



## ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

### ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

#### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

---

*“Επίδραση κομπόστ και βιοεξανθρακώματος στην  
καλλιέργεια μαρουλιού (*Lactuca sativa* L.)”*

*Effect of compost and biochar on the growth of lettuce  
(*Lactuca Sativa* L.)*

---



#### Κατιέ Νάνσυ

##### **Τριμελής Επιτροπή:**

Επικ. Καθ. Αλέξανδρος Στεφανάκης (Επιβλέπων)

Καθ. Ευάγγελος Διαμαντόπουλος

Επικ. Καθ. Απόστολος Γιαννής

XANIA, 2022

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους με βοήθησαν και συνέβαλλαν για την διεκπεραίωση της διπλωματικής μου εργασίας.

Αρχικά ευχαριστώ τον επιβλέπων καθηγητή μου κ. Αλέξανδρο Στεφανάκη για την ανάθεση της συγκεκριμένης ενδιαφέρουσας έρευνας καθώς και όλη την υλικοτεχνική και οικονομική στήριξη που μου παρείχε καθ όλη την διάρκεια του πειραματός μου.

Ένα τεράστιο ευχαριστώ οφείλω στην κα Ελισάβετ Κουκουράκη για όλη την στήριξη και καθοδήγηση που μου πρόσφερε τόσο στο ψυχολογικό όσο και στο τεχνικό κομμάτι της ερευνάς μου.

Επίσης ευχαριστώ τον διδακτορικό μας φοιτητή του εργαστηρίου Παναγιώτη Ρεγκούζα ο οποίος συνέβαλλε με κάθε δυνατή προσπάθεια για το στήσιμο του πειράματος παρά τις δυσχαιρίες που αντιμετωπίζαμε κάθε φορά. Ευχαριστώ τον κ. Γιάννη Μουκαζή για την παροχή εξοπλισμού και την βοήθειά που μου παρείχε για να πραγματοποιηθούν αρκετές αναλύσεις του πειραματός μου μέσα από το δικό του εργαστήριο.

Ένα ακόμη ευχαριστώ οφείλω στο συνεργάτη και συνοδοιπόρο μου Κώστα Μποντιώτη για την στήριξη και την βοήθεια που προσέφερε ο ένας στον άλλον σε αυτό το μεγάλο ταξίδι έρευνας που πραγματοποιήσαμε μαζί.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Απόστολο Γιαννή που μας πρόσφερε την ευκαιρία να ξεκινήσει αυτό το κομμάτι έρευνας από το δικό του εργαστήριο και τον κ. Ευάγγελο Διαμαντόπουλο για την επίσης υλικοτεχνική βοήθεια που μας πρόσφερε μέσα από το εργαστήριό του.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε κομπόστ το οποίο συλλέχθηκε από την ΔΕΔΙΣΑ Χανίων, καθώς και βιοεξανθράκωμα που παράχθηκε από κόμπποστ μέσω της διεργασίας της πυρόλυσης στους 300°C για 4h. Συγκεκριμένα, εξετάστηκε η επίδραση στην καλλιέργεια μαρουλιού *Lactuca Sativa* με την εφαρμογή των δύο εδαφοβελτιωτικών σε καλλιεργήσιμο χώμα σε αναλογίες 1%, 2,5% και 5%. Μελετήθηκαν 10 μεταχειρίσεις όπου η καθεμία είχε 4 επαναλήψεις. Συνολικά εγκαταστάθηκαν 40 πλαστικά δοχεία ίδιου μεγέθους και έγινε η φύτευση των μαρουλιών. Οι μεταχειρίσεις ήταν ο μάρτυρας (soil), δοχείο με κόμπποστ σε αναλογίες 1%, 2,5% και 5 %, δοχείο με βιοεξανθράκωμα από κόμπποστ σε αναλογίες 1%, 2,5% και 5% και συνδυασμός βιοεξανθρακώματος και κόμπποστ σε αναλογίες 1%, 2,5% και 5%. Η καλλιέργεια διήρκεσε 40 μέρες. Πότισμα με πόσιμο νερό βρύσης λάμβανε χώρα 2 φορές την μέρα (πρωί και απόγευμα) εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών που επικρατούσαν. Καθ' όλη τη διάρκεια της καλλιέργειας πραγματοποιήθηκαν 3 μετρήσεις των μεταβολών ύψους των κορμών και του συνολικού αριθμού φύλλων. Μετά τη συγκομιδή πραγματοποιήθηκε ο διαχωρισμός κορμού και ρίζας σε όλα τα φυτά για τη διεξαγωγή αναλύσεων. Αρχικά έγινε ο χαρακτηρισμός στο χώμα και στη συνέχεια στα δυο εδαφοβελτιωτικά καθώς και σε όλα τα εδαφικά δείγματα των μεταχειρίσεων ως προς το pH, την αγωγιμότητα, κατιοντοανταλλακτική ικανότητα, τις συγκεντρώσεις διαθέσιμου φωσφόρου, αμμωνιακών και νιτρικών, βαρέων μετάλλων κ.α. Στους φυτικούς ιστούς πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για τις συγκεντρώσεις ολικού φωσφόρου και αζώτου και έγινε σύγκριση με τα ξηρά βάρη τους. Τέλος έγινε ο προσδιορισμός μετάλλων στα αρχικά και τελικά εδαφικά δείγματα καθώς και στους φυτικούς ιστούς. Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρατηρήθηκε ότι οι μεταχειρίσεις με αυτοτελή προσθήκη κόμπποστ και ο μάρτυρας απέδωσαν καλύτερα στην καλλιέργεια για την ανάπτυξη των φυτών, το οποίο ίσως οφείλεται στο υπάρχων πλούσιο οργανικό έδαφος και στην αρχική βιομάζα κόμπποστ η οποία δεν χρήζει περαιτέρω βελτίωσης.

## ABSTRACT

For the present thesis, biochar was used compost, which was then collected from DESIDA S.A in Chania, as well as biochar produced through the process of pyrolysis at 300°C for 4h. Specifically, the effect on the cultivation of *Lactuca Sativa* lettuce was examined by applying the two soil conditioners in arable soil in proportions of 1%, 2,5% and 5% respectively. 10 treatments were studied where each had 4 repetitions. A total of 40 plastic containers of the same size were installed and the lettuces were planted. The treatments were divided into 4 categories; the control (soil), compost in proportions of 1%, 2.5% and 5%, compost biochar in 1%, 2.5% and 5% and a combination of biochar and compost in dose of 1%, 2, 5% and 5%. The cultivation lasted 40 days. Was watered by potable tap water twice a day (morning and afternoon) due to the high temperatures. Throughout the cultivation, 3 measurements of changes in trunk height and total number of leaves were made. After harvesting, the rootstock was separated from all the plants to begin the analyses. First characterization was done of the soil and then of the two soil conditioners followed by analysis of all the soil samples of the treatments in terms of pH, electrical conductivity (EC), cation exchange capacity, concentrations of available phosphorus, ammonia and nitrates, heavy metals etc. In plants tissues, were made measurements analysis about the total phosphorus and nitrogen concentrations and were compared their dry weights. Finally, metals were identified in the initial and final soil as well as in plant tissues. The results showed that plants grown in the compost and control treatments performed better in terms of growth, which may be due to the existing rich organic soil and the original compost biomass which does not need improvement.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>7</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ .....</b>	<b>8</b>
<b>2.1 Οργανικό κλάσμα στερεών αποβλήτων (Α.Σ.Α) .....</b>	<b>8</b>
<b>2.2 Κομποστοποίηση (composting) .....</b>	<b>8</b>
2.2.1 Διαδικασία Παραγωγής κόμποστ .....	11
<b>2.3 Πυρόλυση- Παραγωγή βιοεξανθρακώματος .....</b>	<b>11</b>
2.3.1 Γενικά στοιχεία Πυρόλυσης .....	11
2.3.2 Είδη Πυρόλυσης .....	12
2.3.3 Προϊόντα Πυρόλυσης .....	14
2.3.4 Βιοεξανθράκωμα (Biochar) .....	15
2.3.4.1 Παραγωγή βιοεξανθρακώματος .....	16
2.3.4.2 Παράμετροι για την απόδοση και τα χαρακτηριστικά του βιοεξανθρακώματος .....	16
2.3.5 Ιδιότητες βιοεξανθρακώματος .....	20
2.3.5.1 Φυσικές Ιδιότητες του βιοεξανθρακώματος .....	20
2.3.5.2 Χημικές Ιδιότητες του βιοεξανθρακώματα .....	20
2.3.6 Επίδραση του βιοεξανθρακώματος στο έδαφος .....	20
<b>2.4 Καλλιέργεια μαρουλιού (Lactuca sativa) .....</b>	<b>22</b>
2.4.1 Χαρακτηριστικά μαρουλιού .....	22
2.4.2 Συνθήκες καλλιέργειας .....	23
2.4.3 Πιθανές ασθένειες και εχθροί .....	24
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ .....</b>	<b>25</b>
<b>3.1 Δείγματα-Υλικά .....</b>	<b>25</b>
3.2. Παραγωγή Κόμποστ ΔΕΔΙΣΑ .....	25
<b>3.3 Πυρόλυση- Παραγωγή Βιοεξανθρακώματος .....</b>	<b>26</b>
3.3.1 Απόδοση Πυρόλυσης σε βιοεξανθράκωμα .....	27
3.3.2 Προσδιορισμός τέφρας .....	27
<b>3.4 Εκτέλεση πειράματος .....</b>	<b>28</b>
3.4.1 Εγκατάσταση πειράματος .....	28
3.4.2 Λήξη καλλιέργειας - Προετοιμασία μετρήσεων .....	31
<b>3.5 Αναλυτικές Μέθοδοι .....</b>	<b>32</b>
3.5.1 Μέθοδοι χαρακτηρισμού εδάφους, κόμποστ, βιοεξανθρακώματος .....	32
3.5.1.2 Προσδιορισμός pH, Αγωγιμότητας (EC) .....	32
3.5.1.3 Προσδιορισμός φαινόμενης πυκνότητας (bulk density) .....	33

3.5.1.4 Προσδιορισμός pH – PZC (point of zero charge).....	33
3.5.1.5 Προσδιορισμός κατιοντοανταλλακτικής ικανότητας (CEC – cationexchange capacity) .....	33
3.5.1.6 Προσδιορισμός μετάλλων .....	34
3.5.1.7 Προσδιορισμός Ολικού Οργανικού Άνθρακα (TOC).....	34
3.5.1.8 Στοιχειακή Ανάλυση .....	35
3.5.1.9 Προσδιορισμός συγκεντρώσεων Ολικού Φωσφόρου.....	35
3.5.1.10 Προσδιορισμός συγκεντρώσεων Διαθέσιμου Φωσφόρου (P- Olsen). 36	
3.5.1.11 Προσδιορισμός διαθέσιμων συγκεντρώσεων N (NO <sub>3</sub> -N και NH <sub>4</sub> -N) ...	37
<b>3.5.2 Ανάλυση στα εδαφικά δείγματα .....</b>	<b>37</b>
<b>3.5.3 Ανάλυση στους Φυτικούς ιστούς .....</b>	<b>37</b>
3.5.3.1 Προσδιορισμός συγκεντρώσεων Ολικού Φωσφόρου.....	38
3.5.3.2 Προσδιορισμός μετάλλων στους φυτικούς ιστούς.....	38
3.5.3.3 Προσδιορισμός Ολικού Αζώτου .....	39
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>39</b>
<b>4.1 Χαρακτηρισμός αρχικών δειγμάτων. ....</b>	<b>39</b>
4.1.2 Προσδιορισμός μετάλλων και μεταλλοειδών στα αρχικά δείγματα. ....	43
<b>4.2 Αποτελέσματα Φυτικών Ιστών .....</b>	<b>45</b>
4.2.1 Ανάπτυξη Φυτικών Ιστών .....	46
4.2.2 Αποτελέσματα Ολικού Φωσφόρου. ....	52
4.2.3 Αποτελέσματα Ολικού Αζώτου.....	53
4.2.4 Προσδιορισμός Μετάλλων και Μεταλλοειδών. ....	54
<b>4.3 Αποτελέσματα Εδαφικών Δειγμάτων. ....</b>	<b>57</b>
4.3.1 pH – Αγωγιμότητα (EC).....	58
4.3.2 Αποτελέσματα Διαθέσιμου Φωσφόρου P-Olsen .....	59
4.3.3 Αποτελέσματα Αμμωνιακού και Νιτρικού Αζώτου (NH <sub>4</sub> -N, O <sub>3</sub> -N) .....	60
4.3.4 Προσδιορισμός Μετάλλων και Μεταλλοειδών. ....	61
4.3.5 Ισοζύγια .....	63
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΠΕΡΑΣΜΑΤΑ &amp; ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....</b>	<b>65</b>
<b>5.1 Συμπεράσματα .....</b>	<b>65</b>
<b>5.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα .....</b>	<b>67</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>67</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ .....</b>	<b>74</b>
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Καμπύλες Βαθμονόμησης .....	74
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Μετρήσεις σε Soil, Compost, Biochar.....	77

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια γίνονται αρκετές προσπάθειες για την προστασία του περιβάλλοντος λόγω των δυσμενών ενεργειών που προκαλούνται από ανθρώπινες δραστηριότητες. Ένα τεράστιο πρόβλημα που δημιουργείται λόγω της αστικοποίησης είναι ο τεράστιος όγκος αποβλήτων.

Η κομποστοποίηση είναι μια καινοτόμα διαδικασία φιλική και οικονομική προς το περιβάλλον, η οποία μπορεί να επιλύσει το προαναφερόμενο πρόβλημα. Μέσω της αποδόμησης που υφίσταται η οργανική ύλη των στερεών αποβλήτων δημιουργείται το κόμποστ, ένα σταθερό προϊόν πλούσιο σε θρεπτικές ουσίες και κατάλληλο για γεωργική χρήση.

Σ' άλλες έρευνες που έχουν διεξαχθεί διαχρονικά ένα άλλο εδαφοβελτιωτικό που προτάθηκε για γεωργικές χρήσεις είναι το βιοεξανθράκωμα (γνωστό και ως Biochar). Μέσω της διεργασίας της πυρόλυσης και παρουσία κατάλληλων συνθηκών (απουσία οξυγόνου, θερμοκρασία, χρόνος παραμονής) παράγεται το βιοεξανθράκωμα, ένα σταθερό υλικό πλούσιο σε άνθρακα όπου η χρήση του προορίζεται για την βελτίωση της γονιμότητας του εδάφους και την απομάκρυνση ρυπογόνων ουσιών. Η περιβαλλοντική αξία και συνεισφορά του βιοεξανθρακώματος είναι τεράστια αφού μέσα από μελέτες αποδείχθηκε ότι συμβάλλει θετικά στην καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής δεσμεύοντας διοξείδιο του άνθρακα CO<sub>2</sub>. Οι ικανότητες αυτού του προϊόντος το καθιστούν υπεύθυνο για την ανάπτυξη των καλλιεργειών και τη μείωση χρήσης των υπολοίπων λιπασμάτων.

Ωστόσο παρουσιάστηκαν και αρκετές διακυμάνσεις σε πειράματα που έχουν διεξαχθεί για το βιοεξανθράκωμα ως προς την σταθερότητα του λόγω των αρωματικών δακτυλίων οι οποίοι μπορεί να απελευθερωθούν κατά την αποσύνθεσή του, γεγονός που μπορεί να οφείλεται στον τύπο της αρχικής του βιομάζας και στις συνθήκες πυρόλυσης.

