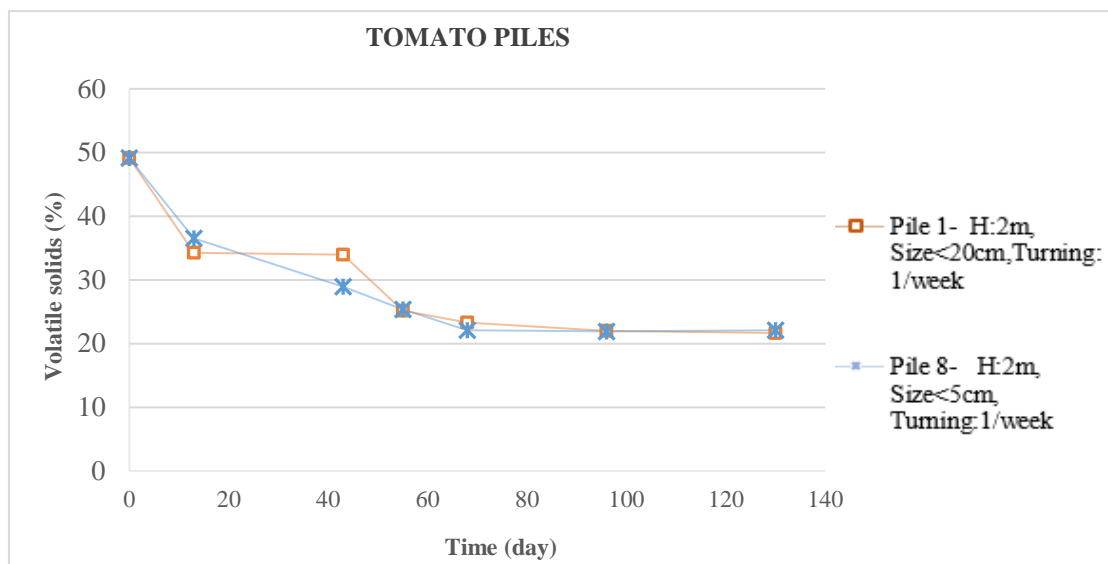


Διάγραμμα 35- Σύγκριση υγρασίας βάσει μεγέθους σωματιδίων

Στο Διάγραμμα 51 παρουσιάζεται τα αποτελέσματα από την παρακολούθηση θερμοκρασίας για τους συγκρίσιμους σωρούς. Το μεγαλύτερο μέγεθος σωματιδίων οδηγεί σε αναστολή έναρξης τους διεργασίας και σε μεγαλύτερους χρόνους κομποστοποίησης λόγω τους μικρής ενεργής επιφάνειας δράσης των μικροοργανισμών. Είναι δυνατόν να παρατηρηθεί από τα διαγράμματα θερμοκρασίας και από το Διάγραμμα 52 όπου παρουσιάζεται η μεταβολή των πτητικών στερεών. Η θερμοκρασία του σωρού με τα μεγάλα σωματίδια άλεσης εμφανίζει άνοδο έπειτα από τους 20 ημέρες, ακόμα από το διάγραμμα πτητικών στερεών, η οργανική ουσία στο διάστημα μεταξύ 20 με 40 ημέρες παραμένει σταθερή, ενώ αναμένεται πτώση.

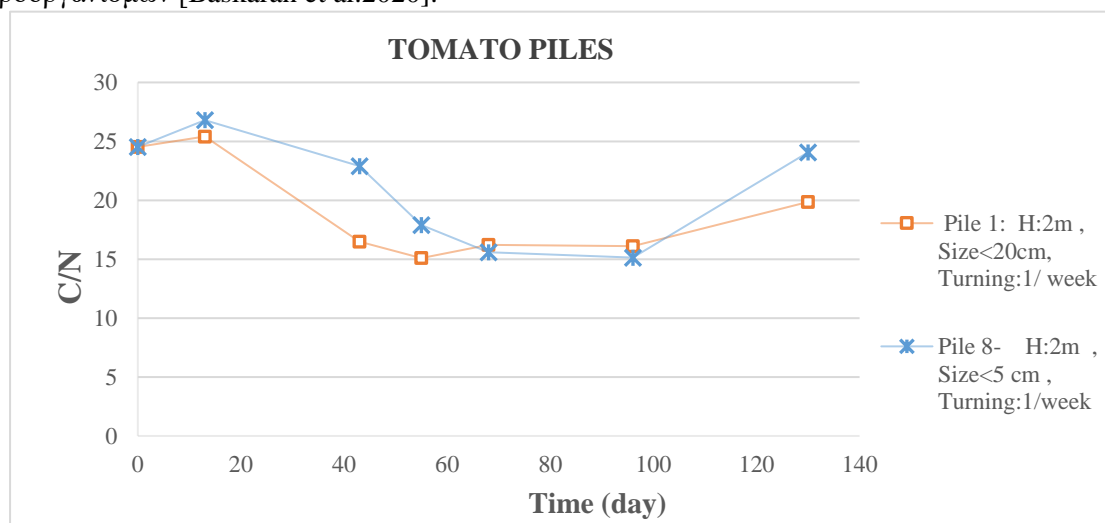


Διάγραμμα 36- Σύγκριση θερμοκρασίας βάσει μεγέθους σωματιδίων



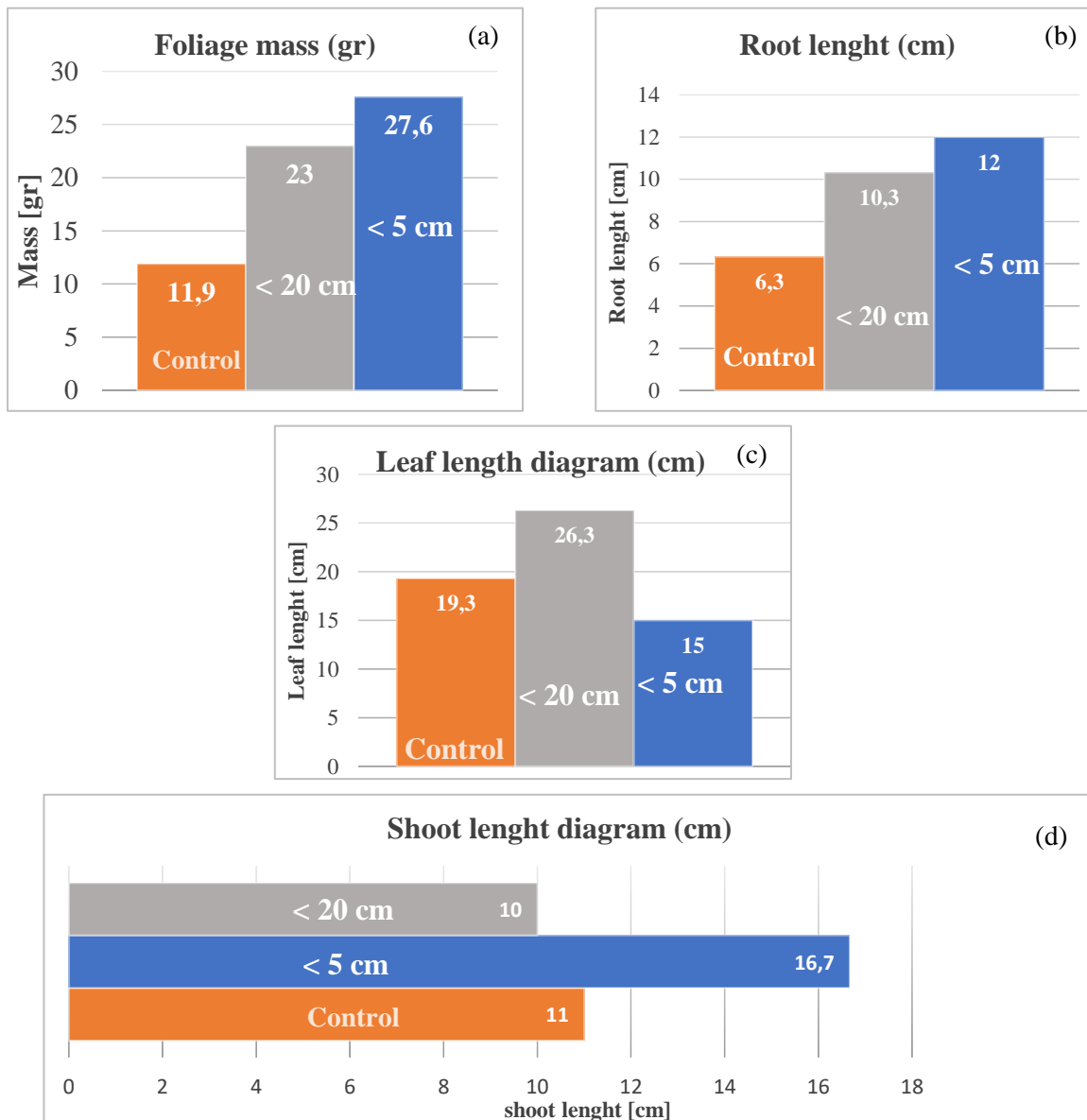
Διάγραμμα 37-Σύγκριση πτητικών στερεών βάσει μεγέθους σωματιδίων

Στο πέρας τους ωρίμανσης, παρατηρείται πτώση του στοιχειακού αζώτου με αποτέλεσμα την αύξηση του λόγου άνθρακα άζωτου που εντοπίζεται στο Διάγραμμα 53. Στον σωρό με το μεγαλύτερο μέγεθος σωματιδίων Νο8, εντοπίζεται μεγαλύτερη πτώση, συνεπώς και μεγαλύτερη αύξηση του λόγου. Ο λόγος άνθρακα αζώτου είναι επιθυμητός για τα εδαφικά υποστρώματα μεταξύ 25-35 [Kavdir,2020], ωστόσο η μείωση του αζώτου μειώνει την αποδοτικότητα του προϊόντος [Hong 2022, Steiner et al. 2010]. Για την δημιουργία τους προϊόντος υψηλότερης ποιοτικής αξίας προτείνεται η αύξηση του αρχικού λόγου άνθρακα άζωτου, με την πρόσμιξη υλικού πλούσιο σε άνθρακα (π.χ biochar που δοκιμάστηκε σε παρεμφερείς μελέτες). Προτείνεται η ένταξη υλικού τους η πυρήνας από ελαιοτριβεία καθώς και επιπλέον ξυλώδες υλικό και είναι διαθέσιμο στην περιοχή. Επιπλέον είναι απαραίτητος ο εντοπισμός των αιτιών μείωσης αζώτου στο στάδιο τους ωρίμανσης και η παρακολούθηση στο στάδιο αυτό. Εκτιμάται πως εξαιτίας του ηπιότερου αερισμού στο διάστημα αυτό και συγχρόνως οι χαμηλές συνθήκες υγρασίας, δημιουργήθηκε ευνοϊκό περιβάλλον πολλαπλασιασμού αναερόβιων μικροοργανισμών [Baskaran et al.2020].

