



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

***«ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΟΜΠΟΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ
ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΜΕΣΩ
ΧΡΩΜΑΤΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ »***

Του Μεταπτυχιακού Φοιτητή

Δημοσθένη Τσιβά

Επιβλέπων

Απόστολος Βλυσίδης, Καθηγητής, Χημικών
Μηχανικών Ε.Μ.Π

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η Μεταπτυχιακή Εργασία «Έλεγχος κομποστοποίησης της βιομάζας μέσω χρωματομετρικής μεθόδου» πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ σε συνεργασία με την Οργανοχημική Θράκης ΙΚΕ υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Απόστολου Βλυσίδα.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή κ. Απόστολο Βλυσίδα για την ανάθεση του θέματος, την καθοδήγηση και τη βοήθεια συνολικά, κατά την εκπόνηση της μεταπτυχιακής εργασίας, καθώς και τις συμβουλές και τις διορθώσεις κατά τη συγγραφή.

Ευχαριστώ επίσης θερμά τον Δρ. Ανέστη Βλυσίδα για την αμέριστη βοήθεια και συμπαράσταση του καθ' όλη τη διάρκεια της μεταπτυχιακής εργασίας, τόσο σε επιστημονικό, όσο και σε προσωπικό επίπεδο. Η συμμετοχή και η καθοδήγηση του στην διεργασία της κομποστοποίησης ήταν πραγματικά ανεκτίμητες.

Επιπροσθέτως, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλο το προσωπικό του Εργαστηρίου Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας για την συμπαράσταση και κατανόηση που μου παρείχαν. Ιδιαίτερες ευχαριστίες στον υποψήφιο διδάκτορα Γεώργιο Σεϊντή για την ουσιαστική συμβολή του στη διεξαγωγή χημικών αναλύσεων.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Θεόδωρο Πατλάκα, καθώς και όλο το δυναμικό προσωπικού της εταιρείας Οργανοχημική Θράκης ΙΚΕ, για την συνολική συμβολή τους στην εκτέλεση της διεργασίας της κομποστοποίησης, η οποία υπήρξε καταλυτική στην ολοκλήρωση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω όλους όσους τολμώ να αποκαλώ δικούς μου ανθρώπους για τη συνεχή και αδιάκοπη συμπαράσταση που μου παρείχαν και συνεχίζουν να μου παρέχουν σε όλα τα στάδια της ζωής μου.

Αθήνα, Ιούλιος 2018
Δημοσθένης Τσιβάς

Πίνακας περιεχομένων

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1. Κομποστοποίηση	1
1.1.1. Ορισμός	1
1.1.2. Στάδια κομποστοποίησης	2
1.1.3. Παράγοντες που επηρεάζουν την κομποστοποίηση	5
1.1.4. Συστήματα κομποστοποίησης	13
1.1.5. Χρήσεις του κομπόστ	15
1.2. Απόβλητα ελαιοτριβείων ως πρώτη ύλη κομποστοποίησης	15
1.3. Χρώμα και μέθοδοι μέτρησης του	17
1.3.1. Χρώμα και φωτισμός.....	17
1.3.2. Χρωματομετρία	18
1.3.3. Χρωματικό μοντέλο CIELab	18
1.3.4. Χρωματόμετρο	20
1.3.5. Χρωματομετρία και κομποστοποίηση	21
1.4. Σκοπός	23
2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	24
2.1. Διεργασία κομποστοποίησης	24
2.1.1. Υπόστρωμα κομποστοποίησης.....	24
2.1.2. Σωρός κομποστοποίησης.....	24
2.1.3. Δειγματοληψία.....	25
2.2. Φυσικοχημικές παράμετροι κομποστοποίησης.....	26
2.2.1. Θερμοκρασία	26
2.2.2. pH	26
2.2.3. Ηλεκτρική αγωγιμότητα	27
2.2.4. Αμμωνιακά ιόντα.....	27
2.2.5. Νιτρικά ιόντα.....	28
2.2.6. Άζωτο	29
2.2.7. Τέφρα, Οργανική ύλη, Άνθρακας.....	31
2.2.8. Φυτοτοξικότητα.....	32
2.2.9. Φουλβικά και Χουμικά οξέα	33
2.3. Χρωματομετρία κομποστοποίησης.....	35
2.3.1. Χρωματομετρική μέθοδος	35
2.3.2. Χρωματικές μεταβλητές του μοντέλου CIELab	36
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	37
3.1. Φυσικοχημικές παράμετροι κομποστοποίησης.....	37
3.1.1. Θερμοκρασία	37
3.1.2. pH.....	38
3.1.3. Ηλεκτρική αγωγιμότητα	39
3.1.4. Αμμωνιακά ιόντα.....	40
3.1.5. Νιτρικά ιόντα.....	41
3.1.6. Άζωτο	42

3.1.7.	Τέφρα, Οργανική ύλη, Άνθρακας.....	43
3.1.8.	Φυτοτοξικότητα.....	45
3.1.9.	Φουλβικά και Χουμικά οξέα.....	45
3.2.	Χρωματικές μεταβλητές του μοντέλου CIELab.....	46
3.2.1.	L (Φωτεινότητα).....	46
3.2.2.	a (Κόκκινο/Πράσινο).....	47
3.2.3.	b (Κίτρινο/Μπλε).....	47
3.2.4.	a/b (Λόγος a προς b).....	48
3.2.5.	H (Χροιά).....	49
3.2.6.	C (Χρωματική πυκνότητα).....	50
3.2.7.	ΔΕ (Ολική μεταβολή χρώματος).....	50
3.2.8.	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα χρωματικών μεταβλητών.....	51
3.3.	Συσχέτιση φυσικοχημικών παραμέτρων του κομπόστ με τις χρωματικές μεταβλητές του μοντέλου CIELab.....	52
4.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	55
4.1.	Συμπεράσματα.....	55
4.2.	Προτάσεις.....	56
5.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	58
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α. ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΜΕ ΧΡΩΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ CIELAB.....		
A.1.	Γραμμική συσχέτιση χρονικού διαστήματος 0 έως 80 ημερών.....	62
A.2.	Γραμμική συσχέτιση χρονικού διαστήματος 15 έως 80 ημερών.....	67
A.3.	Γραμμική συσχέτιση χρονικού διαστήματος 30 έως 80 ημερών.....	71

ΣΥΝΟΨΗ

Η διεργασία εξαγωγής λαδιού ελιάς οδηγεί στην παραγωγή υψηλών ποσοτήτων δύο κύριων παραπροϊόντων : α) το στερεό υπόλειμμα (πυρήνας, φύλλα ελιάς) και β) το λύμα γνωστό και ως υγρό απόβλητο ελαιοτριβείου. Και τα δύο παραπροϊόντα είναι ιδιαίτερα βλαβερά για το περιβάλλον, δημιουργώντας ένα μείζον περιβαλλοντικό ζήτημα σε περιοχές ελαιοπαραγωγής, όπως η Ελλάδα, η Ισπανία και η Ιταλία. Η κομποστοποίηση αποτελεί μία από τις κύριες τεχνολογίες επεξεργασίας των αποβλήτων ελαιοτριβείων, τόσο μόνο των στερεών, αλλά και σε συνδυασμό με τα υγρά απόβλητα. Μία από τις σημαντικότερες δυσκολίες της κομποστοποίησης είναι ο γρήγορος και ακριβής προσδιορισμός της ωριμότητας του τελικού προϊόντος. Αυτή την δυνατότητα την παρέχει η χρωματομετρία και πιο συγκεκριμένα οι μεταβλητές χρώματος του μοντέλου CIELab. Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι ο έλεγχος της κομποστοποίησης των στερεών αποβλήτων ελαιοτριβείου, με την χρήση της χρωματομετρικής μεθόδου του μοντέλου CIELab. Η συνολική διαδικασία της κομποστοποίησης διήρκησε 79 μέρες και διακόπηκε προτού φτάσει στο στάδιο της ωρίμανσης. Καταγράφηκε η μεταβολή συγκεκριμένων δεικτών και παραμέτρων της κομποστοποίησης, μεταξύ των οποίων η θερμοκρασία, το pH, η αγωγιμότητα τα αμμωνιακά και νιτρικά ιόντα, το άζωτο, η περιεκτικότητα του κομπόστ σε τέφρα, οργανική ύλη και άνθρακα, η φυτοτοξικότητα, τα φουλβικά και χουμικά οξέα, μέσω μιας σειράς μετρήσεων και χημικών αναλύσεων. Ταυτόχρονα, καταγράφεται και η εξέλιξη των μεταβλητών του χρωματικού μοντέλου CIELab, το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί για τον έλεγχο κομποστοποίησης της βιομάζας. Οι χρωματικές μεταβλητές a, b, C και ΔE, παρουσιάζουν σταθερή μεταβολή με την πάροδο του χρόνου σε όλη την διάρκεια της κομποστοποίησης και επομένως, μπορούν μέσω της καταγραφής τους να προσδιορίσουν το στάδιο στο οποίο βρίσκεται η προς μελέτη διεργασία. Η χρήση του μοντέλου CIELab για τον έλεγχο της κομποστοποίησης ενισχύεται μετά την 15^η και 30^η μέρα της διεργασίας με την χρήση των δύο επιπλέον χρωματικών μεταβλητών, h και a/b. Τέλος, ελέγχεται η πιθανή συσχέτιση των χρωματικών μεταβλητών με τις φυσικοχημικές παραμέτρους της κομποστοποίησης με την χρήση γραμμικών συντελεστών. Το ποσοστό του κομπόστ σε άνθρακα παρουσιάζει την καλύτερη γραμμική συσχέτιση ($R^2 > 0.9$) από όλες τις φυσικοχημικές παραμέτρους. Ακολουθούν σε σειρά φθίνοντος συντελεστή γραμμικότητας το ποσοστό του κομπόστ σε άζωτο, το pH, η αγωγιμότητα και ο λόγος C/N.

ABSTRACT

The olive oil extraction process leads to the production of high quantities of two main by-products: a) the solid residue (core, olive leaves), and b) an effluent known as olive mill wastewater. Both by-products are particularly harmful to the environment, creating a major environmental issue in olive oil production areas such as Greece, Spain and Italy. Composting is one of the main technologies for the treatment of olive mill waste, both solids only and combined with wastewater. One of the most important difficulties of composting is the rapid and accurate determination of the maturity of the final product. This ability is provided by colorimetry and more specifically by the color variables of the CIELab color model. The purpose of this postgraduate thesis is to control the composting of solid olive mill waste, using the CIELab colorimetric method. The entire composting process lasted 79 days and was stopped before it reached its maturity stage. The change in specific composting indices and parameters has been recorded, including temperature, pH, electric conductivity, ammonium and nitrate ions, nitrogen, compost's content in ash, organic matter and carbon, phytotoxicity, fulvic and humic acids, through a series of measurements and chemical analyzes. At the same time, the evolution of the CIELab color model variables, which can be used to control the composting of biomass, is also recorded. The chromatic variables a, b, C and ΔE show a constant change over time throughout the composting process and therefore, through their recording, can determine the stage at which the process to be studied is. The use of the CIELab model for composting control is enhanced after the 15th and 30th day of the process by the use of two additional chromatic variables, h and a/b. Finally, the possible correlation of the chromatic variables with the physiochemical parameters of composting with the use of linear coefficients is tested. The percentage of carbon in compost shows the best linear correlation ($R^2 > 0.9$) of all the physiochemical parameters. In descending order of linearity follow the percentage of nitrogen in compost, pH, electric conductivity and the C/N ratio.

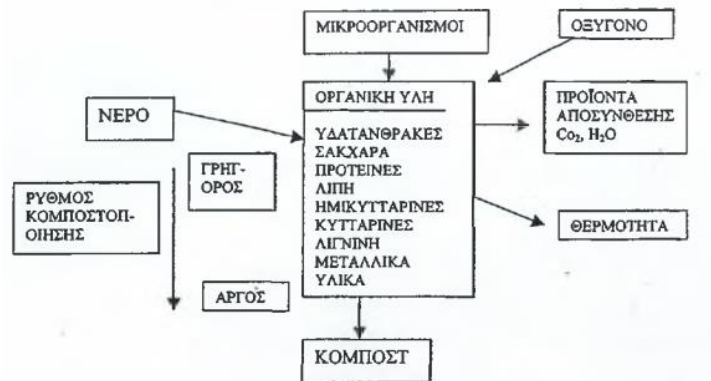
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Κομποστοποίηση

1.1.1. Ορισμός

Η κομποστοποίηση είναι η φυσική βιολογική, ελεγχόμενη, διαδικασία αποικοδόμησης και σταθεροποίησης οργανικών υλικών, κάτω από συνθήκες οι οποίες ευνοούν την ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών, ως αποτέλεσμα της παραγωγής θερμότητας από τις μεταβολικές δραστηριότητες των μικροοργανισμών (βακτήρια, μύκητες), ώστε να παραχθεί ένα σταθερό προϊόν χωρίς παθογόνους μικροοργανισμούς. Η διαδικασία της κομποστοποίησης αναφέρεται στη βιοαποδόμηση ενός μείγματος οργανικών υλικών από ετερογενείς και ετερότροφους μικροοργανισμούς σε στερεά κατάσταση και αερόβιες συνθήκες, όπου απαιτείται παροχή οξυγόνου μέσα στην μάζα των οργανικών υλικών κατά την διάρκεια της [1].

Η παρέμβαση του ανθρώπου έχει συστηματοποιήσει και αυξήσει την απόδοση της κομποστοποίησης, της οποίας τα κύρια προϊόντα είναι διοξείδιο του άνθρακα, θερμότητα, νερό και το τελικό χουμικό προϊόν (κομπόστ), το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως ως εδαφοβελτιωτικό [1] [2]. Η διεργασία της κομποστοποίησης καθώς και τα παράγωγά της παρουσιάζονται συνοπτικά στο Σχήμα 1.1 [3].



Σχήμα 1.1: Διεργασία κομποστοποίησης [3].

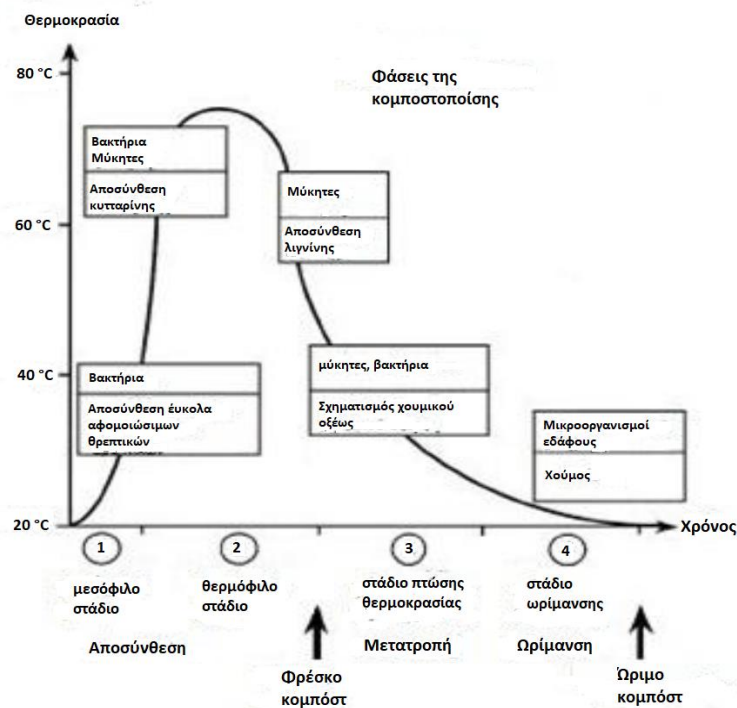
Μια πληθώρα οργανικών αποβλήτων μπορούν με την κατάλληλη επεξεργασία να μετατραπούν μέσω της κομποστοποίησης σε ένα πλούσιο φυτόχωμα, το κομπόστ, του οποίου η χρήση προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα όπως ο εμπλουτισμός του χώματος με θρεπτικά συστατικά και η αύξηση της γονιμότητάς του [4]. Το τελικό προϊόν δεν περιέχει πλέον παθογόνους οργανισμούς, έχει αποτοξικοποιηθεί, δεν έχει δυσάρεστη οσμή, είναι εύκολα διαχειρίσιμο και μπορεί να αποθηκευτεί για μεγάλα χρονικά διαστήματα [5]. Τα κύρια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κομποστοποίησης παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.1.

Πίνακας 1.1 : Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κομποστοποίησης [3].

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Η πλειονότητα των στερεών αποβλήτων μπορεί να κομποστοποιηθεί. Έτσι μια εγκατάσταση μπορεί να επεξεργαστεί τόσο αστικά όσο και βιομηχανικά απόβλητα.	Δυσάρεστες οσμές και εκπομπές βιοαερίων κατά την διάρκεια της διεργασίας. Απαιτείται καλός σχεδιασμός των εγκαταστάσεων και αποτελεσματική διαχείριση.
Κομποστοποίηση οργανικών πρώτων υλών διαφορετικής προέλευσης.	Πιθανή απαίτηση περισσότερου χώρου από άλλες τεχνολογίες διαχείρισης αποβλήτων
Μείωση όγκου υγειονομικής ταφής αποβλήτων μέσω ανακύκλωσης.	Το προϊόν πρέπει να προωθηθεί σε ανταγωνιστική αγορά
Παραγωγή χρήσιμου προϊόντος.	
Μείωση αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων.	

1.1.2. Στάδια κομποστοποίησης

Η κομποστοποίηση μπορεί να διακριθεί σε τρία κύρια στάδια με βάση την θερμοκρασία του σωρού : Α) μεσόφιλο στάδιο (20-40 °C), με τυπική διάρκεια 5-10 ημέρες, Β) θερμοφιλο στάδιο (35-65 °C), το οποίο διαρκεί από μερικές μέρες έως μήνες, και Γ) στάδιο ωρίμανσης. Ο διαχωρισμός των τριών σταδίων παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.2 [6].



Σχήμα 1.2: Στάδια της κομποστοποίησης [6].

Κατά την διάρκεια κάθε σταδίου της κομποστοποίησης ευδοκούν διαφορετικού είδους μικροοργανισμοί. Οι υψηλές θερμοκρασίες αναπτύσσονται κατά την διάρκεια των δύο πρώτων σταδίων λόγω της έντονης μικροβιακής δραστηριότητας και είναι υπεύθυνες για την απομάκρυνση των παθογόνων μικροοργανισμών και την υγιεινοποίηση του τελικού προϊόντος.

Πρώτο στάδιο

Στο πρώτο στάδιο αναπτύσσονται μεσόφιλοι μικροοργανισμοί, κυρίως μεσόφιλα βακτήρια, οι οποίοι αναπτύσσονται σε θερμοκρασίες $<40^{\circ}\text{C}$, μπορούν και διασπών άμεσα διαλυτές και εύκολα αποδομήσιμες ενώσεις (σάκχαρα και πρωτεΐνες). Λόγω της θερμότητας που παράγεται αυξάνει η θερμοκρασία του σωρού [6]. Εάν η προς κομποστοποίηση ποσότητα είναι μικρή και η θερμοκρασία περιβάλλοντος χαμηλή, υπάρχει το ενδεχόμενο να μην φτάσει στα επιθυμητά στάδια η θερμοκρασία του σωρού [7].

Στο πρώτο στάδιο, η αποικοδόμηση πραγματοποιείται με γρήγορους ρυθμούς και αυτό οφείλεται στον γρήγορο πολλαπλασιασμό των μεσόφιλων βακτηρίων. Εκτός από την αύξηση της θερμοκρασίας παρατηρείται και η μείωση του pH (λόγω της παραγωγής οργανικών ενώσεων). Το πρώτο στάδιο είναι πολύ κρίσιμο για την εξέλιξη της κομποστοποίησης, διότι αν η θερμοκρασία δεν προσεγγίσει τα επιθυμητά όρια της μεσόφιλης – θερμόφιλης φάσης τότε το τελικό προϊόν θα είναι πιθανόν ακατάλληλο για χρήση (ατελής κομποστοποίηση) [7].

Δεύτερο στάδιο

Στο δεύτερο στάδιο μόλις η θερμοκρασία ξεπεράσει τους 40°C , οι μεσόφιλοι οργανισμοί αντικαθίστανται από τους θερμόφιλους, οι οποίοι αναπτύσσονται σε θερμοκρασίες μεταξύ 45 και 70°C . Κατά το στάδιο αυτό τα σάκχαρα και οι πρωτεΐνες έχουν αποδομηθεί από τα βακτήρια, τα οποία δεν επιβιώνουν σε αυτές τις συνθήκες. Λόγω αυτού, εντοπίζονται μόνο στην εξωτερική επιφάνεια του σωρού, όπου οι θερμοκρασίες είναι πιο χαμηλές. Οι κυρίαρχοι πληθυσμοί πλέον είναι θερμόφιλοι μύκητες, οι οποίοι είναι ικανοί να διασπών πολυπλοκότερες ουσίες όπως πολυσακχαρίτες (κυτταρίνες). Υπάρχουν επίσης και ορισμένα είδη ακτινομυκήτων καθώς και ορισμένα είδη βακτηρίων της θερμόφιλης περιοχής, τα οποία έχουν την ικανότητα να χρησιμοποιούν την κυτταρίνη ως πηγή άνθρακα [6]. Γενικά η ποικιλότητα των ειδών των μικροοργανισμών στο θερμόφιλο στάδιο της κομποστοποίησης ελαττώνεται έντονα σε θερμοκρασίες άνω των 60°C και η μικροβιακή δραστηριότητα μειώνεται δραματικά [8].

Η ανθεκτικότητα των μικροοργανισμών στις υψηλές θερμοκρασίες βασίζεται στην αντοχή των ενζυμικών συστημάτων τους σε ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες.

Επιπλέον, στο στάδιο αυτό παρατηρείται αύξηση του pH, αρχικά λόγω της αποδόμησης των οργανικών οξέων του πρώτου σταδίου και στην συνέχεια λόγω της συσσώρευσης των αλάτων που οφείλεται στην εξάτμιση του νερού [6].

Ιδιαίτερη προσοχή απαιτεί η υπερβολική αύξηση της θερμοκρασίας του σωρού σε απαγορευτικά επίπεδα (>70 °C), όπου οι μικροβιακοί πληθυσμοί πεθαίνουν ή εξακολουθούν να υπάρχουν σε λανθάνουσα μορφή ως σπόρια. Ο κίνδυνος αυτός μπορεί να αντιμετωπιστεί με διάφορα συστήματα αερισμού τα οποία εξασφαλίζουν τις απαραίτητες αερόβιες συνθήκες. Τέλος, κατά το στάδιο αυτό είναι αναγκαία η διαβροχή του υλικού κομποστοποίησης ώστε να καλύπτονται οι ανάγκες των μικροοργανισμών σε υγρασία καθώς και να γίνεται αναπλήρωση του εξατμιζόμενου νερού [6].

Τρίτο στάδιο

Το στάδιο αυτό χαρακτηρίζεται από πολλές ποιοτικές και ποσοτικές αλλαγές. Η ενέργεια που παράγεται από τη μικροβιακή δραστηριότητα είναι χαμηλή και αδυνατεί να καλύψει τις απώλειες θερμότητας από τον σωρό προς τον περιβάλλοντα χώρο. Αυτό συμβαίνει λόγω της μείωσης των πηγών ενέργειας που αδυνατούν πλέον να καλύψουν τις διατροφικές ανάγκες και απαιτήσεις των μικροοργανισμών σε άνθρακα. Η υγρασία σε αυτό το στάδιο βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα και οδηγεί στον σημαντικό περιορισμό του πληθυσμού των βακτηρίων [6].

Οι θεرمόφιλοι μικροοργανισμοί περιορίζονται και την θέση τους καταλαμβάνουν μεσόφιλοι λιγνιτολυτικοί μύκητες και ακτινομύκητες. Οι μικροοργανισμοί αυτοί αποδομούν δύσκολα αποδομήσιμα υλικά όπως κυτταρίνη και λιγνίνη. Αναπτύσσονται σε αυτό το στάδιο επειδή είναι λιγότερο απαιτητικοί σε υγρασία ενώ ταυτόχρονα προτιμούν τις έντονα αναερόβιες συνθήκες και το ουδέτερο έως ελαφρά αλκαλικό pH [6].

Στην φάση αυτή ενδεικνύεται η επαναδιαβροχή του υλικού με ταυτόχρονη μηχανική ανάδευση. Η ανάδευση εξασφαλίζει στους μικροοργανισμούς καινούριες επιφάνειες αποδόμησης ενώ ταυτόχρονα ομογενοποιεί το τελικό προϊόν της κομποστοποίησης δίνοντας του την ίδια δομή και πυκνότητα σε όλο τον όγκο του. Επίσης, η ανάδευση επιτρέπει την ανταλλαγή αερίων, αφού οξυγόνο εισέρχεται στο σύνολο της μάζας του σωρού, εξασφαλίζοντας έτσι τις αερόβιες συνθήκες ενώ ταυτόχρονα τα τυχόν παγιδευμένα αέρια της κομποστοποίησης διοχετεύονται στο περιβάλλον. Με την διαβροχή εξασφαλίζεται η απαραίτητη ποσότητα νερού στο υλικό ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις των μικροοργανισμών σε υγρασία και να ξεκινήσει ένας ακόμα θερμόφιλος κύκλος [6].

Καθώς η θερμοκρασία πέφτει κάτω από 35 °C, οι ενώσεις που έχουν ήδη διασπαστεί εμφανίζουν μια αντοχή στην αποσύνθεση, ενώ κυριαρχούν οι μύκητες με την ικανότητα να αποδομούν τις πιο ισχυρές ενώσεις. Η συνολική μικροβιακή δραστηριότητα μειώνεται σταδιακά με πολύ αργούς ρυθμούς και ενώ η θερμοκρασία του σωρού είναι κοντά σε αυτήν του περιβάλλοντος, οι χημικές αντιδράσεις συνεχίζουν σταθεροποιώντας τη εναπομείνασα οργανική ύλη [6].

1.1.3. Παράγοντες που επηρεάζουν την κομποστοποίηση

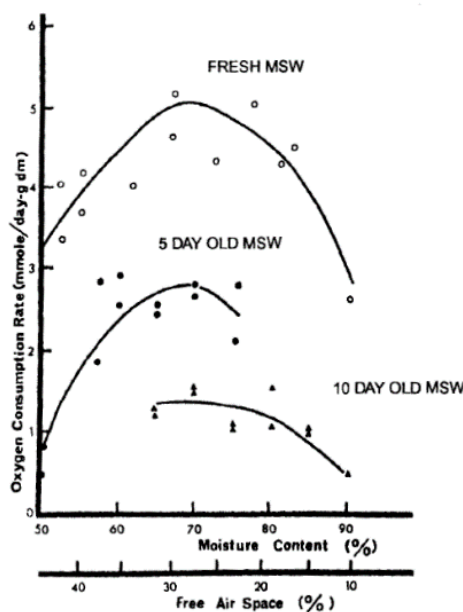
Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την αποικοδόμηση της οργανικής ύλης από μικροοργανισμούς είναι το οξυγόνο και η υγρασία. Σημαντικός παράγοντας είναι και η υψηλή θερμοκρασία, η οποία όμως προκύπτει από την μικροβιακή δραστηριότητα. Επιπλέον, σημαντικοί παράγοντες, που μπορούν να περιορίσουν την διεργασία της κομποστοποίησης, είναι το pH και τα θρεπτικά συστατικά. Ο άνθρακας και το άζωτο κυρίως, κατέχουν σημαντικό ρόλο στην διεργασία και είναι απαραίτητα για την μικροβιακή ανάπτυξη και δραστηριότητα. Πιο συγκεκριμένα, ο άνθρακας αποτελεί την κύρια πηγή ενέργειας και το άζωτο είναι αναγκαίο για την κυτταρική σύνθεση. Οι μικροοργανισμοί χρειάζονται τα ίδια θρεπτικά συστατικά με τα φυτά και συναγωνίζονται για την διαθεσιμότητά τους. Άλλα σημαντικά θρεπτικά είναι ο φώσφορος και το θείο χωρίς όμως να είναι απόλυτα καθορισμένος ο ρόλος τους στην διαδικασία της κομποστοποίησης. Τέλος, σημαντικό ρόλο στην διεργασία έχει το είδος της πρώτης ύλης που θα χρησιμοποιηθεί [3].

Οξυγόνο και αερισμός

Όπως έχει προαναφερθεί η διαδικασία της κομποστοποίησης είναι αερόβια, επομένως το οξυγόνο είναι απαραίτητο για την μικροβιακή δραστηριότητα. Η ανάγκη του σωρού για οξυγόνο και η παραγωγή θερμότητας είναι μεγαλύτερες στα αρχικά στάδια της κομποστοποίησης ενώ μειώνονται καθώς η διαδικασία εξελίσσεται. Αν η παροχή οξυγόνου μέσω αερισμού είναι περιορισμένη, η διαδικασία της κομποστοποίησης επιβραδύνεται. Εκτός από την παροχή οξυγόνου, ο αερισμός του σωρού επιτρέπει την απομάκρυνση της παραγόμενης θερμότητας, των υδρατμών και όλων των αερίων που είναι παγιδευμένα στο εσωτερικό του σωρού. Πολλές φορές ο ρυθμός αερισμού μπορεί να είναι δέκα φορές μεγαλύτερος από την παροχή οξυγόνου αλλά μικρότερος από τον ρυθμό απομάκρυνσης της θερμότητας [3].

Οι παράγοντες που ελέγχουν τα επίπεδα του οξυγόνου είναι : ο ρυθμός κατανάλωσης του, η θερμοκρασία, το μέγεθος των πόρων και η υγρασία του σωρού. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.3, η μέγιστη κατανάλωση οξυγόνου έλαβε χώρα σε τιμές υγρασίας περίπου 65% και σε μέγεθος ελεύθερων πόρων 30%. Επομένως, για να υπάρξει ικανοποιητικός αερισμός η υγρασία του σωρού δεν πρέπει να είναι υψηλή (<60-70 %) διότι υπάρχει κορεσμός στο πορώδες του σωρού και η διακίνηση του

οξυγόνου περιορίζεται αισθητά με αποτέλεσμα την ανάπτυξη αναερόβιων συνθηκών [3].



Σχήμα 1.3: Συσχέτιση ρυθμού κατανάλωσης οξυγόνου με την υγρασία και τον ελεύθερο χώρο των πόρων του σωρού [3].

Χωρίς επαρκές οξυγόνο η κομποστοποίηση γίνεται αναερόβια. Η αναερόβια αποσύνθεση περιλαμβάνει διαφορετικά είδη μικροοργανισμών και διαφορετικές βιοχημικές αντιδράσεις. Οι διαδικασίες αυτές θεωρούνται βραδύτερες και λιγότερο αποτελεσματικές από τις αερόβιες. Παράγεται μικρή ποσότητα θερμότητας, που δεν επαρκεί για να εξατμίσει το νερό από τα υλικά, καθώς και ενδιάμεσες ενώσεις (μεθάνιο, οργανικά οξέα κ.α.). Επίσης, συσσωρεύονται τοξικές ουσίες και παράγεται μεθάνιο και διοξείδιο του αζώτου. Οι ενώσεις αυτές έχουν έντονη οσμή και μερικές είναι επικίνδυνες για την υγεία. Επομένως, η επαρκής παροχή οξυγόνου δίνει στους αερόβιους οργανισμούς ένα ανταγωνιστικό πλεονέκτημα έναντι των αναερόβιων. Παρόλα αυτά αξίζει να σημειωθεί ότι όσο ιδανικές και να είναι οι συνθήκες αερισμού ένα μέρος του σωρού κομποστοποιείται αναερόβια [4].