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε το βιοεξανθράκωμα ως εδαφοβελτιωτικό σε καλλιέργειες μαρουλιού προερχόμενο από ένα ήδη αρκετά σταθερό προϊόν κόμποστ που συλλέχθηκε από την ΔΕΔΙΣΑ Χανίων. Η παραγωγή του βιοεξανθρακώματος προήλθε από τη διεργασία της πυρόλυσης απουσία οξυγόνου στους 300 C για 4h. Αυτά τα δύο εδαφοβελτιωτικά αναμείχθηκαν με χώμα σε αναλογίες 1%, 2,5% και 5% προκειμένου να παρατηρηθεί κατά πόσο επηρέασαν την καλλιέργεια.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### 2.1 Οργανικό κλάσμα στερεών αποβλήτων (Α.Σ.Α)

Τα Αστικά Στερεά Απόβλητα (ΑΣΑ) ή αλλιώς απορρίμματα προέρχονται από οικιακές, εμπορικές δραστηριότητες, δημόσιες υπηρεσίες από μονάδες επεξεργασίας αστικών αποβλήτων δίχως να θεωρούνται τοξικά τα οποία δεν έχουν πλέον κάποια χρησιμότητα για τον κάτοχό τους και ως εκ τούτου τα απορρίπτει. Στη συνέχεια η διαχείριση των ΑΣΑ περιλαμβάνει τη συλλογή, μεταφορά, επεξεργασία και τη διάθεσή τους με το βέλτιστο δυνατό τρόπο για τη δημόσια υγιεινή και αποφυγή οικονομικών και περιβαλλοντικών συνεπειών. Τα ΑΣΑ αποτελούνται από οργανικά (απορρίμματα τροφών, χαρτικά, υφάσματα, απορρίμματα κήπου) και ανόργανα στερεά απόβλητα (γυαλί, αλουμίνιο, σιδηρούχα μέταλλα).

Με τον όρο βιομάζα χαρακτηρίζουμε το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα προϊόντων, αποβλήτων και κατάλοιπων βιολογικής προέλευσης καθώς και των βιομηχανικών αποβλήτων και οικιακών απορριμμάτων. Η βιομάζα μπορεί να θεωρηθεί ότι περιλαμβάνει κάθε οργανική ύλη η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πηγή ενέργειας και ανήκει στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Σε αυτόν τον ορισμό περιλαμβάνεται το οργανικό κλάσμα των ΑΣΑ που προκύπτει από την κατανάλωση τροφικών προϊόντων και την παραγωγή βιοαποδομήσιμων αποβλήτων κήπου και πάρκων. Η χρήση του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ αφού έχει υποστεί επεξεργασία μπορεί να οδηγήσει σε προϊόν κατάλληλο για χρήση σε γεωργικές εκμεταλλεύσεις, επαναχρησιμοποίησή του σε διάφορες καλλιέργειες σαν οργανικό λίπασμα και για άλλες περιβαλλοντικές χρήσεις σύμφωνα με τις προϋποθέσεις της Ευρωπαϊκής Νομοθεσίας (Μαλαμάκη, 2009).

### 2.2 Κομποστοποίηση (composting)

Η κομποστοποίηση είναι η βιολογική, αερόβια, θερμοφιλή και ελεγχόμενη διεργασία μερικής αποσύνθεσης των οργανικών αποβλήτων η οποία μετατρέπει τα οργανικά υλικά σε μια πλούσια θρεπτική ουσία για το έδαφος και τα φυτά. Κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης, τα μικρόβια (βακτήρια, μύκητες και άλλα μικρόβια) παράγουν διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ), θερμότητα και νερό καθώς αποικοδομούν τα οργανικά υλικά του σωρού. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η πλούσια σκούρα θρεπτική ουσία ονομαζόμενη κομπόστ (compost) ιδανικό λίπασμα για τον κήπο και την ανάπτυξη των φυτών. [ΔΕΔΙΣΑ Χανίων, 2017]

#### Απαραίτητα συστατικά

- Οξυγόνο
- Νερό
- Κατάλληλη Θερμότητα
- Καλή αναλογία άνθρακα - αζώτου

## **Προϋποθέσεις**

Για την επίτευξη της κομποστοποίησης απαιτείται:

- Σωστή αναλογία οργανικού μίγματος υλικών
- Αερισμός
- Ελεγχόμενη σχετική υγρασία
- Μέγεθος υλικών (μικρό)

## **Περιβαλλοντικές Συνθήκες**

Για να λειτουργήσει η διαδικασία της κομποστοποίησης θα πρέπει να υπάρχουν οι κατάλληλες συνθήκες. Ο αερισμός και η υγρασία είναι δυο καταστάσεις που συμβάλλουν με την αλληλεπίδρασή τους στην ποιότητα του τελικού προϊόντος, του κόμπост.

Λόγω της αερόβιας διαδικασίας, τα απόβλητα χρειάζεται να έχουν συγκεκριμένη δομή για να είναι αποτελεσματική η παροχή του αέρα και να εισχωρεί στα κενά ανάμεσα στα σωματίδια της μάζας που κομποστοποιείται.

Η αύξηση της υγρασίας γεμίζει τους πόρους με νερό δυσκολεύοντας την κυκλοφορία του αέρα στα διάκενα αρχίζοντας να δημιουργούνται αναερόβιες συνθήκες τμηματικά του σωρού.

Ένας ακόμα σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την διαδικασία της κομποστοποίησης είναι η θερμοκρασία η οποία εξαρτάται από την θερμότητα που παράγεται κατά την δράση των μικροοργανισμών και αντισταθμίζεται με τον κατάλληλο αερισμό, την επιφανειακή ψύξη του σωρού και την εξάτμιση της υγρασίας που εμπεριέχεται.[Χαζιράκης, 2007].

Η θερμοκρασία συμβάλλει θετικά στη δραστηριότητα των ωφέλιμων μικροοργανισμών και στην καταστροφή των παθογόνων μικροοργανισμών όταν βρίσκεται σε επιτρεπτά όρια (40-65°C).

## **Σκοπός - Πλεονεκτήματα Κομποστοποίησης**

Σκοπός της διαδικασίας της κομποστοποίησης είναι η δημιουργία ενός τελικού προϊόντος ιδανικό να ικανοποιεί τις απαιτήσεις για διάφορες χρήσεις ως εδαφοβελτιωτικό, χωρίς να επιβαρύνει το περιβάλλον. Η κομποστοποίηση έχει αρκετά πλεονεκτήματα τα οποία την καθιστούν βέλτιστη επιλογή έναντι άλλων τεχνολογιών για την ολοκληρωμένη διαχείριση αποβλήτων, όπως:

- Μικρό λειτουργικό και επενδυτικό κόστος.
- Μείωση κόστους μεταφοράς λόγω χωροθέτησης σε κοντινή απόσταση από την παραγωγή αποβλήτων.
- Παραγωγή μη τοξικών και επικίνδυνων αερίων.
- Συμβολή στην ανακύκλωση βασικών υλικών.
- Καλύτερη απόδοση στην ενεργειακή κατανάλωση έναντι άλλων τεχνικών.

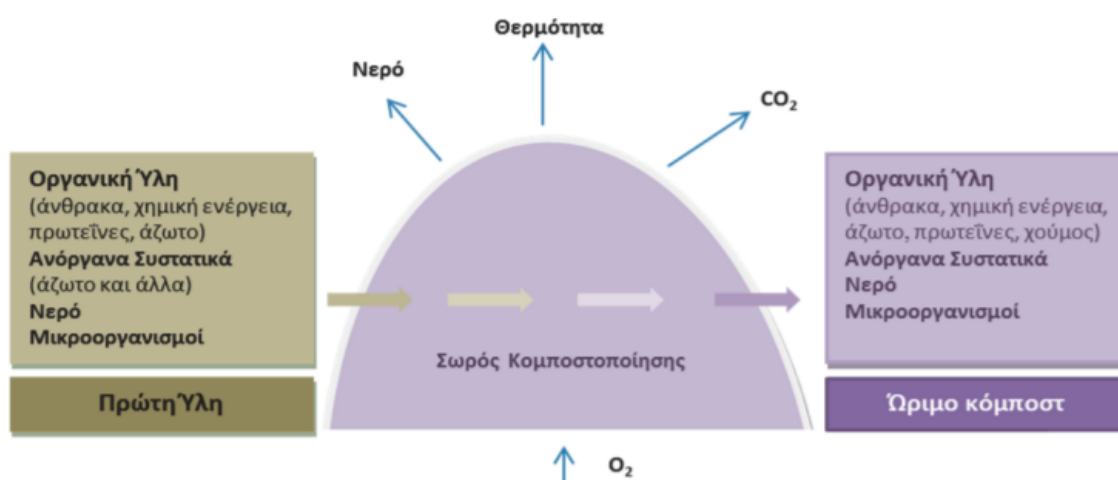
Ένα μειονέκτημα της διαδικασίας αυτής, είναι ότι απαιτείται μεγάλος χώρος για τις εγκαταστάσεις μιας μονάδας κομποστοποίησης. [Ντούρμα, 2018]

### Οφέλη του κόμποστ

Μέσω της κομποστοποίησης μπορεί να επιτευχθεί η μείωση του όγκου των απορριμμάτων τα οποία καταλήγουν στις χωματερές και κατά συνέπεια να συμβάλλει ο καθένας ατομικά στο τομέα ανακύκλωσης. Σύμφωνα με μελέτες που γίνονται κατά περιόδους, ένα μεγάλο ποσοστό της τάξεως του 50% αποτελείται από ζυμώσιμα υλικά, δηλαδή υπολείμματα τροφών και άλλα οργανικά υλικά. Με την βοήθεια της κομποστοποίησης, αυτό το ποσοστό μπορεί να μειωθεί και να βοηθήσει περιβαλλοντικά, οικονομικά και κοινωνικά. Το προϊόν της κομποστοποίησης το κομπόστ έχει αρκετά οφέλη κατά τη χρήση του:

- Βελτιώνει τη φυσικές ιδιότητες του χώματος
- Τροποποιεί τις θερμοκρασίες στο χώμα-ψυχρό το καλοκαίρι, θερμότερο το χειμώνα
- Επιτρέπει καλύτερη απορροφητικότητα ως προς το νερό της βροχής ή της άρδευσης
- Συμβάλλει στη βιολογική δραστηριότητα στο χώμα-Αποδοτικότερη θρεπτική λήψη ιόντων(αργίλιο, σίδηρο)
- Ικανότητα αντίστασης στην αλλαγή του pH στο χώμα.
- Μείωση των ζιζανίων
- Μείωση των αερίων του θερμοκηπίου-Κατάλληλη αντιμετώπιση από την εκπομπή μεθανίου όταν τα οργανικά υλικά υποβληθούν σε αναερόβιες συνθήκες.

Μια ακόμη εφαρμογή του κόμποστ είναι ως υλικό επικαλύψεων σε Χώρους Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (Χ.Υ.Τ.Α)



**Εικόνα 1:** Διαδικασία κομποστοποίησης. [Rynk, et al.,1992]

### 2.2.1 Διαδικασία Παραγωγής κόμποστ

#### Διαχωρισμός βιοαποβλήτων

Τα σύμμεικτα απορρίμματα παραλαμβάνονται καθημερινά από τους πράσινους κάδους μέσω οχημάτων συλλογής-μεταφοράς και αποθηκεύονται στο χώρο υποδοχής σύμμεικτων υλικών της εγκατάστασης. Στη συνέχεια οδηγούνται με μεταφορικές ταινίες και επεξεργάζονται από κόσκινο, μαγνητικό διαχωριστή και συσκευές διαλογής ώστε το οργανικό κλάσμα των Α.Σ.Α να καταλήξει στη δεξαμενή Ταχείας Κομποστοποίησης.

#### Ταχεία Κομποστοποίηση

Το εισερχόμενο οργανικό κλάσμα στη δεξαμενή ταχείας κομποστοποίησης αναμειγνύεται με τεμαχισμένα κλαδιά και αναμειγνύεται περιοδικά 4-6 εβδομάδες. Οι συνθήκες θερμοκρασίας, αερισμού και υγρασίας είναι ελεγχόμενες με σκοπό οι πολύπλοκες βιοχημικές διεργασίες που συμβαίνουν να δημιουργούν ταχύτερα ένα βέλτιστο σε ποιότητα κομπόστ.

#### Ωρίμανση Κομπόστ

Το εξερχόμενο πλέον παραγόμενο κόμποστ από την δεξαμενή ταχείας κομποστοποίησης διαχωρίζεται από τα υλικά που δεν κατάφεραν να κομποστοποιηθούν, περνάει από μηχανισμό διαχωρισμού και αφήνεται για ωρίμανση σε σειράδια. Σε κάποια στάδια της κομποστοποίησης οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στη μάζα του κόμποστ αγγίζουν τους 70°C ώστε να υπάρχει θανάτωση όλων των παθογόνων μικροοργανισμών.

#### Προδιαλεγμένα Βιοαπόβλητα

Μετά την τοποθέτηση των καφέ κάδων σε μεγάλους παραγωγούς (λαϊκές, λέσχες σίτισης, κ.τ.λ) τα βιοαπόβλητα εισέρχονται απευθείας στην εγκατάσταση και ακολουθούν την διαδικασία της κομποστοποίησης. [ΔΕΔΙΣΑ Χανίων, 2017]

### 2.3 Πυρόλυση- Παραγωγή βιοεξανθρακώματος

Η παραγωγή βιοεξανθρακώματος που χρησιμοποιήθηκε στη παρούσα εργασία προήλθε από το κόμποστ της ΔΕΔΙΣΑ Χανίων μέσω της διεργασίας της πυρόλυσης.

#### 2.3.1 Γενικά στοιχεία Πυρόλυσης

Πυρόλυση χαρακτηρίζεται η άμεση θερμική αποσύνθεση της βιομάζας σε υψηλές θερμοκρασίες, απουσίας οξυγόνου και παροχής αζώτου, με αποτέλεσμα την παραγωγή στερεών (εξανθράκωμα), υγρών [ΔΕΔΙΣΑ Χανίων, 2017] (υδατικά ή κλάσματα πίσσας) και αέριων προϊόντων. [Βάμβουκα, 2002] Η θερμοκρασία, η πίεση, ο ρυθμός θέρμανσης και ο χρόνος αντίδρασης, το είδος βιομάζας και οι συνθήκες πυρόλυσης είναι οι παράγοντες που καθορίζουν

τις αποδόσεις των παραγόμενων προϊόντων. [Γραμμέλης, 2003]. Η πυρόλυση είναι μια πιο φιλική προς το περιβάλλον εναλλακτική διεργασία παραγωγής βιοεξανθρακώματος. Θεωρείται λιγότερο χρονοβόρα μέθοδος με το μικρότερο αποτύπωμα άνθρακα σε σχέση με οποιαδήποτε άλλη θερμοχημική μετατροπή. Σε σύγκριση με την καύση, οι εκπομπές NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> και βαρέων μετάλλων είναι αρκετά μειωμένες και ο έλεγχος τους γίνεται πιο εύκολος λόγω της χαμηλής περιεκτικότητας σε οξυγόνο, των χαμηλών θερμοκρασιών και του μειωμένης παροχής αέρα. [Li et al., 1999]

### 2.3.2 Είδη Πυρόλυσης

Ανάλογα με τη θερμοκρασία και το χρόνο παραμονής του στερεού ή του αερίου η πυρόλυση μπορεί να χαρακτηριστεί ως βραδεία (slow pyrolysis), ενδιάμεση (intermediate pyrolysis) και ταχεία πυρόλυση (fast pyrolysis) καθώς πολλές φορές ακαριαία (flash pyrolysis), πυρόλυση κενού (Vacuum Pyrolysis), ενώ με βάση το μέσο μπορεί να χαρακτηριστεί και υδροπυρόλυση (hydropyrolysis). [Βέλλη, 2019].