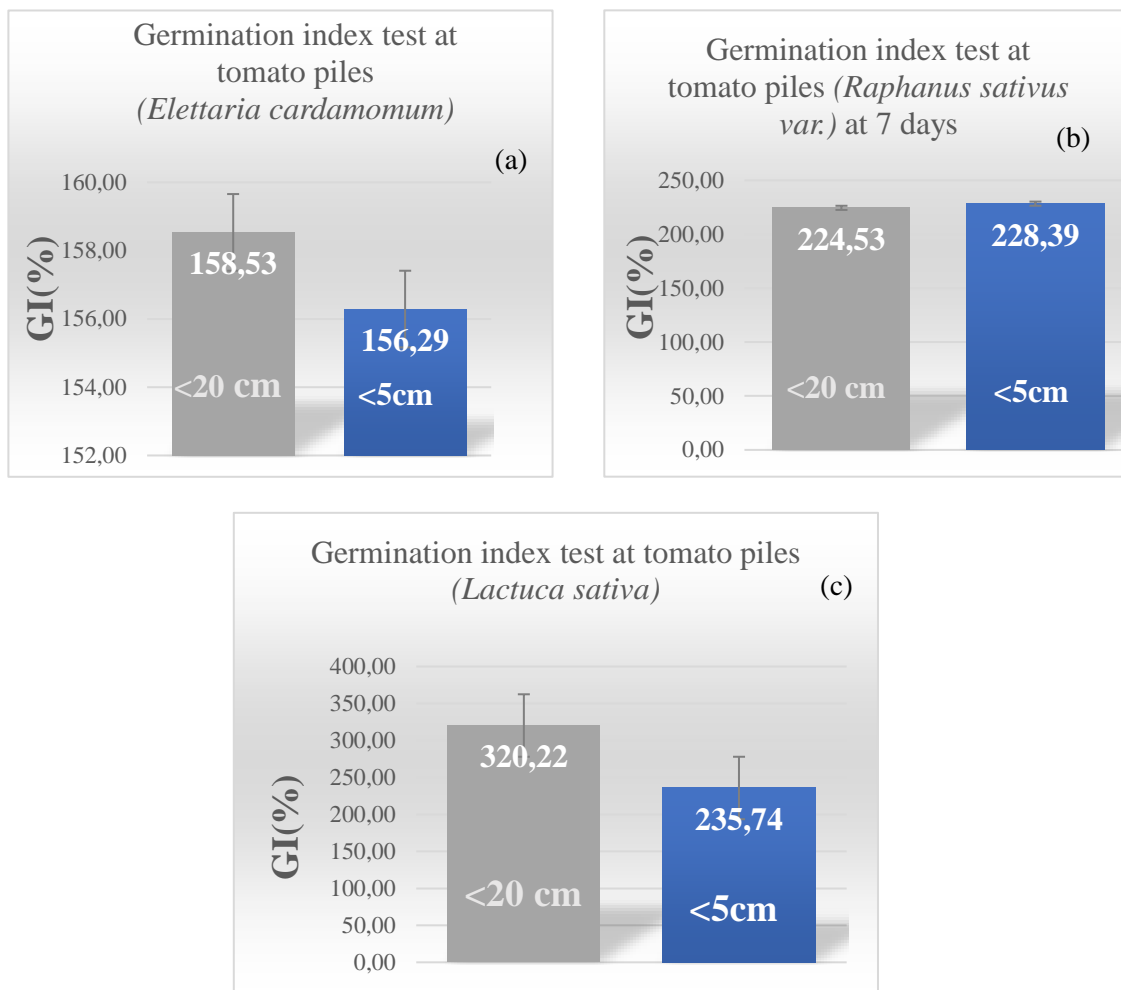


Διάγραμμα 38 – Σύγκριση λόγου άνθρακα-αζώτου βάσει μεγέθους σωματιδίων

Η ενσωμάτωση εδαφοβελτιωτικού από σωρό με μικρό μέγεθος σωματιδίων άλεσης, προσέδωσε τα βέλτιστα αποτελέσματα στην καλλιέργεια μαρουλιών, με ποσοστό αύξησης μάζας 132%. Ομοίως ικανοποιητικά αποτελέσματα παρουσιάζονται και για το εδαφοβελτιωτικό από μεγαλύτερα σωματίδια καθώς υπολογίζεται πως η μάζα αυξήθηκε κατά 93% από την τυφλή καλλιέργεια [Διάγραμμα 54.a]. Επιπλέον, εντοπίζεται αύξηση του μήκους του ριζικού συστήματος κατά την ενσωμάτωση των εδαφοβελτιωτικών [Διάγραμμα 54.b].



Διάγραμμα 39 – Σύγκριση ανάπτυξης φυτών βάσει μεγέθους σωματιδίων



Διάγραμμα 40 – Δείκτες βλαστικότητας για την σύγκριση βάσει μεγέθους σωματιδίων

Τα παραπάνω Διαγράμματα 55 αποτυπώνουν τους δείκτες βλαστικότητας για την σύγκριση βάσει μεγέθους σωματιδίων άλεσης. Οι τιμές των δεικτών και ιδίως στον κάρδαμο , ραπάνι δεν εμφανίζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις. Η διαφοροποίηση των δεικτών για τα δύο υποστρώματα εντοπίζεται τους σπόρους μαρουλιού όπου το μεγαλύτερο μέγεθος σωματιδίων φαίνεται να έχει θετικότερη επίδραση (GI @ 20cm : 320%, GI @ 5cm : 235%). Ενώ το μεγαλύτερο μέγεθος σωματιδίων δεν είναι προτιμητέο για την κομποστοποίηση, το τελικό υπόστρωμα δεν φέρει φυτοτοξικότητα σύμφωνα με τους δείκτες βλαστικότητας.

Στον παρακάτω Πίνακα 6 δίνονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα σύγκρισης,

Πίνακας 6-Σύγκριση βάσει μεγέθους σωματιδίων

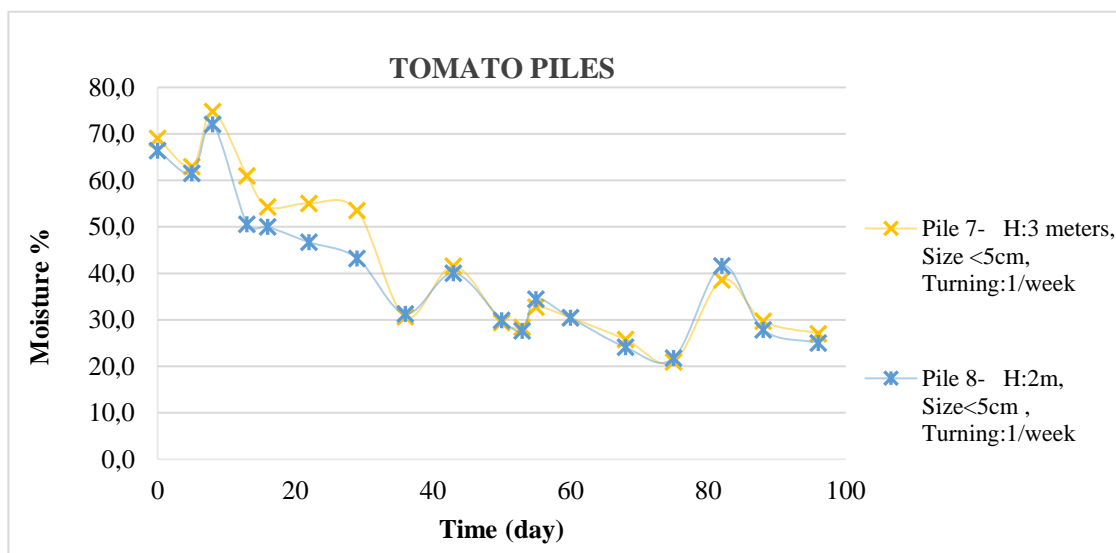
Μέγεθος μικρότερο από	Θερμοκρασία (Τελική)	Υγρασία (Τελικό %)	pH	EC (mS/cm)	VS (%)	C/N	Δείκτης βλαστικότητας (%)	Καλλιέργεια
20 cm	Υψηλή	25	8,6	4,8	22	20	Κάρδαμο : 158	
							Μαρούλι: 320	
							Ραπάνι :224	
5cm		25	9,4	5	22	24	Κάρδαμο : 156	Πιο αποδοτικό
							Μαρούλι :228	
							Ραπάνι : 235	

5.3 Σύγκριση βάσει ύψους σωρών

Οι σωροί που πρόκειται να συγκριθούν διαφέρουν ως τους το ύψος. Πιο αναλυτικά, θα συγκριθούν, **Σωρός 7, ύψους 3 μέτρων**, από υλικό τομάτας, με συχνότητα αερισμού μία φορά την εβδομάδα και μέγεθος σωματιδίων μικρότερο από 5 εκατοστά.

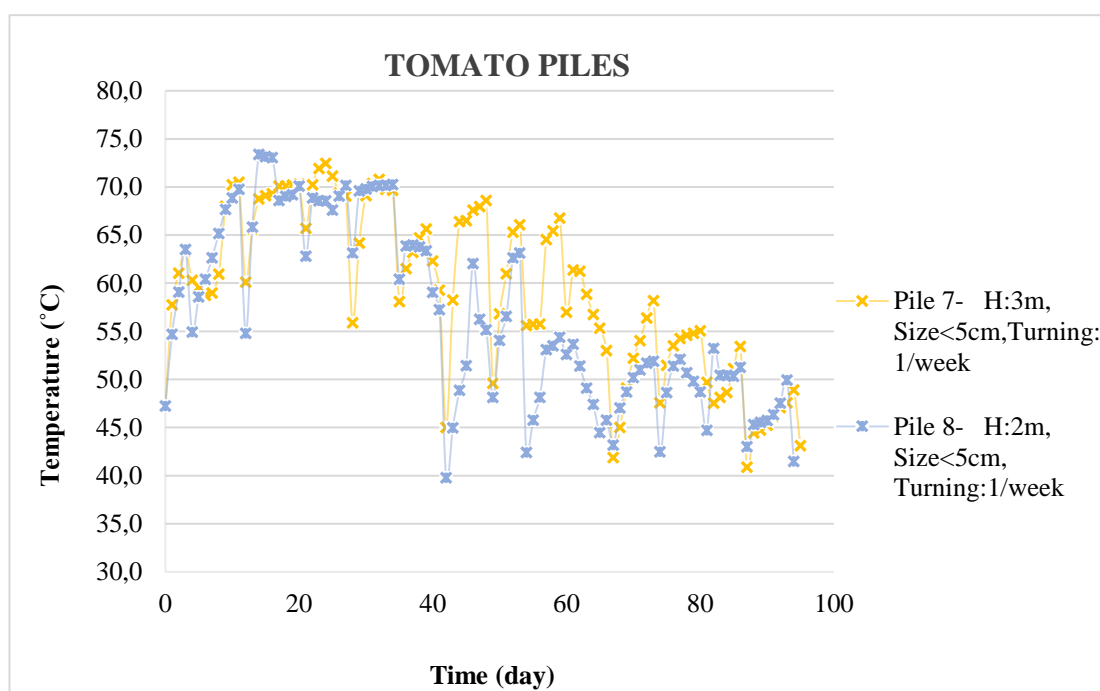
Σωρός 8, ύψους 2 μέτρων από υλικό τομάτας, με συχνότητα αερισμού μια φορά την εβδομάδα και μέγεθος σωματιδίων μικρότερο από 5 εκατοστά.

Στο παρακάτω Διάγραμμα 56 παρουσιάζεται η υγρασία κατά την διεργασία τους κομποστοποίησης. Λόγω του διαφορετικού ύψους, οι σωροί διαφέρουν και ως τους τον όγκο. Η κατανομή του υλικού στο εσωτερικό των σωρών διαφέρει και παρατηρείται πως στο εσωτερικό του σωρού μεγαλύτερου ύψους συγκρατείται η υγρασία εντονότερα. Θα μπορούσε να εξηγηθεί στο γεγονός πως τα εξωτερικά στρώματα είναι παχύτερα και ο αερισμός είναι λιγότερος στον υψηλό σωρό.

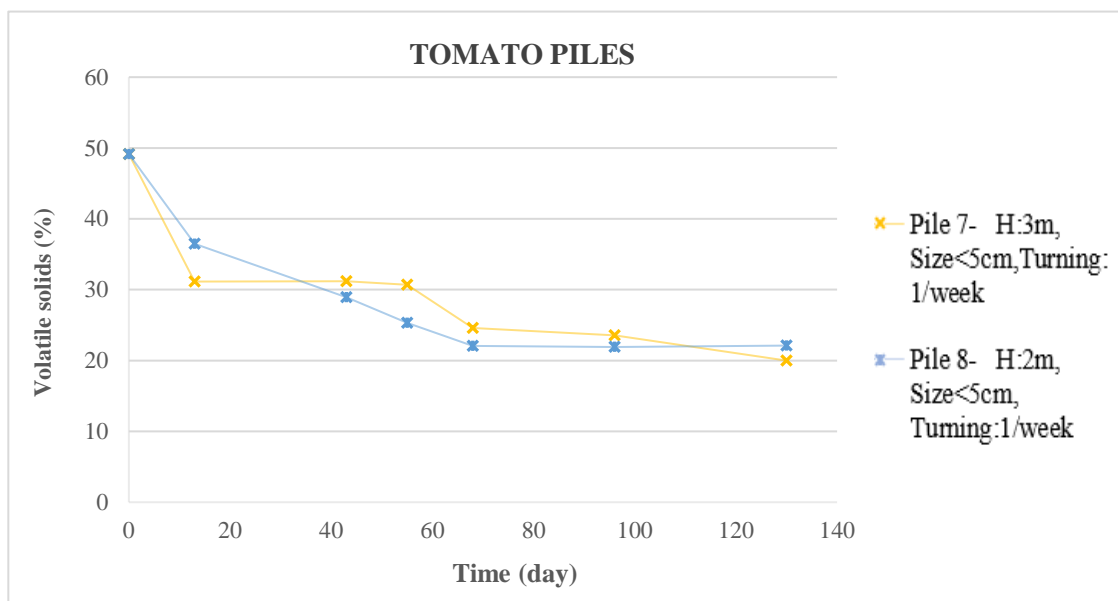


Διάγραμμα 41 – Σύγκριση υγρασίας βάσει ύψους

Από το διάγραμμα θερμοκρασίας, προκύπτει πως οι σωροί έως τους 20 ημέρες κινούνται στα ίδια θερμοκρασιακά εύρη. Ο υψηλός σωρός No7, στο διάστημα των 20 ημερών διαθέτε αρκετή υγρασία. Με αποτέλεσμα η θερμοκρασία να είναι ελαφρώς χαμηλότερη από ότι τον μικρότερο σωρό. Έπειτα από τους 40 ημέρες, που υπήρξε απώλεια υγρασίας στον υψηλότερο σωρό οι θερμοκρασίες εμφάνισαν άνοδο. Η διεργασία φαίνεται να κινείται γρηγορότερα στον μικρότερο σωρό No8 καθώς εντοπίζεται πτώση θερμοκρασίας και παρατηρώντας το Διάγραμμα 58 μεταβολής πτητικών στερεών παρατηρείται πως η οργανική ουσία σταθεροποιείται τους 60 ημέρες. Η πτώση τους θερμοκρασίας είναι αναμενόμενη και φανερώνει την αναστολή δράσης των μικροοργανισμών [Χρόνη, 2017].