Συνολικά υπάρχουν τρεις κύριες μέθοδοι αερισμού οι οποίες παρέχουν στον σωρό τις απαραίτητες ποσότητες οξυγόνου καθ' όλη την διάρκεια της κομποστοποίησης: (1) μηχανική ανάδευση του σωρού, (2) η επαγωγική μεταφορά ροής αέρα, (3) ο μηχανικός αερισμός. Κατά την διάρκεια της κομποστοποίησης σε σειράδια (windrows) αξιοποιούνται οι δύο πρώτες μέθοδοι, ενώ στα στατικά (static) συστήματα η παροχή οξυγόνου επιτυγχάνεται μέσω φυσική ροής αέρα. Η τελευταία μέθοδος ονομάζεται και παθητικός αερισμός και εξαρτάται πλήρως από το πορώδες του σωρού [3].

Υγρασία

Η υγρασία στην διάρκεια της κομποστοποίησης μπορεί να επηρεάσει την μικροβιακή δραστηριότητα και κατ' επέκταση την θερμοκρασία και τον ρυθμό αποδόμησης της οργανικής ύλης. Επιπροσθέτως, μπορεί να επηρεάσει την σύσταση του μικροβιακού πληθυσμού [9]. Παράγεται ως αποτέλεσμα της δράσης των μικροοργανισμών και της αποδόμησης της οργανικής ύλης ενώ εξαντλείται μέσω της εξάτμισης του νερού. Με βάση μελέτες που έχουν γίνει αποδείχθηκε ότι η υγρασία που εκλύεται λόγω της μικροβιακής δράσης υπερτερεί κατά πολύ της απώλειας λόγω εξατμίσεων [10].

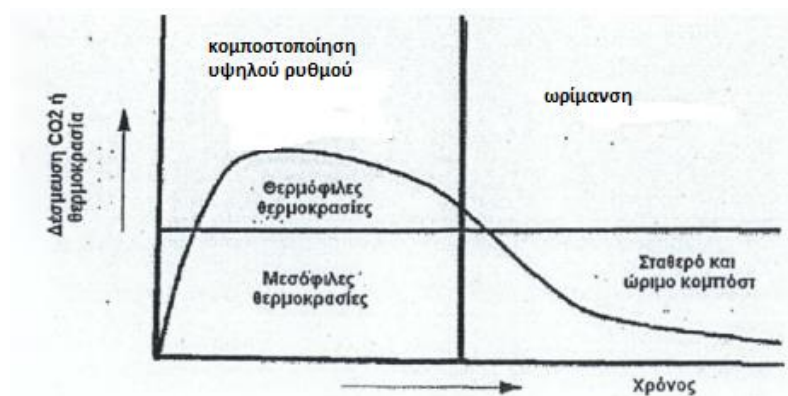
Η προτεινόμενη τιμή ποσοστού σε υγρασία για την κομποστοποίηση κυμαίνεται μεταξύ 50 έως 60% [11]. Σε τιμές κατώτερες του 40%, η μικροβιακή δραστηριότητα μειώνεται ενώ σε τιμές άνω του 60% παρατηρείται η εμφάνιση αναερόβιων συνθηκών λόγω των φραγμένων πόρων του σωρού. Σε πειράματα που διεξήγαγαν οι Wiley και Pierce, αξιολόγησαν τρία επίπεδα υγρασίας κατά την διάρκεια της κομποστοποίησης. Η υψηλότερη θερμοκρασία επιτεύχθηκε σε ποσοστό υγρασίας 55 έως 69%. Τιμές υγρασίας 72 έως 77% οδήγησαν στην ανάπτυξη της χαμηλότερης θερμοκρασίας των πειραμάτων, ενώ ποσοστά υγρασίας 40 έως 53% παρήγαγαν ενδιάμεσες θερμοκρασίες [3].

Το κατάλληλο ποσοστό υγρασίας πρέπει να καθορίζεται με βάση την φύση της πρώτης ύλης που αξιοποιείται για κομποστοποίηση και πιο συγκεκριμένα με βάση τα ιδιαίτερα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά της. Κάθε υλικό έχει ξεχωριστές απαιτήσεις σε υγρασία και φέρει από μόνο του ένα υδατικό φορτίο το οποίο θα μπορούσε να αξιοποιηθεί στην διεργασία της κομποστοποίησης. Αυτό το υδατικό φορτίο σημαντικό είναι να υπάρχει σε επάρκεια σε όλη την διάρκεια της αποικοδόμησης. Η διόρθωση της υγρασίας επιτυγχάνεται μέσω των αναδεύσεων του σωρού, οι οποίες οδηγούν στην ελάττωσή της, ενώ αύξηση της υγρασίας πραγματοποιείται με επιφανειακή ομοιόμορφη διαβροχή του υλικού. Περισσότερη προσοχή στο ποσοστό υγρασίας του σωρού πρέπει να δοθεί στο θερμόφιλο στάδιο της κομποστοποίησης, όπου παρατηρούνται μεγάλες απώλειες νερού λόγω της ανάπτυξης υψηλών θερμοκρασιών με ιδανικό ποσοστό υγρασίας 50 έως 60% [8].

Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία έχει ένα σημαντικό ρόλο στην διαδικασία της κομποστοποίησης. Σχετίζεται άμεσα με το ρυθμό αποδόμησης της οργανικής ύλης και επηρεάζει σημαντικά τον μικροβιολογικό πληθυσμό [3]. Καθορίζεται από δύο παράγοντες, την επίδραση του περιβάλλοντος και την ένταση και διάρκεια της μικροβιακής δραστηριότητας. Διατηρώντας την θερμοκρασία σε υψηλά επίπεδα η κομποστοποίηση ολοκληρώνεται αποτελεσματικότερα, καθώς επικρατούν συνθήκες

που ευνοούν την αποδόμηση της ύλης, ενώ ταυτόχρονα μειώνονται και οι απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον [12]. Η πορεία της θερμοκρασίας κατά την διάρκεια της κομποστοποίησης περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 1.1.2 και παρουσιάζεται συνοπτικά στο Σχήμα 1.4.



Σχήμα 1.4: Στάδια της κομποστοποίησης σε σχέση με την απορρόφηση CO_2 ή την θερμοκρασία [3].

Όσον αφορά την ιδανική θερμοκρασία για την αποικοδόμηση της οργανικής ύλης, έχουν αναπτυχθεί πολλές διαφορετικές απόψεις. Κύριο λόγο αυτής της διαφοροποίησης αποτελεί η ταχύτερη αποδόμηση διαφορετικών πρώτων υλών σε ξεχωριστές θερμοκρασίες. Οι περισσότερες βιβλιογραφικές πηγές υποδεικνύουν ως βέλτιστη την θερμοκρασία μεταξύ 50 με 60 °C. Οι Wiley και Pierce αναφέρουν ως ιδανική θερμοκρασία επεξεργασίας αστικών στερεών αποβλήτων (Α.Σ.Α) τους 60 με 65 °C [13]. Οι Schultz, Regan και Jeris παρουσίασαν αποτελέσματα σύμφωνα με τα οποία ο μέγιστος ρυθμός κατανάλωσης οξυγόνου λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασίες 45 με 66 °C [14] [15]. Τέλος, οι Bach et.al υποδεικνύουν ως βέλτιστη θερμοκρασία τους 60 °C [16].

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί πως για την απαλλαγή του τελικού προϊόντος από παθογόνους οργανισμούς η θερμοκρασία πρέπει να διατηρηθεί για αρκετές ημέρες άνω των 55 °C. Αυτές οι θερμοκρασίες είναι πιο εύκολο να επιτευχθούν στα αρχικά στάδια της κομποστοποίησης όπου υπάρχει σε πληθώρα άνθρακας για μεγιστοποίηση της μικροβιακής δραστηριότητας. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει ανάγκη εξυγίανσης του υλικού από παθογόνους οργανισμούς, χαμηλότερες των 55 °C θερμοκρασίες μπορεί να οδηγήσουν σε γρηγορότερη σταθεροποίηση [3].

Η ρύθμιση της θερμοκρασίας γίνεται με αερισμό του υλικού. Ο αερισμός μπορεί να είναι ασυνεχής (με αναστροφή των σωρών) ή συνεχής (διοχετεύοντας αέρα μέσα στο σωρό του υλικού). Στην πρώτη περίπτωση παρατηρείται μια πρόσκαιρη πτώση της θερμοκρασίας η οποία γρήγορα επανέρχεται σε υψηλά επίπεδα. Στη

δεύτερη περίπτωση η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή στα επιθυμητά επίπεδα, με μειονέκτημα την όχι ομοιόμορφη κατανομή του αέρα στην μάζα του υλικού [17].

pH

Το pH είναι η μέτρηση της οξύτητας ή αλκαλικότητας ενός υλικού. Επηρεάζει έμμεσα την κομποστοποίηση και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης της οργανικής ουσίας και προσδιορισμού της αποσάθρωσής της. Συνδέεται στενά με τον μικροβιακό πληθυσμό καθώς διαφορετικά ήδη ευδοκιμούν σε συγκεκριμένες τιμές του pH. Τα βακτήρια προτιμούν τιμές ουδέτερου pH, οι μύκητες 4 έως 6 ενώ οι ακτινομύκητες ευδοκιμούν σε ελαφρώς αλκαλικό περιβάλλον [18].

Οι Jeris και Regan διαπίστωσαν ότι η κομποστοποίηση με μέγιστη θερμοκρασία έλαβε χώρα σε τιμές pH από 7.5 μέχρι 8.5. Η σταθεροποίηση του προϊόντος μειωνόταν για τιμές κατώτερες ή υψηλότερες των προαναφερθέντων [15]. Άριστο pH θεωρείται όμως εκείνο της ελαφρά αλκαλικής αντίδρασης με τιμές από 6.5 έως 7.5, καθώς ευνοεί την δραστηριότητα των βακτηρίων χωρίς παράλληλα να εμποδίζει σημαντικά αυτήν των μυκήτων [19].

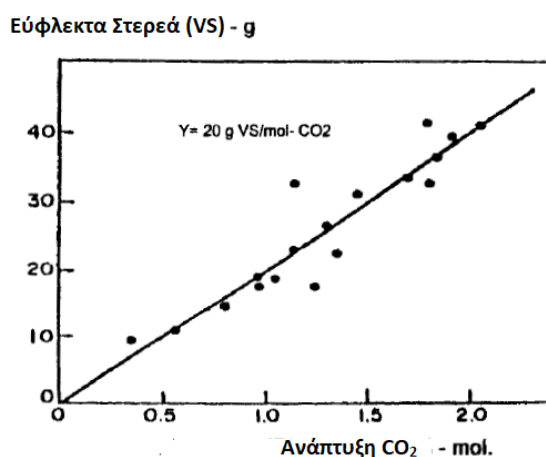
Στα αρχικά στάδια της κομποστοποίησης το pH είναι χαμηλό με τιμές 4.5 έως 6 λόγω της παραγωγής οργανικών οξέων από την αποικοδόμηση της ύλης μέσω των μικροοργανισμών. Στην συνέχεια τα οργανικά οξέα αποδομούνται ενώ ταυτόχρονα απελευθερώνεται αμμωνία και αυξάνει η αλατότητα του σωρού λόγω της εξάτμισης του νερού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της τιμής του pH. Στην συνέχεια, λόγω της απομάκρυνσης της παραγόμενης αμμωνίας από των σωρό (εξάτμιση, μετατροπή αμμωνίας σε νιτρικά) παρατηρείται μια πτώση στην τιμή του pH με αποτέλεσμα ανεξάρτητα από το pH των πρώτων υλών, η κομποστοποίηση να δίνει ένα τελικό προϊόν με σταθερό pH κοντά στο ουδέτερο [20].

Άνθρακας

Ο άνθρακας παρέχεται στον μικροβιακό πληθυσμό μέσω της αποικοδόμησης φυτών καθώς και ζωικών και ανθρώπινων αποβλήτων. Η κύρια χρήση του άνθρακα είναι για τη κυτταρική ανάπτυξη. Κατά την διάρκεια της μικροβιακής δραστηριότητας, παράγεται αέριο διοξείδιο του άνθρακα το οποίο εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα. Στα αρχικά στάδια της κομποστοποίησης αξιοποιούνται η ήδη διαθέσιμη ποσότητα άνθρακα της πρώτης ύλης ενώ καθώς η διεργασία προχωρά η ανάπτυξη διοξειδίου του άνθρακα ελαχιστοποιείται λόγω της μείωσης της μικροβιακής δραστηριότητας αλλά και του διαθέσιμου άνθρακα [3].

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία η έκλυση διοξειδίου του άνθρακα και η απώλεια υγρασίας μεγιστοποιούνται σχεδόν ταυτόχρονα με την μεγιστοποίηση της

θερμοκρασίας της κομποστοποίησης. Στην συνέχεια, η ελάττωση της θερμοκρασίας του σωρού οδηγεί στην ελάττωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και της απώλειας υγρασίας. Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα αρχικά ξεπερνούν τις απώλειες σε νερό, ενώ καθώς η μεγαλύτερη ποσότητα διαθέσιμου άνθρακα καταναλώνεται οι εκπομπές σε διοξείδιο του άνθρακα μειώνονται και υστερούν σε σχέση με τις απώλειες υγρασίας [13]. Συμφωνά με τους Bach et.al, υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ των εύφλεκτων στερεών (VS) και του διοξειδίου του άνθρακα. Όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα ενός οργανικού υλικού σε εύφλεκτα στερεά, τόσο μεγαλύτερη είναι και η παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 1.5 [16].



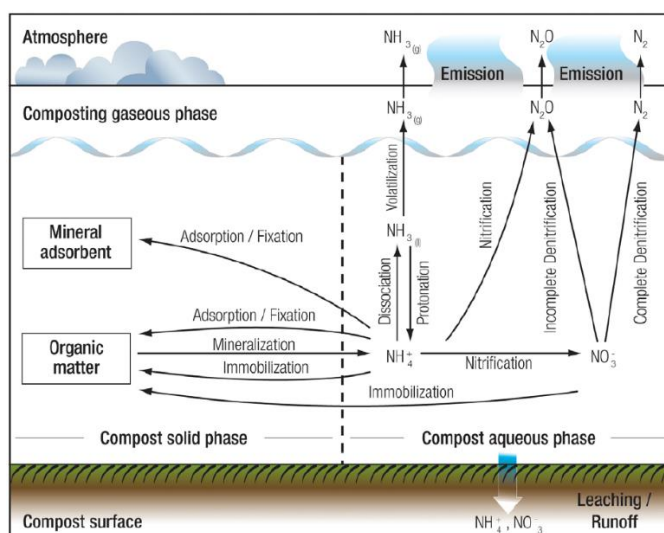
Σχήμα 1.5: Σχέση μεταξύ ανάπτυξης διοξειδίου του άνθρακα και εύφλεκτων στερεών κατά την διάρκεια της κομποστοποίησης [3].

Άζωτο

Το άζωτο αποτελεί σημαντικό θρεπτικό συστατικό της κομποστοποίησης, καθώς αξιοποιείται από τους μικροοργανισμούς για την σύνθεση πρωτεϊνών. Τα βακτήρια περιέχουν 7-11% άζωτο επί ξηρής βάσης, ενώ οι μύκητες 4-6%. Η ποσότητα του αζώτου στα διάφορα απόβλητα ποικίλει ανάλογα με το είδος τους. Για παράδειγμα, υπολείμματα τροφίμων και οργανικά υπολείμματα, έχουν μεγαλύτερη ποσότητα αζώτου από τα υπολείμματα των κήπων. Η μεγαλύτερη πρόκληση της κομποστοποίησης είναι η διατήρηση του αζώτου, το οποίο εξαντλείται με την πάροδο του χρόνου κατά την διάρκεια μιας κομποστοποίησης [3].

Για την καλύτερη διατήρηση του διαθέσιμου αζώτου, είναι σημαντική η κατανόηση του κύκλου του αζώτου και η μετατροπή του σε διάφορες μορφές, μέσω της αποδόμησης της οργανικής ύλης, με απώτερο σκοπό την παραγωγή ενός τελικού προϊόντος (κομπόστ) με υψηλή περιεκτικότητα σε θρεπτικό άζωτο. Ο κύκλος του αζώτου παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.6. Αρχικά, το οργανικό άζωτο ορυκτοποιείται σε

διαλυτά ιόντα αμμωνίου NH_4^+ . Τα αμμωνιακά ιόντα στην συνέχεια νιτροποιούνται σε νιτρικά ιόντα NO_3^- , είτε απομακρύνονται από την υγρή φάση μέσω της αέριας εκπομπής αμμωνίας NH_3 στο περιβάλλον. Κατά την διάρκεια αερόβιων συνθηκών, πιθανή είναι και η οξειδωση των αμμωνιακών ιόντων σε νιτρώδη ιόντα NO_2^- τα οποία με την σειρά τους οξειδώνονται σε νιτρικά ιόντα NO_3^- . Υπό αερόβιες συνθήκες τα νιτρικά ιόντα NO_3^- είναι σταθερά, αλλά όταν επικρατούν αναερόβιες συνθήκες απονιτροποιούνται σε υποοξείδιο του αζώτου N_2O και άζωτο, τα οποία εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα σε αέρια μορφή. Οι υψηλές θερμοκρασίες και συγκεντρώσεις σε αμμώνια NH_3 περιορίζουν τα νιτροποιητικά βακτήρια, και έτσι στα αρχικά θερμοφιλικά στάδια της κομποστοποίησης παρατηρείται μικρή συγκέντρωση νιτρικών ιόντων NO_3^- . Αντιθέτως, όταν η θερμοκρασία μειώνεται και ξεκινάει το στάδιο της ωρίμανσης, η νιτροποίηση αυξάνει την συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων NO_3^- με ταυτόχρονη μείωση των αμμωνιακών NH_4^+ . Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η νιτροποίηση και η απονιτροποίηση συνεισφέρουν στην παραγωγή N_2O το οποίο εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα. Παρόλα αυτά, η απώλεια αζώτου στην μορφή του N_2O είναι αρκετά μικρότερη από αυτήν σε μορφή αμμωνίας NH_3 [21].



Σχήμα 1.6: Ο κύκλος του αζώτου στην κομποστοποίηση [21].

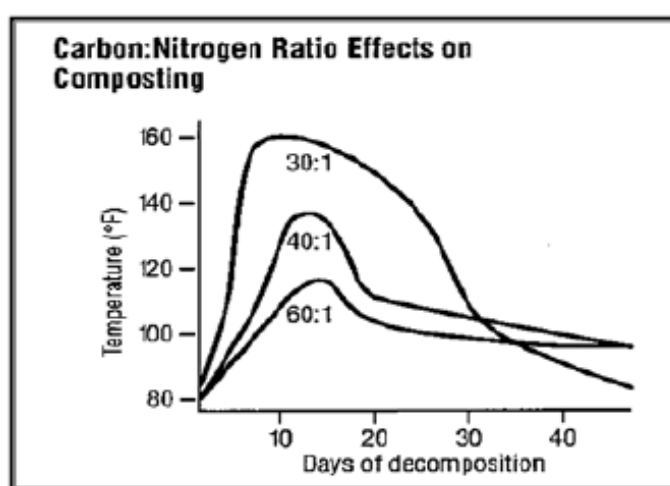
Λόγος άνθρακα-αζώτου C/N

Ο λόγος άνθρακα προς άζωτο αποτελεί δείκτη χουμοποίησης αλλά και δείκτη της γενικότερης δραστηριότητας των μικροοργανισμών στην διάρκεια της κομποστοποίησης. Ο λόγος αυτός αναφέρεται στην ικανότητα των μικροβιακών πληθυσμών να αποδομούν την οργανική ύλη. Οι μικροοργανισμοί έχουν ανάγκη πηγές αζώτου και άνθρακα για να συντηρηθούν και να καλύψουν τις ενεργειακές τους ανάγκες όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενες ενότητες. Ενώ το ποσοστό άνθρακα είναι περίπου σταθερό για κάθε οργανικό σώμα η περιεκτικότητα σε άζωτο ποικίλει. Η παρουσία του αζώτου σε επαρκής ποσότητες εξασφαλίζει μια γρήγορη

χωρίς προβλήματα αποδόμηση, καθώς ο μεταβολισμός των μικροοργανισμών πραγματοποιείται ανεμπόδιστα [4].

Η ιδανικότερη τιμή του λόγου C/N, που συνίσταται να έχει ένας σωρός κομποστοποίησης, είναι από 25/1 έως 30/1, καθώς επιφέρει και την μέγιστη θερμοκρασία κομποστοποίησης όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 1.7. Για τιμές μικρότερες του 20/1, ο διαθέσιμος άνθρακας καταναλώνεται πλήρως χωρίς να έχει σταθεροποιηθεί όλο το άζωτο. Το επιπλέον άζωτο σε αυτήν την περίπτωση μπορεί να χαθεί στην ατμόσφαιρα ως αμμωνία ή υποξείδιο του αζώτου δημιουργώντας προβλήματα δυσάρεστων οσμών. Η συσσώρευση αμμωνίας συνδέεται με αναερόβιες συνθήκες και προκαλεί ποιοτική υποβάθμιση του σωρού και προβλήματα φυτοτοξικότητας [22]. Όταν ο λόγος C/N ξεπερνά την τιμή 50/1, η διεργασία της κομποστοποίησης επιβραδύνεται λόγω της απότομης κυτταρικής ανάπτυξης και της εξάντλησης του διαθέσιμου αζώτου, με τελικό αποτέλεσμα την μείωση της ανάπτυξης των κυττάρων. Καθώς τα κύτταρα πεθαίνουν, το άζωτο που έχουν αποθηκευμένο διατίθεται στα ζώντα κύτταρα [23].

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι, παρόλο που η αναλογία C/N αποτελεί χρήσιμο οδηγό για την δημιουργία του σωρού της κομποστοποίησης, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν και ο βαθμός κατά τον οποίο οι οργανικές ενώσεις αποσυντίθενται. Για παράδειγμα, το πριονίδι αποσυντίθεται και ελευθερώνει τον άνθρακα του γρηγορότερα από το ξύλινα υλικά λόγω της αντοχής της λιγνίνης στην αποσύνθεση. Αντίστοιχα ο άνθρακας που περιέχεται στα σάκχαρα των αποβλήτων των φρούτων καταναλώνεται γρηγορότερα από τον άνθρακα της κυτταρίνης στο πριονίδι. Γενικά, αν ο άνθρακας είναι σε οργανικές ενώσεις που δύσκολα αποδομούνται, ο ρυθμός της κομποστοποίησης μειώνεται [4].



Σχήμα 1.7: Σχέση λόγου C/N με την θερμοκρασία στην κομποστοποίηση [3]

Πρώτη ύλη

Για μια επιτυχημένη κομποστοποίηση θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη η φύση και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της πρώτης ύλης. Η δομή και η φύση της πρώτης ύλης αποτελούν κριτήριο για την επιλογή της καλύτερης μεθόδου, για γρήγορη και αποτελεσματική κομποστοποίηση. Διάφορα υλικά που μπορούν να αξιοποιηθούν αναφέρονται στον Πίνακα 1.2 [4].

Πίνακας 1.2: Υλικά κατάλληλα για κομποστοποίηση [4].

Πηγή	Υλικά
Γεωργική βιομηχανία	Ελαιοπυρήνας, πυρηνόξυλο, λιόφυλλα, άχυρο, υπολείμματα εκκοκισμού βάμβακος
Βιομηχανία ξύλου	Φλοιός δέντρου
Απορρίμματα πόλεων	Κλαδιά, φύλλα, οργανικά σκουπίδια, λάσπη βιολογικού καθαρισμού
Βιομηχανία τροφίμων	Υπολείμματα φρούτων, λαχανικών, απορρίμματα σφαγείου
Ζωοτεχνική μονάδα	Κοπριές χοιροστασίων, ορνιθοτροφείων, βουστασίων

Οι διάφορες πρώτες ύλες που θα επιλεγθούν για την κομποστοποίηση θα πρέπει να ικανοποιούν όλα τα κριτήρια που επηρεάζουν την διεργασία όπως έχουν ήδη αναφερθεί, όπως η υγρασία, ο λόγος C/N, η περιεκτικότητα σε άνθρακα και άζωτο, έτσι ώστε το τελικό προϊόν που θα παραχθεί να είναι υψηλής ποιότητας [4].

Σημαντικό ρόλο στην κομποστοποίηση, έχει η δυνατότητα συνδυασμού πρώτων υλών, έτσι ώστε να παραχθεί ένα τελικό προϊόν υψηλής ποιότητας. Ο σωστός συνδυασμός έχει τις προδιαγραφές να οδηγήσει σε μία βέλτιστη πορεία κομποστοποίησης, ταχύτερη και ασφαλέστερη. Υλικά που από μόνα τους είναι προβληματικά, όταν συνδυαστούν με άλλα υπάρχει ομαλοποίηση στον χειρισμό τους και η παραγωγή ασφαλούς προϊόντος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα, τα υγρά απόβλητα των ελαιοτριβείων, η διαχείριση των οποίων αποτελεί ένα μεγάλο περιβαλλοντικό πρόβλημα, μπορούν να επεξεργαστούν μέσω της συγκομποστοποίησης παράλληλα με τα στερεά απόβλητα. Το ίδιο συμβαίνει και με το οργανικό κλάσμα των αστικών αποβλήτων το οποίο μπορεί να συγκομποστοποιηθεί με κατάλληλη ποσότητα βιολογικής ίλως [4].

1.1.4. Συστήματα κομποστοποίησης

Η κομποστοποίηση χωρίζεται σε δύο κύριες κατηγορίες συστημάτων : τα συστήματα ανοιχτού και τα συστήματα κλειστού τύπου. Τα συστήματα ανοιχτού

τύπου διαιρούνται με βάση το είδος του αερισμού σε : συστήματα με δυναμικό αερισμό / αναστρεφόμενα σειράδια (windrows) και συστήματα με στατικό αερισμό (aeretic static pile). Στα συστήματα κλειστού τύπου η διεργασία λαμβάνει χώρα μέσα σε βιοαντιδραστήρες.

Συστήματα ανοιχτού τύπου

Η πρώτη ύλη διαμορφώνεται σε κωνικούς σωρούς, τα σειράδια. Η μέθοδος αυτή είναι η πλέον διαδεδομένη λόγω του χαμηλού κατασκευαστικού κόστους, της απλότητας των χειρισμών και της ποσότητας πρώτης ύλης που μπορεί να διαχειριστεί [24].

Συστήματα με δυναμικό αερισμό / αναστρεφόμενα σειράδια

Σε αυτά τα συστήματα ο αερισμός του σωρού γίνεται με μηχανήματα, ώστε να διατηρηθούν οι αερόβιες συνθήκες. Το προς κομποστοποίηση μίγμα στοιβάζεται σε σειράδια, των οποίων το ύψος, το πλάτος και το σχήμα των γραμμικών σωρών ρυθμίζονται με βάση το είδος του υλικού και τον τύπο του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται για την ανάδευση [25].

Συστήματα στατικού αερισμού

Σε αυτά τα συστήματα οι σωροί διαμορφώνονται από την αρχή της διαδικασίας της κομποστοποίησης, καθώς δεν γίνεται αναστροφή. Το μίγμα τοποθετείται στην ίδια διάταξη με αυτή των αναστρεφόμενων σειραδίων και εμπλουτίζεται με διογκωτικούς παράγοντες, όπως φύλλα ή πριονίδια, ώστε να υπάρξει η κατάλληλη δομή και το κατάλληλο πορώδες για τον αερισμό και την μείωση της υγρασίας σε επίπεδα 60% και χαμηλότερα [24], [25]. Ο αερισμός γίνεται μέσω θετικής ή αρνητικής πίεσης. Με αυτήν την μέθοδο η διάρκεια της κομποστοποίησης είναι μεγαλύτερη και το τελικό προϊόν είναι ανομοιογενές [26].

Συστήματα κλειστού τύπου

Στα συστήματα κλειστού τύπου η κομποστοποίηση γίνεται σε κατάλληλα βυτία διαφορετικών τύπων και χωρητικότητας και επιτρέπει στο χειριστή να ελέγχει την όλη διαδικασία. Το υλικό κομποστοποιείται μέσα σε κάποιο τύπο αντιδραστήρα, ασχέτως αν αυτός είναι κλειστός ή ανοιχτός, και αν διαθέτει ή όχι σύστημα μηχανικής ανάμιξης. Οι αντιδραστήρες αυτοί περιορίζουν τις οσμές και την διάρκεια της διαδικασίας, μέσω ελέγχου των περιβαλλοντικών συνθηκών, όπως η ροή του αέρα, η θερμοκρασία και η συγκέντρωση του οξυγόνου. Τα συστήματα αυτά μπορεί να είναι καθέτου ροής ή οριζόντιας ροής με τοιχώματα καταλλήλως κατασκευασμένα, έτσι ώστε να ελαχιστοποιούν τη θερμοδυναμική εναλλαγή μεταξύ

του υλικού και του περιβάλλοντος. Μετά το τέλος της κομποστοποίησης το τελικό προϊόν αποθηκεύεται σε σωρό για το στάδιο της ωρίμανσης [24].

1.1.5. Χρήσεις του κομπόστ

Το τελικό προϊόν της διαδικασίας της κομποστοποίησης μπορεί να αξιοποιηθεί σε διάφορους τομείς ανάλογα με το βαθμό ωριμότητάς του και τα χαρακτηριστικά του. Μερικές από τις χρήσεις του είναι [3]:

- Εδαφοβελτιωτικό.
- Σε ΧΥΤΑ ως υλικό κάλυψης.
- Αποκατάσταση εδάφους σε άγονες και φτωχές σε θρεπτικά συστατικά εκτάσεις, που προέρχονται είτε από εντατική καλλιέργεια είτε από πυρκαγιές.
- Για έλεγχο διαβρωτικών φαινομένων.
- Σε αναδασώσεις.
- Σε εξυγιάνσεις εδαφών.
- Για ανάπτυξη καλλωπιστικών φυτών, κηπευτικών, ανθοκομικών φυτών και σε φυτώρια.
- Για την καταπολέμηση μυκητών εδάφους, νηματωδών κ.α.

1.2. Απόβλητα ελαιοτριβείων ως πρώτη ύλη κομποστοποίησης

Σε όλη την έκταση της Μεσογείου εδώ και χιλιάδες χρόνια οι διάφοροι πληθυσμοί παρήγαγαν και συνεχίζουν να παράγουν λάδι ελιάς. Σήμερα, περίπου 900 εκατομμύρια δέντρα ελιάς καλύπτουν πάνω από 10 εκατομμύρια στρέμματα παγκοσμίως, 98% των οποίων βρίσκονται στην περιοχή της Μεσογείου [27]. Αυτό το φαινόμενο οφείλεται στην επιτυχία της Μεσογειακής διατροφής, η οποία σχετίζεται με μειωμένα περιστατικά αθηροσκλήρωσης, συγκεκριμένων μορφών καρκίνου, καρδιαγγειακών και νεύρο-εκφυλιστικών ασθενειών καθώς και πολλών άλλων ευεργετικών λειτουργιών [28].