Η βραδεία και η ενδιάμεση πυρόλυση, χαρακτηρίζονται από μεγάλους χρόνους παραμονής, ευνοούν την παραγωγή του βιοεξανθρακώματος, ενώ η γρήγορη πυρόλυση παράγει περίπου 75% πίσσα [IEA, 2007]. Η αργή πυρόλυση, είναι η διεργασία που παράγει υψηλής απόδοσης βιοεξανθράκωμα και είναι εκείνη που προτιμάται, όταν το επιθυμητό τελικό προϊόν είναι το βιοεξανθράκωμα. [Lv et Wang, 2017]

Pyrolysis types	Retention time	Rate of heating	Final temperature (°C)	Products
Fast	<2 s	Very high	500	Bio-oil
Flash	<1 s	High	<650	Bio-oil, chemicals and gas
Ultra-rapid	<0,5 s	Very high	1000	Chemical and gas
Vacuum	2–30 s	Medium	400	Bio-oil
Hydro-pyrolysis	<10 s	High	<500	Bio-oil
Carbonization	days	Very low	400	Charcoal
Conventional	5–30 min	Low	600	Char, bio-oil and gas

**Εικόνα 2:** Ενδεικτικός πίνακας διεργασιών πυρόλυσης.[www.intechopen.com]

#### ➤ Βραδεία Πυρόλυση (Slow Pyrolysis)

Χαρακτηρίζεται από αυξημένους χρόνους παραμονής και χαμηλό ρυθμό θέρμανσης και χρησιμοποιείται στο τελικό επιθυμητό προϊόν, το βιοεξανθράκωμα. Ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας είναι από 0,1 έως 1°C/s, ο χρόνος παραμονής κυμαίνεται από 60-120min και οι θερμοκρασίες συνήθως 300-600 °C. [Brassard et al., 2016]

### ➤ Ταχεία πυρόλυση (Fast Pyrolysis)

Θερμοχημική τεχνική όπου η βιομάζα σε υψηλή θερμοκρασία και με υψηλό ρυθμό θέρμανσης γίνεται υγρό βιο-έλαιο. Παράγονται 60-75% βιο-έλαιο, 15-25% βιοεξανθράκωμα και 10-20% αέρια. Ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας είναι από 10 έως 200 °C/s, ο χρόνος παραμονής κυμαίνεται από 1-10min και οι θερμοκρασίες 850-1000 °C.[Tripathi et al., 2016].

### ➤ Ενδιάμεση Πυρόλυση (Intermediate Pyrolysis)

Αποτελεί συνδυασμό της ταχείας και της βραδείας πυρόλυσης και στοχεύει στην ισορροπία στα τρία κλάσματα των προϊόντων. Ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας είναι 0,1 έως 10 °C/s, ο χρόνος παραμονής από 300-1000s και οι θερμοκρασίες 500-600 °C.[Tripathi et al., 2016].

### ➤ Ακαριαία Πυρόλυση (Flash Pyrolysis)

Στην ακαριαία πυρόλυση η βιομάζα μετατρέπεται σε προϊόν σε διάστημα μερικών δευτερολέπτων. Ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας μπορεί να είναι έως 1000 °C/s, ο χρόνος παραμονής 0,1- 1s και οι θερμοκρασίες 900-1200 °C. Βάση των παραπάνω συνθηκών η παραγωγή των βιο-ελαίων μπορεί να φτάσει έως και 75% αλλά λόγω του υψηλού λειτουργικού κόστους την καθιστά λιγότερο εφαρμόσιμη για μικρές παραγωγές. [Tripathi et al., 2016]

### ➤ Πυρόλυση Κενού (Vacuum Pyrolysis)

Πυρόλυση κενού χαρακτηρίζεται η θερμική αποικοδόμηση της βιομάζας με απουσία οξυγόνου υπό χαμηλή πίεση. Ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας είναι παρόμοιος με εκείνον της βραδείας πυρόλυσης, ο χρόνος παραμονής κυμαίνεται από 2-30 s και η θερμοκρασία διατηρείται μεταξύ 450°C και 600°C. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι η χαμηλή πίεση που χρησιμοποιείται για την αφαίρεση των ατμών κάνει την οργανική ύλη να αποσυντίθεται σε χαμηλές θερμοκρασίες, δεν πραγματοποιούνται δευτερογενείς αντιδράσεις και εξασφαλίζεται υψηλή απόδοση σε υγρό προϊόν. [Tripathi et al., 2016]

### ➤ Υδροπυρόλυση (Hydropyrolysis)

Γίνεται μετατροπή της βιομάζας σε βιοέλαιο. Σ αυτήν την τεχνική γίνεται προσθήκη υδρογόνου και έχει σκοπό την μείωση οξυγόνου στο βιοέλαιο και την αύξηση παραγωγής του βιοεξανθρακώματος. Ο ρυθμός της θερμοκρασίας είναι αισθητά μειωμένος 8 °C/min, ο χρόνος παραμονής 1-10 min και οι θερμοκρασίες 300-550°C. [Tripathi et al., 2016].

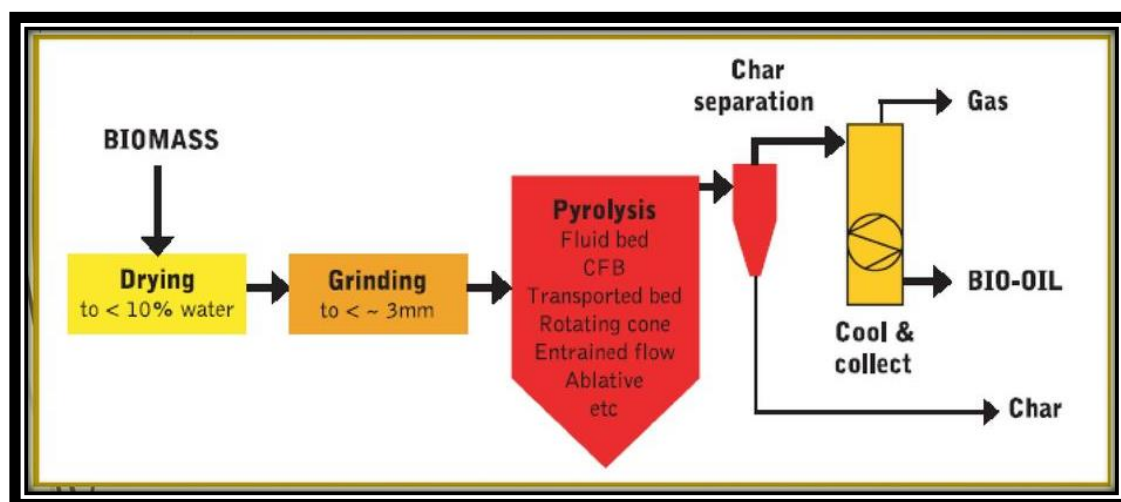
### 2.3.3 Προϊόντα Πυρόλυσης

Τα προϊόντα της πυρόλυσης διακρίνονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

- Τα αέρια προϊόντα - Βιοαέριο
- Τα υγρά προϊόντα - Βιοέλαιο
- Τα στερεά προϊόντα – Βιοεξανθράκωμα

#### ◆ Βιοαέριο σύνθεσης (Syngas)

Είναι ένα αέριο κλάσμα το οποίο προκύπτει από την πυρόλυση και αποτελείται κυρίως από υδρογόνο  $H_2$ , μονοξείδιο  $CO$  διοξείδιο του άνθρακα  $CO_2$  και μεθάνιο  $CH_4$ . Σε θερμοκρασίες μικρότερες των  $500^{\circ}C$  περιέχονται αρωματικές ενώσεις και φαινόλες. Ο σχεδιασμός συστημάτων της πυρόλυσης καθιστά τα αέρια της διεργασίας αυτής χρήσιμα για παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και ως πρόσθετο υλικό στη βιομηχανία των πετροχημικών. [Diebold J.P,1997]



Εικόνα 3: Τυπικό διάγραμμα ροής Πυρόλυσης [Θυώνη Πολίτης,2018]

#### ◆ Βιοέλαιο– (Bio-oil)

Το υγρό προϊόν της πυρόλυσης το βιοέλαιο αποτελείται από ένα βαρύ κλάσμα πτητικών συστατικών, οξυγονωμένες ενώσεις, καρβοξυλικά οξέα. Έχει σκουρόχρωμη καφέ όψη και μυρωδιά πίσσας. Είναι ένα σύνθετο μίγμα νερού και οργανικών ενώσεων όπως φαινόλες, αρωματικές ενώσεις, αλδεΐδες, υδρογονάνθρακες. Μπορεί να περιέχει λεπτά σωματίδια ανόργανης ύλης και η περιεκτικότητα των ελαίων της πυρόλυσης σε ανόργανη ύλη σχετίζεται με την περιεκτικότητά τους σε εξανθράκωμα. [Σπυριδάκης, 2015]. Με την κατάλληλη επεξεργασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως σύνθετο καύσιμο, ως υλικό τροφοδοσίας των διυλιστηρίων πετρελαίου και ως πρώτη ύλη για τη σύνθεση χημικών, κολλών και λιπασμάτων. [Βέλλη, 2019]

#### ◆ Βιοεξανθράκωμα- (Biochar)

Αποτελεί το στερεό προϊόν της πυρόλυσης και αποτελείται από το οργανικό και ανόργανο υλικό. Τα ανόργανα υλικά μετατρέπονται σε τέφρα από την καύση του βιοεξανθρακώματος ενώ το οργανικό υλικό περιλαμβάνει υπόλειμμα πλούσιο σε άνθρακα και θρεπτικά στοιχεία. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμη ύλη για την παραγωγή ενέργειας σε κατάλληλους λέβητες ή κλιβάνους και για την παρασκευή ενεργού άνθρακα με το σωστό μέγεθος πόρων και μεγάλη επιφάνεια. [Βάμβουκα Δ., 2002]. Λόγω της σύστασής του μπορεί να εφαρμοστεί ως εδαφοβελτιωτικό και να εμπλουτίσει το έδαφος με άζωτο και ενεργό άνθρακα.

#### 2.3.4 Βιοεξανθράκωμα (Biochar)

Βιοεξανθράκωμα (biochar) καλείται το στερεό, πλούσιο σε άνθρακα, προϊόν της θερμικής αποσύνθεσης της βιομάζας υπό συνθήκες περιορισμένης ή πλήρους απουσίας οξυγόνου. Είναι ένα υλικό πλούσιο σε άνθρακα η περιεκτικότητα του όμως σε θρεπτικά συστατικά (N, P, K, Ca) είναι μικρή. Η στοιχειακή σύνθεση του διαφέρει ανάλογα με το είδος της βιομάζας το οποίο παράγεται και τα χαρακτηριστικά της διαδικασίας παραγωγής του. [Maddox and Kambo et al., 2015]. Το biochar κατά την εφαρμογή του έχει την ικανότητα να βελτιώσει την κατακράτηση θρεπτικών συστατικών του εδάφους και την συγκράτηση νερού αυξάνοντας το πορώδες του εδάφους ώστε να είναι πιο εύκολη η διείσδυση του σ αυτό. [Μοναχός, 2020].

Η εφαρμογή βιοεξανθρακώματος μπορεί να προκαλέσει μεταβολή του pH στο έδαφος, αύξηση της ικανότητας εναλλαγής κατιόντων (CEC) και να οδηγήσει σε αυξημένη αποδοτικότητα των λιπασμάτων. [Rees and Novak et al., 2014] Η κάθε καλλιέργεια έχει ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών στο οποίο μεγιστοποιείται η ανάπτυξή της η δυνατότητα ρύθμισης του pH είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα. Με την προσθήκη βιοεξανθρακώματος παρατηρείται αύξηση του pH στο έδαφος αφού συνήθως οι τιμές pH του προϊόντος αυτού είναι υψηλότερες. Μας δίνεται όμως η δυνατότητα παραγωγής βιοεξανθρακώματος με χαμηλότερο pH αν αυτό θεωρηθεί ότι θα ευνοήσει την ανάπτυξη της καλλιέργειας μας [Μοναχός, 2020].

Ακόμα μια σημαντική παράμετρος για την ποιότητα των εδαφών είναι η εναλλαγή κατιόντων (CEC). Εδάφη με αυξημένη (CEC) διατηρούν θρεπτικές ουσίες και περισσότερα κατιόντα, επηρεάζεται η ικανότητα διατήρησης νερού ενός εδάφους και οδηγείται στη διατήρηση ενός σταθερού pH. Η προσθήκη βιοεξανθρακώματος σε εδάφη έχει αποδειχτεί ότι μπορεί να προκαλέσει πολλές φορές έως και 50% αύξηση της CEC. [Glaser et al, 2002]

Τα τελευταία χρόνια η επιστήμη έχει δείξει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για το βιοεξανθράκωμα κυρίως επειδή παράγεται από υπολείμματα βιομάζας χαμηλού κόστους παρέχοντας ιδιαίτερες δυνατότητες σε περιβαλλοντικές εφαρμογές όπως η δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα, η βελτίωση ποιότητας εδάφους και γενικότερα η εξυγίανση του περιβάλλοντος. Στα πλαίσια της

κυκλικής οικονομίας η ιδέα της αξιοποίησης αγροτικών αποβλήτων για την παραγωγή βιοεξανθρακώματος ως βελτιωτικού εδάφους αποτελεί μια φιλική προς το περιβάλλον και οικονομικά συμφέρουσα τεχνολογία. Συγκεκριμένα το παραγόμενο βιοεξανθράκωμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την βελτίωση γονιμότητας του εδάφους, την μείωση διαφόρων εκπομπών αερίων εκ των οποίων κάποια σχετίζονται με το φαινόμενο του θερμοκηπίου ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ), τη συγκράτηση θρεπτικών συστατικών, τη δέσμευση άνθρακα στο έδαφος, την βελτίωση παραγωγής αγροτικών προϊόντων, την απομάκρυνση βαρέων μετάλλων και γενικότερα συμβάλλει στην αποκατάσταση ρυπασμένων εδαφών. [Ράκκας , 2016]

#### **2.3.4.1 Παραγωγή βιοεξανθρακώματος**

Η βιοχημική και η θερμοχημική επεξεργασία είναι οι δυο απ' τις σημαντικότερες μεθόδους μετατροπής της βιομάζας. Στη βιοχημική μέθοδο ανήκουν οι διεργασίες της αναερόβιας χώνευσης, η υδρόλυση και η ζύμωση. Χρησιμοποιείται βιομάζα με υψηλή περιεκτικότητά (μεγαλύτερη από 40%) σε σάκχαρα ή υδατάνθρακες και νερό [Damartzis and Zabaniotou, 2011]. Στη θερμοχημική μέθοδο μετατροπής της βιομάζας ανήκουν η καύση, η αεριοποίηση, η υγροποίηση, η υδρογόνωση και η πυρόλυση. Οι θερμοχημικές μέθοδοι υπερτερούν των βιοχημικών λόγω μεγαλύτερης παραγωγικότητας, γίνεται πλήρη χρήση της αρχικής βιομάζας, είναι ανεξάρτητες των κλιματικών συνθηκών, εφαρμόζονται σε μια ικανοποιητικά μεγάλη γκάμα βιομαζών και δίνεται η δυνατότητα ελέγχου της διεργασίας [Bolan et al., 2013]. Η παραγωγή βιοεξανθρακώματος πραγματοποιείται μέσω της διεργασίας της πυρόλυσης. Προκειμένου να επιτευχθούν υψηλές τιμές απόδοσής βιοεξανθρακώματος απαιτούνται συγκεκριμένες συνθήκες πυρόλυσης.

Η θερμοκρασία έχει την μεγαλύτερη επιρροή στην απόδοση του βιοεξανθρακώματος [Lua and Yang et al., 2004] και ακολουθεί ο ρυθμός πυρόλυσης και τέλος παράγοντες μικρότερης σημασίας η παροχή αερίου και ο χρόνος παραμονής.

Ως απόδοση (yield %) της πυρόλυσης σε βιοεξανθράκωμα ορίζεται ο λόγος της παραγόμενης μάζας βιοεξανθρακώματος προς την αρχική μάζα εκφρασμένη επί τοις εκατό.

#### **2.3.4.2 Παράμετροι για την απόδοση και τα χαρακτηριστικά του βιοεξανθρακώματος**

Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του βιοεξανθρακώματος είναι εκείνα που καθορίζουν τη χρήση του ως λίπασμα για την ανάπτυξη των καλλιεργειών ή την χρήση του για απομάκρυνση ρύπων του εδάφους. Η ποσότητα του παραγόμενου βιοεξανθρακώματος από την πυρόλυση καθώς και οι φυσικές, χημικές και βιολογικές ιδιότητες του εξαρτώνται από το είδος αρχικής βιομάζας που υπόκειται σε πυρόλυση και από τις παραμέτρους της πυρόλυσης, θερμοκρασία, ρυθμός πυρόλυσης, παροχή αερίου και χρόνος παραμονής στη

μονάδα διεργασίας της πυρόλυσης. [Βέλλη, Αγραφιώτη κ.α., 2014]. Ο συνδυασμός όλων των παραπάνω παραγόντων χαρακτηρίζει το βιοεξανθράκωμα ένα προϊόν με ετερογενή σύσταση το οποίο το καθιστά ιδιαίτερα σταθερό στο περιβάλλον. [Μαντωνανάκη, 2014].