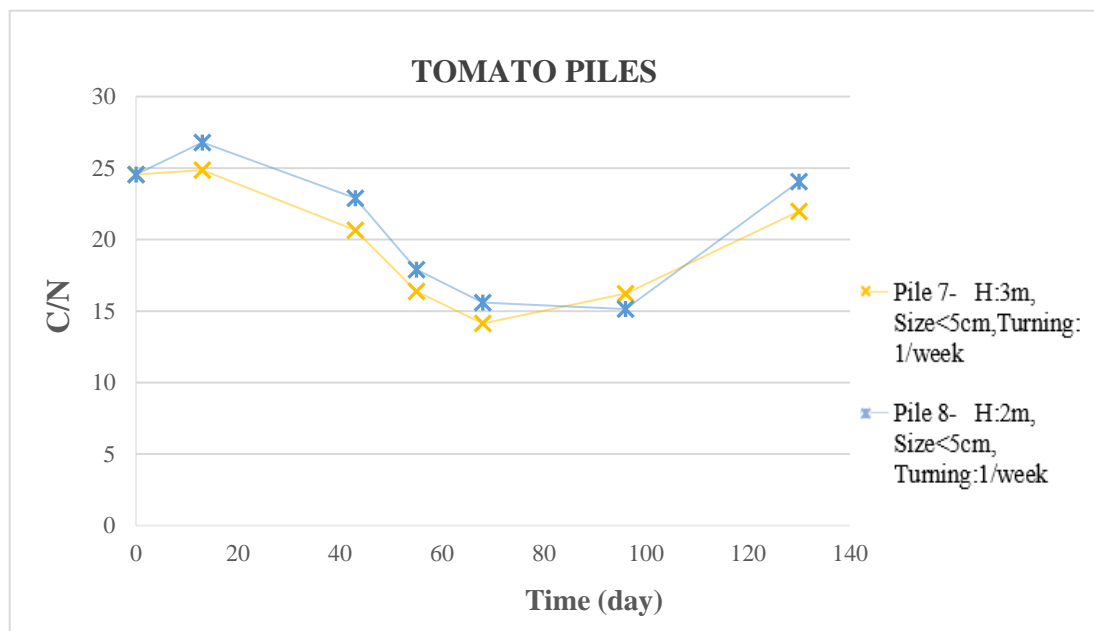


Διάγραμμα 42- Σύγκριση θερμοκρασίας βάσει ύψους



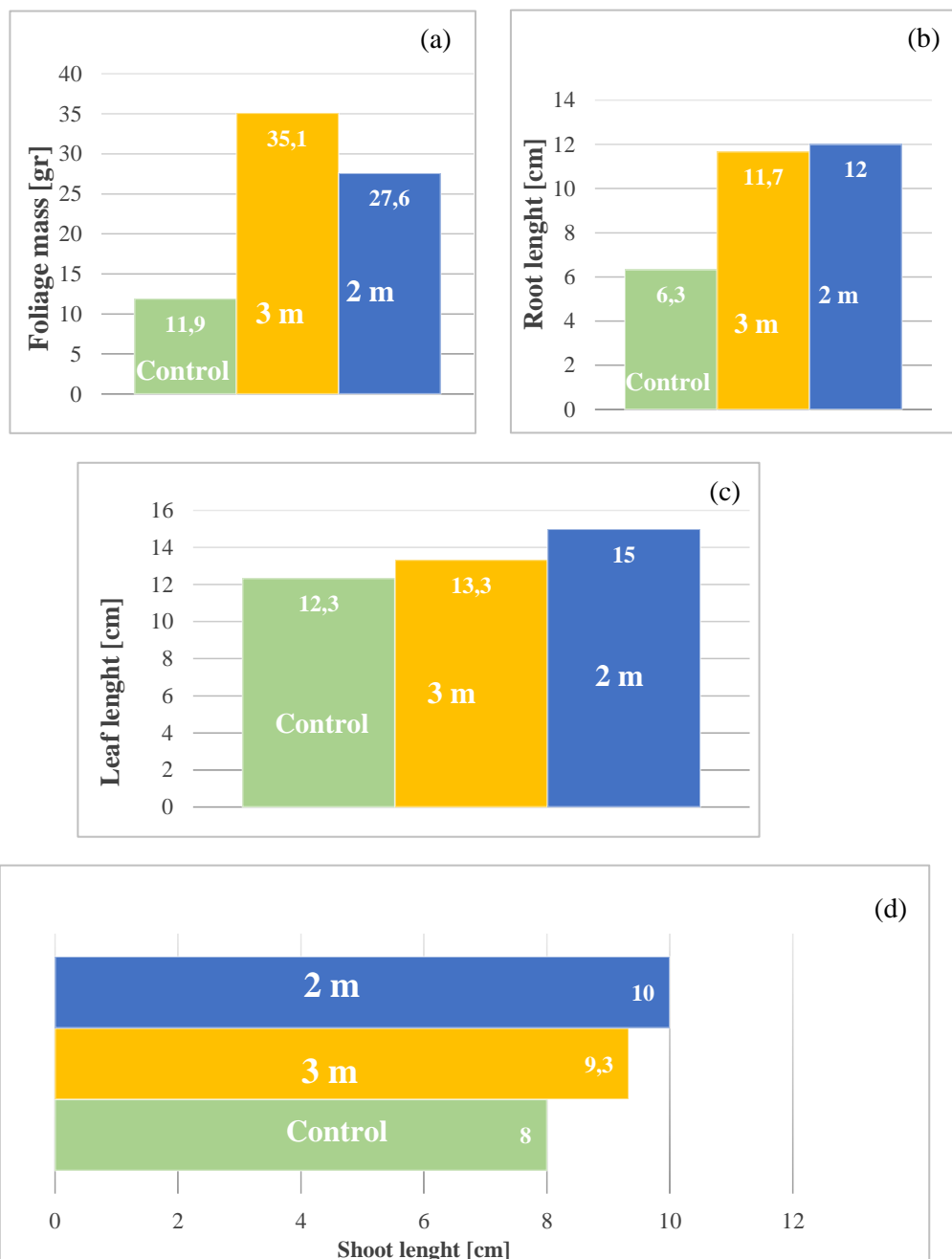
Διάγραμμα 44 – Σύγκριση πτητικών στερεών βάσει ύψους

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δοκιμών οι σωροί παρατηρείται πως δεν σημειώνουν σημαντικές διαφοροποιήσεις. Στο Διάγραμμα 59 παρουσιάζεται ο λόγος άνθρακα αζώτου κατά την κομποστοποίηση. Οι δύο σωροί ακολουθούν κοινή πορεία ελάττωσης άζωτου και άνθρακα στην διάρκεια τους διεργασίας. Έπειτα από την ωρίμανση προκύπτει μείωση 0,4% του αζώτου και για τους δύο σωρούς.

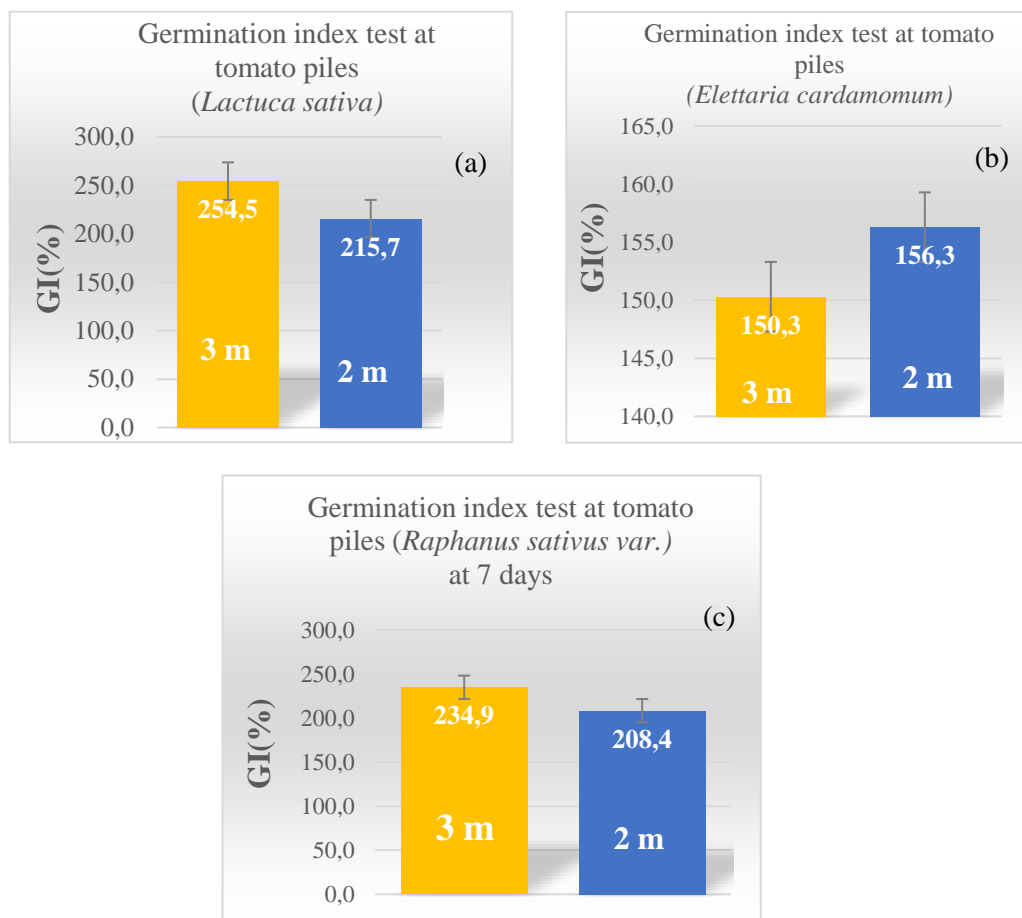


Διάγραμμα 43-Λόγος άνθρακα αζώτου για σύγκριση βάσει ύψους

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με την τυφλή καλλιέργεια, παρατηρείται η εδαφοβελτιωτική ικανότητα των δύο υποστρωμάτων. Τα εδαφοβελτιωτικά απέδωσαν όμοια σε σχέση με την τυφλή καλλιέργεια. Ο ψηλός σωρός εμφάνισε 190% αύξηση μάζας φυτών και ο χαμηλός σωρός 132%, [Διάγραμμα 60.a]. Επιπλέον το μήκος του ριζικού συστήματος ενισχύθηκε κατά 90% και 85%, για τον υψηλό και χαμηλό σωρό αντίστοιχα [Διάγραμμα 60.b]. Η καλλιέργεια με την ενσωμάτωση εδαφοβελτιωτικού από τον υψηλό σωρό φαίνεται να απέδωσε ελαφρώς καλύτερα από ότι στον χαμηλό σωρό.