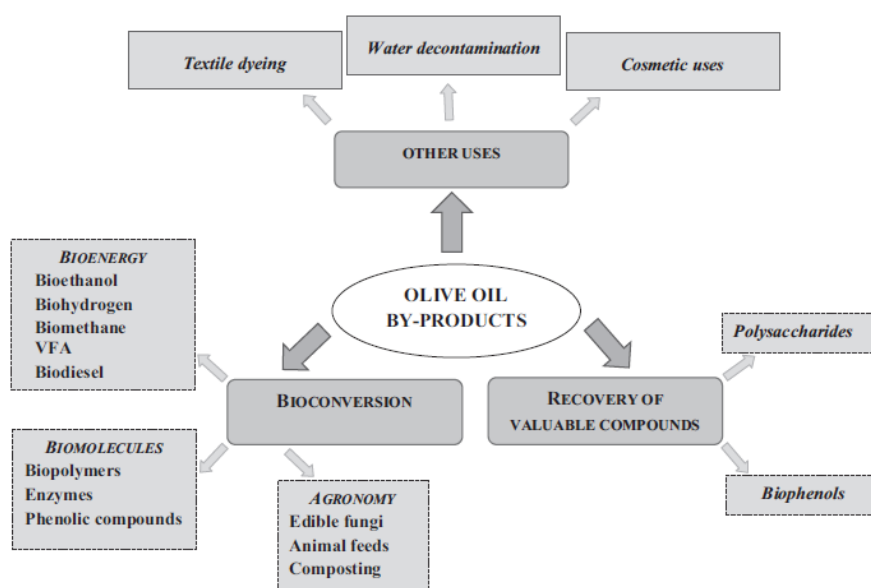
Παρόλα αυτά, η διεργασία εξαγωγής λαδιού ελιάς οδηγεί στην παραγωγή υψηλών ποσοτήτων δύο κύριων παραπροϊόντων : α) το στερεό υπόλειμμα (πυρήνας, φύλλα ελιάς) και β) το υγρό απόβλητο ελαιοτριβείου (OMWW). Διάφορα χαρακτηριστικά των αποβλήτων των ελαιοτριβείων παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.3. Και τα δύο παραπροϊόντα, αλλά ειδικότερα το υγρό απόβλητο, είναι ιδιαίτερα βλαβερά για το περιβάλλον, όπως έχουν δείξει πολλές μελέτες, κυρίως για την επίπτωση που έχουν στους μικροβιακούς πληθυσμούς του εδάφους, στα υδατικά οικοσυστήματα και τον αέρα μέσω των εκπομπών φαινόλης και διοξειδίου του θείου. Οι φαινόλες της ελιάς παίζουν σημαντικό ρόλο στην μόλυνση εξαιτίας της τοξικότητας και της αντιμικροβιακής δραστηριότητάς τους, δημιουργώντας ένα

μείζον περιβαλλοντικό ζήτημα σε περιοχές ελαιοπαραγωγής, όπως η Ισπανία, η Ελλάδα και η Ιταλία [29], [28].

Πίνακας 1.3: Χημικά χαρακτηριστικά αποβλήτων των ελαιοτριβείων [28].

Παράμετρος	Απόβλητα ελαιοτριβείου		
	Υγρό απόβλητο	Στερεό υπόλειμμα	
		Πάστα ελιάς	Διφασικό υγρό απόβλητο
Πούλπα (%)		12 - 35	10 - 15
Πυρήνας (%)		14 - 45	12 - 18
Ξηρή ύλη (%)	6.33 - 7.19	87.1 - 94.4	
Τέφρα (%)	1	1.7 - 4	1.42 - 4
pH	2.24 - 5.9		4.9 - 6.8
EC (dS/m)	5.5 - 10		1.78 - 5.24
Άνθρακας (%)	2 - 3.3	29.03 - 42.9	25.37
Οργανική ύλη (%)	57.2 - 62.1	85	60.3 - 98.5
Ολικό άζωτο (%)	0.63	0.2 - 0.3	0.25 - 1.85

Επομένως, έχει γεννηθεί η ανάγκη ανάπτυξης τεχνολογιών επεξεργασίας των παραπροϊόντων της παραγωγής λαδιού ελιάς, έτσι ώστε αυτά τα μην απορρίπτονται ανεπεξέργαστα στο περιβάλλον. Είδη αναπτύσσονται πολλές τεχνολογίες επεξεργασίας τέτοιου είδους αποβλήτων όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.8. Οι τεχνολογίες αυτές περιλαμβάνουν την χημική ή βιολογική επεξεργασία των αποβλήτων καθώς και τον συνδυασμό τους. Μία τεχνολογία επεξεργασίας των παραπροϊόντων των ελαιοτριβείων είναι και η κομποστοποίηση [28].



Σχήμα 1.8: Μέθοδοι επεξεργασίας αποβλήτων ελαιοτριβείων [28].

Η κομποστοποίηση αποτελεί μία από τις κύριες τεχνολογίες επεξεργασίας των αποβλήτων ελαιοτριβείων, τόσο μόνο των στερεών αποβλήτων, αλλά και σε συνδυασμό με τα υγρά απόβλητα. Περιλαμβάνει, όπως έχει ήδη αναφερθεί, την αερόβια βιολογική αποδόμηση οργανικών υλικών με στόχο την παραγωγή σταθερών χουμικών και ορυκτών ουσιών, για αύξηση της γονιμότητας του εδάφους και της φυτικής παραγωγής. Οι Manios et.al, μελέτησαν την εμπορική παραγωγή κομπόστ από τα στερεά απόβλητα ελαιοτριβείων, και πιο συγκεκριμένα του πυρήνα και των φύλλων της ελιάς, όπως αυτά λαμβάνονται απευθείας από τα ελαιοτριβεία [30]. Τα υγρά απόβλητα ελαιοτριβείων μπορούν να προστεθούν στον προς κομποστοποίηση σωρό των στερεών αποβλήτων του ελαιοτριβείου, εμπλουτίζοντάς τον με οργανική ύλη. Το υγρό απόβλητο στην συνέχεια, είτε καταναλώνεται από τους μικροοργανισμούς της κομποστοποίησης είτε εξατμίζεται [28].

Τέλος, τα απόβλητα ελαιοτριβείων μπορούν να αξιοποιηθούν και σε άλλες μεθόδους επεξεργασίας όπως η παραγωγή βιο-ενεργών φαινολικών συμπλόκων, ζωικών τροφών, βιο-υδρογόνου, βιο-μεθανίου, βιο-αιθανόλης, βιο-ντίζελ, ενζύμων, διαφόρων βιο-πολυμερών, σαπουνιού, βιολογικού λιπάσματος, φυτοορμονών και άλλων, μέσω χημικής ή βιολογικής επεξεργασίας [28].

1.3. Χρώμα και μέθοδοι μέτρησης του

1.3.1. Χρώμα και φωτισμός

Το φυσικό αίτιο που προκαλεί την αντίληψη του χρώματος είναι τα διαφορετικά μήκη κύματος της φωτεινής ακτινοβολίας που περιέχονται στο ορατό φάσμα. Τα μεγαλύτερα μήκη κύματος αντιστοιχούν στο κόκκινο και τα μικρότερα στο ιώδες. Για αυτό και οι ακτινοβολίες έξω από τα όρια του ορατού φάσματος ονομάζονται υπέρυθρες και υπεριώδεις, αντίστοιχα. Η κατανομή του φάσματος της ορατής ακτινοβολίας σε αντιστοίχιση με τις βασικές χρωματικές αποχρώσεις που αντιλαμβάνεται το ανθρώπινο μάτι παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.4.

Πίνακας 1.4: Μήκος κύματος και συχνότητα φωτεινής ακτινοβολίας του ορατού φάσματος [31].

Χρώμα	Μήκος κύματος	Συχνότητα
Κόκκινο	700-630 nm	430-480 THz
Πορτοκαλί	630-590 nm	480-510 THz
Κίτρινο	590-560 nm	510-540 THz
Πράσινο	560-490 nm	540-610 THz
Μπλε	490-450 nm	610-670 THz
Ιώδες	450-400 nm	670-750 THz

Για να γίνει αντιληπτό το χρώμα απαιτείται η ταυτόχρονη ύπαρξη τριών παραγόντων [32], [33]:

- Μιας φωτεινής πηγής.
- Ενός αντικειμένου.
- Ενός παρατηρητή, ο οποίος καταγράφει το χρώμα υποκειμενικά, ή μιας συσκευής μέτρησης του χρώματος που θεωρείται και αντικειμενικός παρατηρητής.

Τέλος, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι ο τύπος φωτισμού στον οποίο εκτίθεται οποιοδήποτε αντικείμενο αποτελεί πολύ σημαντικό παράγοντα για την εμφάνιση του. Αυτό σημαίνει ότι ο τύπος φωτισμού υπό τον οποίο χαρακτηρίζεται ένα χρώμα είναι σημαντικός αφού ουσιαστικά επηρεάζει το πώς αυτό θα γίνει αντιληπτό από τον παρατηρητή [32], [33]. Για αυτόν τον λόγο ο οργανισμός CIE (International Commission of Illumination), έχει καθορίσει πρότυπους τύπους φωτισμού για την αξιολόγηση του χρώματος, οι οποίοι εκπέμπουν σε προκαθορισμένα μήκη κύματος φωτεινής ακτινοβολίας [34].

1.3.2. Χρωματομετρία

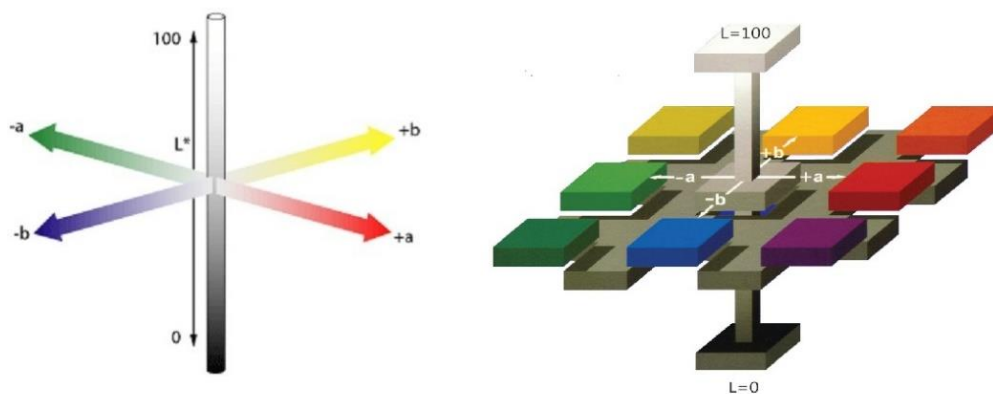
Χρωματομετρία (colorimetry) είναι η επιστήμη που ασχολείται με τον ποσοτικό προσδιορισμό και την φυσική περιγραφή της ανθρώπινης αντίληψης του χρώματος [35]. Εμφανίστηκε ως επιστήμη το 1930 από την CIE με τη διεξαγωγή πειραμάτων οπτικής. Τα χρωματομετρικά συστήματα της CIE είναι τα μόνα παγκοσμίως αποδεκτά για τη μέτρηση του χρώματος με συνέπεια όλα τα διεθνή πρότυπα να είναι βασισμένα σε αυτά που ορίζονται από αυτή [32]. Η CIE εκφράζει το χρώμα με μαθηματικές τιμές οι οποίες προκύπτουν από μαθηματικές εξισώσεις. Ο προσδιορισμός του χρώματος επακριβώς ξεκίνησε στις αρχές του 19^{ου} αιώνα με τη δημιουργία των χρωματικών μοντέλων, χώρων δηλαδή που σε κάθε χρώμα αντιστοιχούν αριθμητικές συντεταγμένες [36].

Το πρώτο χρωματικό μοντέλο που δημιουργήθηκε είναι το μοντέλο RGB. Εκτός από αυτό υπάρχουν και άλλα χρωματικά μοντέλα όπως το CIE Lab, το CMY(K), το HSB καθώς και άλλα τα οποία αξιοποιούνται. Από όλα αυτά τα χρωματικά μοντέλα τα οποία έχουν δημιουργηθεί θα γίνει αναλυτικότερη αναφορά μόνο στο μοντέλο CIE Lab, λόγω της ευρείας χρήσης του στην ποιοτική ανάλυση του χρώματος διαφόρων προϊόντων όπως τα τρόφιμα, το κομπόστ και γενικότερα του χρώματος [37].

1.3.3. Χρωματικό μοντέλο CIE Lab

Το χρωματικό μοντέλο CIE Lab, αποτελεί ένα ομοιόμορφο οπτικά χρωματικό χώρο, ο οποίος προσομοιάζει καλύτερα από όλα τα χρωματικά συστήματα ή μοντέλα

την ανθρώπινη αντίληψη των χρωμάτων. Το κάθε χρώμα περιγράφεται από 3 συντεταγμένες ή παράγοντες, οι οποίοι ονομάζονται L, a, και b, και απεικονίζονται σε τρισδιάστατο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Ο παράγοντας L (Lightness) αποθηκεύει όλη την πληροφορία φωτεινότητας της εικόνας παίρνοντας τιμές από 0 (μαύρο) έως 100 (λευκό). Οι παράγοντες a και b αποθηκεύουν την πληροφορία χρώματος χωρίς να υπάρχουν για αυτά αριθμητικά όρια. Θετικές τιμές του παράγοντα a αντιπροσωπεύουν αποχρώσεις του κόκκινου ενώ αρνητικές τιμές αντιπροσωπεύουν αποχρώσεις του πράσινου. Θετικές τιμές του παράγοντα b αντιπροσωπεύουν αποχρώσεις του κίτρινου, ενώ αρνητικές τιμές του αντιπροσωπεύουν αποχρώσεις του μπλε. Η απεικόνιση των συντεταγμένων L, a, και b παρουσιάζεται αναλυτικά στο Σχήμα 1.9 [38], [39].

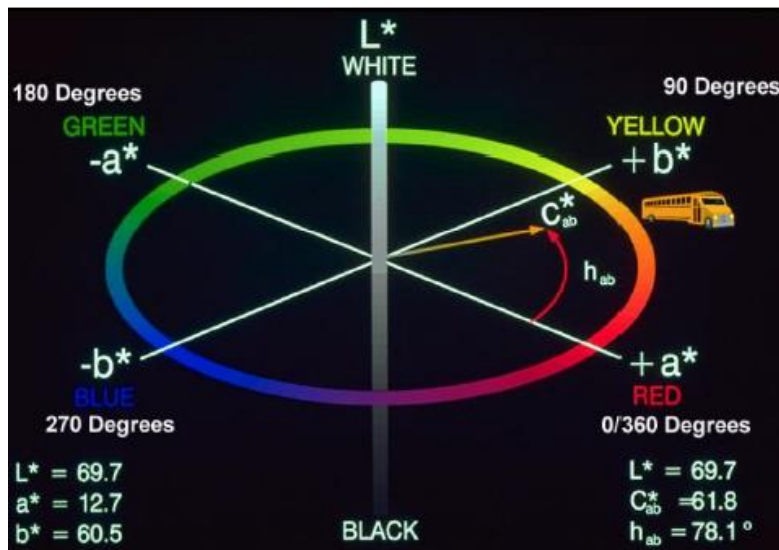


Σχήμα 1.9: Τρισδιάστατο καρτεσιανό σύστημα του χρωματικού μοντέλου CIELab [39].

Εκτός από τις τρισδιάστατες καρτεσιανές συντεταγμένες, το μοντέλο CIELab μπορεί να αναπαρασταθεί και σε κυλινδρικό σύστημα πολικών συντεταγμένων με το μοντέλο CIE L, C, h, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.10. Όπου :

- L (Lightness): Φωτεινότητα όπως προαναφέρθηκε.
- C (Chroma): Χρωματική πυκνότητα: Προσδιορίζει την συγκέντρωση, δηλαδή την ένταση ή την καθαρότητα του χρώματος ή διαφορετικά τη σχέση μεταξύ της έντασης της φωτεινότητας της μελετώμενης απόχρωσης [40], [35].
- h (Hue angle): Χροιά: Μετράται σε μοίρες και προσδιορίζει την απόχρωση παίρνοντας τιμές 0° για το κόκκινο-πορφυρό, 90° για το κίτρινο, 180° για το πράσινο και 270° για το μπλε [40].

Το μοντέλο CIELab είναι ένας ευρύς χρωματικός χώρος. Αποτελεί υπερσύνολο το οποίο περιλαμβάνει μοντέλα όπως το RGB και το CMYK καθώς και όλα τα άλλα χρωματικά μοντέλα. Αν φτάσουμε στα όρια του, προκύπτουν χρώματα εξωπραγματικά, έξω από τις δυνατότητες άλλων συσκευών απεικόνισης. Τέλος, πολύ σημαντικό είναι το γεγονός ότι το χρωματικό μοντέλο CIELab είναι 'device independent', μη εξαρτόμενο δηλαδή από τις ιδιότητες των συσκευών καταγραφής ή απεικόνισης, κάτι που δεν συμβαίνει με τα υπόλοιπα χρωματικά μοντέλα [41], [42].



Σχήμα 1.10: Κυλινδρικές πολικές συντεταγμένες του χρωματικού μοντέλου CIELab [39].

1.3.4. Χρωματόμετρο

Υπάρχουν διάφορα συστήματα τα οποία χρησιμοποιούνται για την μέτρηση του χρώματος, και ένα από αυτά είναι το χρωματόμετρο. Τα πρώτα χρωματόμετρα που δημιουργήθηκαν ήταν τα τριχρωματικά χρωματόμετρα ή χρωματόμετρα τριπλής διέγερσης (Tristimulus Colorimeter). Έχουν ως βάση την αρχή της ισοδύναμης διέγερσης των R, G και B, τα οποία με την πάροδο του χρόνου βελτιωνόταν με αποτέλεσμα την δημιουργία διαφορετικών και περισσότερο εξελιγμένων οργάνων μέτρησης [43].

Τα νεότερα και βελτιωμένα όργανα παίρνουν τις απορροφήσεις σε συγκεκριμένα μήκη κύματος δίνοντας αποτελέσματα των χρωματικών παραγόντων ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο χρωματικό μοντέλο (π.χ CIELab). Με τα όργανα αυτά είναι δυνατή η μέτρηση μιας απόχρωσης, επομένως και των διαφόρων αποχρώσεων [43] [38].

Οι αισθητήρες των χρωματόμετρων με τη βοήθεια ειδικών φίλτρων προσομοιάζουν την λειτουργία του ανθρώπινου οφθαλμού και οι μετρήσεις γίνονται με προκαθορισμένη φωτεινή πηγή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι συνθήκες αξιολόγησης του χρώματος να είναι πάντα οι ίδιες ανεξάρτητα από τις εξωτερικές συνθήκες (νύχτα ή μέρα, εσωτερικός ή εξωτερικός χώρος) [38]. Η χρωματομετρική αυτή μέθοδος αξιολογεί πολύ μικρές μόνο επιφάνειες των προϊόντων κάθε φορά, με αποτέλεσμα η αξιοπιστία της να είναι συνάρτηση της πυκνότητας των λαμβανόμενων χρωματομετρικών μετρήσεων [43].

1.3.5. Χρωματομετρία και κομποστοποίηση

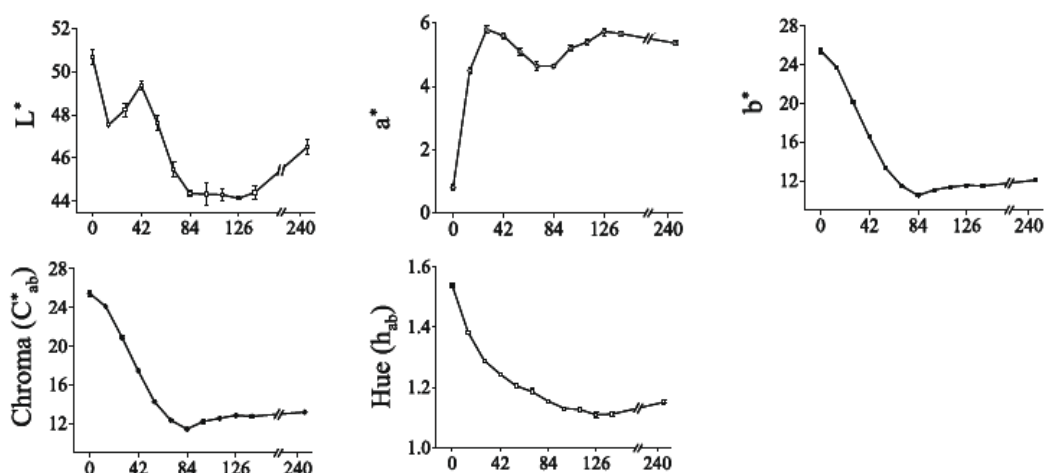
Μία από τις σημαντικότερες δυσκολίες της κομποστοποίησης είναι ο άμεσος και ακριβής προσδιορισμός της ωριμότητας του τελικού προϊόντος. Έως τώρα έχουν προταθεί διάφοροι δείκτες και μέθοδοι για την αξιολόγηση της αποδόμησης της οργανικής ύλης όπως η θερμοκρασία του σωρού, ο λόγος C/N, η συγκέντρωση οργανικού άνθρακα, η ποσότητα χουμικών ουσιών και τα κλάσματα τους, η μικροβιακή αναπνοή, η δοκιμή βλάστησης κ.α. Οι περισσότερες από αυτές τις κοινώς αξιοποιήσιμες μεθόδους αξιολόγησης της κομποστοποίησης, βασίζονται σε χημικές αναλύσεις που είναι είτε χρονοβόρες είτε δαπανηρές. Επιπλέον, έχουν εντοπιστεί και πιθανά προβλήματα όσον αφορά την αξιοπιστία των μικροβιολογικών δοκιμών. Επομένως, εδώ και πολύ καιρό είναι αναγκαία η δημιουργία μιας απλής και φθηνής μεθόδου αξιολόγησης του μετασχηματισμού της οργανικής ύλης [3], [37].

Αυτή την δυνατότητα την παρέχει η χρωματομετρία και πιο συγκεκριμένα οι μεταβλητές χρώματος του μοντέλου CIELab, οι οποίες πλέον χρησιμοποιούνται ευρέως για να χαρακτηρίσουν την σύνθεση της οργανικής ύλης του εδάφους λόγω της συνεχής ομοιομορφίας του [44]. Πιο συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα από πολλά πειράματα έχουν αποκαλύψει ότι η περιεκτικότητα σε οργανικό άνθρακα, τα χουμικά οξέα και τα ανόργανα άλατα στο έδαφος σχετίζονται άμεσα με τις μεταβλητές χρώματος CIELab [44], [45].

Το τελικό προϊόν της κομποστοποίησης σχεδόν πάντα χρωματικά είναι πιο σκούρο από την αντίστοιχη πρώτη ύλη που αξιοποιείται, και πιο συγκεκριμένα χρώματος μαύρου ή σκούρου γκρι. Το γεγονός αυτό καθώς και η ομοιότητά του κομπόστ με τη μορφή του εδάφους, οδήγησε τους επιστήμονες στην υπόθεση ότι υπάρχει μεγάλη πιθανότητα η χρήση των μεταβλητών του μοντέλου CIELab να γίνει για τον χαρακτηρισμό της σύνθεσης της οργανικής ύλης στα διάφορα στάδια της κομποστοποίησης. Απώτερος σκοπός της χρήσης του χρωματικού μοντέλου CIELab είναι η επίλυση του προβλήματος της εκτίμησης της σταθεροποίησης της οργανικής ύλης κατά την διάρκεια της κομποστοποίησης [37].

Στην μελέτη τους, οι Khan et.al, διερεύνησαν την μεταβολή του χρώματος κατά την διάρκεια της κομποστοποίησης υπολειμμάτων επεξεργασίας πράσινου τσαγιού και πίτουρων ρυζιού, αξιοποιώντας τις μεταβλητές του χρωματικού μοντέλου CIELab. Μελετήθηκε η μεταβολή διαφόρων μεταβλητών του μοντέλου CIELab και πιο συγκεκριμένα των L, a, b, C, h οι οποίες παρουσίασαν ραγδαία μεταβολή τις πρώτες 42 με 84 μέρες της κομποστοποίησης ενώ στην συνέχεια σταθεροποιούνταν, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.11. Οι μεταβλητές L, b, h και C παρουσίασαν σταδιακή ελάττωση με την πάροδο του χρόνου, ενώ η μεταβλητή a σταδιακή αύξηση, επιβεβαιώνοντας την αρχική υπόθεση ότι το χρώμα μεταβάλλεται σταδιακά προς μία κατεύθυνση με την πάροδο του χρόνου. Στην συνέχεια, οι Khan et.al συσχέτισαν τις

μεταβλητές του χρώματος με την ωριμότητα του κομπόστ μετρώντας διάφορες φυσικές παραμέτρους όπως, η περιεκτικότητα σε οργανικό άνθρακα, ο λόγος C/N, η συγκέντρωση νιτρικών ιόντων αζώτου, η συγκέντρωση χουμικών οξέων και η δοκιμή βλάστησης. Κάθε μια από αυτές τις παραμέτρους ωριμότητας του κομπόστ αξιολογήθηκε με την χρήση του συντελεστή συσχέτισης Pearson, δίνοντας θεμιτά αποτελέσματα. Από τις τρεις κύριες χρωματικές μεταβλητές του μοντέλου CIELab, η μεταβλητή b εμφάνισε την ισχυρότερη συσχέτιση με τις ευρέως μετρούμενες παραμέτρους ωριμότητας της κομποστοποίησης, ακολουθούμενη από τις μεταβλητές L και a [37].

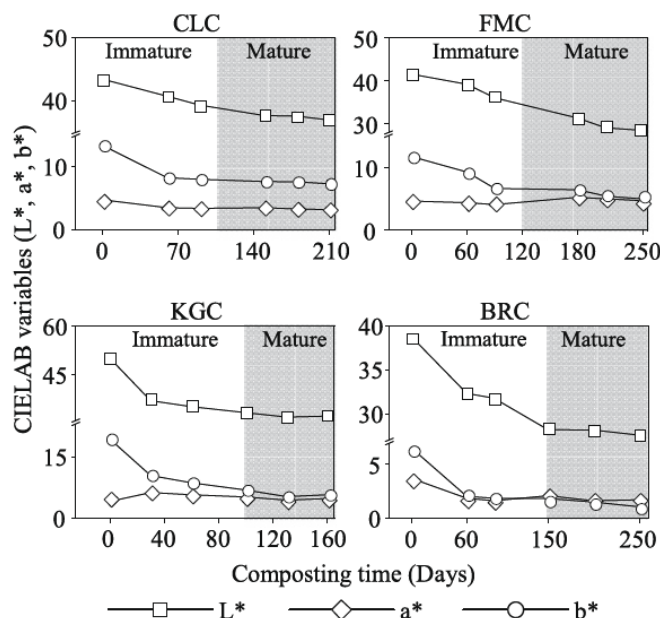


Σχήμα 1.11: Μεταβολή χρωματικών μεταβλητών του μοντέλου CIELab με την πάροδο του χρόνου κατά την διάρκεια κομποστοποίησης αποβλήτων τσαγιού [37].

Επιπλέον, οι Khan et.al, για να διασταυρώσουν την εγκυρότητα των μεταβλητών του μοντέλου CIELab για ευρεία χρήση στην αξιολόγηση της ωριμότητας του κομπόστ, μελέτησαν την κομποστοποίηση σε μεγάλη κλίμακα μονάδων που αξιοποιούν απορρίμματα βοοειδών (CLC), κοπριά αγροκτημάτων (FLC), απόβλητα κουζίνας (KGC) και φλοιούς δέντρων (BRC). Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης ήταν θετικά και οδήγησαν στην δημιουργία διαγραμμάτων ωριμότητας της κομποστοποίησης της κάθε πρώτης ύλης σε σχέση με τις χρωματικές μεταβλητές L, a και b, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.12 [37].

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι έχουν γίνει και άλλες χρωματομετρικές μελέτες διεργασιών κομποστοποίησης, βασισμένες σε παλαιότερα χρωματομετρικά συστήματα, όπως το CIE 1931 Standard Colorimetric System, οι οποίες όμως δεν είναι τόσο εκτενείς όσο η προαναφερθείσα μέθοδος των Khan et.al. Πιο συγκεκριμένα, οι García et.al, μελέτησαν την μεταβολή του χρώματος διαφόρων μειγμάτων λύματος και διαπίστωσαν πως υπάρχει ικανοποιητική συσχέτιση του

δείκτη Y του χρωματικού μοντέλου CIE 1931 με τον λόγο WSC/N [46]. Επιπροσθέτως, οι Sugahara et.al, σε μελέτες κομποστοποίησης διαφορετικών πρώτων υλών όπως, αστικά απόβλητα, σιτάρι και φλοιό δέντρων παρατήρησαν την υψηλή συσχέτιση της μεταβλητής Y του μοντέλου CIE 1931 με τον λόγο C/N [47].



Σχήμα 1.12: Διαγράμματα ωριμότητας κομποστοποίησης με βάση την μεταβολή των μεταβλητών χρώματος του μοντέλου CIELab σε σχέση με τον χρόνο [37].

1.4. Σκοπός

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι ο έλεγχος της κομποστοποίησης της βιομάζας, πιο συγκεκριμένα των στερεών αποβλήτων ελαιοτριβείου, με την χρήση μιας χρωματομετρικής μεθόδου. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε είναι το χρωματικό μοντέλο CIELab, με στόχο την συσχέτιση της μεταβολής των μεταβλητών του με τα διάφορα στάδια και φυσικοχημικές παραμέτρους της κομποστοποίησης. Πρωταρχικός στόχος επομένως, είναι η σωστή διεξαγωγή της κομποστοποίησης στερεών αποβλήτων ελαιοτριβείου και η καταγραφή της μεταβολής συγκεκριμένων δεικτών και παραμέτρων με την πάροδο του χρόνου, μέσω μιας σειράς μετρήσεων και χημικών αναλύσεων, έτσι ώστε να οριστούν τα διάφορα στάδια της κομποστοποίησης. Ταυτόχρονα, καταγράφεται και η εξέλιξη των μεταβλητών της μεθόδου CIELab με την πάροδο του χρόνου καθ' όλη την διάρκεια της κομποστοποίησης. Ερευνάται η ύπαρξη χρωματικών μεταβλητών των οποίων η μεταβολή σε σχέση με τον χρόνο είναι γνησίως αύξουσα ή φθίνουσα, με στόχο την δημιουργία διαγραμμάτων ωριμότητας του κομπόστ. Τέλος, ελέγχεται η πιθανή συσχέτιση των χρωματικών μεταβλητών με τις φυσικοχημικές παραμέτρους της κομποστοποίησης με την χρήση γραμμικών συντελεστών.

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1. Διεργασία κομποστοποίησης

Στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, η διεργασία της κομποστοποίησης διεξήχθη σε βιομηχανική κλίμακα στις εγκαταστάσεις της εταιρείας Οργανοχουμική Θράκης ΙΚΕ. Παρακάτω περιγράφεται αναλυτικά αυτή η διαδικασία.

2.1.1. Υπόστρωμα κομποστοποίησης

Στην συγκεκριμένη διεργασία ως πρώτη ύλη κομποστοποίησης χρησιμοποιήθηκαν τα στερεά απόβλητα τριφασικών και διφασικών ελαιοτριβείων (ΣΑΕ), τα οποία παρήχθησαν σε ελαιοτριβεία της ευρύτερης περιοχής της Θράκης. Τα στερεά αυτά απόβλητα αποτελούνται από ένα μείγμα πυρήνα και φύλλων ελιάς σε αναλογία περίπου 3:1, τα οποία δεν έχουν υποστεί περαιτέρω επεξεργασία και λαμβάνονται απευθείας από τα ελαιοτριβεία λίγες μέρες μετά την παραγωγή τους.

2.1.2. Σωρός κομποστοποίησης

Ο προς κομποστοποίηση σωρός κατασκευάστηκε αξιοποιώντας 30 tn ΣΑΕ (πυρήνας, φύλλα ελιάς) σε συνδυασμό με 15% κατά βάρος έτοιμου κομπόστ (μαγιά), το οποίο βρισκόταν στο στάδιο της ωρίμανσης. Η προσθήκη μαγιάς έγινε με στόχο την επιτάχυνση της διεργασίας της κομποστοποίησης, καθώς περιέχει μεγάλο αριθμό ενεργών μικροβιακών πληθυσμών μέσω των οποίων επιτυγχάνεται η αποδόμηση της οργανικής ύλης. Λόγω της αρκετά υψηλής υγρασίας (~50%) των αποβλήτων, όπως αυτά παρέχονται από τα ελαιοτριβεία, ο τελικός σωρός δεν χρειάστηκε επιπλέον διαβροχή με νερό.