## **I) Είδος Βιομάζας**

Σύσταση: Η βιομάζα αποτελείται κυρίως από τρεις οργανικές ενώσεις την κυτταρίνη, ημικυτταρίνη και λιγνίνη και αποτελεί έναν απ' τους σημαντικότερους παράγοντες για την παραγωγή βιοεξανθρακώματος [Kavitha et al., 2018]. Η λιγνοκυτταρινική της σύσταση είναι καθοριστική για την ποσότητα του βιοεξανθρακώματος που θα παραχθεί από την πυρόλυση. Η αναλογία της κυτταρίνης, λιγνίνης αλλά και της ημικυτταρίνης θα καθορίσει το βαθμό κατά τον οποίο η δομή της βιομάζας διατηρείται σε μια δεδομένη θερμοκρασία πυρόλυσης ανάλογα με τις θερμοκρασίες που διασπώνται (κυτταρίνη 240-350°C, λιγνίνη 280-500°C). Λόγω σταθερότητας της λιγνίνης έναντι της αποσύνθεσης, οι βιομάζες με υψηλή περιεκτικότητα σε λιγνίνη έχουν μεγάλη απόδοση σε βιοεξανθράκωμα σε αντίθεση με την κυτταρίνη και την ημικυτταρίνη που αποτελούν τα πτητικά κλάσματα της βιομάζας. [Mohamed et al., 2010].

Τέφρα: Η περιεχόμενη τέφρα είναι ακόμα μια παράμετρος που επηρεάζει την απόδοση του βιοεξανθρακώματος και τη σύστασή του. Μελέτες έχουν δείξει ότι η προ επεξεργασία της βιομάζας με ανόργανα διαλύματα αλάτων αυξάνει την απόδοση της πυρόλυσης σε βιοεξανθράκωμα, βιομάζες με υψηλή περιεκτικότητα σε τέφρα κατά την διεργασία της πυρόλυσης έχουν μεγαλύτερη απόδοση σε βιοεξανθράκωμα [White et al., 2011]. Τα συστατικά της τέφρας όπως το χλώριο (Cl), το κάλιο (K) και το άζωτο (N) απομακρύνονται ως πτητικά σε χαμηλές θερμοκρασίες, ενώ το ασβέστιο (Ca), ο φώσφορος (P) και το θείο (S) δείχνουν πιο σταθερά και για αυτό διασπώνται σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Στο μεγαλύτερο μέρος τους τα συστατικά αυτά και η τέφρα παραμένουν στο βιοεξανθράκωμα σε μεγαλύτερη συγκέντρωση λόγω απουσίας σε άνθρακα (C), υδρογόνο (H) και οξυγόνο (O) [Αγραφιώτη et al., 2014].

Στοιχειακή σύνθεση, υγρασία, πτητικά συστατικά: Βασικοί παράμετροι που χαρακτηρίζουν τη βιομάζα και έχουν καθοριστικό ρόλο στη σύσταση του βιοεξανθρακώματος εκτός από την τέφρα είναι η υγρασία, τα πτητικά συστατικά ο σταθερός άνθρακας και η περιεκτικότητα της βιομάζας σε O, H, C, N, S (στοιχειακή ανάλυση). Πειράματα πυρόλυσης που πραγματοποιήθηκαν με κοπριά ζώων έδειξαν ότι η απόδοση σε βιοεξανθράκωμα είναι αντιστρόφως ανάλογη με τα πτητικά συστατικά, τον άνθρακα και το άζωτο που περιέχονται σε βιομάζες. Αυξημένη απόδοση σε βιοεξανθράκωμα είχε η βιομάζα με την χαμηλότερη περιεκτικότητα σε πτητικά και υψηλότερη περιεκτικότητα σε τέφρα. [Cantrell et al., 2012].

Μέγεθος σωματιδίων: Τέλος το μέγεθος των σωματιδίων επηρεάζει την απόδοση της πυρόλυσης σε βιοεξανθράκωμα, το μέγεθος και το σχήμα της βιομάζας επηρεάζει την κατανομή της θερμότητας στον συνολικό όγκο της βιομάζας κατά τη διεργασία της πυρόλυσης [Μουργέλα ,2021] . Σε αντίστοιχα πειράματα πυρόλυσης σε ελαιοπυρήνα (680 °C), η απόδοση βιοεξανθρακώματος αυξήθηκε από 19,4 σε 35,6% κ.β, όταν αυξήθηκε το μέγεθος σωματιδίων της βιομάζας από 0,5 σε 2,2 mm. [Demibras, 2004].

## **II) Λειτουργικές παράμετροι πυρόλυσης**

Θερμοκρασία πυρόλυσης: Η θερμοκρασία πυρόλυσης αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα καθώς επιδρά στα χαρακτηριστικά του βιοεξανθρακώματος. Σε υψηλές θερμοκρασίες αυξάνεται το pH καθώς και η ειδική επιφάνεια των βιοεξανθρακωμάτων (**Πίνακας 2.1**) αφού είναι ανάλογο της θερμοκρασίας και δημιουργείται μεγαλύτερο ποσοστό τέφρας. Ο άνθρακας C είναι ανάλογος με την θερμοκρασία πυρόλυσης ενώ το περιεχόμενο H και O στο βιοεξανθράκωμα μειώνονται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία. Αντιστρόφως ανάλογη αποτελεί και η απόδοση του βιοεξανθρακώματος με την αύξηση της θερμοκρασίας. Τέλος η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων CEC ενός βιοεξανθρακώματος επηρεάζεται αρνητικά με την αύξηση της θερμοκρασίας πυρόλυσης. Ωστόσο με το πέρασμα του χρόνου λόγω γήρανσης του βιοεξανθρακώματος και πιθανής οξειδωσης της επιφάνειάς του, η CEC τείνει να έχει μια αυξητική τάση.

Ρυθμός αύξησης θερμοκρασίας: Έχει αποδειχθεί ότι ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας είναι αντιστρόφως ανάλογος με την ειδική επιφάνεια του βιοεξανθρακώματος καθώς ευθύνεται για την μεγάλη απομάκρυνση πτητικής ύλης.

Χρόνος παραμονής: Η αύξηση του χρόνου παραμονής δεν επηρεάζει την απόδοση και τα χαρακτηριστικά του βιοεξανθρακώματος όσο την χημική δομή του. Σύμφωνα με τους Tan et al., (2017) άλλο ένα μέγεθος που επηρεάζεται όσο αυξάνεται ο χρόνος παραμονής είναι το μέγεθος των πόρων μέχρι ενός ορίου και μετά αρχίζει να μειώνεται. Επισημαίνουν την προσοχή αυτού του μεγέθους κάτι το οποίο εξαρτάται και από τον τύπο της αρχικής βιομάζας, διότι το μεγάλο μέγεθος πόρων δυσχεραίνει την κατακράτηση νερού και την αναπνοή του εδάφους και πιθανόν την ανάπτυξη μικροοργανισμών.

**Πίνακας 2.1:** Χαρακτηριστικά βιοεξανθρακώματων που παρήχθησαν από πυρόλυση σε διάφορες θερμοκρασίες , από διαφορετικούς τύπους βιομαζών [Αγραφιώτη, 2014]

Βιομάζα	Θερμοκρασία (°C)	Απόδοση (%)	Τέφρα (%)	pH	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	Ειδική επιφάνεια (m <sup>2</sup> /g)
Απορρίμματα πουλερικών	350	54,3	30,7	8,7	51,07	3,79	15,63	4,45	3,9
Απορρίμματα πουλερικών	700	36,7	46,2	10,3	45,91	1,98	10,53	2,07	50,9
Άχυρο ρυζιού	300	49,5	22,9	9,19	72,1	5,08	21,3	1,55	-
Άχυρο ρυζιού	400	42,8	28,8	9,96	77,2	4,01	17	1,74	-
Άχυρο ρυζιού	500	39	31,8	10,48	82,8	3,25	12,1	1,77	-
Άχυρο ρυζιού	600	35,7	27,6	10,84	87,1	2,51	8,8	1,52	-
Άχυρο ρυζιού	700	34,7	29,3	10,77	90,6	1,8	6,2	1,41	-
Κέλυφος πυρήνα φοίνικα	500	32,2	6,86	6,9	87,85	2,91	8,14	1,11	191
Κέλυφος φιστικιού	300	36,9	12	7,8	68,27	3,85	25,89	1,91	3,1
Κέλυφος φιστικιού	700	21,9	8,9	10,6	83,76	1,75	13,34	1,14	448,2
Κοπριά χοίρου	400	39	43,5	7,5	41,8	1	20,6	3,2	5,7
Κοπριά χοίρου	500	37	45,8	10,2	41,8	1	18,4	2,6	3,9
Κοπριά χοίρου	600	36	47,5	10,7	41,1	0,8	17,6	2,5	3,4
Κοπριά χοίρου	700	34	52,8	11,8	43,9	0,9	14,9	2	59
Κοπριά χοίρου	800	34	51,8	11,4	42,1	1,1	13,5	1,6	63
Μπαμπού	300	40,5	-	7,9	66,20	4,70	27,72	0,4	1,3
Μπαμπού	450	26,3	-	8,5	76,89	3,55	18,11	0,23	10,2
Μπαμπού	600	24,0	-	9,2	80,89	2,43	14,87	0,15	375,5
Μίσχανθος	350	70,0	-	6,90	50,95	5,76	43,14	0,30	-
Μίσχανθος	450	31,0	-	9,25	72,61	4,21	22,91	0,56	-

## **2.3.5 Ιδιότητες βιοεξανθρακώματος**

### **2.3.5.1 Φυσικές Ιδιότητες του βιοεξανθρακώματος**

Οι φυσικές ιδιότητες του βιοεξανθρακώματος όπως η ειδική επιφάνεια και το μεγάλο πορώδες, εξαρτώνται κυρίως από την διεργασία της πυρόλυσης αλλά και τον αρχικό τύπο βιομάζας. Το βιοεξανθράκωμα λόγω του υψηλού πορώδες επιφέρει αύξηση της υδατοϊκανότητας του εδάφους και διευκολύνει την διείσδυση του νερού στην περιοχή του ριζικού συστήματος της καλλιέργειας. Σ' άλλες μελέτες που έχουν διεξαχθεί έχει αναφερθεί ότι οι παράγοντες που σχετίζονται με την αποτελεσματικότητα των φυσικών ιδιοτήτων του βιοεξανθρακώματος στο έδαφος πέραν της αρχικής βιομάζας και των συνθηκών πυρόλυσης είναι και η κατάλληλη εφαρμοζόμενη δόση στο έδαφος καθώς και η σύσταση του εδάφους. Πειράματα που πραγματοποιήθηκαν για την εφαρμογή του βιοεξανθρακώματος στο έδαφος έδειξαν ότι η αύξηση της δόσης είναι ανάλογη της υδατοϊκανότητας του εδάφους [Βέλλη . 2019].

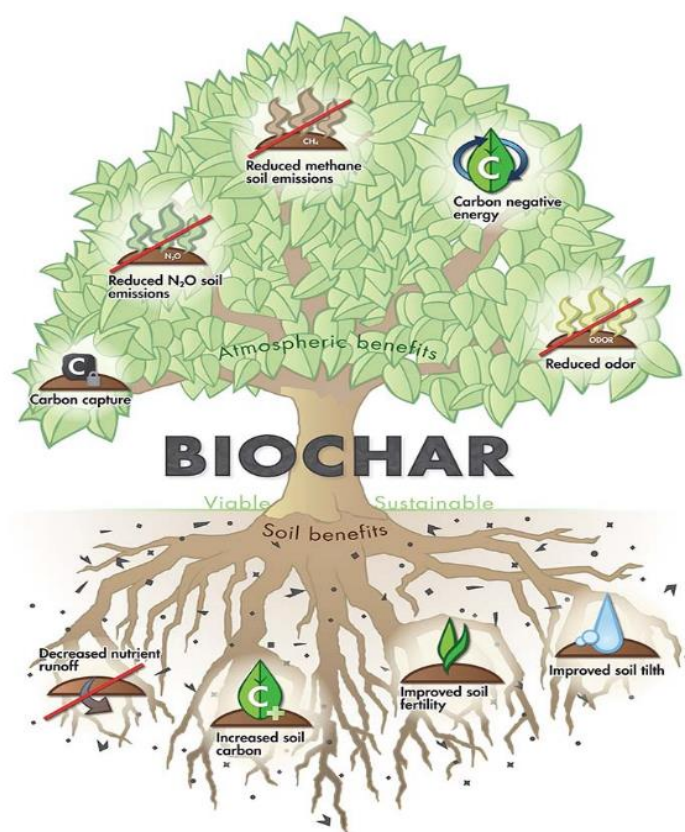
### **2.3.5.2 Χημικές Ιδιότητες του βιοεξανθρακώματος**

Οι κύριες χημικές ιδιότητες που αποτελούν το βιοεξανθράκωμα είναι οι στοιχειακή ανάλυση με το ποσοστό άνθρακα και αζώτου, το ποσοστό τέφρας, η υγρασία, η πτητική ύλη, το Ph, η ηλεκτρική αγωγιμότητα, η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων καθώς και τα θρεπτικά στοιχεία. Σημαντικό ρόλο για τις χημικές ιδιότητες κατέχει ο αρχικός τύπος βιομάζας που θα παραχθεί το βιοεξανθράκωμα καθώς και η διεργασία της πυρόλυσης. Μελέτες έχουν παρατηρήσει ότι το βιοεξανθράκωμα ανάλογα με το είδος βιομάζας από το οποίο έχει παραχθεί έχει την ιδιότητα να επιφέρει αύξηση του pH στο έδαφος με αποτέλεσμα να διευκολύνει θρεπτικά στοιχεία στην προσρόφηση τους από τις ρίζες [Chintala et al., 2014].

### **2.3.6 Επίδραση του βιοεξανθρακώματος στο έδαφος**

Το βιοεξανθράκωμα έχει αποδειχθεί πέραν από τις ευεργετικές ιδιότητες που κατέχει λειτουργεί και ως απορρυπαντής δεσμεύοντας σημαντικές ρυπογόνες ουσίες όπως το διοξείδιο του άνθρακα, το σημαντικότερο αέριο στη συμβολή του φαινομένου του θερμοκηπίου. Έχει την ιδιότητα να επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τις φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους όταν αναμειχθεί με αυτό. Μια σημαντική παράμετρος που καθορίζεται από την προσθήκη βιοεξανθρακώματος στο έδαφος είναι η δυνατότητα ρύθμισης του pH το οποίο στη συνέχεια θα επηρεάσει την διαθεσιμότητα των θρεπτικών συστατικών, καθώς κάθε καλλιέργεια έχει ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών pH στο οποίο θα επιτευχθεί η μέγιστη ανάπτυξή της [Agegehu et al. 2017]. Τα βιοεξανθρακώματα μπορεί να αποδίδουν είτε ως εδαφοβελτιωτικά είτε ως προσροφητικά υλικά [Μουργέλα, 2021]. Επιπρόσθετα λόγω του υψηλού πορώδες που διαθέτει όπως προαναφέρθηκε οδηγεί στην κατακράτηση θρεπτικών στοιχείων και νερού στο έδαφος καθώς και στην ανάπτυξη μικροοργανισμών οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την μεταφορά αζώτου και

φωσφόρου στα φυτά. Σύμφωνα με τους Glaser et al. (2002) έχει αποδειχθεί ότι η προσθήκη βιοεξανθρακώματος στο έδαφος οδηγεί στην αύξηση της ικανότητας ανταλλαγής κατιόντων CEC, ιδιαίτερα σε εδάφη που εμφανίζουν χαμηλές τιμές CEC. Σε άλλες μελέτες παρατηρήθηκαν αύξηση στις συγκεντρώσεις διαθέσιμου φωσφόρου στο έδαφος όπου εφαρμόστηκε βιοεξανθράκωμα σε σύγκριση με τον μάρτυρα καθώς επίσης και μεγάλη περιεκτικότητα σε θρεπτικά στοιχεία [Faria et al., 2018].