Διάγραμμα 45 – Σύγκριση ανάπτυξης φυτών βάσει ύψους



Διάγραμμα 46 -Σύγκριση δεικτών βλαστικότητας βάσει ύψους

Στα παραπάνω διαγράμματα παρουσιάζονται οι δείκτες βλαστικότητας για τους εξεταζόμενους σωρούς. Στις όλες τις δοκιμές οι δείκτες προκύπτουν φυτοθρεπτικοί ($GI > 100\%$). Δεν παρατηρούνται έντονες διαφοροποιήσεις μεταξύ των δεικτών, ωστόσο οι δείκτες βλαστικότητας προέκυψαν μεγαλύτεροι για τον σωρό με το μεγαλύτερο. Από τα διαγράμματα θερμοκρασίας και πτητικών στερεών προέκυψε το συμπέρασμα πως η αποδόμηση εξελίχθηκε γρηγορότερα. Ωστόσο οι δείκτες και τα αποτελέσματα από την καλλιέργεια μαρουλιών φανερώνουν πως πάρα τον μικρό χρόνο κομποστοποίησης του χαμηλότερου σωρού, το προϊόν είχε μικρότερη εδαφοβελτιωτική ικανότητα.

Πίνακας 7-Σύγκριση βάσει ύψους

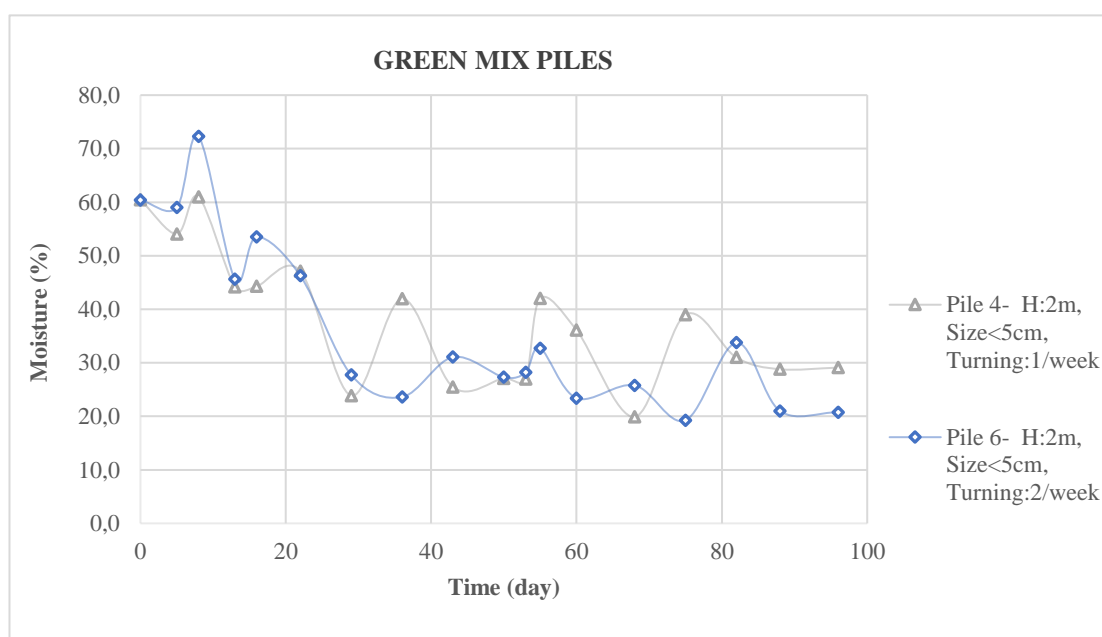
	Θερμοκρασία (Τελική)	Υγρασία (Τελικό %)	pH	EC [mS/cm]	VS (%)	C/N	Δείκτης βλαστικότητας (%)	Καλλιέργεια
Υψηλός σωρός	Υψηλότερη	27,1	9,4	3,75	20	22	Κάρδαμο:150,3	Πιο αποδοτικό
							Μαρούλι:254,5	
							Ραπάνι:234,9	
Χαμηλός σωρός		25	9,4	5,06	22	24	Κάρδαμο:156,3	
							Μαρούλι:215,7	
							Ραπάνι:208,4	

5.4 Σύγκριση βάσει συχνότητας αερισμού

Τέλος, πρόκειται να συγκριθούν σωροί πράσινης μίξης με διαφορετική συχνότητα αερισμού. Τους σε προηγούμενες συγκρίσεις οι σωροί διαφέρουν κατά μόνο ένα παράγοντα κομποστοποίησης. Πιο αναλυτικά οι συγκρίσιμοι σωροί είναι,

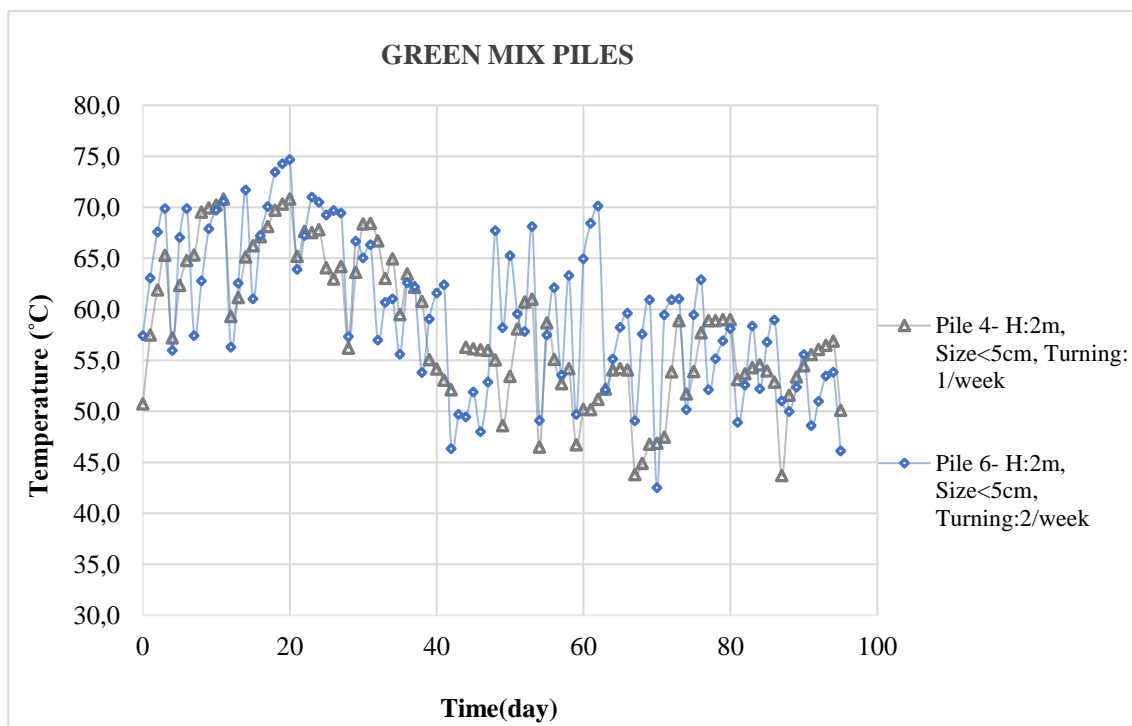
1. **Σωρός 4**, ύψους 2 μέτρων, με υλικό την πράσινη μίξη, μέγεθος σωματιδίων μικρότερο από 5 εκατοστά και συχνότητα αερισμού 1 φορά την εβδομάδα.
2. **Σωρός 6**, ύψους 2 μέτρων, με υλικό την πράσινη μίξη, μέγεθος σωματιδίων μικρότερο από 5 εκατοστά και συχνότητα αερισμού 2 φορές την εβδομάδα.

Στο Διάγραμμα 62 εντοπίζεται η υγρασία κατά την διάρκεια της διεργασίας. Είναι φανερή η ελάττωση του ποσοστού υγρασίας στο σωρό με την εντονότερη ανάδευση. Κατά την ανάδευση το υλικό αερίζεται και το υλικό στεγνώνει [Tang et al.,2022]. Ο έντονος αερισμός είναι προτιμητέος και αποτελεί βασική συνθήκη για την επιβίωση των ωφέλιμων μικροβίων [Nemet, 2021]. Ωστόσο, επιπλέον σημαντικός παράγοντας για την επιβίωση των μικροοργανισμών αποτελεί η υγρασία, καθώς το ποσοστό υγρασίας επηρεάζει τα φυσιολογικά χαρακτηριστικά των μικροβίων. Υποπτεύεται πως ο αερισμός θα ήταν ωφέλιμος για την μικροβιακή δράση εάν το ποσοστό υγρασίας διατηρούνταν μεταξύ 35-45% σε όλη την διάρκεια της διεργασίας.



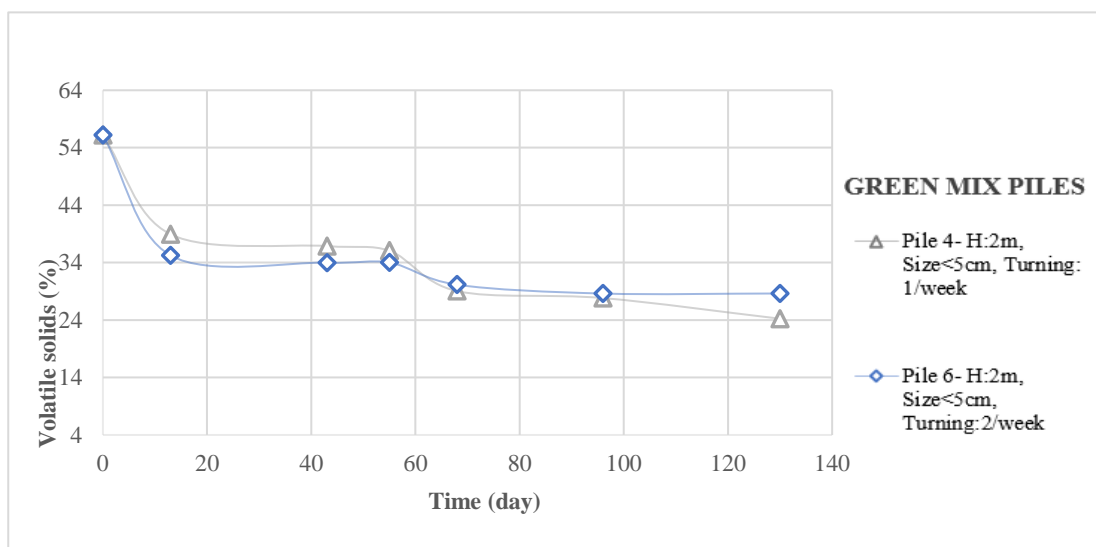
Διάγραμμα 47- Σύγκριση υγρασίας βάσει συχνότητα αερισμού

Το χαμηλό ποσοστό υγρασίας συνέβαλλε στην άνοδο της θερμοκρασίας των σωρών και ιδίως για τον σωρό με την εντονότερη ανάδευση όπως αποτυπώνεται και στο Διάγραμμα 63. Η θερμοκρασία στον σωρό αυτό υπήρξε απαγορευτικά υψηλή για τους αερόβιους μικροοργανισμούς καθώς αυτοί αδρανοποιούνται τους 65° C.



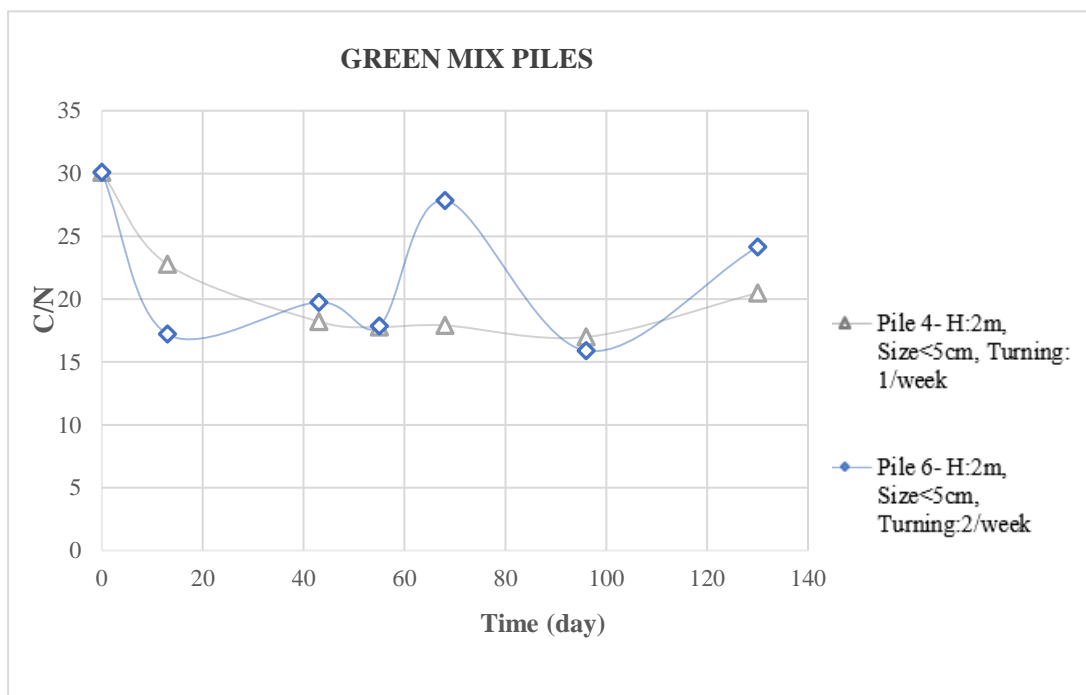
Διάγραμμα 49-Σύγκριση θερμοκρασίας βάσει συχνότητας αερισμού

Από το Διάγραμμα 64 που διακρίνεται το ποσοστό πτητικών κατά την διεργασία δεν παρατηρούνται διαφοροποιήσεις όσο αφορά τους δύο σωρούς.