Η κομποστοποίηση έγινε σε σύστημα ανοιχτού τύπου και πιο συγκεκριμένα σε σύστημα με δυναμικό αερισμό / αναστρεφόμενα σειράδια (windrows). Ο σωρός, συνολικού βάρους 34.5 Tn, τοποθετήθηκε σε εξωτερικό χώρο δημιουργώντας ένα σειράδι διαστάσεων 6 x 1.5 x 1.2 m, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1.

Όπως προαναφέρθηκε, λόγω του είδους του συστήματος κομποστοποίησης που επιλέχθηκε, ο αερισμός του εξασφαλίστηκε μέσω αναστροφής του σειραδιού, με την χρήση ειδικού μηχανήματος, φερόμενο σε γεωργικό ελκυστήρα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Η ανάδευση του σωρού γινόταν τακτικά κάθε μέρα, ειδικά στην αρχή της κομποστοποίησης έτσι ώστε ο σωρός να αναπτύξει σύντομα υψηλές θερμοκρασίες. Για την διεξαγωγή μιας ομαλής κομποστοποίησης ο αερισμός γινόταν

σε τέτοια συχνότητα έτσι ώστε να αποφεύγεται η δημιουργία αναερόβιων συνθηκών, με ταυτόχρονη διατήρηση των υψηλών θερμοκρασιών του σωρού.



Σχήμα 2.1: Σωρός κομποστοποίησης στοιβαγμένος σε σειράδι (windrow)



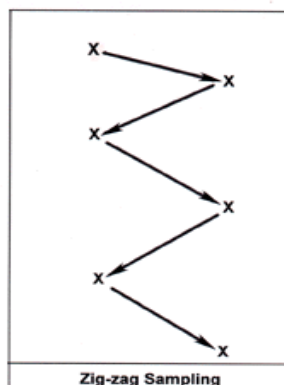
Σχήμα 2.2: Σύστημα δυναμικού αερισμού μέσω αναστροφής

2.1.3. Δειγματοληψία

Για την διεξαγωγή μετρήσεων και χημικών αναλύσεων του κομποστ πραγματοποιήθηκε η λήψη δειγμάτων με συχνότητα ανά δύο μέρες. Η δειγματοληψία γινόταν τόσο συχνά με στόχο την μέγιστη κατά δύναμη απαλοιφή πειραματικών σφαλμάτων, λόγω του μεγάλου μεγέθους του σωρού και της πιθανής ανομοιομορφίας του.

Τα δείγματα συλλέγονταν από διαφορετικά σημεία του σωρού κομποστοποίησης, έτσι ώστε να είναι αντιπροσωπευτικά της γενικής εικόνας ενώ ταυτόχρονα αποφεύγονταν δείγματα άτυπης υγρασία (>60%). Ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα κομποστ αποτελείται από τουλάχιστον 15 σημεία δειγματοληψίας, τα οποία συλλέγονται με βάση την μέθοδο ζιγκ ζαγκ από διαφορετικά σημεία και βάθη του σωρού, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.3. Τα συγκεντρωμένα 15 υπο-δείγματα αναμειγνύονται μεταξύ τους για την δημιουργία ενός τελικού δείγματος, το οποίο

αντιπροσωπεύει τα γενικά χημικά, φυσικά και βιολογικά χαρακτηριστικά του κομποστοποιημένου υλικού. Ένα υπο-δείγμα μεγέθους μικρότερου του 1 g θεωρείται αντιπροσωπευτικό για περισσότερα από 1000 kg κομπόστ [48].



Σχήμα 2.3: Ζιγκ ζαγκ μέθοδος δειγματοληψίας κομπόστ [48].

Για την σωστή δειγματοληψία κομπόστ είναι απαραίτητη η χρήση συλλεκτών κατασκευασμένων από ανοξείδωτο χάλυβα ή πλαστικό, εφόσον αυτά τα υλικά δεν θα οδηγήσουν στην μεταβολή των χημικών χαρακτηριστικών του κομπόστ (TMEC).

2.2. Φυσικοχημικές παράμετροι κομποστοποίησης

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται οι διάφορες φυσικοχημικές παράμετροι που μελετήθηκαν στην διάρκεια της κομποστοποίησης, καθώς και οι μέθοδοι μέτρησής τους.

2.2.1. Θερμοκρασία

Η μέτρηση της θερμοκρασίας του σωρού γίνεται με την χρήση κατάλληλου ηλεκτρικού θερμομέτρου. Πραγματοποιείται η ταυτόχρονη λήψη πολλών θερμοκρασιών σε διαφορετικά σημεία του σωρού κομποστοποίησης σε βάθος περίπου 20 cm. Η θερμοκρασία που καταγράφεται αποτελεί των μέσο όρο των μετρούμενων θερμοκρασιών. Ο βαθμός ευαισθησίας του θερμομέτρου που χρησιμοποιήθηκε είναι ενός δεκαδικού ψηφίου.

2.2.2. pH

Η μέτρηση της αλκαλικότητας του κομπόστ γίνεται σε διάλυμα κομπόστ/νερού αναλογίας 1:5 w/v (40 g υγρό δείγμα κομπόστ σε 200 mL απιονισμένου νερού), το οποίο αναδεύεται σε αναδευτήρα για 20 min σε θερμοκρασία δωματίου. Όταν το μείγμα αυτό ηρεμίσει η μέτρηση του pH

επιτυγχάνεται με την χρήση ηλεκτρικού πεχαμέτρου είτε απευθείας από το μείγμα κομπόστ/νερού είτε από το εκχύλισμά του [48].

2.2.3. Ηλεκτρική αγωγιμότητα

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) μετρά την συγκέντρωση διαλυτών ουσιών στο κομπόστ, όπου τα διαλυτά άλατα αναφέρονται στην συγκέντρωση διαλυτών ιόντων ενός διαλύματος. Η διαδικασία μέτρησης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας είναι ίδια με αυτή του pH και καταγράφεται με την χρήση κατάλληλου ηλεκτρικού αγωγιμόμετρου [48].

2.2.4. Αμμωνιακά ιόντα

Η διαδικασία μέτρησης των αμμωνιακών ιόντων (NH_4^+) που περιέχονται στο κομπόστ περιλαμβάνει την εκχύλιση αυτών των ιόντων μέσω του κατάλληλου διαλύματος, τα οποία στην συνέχεια προσδιορίζονται φωτομετρικά με την χρήση του διατιθέμενου εξοπλισμού του αναλυτικού συστήματος Nanocolor® [49].

Εκχύλιση

Η εκχύλιση επιτυγχάνεται με την χρήση διαλύματος KCl 1M. Αρχικά, δείγμα κομπόστ ποσότητας 10 g ξηραίνεται σε θερμοκρασία 70 °C και αναμιγνύεται με 100 mL του διαλύματος KCl σε αναλογία κομπόστ/KCl 1:5 w/v. Ακολουθεί ανάδευση για 2 ώρες σε αναδευτήρα και έπειτα διήθηση σε διηθητικό χαρτί Whatman No 42. Το διήθημα εάν δεν αναλυθεί άμεσα μπορεί να διατηρηθεί σε θερμοκρασία 4 °C για 30 μέρες [50].

Ανάλυση

Για την μέτρηση των αμμωνιακών ιόντων χρησιμοποιούνται τα τεστ σωλήνα (Tube Test) 0-03, τα οποία βασίζονται στην αρχή πως τα αμμωνιακά ιόντα αντιδρούν με υποχλωριώδη και σαλικυλικά ιόντα σε ισχυρά αλκαλικά διαλύματα ($\text{pH} \approx 12.6$), παρουσίας νιτροπρωσσικού νατρίου ως καταλύτη, για την παρασκευή ινδοφαινόλης (μπλε), η οποία μπορεί να μετρηθεί φωτομετρικά. Εισάγεται 1 mL του διηθήματος εκχύλισης στο φιαλίδιο του τεστ μαζί με 1 δισκίο ειδικού καταλύτη R2. Έπειτα ανακινείται και τοποθετείται στο φωτόμετρο [49].

Το φωτόμετρο που χρησιμοποιείται για την μέτρηση των αμμωνιακών ιόντων είναι το μοντέλο Nanocolor 500D, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.4. Η μέτρηση γίνεται επιλέγοντας την μέθοδο 0-03, η οποία καταγράφει την συγκέντρωση αμμωνιακών ιόντων του διηθήματος. Η μέτρηση του φωτόμετρου γίνεται σε μήκος κύματος 690 nm [49].

φιαλίδιο του τεστ μαζί με 0.5 mL του ειδικού καταλύτη R2, ο οποίος παρέχεται έτοιμος από την εταιρεία. Η αντίδραση είναι εξώθερμη, επομένως το φιαλίδιο μετά την προσθήκη των αντιδραστηρίων ανακινείται 2-3 φορές ομαλά και τοποθετείται στο φωτόμετρο [49].

Το φωτόμετρο που χρησιμοποιείται για την μέτρηση των νιτρικών ιόντων είναι το μοντέλο Nanocolor 500D. Η μέτρηση γίνεται επιλέγοντας την μέθοδο 0-64, η οποία καταγράφει την συγκέντρωση νιτρικών ιόντων του διηθήματος. Η μέτρηση του φωτόμετρου γίνεται σε μήκος κύματος 365 nm [49].

Υπολογισμοί

$$\text{mg NO}_3^- / \text{g dry compost} = \frac{C_{\text{nit}} \cdot V_{\text{sol}}}{1000 \cdot m_s} \quad (2.2)$$

Όπου:

C_{nit} : Συγκέντρωση NO_3^- του εκχυλίσματος στο Nanocolor 500D [mg/L]

V_{sol} : Όγκος διαλύματος εκχύλισης KCl [mL]

m_s : Βάρος ξηρού δείγματος κομπόστ [g]

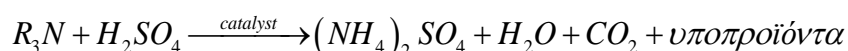
1000 : Συντελεστής μετατροπής [mL/L]

2.2.6. Άζωτο

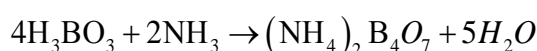
Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία το άζωτο που εμπεριέχεται στο κομπόστ προσδιορίστηκε με βάση την μέθοδο Kjeldahl. Η μέθοδος αυτή υπολογίζει τη συγκέντρωση του αζώτου που περιέχει το στερεό δείγμα σε μορφή οργανικού (N-org) και αμμωνιακού ($\text{NH}_4\text{-N}$) αζώτου. Πραγματοποιείται η μετατροπή του οργανικού αζώτου και ελεύθερου αμμωνίου σε άλας θειικού αμμωνίου στην διάρκεια της χώνευσης παρουσία θειικού οξέος και καταλυτών. Στην συνέχεια η αμμωνία αποστάζεται και προσδιορίζεται ογκομετρικά με τιτλοδότηση [51].

Επομένως, η μέθοδος αυτή χωρίζεται σε τρία μέρη : (1) χώνευση, (2) απόσταξη και (3) τιτλοδότηση, των οποίων οι αντιδράσεις είναι οι εξής [51]:

1. Χώνευση:



2. Απόσταξη: $(NH_4)_2 SO_4 + 2NaOH \xrightarrow{\text{θέρμανση}} Na_2SO_4 + 2NH_3 \uparrow + 2H_2O$



3. Τιτλοδότηση: $(NH_4)_2 B_4O_7 + H_2SO_4 \xrightarrow{\text{δείκτης}} (NH_4)_2 SO_4 + 4H_3BO_3$

Η μέτρηση του αζώτου πραγματοποιήθηκε μέσω της μεθόδου Kjeldahl, όπως αυτή περιγράφεται στις οδηγίες της εταιρείας Buchi και με χρήση του ειδικού εξοπλισμού που παρέχεται, ο οποίος παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.5. Τα διάφορα στάδια της μεθόδου περιγράφονται παρακάτω.

Χώνευση

Η χώνευση επιτυγχάνεται με την χρήση του ειδικού χωνευτήρα Kjel Digester K-425, της εταιρείας Buchi. Αρχικά, γίνεται προεπεξεργασία του κομπόστ, σύμφωνα με τον κανονισμό DIN ISO 11464. Το δείγμα ξηραίνεται σε φούρνο στους 70 °C και στην συνέχεια αλέθεται και κοσκινίζεται με κόσκινο μικρής διατομής, έτσι ώστε να επιτευχθεί ευκολότερα η χώνευση του. Από το κοσκινισμένο δείγμα εισάγεται ποσότητα 0.15 g μαζί με 8 mL πυκνού θεικού οξέος και 1 ταμπλέτα τιτανίου της Buchi στις ειδικές φιάλες του χωνευτήρα K-425. Εκτός του δείγματος κομπόστ, στον χωνευτήρα τοποθετείται και ένα τυφλό δείγμα (απουσία αζώτου). Ο χωνευτήρας προθερμαίνεται στους 320 °C και έπειτα τα δείγματα εισάγονται και θερμαίνονται στους 420 °C για 70 min. Μετά το πέρας των 70 λεπτών και εφόσον όλα τα δείγματα έχουν αποκτήσει χρώμα διαυγούς πράσινου, η διαδικασία της χώνευσης σταματά και τα δείγματα αφήνονται να κρυώσουν σε θερμοκρασία δωματίου για 30 min [52].

Απόσταξη

Μετά το πέρας της χώνευσης και εφόσον οι φιάλες έχουν κρυώσει, ακολουθεί η διεργασία της απόσταξης με την χρήση του μηχανήματος KjelFlex K-360 της εταιρείας Buchi. Επιλέγεται το κατάλληλο πρόγραμμα απόσταξης της συσκευής με τις απαραίτητες ποσότητες καυστικού νατρίου (NaOH) και βορικού οξέος (H₃BO₃), οι οποίες απαιτούνται για την απόσταξη και δέσμευση της αμμωνίας αντίστοιχα. Οι ποσότητες αυτές παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1 [52].

Πίνακας 2.1: Παράμετροι απόσταξης της συσκευής KjelFlex K-360 [52].

Όγκος H ₂ O	34 mL
Όγκος NaOH (32%)	42 mL
Όγκος H ₃ BO ₃ (2%)	60 mL
Χρόνος αντίδρασης	5 s
Χρόνος απόσταξης	240 s

Τιτλοδότηση

Η τιτλοδότηση των δειγμάτων έλαβε μέρος σε μία τυπική στήλη τιτλοδότησης με την χρήση διαλύματος θεικού οξέος κανονικότητας 0.02 N και μικτού δείκτη MI5. Αρχικά, εισάγονται στο απεσταγμένο δείγμα 3-4 σταγόνες του δείκτη έως ότου αποκτήσει χρώμα ανοιχτού γαλάζιου και τοποθετείται στο κάτω μέρος της

τιτλοδοτικής στήλης. Στην συνέχεια, το θειικό οξύ αφήνεται να στάξει εντός του δείγματος, με ταυτόχρονη ανάδευση, μέχρι αυτό να αποχρωματιστεί και καταγράφεται η απαιτούμενη ποσότητά του [52].



Σχήμα 2.5: Εξοπλισμός μέτρησης αζώτου της Buchi: α) χωνευτήρας K-425, β) συσκευή απόσταξης KjelFlex K-360 [52].

Υπολογισμοί

$$w_N = \frac{(V_{sample} - V_{blank}) \cdot z \cdot c \cdot f \cdot M_N}{m_{sample} \cdot 1000} \quad (2.3)$$

$$\%N = w_N \cdot 100\% \quad (2.4)$$

Όπου:

- w_N : Κλάσμα βάρους αζώτου
- V_{sample} : Όγκος τιτλοδότη για το δείγμα [mL]
- V_{blank} : Όγκος τιτλοδότη για το τυφλό δείγμα [mL]
- z : Γραμμομοριακό σθένος (2 για H_2SO_4)
- c : Συγκέντρωση τιτλοδότη [mol/L]
- f : Παράγοντας τιτλοδότησης (συνήθως 1 για εμπορικά διαλύματα)
- M_N : Μοριακό βάρος αζώτου [g/mol]
- m_{sample} : Βάρος ξηρού δείγματος κομπόστ [g]
- 1000 : Συντελεστής μετατροπής [mL/L]
- $\%N$: Ποσοστό βάρους του αζώτου [%]

2.2.7. Τέφρα, Οργανική ύλη, Άνθρακας

Η περιεκτικότητα του κομπόστ σε τέφρα (ash) υπολογίζεται μέσω του ποσοστού της μάζας του κομπόστ το οποίο διαφεύγει σε αέρια μορφή εξαιτίας της ανάφλεξης ξηρού δείγματος υπό συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών $550 \text{ } ^\circ\text{C}$, όπως

περιγράφεται στο ελληνικό πρότυπο ΕΛΟΤ EN 12879 [53]. Τα ποσοστά οργανικής ύλης (OM) και άνθρακα (C) του κομπόστ προκύπτουν μαθηματικά μέσω της περιεκτικότητας σε τέφρα.

Αρχικά, τοποθετείται μια κάψα και θερμαίνεται στον φούρνο των 550 °C για τουλάχιστον 30 min. Μετά την θέρμανση της και εφόσον έχει αφεθεί να κρυώσει εντός ξηραντήρα, ζυγίζεται σε ζυγό ακριβείας ενός mg. Στην συνέχεια, τοποθετείται στην κάψα ποσότητα δείγματος κομπόστ ίση με 0.5 έως 5 g, η οποία προηγουμένως έχει ξηραθεί σε φούρνο στους 70 °C. Η κάψα που περιέχει το δείγμα εισάγεται στον φούρνο των 550 °C και θερμαίνεται για 120 min. Έπειτα, μετά το πέρας της θέρμανσης, η κάψα αφήνεται να κρυώσει στον ξηραντήρα και καταγράφεται το βάρος της. Η ζύγιση των καψών γίνεται αμέσως μετά την απομάκρυνση τους από τον ξηραντήρα έτσι ώστε να αποφευχθεί η συσσώρευση υγρασίας η οποία ίσως αλλοιώσει τα αποτελέσματα [53].

Υπολογισμοί

$$Ash\% = \frac{Im_a - Im_b}{m_s} \cdot 100 \quad (2.5)$$

$$OM\% = 100 - Ash\% \quad (2.6)$$

$$C\% = \frac{(100 - Ash\%)}{1.8} \quad (2.7)$$

Όπου:

- Ash% : Ποσοστό βάρους της τέφρας του δείγματος κομπόστ [%]
- Im_a : Συνολικό βάρος κάψας δείγματος μετά την θέρμανση σε 550 °C [g]
- Im_b : Βάρος άδειας κάψας μετά την θέρμανση σε 550 °C [g]
- m_s : Βάρος ξηρού δείγματος κομπόστ [g]
- OM% : Ποσοστό βάρους της οργανικής ύλης του δείγματος κομπόστ [%]
- C% : Ποσοστό βάρους του άνθρακα του δείγματος κομπόστ [%]

2.2.8. Φυτοτοξικότητα

Η φυτοτοξικότητα είναι η τοξική επίδραση μιας ένωσης στην ανάπτυξη των φυτών. Τέτοιου είδους βλάβες μπορούν να προκληθούν από μια ευρεία ποικιλία ενώσεων όπως τα στοιχεία μετάλλων, από την περιεκτικότητα σε άλατα κ.α. Η μέθοδος μέτρησης της φυτοτοξικότητας του κομπόστ γίνεται μέσω του δείκτη βλάστησης (Germination Index) και περιλαμβάνει την χρήση εκχυλίσματος κατάλληλης αναλογίας στερεού/υγρού καθώς και τους σπόρους ενός φυτού [48].

Αρχικά, ζυγίζονται 40 g κομπόστ σε υγρή μορφή εντός ενός ποτηριού ζέσεως. Έπειτα, ογκομετρώνται 200 mL απιονισμένου νερού τα οποία εισάγονται στο ποτήρι ζέσεως έτσι ώστε να επιτευχθεί αναλογία στερεού/υγρού 1:5 w/v. Το διάλυμα αναδεύεται, με αναδευτήρα, για 180 min με ενδιάμεσες στάσεις και στην συνέχεια διηθείται μέσω διηθητικού χαρτιού για την απομάκρυνση τυχόν στερεών. Σε 7 τρυβλία petris τοποθετούνται δύο στρώσεις απορροφητικού χαρτιού και 10 σπόροι καρδάμου. Σε 5 τρυβλία προστίθενται 10 mL από το διήθημα του κομπόστ, ενώ στα άλλα 2 τοποθετούνται 10 mL απιονισμένου νερού, ώστε να αξιοποιηθούν ως τρυβλία ελέγχου. Και τα 7 τρυβλία σφραγίζονται με ταινία parafilm και τοποθετούνται σε σκοτεινό μέρος για 7 μέρες. Την 5^η μέρα μετριέται ο αριθμός των σπόρων που φύτρωσαν και την 7^η το μήκος των ριζών τους. Στα πλαίσια αυτής της μεθόδου η θερμοκρασία του χώρου αποθήκευσης διατηρείται σταθερή, έτσι ώστε να μην επηρεάζει τους σπόρους του φυτού που χρησιμοποιείται [48].

Υπολογισμοί

$$GI = \left(\frac{\% \text{ Seed germination}}{\% \text{ Root growth}} \right) \cdot 100 \quad (2.8)$$

$$\% \text{ Seed germination} = \frac{S_{\text{sample}}}{S_{\text{control}}} \cdot 100 \quad (2.9)$$

$$\% \text{ Root growth} = \frac{G_{\text{sample}}}{G_{\text{control}}} \cdot 100 \quad (2.10)$$

Όπου:

GI : Δείκτης βλάστησης [%]

S_{sample} : Μέσος όρος σπόρων που βλάστησαν στα τρυβλία εκχυλίσματος του δείγματος [Αρ.]

S_{control} : Μέσος όρος σπόρων που βλάστησαν στα τρυβλία ελέγχου [Αρ.]

G_{sample} : Μέσος όρος μήκους ριζών στα τρυβλία εκχυλίσματος του Δείγματος [mm]

G_{control} : Μέσος όρος μήκους ριζών στα τρυβλία ελέγχου [mm]

2.2.9. Φουλβικά και Χουμικά οξέα

Ο προσδιορισμός της περιεκτικότητας του κομπόστ σε φουλβικά (FA) και χουμικά (HA) οξέα, επιτυγχάνεται με την αξιοποίηση της διαφορετικής συμπεριφοράς τους σε όξινο και αλκαλικό περιβάλλον. Οι δύο αυτές ενώσεις έχουν αρκετές διαφορές μεταξύ τους, μια εκ των οποίων είναι η διαλυτότητα των φουλβικών σε όξινο περιβάλλον, σε αντίθεση με τα χουμικά τα οποία είναι ευδιάλυτα

σε αλκαλικό περιβάλλον. Τα φουλβικά έχουν κίτρινο χρώμα, ενώ τα χουμικά σκούρο καφέ [54].

Η μέθοδος μέτρησης των φουλβικών και χουμικών στηρίζεται στην εναλλαγή του pH του δείγματος κομπόστ. Αρχικά, ζυγίζεται ποσότητα 20 g κομπόστ, το οποίο έχει ήδη ξηραθεί σε φούρνο 70 °C, και τοποθετείται σε ένα ποτήρι ζέσεως. Έπειτα, εισάγεται στο ποτήρι ικανή ποσότητα 1N HCl έτσι ώστε η τιμή του pH να φτάσει στο 1-2 και προστίθεται 0.1 N HCl έως τα 200 mL. Το διάλυμα αναδεύεται με αναδευτήρα για 30 min και ακολουθεί διήθηση. Το υπερκείμενο, το οποίο αποτελεί τα φουλβικά, τοποθετείται σε ένα ποτήρι ζέσεως στο οποίο προστίθενται κόκκοι NaOH έως ότου το pH να φτάσει το 12 και αναδεύεται για 30 min. Το νέο διάλυμα διηθείται σε προζυγισμένο φίλτρο Whatman No.42 και το ίζημα ξηραίνεται στους 105 °C 24 ώρες. Το ίζημα της πρώτης διήθησης, το οποίο περιέχει τα χουμικά, τοποθετείται σε ποτήρι ζέσεως με 50 mL απιονισμένου νερού και κόκκους NaOH, έως ότου το pH να φτάσει το 12. Το διάλυμα αναδεύεται για 30 min και ακολουθεί διήθηση. Το διήθημα που προκύπτει οξινίζεται εκ νέου με HCl ώστε το pH να είναι ίσο με 1-2 και αναδεύεται για 30 min. Τέλος, ακολουθεί διήθηση του τελικού διαλύματος σε προζυγισμένο φίλτρο Whatman No.42 και το ίζημα ξηραίνεται στους 105 °C 24 ώρες. Μετά το πέρας των 24 ωρών τα φίλτρα με τα ιζήματα ζυγίζονται εκ νέου και οι διαφορές των βαρών είναι η περιεκτικότητα σε φουλβικές και χουμικές ενώσεις.

Υπολογισμοί

$$FA\% = \frac{mf_{FA} - mf_0}{m_{sample}} \cdot 100 \quad (2.11)$$

$$HA\% = \frac{mf_{HA} - mf_0}{m_{sample}} \cdot 100 \quad (2.12)$$

Όπου:

- FA% : Ποσοστό βάρους φουλβικών οξέων του κομπόστ [%]
- mf_{FA} : Συνολικό βάρος φίλτρου και φουλβικών οξέων [g]
- mf₀ : Βάρος σκέτου φίλτρου [g]
- HA% : Ποσοστό βάρους χουμικών οξέων του κομπόστ [%]
- mf_{FA} : Συνολικό βάρος φίλτρου και χουμικών οξέων [g]
- m_{sample} : Βάρος ξηρού δείγματος κομπόστ [g]

2.3. Χρωματομετρία κομποστοποίησης

Στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, η χρωματομετρική ανάλυση της διεργασίας της κομποστοποίησης επιτεύχθηκε με την χρήση του χρωματομετρικού μοντέλου CIELab. Η καταγραφή των χρωματικών μεταβλητών πραγματοποιήθηκε με ειδικό χρωματόμετρο (colorimeter). Σε αυτήν την ενότητα περιγράφεται η διαδικασία χρωματομετρίας καθώς και ο τρόπος υπολογισμού των μεταβλητών της.

2.3.1. Χρωματομετρική μέθοδος

Η χρωματική μελέτη του κομπόστ έλαβε χώρα με την χρήση του χρωματόμετρου Hach Lange LMG 183, το οποίο παρουσιάζεται Σχήμα 2.6. Το χρωματόμετρο χρησιμοποιεί την συνηθέστερη διεθνή γεωμετρία προβολής $d/8^0$, καθώς και επιτρέπει την ανίχνευση μεταμερισμού. Πριν από κάθε μέτρηση το όργανο βαθμονομούνταν με δύο ειδικές ταμπλέτες LZM 268, της εταιρείας Hach Lange, οι οποίες ήταν χρώματος λευκού και μαύρου, όπως ορίζει και το εγχειρίδιο οδηγιών του.



Σχήμα 2.6: Χρωματόμετρο Hach Lange LMG 183.

Για την σωστή καταγραφή του χρώματος του κομπόστ το δείγμα αρχικά υφίσταντο μια προεργασία. Κατάλληλη ποσότητα κομπόστ ξηραίνονταν σε φούρνο στους 70 °C, ενώ στην συνέχεια αλέθονταν και κοσκινίζονταν μέσω ενός κόσκινου μικρής διατομής, έτσι ώστε να είναι ομοιόμορφο και να καταγράφεται σε οποιοδήποτε σημείο του η ίδια απόχρωση χρώματος. Έπειτα το επεξεργασμένο δείγμα τοποθετούνταν σε ειδικό δοχείο, του οποίου η διατομή ήταν όμοια με αυτή της καταγραφικής κεφαλής του χρωματόμετρου. Ιδιαίτερη σημασία δίνονταν στην ποσότητα του μετρούμενου δείγματος, έτσι ώστε το δοχείο να καλύπτεται πλήρως έως την κορυφή του χωρίς να υπάρχουν κενά.

Σε κάθε δείγμα κομπόστ πραγματοποιήθηκαν 5 μετρήσεις του χρώματος του. Ο αριθμός των μετρήσεων επιλέχθηκε με βάση την πιθανή απόκλιση των αποχρώσεων στην επιφάνεια του κομπόστ, έτσι ώστε να μειωθεί η ύπαρξη σφαλμάτων στην καταγραφή του χρώματος. Η τελική τιμή των χρωματομετρικών μεταβλητών προκύπτει από τον μέσο όρο των πέντε μετρήσεων.

2.3.2. Χρωματικές μεταβλητές του μοντέλου CIELab

Το όργανο καταγραφής του χρώματος εμφάνιζε σε κάθε μέτρηση 3 από τις συνολικές μεταβλητές του μοντέλου CIELab, πιο συγκεκριμένα τις μεταβλητές L, a και b. Η συνολική περιγραφή του χρώματος κάθε δείγματος πραγματοποιείται με την χρήση επιπλέον μεταβλητών χρώματος, οι οποίες είναι οι ΔL , Δa , Δb , a/b , h , C και ΔE . Στον Πίνακα 2.2 παρουσιάζονται όλες οι χρωματικές μεταβλητές και ο τρόπος υπολογισμού τους.

Πίνακας 2.2: Υπολογισμός μεταβλητών χρωματικού μοντέλου CIELab [39].

Μεταβλητή	Μέθοδος υπολογισμού	Ερμηνεία
L	Απευθείας από το χρωματόμετρο	Φωτεινότητα
a	Απευθείας από το χρωματόμετρο	Κόκκινο/Πράσινο
b	Απευθείας από το χρωματόμετρο	Κίτρινο/Μπλε
ΔL	$\Delta L = L_{\text{δείγματος}} - L_{\text{αρχικό}}$	Μεταβολή φωτεινότητας
Δa	$\Delta a = a_{\text{δείγματος}} - a_{\text{αρχικό}}$	Μεταβολή συντελεστή a
Δb	$\Delta b = b_{\text{δείγματος}} - b_{\text{αρχικό}}$	Μεταβολή συντελεστή b
a/b	$a/b = \frac{a}{b}$	Λόγος a προς b
h	$h = \tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right)$ $a > 0, b \geq 0$	Χροιά
C	$C = \sqrt{(a)^2 + (b)^2}$	Χρωματική πυκνότητα
ΔE	$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2}$	Ολική μεταβολή χρώματος

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

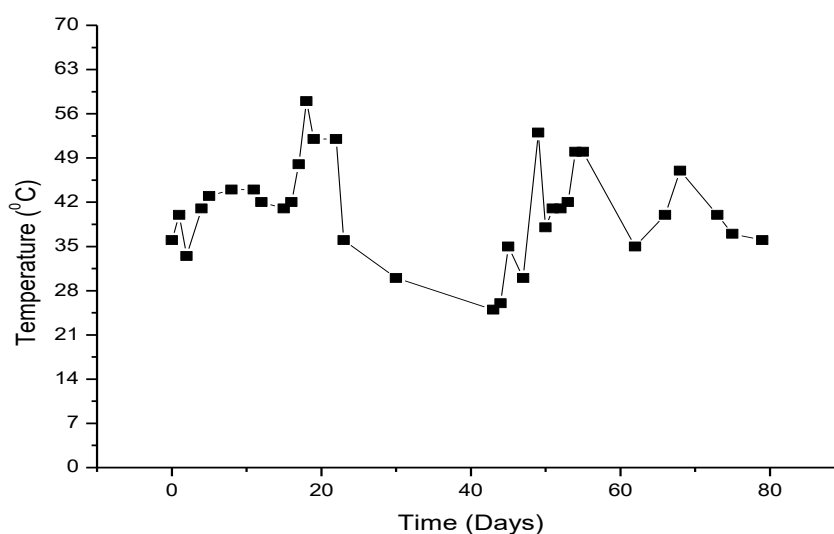
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έλαβαν χώρα κατά την διάρκεια της κομποστοποίησης στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας. Οι μετρήσεις περιλαμβάνουν τις φυσικοχημικές παραμέτρους του σωρού καθώς και τις χρωματικές μεταβλητές του χρωματικού μοντέλου CIELab.