**Εικόνα 4:** Ιδιότητες βιοεξανθρακώματος. [Biochar-international.org, 2018]

**Πίνακας 2.2:** Επίδραση του βιοεξανθρακώματος σε καλλιέργειες [Μοναχός, 2020].

Βιομάζα	Τύπος καλλιέργειας	Επίδραση βιοεξανθρακώματος
Ξύλο Μάνγκο	Αραβόσιτο	Αύξηση βιομάζας 30-43% και της απόδοσης παραγωγής 22% λόγω της βελτίωσης του pH εδάφους, CEC, κατακράτηση νερού και διαθεσιμότητας θρεπτικών συστατικών.
Ξύλο τικ και τριανταφυλλιάς	Σόργος, ρύζι	Βελτίωση ανάπτυξης φυτού και 200-300% αύξηση παραγωγής λόγω αύξησης της επίδρασης λιπασμάτων.
Κέλυφος μακαδαμίας	Αραβόσιτο, μαρούλι	Το βιοεξανθράκωμα με υψηλή πτητική ύλη μείωσε την ανάπτυξη της καλλιέργειας σε σύγκριση με το βιοεξανθράκωμα χαμηλότερης πτητικής ύλης
Απόβλητα χαρτοποιίας	Σιτάρι, ραπανάκι	Διαφορετικές επιδράσεις στην βιομάζα που εξαρτώνται από τον τύπο εδάφους.
Μίσχος μανιόκας, κοπριά, καλαμπόκι αραβόσιτου	Αραβόσιτο, μανιόκα	Αύξηση παραγωγής λόγω βελτίωσης οργανικού C, N, P, CEC, K και διαθεσιμότητας νερού.
Βιολογικά απόβλητα, απορρίματα πουλερικών	Ραπανάκι	Αύξηση παραγωγής 42-96% λόγω βελτίωσης φυσικοχημικών ιδιοτήτων εδάφους, διαθεσιμότητας N και μείωσης ανταλλάξιμου Al.
Λυματολάσπη	Κεράσι, ντομάτα	Αύξηση παραγωγής έως 64% λόγω αύξησης διαθεσιμότητας N, P.
Πριονίδι πεύκου	Ντομάτα	Αύξηση ανάπτυξης φυτών, παραγωγής και ποιότητας.
Απόβλητα δέντρου ακακίας, κοπριά πτηνών	Μήλο	Αύξηση περιφέρειας κορμού χωρίς επίδραση σε παραγωγή και ποιότητα.
Φλοιός ρυζιού	Μαρούλι, λάχανο	Αύξηση βιομάζας έως 903% και συγκέντρωσης Ca, Mg και K.

## 2.4 Καλλιέργεια μαρουλιού (*Lactuca sativa*)

### 2.4.1 Χαρακτηριστικά μαρουλιού

Το *Lactuca sativa*, ή κοινός γνωστό και ως μαρούλι τύπου Ρωμάνο, είναι ένα πολύ γνωστό φυτό παγκοσμίως λόγω της χρήσης του στην παρασκευή φαγητών, όπως σαλάτες ή σούπες. Το φυλλώδες αυτό λαχανικό καλλιεργήθηκε για πρώτη φορά από τους Αιγύπτιους. Ανήκει στην οικογένεια *Asteraceae* (*Compositae*) και είναι ετήσιο ποώδες φυτό (Πίνακας 1). Χαρακτηρίζεται ως ένα λείο φυτό, με ριζικό σύστημα τύπου βρύσης, κατακόρυφο μίσχο ύψους 30 με 100 cm και έχει μια επιμήκης κεφαλή. Είναι διακλαδισμένη στο πάνω μέρος και

τα φύλλα έχουν μια σπειροειδή διάταξη, είναι ακέραια ή κυματοειδή ή ακανόνιστα οδοντωτά σχηματίζοντας μια πυκνή ροζέτα με ομοιόμορφα φύλλα που είναι επιμήκη ελλειπτικά με καρδιοειδή βάση, δίνοντας μια εικόνα σγουρού σχήματος.

Η ταξιανθία (capitulum, head) αποτελείται από 7–15 (35) κίτρινες λιγούρες (ανθίδες). Ο καρπός (αχήν) έχει 5 έως 7 νευρώσεις σετόζης σε κάθε πλευρά, ένα ράμφος και ένας λευκός πάππος. Το μήκος του (συμπεριλαμβανομένου του ράμφους) είναι 6–8 mm και το χρώμα του είναι λευκό, κρεμ, γκρι, καφέ ή μαύρο. Είναι διπλοειδές με βασικό αριθμό χρωμοσωμάτων  $n=9$  [Doležalová et al., 2002b]. Το χρώμα των φύλλων ανάλογα τον τύπο και την ποικιλία κυμαίνεται από βαθύ πράσινο ή κιτρινοπράσινο μέχρι κοκκινωπό. Σε ορισμένες ποικιλίες όταν τα φύλλα εκτίθενται σε χαμηλές θερμοκρασίες παράγουν ανθοκυάνες (χρωστική ουσία) και μεταχρωματίζονται σε κοκκινωπά. Τα εσωτερικά φύλλα λόγω μειωμένης φωτοσύνθεσης έχουν πιο ανοιχτό χρώμα από τα εξωτερικά φύλλα, συγκεκριμένα σε μαρούλια που σχηματίζουν κεφάλι το χρώμα τους μπορεί να είναι και λευκοκίτρινο. Τέλος εξαιτίας των μεταφυτεύσεων που μπορεί να προκύψουν κατά τη διάρκεια της καλλιέργειας του, η ανατομία της κεντρικής ρίζας αλλοιώνεται και αναπτύσσεται ένα επιφανειακό θυσσανώδες ριζικό σύστημα όπου ο βλαστός είναι πολύ κοντός και τα φύλλα φέρονται σε μορφή ροζέτας καλύπτοντας τον ώστε να μην είναι ορατός.

**Πίνακας 2.3:** Ταξινόμηση είδους *Lactuca sativa*. [ [www.itis.gov.com](http://www.itis.gov.com) ]

Βασίλειο:	Plantae
Κλάση:	Magnoliopsida
Τάξη:	Asterales
Οικογένεια:	Asteraceae
Γένος:	Lactuca L.
Είδος:	Lactuca sativa L.

#### 2.4.2 Συνθήκες καλλιέργειας

Το μαρούλι καλλιεργείται παγκοσμίως και είναι ένα από τα πιο καταναλωμένα πράσινα φυλλώδη λαχανικά σε ακατέργαστη μορφή λόγω της γεύσης και της υψηλής θρεπτικής του αξίας. Η καλλιέργεια του είναι σχετικά εύκολη αλλά δεν παρουσιάζει ανθεκτικότητα σε καιρικές συνθήκες και ασθένειες. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος για την ορθή ανάπτυξη κυμαίνεται στους 15-19,5°C ενώ για το στάδιο της βλάστησης είναι 15°C- 22°C. Σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 30°C η ανάπτυξη διακόπτεται και υπάρχει κίνδυνος πρόωρων ανθικών στελεχών, πικρία και μη σχηματισμός κεφαλής στους κεφαλωτούς τύπους μαρουλιού, όπου όλα αυτά καθιστούν το μαρούλι μη εμπορεύσιμο προϊόν. Στην περίπτωση όπου οι θερμοκρασίες είναι μικρότερες των 7°C, το στάδιο

ανάπτυξης τους γίνεται βραδύτερο. Οι ιδανικοί μήνες για σπορά είναι από τον Ιανουάριο έως και το Μάιο. Οι φυλλώδεις τύποι μαρουλιού είναι πιο ανθεκτικοί σε υψηλότερο εύρος θερμοκρασιών σε σύγκριση με τους κεφαλωτούς τύπους [Τσώλης, 2019].

Λόγω της αναγκαιότητας για θρεπτικά συστατικά είναι απαραίτητη η χρήση χώματος πλούσια σε οργανικές ουσίες με υψηλό βαθμό υδατοϊκανότητας και καλά στραγγιζόμενο καθώς και συχνό πότισμα για το βέλτιστο αποτέλεσμα [Ρεγκούζας, 2015]. Το κατάλληλο pH κυμαίνεται από 6,0 - 7,5.

Αυτό το φυτό έχει επίσης εξαιρετικές φαρμακευτικές ιδιότητες και θεωρείται σημαντική πηγή φυτοθρεπτικών συστατικών. Σήμερα, παράγεται σε όλο τον κόσμο και χρησιμοποιείται στην ιατρική για αντιμετώπιση παθήσεων, όπως στομαχικά προβλήματα και φλεγμονές αλλά και για λοιμώξεις του ουροποιητικού συστήματος. Μελέτες που πραγματοποιήθηκαν απέδειξαν τις φαρμακολογικές του δυνατότητες, συμπεριλαμβανομένων των αντιοξειδωτικών, αντιμικροβιακών, νευροπροστατευτικών και υπνωτικών επιδράσεων. Η χημική σύνθεση του φυτού έδειξε την παρουσία διαφορετικών κατηγοριών δευτερογενών μεταβολιτών, όπως, φλαβονοειδή, τερπενοειδή και φαινόλες, οι οποίοι ευθύνονται για τις βιολογικές του δραστηριότητες. Το φυτό περιέχει επίσης απαραίτητα στοιχεία, όπως βιταμίνες καθώς και μέταλλα και οργανικές ουσίες [Noumedem et al., 2017].

#### 2.4.3 Πιθανές ασθένειες και εχθροί

Το μαρούλι προσβάλλεται από διάφορα αφιδοειδή. Η κύρια υπεύθυνη για την μετάδοση ιώσεων είναι η πράσινη αφίδα (*Myzus persicae*) η οποία υποβαθμίζει την ποιότητα του φυτού. Ακολουθούν επιπτώσεις στο ριζικό σύστημα οι οποίες προέρχονται από σαλιγκάρια, ποντίκια ή διάφορα έντομα του εδάφους. Οι μυκητολογικές προσβολές μπορεί να προέλθουν από:

- Τήξη σπορειών από τους μύκητες *Pythium* spp, *Rhizoctonia solani*
- Περονόσπορος *Bremia lactuca*.
- *Botrytis cinerea* (σήψη) προσβάλλει σε όλα τα στάδια ανάπτυξης των φυτών
- Ωίδιο, *Erysiphe cichoracearum*.
- Σκληρωτινίαση, *Sclerotinia sclerotiorum*.

Τέλος οι ιολογικές προσβολές δεν χρήζουν ιδιαίτερης σημασίας και αξίζει να σημειωθεί ότι η εξέλιξή της γενετικής μηχανικής φέρει αντίσταση σε πολλές ασθένειες σήμερα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

### 3.1 Δείγματα-Υλικά

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής χρησιμοποιήθηκε κόμποστ προερχόμενο από οργανικό κλάσμα των αστικών απορριμμάτων το οποίο συλλέχθηκε από την εταιρεία ανακύκλωσης ΔΕΔΙΣΑ (Διαδημοτική Επιχείρηση Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων) Χανίων. Στη συνέχεια επιλέχθηκε χρήση βιοεξανθρακώματος προερχόμενο από το κόμποστ της ΔΕΔΙΣΑ το οποίο παράχθηκε μέσω της διεργασίας της πυρόλυσης στους 300°C με χρόνο παραμονής 4h. Το δείγμα εδάφους που χρησιμοποιήθηκε συλλέχθηκε από καλλιεργήσιμη περιοχή του Ακρωτηρίου Χανίων. Για την προεργασία του χώματος έγινε ξήρανση στους 60°C για 48h ώστε να απομακρυνθεί η περιεχόμενη υγρασία και όχι η πτητική ύλη, ύστερα απομακρύνθηκαν οι πέτρες και τα χαλίκια και τέλος κοσκινίστηκε με 2 κόσκινα διαφορετικών διαμέτρων 10 mm και 2 mm για να επιτευχθεί ο χαρακτηρισμός του. Τέλος για την καλλιέργεια του πειράματος χρησιμοποιήσαμε μαρούλια τύπου Ρωμάνο, ομοιόμορφα φυτά (ανάπτυξη 30 ημερών) τα οποία αγοράστηκαν από φυτώριο.

### 3.2. Παραγωγή Κόμποστ ΔΕΔΙΣΑ

Το βιοεξανθράκωμα (biochar) το οποίο δημιουργήσαμε προήλθε από κόμποστ από τη ΔΕΔΙΣΑ Χανίων, τα οποία στη συνέχεια τα αναμείξαμε σε διάφορες αναλογίες με χώμα για να γίνει η φύτευση των μαρουλιών.

Η διαδικασία της κομποστοποίησης που πραγματοποιείται στο Εργοστάσιο Μηχανικής Ανακύκλωσης και Κομποστοποίησης (ΕΜΑΚ) Χανίων διαφοροποιείται από την φυσική αποδόμηση που πραγματοποιείται στη φύση. Εκεί γίνεται επεξεργασία βιοαποβλήτων (υπολείμματα τροφών) και είναι μια ταχύτερη διεργασία και ευέλικτη ως προς την ποιότητα του παραγόμενου υλικού. [ΔΕΔΙΣΑ Χανίων, 2017]

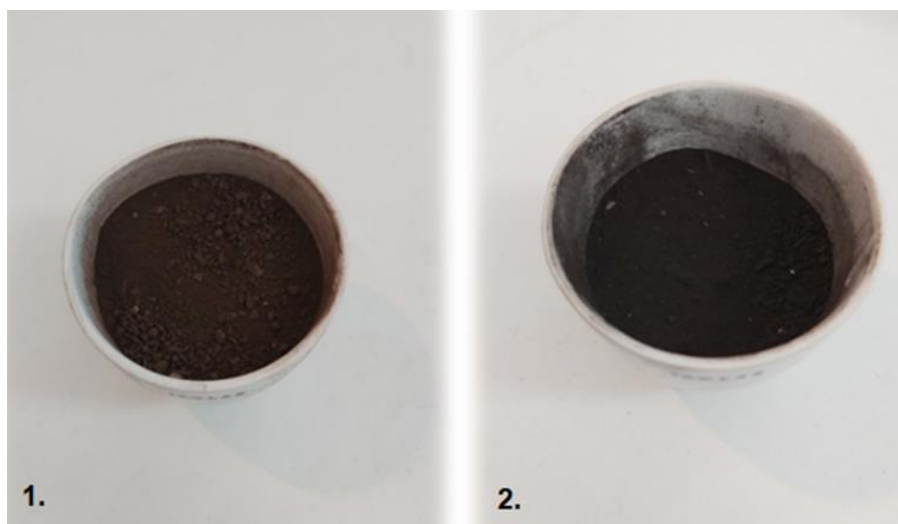
Το ΕΜΑΚ Χανίων επεξεργάζεται προ διαλεγμένα ανακυκλώσιμα υλικά, ογκώδη απόβλητα και σύμμεικτα ΑΣΑ καθώς και προδιαλεγμένα βιοαπόβλητα από μεγάλους παραγωγούς και έχει δυναμικότητα 70.000 tn/έτος. Το κόμποστ που παράγεται τοποθετείται σε συσκευασία των 30 L και δίνεται προς πώληση σε δίκτυο καταστημάτων σε όλη την Κρήτη καθώς διατίθεται και σε σάκους όγκου 0.5 και 1 m<sup>3</sup>. [ΕΠΠΕΡΑΑ, 2014]



**Εικόνα 5:** Παραγόμενο κομπόστ ΕΜΑΚ Χανίων. [ΕΠΠΕΡΑΑ,2014]

### 3.3 Πυρόλυση- Παραγωγή Βιοεξανθρακώματος

Η πρώτη ύλη που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή βιοεξανθρακώματος ήταν το κόμπποστ προερχόμενο από τη ΔΕΔΙΣΑ Χανίων. Πριν την πυρόλυση απαιτείται ξήρανση του κόμπποστ για απομάκρυνση της περιεχόμενης υγρασίας για 24h. Έπειτα από την προετοιμασία του κόμπποστ ακολουθεί το στάδιο της πυρόλυσης η οποία έλαβε χώρα σε κλίβανο πυρόλυσης σταθερής κλίνης που έχουν δημιουργηθεί συνθήκες απουσίας οξυγόνου. Προζυγισμένη ποσότητα κόμπποστ τοποθετήθηκε σε ειδικά πορσελάνινα χωνευτήρια και μετέπειτα στο κλίβανο πυρόλυσης. Η θερμοκρασία πυρόλυσης έλαβε χώρα στους 300°C με ρυθμό αύξησης 3°C/min και χρόνο παραμονής 4h.