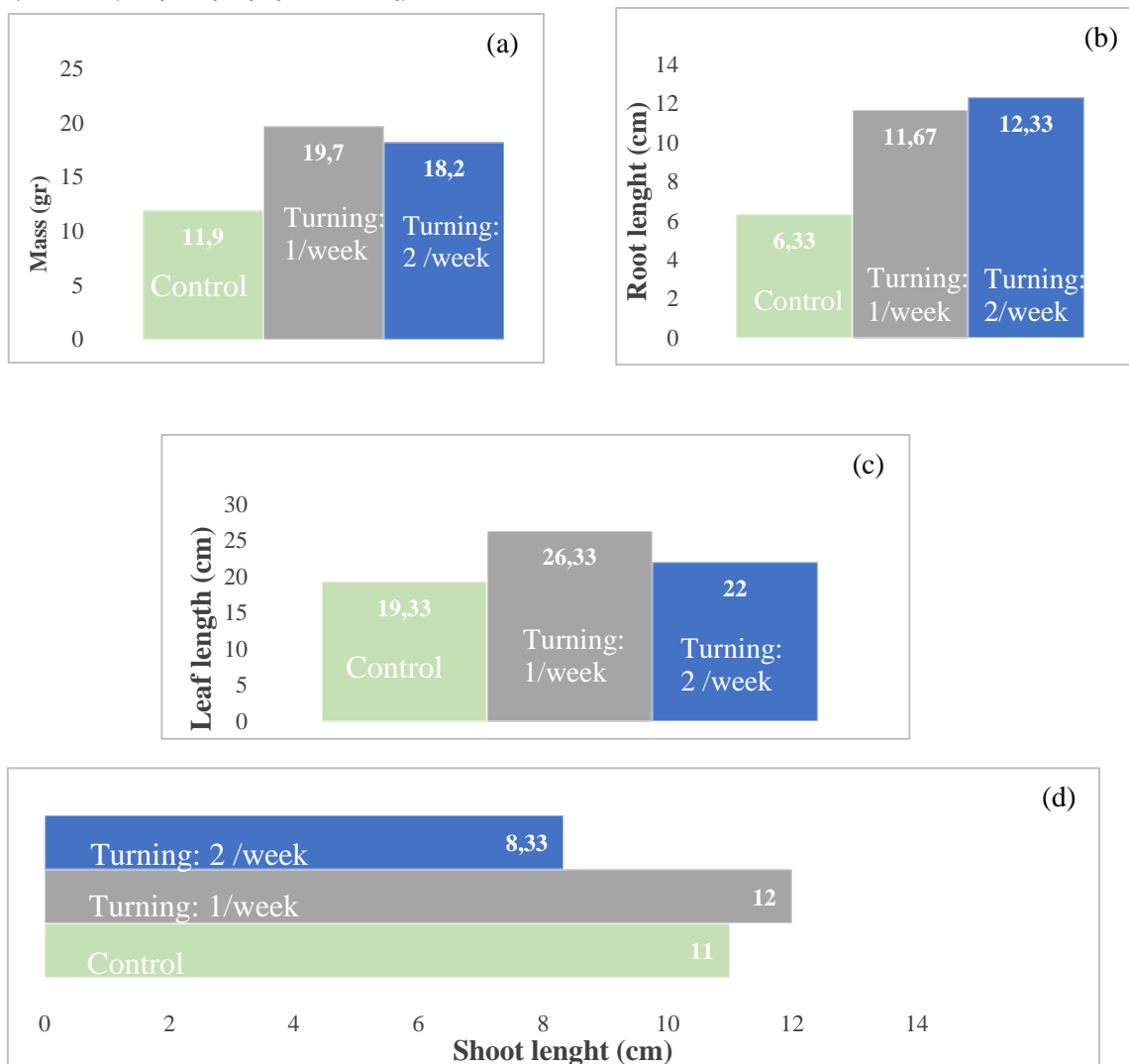
Διάγραμμα 48 -Σύγκριση πτητικών στερεών βάσει συχνότητας αερισμού

Στο Διάγραμμα 65 παρατηρείται η πορεία του λόγου άνθρακα αζώτου για τους δύο συγκρίσιμους σωρούς. Ο σωρός με την ηπιότερη ανάδευση φαίνεται να ακολουθεί μια ομαλή μείωση εξαιτίας της διάσπασης του οργανικού άνθρακα. Στο πέρας της ωρίμανσης έπειτα από την διαφυγή του αζώτου, ο λόγος αυξάνεται. Σε αντίθεση ο σωρός με την υψηλότερη ανάδευση παρουσιάζει έντονες αυξομειώσεις κατά την διάρκεια της διεργασίας. Οι μεταβολές ευθύνονται λόγω των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου [Xiong, 2017]. Μελετητές έχουν εντοπίσει πως η εντονότερη συχνότητα αερισμού, σε συνδυασμό με χαμηλά ποσοστά υγρασίας, επιφέρει έχει και την μεγαλύτερη διαφυγή διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) [Lijuan, 2023]. Η μεταλλοποίηση του άνθρακα σε διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) συμβαίνει μέσω βιοχημικών διεργασιών και κυρίως από τη δραστηριότητα μικροβίων. Η απελευθέρωση του διοξειδίου του άνθρακα κυρίως παρουσιάζεται σε υψηλές θερμοκρασίες [Naushin, 2022], δηλαδή τους συνθήκες του σωρού έντονης ανάδευσης. Συνεπώς για την μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος της διεργασίας είναι σημαντική η παρακολούθηση της υγρασίας και της θερμοκρασίας της κομποστοποίησης.



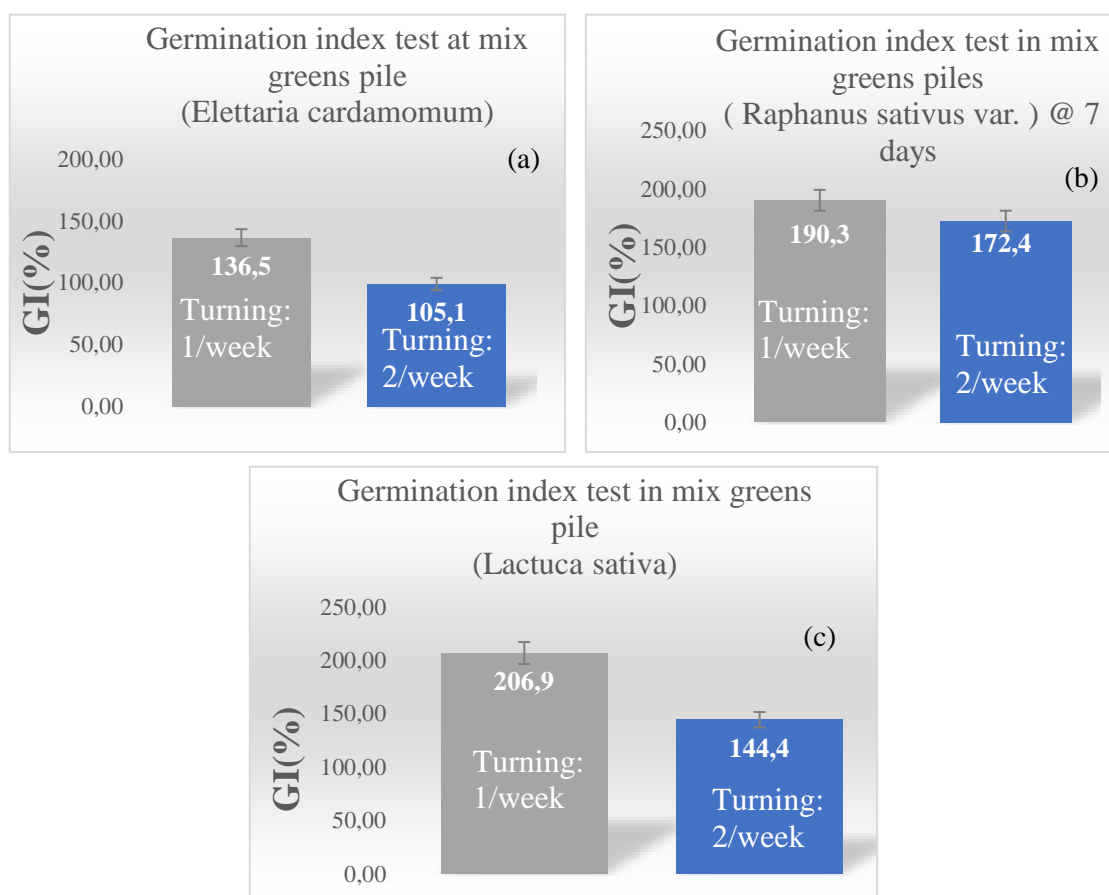
Διάγραμμα 50-Σύγκριση πτητικών στερεών βάσει συχνότητας αερισμού

Ο αερισμός αποτελεί ένα ουσιώδη παράγοντα κατά την αερόβια κομποστοποίηση [Ma et al.,2022]. Μέσω τους ανάδευσης παρέχεται οξυγόνο τους μικροοργανισμούς, οι οποίοι διασπούν την οργανική ύλη. Αναμένονταν πως ο σωρός με εντονότερο αερισμό να παρουσίαζε αποδοτικότερη διαδικασία κομποστοποίησης καθώς δημιουργεί συνθήκες πολλαπλασιασμού αερόβιων μικροοργανισμών [Nemet, 2021]. Ωστόσο, φαίνεται πως έντονος αερισμός συνέβαλε στην πτώση τους υγρασίας όπου οδήγησε στην αύξηση θερμοκρασίας του σωρού, μειώνοντας κατά συνέπεια την αποδοτικότητα τους κομποστοποίησης. Η παραπάνω παρατήρηση επιβεβαιώνεται από τους δείκτες βλαστικότητας και αποτελέσματα στη καλλιέργεια μαρουλιών. Στα Διαγράμματα 66 εντοπίζονται τα αποτελέσματα από την καλλιέργεια μαρουλιών. Σε σχέση με την τυφλή καλλιέργεια, τα δύο υποστρώματα εμφάνισαν εδαφοβελτιωτική ικανότητα. Η απόδοση των εδαφοβελτιωτικών είναι όμοια. Το εδαφοβελτιωτικό από σωρό με ηπιότερη ανάδευση αποδίδει ελαφρώς καλύτερα σε τους τους μετρήσεις εκτός του ριζικού συστήματος. Τα φυτά με εδαφοβελτιωτικό από σωρό έντονης ανάδευσης, εμφάνισαν μακρύτερο ριζικό σύστημα.



Διάγραμμα 51 – Σύγκριση ανάπτυξης φυτών βάσει συχνότητας αερισμού

Ομοίως στην δοκιμή βλαστικότητα το εδαφικό υπόστρωμα από σωρό ήπιας ανάδευσης εμφάνισε μεγαλύτερη φυτοθρεπτικότητα. Στα παρακάτω διαγράμματα, απεικονίζονται οι δοκιμές σε σπόρους καρδάμου, ραπανιού και μαρουλιού. Από τους μετρήσεις προκύπτει πως και τα δύο υποστρώματα είναι φυτοθρεπτικά αφού ο δείκτης βλαστικότητα είναι μεγαλύτερος από 100% [Wang et al., 2022]. Η μεγαλύτερη διαφοροποίηση των δεικτών προκύπτει τους σπόρους μαρουλιού, όπου οι δείκτες στα υποστρώματα σύγκρισης διαφέρουν κατά 60%. Ο δείκτης βλαστικότητα στο μαρούλι έχει ιδιαίτερη σημαντικότητα για την σύγκριση, καθώς τους να αναφέρθηκε προηγουμένως έχει την μεγαλύτερη ευαισθησία σε φυτοξικές ενώσεις [Ifeoluwa, 2015].