Η διαδικασία της κομποστοποίησης διήρκησε συνολικά 79 μέρες. Τα στερεά απόβλητα του ελαιοτριβείου τοποθετήθηκαν στον σωρό κομποστοποίησης στις 25 Νοεμβρίου 2018 και η διεργασία διακόπηκε στις 13 Φεβρουαρίου 2018 προτού φτάσει στο στάδιο της ωρίμανσης. Η κομποστοποίηση, όπως προαναφέρθηκε, έλαβε χώρα σε εξωτερικό χώρο εκτεθειμένη σε όλα τα καιρικά φαινόμενα της περιόδου, τα οποία περιλάμβαναν συχνές και έντονες βροχοπτώσεις καθώς και χαμηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Επομένως, αναμένεται μια πιθανή επίδραση των καιρικών φαινομένων στα αποτελέσματα της κομποστοποίησης.

3.1. Φυσικοχημικές παράμετροι κομποστοποίησης

3.1.1. Θερμοκρασία

Η μεταβολή της θερμοκρασίας του σωρού κομποστοποίησης παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1 : Διακύμανση της θερμοκρασίας του σωρού συναρτήσει του χρόνου.

Στο Σχήμα 3.1, παρατηρείται ότι η θερμοκρασία του σωρού δεν ακολουθεί την θεωρητική πορεία που περιγράφεται από τους Epstein et.al (βλ. 1.1.3), αλλά περιλαμβάνει διακυμάνσεις. Πιο συγκεκριμένα, μέχρι την 4^η ημέρα, η κομποστοποίηση βρίσκεται στο μεσόφιλο στάδιο, με την θερμοκρασία να ανεβαίνει σταδιακά χωρίς όμως να ξεπερνά τους 40 °C. Στην συνέχεια, η θερμοκρασία αυξάνεται για να αγγίξει την 18^η μέρα την τιμή των 58 °C, η οποία αποτελεί την μέγιστη θερμοκρασία που καταγράφηκε κατά την διάρκεια της κομποστοποίησης. Στο διάστημα μεταξύ 5^{ης} και 22^{ης} μέρας, ο σωρός βρίσκεται στο θερμόφιλο στάδιο, όπου η θερμοκρασία είναι διαρκώς μεγαλύτερη των 40 °C. Ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες, οι οποίες ξεπερνούν τους 50 °C, εμφανίζονται μεταξύ της 17^{ης} και 22^{ης} ημέρας. Το θερμόφιλο στάδιο διακόπτεται την 23^η ημέρα λόγω έντονων βροχοπτώσεων, οι οποίες διαρκούν μέχρι την 47^η ημέρα και δεν επιτρέπουν την θερμοκρασία να ξεπεράσει τους 40 °C, επιστρέφοντας την κομποστοποίηση στο μεσόφιλο στάδιο. Έπειτα, μετά το πέρας των βροχοπτώσεων, η θερμοκρασία αυξάνεται και την 49^η ημέρα ο σωρός βρίσκεται εκ νέου στο θερμόφιλο στάδιο, με θερμοκρασία 53 °C, το οποίο διαρκεί μέχρι την 72^η μέρα έχοντας ελάχιστες διακυμάνσεις. Τέλος, η θερμοκρασία μειώνεται αγγίζοντας τιμές κάτω των 40 °C, οι οποίες ανήκουν στην μεσόφιλη φάση της διεργασίας.

Τα στάδια της κομποστοποίησης όπως προέκυψαν από τη διακύμανση της θερμοκρασίας κατά την διάρκεια του πειράματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1 : Διάρκεια των σταδίων της κομποστοποίησης

Στάδιο κομποστοποίησης	Διάρκεια σε μέρες
1 ^ο Μεσόφιλο	1 ^η – 4 ^η
1 ^ο Θερμόφιλο	5 ^η – 22 ^η
2 ^ο Μεσόφιλο	23 ^η – 48 ^η
2 ^ο Θερμόφιλο	49 ^η – 60 ^η
3 ^ο Μεσόφιλο	61 ^η – 62 ^η
3 ^ο Θερμόφιλο	63 ^η – 72 ^η
4 ^ο Μεσόφιλο	73 ^η – 79 ^η

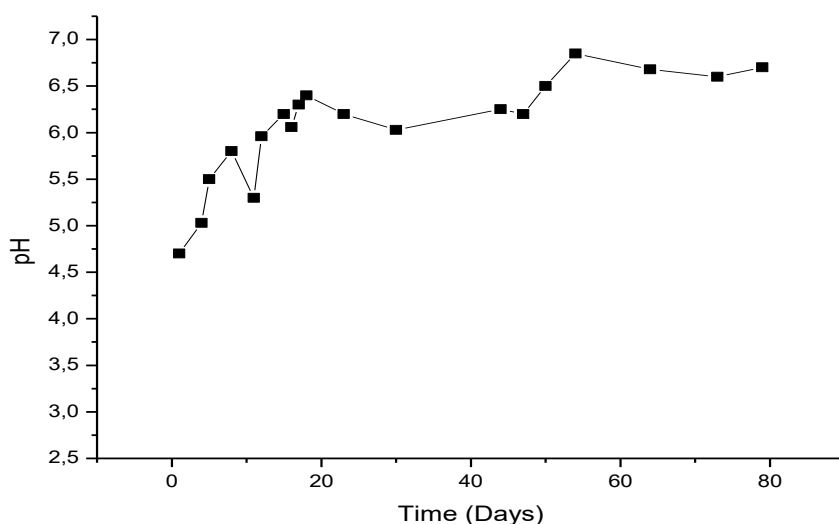
3.1.2. pH

Η μεταβολή του pH κατά την διάρκεια της κομποστοποίησης παρουσιάζεται παρακάτω στο Σχήμα 3.2. Η μεταβολή είναι αναμενόμενη και σύμφωνη με όσα περιγράφονται στην βιβλιογραφία από τους Ευθυμίου et.al. (βλ. 1.1.3).

Στην έναρξη της κομποστοποίησης παρατηρείται ότι το pH είναι όξινο, με τιμή 4.7, γεγονός που οφείλεται στην παρουσία οξικών βακτηρίων και στην παραγωγή οργανικών οξέων από την αποδόμηση της ύλης. Στην συνέχεια, το pH αυξάνεται ραγδαία καθώς τα οργανικά οξέα αποδομούνται ενώ ταυτόχρονα

απελευθερώνεται αμμωνία. Από την 20^η μέρα και έπειτα η τιμή του pH εμφανίζει ήπια αύξηση, η οποία οφείλεται στην διακοπή του θερμόφιλου σταδίου λόγω βροχοπτώσεων, που έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση του ρυθμού κομποστοποίησης. Το pH του σωρού στο τέλος του πειράματος πλησιάζει την ουδέτερη περιοχή με τιμή 6.7.

Σύμφωνα με τους Ευθυμίου et.al, η τιμή του pH θα έπρεπε να αυξηθεί ακόμα περισσότερο και στην συνέχεια να μειωθεί λόγω της απομάκρυνσης της παραγόμενης αμμωνίας από τον σωρό (εξάτμιση, μετατροπή αμμωνίας σε νιτρικά) με αποτέλεσμα ανεξάρτητα από το pH των πρώτων υλών, η κομποστοποίηση να δίνει ένα τελικό προϊόν με σταθερό pH κοντά στο ουδέτερο [20]. Στην συγκεκριμένη διεργασία κομποστοποίησης δεν παρατηρήθηκε αυτό το φαινόμενο καθώς η κομποστοποίηση διακόπηκε προτού φτάσει στο στάδιο της ωρίμανσης, εξαιτίας των καιρικών παρεμβολών.



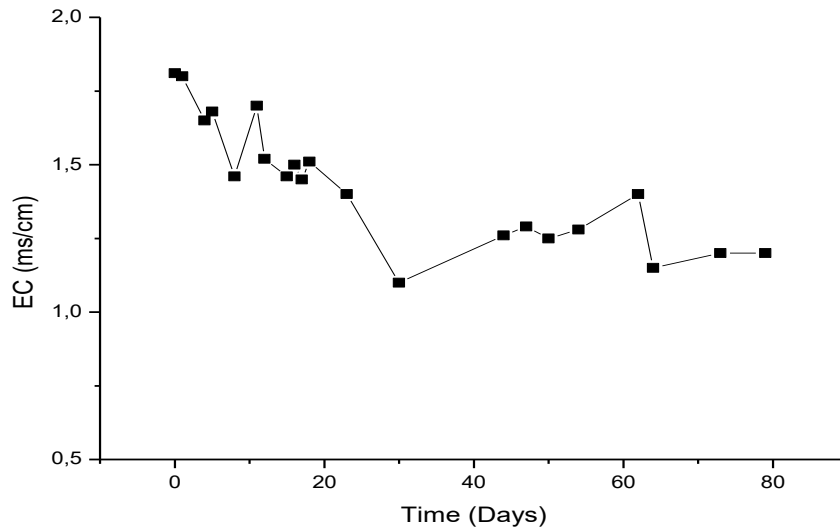
Σχήμα 3.2 : Μεταβολή του pH συναρτήσει του χρόνου.

3.1.3. Ηλεκτρική αγωγιμότητα

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα αντανακλά το βαθμό της αλατότητας του τελικού προϊόντος της κομποστοποίησης, το οποίο υποδεικνύει τα πιθανά φαινόμενα φυτοτοξικότητας στην ανάπτυξη των φυτών. Κατά την διάρκεια μιας κομποστοποίησης παρατηρείται συνήθως αύξηση της αγωγιμότητας εξαιτίας της αποδόμησης της οργανικής ύλης και της ελευθέρωσης ανόργανων στοιχείων [20].

Αντιθέτως, παρατηρείται στο Σχήμα 3.3 πως η ηλεκτρική αγωγιμότητα κατά την διάρκεια της συγκεκριμένης διαδικασίας κομποστοποίησης μειωνόταν σταδιακά, ξεκινώντας με αρχική τιμή 1.8 mS/cm και καταλήγοντας σε 1.2 mS/cm. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να εξηγηθεί σαν άμεσο αποτέλεσμα των συχρών και έντονων

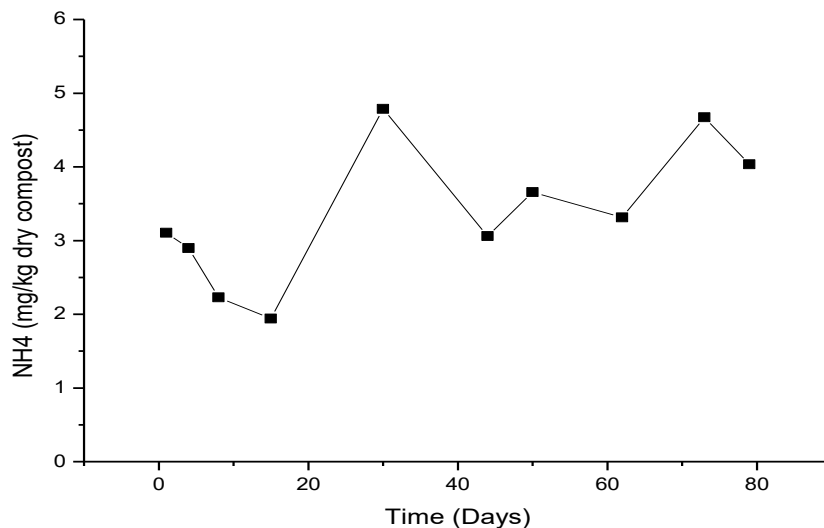
βροχοπτώσεων, οι οποίες προκαλούν την απόπλυση των παραγόμενων ανόργανων στοιχείων μειώνοντας την ικανότητα του κομπόστ να μεταφέρει ρεύμα.



Σχήμα 3.3: Μεταβολή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του κομπόστ συναρτήσει του χρόνου.

3.1.4. Αμμωνιακά ιόντα

Η μεταβολή της συγκέντρωσης των αμμωνιακών ιόντων (NH_4^+) του κομπόστ παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4: Μεταβολή της συγκέντρωσης αμμωνιακών ιόντων συναρτήσει του χρόνου.

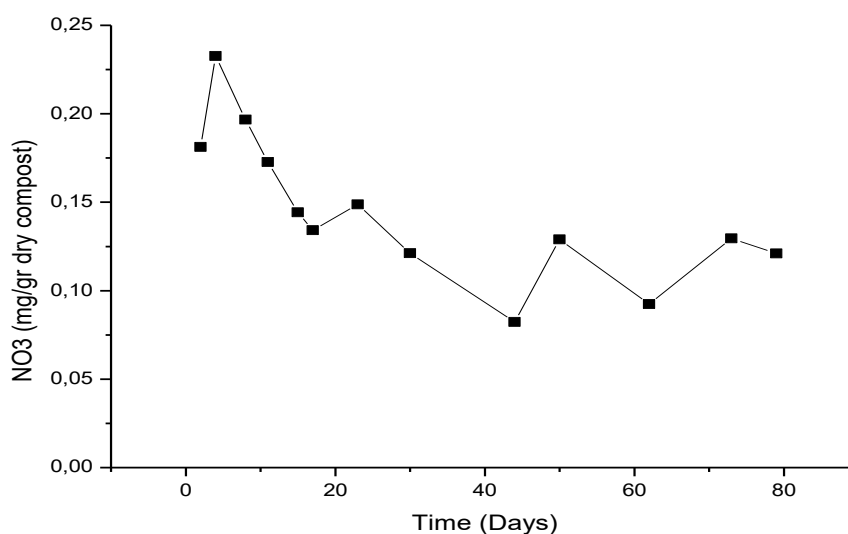
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4, στις πρώτες 15 μέρες της κομποστοποίησης η συγκέντρωση των αμμωνιακών ιόντων του κομπόστ μειώνεται στα 2 mg/kg, ενώ

στην συνέχεια αυξάνεται ραγδαία στα 5 mg/kg την 16^η ημέρα, στην οποία ο σωρός βρίσκεται στο θερμοφίλο στάδιο με τις υψηλότερες θερμοκρασίες. Αυτό οφείλεται στην ορυκτοποίηση του οργανικού αζώτου σε διαλυτά ιόντα αμμωνίου, φαινόμενο το οποίο παρατηρήθηκε στον κύκλο του αζώτου από τους Xao et.al (βλ. 1.1.3). Έπειτα, μετά την 30^η ημέρα λόγω των βροχοπτώσεων και της πτώσης της θερμοκρασίας του σωρού, τα ιόντα αμμωνίου παρασύρονται με αποτέλεσμα την μείωση της συγκέντρωσης τους στα 3 mg/kg. Την 48^η μέρα, όπου η κομποστοποίηση βρίσκεται εκ νέου σε θερμοφίλο στάδιο, η συγκέντρωση των αμμωνιακών ιόντων αυξάνεται με μικρές διακυμάνσεις οι οποίες ταυτίζονται με την εναλλαγή των μεσόφιλων και θερμοφίλων σταδίων της κομποστοποίησης, όπως περιγράφονται στην υποενότητα 3.1.1. Οι υψηλές θερμοκρασίες των θερμοφίλων σταδίων ευνοούν την αύξηση της συγκέντρωσης των αμμωνιακών ιόντων, ενώ οι χαμηλές θερμοκρασίες των μεσόφιλων σταδίων της κομποστοποίησης έχουν το ακριβώς αντίθετο αποτέλεσμα. Η αύξηση της συγκέντρωσης των αμμωνιακών ιόντων αποτελεί απόδειξη πως η διεργασία της κομποστοποίησης δεν έχει ολοκληρωθεί.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι σε γενικές γραμμές η συγκέντρωση των αμμωνιακών ιόντων του κομποστ δεν άγγιξε υψηλά επίπεδα, το οποίο πιθανώς οφείλεται στην επίδραση των καιρικών φαινομένων στην διαδικασία της κομποστοποίησης.

3.1.5. Νιτρικά ιόντα

Η μεταβολή της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων (NO_3^-) του κομποστ παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.5.

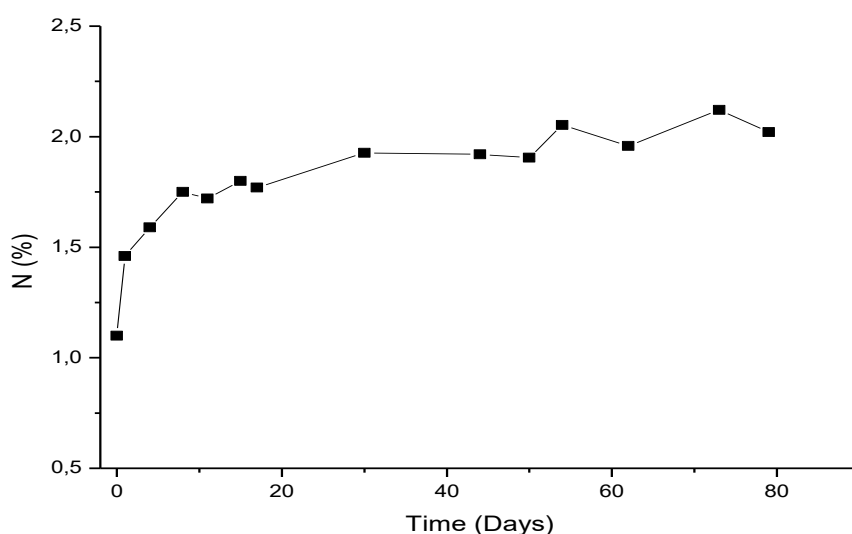


Σχήμα 3.5: Μεταβολή της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων συναρτήσει του χρόνου.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5, η συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων παρουσιάζει σταδιακή ελάττωση μέχρι την 44^η ημέρα, από 0.18 στα 0.9 mg/g. Στην συνέχεια παρατηρείται μικρή αύξηση της συγκέντρωσης, με κάποιες διακυμάνσεις, με τελική τιμή τα 0.13 mg/g. Το φαινόμενο αυτό συμφωνεί με τις παρατηρήσεις των Xao et.al (βλ. 1.1.3, καθώς οι υψηλές θερμοκρασίες και συγκεντρώσεις αμμωνίας περιορίζουν τα νιτροποιητικά βακτήρια, και έτσι στα θερμοφιλικά στάδια της κομποστοποίησης παρατηρείται μικρή συγκέντρωση νιτρικών ιόντων NO₃⁻. Αντιθέτως, όταν η θερμοκρασία μειώνεται και ξεκινάει το στάδιο της ωρίμανσης, η νιτροποίηση αυξάνει την συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων NO₃⁻ με ταυτόχρονη μείωση των αμμωνιακών NH₄⁺ [21]. Στο συγκεκριμένο πείραμα η διεργασία της κομποστοποίησης διακόπηκε προτού ξεκινήσει το στάδιο της ωρίμανσης και έτσι δεν παρατηρήθηκε αύξηση των νιτρικών ιόντων. Ταυτόχρονα, οι συχνές βροχοπτώσεις είχαν ως αποτέλεσμα την απόπλυση των ήδη υπαρκτών νιτρικών ιόντων μειώνοντας έτσι την συγκέντρωσή τους.

3.1.6. Αζωτο

Η μεταβολή του αζώτου κατά την διάρκεια της κομποστοποίησης παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.6



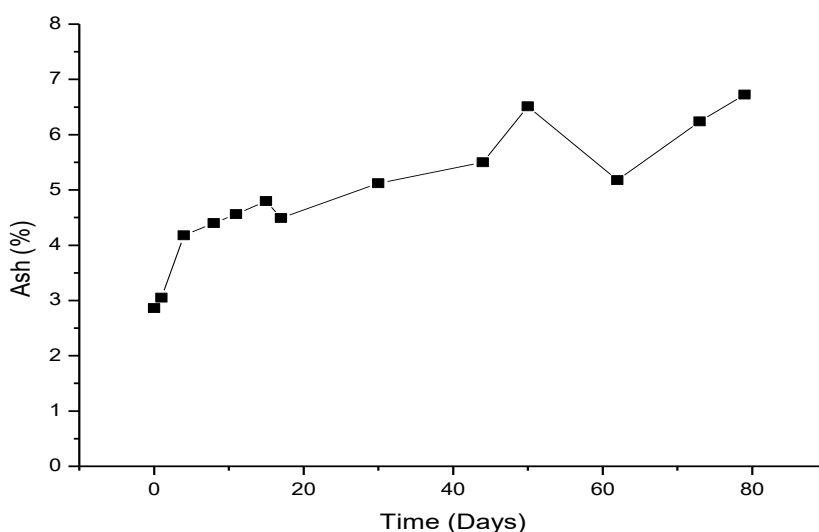
Σχήμα 3.6: Μεταβολή του ποσοστού αζώτου του κομπόστ συναρτήσει του χρόνου.

Στο Σχήμα 3.6, παρατηρείται η σταδιακή αύξηση του ποσοστού του αζώτου του κομπόστ, το οποίο είχε αρχικό ποσοστό 1.1% και τελικό ποσοστό 2.02%. Σύμφωνα με τους Epstein et.al, η μεγαλύτερη πρόκληση της κομποστοποίησης είναι η διατήρηση του αζώτου, το οποίο εξαντλείται με την πάροδο του χρόνου κατά την διάρκεια μιας κομποστοποίησης [3]. Η διαφοροποίηση του συγκεκριμένου πειράματος από την θεωρία οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την διάρκεια της συγκεκριμένης κομποστοποίησης δεν υπάρχουν απώλειες αζώτου από τη μικροβιακή

δραστηριότητα. Σε συνδυασμό λοιπόν με την απώλεια οργανικής ύλης και τη συμπύκνωση του υλικού του σωρού, η αρχική ποσότητα αζώτου στο τελικό υλικό αντιπροσωπεύει μεγαλύτερο ποσοστό.

3.1.7. Τέφρα, Οργανική ύλη, Άνθρακας

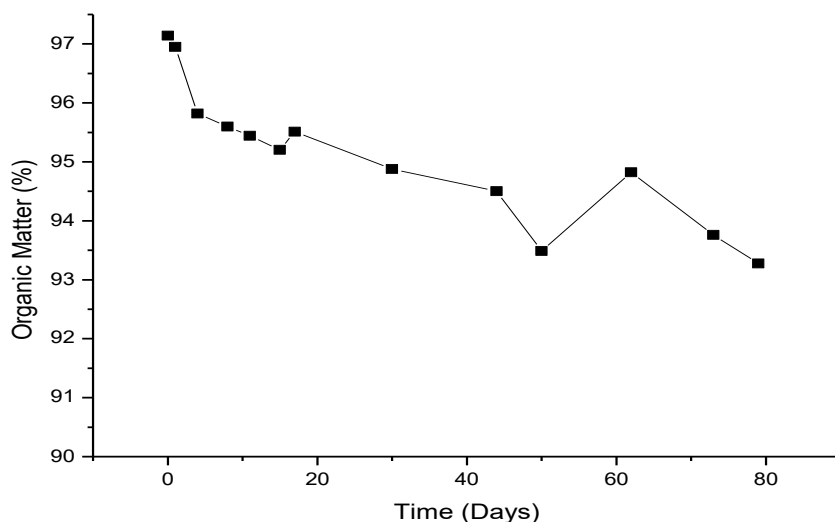
Η μεταβολή της περιεκτικότητας του κομπόστ σε τέφρα (Ash) παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.7. Στο σχήμα αυτό, παρατηρείται η σταδιακή και ήπια αύξηση του ποσοστού του κομπόστ σε τέφρα το οποίο από την αρχική τιμή 2.85 % καταλήγει σε 6.72%. Το φαινόμενο αυτό συμφωνεί με τις παρατηρήσεις των Epstein et.al., σύμφωνα με τους οποίους κατά την διάρκεια της κομποστοποίησης οι μικροοργανισμοί αποδομούν την οργανική ύλη και καταναλώνουν τα διαθέσιμα ποσά άνθρακα, αυξάνοντας έτσι την περιεκτικότητα του υλικού σε τέφρα [3]. Το τελικό ποσοστό τέφρας του κομπόστ δεν είναι υψηλό εξαιτίας της παρεμπόδισης του ρυθμού κομποστοποίησης από τα καιρικά φαινόμενα, καθώς επίσης και της διακοπής της διαδικασίας πριν από το στάδιο της ωρίμανσης. Το τελικό προϊόν παρόμοιας ολοκληρωμένης μεθόδου κομποστοποίησης μπορεί να έχει ποσοστό τέφρας έως και 30-32%.



Σχήμα 3.7: Μεταβολή του ποσοστού τέφρας του κομπόστ συναρτήσει του χρόνου.

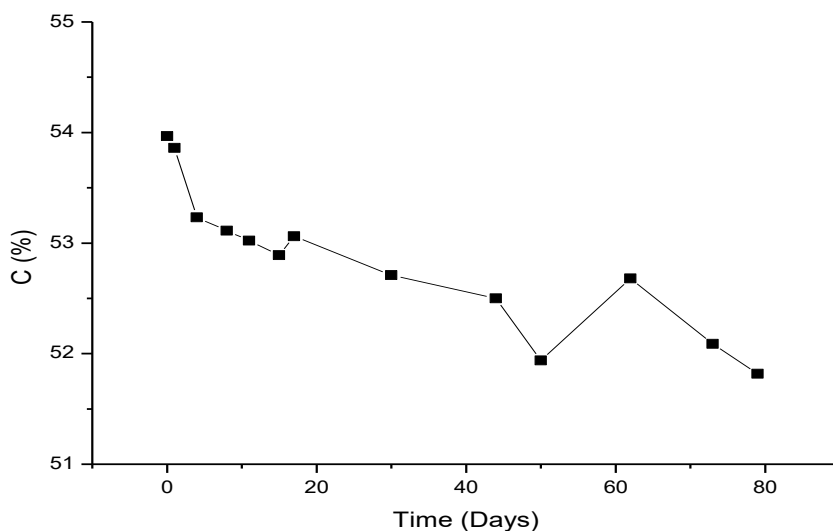
Η μεταβολή του ποσοστού οργανικής ύλης (Organic matter) του κομπόστ παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.8, όπου φαίνεται η σταδιακή μείωση του κατά την διάρκεια της κομποστοποίησης. Η οργανική ύλη έχοντας αρχική τιμή 97% μειώνεται καθ' όλη την διάρκεια της διεργασίας μέχρι την τελική τιμή του 93.2%. Όπως προαναφέρθηκε, το φαινόμενο αυτό συμφωνεί με την θεωρία και η μικρής έκτασης ελάττωση του ποσοστού οφείλεται στην παρεμπόδιση του ρυθμού κομποστοποίησης από τα ακραία καιρικά φαινόμενα, καθώς επίσης και στην διακοπή της

κομποστοποίησης πριν από το στάδιο της ωρίμανσης. Το τελικό προϊόν παρόμοιας ολοκληρωμένης μεθόδου κομποστοποίησης μπορεί να έχει τελικό ποσοστό οργανικής ύλης 68-70%.



Σχήμα 3.8: Μεταβολή του ποσοστού οργανικής ύλης του κομπόστ συναρτήσει του χρόνου.

Τέλος, η μεταβολή του ποσοστού του άνθρακα (C) του κομπόστ παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.9. Ο άνθρακας από 54% ελαττώνεται στο 51.8%, φαινόμενο το οποίο συμφωνεί με την θεωρία. Η τελική τιμή απέχει από το ποσοστό άνθρακα τελικών προϊόντων ίδιων μεθόδων κομποστοποίησης, το οποίο είναι 38-40%, καθώς η διεργασία της κομποστοποίησης διακόπηκε πριν από το στάδιο της ωρίμανσης.



Σχήμα 3.9: Μεταβολή του ποσοστού άνθρακα του κομπόστ συναρτήσει του χρόνου.

3.1.8. Φυτοτοξικότητα

Στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, καταγράφηκε η φυτοτοξικότητα του κομπόστ, μέσω του δείκτη βλάστησης (Germination Index), στην αρχή και στο τέλος του πειράματος, ως ένας επιπλέον δείκτης για την ολοκλήρωση της διεργασίας. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2: Μεταβολή του δείκτη βλάστησης του κομπόστ

Χρόνος	GI (%)
11 ^η μέρα	74
73 ^η μέρα	120

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.2, ο δείκτης βλάστησης του κομπόστ αυξήθηκε κατά την διάρκεια του πειράματος και έφτασε την τιμή του 120 %. Επομένως, στο τέλος της διεργασίας του πειράματος το κομπόστ όχι μόνο δεν είναι φυτοτοξικό (GI<100%) αλλά κατέχει και φυτοθρεπτικές ιδιότητες (GI>100%). Καταλήγουμε λοιπόν στο συμπέρασμα ότι παρόλες τις παρεμβολές του καιρού στον ρυθμό της κομποστοποίησης, η διεργασία κομποστοποίησης επιτεύχθηκε έως κάποιο βαθμό και μπόρεσε να αποτοξικοποιήσει τα απόβλητα του ελαιοτριβείου χωρίς όμως να φτάσει την μέγιστη δυνατή τιμή φυτοθρεπτικότητας. Εάν η κομποστοποίηση δεν είχε διακοπεί πριν το στάδιο της ωρίμανσης είναι πιθανό το τελικό προϊόν να είχε δείκτη βλάστησης μεγαλύτερο του 150 %.

3.1.9. Φουλβικά και Χουμικά οξέα

Στην αρχή και στο τέλος του πειράματος μετρήθηκε η περιεκτικότητα του κομπόστ σε φουλβικά (FA) και χουμικά (HA) οξέα. Η αναλογία χουμικών/φουλβικών οξέων αποτελεί δείκτη ωρίμανσης του κομπόστ με θεμιτές τιμές μεγαλύτερες του 2.9. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.3.

Πίνακας 3.3: Μεταβολή του ποσοστού του κομπόστ σε φουλβικά και χουμικά οξέα.

Χρόνος	FA (%)	HA (%)
12 ^η μέρα	0.52	0.15
73 ^η μέρα	0.84	1.06

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.3, η περιεκτικότητα του κομπόστ σε φουλβικά οξέα υπέστη μικρή αύξηση με αρχική και τελική τιμή σχετικά χαμηλές. Τα χουμικά οξέα αυξήθηκαν αρκετά σε σχέση με την αρχική τους τιμή αλλά παρέμειναν και αυτά σε χαμηλά ποσοστά. Το φαινόμενο αυτό επιβεβαιώνει την επίτευξη ενός μέρους της κομποστοποίησης και όχι την ολοκλήρωσή της, το οποίο είναι αναμενόμενο καθώς ο σχηματισμός φουλβικών και χουμικών οξέων λαμβάνει χώρα στο στάδιο της ωρίμανσης, το οποίο στο παρόν πείραμα παραλήφθηκε. Το τελικό προϊόν παρόμοιας

ολοκληρωμένης μεθόδου κομποστοποίησης μπορεί να έχει τελικό ποσοστό φουλβικών και χουμικών οξέων 0.5-2 % και 3-7 % αντίστοιχα.