**Εικόνα 6:** 1. Κόμπποστ από τη ΔΕΔΙΣΑ Χανίων. 2. Βιοεξανθράκωμα από κόμπποστ μετά από πυρόλυση στους 300 °C.

Μετά το πέρας της διαδικασίας έγινε υπολογισμός της απόδοσης της πυρόλυσης και προσδιορισμός της τέφρας του παραγόμενου

βιοεξανθρακώματος, όπως αναλύονται παρακάτω, ενώ το υπόλοιπο αποθηκεύτηκε σε αεροστεγή συσκευασία μέχρι τη χρήση του στην καλλιέργεια.

### 3.3.1 Απόδοση Πυρόλυσης σε βιοεξανθράκωμα

Η απόδοση της πυρόλυσης ορίζεται ως το πηλίκο της παραγόμενης ποσότητας του βιοεξανθρακώματος προς το ξηρό βάρος του αρχικού υλικού κόμποστ επί τοις εκατό (%), δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\text{Yield (\%)} = \frac{M_{\text{Biochar}}}{M_{\text{Compost}}} \times 100 \%$$

$M_{\text{Biochar}}$  : ορίζεται η μάζα του παραγόμενου βιοεξανθρακώματος.

$M_{\text{Compost}}$  : ορίζεται η μάζα του κόμποστ πριν την πυρόλυση.

Ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία για την ακριβής μέτρηση των μαζών:

- Μετρήθηκε το βάρος της κάθε κάψας
- Στη συνέχεια μετρήθηκε το βάρος της κάψας μαζί με την περιεχόμενη ποσότητα κόμποστ.
- Τέλος μετά την διεργασία της πυρόλυσης μετρήθηκε το εκ νέου βάρος της κάψας μαζί με την παραγόμενη ποσότητα του βιοεξανθρακώματος.

Προκύπτει η παρακάτω σχέση προσδιορισμού της απόδοσης :

$$\text{Yield (\%)} = \frac{M_{\text{Biochar}+\text{κάψα}} - M_{\text{κάψας}}}{M_{\text{Compost}+\text{κάψα}} - M_{\text{κάψας}}} \times 100\%$$

Το τελικό παραγόμενο βιοεξανθράκωμα ήταν 986 g μετά το πέρας της διεργασίας της πυρόλυσης. Η απόδοση του βιοεξανθρακώματος ήταν 84%.

### 3.3.2 Προσδιορισμός τέφρας

Ο προσδιορισμός περιεκτικότητας της τέφρας υλοποιείται στα ξηραμένα αρχικά δείγματα (χώμα, κόμποστ, βιοεξανθράκωμα). Αρχικά ζυγίστηκαν 2g ξηρού δείγματος και τοποθετήθηκαν σε προ ζυγισμένα δοχεία πορσελάνης, στη συνέχεια ξαναζυγίστηκαν μαζί και τοποθετήθηκαν σε φούρνο High Therm της εταιρείας Linn στους 750°C για 6h. Μετά την καύση τα δείγματα ζυγίστηκαν ξανά και μετρήθηκε το τελικό βάρος της τέφρας με την κάψα. Το τελικό ποσοστό της τέφρας για κάθε δείγμα υπολογίζεται επί ξηρού.

$$\text{Ash (g)} = \text{Μάζα (εναπομείναντος + κάψα)} - \text{Μάζα κάψας}$$

$$\text{Ash (\%)} = \frac{\text{Τέφρα (g)}}{\text{Μάζα αρχικού δείγματος (g)}} \times 100\%$$

### 3.4 Εκτέλεση πειράματος

#### 3.4.1 Εγκατάσταση πειράματος

Η εγκατάσταση του πειράματος πραγματοποιήθηκε το καλοκαίρι στις 4 Ιουνίου του 2021 σε ταράτσα του Πολυτεχνείου Κρήτης στα Χανιά περιβαλλόμενο από τοίχους. Η επιλογή αυτής της τοποθεσίας επιλέχθηκε έναντι του θερμοκήπιου λόγω της υπερβολικά αυξημένης θερμοκρασίας που επικρατούσε εκείνο το διάστημα.



**Εικόνα 7:** Εγκατάσταση της καλλιέργειας στην ταράτσα του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Το έδαφος αφού συλλέχθηκε από το πεδίο, υπέστη ξήρανση (60°C) και έπειτα αναμείχθηκε σε διάφορες αναλογίες με το κόμποστ και το παραγόμενο βιοεξανθράκωμα όπως αναγράφεται στον Πίνακα 2. Τόσο ο μάρτυρας όσο και η κάθε μεταχείριση έγιναν σε 4 επαναλήψεις. Στα μείγματα των μεταχειρίσεων έγινε προσθήκη νερού ώστε να είναι εύκολη η ομογενοποίηση τους, αποθηκεύτηκαν σε πλαστικές σακούλες οι οποίες έμειναν ανοιχτές 10 μέρες σε

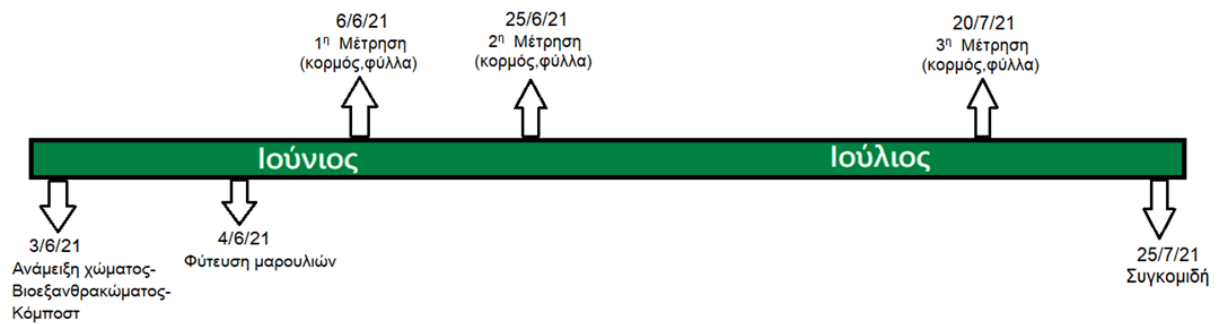
εξωτερικό χώρο μέχρι να αεροξηρανθούν. Έπειτα τα αποξηραμένα μείγματα βάρους 500 g τοποθετήθηκαν σε πλαστικά δοχεία ίδιου μεγέθους (24.5 x 24.5 cm) και έγινε η φύτευση των μαρουλιών. Ο πειραματικός σχεδιασμός ήταν τυχαίος. Στην τaráτσα του Πολυτεχνείου τοποθετήθηκαν 40 πλαστικά δοχεία ίδιου μεγέθους στα οποία φυτεύτηκαν τα μαρούλια μετά απ' τις εξής μεταχειρίσεις:

**Πίνακας 3.1:** Περιγραφή μεταχειρίσεων καλλιέργειας.

Μεταχείριση	Αναλυτική περιγραφή	Χώμα (g)	Κόμποστ (g)	Biochar (g)	Επανάληψη (γλάστρες)
<b>Soil (control)</b>	Soil (μάρτυρας)	500	-	-	4
<b>S-C 1%</b>	Soil-Compost 1%	495	5	-	4
<b>S-C 2,5%</b>	Soil-Compost 2,5%	487,5	12,5	-	4
<b>S-C 5%</b>	Soil-Compost 5%	475	25	-	4
<b>S-B 1%</b>	Soil-Biochar 1%	495	-	5	4
<b>S-B 2,5%</b>	Soil-Biochar 2,5%	487,5	-	12,5	4
<b>S-B 5%</b>	Soil-Biochar 5%	475	-	25	4
<b>S-C-B 1%</b>	Soil-Compost-Biochar 1%	495	2,5	2,5	4
<b>S-C-B 2,5%</b>	Soil-Compost-Biochar 2,5%	487,5	6,25	6,25	4
<b>S-C-B 5%</b>	Soil-Compost - Biochar 5%	475	12,5	12,5	4

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε τους μήνες Ιούνιο με Ιούλιο, όπως φαίνεται στο χρονοδιάγραμμα (Σχήμα 1). Κατά την διάρκεια του πειράματος, η μέση μέγιστη θερμοκρασία τον μήνα Ιούνιο ήταν 24.7°C και η μέση ελάχιστη 20°C, τον μήνα Ιούλιο η μέση μέγιστη θερμοκρασία ήταν 30.7°C και η μέση ελάχιστη 26.4°C ενώ η μέση μηνιαία υγρασία γι' αυτούς τους μήνες ήταν 50.2% σύμφωνα με τα μηνιαία μετεωρολογικά δελτία. Τα φυτά ποτίζονταν 180 mL με νερό βρύσης καθημερινά πρωί (90 mL) και απόγευμα (90 mL), λόγω των συνθηκών αυξημένης θερμοκρασίας.

Πραγματοποιήθηκαν 3 μετρήσεις σύμφωνα με το χρονοδιάγραμμα (Σχήμα 1) των μορφολογικών χαρακτηριστικών (ύψος υπέργειου μέρους και αριθμός φύλλων) κατά την διάρκεια της καλλιέργειας.



**Σχήμα 3.1:** Χρονοδιάγραμμα πειράματος.



**Εικόνα 8:** Πρώτη ημέρα πειραματικής διάταξης μετά τη φύτευση.



**Εικόνα 9:** Πειραματική διάταξη 1 μέρα πριν τη συγκομιδή.

### 3.4.2 Λήξη καλλιέργειας - Προετοιμασία μετρήσεων

Μετά το πέρας της καλλιέργειας, τα μαρούλια μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο προκειμένου να γίνει η συγκομιδή τους και να αποθηκευτούν για τις περαιτέρω μετρήσεις που θα ακολουθούσαν. Αφαιρέθηκαν προσεκτικά από όλα τα δοχεία τα μαρούλι μαζί με την ρίζα και έγινε ξέπλυμα με απιονισμένο νερό ώστε να απομακρυνθεί το χώμα απ' την ρίζα. Μετρήθηκε το τελικό ύψος του φυτού και αποθηκεύτηκε ο κορμός και η ρίζα ξεχωριστά ώστε να μετρηθούν το νωπό τους βάρος. Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν σε φούρνο ξήρανσης για 24h στους 100°C ώστε να ξηραθούν και να γίνει η μέτρηση του ξηρού βάρους κορμού και ρίζας. Τέλος έγινε τεμαχισμός των αποξηραμένων φύλλων και αποθηκεύτηκαν σε αεροστεγή πλαστικά σκεύη.

Μετά το τέλος του πειράματος πραγματοποιήθηκε η συγκομιδή όλων των μεταχειρίσεων στις οποίες μελετήθηκαν:

- Το ξηρό βάρος των υπέργειων φυτικών ιστών (φύλλα).
- Το pH, η ηλεκτρική αγωγιμότητα και οι συγκεντρώσεις  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$ , P-Olsen και μετάλλων στα εδαφικά δείγματα.
- Η συγκέντρωση ολικού P, ολικού N και μετάλλων στους υπέργειους φυτικούς ιστούς



**Εικόνα 10:** Συγκομιδή των μαρουλιών.

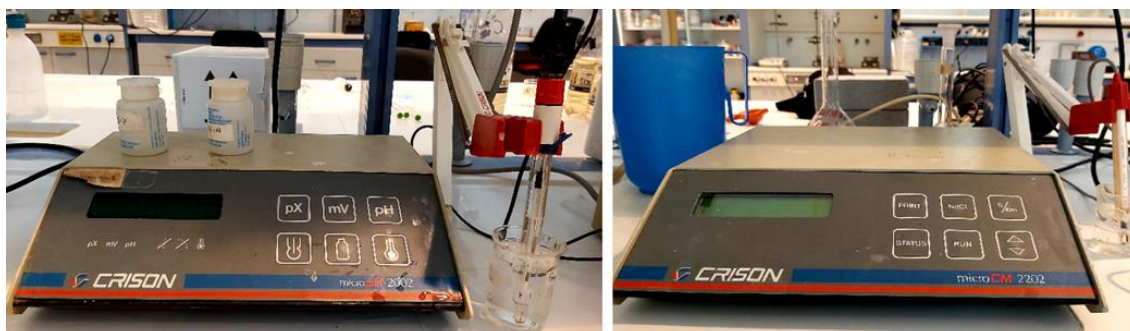
## 3.5 Αναλυτικές Μέθοδοι

### 3.5.1 Μέθοδοι χαρακτηρισμού εδάφους, κόμποστ, βιοεξανθρακώματος

Τα υλικά πριν χρησιμοποιηθούν στην καλλιέργεια (έδαφος, βιοεξανθράκωμα και κόμποστ) χαρακτηρίστηκαν με τις παρακάτω φυσικοχημικές μεθόδους.

#### 3.5.1.2 Προσδιορισμός pH, Αγωγιμότητας (EC)

Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε για να προσδιορίσει τις τιμές pH είναι τύπου “microH 2002” της εταιρίας Crison Instruments S.A. Με αναλογία δείγματος/νερού  $\frac{1}{2},5$  (2g δείγματος σε 5 mL απιονισμένου νερού) έγινε ανάδευση για 24h στα 60rpm. Η βαθμονόμηση του οργάνου έγινε με πρότυπα διαλύματα ρυθμίζοντας το pH στο 7 και στη συνέχεια ρυθμίστηκε η τιμή 4. Τέλος πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις των δειγμάτων με τη χρήση κατάλληλων ηλεκτροδίων του οργάνου. Αντίστοιχα με το ίδιο δείγμα υπολογίστηκαν οι τιμές της αγωγιμότητας των δειγμάτων με το όργανο τύπου “microCM 2202” της εταιρίας Crison.



**Εικόνα 11:** Όργανο μέτρησης pH (αριστερά) και όργανο μέτρησης αγωγιμότητας (δεξιά).

### 3.5.1.3 Προσδιορισμός φαινόμενης πυκνότητας (bulk density)

Η φαινόμενη πυκνότητα του υλικού υπολογίζεται από το λόγο της ξηρής μάζας του υλικού ως προς τον συνολικό όγκο της. Ο όγκος του υλικού στη φυσική κατάσταση συμπεριλαμβάνει τον όγκο της μάζας αλλά και το πορώδες. Σε ογκομετρικό κύλινδρο υπολογίζεται ο όγκος του κάθε υλικού, και στη συνέχεια ζυγίζεται για να υπολογιστεί η φαινόμενη πυκνότητα. Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος από τους Ahmenda et al. (1997).

### 3.5.1.4 Προσδιορισμός pH – PZC (point of zero charge)

Παρασκευάστηκε διάλυμα  $\text{CaCl}_2$  συγκέντρωσης 0,005M, το οποίο βράζεται μέχρι να εξατμιστεί το  $\text{CO}_2$ . Αφού το διάλυμα επανήλθε σε θερμοκρασία δωματίου παρασκευάστηκαν τα διαλύματα επιθυμητού pH στις τιμές των 2, 4, 6, 8, 10, 12 με την προσθήκη HCl 1M ή αντίστοιχα 0,5M NaOH. Αφού ρυθμιστεί το pH του κάθε διαλύματος τοποθετούνται 0,6g δείγματος σε μια κωνική φιάλη και 20ml από το κάθε διάλυμα και αναδεύονται στα 150rpm για 24h. Μετά το τέλος της ανάδευσης γίνεται ξανά μέτρηση του pH σε κάθε δείγμα και σχεδιάζεται το διάγραμμα του pH τελικό σε συνάρτηση με το pH αρχικό. Το σημείο μηδενικού φορτίου κάθε δείγματος απεικονίζεται εκεί που τέμνει την ευθεία  $\text{pH}_{\text{τελ}} = \text{pH}_{\text{initial}}$ . Τα διαγράμματα αυτά παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β.