Διάγραμμα 52- Σύγκριση δεικτών βλαστικότητας βάσει συχνότητας αερισμού

Παρακάτω δίνεται ο Πίνακας 8 που περιλαμβάνει συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της σύγκρισης,

Πίνακας 8-Σύγκρισης βάσει συχνότητας αερισμού

Συχνότητα αερισμού	Θερμοκρασία (Τελική)	Υγρασία (Τελικό %)	pH	EC (mS/cm)	VS (%)	C/N	Δείκτες βλαστικότητας (%)	Καλλιέργεια
1 φορά την εβδομάδα		29	9,1	3,8	24	20	Ραπάνι: 190	Αποδοτικότερο
							Μαρούλι: 206	
							Κάρδαμο: 136	
2 φορές την εβδομάδα	Υψηλή	20	9,4	4,6	28	24	Ραπάνι: 172	
							Μαρούλι: 144	
							Κάρδαμο: 105	

Κεφάλαιο 6 – Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα

6.1 Θερμοκρασία

Οι μετρήσεις που πάρθηκαν στην επιφάνεια του σωρού δεν αποκάλυψαν σημαντικές διαφορές μεταξύ τους, διότι τα σημεία μέτρησης τοποθετήθηκαν σε μια ζώνη βάθους 80 εκατοστών όπου επηρεάζεται από το ηλεκτρόδιο του θερμομέτρου. Αντίθετα οι μετρήσεις θερμοκρασία που πάρθηκαν από την τομή διαφοροποιούνται σημαντικά στα διάφορα βάθη του σωρού. Συγκεκριμένα, στα πρώτα περίπου επιφανειακά πέντε εκατοστά, η θερμοκρασία ισορροπεί με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, ενώ το υλικό παραμένει πλήρως ξηρό. Αυτό υποδηλώνει ότι η διαδικασία τους κομποστοποίησης δεν εκτυλίσσεται στην επιφάνεια. Στη συνέχεια, ακολουθεί ένα στρώμα με χαμηλή υγρασία, προστατευμένο από το εξωτερικό στρώμα. Σε αυτήν τη ζώνη, ιδίως στα 2/3 του ύψους του σωρού, παρατηρήθηκε η υψηλότερη θερμοκρασία. Οι ατμοί από το φαινόμενο τους καμινάδας θερμαίνουν την υψηλή ζώνη. Έπειτα, εντοπίζεται η μέση ζώνη με μεγαλύτερη υγρασία και χαμηλότερο αερισμό. Τέλος, οι δύο ζώνες στραγγίζουν τους τη χαμηλότερη ζώνη, εμποδίζοντας την αύξηση τους θερμοκρασίας σε αυτή. Η εξάρτηση τους θερμοκρασία με την απόσταση από την επιφάνεια δικαιολογείται από την αδυναμία του σωρού να συμπεριφερθεί σαν ομογενοποιημένο υλικό. Ανάλογα με το βάθος από την επιφάνεια κυριαρχεί διαφορετική κατάσταση συνεπώς και άλλο θερμοκρασιακό εύρος. Ακόμα εντοπίστηκε η μέση θερμοκρασία των σωρών από τους δύο μεθόδους υπολογισμού θερμοκρασίας διέφερε σε υψηλότερες συνθήκες υγρασίας. Η περιεχόμενη υγρασία στον σωρό δημιουργεί ψυχρότερες ζώνες στην βάση του σωρού. Με αποτέλεσμα, η μέση θερμοκρασία από την μέτρηση στην τομή να προκύπτει μικρότερη από την μέτρηση από την επιφάνεια. Σε συνθήκες έλλειψης υγρασίας (< 25% ξ.μ), οι ψυχρές ζώνες να θερμαίνονται και η μέση θερμοκρασία από την μέθοδο της τομής προκύπτει όμοια ή μεγαλύτερη από την μέθοδο μέτρησης από την επιφάνεια.

6.2 Υγρασία

Οι σωροί με υψηλότερα ποσοστά υγρασίας εμφάνισαν και την υψηλότερη επιτυχία στην δοκιμή καλλιέργειας και δεικτών βλαστικότητας. Παρατηρήθηκε πως η τιμή του δείκτη βλαστικότητας επηρεάζεται έντονα από την περιεχόμενη υγρασία των σωρών κατά την διάρκεια του πειράματος. Οι μικρότεροι δείκτες βλαστικότητας εμφανίστηκαν σε σωρούς με την μικρότερη περιεχόμενη υγρασία.

6.3 Μέγεθος σωματιδίων άλεσης

Στο πείραμα επιλέχθηκαν δύο μεγέθη σωματιδίων άλεσης, το μεγαλύτερο μέγεθος (μικρότερο από 20 εκατοστά), δεν ήταν προσοδοφόρο στην διεργασία. Από την μελέτη των διαγραμμάτων θερμοκρασίας φαίνεται πως το μεγαλύτερο μέγεθος καθυστέρησε τον χρόνο κομποστοποίησης καθώς

η ενεργή επιφάνεια που δρούσαν οι μικροοργανισμοί ήταν μικρότερη. Στο πεδίο ακόμη παρατηρήθηκε από τους σωρούς αυτούς, οσμή αμμωνίας που θα μπορούσε να που θα μπορούσε να υποδηλώνει αναερόβιες συνθήκες. Είναι λοιπόν, ωφέλιμο το μικρότερο μέρος σωματιδίων ώστε οι μικροοργανισμοί να δρουν σε μεγαλύτερη ενεργό επιφάνεια και η κομποστοποίηση να γίνεται σε μικρότερους χρόνους πιο αποδοτικά.

6.4 Συχνότητα αερισμού

Μελετώντας τα αποτελέσματα των δοκιμών για τους σωρούς με την έντονη ανάδευση, παρατηρείται πως η κομποστοποίηση λειτούργησε λιγότερο αποδοτικά από ότι στους σωρούς με την ηπιότερη ανάδευση. Η εντονότερη συχνότητα αερισμού εμπλούτιζε τους σωρούς με αέρα, δημιουργώντας έντονα αερόβιες συνθήκες. Συγχρόνως κατά την ανάδευση το υλικό το ποσοστό υγρασίας μειώνονταν, με συνέπεια να αυξάνεται η θερμοκρασία και να αδρανοποιείται η μικροβιακή δράση. Οι σωροί που αναδεύτηκαν με υψηλότερη συχνότητα αερισμού είχαν τους μικρότερους δείκτες βλαστικότητας και απέδωσαν λιγότερο στην καλλιέργεια μαρουλιών. Η διατήρηση τους υγρασίας με συχνά ποτίσματα και συχνός αερισμός υποπτεύεται πως θα έδιναν υψηλής ποιότητας κόμποστ.

6.5 Ύψος σωρού

Η κομποστοποίηση με σωρούς ύψους 3 μέτρων ενδέχεται να παρουσιάζει δυσκολίες στον αερισμό, ιδίως στο εσωτερικό του σωρού. Στο πεδίο στους σωρούς με το μεγαλύτερο ύψος εντοπίστηκε οσμή αμμωνίας υποδηλώνοντας την ύπαρξη αναερόβιων συνθηκών. Ωστόσο οι σωροί των 3 μέτρων παρουσίασαν τα βέλτιστα αποτελέσματα στις δοκιμές δεικτών βλαστικότητας και φυτοκαλλιέργειας. Θα μπορούσε να αιτιολογηθεί από την διατήρηση υψηλότερων επίπεδων υγρασίας εσωτερικό του σωρού κατά τις κρίσιμες μέρες της διεργασίας (0-20 day). Το διάστημα αυτό υποπτεύεται πως λειτούργησε αποδοτικότερα η αποδόμηση και ενισχύθηκε η υδρόλυση φυτοτοξικών ενώσεων. Για τους σωρούς ύψους μικρότερου από 3 μέτρα απαιτούνται περισσότερες διαβροχές διότι λόγω του μικρού του ύψους η υγρασία είναι δυσκολότερο να συγκρατηθεί.

6.6 Μελλοντική έρευνα

Ο υπολογισμός μιας αντιπροσωπευτικής μέτρησης θερμοκρασίας είναι σημαντική παράμετρος για την μελέτη της διεργασίας της κομποστοποίησης. Στην παρούσα διπλωματική εξετάστηκαν δύο μέθοδοι υπολογισμού θερμοκρασίας. Λόγω του χαμηλού ποσοστού υγρασίας εκτιμάται πως οι μετρήσεις των δύο μεθόδων δεν διαφοροποιήθηκαν. Σε μελλοντική έρευνα θα είχε ενδιαφέρον η επανάληψη του πειράματος σε υψηλότερες συνθήκες υγρασίας και εξέταση των δύο μεθόδων υπολογισμού θερμοκρασίας. Το μοντέλο τομής εξέταζε την σχέση θερμοκρασίας-ύψους, θα είχε ενδιαφέρον ο επιπλέον προσδιορισμός σχέσης θερμοκρασίας-πλάτους. Ακόμα, σε μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να προσδιοριστεί η επίδραση της υγρασίας και της συχνότητας αερισμού στην απορροή του αζώτου στην ατμόσφαιρα και η συγκράτηση του με προσθήκη αποβλήτου πλούσιο σε άνθρακα.

6.7 Προτεινόμενες συνθήκες κομποστοποίησης

Συνοψίζοντας, παρέχονται παρακάτω οδηγίες για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας παραγωγής κόμποστ υψηλότερης εδαφοβελτιωτικής αξίας. Στο αρχικό υλικό ο λόγος άνθρακα-αζώτου που προτείνεται είναι 35:1-40:1 για την διατήρηση ισορροπίας των μικροοργανισμών που συμμετέχουν στη διαδικασία. Επιπλέον το ποσοστό υγρασίας είναι σημαντικό να είναι υψηλό (φυτό τομάτας) και σε όλη την διάρκεια της διεργασίας να μην είναι χαμηλότερο 35% (ξηρής μάζας), για την εξασφάλιση ενός επαρκούς υγρού περιβάλλοντος για τους μικροοργανισμούς. Η διαβροχή του υλικού συστήνεται με συχνά μικρά ποτίσματα και με ανάμειξη υγρού αποβλήτου για την προσθήκη οργανικής ουσίας στο υλικό. Ακόμα το μέγεθος σωματιδίων συστήνεται να μην ξεπερνά τα πέντε εκατοστά για την αύξηση της ενεργής επιφάνειας και κατά συνέπεια τον μικρότερο χρόνο κομποστοποίησης. Τέλος, ο σωρός να μην ξεπερνά τα 2 μέτρα και να αναδεύεται 2 φορές την εβδομάδα ώστε να ελέγχεται η θερμοκρασία.