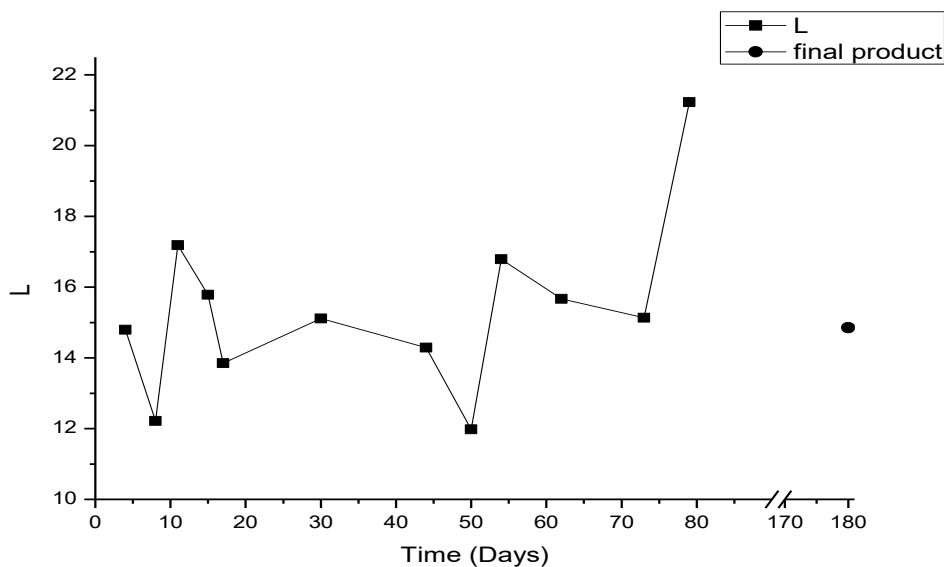
3.2. Χρωματικές μεταβλητές του μοντέλου CIELab

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων των χρωματικών μεταβλητών του κομπόστ, με την χρήση του χρωματικού μοντέλου CIELab. Απώτερος σκοπός είναι η εύρεση χρωματικών μεταβλητών των οποίων η μεταβολή μπορεί να αξιοποιηθεί για τον προσδιορισμό της ωρίμανσης του κομπόστ με την πάροδο του χρόνου.

Για την ύπαρξη σφαιρικής εικόνας της μεταβολής των χρωματικών μεταβλητών του κομπόστ, εφόσον η συγκεκριμένη κομποστοποίηση διακόπηκε πριν από το στάδιο της ωρίμανσης, μετρήθηκαν και οι χρωματικές μεταβλητές του τελικού ώριμου προϊόντος κομποστοποίησης άλλης περιόδου η οποία έλαβε χώρα αξιοποιώντας την ίδια μέθοδο και πρώτη ύλη με την κομποστοποίηση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

3.2.1. L (Φωτεινότητα)

Η μεταβολή της χρωματικής μεταβλητής L του κομπόστ παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.10.



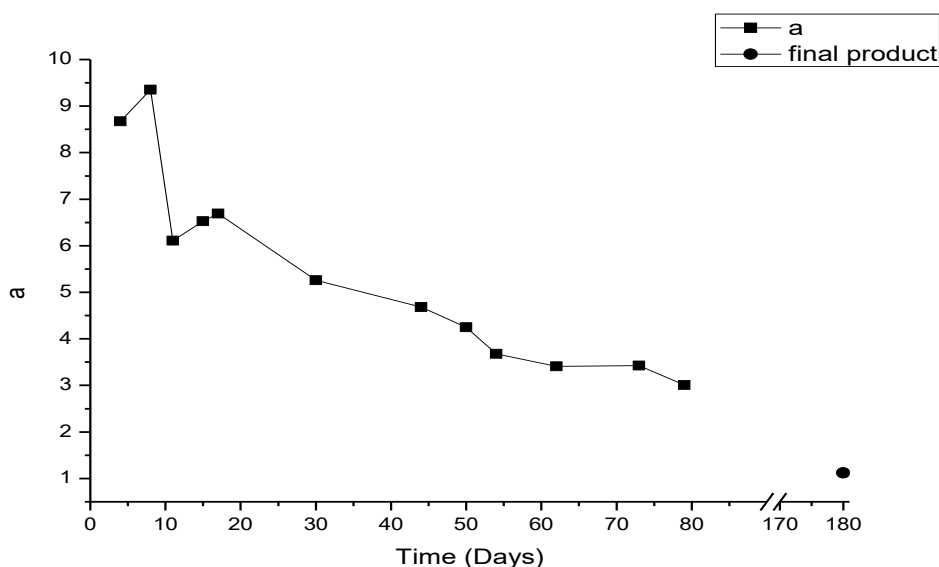
Σχήμα 3.10: Μεταβολή της μεταβλητής L του κομπόστ συναρτήσει του χρόνου.

Στο Σχήμα 3.10, παρατηρείται πως η φωτεινότητα του κομπόστ δεν έχει σταθερή μεταβολή με την πάροδο του χρόνου. Κάποια δείγματα εμφανίζονται να

πλησιάζουν την απόχρωση του μαύρου ($L=0$), ενώ άλλα έχουν αποχρώσεις πιο λευκές ($L=100$) σε σχέση με το αρχικό δείγμα. Επιπροσθέτως, η φωτεινότητα του τελικού προϊόντος βρίσκεται σε παρόμοια επίπεδα με την φωτεινότητα του αρχικού δείγματος. Επομένως, η μεταβολή της φωτεινότητας του κομπόστ δεν μπορεί να αξιοποιηθεί για τον προσδιορισμό της ωριμότητας του.

3.2.2. a (Κόκκινο/Πράσινο)

Η μεταβολή της χρωματικής μεταβλητής a του κομπόστ παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.11.



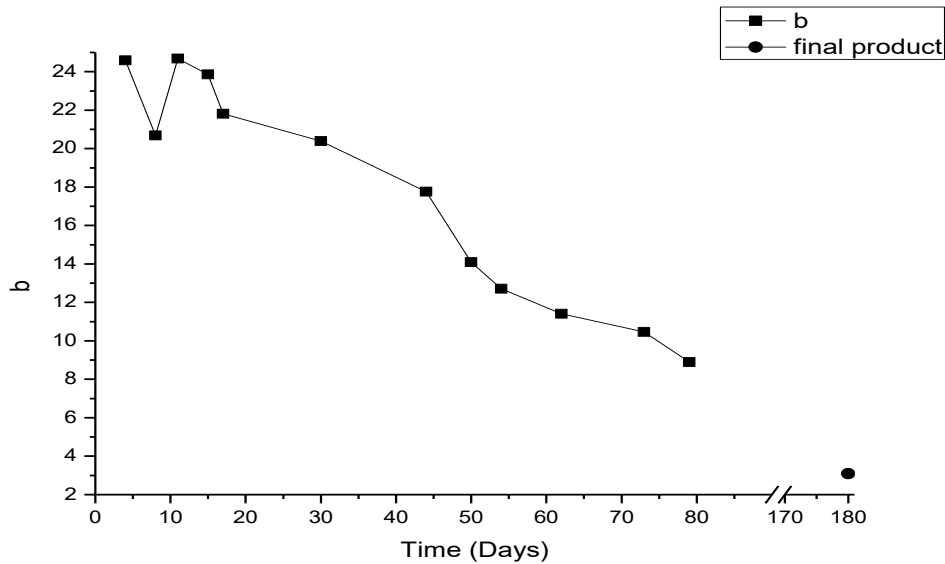
Σχήμα 3.11: Μεταβολή της μεταβλητής a του κομπόστ συναρτήσει του χρόνου.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.11, η χρωματική μεταβλητή a του κομπόστ μειώνεται σταδιακά με την πάροδο του χρόνου, με αρχική τιμή 8.67 και τελική τιμή 3.01. Η ελαφρώς κόκκινη απόχρωση του κομπόστ ($a>0$), ελαττώνεται συνεχώς προς τις αποχρώσεις του πράσινου ($a<0$). Η φθίνουσα τάση της μεταβλητής a συμφωνεί και με την τιμή του τελικού προϊόντος, η οποία είναι 1.12. Επομένως, η μεταβολή της χρωματικής μεταβλητής a μπορεί να αξιοποιηθεί για τον προσδιορισμό της ωριμότητας του κομπόστ σε όλη την διάρκεια της διεργασίας κομποστοποίησης.

3.2.3. b (Κίτρινο/Μπλε)

Η μεταβολή της χρωματικής μεταβλητής b του κομπόστ παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.12. Στο σχήμα αυτό, παρατηρείται η σταδιακή και σταθερή μείωση της μεταβλητής, με αρχική και τελική τιμή 24.59 και 8,89 αντίστοιχα. Η κίτρινη απόχρωση του κομπόστ ($b>0$) ελαττώνεται προς αποχρώσεις του μπλε ($b<0$). Η τιμή της μεταβλητής b του τελικού προϊόντος, η οποία είναι 3.09, ταυτίζεται με την

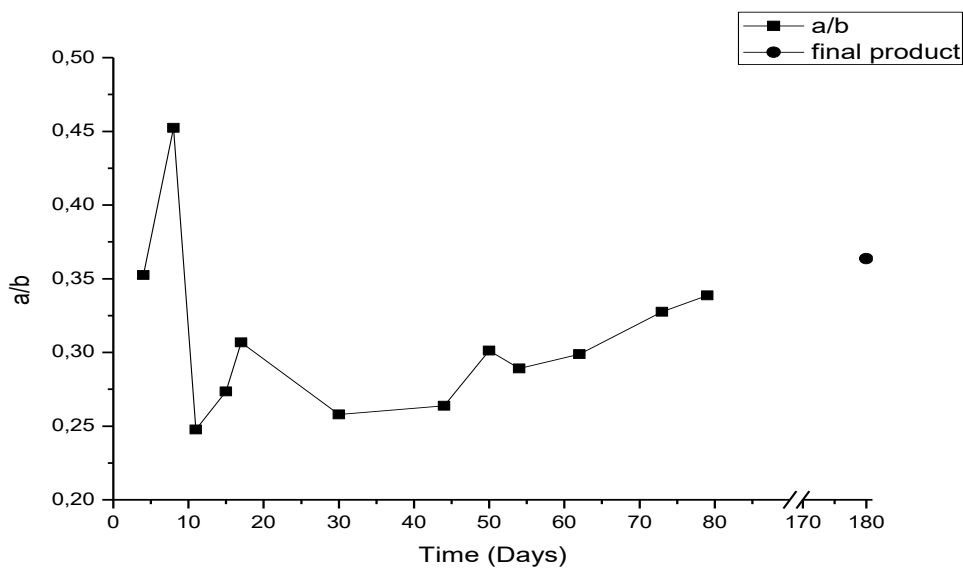
φθίνουσα πορεία της μεταβλητής καθιστώντας την ικανή να προσδιορίσει την ωριμότητα του κομπόστ σε σχέση με την συνολική πάροδο του χρόνου της κομποστοποίησης.



Σχήμα 3.12: Μεταβολή της μεταβλητής b του κομπόστ συναρτήσει του χρόνου.

3.2.4. a/b (Λόγος a προς b)

Η μεταβολή της χρωματικής μεταβλητής a/b του κομπόστ παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.13.

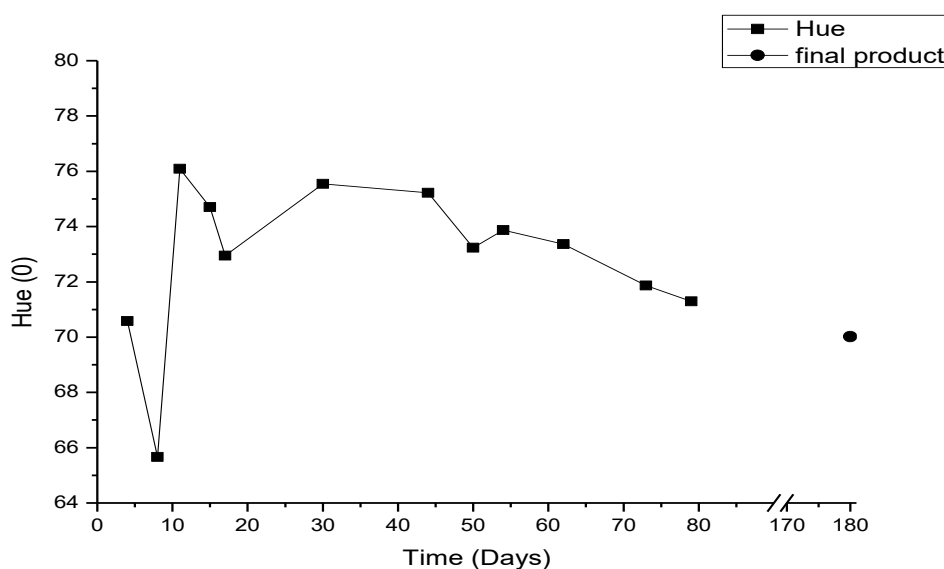


Σχήμα 3.13: Μεταβολή του λόγου a προς b του κομπόστ συναρτήσει του χρόνου.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.13, στην αρχή της κομποστοποίησης ο λόγος a/b παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις χωρίς να έχει σταθερή μεταβολή. Μετά το πέρας της 15^{ης} μέρας και ιδιαίτερα της 30^{ης}, η τιμή του λόγου a/b αυξάνεται σταδιακά, ξεκινώντας από τις τιμές 0.27 και 0.26 αντίστοιχα, για να καταλήξει στην τελική τιμή 0.34. Η αύξουσα πορεία του λόγου a/b μετά την 15^η μέρα συμφωνεί και με την τιμή του τελικού προϊόντος, η οποία είναι 0.36. Επομένως, ο λόγος a/b δεν μπορεί να αξιοποιηθεί για την συνολική περιγραφή της διαδικασίας ωρίμανσης του κομπόστ καθώς δεν παρουσιάζει σταθερή μεταβολή στην συνολική πάροδο του χρόνου. Παρόλα αυτά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της ωριμότητας του κομπόστ μετά το πέρας της 15^{ης} μέρας της κομποστοποίησης, όπου η μεταβολή του είναι σταθερά αύξουσα.

3.2.5. Η (Χροιά)

Η μεταβολή του χρωματικού συντελεστή h του κομπόστ παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.14.



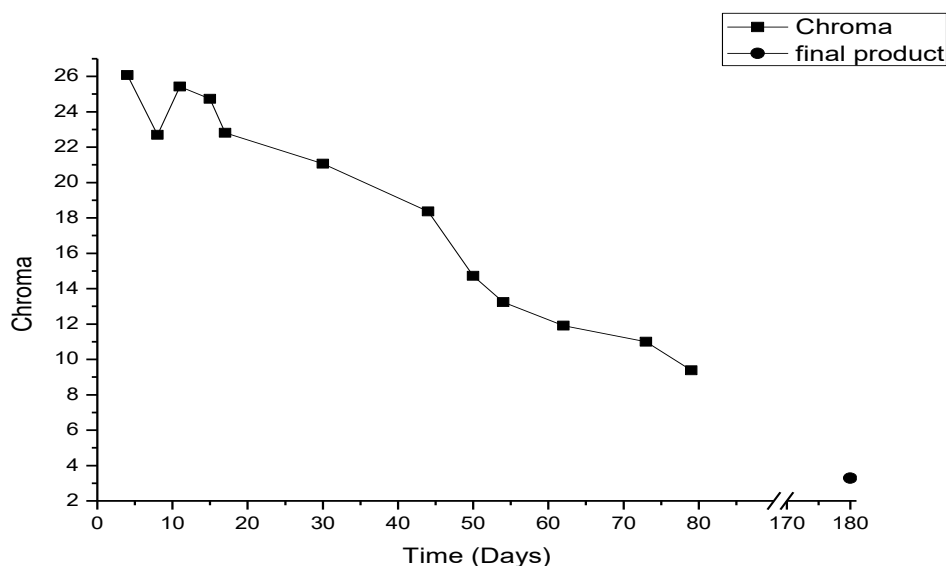
Σχήμα 3.14: Μεταβολή της χροιάς του κομπόστ συναρτήσει του χρόνου.

Στο Σχήμα 3.14, παρατηρείται η μεγάλη διακύμανση των τιμών της χροιάς στις πρώτες μέρες της κομποστοποίησης. Μετά το πέρας της 15^{ης} μέρας και ιδιαίτερα της 30^{ης}, η τιμή της χροιάς μειώνεται σταδιακά, ξεκινώντας από τις τιμές 74.7⁰ και 75.54⁰ αντίστοιχα, για να καταλήξει στην τελική τιμή 71.3⁰. Η φθίνουσα πορεία της μετά την 15^η μέρα συμφωνεί και με την τιμή του τελικού προϊόντος, η οποία είναι 70.02⁰. Επομένως, η μεταβλητή h δεν μπορεί να αξιοποιηθεί για την συνολική περιγραφή της διαδικασίας ωρίμανσης του κομπόστ καθώς δεν παρουσιάζει σταθερή μεταβολή στην συνολική πάροδο του χρόνου. Παρόλα αυτά μπορεί να

χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της ωριμότητας του κομπόστ μετά το πέρας της 15^{ης} μέρα της κομποστοποίησης, όπου η μεταβολή της είναι σταθερά φθίνουσα.

3.2.6. C (Χρωματική πυκνότητα)

Η μεταβολή του χρωματικού συντελεστή C του κομπόστ παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.15.



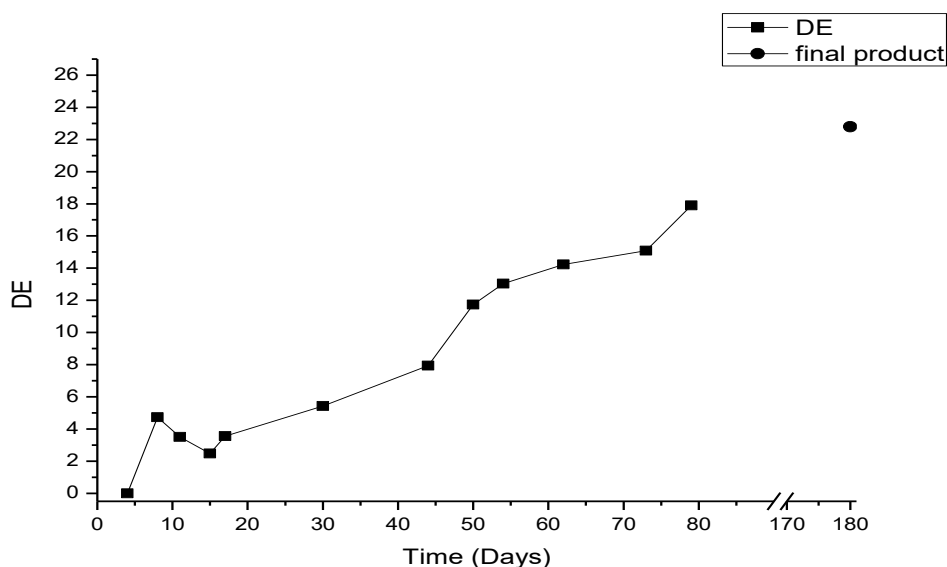
Σχήμα 3.15: Μεταβολή της χρωματικής πυκνότητας του κομπόστ συναρτήσει του χρόνου.

Στο Σχήμα 3.15, παρατηρείται η σταδιακή και συνεχή μείωση της χρωματικής μεταβλητής C καθώς προχωρά η διαδικασία της κομποστοποίησης. Η χρωματική πυκνότητα στην αρχή της διεργασίας είχε τιμή 26.08 και στο τέλος της 9.39. Η διαρκώς φθίνουσα μεταβολή της μεταβλητής C, συμφωνεί και με την τιμή της μεταβλητής του τελικού προϊόντος, η οποία είναι 3.28. Επομένως, η χρωματική μεταβλητή C, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της ωριμότητας του κομπόστ σε σχέση με την συνολική πάροδο του χρόνου της κομποστοποίησης.

3.2.7. ΔΕ (Ολική μεταβολή χρώματος)

Στο Σχήμα 3.16 παρουσιάζεται η ολική μεταβολή χρώματος του κομπόστ κατά την διάρκεια της κομποστοποίησης. Παρατηρείται, στο σχήμα αυτό, πως η χρωματική μεταβλητή ΔΕ εμφανίζει γνησίως αύξουσα μεταβολή, με αρχική και τελική τιμή 0 και 17.89 αντίστοιχα. Η πορεία μεταβολής του ΔΕ συμφωνεί με την τιμή της μεταβλητής του τελικού προϊόντος, η οποία είναι 22.79. Επομένως, η

μεταβλητή ΔΕ, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της ωριμότητας του κομπόστ σε σχέση με την συνολική πάροδο του χρόνου της κομποστοποίησης.






Σχήμα 3.16: Ολική μεταβολή χρώματος του κομπόστ συναρτήσει του χρόνου.

3.2.8. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα χρωματικών μεταβλητών

Παρακάτω παρουσιάζονται οι χρωματικές μεταβλητές και η χρωματική απεικόνιση του κομπόστ, καθώς και τα αντίστοιχα δεδομένα του τελικού προϊόντος παρόμοιας κομποστοποίησης που χρησιμοποιήθηκε.

Πίνακας 3.4: Χρωματική εικόνα και χρωματικές μεταβλητές του κομπόστ.

	Αρχική μέτρηση	Τελική μέτρηση	Τελικό προϊόν
			
Time (d)	4	79	180
L	14.79	21.23	14.85
a	8.67	3.01	1.12
b	24.59	8.89	3.09
a/b	0.352	0.34	0.36
Hue	70.58	71.29	70.01
Chroma	26.08	9.39	3.28
ΔΕ	0	17.89	22.79

3.3. Συσχέτιση φυσικοχημικών παραμέτρων του κομπόστ με τις χρωματικές μεταβλητές του μοντέλου CIELab

Στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας πραγματοποιήθηκε η προσπάθεια γραμμικής συσχέτισης της μεταβολής των φυσικοχημικών παραμέτρων του κομπόστ με τις διάφορες χρωματικές μεταβλητές που έχουν καταγραφεί κατά την διάρκεια της διεργασίας της κομποστοποίησης. Υπολογίστηκαν 3 σενάρια γραμμικής συσχέτισης για τρεις διαφορετικές χρονικές περιόδους της κομποστοποίησης: α) $t = 0 - 80$ μέρες, β) $t = 15 - 80$ μέρες και γ) $t = 30 - 80$ μέρες. Τα αποτελέσματα αυτών των μετρήσεων παρουσιάζονται στην συνέχεια στους Πίνακες 3.5, 3.6 και 3.7.

Στον Πίνακα 3.5, για την χρονική περίοδο 0 έως 80 ημερών, παρατηρείται ότι την μεγαλύτερη γραμμική συσχέτιση παρουσίασαν οι χρωματικές μεταβλητές a, b C και ΔΕ με την περιεκτικότητα του κομπόστ σε άνθρακα (C %), ακολουθούμενη από το ποσοστό του αζώτου (N %). Οι ίδιες χρωματικές μεταβλητές συσχετίζονται γραμμικά σε ικανοποιητικό βαθμό και με τις τιμές του pH και της αγωγιμότητας (EC) του κομπόστ. Ο λόγος C/N, εμφανίζει παρόμοια συσχέτιση με τις προαναφερθείσες παραμέτρους, με την διαφορά ότι δεν συσχετίζεται εξίσου καλά γραμμικά με την μεταβλητή b. Επομένως, η ισχυρή γραμμική συσχέτιση των μεταβλητών a, b C και ΔΕ με δείκτες ωρίμανσης της κομποστοποίησης, όπως τα ποσοστά άνθρακα και αζώτου, επιβεβαιώνουν το συμπέρασμα της προηγούμενης υποενοότητας, ότι οι συγκεκριμένες χρωματικές μεταβλητές μπορούν να αξιοποιηθούν για τον προσδιορισμό της ωριμότητας του κομπόστ στην συνολική διάρκεια της κομποστοποίησης. Τα διαγράμματα γραμμικής συσχέτισης καθώς και οι γραμμικές εξισώσεις των δεδομένων του Πίνακα 3.5 με $R^2 > 0.8$ παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α.

Στον Πίνακα 3.6, εξετάζεται η γραμμική συσχέτιση των παραμέτρων της κομποστοποίησης με τις χρωματικές μεταβλητές, στο χρονικό διάστημα 15 έως 80 ημερών. Όπως και προηγουμένως, την μεγαλύτερη γραμμική συσχέτιση παρουσιάζουν οι μεταβλητές a, b C και ΔΕ με την περιεκτικότητα του κομπόστ σε άνθρακα (C %), ακολουθούμενη από το ποσοστό του αζώτου (N %), με τιμές υψηλότερες από τις αντίστοιχες της περιόδου 0 έως 80 μερών. Αύξηση παρατηρείται και στους γραμμικούς συντελεστές των μεταβλητών a, b C και ΔΕ με την αγωγιμότητα. Οι γραμμικοί συντελεστές του pH παρέμεινα σταθεροί. Επιπλέον, ο λόγος C/N παρουσιάζει αυξημένη γραμμικότητα με τις μεταβλητές a, C και ΔΕ, ενώ πλέον συσχετίζεται επαρκώς και με την μεταβλητή b. Σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο χρονικών περιόδων, 15-80 με 0-80, είναι πως στο διάστημα 15 έως 80 ημερών το ποσοστό του άνθρακα (C%), εμφανίζει ικανοποιητική συσχέτιση και με τις χρωματικές μεταβλητές h και a/b. Επομένως, η ωριμότητα του κομπόστ μπορεί να προσδιοριστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια, με την χρήση επιπλέον χρωματικών μεταβλητών, μετά την 15^η ημέρα. Τα διαγράμματα γραμμικής συσχέτισης καθώς και

οι γραμμικές εξισώσεις των δεδομένων με $R^2 > 0.8$ του Πίνακα 3.6 παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α.

Στον Πίνακα 3.7, για την χρονική περίοδο 30 έως 80 ημερών, παρατηρείται ότι την μεγαλύτερη γραμμική συσχέτιση παρουσίασαν οι χρωματικές μεταβλητές a,b, a/b, h, C και ΔΕ με την περιεκτικότητα του κομπόστ σε άνθρακα (C %), ακολουθούμενη επιπλέον από το ποσοστό του αζώτου (N %), με τιμές κοντά στην μονάδα. Οι ίδιες χρωματικές μεταβλητές συσχετίζονται γραμμικά σε ικανοποιητικό βαθμό και με τις τιμές του pH. Οι συντελεστές γραμμικότητας και των τριών παραμέτρων (C%, N%, pH), αυξήθηκαν σε σχέση με την περίοδο 15 έως 80 ημερών, καθώς αυξήθηκε και ο αριθμός των χρωματικών μεταβλητών που μπορούν να τις προσδιορίσουν. Ο λόγος C/N, ενώ πλέον εμφανίζει γραμμική συσχέτιση και με τις μεταβλητές h και a/b, οι τιμές των συντελεστών γραμμικότητας είναι μειωμένες σε σχέση με την χρονική περίοδο των 15 έως 80 ημερών. Η αγωγιμότητα παρουσιάζει αυξημένο συντελεστή γραμμικότητας με την μεταβλητή a, ενώ των υπολοίπων μεταβλητών οι συντελεστές έχουν μειωθεί. Επομένως, η ωριμότητα του κομπόστ μπορεί να προσδιοριστεί με ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια μετά την 30^η ημέρα της κομποστοποίησης, μέσω των παραμέτρων C%, N% και pH, ενώ η ακρίβεια μειώνεται για τις παραμέτρους C/N και αγωγιμότητα. Τα διαγράμματα γραμμικής συσχέτισης καθώς και οι γραμμικές εξισώσεις των δεδομένων με $R^2 > 0.8$ του Πίνακα 3.7 παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α.

Συνοψίζοντας, η υψηλού βαθμού γραμμική συσχέτιση συγκεκριμένων μεταβλητών χρώματος του κομπόστ με τις διάφορες φυσικοχημικές παραμέτρους, οι οποίες αποτελούν δείκτη ωρίμανσης, επιτρέπουν τον προσδιορισμό της ωριμότητας του κομπόστ καθώς και των τιμών των επιμέρους παραμέτρων κατά την διάρκεια της κομποστοποίησης. Η παράμετρος η οποία μπορεί να προσδιοριστεί με την μεγαλύτερη ακρίβεια, είναι το ποσοστό του άνθρακα (C%), μέσω των μεταβλητών a, b, C και ΔΕ για την περίοδο 0 έως 80 ημερών και μέσω των μεταβλητών a,b, a/b, h, C και ΔΕ για τις περιόδους 15 έως 80 και 30 έως 80 ημερών. Ακολουθούν σε ακρίβεια προσδιορισμού το ποσοστό του αζώτου (N %) και το pH, μέσω των μεταβλητών a, b, C και ΔΕ για τις περιόδους 0 έως 80 και 15 έως 80 ημερών και μέσω των μεταβλητών a,b, a/b, h, C και ΔΕ για την περίοδο 30 έως 80 ημερών. Η αγωγιμότητα (EC) και ο λόγος C/N, υπολογίζονται με μικρότερη αλλά ικανοποιητική ακρίβεια σε σχέση με τις υπόλοιπες παραμέτρους.

Πίνακας 3.5: Συντελεστές γραμμικής συσχέτισης φυσικοχημικών παραμέτρων με τις χρωματικές μεταβλητές του κομπόστ το χρονικό διάστημα $t = 0 - 80$ μέρες.

Φυσικοχημικές παράμετροι	Χρωματικές μεταβλητές CIELab						
	L	a	b	h	C	a/b	ΔE
NH ₄ (mg/kg)	0.075	0.4258	0.342	0.0975	0.3635	0.1016	0.3259
NO ₃ (mg/g)	0.0259	0.6665	0.3599	0.2711	0.4022	0.274	0.3812
N (%)	0.0101	0.9341	0.8697	0.0138	0.8916	0.015	0.903
C (%)	0.3736	0.8406	0.9065	0.0108	0.9416	0.0131	0.9372
pH	0.1104	0.7744	0.8543	0.0994	0.8691	0.1008	0.8744
EC (mS/cm)	0.0881	0.824	0.8267	0.0875	0.8498	0.088	0.8489
C/N	0.0699	0.9306	0.7834	0.009	0.806	0.0099	0.8243

Πίνακας 3.6: Συντελεστές γραμμικής συσχέτισης φυσικοχημικών παραμέτρων με τις χρωματικές μεταβλητές του κομπόστ το χρονικό διάστημα $t = 15 - 80$ μέρες.

Φυσικοχημικές παράμετροι	Χρωματικές μεταβλητές CIELab						
	L	a	b	h	C	a/b	ΔE
NH ₄ (mg/kg)	0.0087	0.2995	0.2459	0.1098	0.2489	0.1113	0.2252
NO ₃ (mg/g)	0.0094	0.2619	0.148	0.3674	0.1555	0.0813	0.1409
N (%)	0.2121	0.9606	0.9151	0.1405	0.9291	0.1421	0.9331
C (%)	0.4507	0.9511	0.9808	0.8191	0.9804	0.821	0.9946
pH	0.1104	0.7744	0.8543	0.0994	0.8691	0.1008	0.8744
EC (mS/cm)	0.0732	0.9583	0.8824	0.2321	0.8901	0.2346	0.8628
C/N	0.2689	0.9545	0.8793	0.1915	0.887	0.194	0.9002

Πίνακας 3.7: Συντελεστές γραμμικής συσχέτισης φυσικοχημικών παραμέτρων με τις χρωματικές μεταβλητές του κομπόστ το χρονικό διάστημα $t = 30 - 80$ μέρες.