### 3.5.1.5 Προσδιορισμός κατιοντοανταλλακτικής ικανότητας (CEC – cationexchange capacity)

Η κατιοντοανταλλακτική ικανότητα προσδιορίζει το βαθμό δέσμευσης θρεπτικών συστατικών στο δείγμα. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι η 9081 της USEPA (1986) και οι μονάδες μέτρησης είναι  $\text{cmol Na}^+/\text{kg}$  δείγματος. Αρχικά ζυγίζεται 1g δείγματος (έδαφος, κόμπποστ, βιοεξανθράκωμα) και τοποθετείται σε φυγοκεντρικό σωλήνα (για κάθε δείγμα έγιναν 3 επαναλήψεις). Στη συνέχεια σε κάθε φυγοκεντρικό σωλήνα προστίθενται 8,25ml  $\text{NaOAc}$  1M, γίνεται ανάδευση του μίγματος για 5min στα 150rpm και συνεχίζει στη φυγόκεντρο για 10 min στα 4000rpm. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται 3 φορές μετά την απομάκρυνση του υγρού. Ακολουθεί το δεύτερο στάδιο με προσθήκη 8,25ml ισοπροπυλικής αλκοόλης στο μίγμα το οποίο δημιουργήθηκε με ανάδευση και την ίδια διαδικασία φυγοκέντρωσης. Σε αυτό το στάδιο πραγματοποιούνται 2 επαναλήψεις. Στο τελευταίο στάδιο που ακολούθησε έγινε προσθήκη 8,25ml  $\text{NH}_4\text{OAc}$  1M στο υπόλειμμα το οποίο προέκυψε από το δεύτερο στάδιο και αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται δυο φορές. Στη συνέχεια συλλέγεται το υγρό από τις τρεις επαναλήψεις διηθείται και τοποθετείται σε ογκομετρική φιάλη 25ml όπου γίνεται προσθήκη  $\text{NH}_4\text{OAc}$  μέχρι τη χαραγή.

Τέλος, η συγκέντρωση του  $\text{Na}^+$  στα διαλύματα μετρήθηκε σε σύστημα Φασματομετρίας ατομικών μαζών σε επαγωγικά συζευγμένο πλάσμα (ICP-MS) του οίκου Agilent μοντέλο CX 7500 series στο εργαστήριο Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης.

### 3.5.1.6 Προσδιορισμός μετάλλων

Για τον προσδιορισμό μετάλλων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος χώνευσης με μικροκύματα του οργάνου Mars 6 της CEM Corporation ώστε να υπάρχει πλήρης διαλυτοποίηση των δειγμάτων μας λόγω υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης. Μετρήθηκε 0,1g από κάθε δείγμα και προστέθηκαν 10ml νιτρικού οξέος ( $\text{HNO}_3$ ) και τοποθετήθηκαν σε ειδικά φιαλίδια από teflon τα οποία σφραγίζονται ώστε να μην υπάρχει διαρροή. Η όλη διαδικασία διαρκούσε 1h στους  $210^\circ\text{C}$  και χρειαζόνταν επιπλέον 30 λεπτά ώστε να πέσει η θερμοκρασία και να γίνει αποθήκευση των δειγμάτων (υπήρχε δυνατότητα ταυτόχρονης χώνευσης 12 δειγμάτων την φορά). Τέλος η ολική συγκέντρωση των μετάλλων K, Ca, Mg, Cu, Cr, Ni, As, Mo, Hg, Pb, Co, Si, Se, Cd στα δείγματα μετρήθηκε στο icp-ms του εργαστηρίου της εταιρείας Agilent και μοντέλου CX 7500 series, στο εργαστήριο Υδρογεωχημικής Μηχανικής και αποκατάστασης εδαφών της Σχολής Χημικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης.



**Εικόνα 12:** Όργανο χώνευσης με μικροκύματα Mars 6 με τα 12 vessel.

### 3.5.1.7 Προσδιορισμός Ολικού Οργανικού Άνθρακα (TOC)

Ο Ολικός Οργανικός Άνθρακας (TOC -  $\text{C}_{\text{org}}$ ) υπολογίζεται ως η διαφορά του ολικού άνθρακα (TC) και ανόργανου άνθρακα (IC -  $\text{C}_{\text{inorg}}$ ):

$$\text{TOC} = \text{TC} - \text{IC}$$

Ο προσδιορισμός του ολικού άνθρακα (TC) και ανόργανου άνθρακα (IC) πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το όργανο SSM-5000A, Solid sample module της SHIMADZU. Το δείγμα εισάγεται στο σωλήνα καύσης στους 900°C που περιέχει έναν καταλύτη ο οποίος αποτελείται από μίγμα Pt και Co, ο TC οξειδώνεται στους 900°C και σχηματίζεται το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>). Έπειτα το οξυγόνο ρέει στο σωλήνα καύσης, παραλαμβάνει τα προϊόντα της διαδικασίας και τα οδηγεί στον αφυγραντήρα όπου ξηραίνονται. Τέλος το φέρον αέριο οδηγείται στον ανιχνευτή IR όπου ανιχνεύεται το διοξείδιο του άνθρακα. Για τον προσδιορισμό του ανόργανου άνθρακα (IC) το δείγμα οξινίζεται με φωσφορικό οξύ H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> ώστε το pH<3 για την μετατροπή των ανθρακικών αλάτων που υπάρχει στο δείγμα σε διοξείδιο του άνθρακα και καίγεται στους 200°C. Το παραγόμενο διοξείδιο του άνθρακα για το TC και το IC μεταφέρεται με το φέρον αέριο στον ανιχνευτή IR και ανιχνεύεται.



**Εικόνα 13:** Όργανο προσδιορισμού TOC SSM-5000A.

#### 3.5.1.8 Στοιχειακή Ανάλυση

Η στοιχειακή ανάλυση των δειγμάτων εδάφους, κόμποστ και βιοεξανθρακώματος (επί ξηρού) πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Επεξεργασία & Διαχείριση Τοξικών και Επικίνδυνων Αποβλήτων της Σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης. Προσδιορίστηκε η περιεκτικότητα των βασικών χημικών στοιχείων όπως άνθρακας (C), άζωτο (N) και υδρογόνο (H) στα δείγματα. Η συσκευή στην οποία πραγματοποιήθηκε η ανάλυση CHNS-O Elemental Analysis είναι η Euro Vector EA 3000. Ακολούθησε η παρακάτω διαδικασία όπου σε μια κάψα κασσιτέρου τοποθετήθηκαν 2mg δείγματος, διπλώθηκε σε σχήμα κύβου και τοποθετήθηκε στον κυλινδρικό δειγματολήπτη και οδηγήθηκε στο εσωτερικό του οργάνου. Η κάψα καίγεται στη στήλη χαλαζία παρουσία Οξυγόνου και Ηλίου. Τα παραγόμενα συστατικά καύσης ανιχνεύονται από τον ανιχνευτή θερμικής καύσης.

#### 3.5.1.9 Προσδιορισμός συγκεντρώσεων Ολικού Φωσφόρου

Για τον προσδιορισμό του ολικού φωσφόρου ακολουθήθηκε η μέθοδος των Enders & Lehmann (2012). Αρχικά ζυγίστηκε 1g από το κάθε δείγμα τα οποία τοποθετήθηκαν σε φούρνο High Therm της εταιρείας Linn στους 500°C για 8h

έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί η καύση. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε χώνευση του υπολείμματος σε μάτι φούρνου στους 120°C με προσθήκη  $\text{HNO}_3$  μέχρι τελικού όγκου 1ml. Στη συνέχεια το αφήναμε να κρυώσει και γινόταν προσθήκη απιονισμένου νερού περίπου 12 ml. Το δείγμα μεταφερόταν σε πλαστικά falcon και γινόταν φυγοκέντρωση για 4min στα 4000rpm. Ακολουθούσε διήθηση με φίλτρο μεμβράνης σε σύριγγα 0.45  $\mu\text{m}$ , ρύθμιση του pH στην ουδέτερη περιοχή και αραίωση μέχρι τα 25ml. Για τη μέτρηση του φωσφόρου P ακολουθήθηκε η πρότυπη μέθοδος 4500-P Ascorbic Acid Method [APHA, 1992] η οποία πραγματοποιήθηκε με τη χρήση combined reagent που παρασκευάστηκε στο εργαστήριο. Ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης του ολικού φωσφόρου έγινε φασματοφωτομετρικά σε μήκος κύματος 880nm με χρήση του φασματοφωτόμετρου UV-1202 του οίκου Shimadzu.



**Εικόνα 14:** Προετοιμασία δειγμάτων μέτρησης φωσφόρου.

#### **3.5.1.10 Προσδιορισμός συγκεντρώσεων Διαθέσιμου Φωσφόρου (P-Olsen)**

Ο προσδιορισμός του διαθέσιμου φωσφόρου περιλαμβάνει δυο στάδια: την εκχύλιση των στερεών υλικών και τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης των  $\text{PO}_4^{3-}$  στο εκχύλισμα. Για την εκχύλιση ζυγίστηκαν 2,5g από το κάθε δείγμα τοποθετήθηκαν σε κωνική φιάλη μαζί με 50mL διαλύματος  $\text{NaHCO}_3$  0.5M το οποίο παρασκευάστηκε στο εργαστήριο και είχε προηγηθεί ρύθμιση του pH του στο 8.5 με χρήση  $\text{NaOH}$  5N. Έγινε ανάδευση του αιωρήματος για 30min στα 150 rpm. Μετά το πέρας της ανάδευσης το αιώρημά συλλέχθηκε σε ειδικά πλαστικά δοχεία falcon, φυγοκεντρήθηκε για 4min στα 4000 rpm και διηθήθηκε με φίλτρο μεμβράνης σε σύριγγα με μέγεθος πόρων 0.45  $\mu\text{m}$ . Ακολουθήθηκε η πρότυπη μέθοδος 4500-P Ascorbic Acid Method [APHA, 1992] και ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης του διαθέσιμου P μετρήθηκε φασματοφωτομετρικά σε μήκος κύματος 880nm με χρήση του φασματοφωτόμετρου UV-1202 του οίκου Shimadzu.

#### **3.5.1.11 Προσδιορισμός διαθέσιμων συγκεντρώσεων N ( $\text{NO}_3\text{-N}$ και $\text{NH}_4\text{-N}$ )**

Για τον προσδιορισμό των διαθέσιμων συγκεντρώσεων N πραγματοποιήθηκε η διαδικασία που περιγράφεται από τους Singh et al., (2017). Αρχικά ζυγίστηκαν 2,5g από το κάθε δείγμα και τοποθετήθηκαν σε κωνική φιάλη με προσθήκη 25mL KCl 2M και το αιώρημα αναδεύτηκε για 1h. Μεταφέρθηκαν στη φυγόκεντρο όπου έγινε φυγοκέντρωση για 4 min στα 4000 rpm και ακολούθησε η διήθηση τους με φίλτρο μεμβράνης σε σύριγγα με μέγεθος πόρων 0.45  $\mu\text{m}$ . Για τον προσδιορισμό των  $\text{NO}_3\text{-N}$  χρησιμοποιήθηκε το kit αντιδραστηρίων Nitrate cell test 1-65 της Macherey Nagel, ενώ για τον προσδιορισμό των  $\text{NH}_4\text{-N}$  χρησιμοποιήθηκε το kit αντιδραστηρίων Ammonium test της Merck. Οι συγκεντρώσεις προσδιορίστηκαν φασματοφωτομετρικά σε μήκος κύματος 345nm για  $\text{NO}_3\text{-N}$  και σε 690nm για  $\text{NH}_4\text{-N}$  με χρήση του φασματοφωτόμετρου UV-1202 του οίκου Shimadzu. Οι υπολογισμοί των συγκεντρώσεων  $\text{NO}_3\text{-N}$  και  $\text{NH}_4\text{-N}$  πραγματοποιούνται μέσω των αντίστοιχων καμπυλών βαθμονόμησης.

#### **3.5.2 Ανάλυση στα εδαφικά δείγματα**

##### **Λειοτρίβηση/Ξήρανση εδαφικών δειγμάτων**

Μετά το πέρας της καλλιέργειας των μαρουλιών πραγματοποιήθηκε η συγκομιδή τους και έγινε ο διαχωρισμός των εδαφικών δειγμάτων από τους φυτικούς ιστούς. Τα εδαφικά δείγματα αεροξηράνθηκαν για 10 μέρες σε εξωτερικό χώρο στη συνέχεια αποθηκεύτηκαν σε ειδικά σκευή και οδηγήθηκαν στο φούρνο ξήρανσης στους 68° C για 24h. Τέλος πέρασαν από κόσκινο διαμέτρου 10 mm και 2 mm και προετοιμάστηκαν για τις μετρήσεις που ακολούθησαν.

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις των εδαφικών δειγμάτων φαίνονται παρακάτω και ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία όπως περιγράφεται στην Παράγραφο 3.4.1:

- Προσδιορισμός pH – Αγωγιμότητας
- Προσδιορισμός μετάλλων
- Προσδιορισμός Ολικού Οργανικού Άνθρακα (TOC)
- Προσδιορισμός συγκεντρώσεων Διαθέσιμου Φωσφόρου (P- Olsen)
- Προσδιορισμός διαθέσιμων συγκεντρώσεων N ( $\text{NO}_3\text{-N}$  και  $\text{NH}_4\text{-N}$ )

#### **3.5.3 Ανάλυση στους Φυτικούς Ιστούς**

##### **Λειοτρίβηση/Ξήρανση φυτικών ιστών**

Πραγματοποιήθηκε ο διαχωρισμός εδαφικών δειγμάτων από τους φυτικούς ιστούς. Οι φυτικοί ιστοί μετά την ξήρανση οδηγήθηκαν σε ηλεκτρικό τεμαχιστή έως ότου γίνουν σκόνη και να αποθηκευτούν για να χρησιμοποιηθούν στις παρακάτω αναλύσεις.

### 3.5.3.1 Προσδιορισμός συγκεντρώσεων Ολικού Φωσφόρου

Για τον προσδιορισμό του ολικού φωσφόρου ακολουθήθηκε διαφορετική μέθοδος στους φυτικούς ιστούς. Ζυγίστηκε 1g από κάθε δείγμα και τοποθετήθηκε στο φούρνο High Therm της εταιρείας Linn στους 500°C για 5h έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί η καύση. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε προσθήκη HCL 1N και θέρμανση έως ότου διαλυτοποιηθεί η στάχτη. Μεταφέρθηκαν σε πλαστικά falcon και πραγματοποιήθηκε φυγοκέντρηση για 3min στα 4000rpm. Το τελικό μίγμα διηθήθηκε με φίλτρο μεμβράνης σε σύριγγα με μέγεθος πόρων 0.45  $\mu\text{m}$  και στη συνέχεια έγινε ρύθμιση του pH στην ουδέτερη περιοχή και αραίωση μέχρι τα 25ml. Για τη μέτρηση του φωσφόρου P ακολουθήθηκε η πρότυπη μέθοδος 4500-P Ascorbic Acid Method [APHA, 1992] και ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης του μετρήθηκε φασματοφωτομετρικά σε μήκος κύματος 880nm με χρήση του φασματοφωτόμετρου UV-1202 του οίκου Shimadzu. Για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης δημιουργήθηκε καμπύλη βαθμονόμησης Παράρτημα Α.

### 3.5.3.2 Προσδιορισμός μετάλλων στους φυτικούς ιστούς

Για τον προσδιορισμό μετάλλων στους φυτικούς ιστούς ακολουθήθηκε διαφορετική διαδικασία από εκείνη των εδαφικών δειγμάτων. Αρχικά ζυγίστηκε 0,5g από κάθε δείγμα, τοποθετήθηκε σε ποτηράκια ζέσεως και με προσθήκη πυκνού  $\text{HNO}_3$  έγινε χώνευση σε μάτι φούρνου στους 120°C για 2 ώρες. Μεταφέρθηκαν σε πλαστικά falcon και πραγματοποιήθηκε φυγοκέντρηση για 3min στα 4000rpm. Το τελικό μίγμα διηθήθηκε με φίλτρο μεμβράνης σε σύριγγα με μέγεθος πόρων 0.45  $\mu\text{m}$  και αποθηκεύτηκαν σε ειδικά γυάλινα σκεύη. Η ολική συγκέντρωση των μετάλλων K, Ca, Mg, Cu, Cr, Ni, As, Mo, Hg, Pb, Co, Si, Se, Cd στα δείγματα μετρήθηκε στο icp-ms του εργαστηρίου της εταιρείας Agilent και μοντέλου CX 7500 series, στο εργαστήριο Υδρογεωχημικής Μηχανικής και αποκατάστασης εδαφών της Σχολής Χημικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης.