Πίνακας 9- Προτεινόμενες συνθήκες κομποστοποίησης

Υλικό	<ul style="list-style-type: none"> ✚ Τομάτα ή υλικό υψηλής αρχικής υγρασίας ✚ Αρχικός λόγος άνθρακα αζώτου 35:1 , 40:1
Υγρασία	<ul style="list-style-type: none"> ✚ Διατήρηση 35-40% σε όλη την φάση τους διεργασίας
Αερισμός	<ul style="list-style-type: none"> ✚ Έντονη συχνότητα 2 φορές την εβδομάδα
Ύψος	<ul style="list-style-type: none"> ✚ 2 μέτρα για έλεγχο της θερμοκρασίας
Διαβροχή	<ul style="list-style-type: none"> ✚ Συχνά μικρά ποτίσματα για την διατήρηση υγρασίας στα επιθυμητά επίπεδα ✚ Διαβροχή με υγρό απόβλητο για την ενίσχυση οργανικής ουσίας
Μέγεθος σωματιδίων	<ul style="list-style-type: none"> ✚ Μικρότερο ή ίσο με πέντε εκατοστά
Μικρότερος χρόνος κομποστοποίησης (2 μήνες)	<ul style="list-style-type: none"> ✚ Εφόσον έχουν συμπληρωθεί οι απαιτούμενες μέρες με θερμοκρασίες έως 65 βαθμούς που προβλέπει ο κώδικας ΕΠΠΕΡΑ 2014, για εξουδετέρωση θερμοφίλων ιών.
Σκέπαστρο-Δάπεδο	<ul style="list-style-type: none"> ✚ Πρόληψη για πρόσμιξη υλικών από γύρω δραστηριότητες.
Εμπλουτισμός υλικού	<ul style="list-style-type: none"> ✚ Πρόσμιξη με ορυκτό ή με άλλα φυτικά απόβλητα

Βιβλιογραφία

Ελληνόφωνη

1. **Ακράτος, Χ. Σ., Τεκερλεκόπουλου, Α. Γ., Βασιλειάδου, Ι. Α., & Βαγγέλης, Δ. Β. (2017).** Ανακύκλωση των Αποβλήτων του Ελαιοτριβείου: Πρόσφατες Εξελίξεις για την Αειφόρο Διαχείριση. Σελίδες 161-182.
2. **Βαρέλα (2021).** Συστήματα κομποστοποίησης (Ακαδημαϊκές σημειώσεις). Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Πάτρα.
3. **Επιτροπή Περιβάλλοντος, Δημόσιας Υγείας και Ασφάλειας των Τροφίμων. (2020).** Σχέδιο έκθεσης σχετικά με το νέο σχέδιο δράσης για την κυκλική οικονομία (2020/2077(INI)).
4. **ΕΠΠΡΕΑΑ. (2014).** Οδηγός λειτουργίας εγκαταστάσεων κομποστοποίησης.
5. **Ε.Σ.Δ.Α (2020-2030).** Εθνικό σχέδιο διαχείρισης αποβλήτων υπουργείου ενέργειας και περιβάλλοντος για την περίοδο 2020-2030, ΦΕΚ Τεύχος Α' 185/29.09.2020
6. **Εξάρχου, Μ. (2017).** Καινοτόμος βιοαποικοδόμηση πολυφαινολικών ενώσεων από Ι) απόβλητα ελαιουργείου και ΙΙ) διαχείριση πράσινων απορριμμάτων μέσω κομποστοποίησης με τη χρήση βιοκαταλύτη. Ερευνητική εργασία διπλώματος ειδίκευσης.
7. **Ibanez, J. G., Hernandez-Esperarza, M., Doria Serrano, C., & Fregoso-Infante, A. (2023).** Περιβαλλοντική Χημεία (Μετάφραση : Θ. Πρεβεδώρας, Μετάφραση).
8. **Λιτάς, Γ. Χ. (2014).** Αξιολόγηση σεναρίων διαχείρισης αστικών στερεών αποβλήτων (Μεταπτυχιακή εργασία). Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
9. **Μανιός, Θ. (2009).** Κομποστοποίηση οργανικών υπολειμμάτων. Εργαστήριο Διαχείρισης Στερεών Υπολειμμάτων & Υγρών Αποβλήτων, ΤΕΙ Κρήτης.
10. **Μουτάφης Ι. Ευάγγελος (2018).** Διαχείριση οργανικών αποβλήτων με κομποστοποίηση και επιλογή κατάλληλων δομικών υλικών. (Μεταπτυχιακή εργασία), Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
11. **Σάββας, Δ. (2016).** Γενική Λαχανοκομία. Αθήνα: Πεδίο.
12. **Σάκκας, Ν., Σαββάκης, Ν. (2020).** Περιβαλλοντική διαχείριση. Μεσογειακό Πανεπιστήμιο.

13. **Στεργιόπουλος, Α. (2022).** Σύγκριση τεχνολογιών κομποστοποίησης και αναερόβιας χώνεψης με τεχνικές κύκλου ζωής, εστιάζοντας στο ενεργειακό και περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα (Διπλωματική εργασία). Πανεπιστήμιο Αθηνών.
14. **Ψυχρή, Μ. Θ. (2016).** Σύνθεση μικτών οξειδίων και καρβιδίων για ενεργειακές εφαρμογές. (Διπλωματική εργασία) Πανεπιστήμιο Αθηνών.
15. **Τουρναβίτη Μαρία (2022).**Θερμική επεξεργασία αποβλήτων: τεchnοοικονομική ανάλυση και κύκλος ζωής αεριοποίησης, και πυρόλυσης.(Μεταπτυχιακή εργασία),Αθήνα
16. **Tchobanoglous G., Kreith Frank (2018).** Εγχειρίδιο Διαχείρισης Στερεών αποβλήτων, 2^η έκδοση, Επιμέλεια :Αθανάσιος Κουγκολος, Αβραάμ Καραγιαννίδης,Πέτρος Σαμαράς.
17. **Πεζούλας Ιωάννης (2012).**Επεξεργασία οργανικού κλάσματος απορριμάτων με χρήση πρότυπου οικιακού κομποστοποιητή (Διπλωματική Εργασία), Εθνικό Μετσόβιο πολυτεχνείο, Αθηνά
18. **Καραγλάνης Γεώργιος (2013).**Συγκομποστοποίηση βιολογικής ιλύος με τροφικά υπολείμματα με πρόσθετο περλίτη.(Διπλωματική εργασία) Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
19. **Κομίλης Δημήτριος (2023).**Διαχείριση και μηχανική Στερεών αποβλήτων.3^η Έκδοση, Εύδοξος

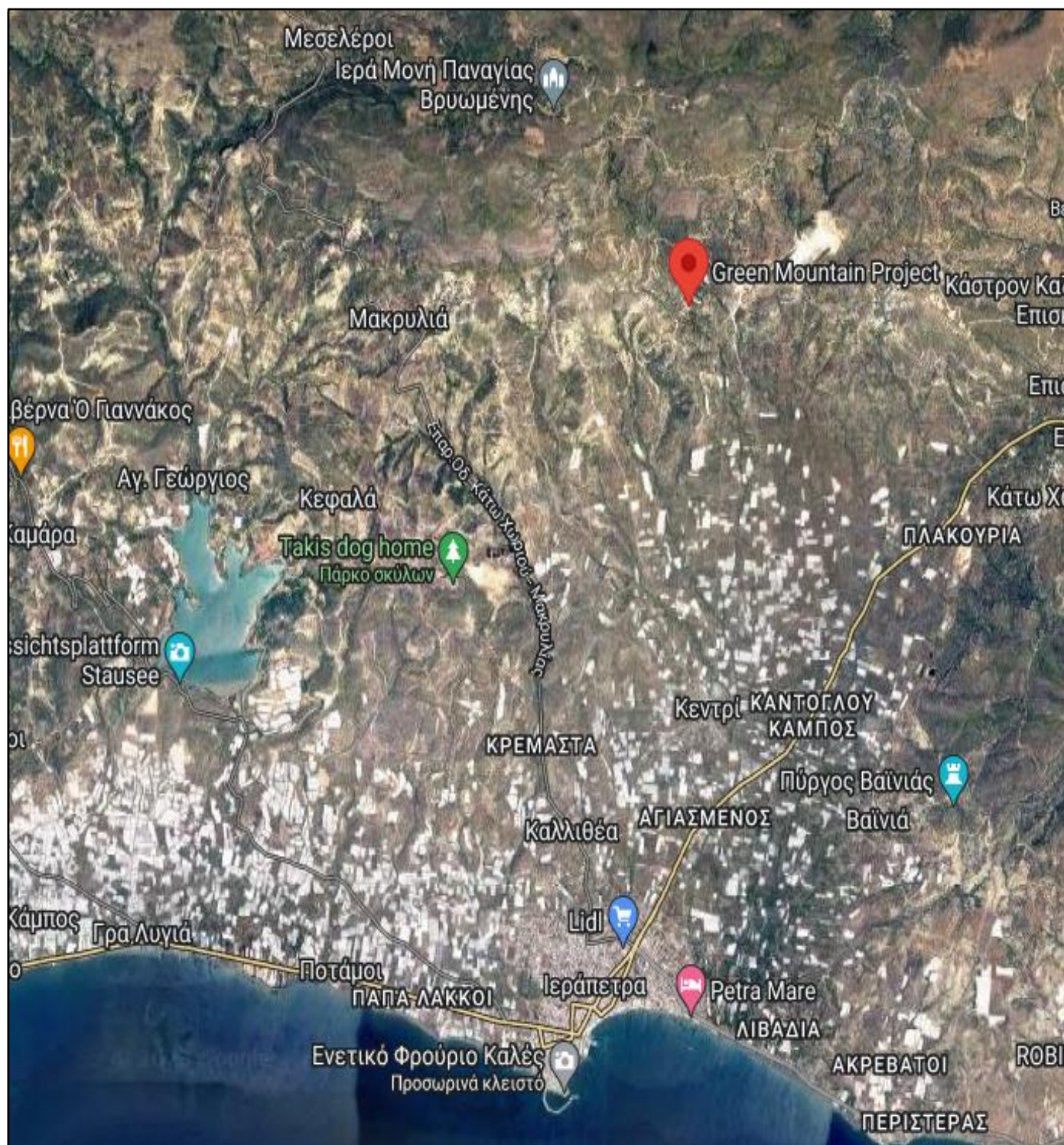
Διεθνής

1. **Alamin, M., & Bari, Q. H. (2022).** Extent of degradation in three-stage co-composting of fecal sludge and solid waste.
2. **Mukesh Kumar Awasthi, Yumin Duan, Sanjeev Kumar Awasthi, Tao Liu,Zengqiang Zhang, Sanh-Hyoun Kim, Askhon Pandey (2020).**Effect of biochar on emission, maturityand bacterial dynamics during sheep manure composting. Renewable Energy
3. **Baskaran Gunasekaran (2020).**Food Waste Composting and Microbial Community Structure Profiling. Indian Journal of Biotechnology

4. **Chen, P., Cheng, W., & Li, S. (2023).** Optimization strategies for mitigating nitrogen loss in the aerobic composting of pig manure and microbial changes revealed by metagenomic analysis. *Int J Waste Resources*
5. **Craig Coker, Tim O'Neill (2017).** Aeration floor Fundamentals, BioCycle press
6. **Hong Giang Hoang, Bui Thi Phuong Thuy, Chitsan Lin, Dai-Viet N.Vo (2022).** The nitrogen cycle and mitigation strategies for nitrogen loss during organic waste composting.
7. **Jaibiba, L. S. P., Vignesh, S. N., & Hariharan, S. (2020).** Bioreactors: Sustainable Design and Industrial Applications in Mitigation of GHG Emissions.
8. **Kim, E., Lee, D.-H., Won, S. G., & Ahn, H. (2016).** Evaluation of Optimum Moisture Content for Composting of Beef Manure and Bedding Material Mixtures Using Oxygen Uptake Measurement.
9. **Nemet, F., Peric, K., & Loncaric, Z. (2021).** Microbiological activities in the compost process. University of Osijek Faculty of Agrobiotechnical Sciences Osijek.
10. **Rastogi, M., Nandal, M., & Khosla, B. (2017).** Microbes as vital additives for solid waste composting.
11. **Sauer, N., & Crouch, E. (2013).** Measuring Oxygen in Compost. *BioCycle*, 54(12), 23.
12. **Subbarao, P. M. V., D' Silva, T. C., Adlak, K., Kumar, S., Chandra, R., & Vijay, V. K. (2023).** Anaerobic digestion as a sustainable technology for efficiently utilizing biomass in the context of carbon neutrality and circular economy.
13. **Tajima, R. (2021).** Importance of individual root traits to understand crop root system in agronomic and environmental contexts. Japanese Society of Breeding.
14. **Yunquan Wei, Yue Zhao, Xinyu Zhao, Xinyu Gao, Yansi Zheng (2019).** Roles of different humin and heavy-metal resistant bacteria from composting on heavy metal removal. *China University of Agriculture*

15. **R.Kannan, K.A.Kallapiran (2021).**A review on the agricultural waste residues management by different microbes.
16. **Ibrahim M. Maafa, Ahmed Abutaleb,Nasser Zouli (2023).**Effect of agriculture biomass wastes on thermal insulation and self-cleaning of fired bricks.
17. **Ifeoluwa Bamgbose,Todd A.Anderson (2015).**Ecotoxicology and Environmental Safety 286-274,Texas Tech University,USA.
18. **Nur Izyan Wan Azelee, Nor Hasmalian Abdul Manas, Daniel joe Dailin,Aizi NorMazila, Shalyda Md Shaarani (2020).**Valorasion of Agro-industrial Residues-Volume I: Biological Approaches pg 59-79.
19. **Naushin Yasmin, Milleni Jamuda, Alok Kumar Panda, Kundan Samal (2022).** Emission of greenhouse gas (GHGs) during composting and vermicomposting: Measurement, mitigation and perspectives,India
20. **Rynk Roberts, Ginny Black, Jane Gillbert, Johannes Biala, Jena Bonhotal, Mary Schwaz, Leslie Cooperband (2021).** The Composting Handbook: A how-to and why manual for farm, municipal, institutional and commercial composters.1st edition, Academic Press.
21. **Ryosuke Tajima (2021).** Importance of individual root traits to understand crop root system in agronomic and environmental contexts, Japanese Breeding Society
22. **Peizhen Chen, Weimin Chenf, Sahopeng Li (2023).** Process safety and Environmental Protection,pg 270-284. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China
23. **Vania Scarlet Chavez-Rico (2022)** Physicochemical changes in biowaste used in anaerobic digestion, composting, and fermentation
24. **Xiong Zhi-Qiang. Wang Guo-Xing,Huo Zhao-Chen, Wang Wei-Dong (2017).**Effect of Aeration Rates on the composting Process and Loss of Nitrogen During Composting. Laboratory of Environmental Microbiology and Toxicology of Biological Sciences, Honk Kong.