Φυσικοχημικές παράμετροι	Χρωματικές μεταβλητές CIELab						
	L	a	b	h	C	a/b	ΔE
NH ₄ (mg/kg)	0.031	0.0067	0.0015	0.025	0.0018	0.0301	0.0009
NO ₃ (mg/g)	0.111	0.0007	0.0243	0.205	0.0222	0.2066	0.0272
N (%)	0.2424	0.8861	0.925	0.9379	0.9231	0.9361	0.9259
C (%)	0.6015	0.9866	0.9729	0.9446	0.9737	0.945	0.9914
pH	0.1862	0.935	0.9686	0.933	0.9677	0.9316	0.9578
EC (mS/cm)	0.1642	0.9505	0.8089	0.0689	0.8221	0.0709	0.7957
C/N	0.9189	0.746	0.77	0.7729	0.7311	0.7783	0.7997

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

4.1. Συμπεράσματα

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα του ελέγχου κομποστοποίησης της βιομάζας στερεών αποβλήτων ελαιοτριβείου με την χρήση της χρωματομετρικής μεθόδου CIELab. Αρχικά, διεξάχθηκε η διεργασία της κομποστοποίησης και καταγράφηκε η μεταβολή συγκεκριμένων δεικτών και παραμέτρων με την πάροδο του χρόνου, μέσω μιας σειράς μετρήσεων και χημικών αναλύσεων, έτσι ώστε να οριστούν τα διάφορα στάδια και η πορεία της κομποστοποίησης. Ταυτόχρονα, καταγράφηκε και η εξέλιξη των μεταβλητών της μεθόδου CIELab, με στόχο την εύρεση χρωματικών μεταβλητών των οποίων η μεταβολή σε σχέση με τον χρόνο είναι σταθερή, έτσι ώστε να επιτρέπουν τον προσδιορισμό της ωριμότητας του κομποστ. Τέλος, ελέγχθηκε η πιθανή συσχέτιση των χρωματικών μεταβλητών με τις φυσικοχημικές παραμέτρους της κομποστοποίησης με την χρήση γραμμικών συντελεστών. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανωτέρω μελέτη συνοψίζονται παρακάτω :

- Η διαδικασία της κομποστοποίησης, παρόλες τις παρεμβολές των έντονων καιρικών φαινομένων, επιτεύχθηκε μέχρι ενός βαθμού, διατηρώντας το θερμοφίλο στάδιο ($T > 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$) για αρκετές μέρες, και διακόπηκε προτού φτάσει στο στάδιο της ωρίμανσης.
- Η μεταβολή των φυσικοχημικών παραμέτρων του κομποστ με την πάροδο του χρόνου, βρίσκεται σε συμφωνία με το αναμενόμενο αποτέλεσμα που περιγράφεται στις αντίστοιχες βιβλιογραφικές μελέτες της κομποστοποίησης, οι οποίες περιγράφουν τα διάφορα στάδια της διαδικασίας.
- Το χρωματικό μοντέλο CIELab, μπορεί να αξιοποιηθεί για τον έλεγχο της κομποστοποίησης της βιομάζας. Οι χρωματικές μεταβλητές a, b, C και ΔΕ, παρουσιάζουν σταθερή μεταβολή με την πάροδο του χρόνου σε όλη την διάρκεια της κομποστοποίησης. Επομένως, μπορούν μέσω της καταγραφής τους να προσδιορίσουν το στάδιο στο οποίο βρίσκεται η προς μελέτη διεργασία.
- Η χρήση του χρωματικού μοντέλου CIELab για τον έλεγχο της κομποστοποίησης ενισχύεται μετά την 15^η και 30^η μέρα της διεργασίας με την χρήση δύο επιπλέον χρωματικών μεταβλητών. Οι μεταβλητές h και a/b, παρουσιάζουν σταθερή μεταβολή με το χρόνο μετά την 15^η και ιδιαίτερα την 30^η ημέρα της κομποστοποίησης, παρέχοντας την δυνατότητα μέσω της καταγραφής τους να προσδιοριστεί το στάδιο της διεργασίας.
- Γραμμική συσχέτιση με συντελεστή κοντά στην μονάδα εμφάνισαν πέντε φυσικοχημικές παράμετροι της διεργασίας, οι οποίες αποτελούν δείκτη ωριμότητας, με τις μεταβλητές του μοντέλου CIELab. Το ποσοστό του

κομπόστ σε άνθρακα παρουσιάζει την καλύτερη γραμμική συσχέτιση από όλες τις φυσικοχημικές παραμέτρους. Ακολουθούν σε σειρά φθίνοντος συντελεστή γραμμικότητας το ποσοστό του κομπόστ σε άζωτο, το pH, η αγωγιμότητα και ο λόγος C/N.

- Όσο προχωράει η διαδικασία της κομποστοποίησης, η γραμμική συσχέτιση του ποσοστού σε άνθρακα με τις μεταβλητές του μοντέλου CIELab βελτιώνεται. Την περίοδο $t=0-80$, το C% συσχετίζεται γραμμικά με της μεταβλητές a, b, C, ΔΕ. Για $t=15-80$, οι γραμμικοί συντελεστές των προαναφερθέντων μεταβλητών αυξάνονται και πλέον υπάρχει γραμμική συσχέτιση και με τις μεταβλητές h και a/b. Τέλος, για την περίοδο $t=30-80$, οι γραμμικοί συντελεστές και των έξι χρωματικών μεταβλητών αυξάνονται με τιμές πολύ κοντά στην μονάδα.
- Η περιεκτικότητα του κομπόστ σε άζωτο και η τιμή του pH παρουσιάζουν βελτιωμένη γραμμική συσχέτιση με τις χρωματικές μεταβλητές του μοντέλου CIELab με την πάροδο του χρόνου. Την περίοδο $t=0-80$, συσχετίζονται γραμμικά με της μεταβλητές a,b, C, ΔΕ και την περίοδο $t=15-80$ οι γραμμικοί συντελεστές των προαναφερθέντων μεταβλητών αυξάνονται. Τέλος, για την περίοδο $t=30-80$, υπάρχει γραμμική συσχέτιση και με τις μεταβλητές h και a/b και οι γραμμικοί συντελεστές και των έξι χρωματικών μεταβλητών αυξάνονται με τιμές πολύ κοντά στην μονάδα.
- Η αγωγιμότητα και ο λόγος C/N παρουσιάζουν βελτιωμένη γραμμική συσχέτιση με τις μεταβλητές του μοντέλου CIELab την περίοδο $t=15-80$, σε σχέση με την περίοδο $t=0-80$. Αντιθέτως, για την περίοδο $t=30-80$, οι γραμμικοί συντελεστές των δύο παραμέτρων ελαττώνονται.

4.2. Προτάσεις

Για την συνέχιση της παρούσας εργασίας θα ήταν θεμιτή η ενίσχυση της χρωματομετρικής μελέτης, με στόχο την δημιουργία διαγραμμάτων και εξισώσεων προσδιορισμού της ωριμότητας και των επιμέρους φυσικοχημικών παραμέτρων του κομπόστ. Συγκεκριμένα, μια πρόταση θα μπορούσε να είναι η μελέτη μιας ολοκληρωμένης κομποστοποίησης, η οποία να μην είναι εκτεθειμένη και να μην υφίσταται αλλοιώσεις από εξωτερικούς παράγοντες. Περαιτέρω ενίσχυση θα μπορούσε να επιτευχθεί με την καταγραφή επιπλέον φυσικοχημικών παραμέτρων του κομπόστ, έτσι ώστε να αυξηθεί η ακρίβεια προσδιορισμού της ωριμότητας και της σύστασης του προϊόντος της κομποστοποίησης. Επίσης, σημαντική θα ήταν και η μελέτη επιπλέον πειραμάτων κομποστοποίησης, ίδιας πρώτης ύλης και μεθοδολογίας, έτσι ώστε να ελαττωθούν τα πιθανά σφάλματα και να εξακριβωθεί το εύρος χρήσεως της χρωματομετρικής μελέτης. Τέλος, η συσχέτιση των φυσικοχημικών παραμέτρων του κομπόστ, με τις αντίστοιχες χρωματικές μεταβλητές του μοντέλου CIELab, θα

μπορούσε να περιγραφεί καλύτερα με την διεξαγωγή και διαφορετικών μορφών συσχετίσεων εκτός της γραμμικής.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] L. Diaz, M. De Bertoldi και W. Bidlingmaier, «Compost science and technology,» *Elsevier*, 2007.
- [2] R. Haug, *The practical handbook of compost engineering*, Lewis Publishers, 1993.
- [3] E. Epstein, *THE SCIENCE OF COMPOSTING*, CRC Press, 1997.
- [4] R. Rynk, M. Van de Kamn, M. Singley, T. Richard, J. Kolega, F. Gouin, L. Laliberty, D. Kay, D. Murphy, H. Hoitink και W. Brinton, *On-Farm Composting Handbook*, Ithaca.NY: Northeast Regional Agricultural Engineering Service, 1992.
- [5] Α. Αγγελάκης, Κ. Βούρβαχη, Η. Διαβάτης, Α. Ευμορφοπούλου, Ν. Κάρτσωνας, Δ. Μαμάης, Α. Μποσδογιάννη και Α. Στάμου, *Εναλλακτικοί τρόποι διαχείρισης των παραπροϊόντων από εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων*, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, 2005.
- [6] N. Trautmann και M. Krasny, *Composting in the Classroom Scientific Inquiry for High School Students*, Cornell Waste Management Institute, 1997.
- [7] R. Haug, «Composting process design criteria part 3, aeration,» *BioCycle*, αρ. 26, pp. 53-57, 1986.
- [8] V. Mc Kinley, J. Vestal και A. Eralp, «Microbial Activity in Composting (i),» *BioCycle*, τόμ. 26, αρ. 9, pp. 39-43, 1985.
- [9] S. Coppola, S. Dumontet και P. Marino, «Composting raw sewage sludge in mixture with organic or inert bulking agents,» T. U. o. Leeds, Επιμ., University of Leeds, 1983, pp. 125-147.
- [10] M. Viel, D. Sayag και L. Andre, «Optimization of agricultural industrial wastes management through in-vessel composting,» *Elsevier Applied Sciences*, pp. 231-237, 1987.
- [11] K. Schultz, «Continuous thermophilic composting,» *Applied Microbiology*, αρ. 10, pp. 108-122, 1962.
- [12] Y. Handar, «Formation and properties of humic substance originating from composts,» σε *de Bertoldi M, P. Sequi, B. Lemmes and T. Papi. The science of composting*, Blackie Academic & Professional, 1993, pp. 235-239.
- [13] J. Wiley και G. Pierce, «A preliminary study of high rate composting,» *Proc. Am. Soc. Civil Eng. Paper*, τόμ. No.846, αρ. 81, pp. 1-28, 1955.
- [14] K. Schultz, «Rate of oxygen consumption and respiratory quotients during aerobic decomposition of a synthetic garbage,» *Compost Science*, αρ. 1, pp. 36-40, 1960.
- [15] R. Regan και J. Jeris, «A review of the decomposition of cellulose and refuse,» *Compost Science*, αρ. 11(1), pp. 17-20, 1970.

- [16] P. Bach, M. Shoda και H. Kubota, «Rate of composting of dewatered sludge in conitniously mixed isothermal reactor,» *J. Fremment. Techol*, αρ. 62(3), pp. 285-292, 1984.
- [17] Δ. Γεωργακάκης, Διαχείριση Αποβλήτων Τεύχος 3ο. Δευτεροβάθμια (Βιολογική) Επεξεργασία Γεωργο-Βιομηχανικών Αποβλήτων. Μέρος Β. Αερόβιες Διεργασίες, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 2009.
- [18] M. De Bertoldi, G. Vallini και A. Pera, «Thechological aspects of composting including modelling and microbiology,» σε *Gasser, J.K.R. Composting of Agricultural and Other Wastes*, New York, Elsevier Applied Science Publishers, 1982, pp. 27-41.
- [19] E. Stentiford, «Composting control: principles and practice,» σε *The Science of Composting (Eds. de Bertoldi M., Sequi P, Lemmes B., Papi T.)*, Glasgow. Scotland, Blackie Academic and Professional, 1995, pp. 49-59.
- [20] Α. Ευθυμίου, Μικροβιακή ποικιλομορφία κατά τη συγκοστοποίηση υπολειμμάτων εκοκκισμού βάμβακος, Αθήνα: Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 2012.
- [21] X. Hao και M. Benke, «Nitrogen Traonsformation and Losses during Composting Mitigation Strategies,» *Dynamic Soil, Dynamic Plant*, 2008.
- [22] D. Knuth, «Nitrogen-cycle ecology of solid waste composting,» *Develop. Ind. Microbiol.*, αρ. 11, pp. 387-395, 1970.
- [23] P. Bishop και C. Godfrey, «Nitrogen transformations during sludge composting,» *BioCycle*, αρ. 24(4), pp. 34-39.
- [24] N. Shammam και L. Wang, «Biosolids Composting (Chapter 16),» σε *Handbook of Enviromental Engineering, Volume 8: Biological Treatment Processes*, Humana Press, 2009.
- [25] Δ. Μαλάμης, Σχεδιασμός, κατασκευή και λειτουργία βιοαντιδραστήρα για την επεξεργασία οργανικών αποβλήτων, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο , 2011.
- [26] L. Cooperband, *The Art and Science of Composting: A Resource for Farmers and Compost Producers*, Center for Intergrated Agricultural Systems, 2002.
- [27] M. Sesli και E. Yegenoglu, «RAPD-PCR analysis of cultured type olives in Turkey,» *African Biotechnol*, αρ. 8, pp. 3418-23, 2009.
- [28] S. Dermeche, M. Nadour, C. Larroche, F. Moulti-Mati και P. Michaud, «Olive mill wastes: Biochemical characterizations and volarization strategies,» *Process Biochemistry*, αρ. 48, pp. 1532-1552, 2013.
- [29] A. Rozzi και F. Malpei, «Treatment and disposal of olive mill effliuents,» *Int. Biodet Biodeg*, αρ. 1, pp. 135-144, 1996.
- [30] M. Manios, M. Kalogeraki, M. Terzakis, A. Mikros και V. Manios, «Cocomposting olive residuals and green waste on Crete,» *BioCycl Intl*, αρ.

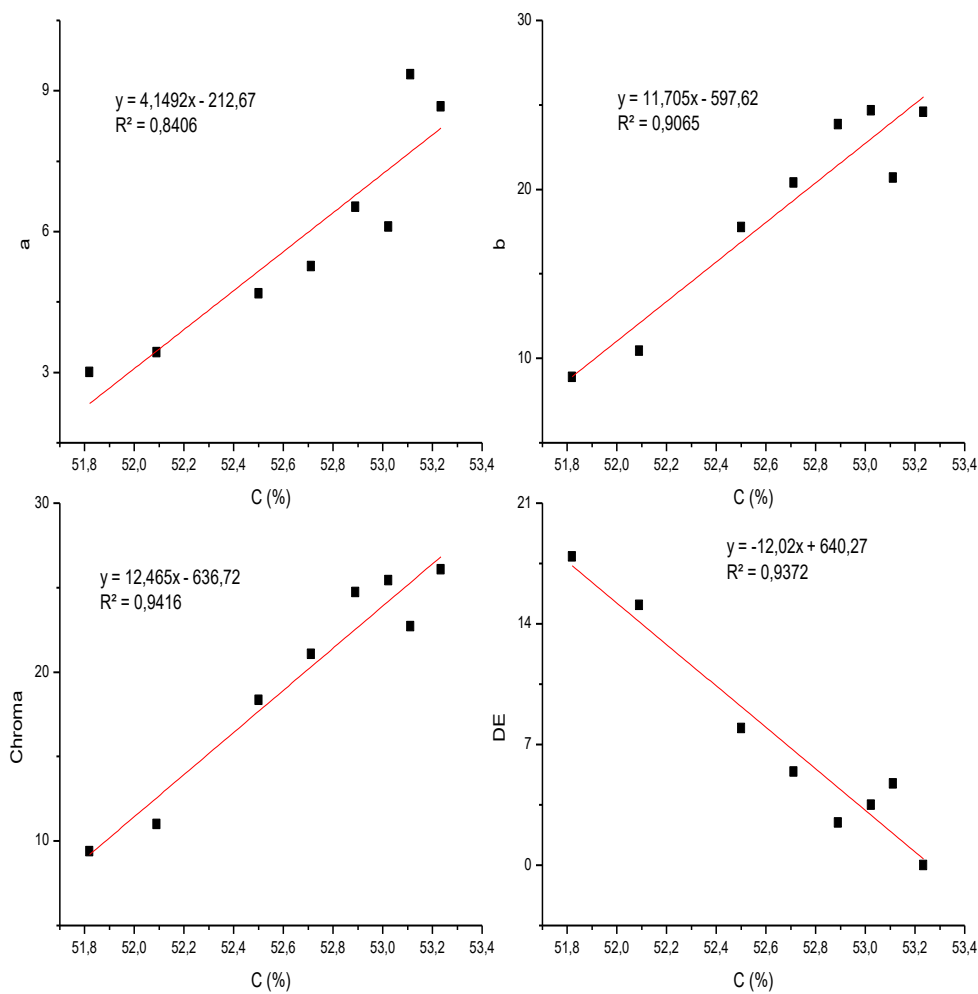
- 45(2), pp. 67-70, 2004.
- [31] C. Bohren, *Fundamentals of Atmospheric Radiation: An Introduction with 400 Problems*, Wiley-VCH, 2006.
- [32] Hunterlab, «What is color and How is Measured?,» *Hunterlab The Color Management Company, Applications Note*, αρ. 8(7), 2000.
- [33] L. Cornelius, «A Matter of Perspective: Understanding Color Theory for Remanufacturing,» *RECHARGER Magazine*, pp. 36-42, 2001.
- [34] CIE, «CIE Draft Standard DS 014-2.2/E:2004 Colorimetry-Part 2: CIE Standard Illuminants,» 2004.
- [35] Κ. Ορφανάκος, *Χρωματομετρία-Βασικές Αρχές*, Αθήνα: Εκδόσεις Σταμούλης, 2004.
- [36] S. Süsstrunk, R. Buckley και S. Swen, «Standard RGB Color Spaces,» *Laboratory of audio-visual Communication (EPFL), Xerox Architecture Center, Apple Computer*, 1999.
- [37] M. A. I. Khan, K. Ueno, S. Horimoto, F. Komai, T. Someya, K. Inoue, K. Tanaka και Y. Ono, «CIELAB color variables as indicators of compost stability,» *Waste Management*, αρ. 29, pp. 2969-2975, 2009.
- [38] A. Abbot, «Quality measurement of fruit and vegetables,» *Postharvest Biology and Technology*, αρ. 15(3), pp. 207-225.
- [39] Hunterlab, «The Basics of Color Perception and Measurements,» *Hunterlab Presents, Version 1.4*, 2001.
- [40] R. McGuire, «Reporting of objective color measurements,» *Horticultural Science*, αρ. 27, pp. 1254-1255, 1992.
- [41] B. Hutchings, *Food Colour and Appearance*, Glasgow: Blackie Academic & Professional, 1994.
- [42] L. Yam και E. Papadakis, «A simple digital imaging method for measuring and analyzing color of food surfaces,» *Journal of Food Engineering*, αρ. 61(1), pp. 137-142, 2004.
- [43] Ε. Χατζής, *Ανάπτυξη Μεθόδου Μέτρησης Χρώματος Νωπών Αγροτικών Προϊόντων με Ανάλυση Ψηφιακών Εικόνων (Διδακτορική Διατριβή)*, Αθήνα: Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 2015.
- [44] M. Sánchez-Maranón, G. Delgado, M. Melgosa, R. Delgado και E. Hita, «CIELAB color parameters and their relationship to soil characteristics in Mediterranean red soils,» *Soil Science*, αρ. 162, pp. 833-842, 1997.
- [45] S. Spielvogel, H. Knicker και L. Kögel-Knaber, «Soil organic matter composition and soil lightness,» *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, αρ. 167, pp. 545-555, 2004.
- [46] C. García, T. Hernández και F. Costa, «Color changes of organic wastes during composting and maturation processes,» *Soil Science and Plant Nutrition*, αρ.

- 36(2), pp. 243-250, 2012.
- [47] K. Sugahara, Y. Harada και A. Inoko, «Color changes of city refuse during composting process,» *Soil Science and Plant Nutrition*, αρ. 25(2), pp. 197-208, 2012.
- [48] Test Methods for the Examination of Composting and Compost, The United States Composting Council, 2001.
- [49] Macherey-Nagel, «Basic principles of Water Analysis,» *Water Analysis brochure*, 2009.
- [50] E. C. f. Standardization, «Determination of ammonium and nitrate in soil, biowaste and sewage sludge,» 2005.
- [51] OE 504A-25/3, Προσδιορισμός ολικού αζώτου (TN) σε στερεά, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2012.
- [52] Büchi, «Nitrogen determination in soil,» *Application Note No. 124/2013*, 2013.
- [53] ΕΣΥΠ/ΕΛΟΤ, «Χαρακτηρισμός ίλων-Προσδιορισμός της απώλειας κατά την ανάφλεξη της ξηράς ύλης,» *ΕΛΟΤ EN 12879*, 2001.
- [54] ICF, «Humic Acids,» *Draft technical Evaluation Report, Complied by ICF Consulting for the USADA national Organic Program*, pp. 1-10, 2006.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α. ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΜΕ ΧΡΩΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ CIELAB

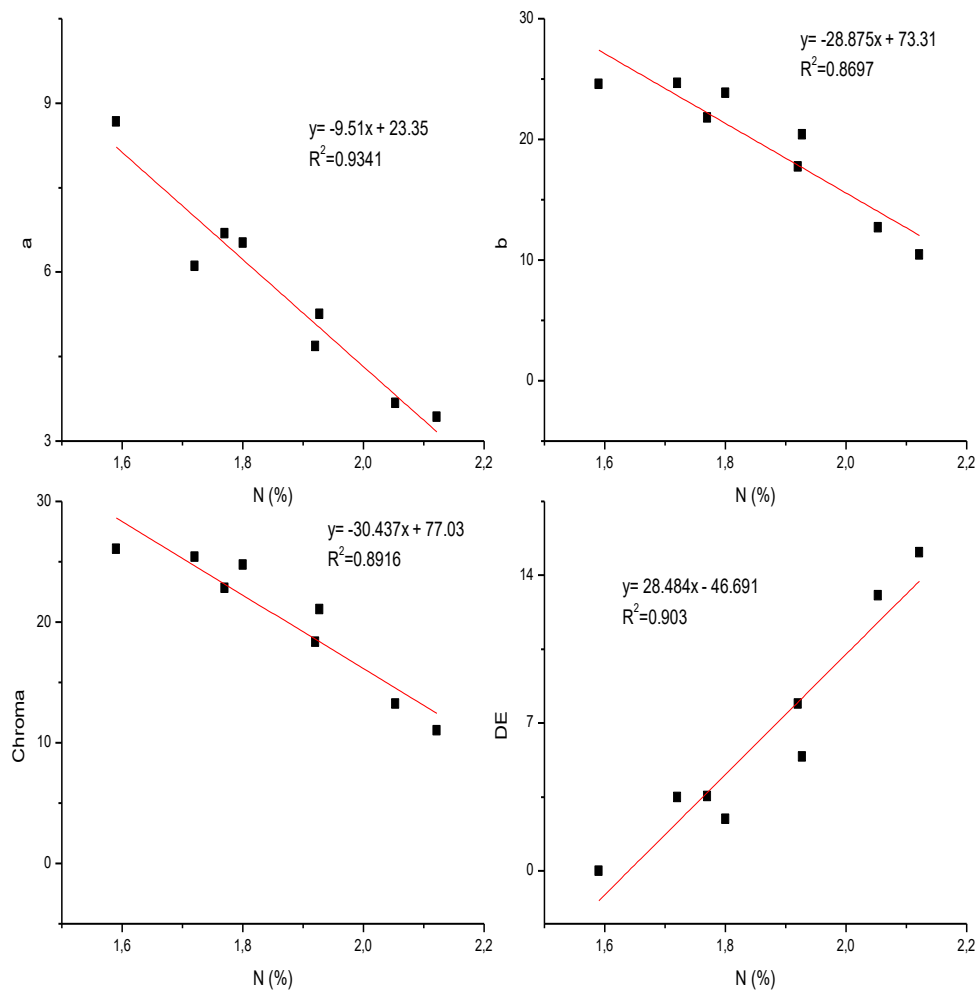
Α.1. Γραμμική συσχέτιση χρονικού διαστήματος 0 έως 80 ημερών

Α.1.1. Περιεκτικότητα σε άνθρακα (C %)



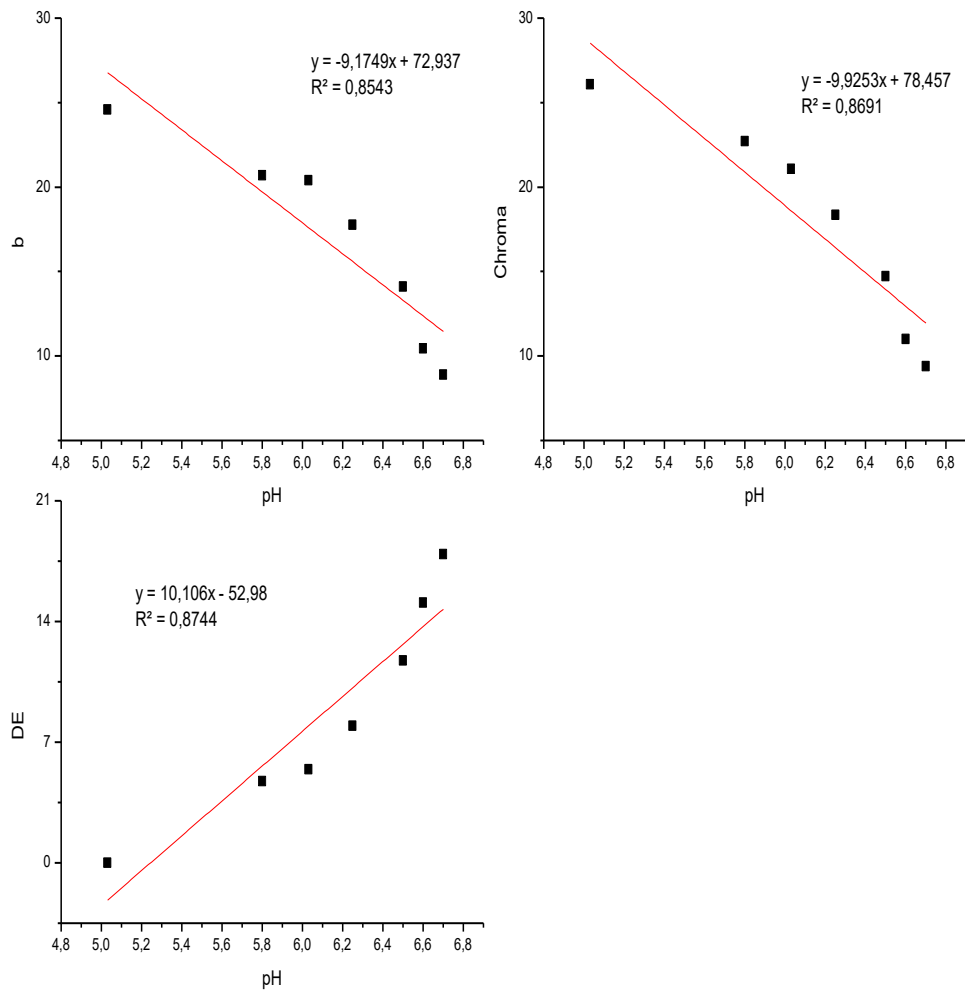
Σχήμα Α.1: Διαγράμματα γραμμικής συσχέτισης του C% με τις χρωματικές μεταβλητές a, b, C, ΔΕ.

A.1.2. Περιεκτικότητα σε άζωτο (N %)



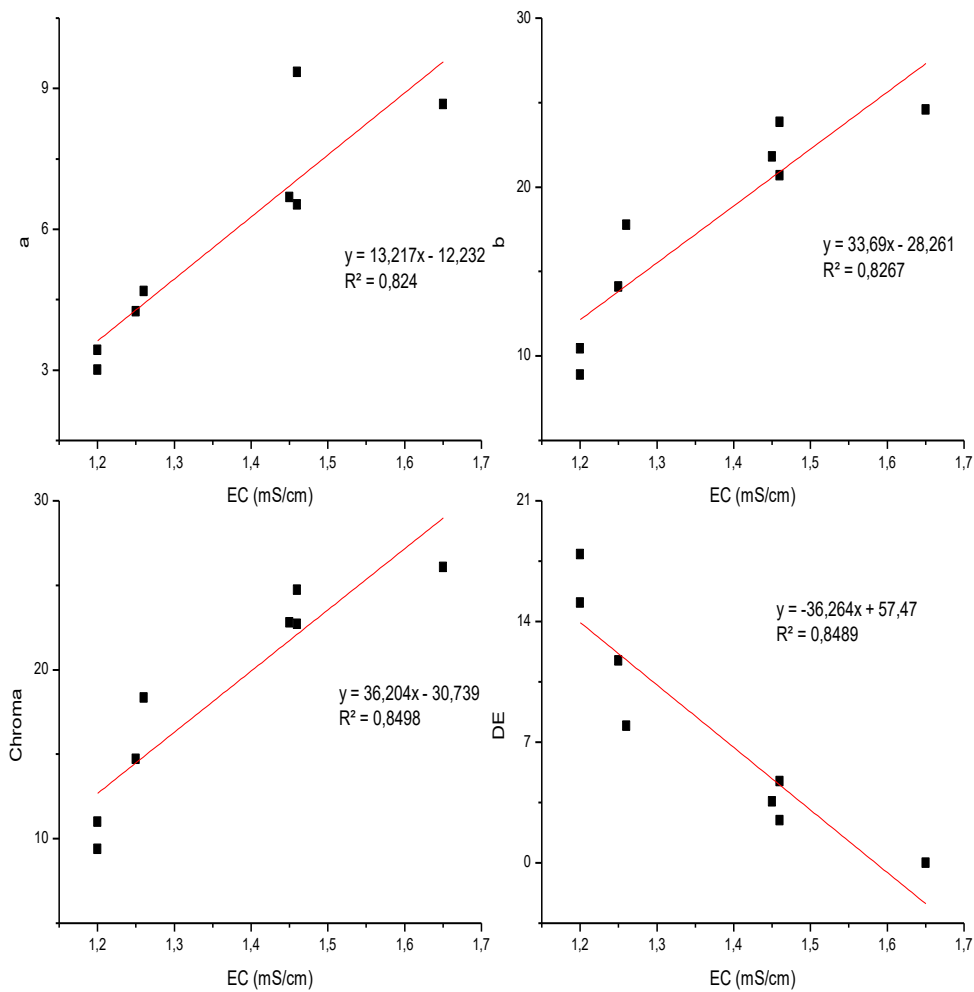
Σχήμα A.2: Διαγράμματα γραμμικής συσχέτισης του N% με τις χρωματικές μεταβλητές a, b, C, ΔE.