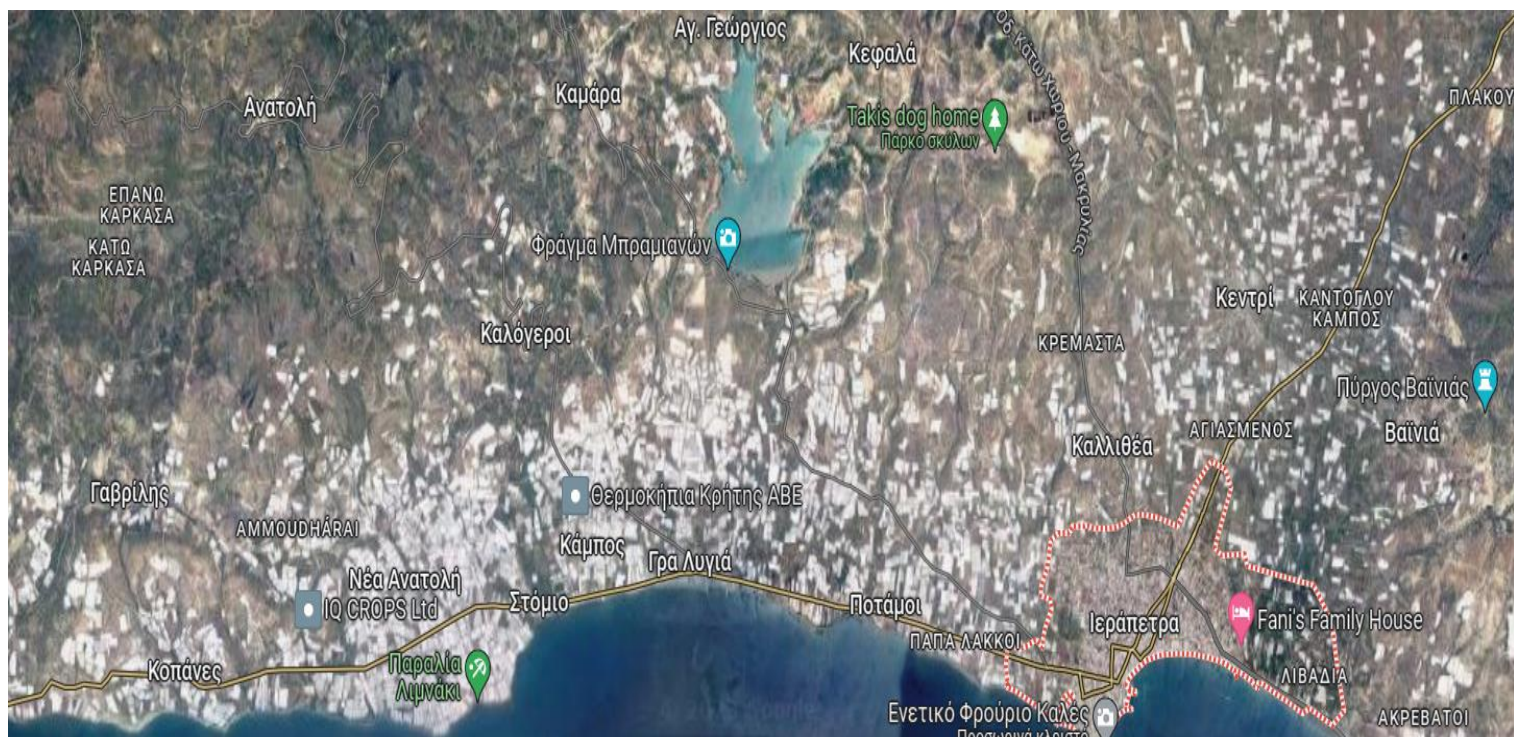
Παραρτήματα



Εικόνα 20-Τοποθεσία εγκατάστασης κομποστοποίησης.



Εικόνα 25-Φωτογραφία μέσω drone από ακτογραμμή Ιεράπετρας



Εικόνα 26-Φωτογραφία μέσω δορυφόρου με θερμοκήπια Ιεράπετρας



Εικόνα 21- Σωροί πειράματος

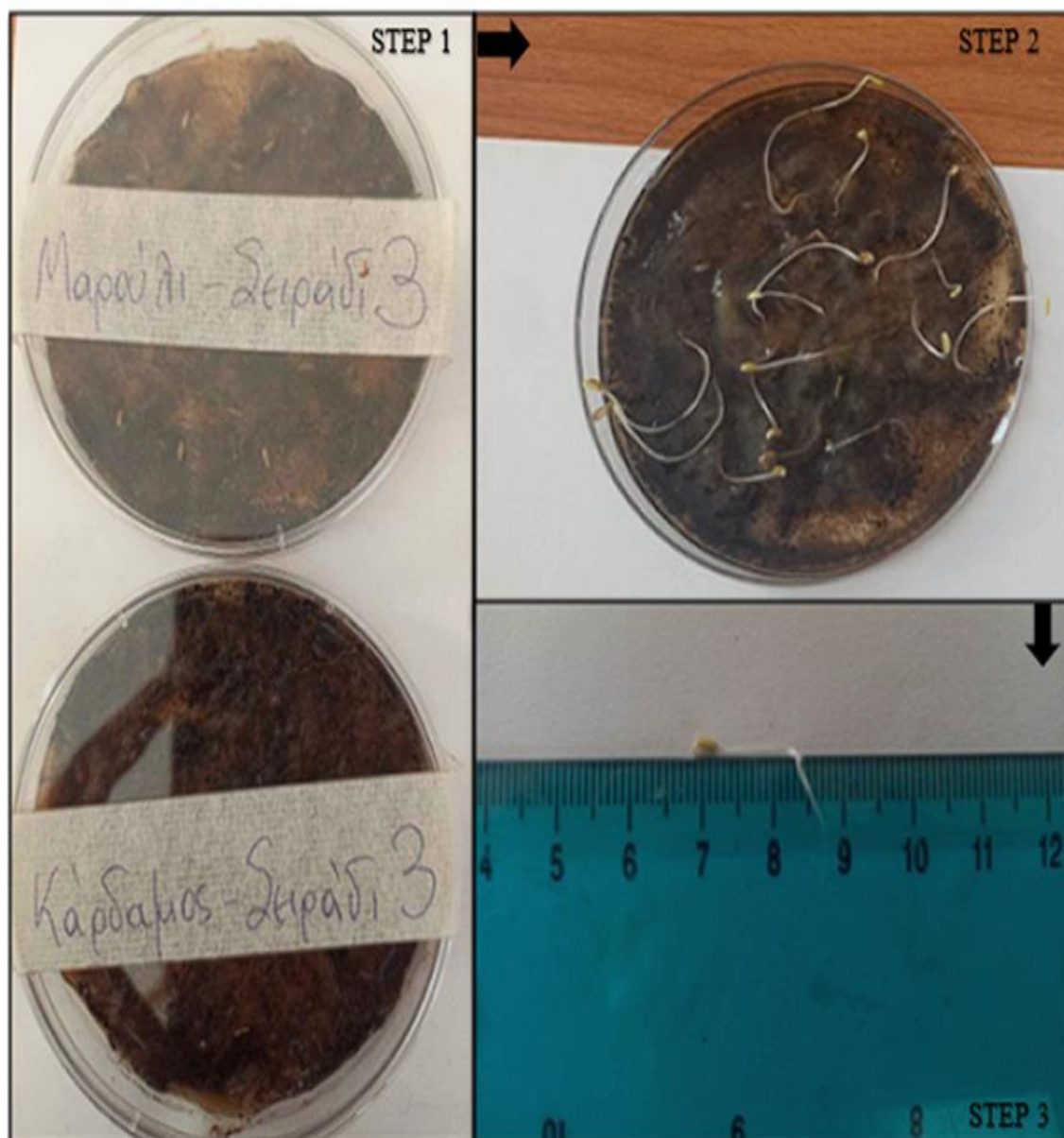




Εικόνα 22-Μέτρηση θερμοκρασίας από στην τομή



Εικόνα 23 – Μέτρηση θερμοκρασίας από την επιφάνεια



Εικόνα 24-Βήματα δοκιμής βλαστικότητας



Εικόνα 25- Υλικό πριν το ραφινάρισμα



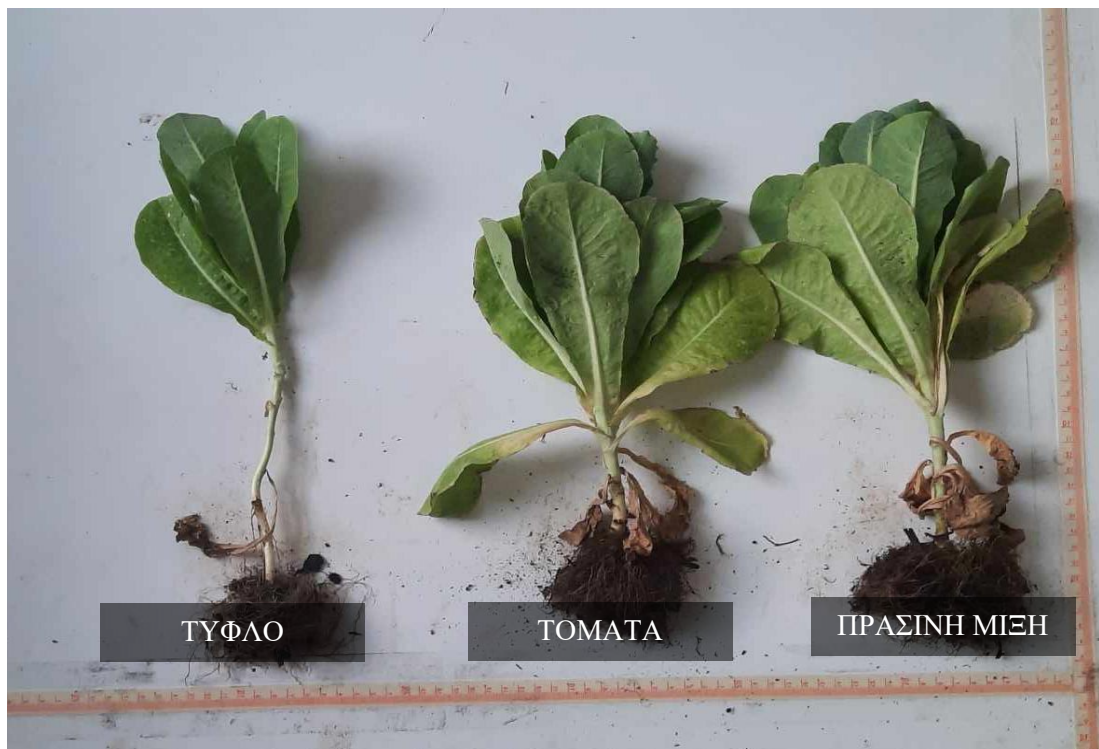
Εικόνα 26- Σύγκριση φυτού πράσινης μίξης και φυτού απο τυφλή καλλιέργεια



Εικόνα 27- Δοκιμή καλλιέργειας μαρουλιών



Εικόνα 31-Εξέλιξη δοκιμής μαρουλιών.



Εικόνα 32-Σύγκριση καλλιέργειας μαρουλιών