A.1.3. pH



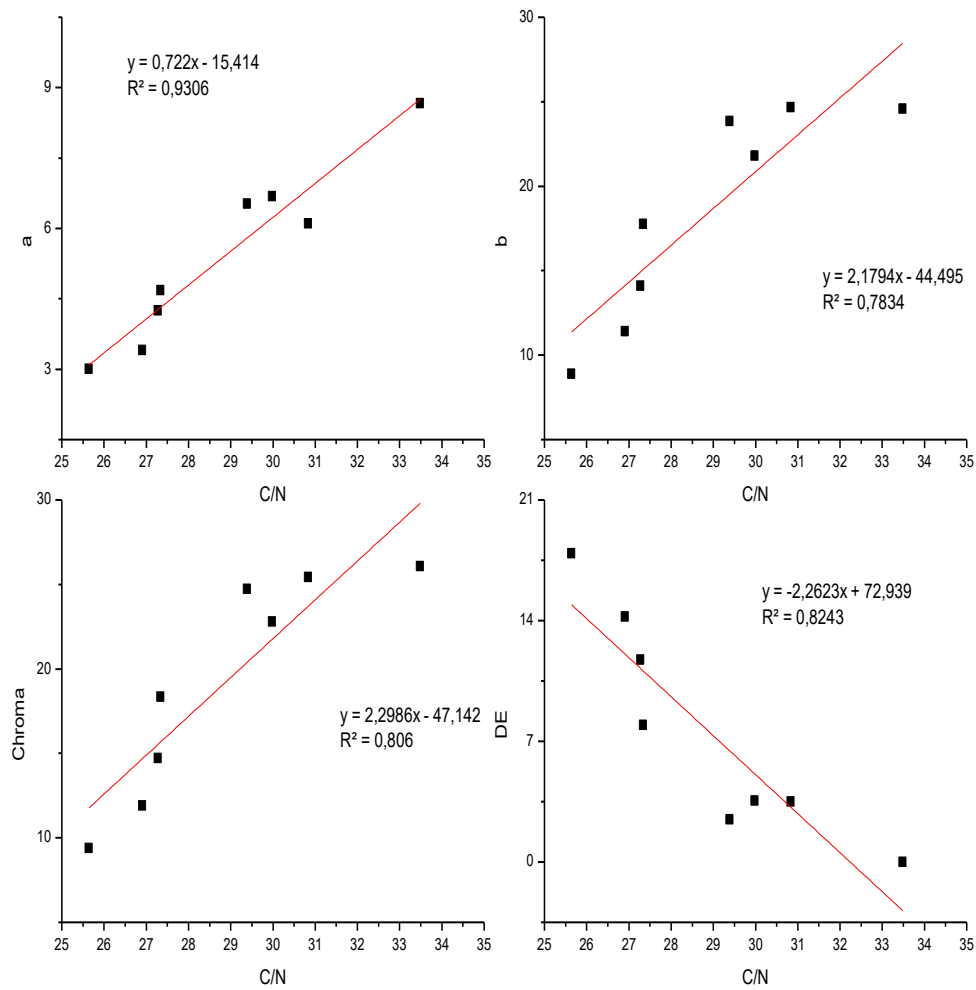
Σχήμα Α.3: Διαγράμματα γραμμικής συσχέτισης του pH με τις χρωματικές μεταβλητές *b*, *C*, ΔE .

A.1.4. Ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC)



Σχήμα A.4: Διαγράμματα γραμμικής συσχέτισης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας με τις χρωματικές μεταβλητές *a*, *b*, *C*, ΔE .

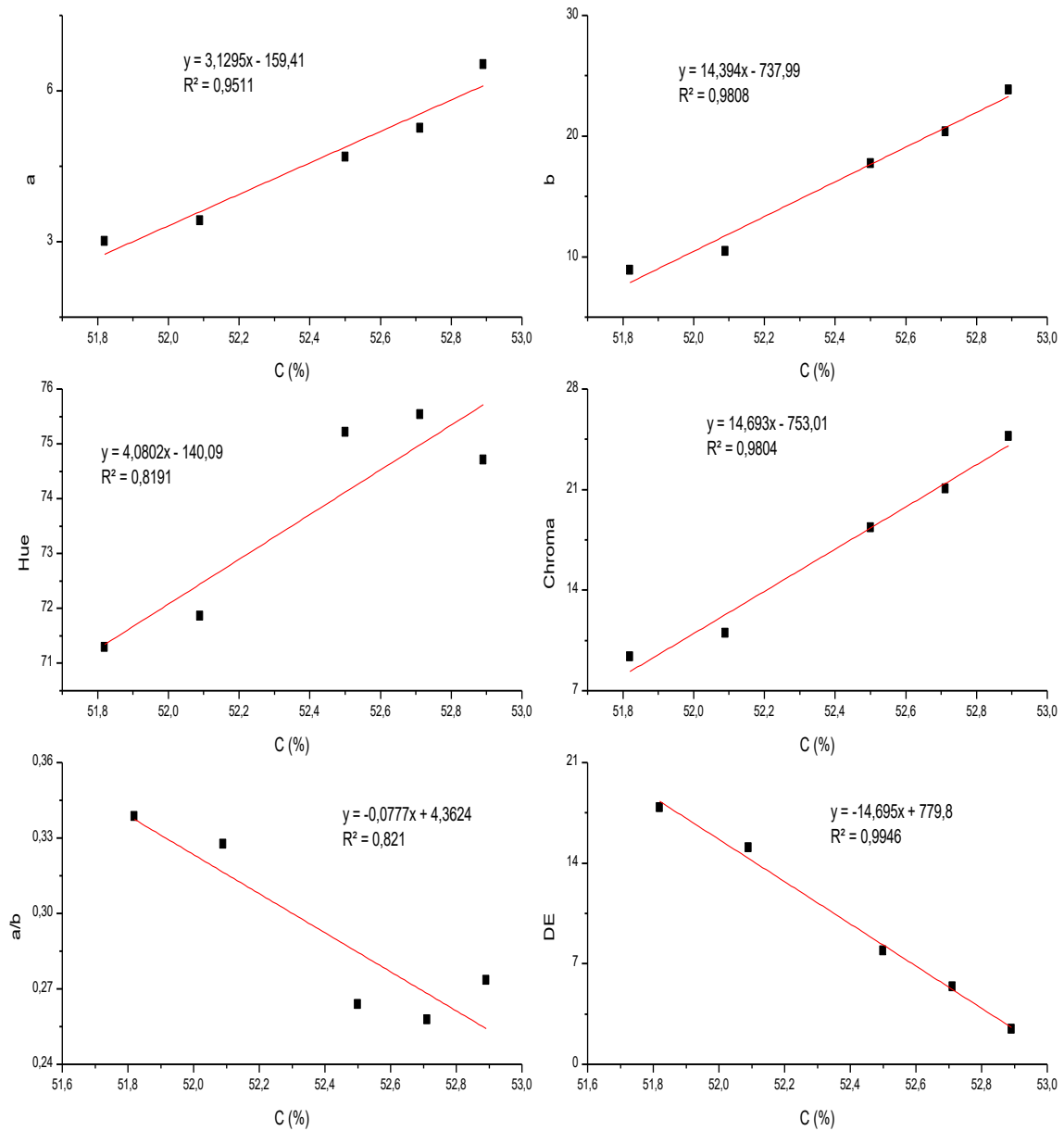
A.1.5. Λόγος άνθρακα προς άζωτο (C/N)



Σχήμα A.5: Διαγράμματα γραμμικής συσχέτισης του λόγου C/N με τις χρωματικές μεταβλητές a, b, C, ΔE.

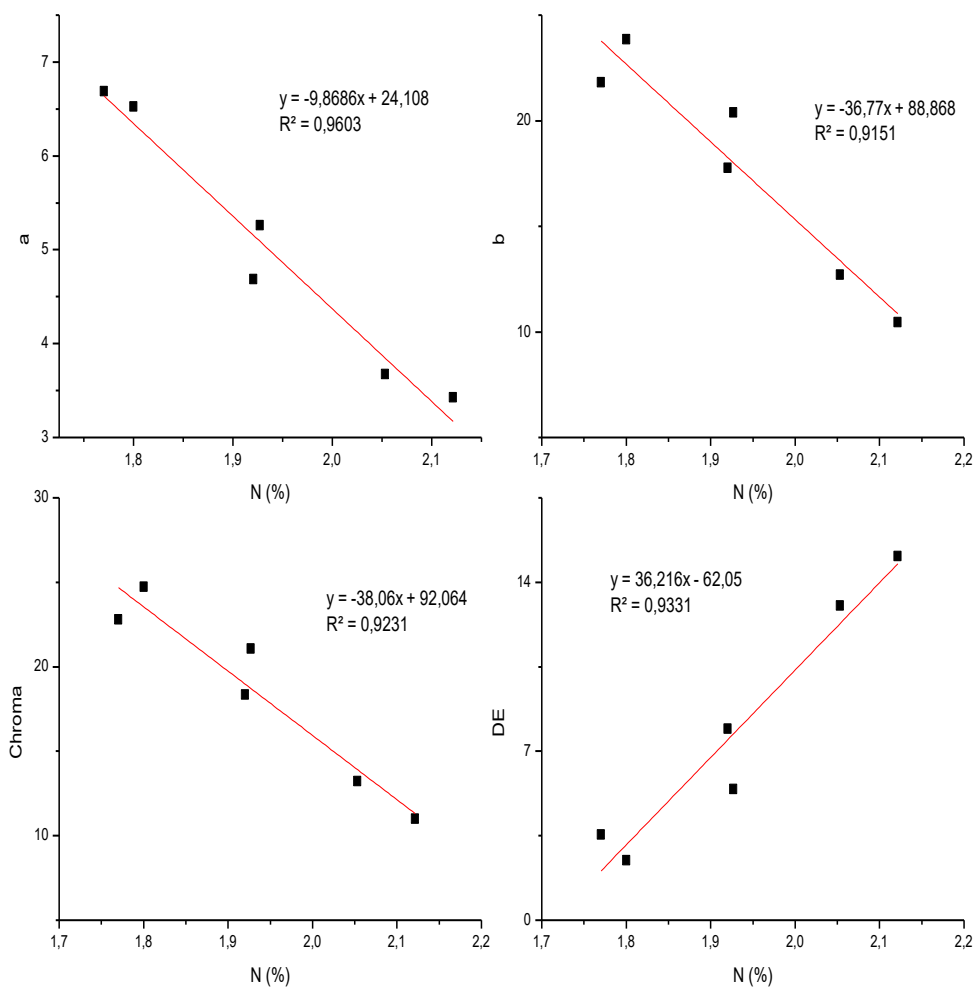
Α.2. Γραμμική συσχέτιση χρονικού διαστήματος 15 έως 80 ημερών

Α.2.1. Περιεκτικότητα σε άνθρακα (C %)



Σχήμα Α.6: Διαγράμματα γραμμικής συσχέτισης του C% με τις χρωματικές μεταβλητές $a, b, h, C, a/b, \Delta E$.

A.2.2. Περιεκτικότητα σε άζωτο (N %)

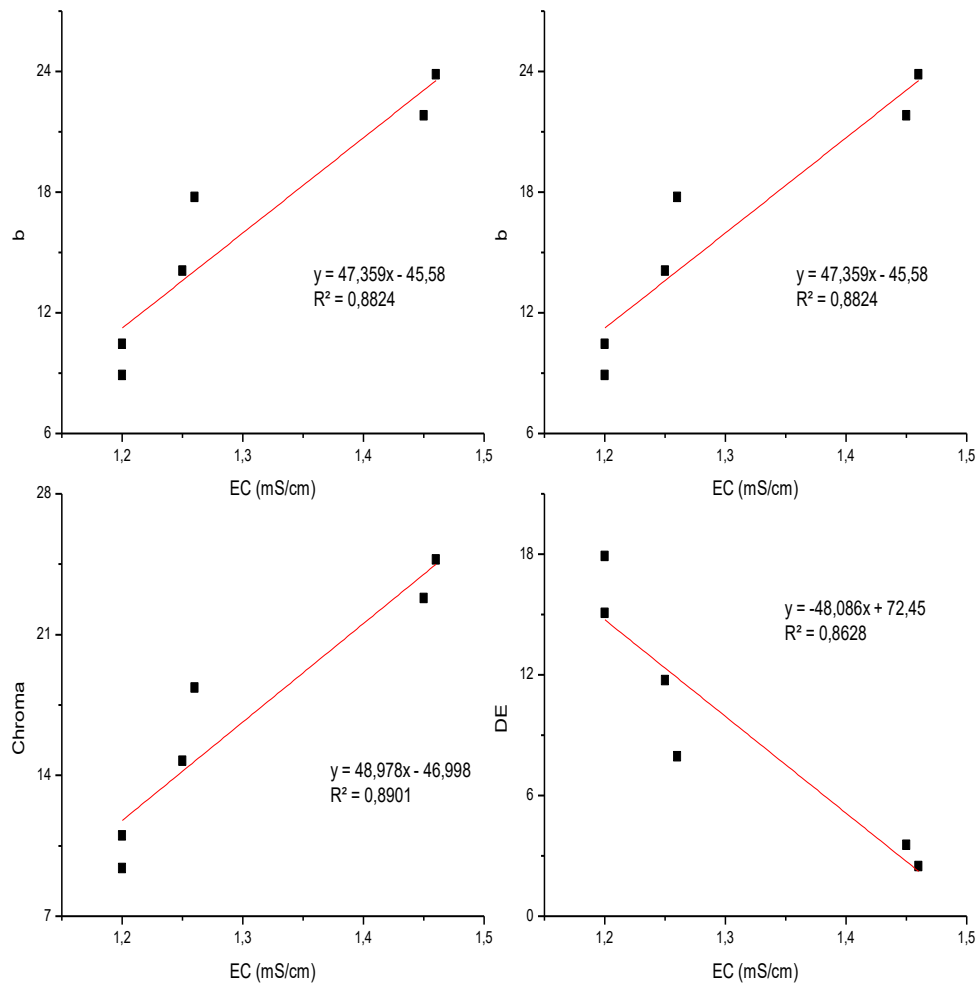


Σχήμα A.7: Διαγράμματα γραμμικής συσχέτισης του N% με τις χρωματικές μεταβλητές a, b, C, ΔE.

A.2.3. pH

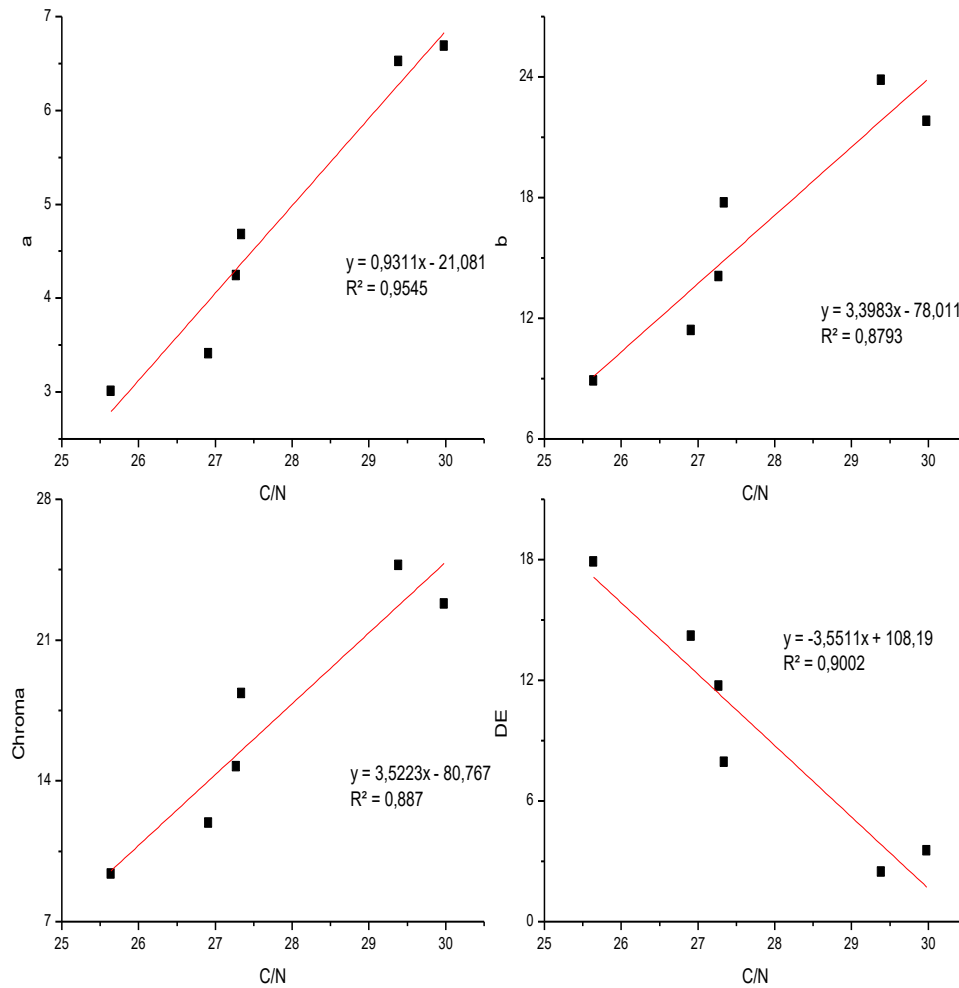
Παρόμοια αποτελέσματα με τα διαγράμματα και τις γραμμικές εξισώσεις της περιόδου 0 έως 80 ημερών (βλ. A.1.3).

A.2.4. Ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC)



Σχήμα A.8: Διαγράμματα γραμμικής συσχέτισης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας με τις χρωματικές μεταβλητές a, b, C, DE .

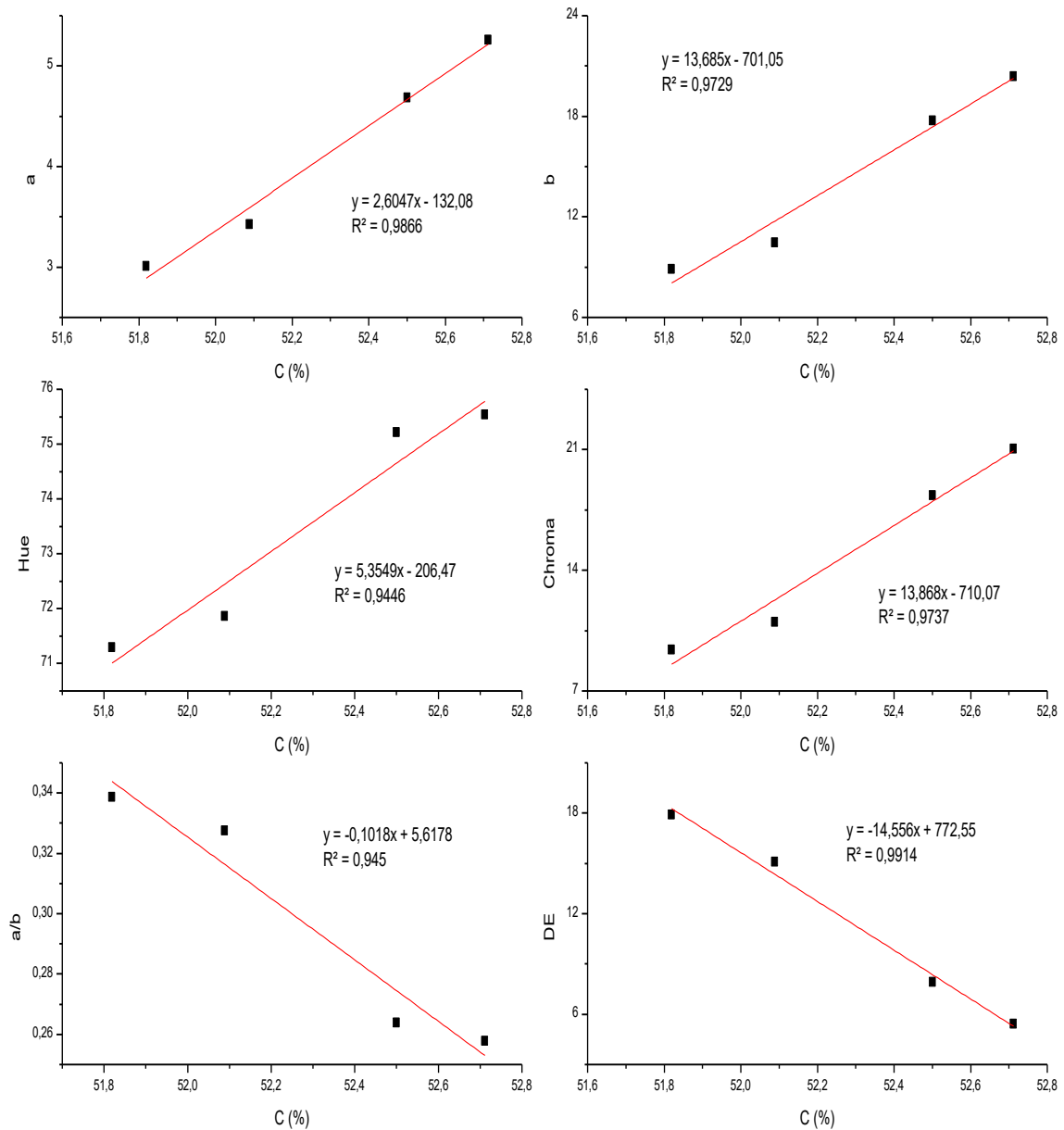
A.2.5. Λόγος άνθρακα προς άζωτο (C/N)



Σχήμα A.9: Διαγράμματα γραμμικής συσχέτισης του λόγου C/N με τις χρωματικές μεταβλητές a, b, C, ΔE.

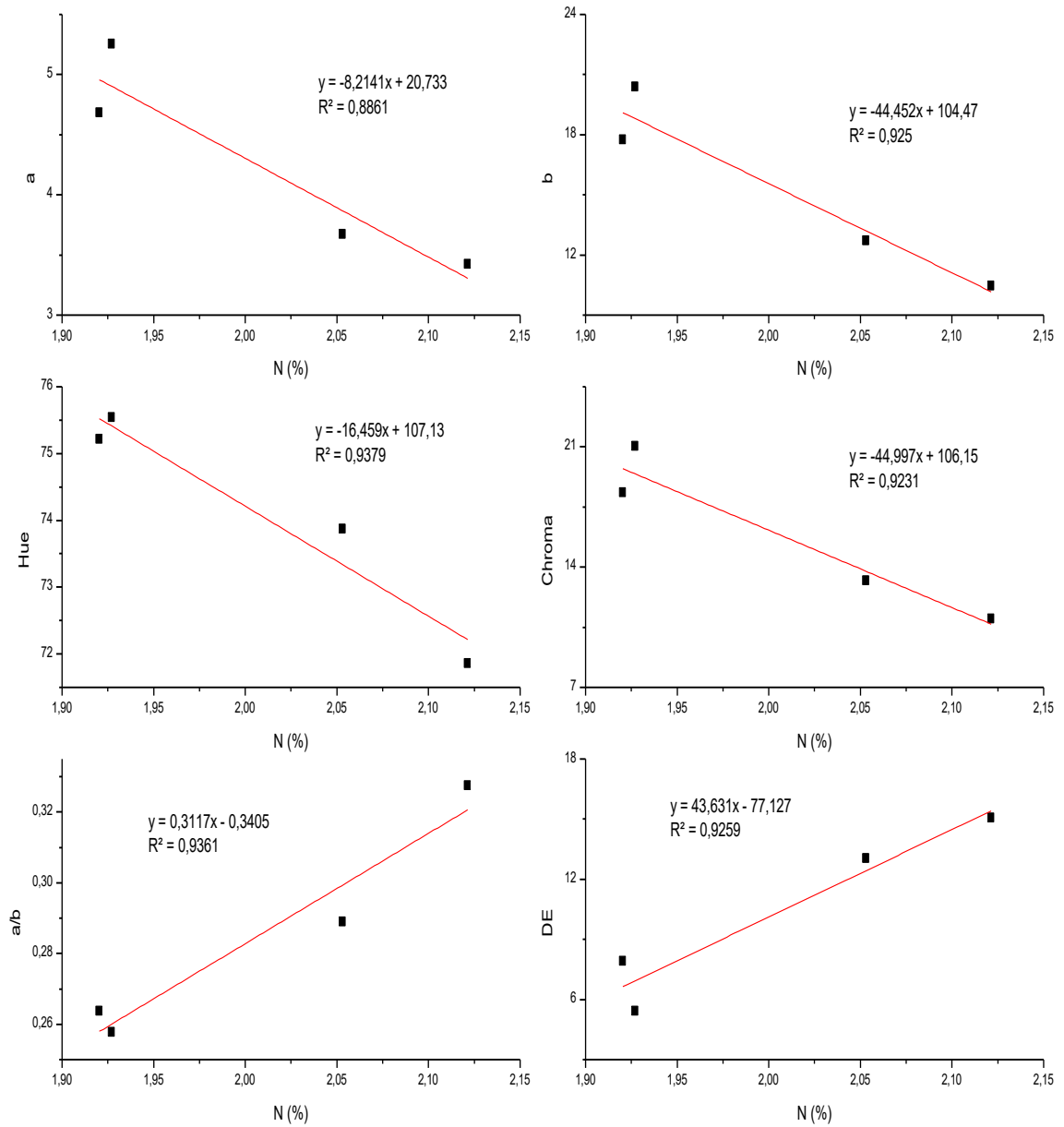
Α.3. Γραμμική συσχέτιση χρονικού διαστήματος 30 έως 80 ημερών

Α.3.1. Περιεκτικότητα σε άνθρακα (C %)



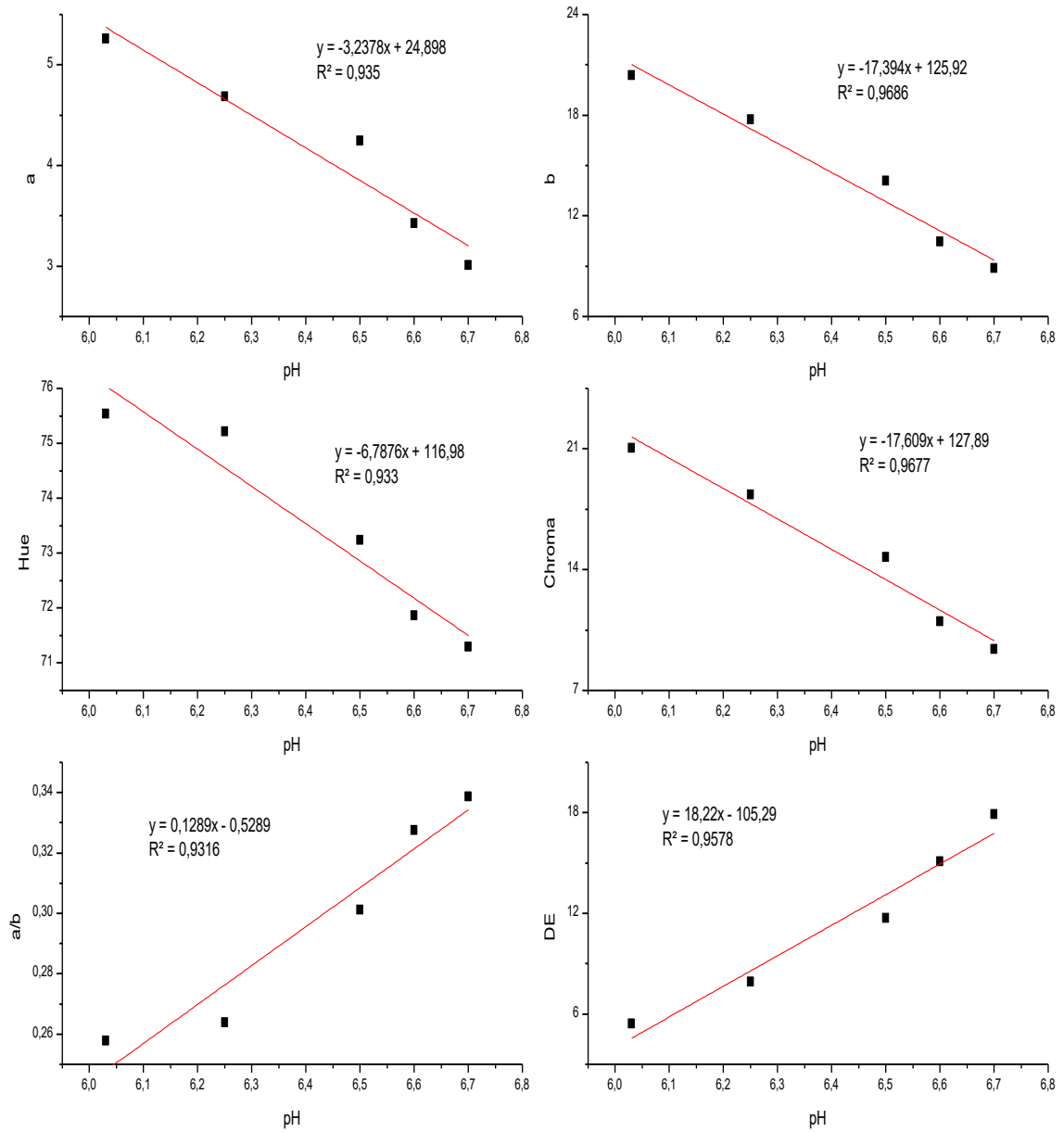
Σχήμα Α.10: Διαγράμματα γραμμικής συσχέτισης του C% με τις χρωματικές μεταβλητές a, b, h, C, a/b, ΔE.

Α.3.2. Περιεκτικότητα σε άζωτο (N %)



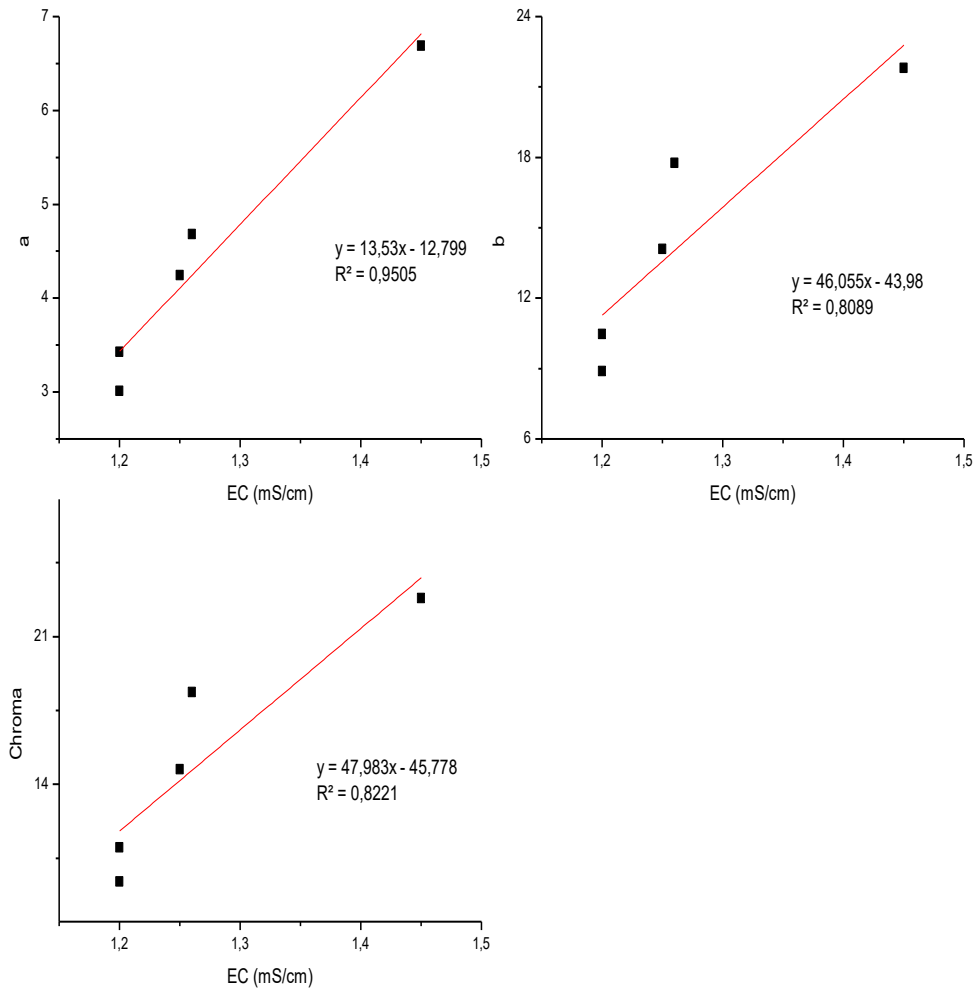
Σχήμα Α.11: Διαγράμματα γραμμικής συσχέτισης του Ν% με τις χρωματικές μεταβλητές a,b, h, C, a/b, ΔΕ.

A.3.3. pH



Σχήμα Α.12: Διαγράμματα γραμμικής συσχέτισης του pH με τις χρωματικές μεταβλητές a,b, h, C,a/b, ΔE.

A.3.4. Ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC)



Σχήμα A.13: Διαγράμματα γραμμικής συσχέτισης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας με τις χρωματικές μεταβλητές a, b, C.