**Εικόνα 15:** Χώνευση δειγμάτων.



**Εικόνα 16:** Τελικό διηθημένο δείγμα.

### 3.5.3.3 Προσδιορισμός Ολικού Αζώτου

Για τον προσδιορισμό του ολικού αζώτου στους φυτικούς ιστούς ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία. Αρχικά ζυγίστηκαν σε ποτηράκια ζέσεως 0,25g από το κάθε δείγμα. Στη συνέχεια έγινε προσθήκη 5ml  $H_2SO_4$  και 10 σταγόνες  $H_2O_2$  και τοποθετήθηκαν για βράσιμο στους 350°C για 30 min. Μετά από κάθε 30 min γινόταν προσθήκη 10 σταγόνων υπεροξειδίου. Έγινε επανάληψη της διαδικασίας συνολικά 3 φορές. Μετά το πέρας των επαναλήψεων μεταφέρθηκαν σε πλαστικά falcon έγινε αραίωση των δειγμάτων μέχρι τα 20ml και φυγοκεντρήθηκαν. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε το kit έτοιμων αντιδραστηρίων με κωδικό 1.14763.0001 της εταιρείας SUPELCO, το οποίο περιλαμβάνει χώνευση σε 2ml δείγματος με 8ml απιονισμένου νερού και χρήση έτοιμων αντιδραστηρίων στους 120°C σε ηλεκτρικό θερμαντήρα για 1h. Τέλος για τη μέτρηση του ολικού αζώτου 1ml χωνευμένου δείγματος τοποθετείται σε ειδικά φιαλίδια από το kit με τα κατάλληλα αντιδραστήρια και γίνεται μέτρηση στο φωτόμετρο Spectroquant NOVA 60 της εταιρείας MERCK. Στις συγκεκριμένες αναλύσεις για την συγκέντρωσή του ολικού αζώτου στους φυτικούς ιστούς δεν πραγματοποιήθηκαν επαναλήψεις λόγω περιορισμένων kit.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 4.1 Χαρακτηρισμός αρχικών δειγμάτων.

Στον χαρακτηρισμό των αρχικών δειγμάτων πραγματοποιήθηκε μια σειρά φυσικοχημικών αναλύσεων για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων τους. Στον Πίνακα 4-1 αναγράφονται οι ιδιότητες των δειγμάτων σχετικά με το pH, το σημείο μηδενικού φορτίου (pH-PZC), την αγωγιμότητα, την απόδοση, την τέφρα και την φαινόμενη πυκνότητα. Ακολουθεί η κατιοντοανταλλακτική μέτρηση κάθε δείγματος, ο προσδιορισμός ολικού άνθρακα, ο προσδιορισμός συγκεντρώσεων ολικού και διαθέσιμου φωσφόρου και συγκεντρώσεων διαθέσιμου αζώτου και τέλος η στοιχειακή ανάλυση δηλαδή η περιεκτικότητα των δειγμάτων σε H, N.

**Πίνακας 4.1:** Χαρακτηριστικά των αρχικών δειγμάτων, χώμα, κόμποστ, βιοεξανθράκωμα.

Χαρακτηριστικά	Soil	Compost	Biochar
pH	7,50 ±0,16	8,03 ±0,01	8,45 ±0,15
pH-PZC	7,67	7,67	8
EC (mS/cm)	0,56 ±0,00	9,47 ±0,20	9,78 ±0,11
Yield (%)	-	-	84%
Τέφρα (%)	84,56%	72,76%	56,28%
Φαινόμενη Πυκνότητα (g/ml)	1,06 ±0,02	1,52 ±0,00	0,85 ±0,03
CEC (cmol/kg)	4,93 ±0,08	13,11 ±0,97	11,19 ±0,09
C <sub>org</sub> (%)	2,42	21,53	22,31
C <sub>inorg</sub> (%)	1,27	3,88	2,12
Olsen-P (mg/kg)	30,30 ±2,53	34,83 ±1,73	181,08
Ολικός P (mg/kg)	123,69±59,61	161,54 ±76,67	192,24
NO <sub>3</sub> -N (mg/kg)	8,23 ±4,00	81,27 ±1,60	38,26 ±1,74
NH <sub>4</sub> -N (mg/kg)	70,81 ±9,50	60,05 ±5,70	94,19 ±11,41
N (%)	0,57	2,83	2,81
H (%)	0,79	2,27	2,41
C (%)	8,17	27,18	35,62

Οι τιμές του pH για το χώμα και το κόμποστ προσδιορίστηκαν 7,50 και 8,03 αντίστοιχα ενώ του βιοεξανθρακώματος είναι λίγο πιο αυξημένο με pH=8,45. Το pH επηρεάζεται κυρίως από την θερμοκρασία της πυρόλυσης γι' αυτό τείνει να είναι πιο αλκαλικό στο βιοεξανθράκωμα. Σύμφωνα με τον Sharma (2020) το pH της αρχικής βιομάζας εμφανίζει τιμές από 5 - 7,5 ενώ τα βιοεξανθρακώματα μπορούν να εμφανίσουν τιμές pH από 3,7 - 12,7. Στην ανάλυση του σημείου μηδενικού φορτίου παρατηρείται ότι μόνο το χώμα παρουσιάζει pH μικρότερο από το PZC του αυτό σημαίνει ότι κάτω από την τιμή του το έδαφος διατηρεί κυρίως ανιόντα ενώ το κόμποστ και το βιοεξανθράκωμα παρουσιάζουν ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων [Appel et al., 2003].

Στην ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) του κόμποστ και του βιοεξανθρακώματος εμφανίστηκαν παρόμοιες τιμές 9,47 και 9,78 mS/cm αντίστοιχα. Αντιθέτως το χώμα εμφάνισε αρκετά χαμηλή τιμή 0,56 mS/cm το οποίο αποδεικνύει ότι το έδαφος αυτό είναι πιο ευνοϊκό για καλλιέργεια και ανάπτυξη φυτών. Η EC σε ένα έδαφος καθορίζει την ανάπτυξη και την ποιότητα των καλλιεργειών. Οι Huang et al. (2017) στο πείραμά τους παρουσίασαν EC=3,20 mS/cm ιλύος και EC=1,30 mS/cm βιοεξανθρακώματος με θερμοκρασία πυρόλυσης 300°C, λίγο μικρότερη από την αρχική βιομάζα. Οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας επηρεάζονται από των τύπο των αρχικών βιομαζών, τις συνθήκες πυρόλυσης και το ποσοστό τέφρας της αρχικής βιομάζας.[Aller, 2016].

Το yield προσδιορίζει την απόδοση πυρόλυσης του βιοεξανθρακώματος το οποίο υπολογίστηκε στο 84%. Η απόδοση του βιοεξανθρακώματος οφείλεται κυρίως στην θερμοκρασία της πυρόλυσης. Τα βιοεξανθρακώματα σε 300°C (αργή πυρόλυση) έχουν καλύτερη απόδοση από κείνα με θερμοκρασίες >600 °C λόγω των πτητικών ενώσεων που απελευθερώνονται με συνέπεια να μειώνεται η παραγωγή του κλάσματος [Βοσνάκη ,2021]. Σε άλλη έρευνα που πραγματοποιήθηκε από τον Μοναχό Μάριου (2020) για παραγωγή βιοεξανθρακώματος από φύλλα φοίνικα και βιοεξανθράκωμα από υπόλειμμα ραφιναρίας μέσω πυρόλυσης σε διάφορες θερμοκρασίες από 200°C-800°C, διαπιστώθηκε ότι υπάρχει μείωση της απόδοσης τους βιοεξανθρακώματος με την αύξηση της θερμοκρασίας και στις δυο περιπτώσεις.

Η μέτρηση που πραγματοποιήθηκε για το περιεχόμενο της τέφρας στο κόμποστ και στο βιοεξανθράκωμα έδειξε αποτελέσματα 72,76% και 56,28% αντίστοιχα, με το κόμποστ να παρουσιάζει 22% περισσότερη τέφρα απ' αυτήν του βιοεξανθρακώματος. Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν τις μετρήσεις αυτές στο βιοεξανθράκωμα είναι η θερμοκρασία πυρόλυσης και ο τύπος βιομάζας. Τα βιοεξανθρακώματα σε υψηλές θερμοκρασίες παρουσιάζουν μεγαλύτερα ποσοστά τέφρας. Το biochar στη συγκεκριμένη έρευνα προήλθε μέσω της διεργασίας της πυρόλυσης σε σχετικά χαμηλή θερμοκρασία (300°C) με αρχικό τύπο βιομάζας το κόμποστ, κατά συνέπεια είναι λογικό να προκύπτει ένα τελικό προϊόν με λιγότερο σε ποσοστό τέφρας λόγω του ότι δεν υπήρξε σταδιακή συγκέντρωση υπολειμμάτων σε καύση ώστε να αυξήσουν την περιεκτικότητα σε τέφρα [Cao and Harris, 2010].

Στους υπολογισμούς της φαινόμενης πυκνότητας παρατηρήθηκε ότι οι τιμές των αρχικών δειγμάτων δεν διέφεραν πολύ μεταξύ τους. Ανάλογα με τον τύπο εδάφους και το πορώδες εφαρμόζονται κάποια όρια, τα οποία κυμαίνονται για αργιλώδη εδάφη <1,4 g/cm<sup>3</sup> και για αμμώδη <1,6 g/cm<sup>3</sup>. Οι υψηλές θερμοκρασίες πυρόλυσης δημιουργούν πορώδες και βελτιώνουν την επιφάνεια του εδάφους. Τα αργιλώδη εδάφη παρουσιάζουν υψηλές τιμές πορώδους αλλά συνήθως θεωρούνται ακατάλληλα για αρκετές καλλιέργειες λόγω κακού αερισμού [geo-analysis,2022]. Στη συγκεκριμένη περίπτωση παρατηρείται ότι η τιμή του κόμποστ είναι ελάχιστα πιο πάνω απ' τα επιτρεπτά όρια, το οποίο δεν θα επηρεάσει διότι θα χρησιμοποιηθεί σε διάφορες μικρές αναλογίες.

Στη συνέχεια ακολούθησε η μέτρηση της ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων (CEC), η οποία είναι μια ακόμα μέθοδος χαρακτηρισμού των δειγμάτων και κυρίως του βιοεξανθρακώματος. Στις παραπάνω μετρήσεις παρατηρείται ότι το βιοεξανθράκωμα παρουσιάζει χαμηλότερη τιμή από το κόμποστ. Μελέτες έχουν δείξει ότι ο τύπος βιομάζας είναι ένας παράγοντας που επηρεάζει κατά πολύ την ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων των βιοεξανθρακωμάτων [Silber et al., 2010]. Στα πειράματα της Aller (2016), τα βιοεξανθρακώματα από φύκη και απόβλητα παρουσίασαν υψηλότερες τιμές CEC συγκρίνοντας με τα βιοεξανθρακώματα από το κέλυφος καρυδιών και βιομάζα εμπλουτισμένη σε λιγνίνη. Σε ερευνά τους οι Mia et al. (2017) και οι Banik et al. (2018) παρατηρούν

μειωμένες τιμές CEC σε φρέσκα βιοεξανθρακώματα ενώ με την πάροδο του χρόνου παραμένοντας το βιοεξανθράκωμα στο έδαφος παρουσιάζει αυξητική τάση τόσο το pH όσο και η CEC. Σύμφωνα επίσης με τους Mukherjee et al. (2011) και τους Banik et al. (2018) η CEC των βιοεξανθρακωμάτων μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας της πυρόλυσης και αυξάνεται με το pH, συμπεραίνοντας ότι είναι αρκετά σημαντικές οι συνθήκες παραγωγής του βιοεξανθρακώματος. Η μέτρηση στο χώμα παρατηρήθηκε αρκετά χαμηλή που ίσως αποδεικνύει ότι δεν έχει την δυνατότητα να συγκρατεί αρκετά θρεπτικά συστατικά.

Επόμενη μέτρηση ήταν να εξετάσουμε τα ποσοστά του ολικού οργανικού άνθρακα των δειγμάτων με την μέθοδο προσδιορισμού που προαναφέρθηκε στο πειραματικό μέρος. Το βιοεξανθράκωμα εμφάνισε ποσοστό οργανικού άνθρακα κατά 2% πιο αυξημένο σε σχέση με το κόμπποστ που ήταν η βιομάζα. Στην έρευνα που πραγματοποιήθηκε από την Βέλλη (2019), ο  $C_{org}$  του βιοεξανθρακώματος που παράχθηκε από πυρόλυση στους 300°C εμφάνισε τριπλάσια μείωση σε σχέση με την αρχική βιομάζα που ήταν λυματολάσπη ενώ σε αντίθετη περίπτωση στα πειράματα της Μουργέλα (2021) με τον ίδιο τύπο αρχικής βιομάζας αλλά σε υψηλότερη θερμοκρασία πυρόλυσης 400°C, ο οργανικός άνθρακας του βιοεξανθρακώματος είχε αρκετά υψηλότερη τιμή απ' την βιομάζα. Στην έρευνα του Μοναχού Μ. (2020) υπέδειξε ελάχιστη αύξηση στις μετρήσεις άνθρακα του βιοεξανθρακώματος σε σχέση με τη βιομάζα που ήταν φύλλα ραφηναρίας ενώ υπήρξε μεγαλύτερη αύξηση στην τιμή στο βιοεξανθράκωμα που προήλθε από φύλλα φοίνικα, με την ίδια θερμοκρασία πυρόλυσης στους 300°C και στις δυο περιπτώσεις. Είναι σημαντικό λοιπόν να τονιστεί ότι η βιομάζα και η θερμοκρασία πυρόλυσης κατέχουν τον σημαντικότερο ρόλο για τις μετρήσεις του οργανικού άνθρακα.

Η έρευνα επικεντρώθηκε περισσότερο στις παρακάτω μετρήσεις που θα αναλυθούν για τα αποτελέσματα του φωσφόρου και των διαθέσιμων συγκεντρώσεων αζώτου. Από τον πίνακα 4.1 παρατηρείται ότι οι συγκεντρώσεις του ολικού φώσφορου (P) είναι αρκετά υψηλότερες στα δείγματα συγκριτικά με τον διαθέσιμο (Olsen-P) πλην του βιοεξανθρακώματος που εμφανίζουν αρκετά κοντινές τιμές. Ο φώσφορος χρήζει ιδιαίτερης σημασίας στις καλλιέργειες διότι εκτός του ότι αποθηκεύει και μεταφέρει θρεπτικά συστατικά στο έδαφος μέσω μικροοργανισμών με άλλες μορφές (διαθέσιμου φωσφόρου) είναι μη ανανεώσιμος και αναντικατάστατος πόρος για την ανάπτυξη των φυτών. Σύμφωνα με τις έρευνες των Brewer et al. (2009), Cao & Harris, (2010) και Angst and Sohi (2013), τα βιοεξανθρακώματα είναι ικανές πηγές φωσφόρου καθώς εμφανίζουν υψηλότερες συγκεντρώσεις P σε σύγκριση με τα οργανικά υλικά που δεν έχουν υποστεί πυρόλυση, το οποίο επιβεβαιώνεται με τα αποτελέσματα για το βιοεξανθράκωμα στη συγκεκριμένη έρευνα. Επομένως το βιοεξανθράκωμα καθίσταται εδαφοβελτιωτικό σε πολλές καλλιέργειες.

Οι επόμενες μετρήσεις αφορούν την ποσότητα διαθέσιμου αζώτου μέσω νιτρικών ( $NO_3-N$ ) και αμμωνιακών ( $NH_4-N$ ). Τα αμμωνιακά είναι αρκετά αυξημένα σε σύγκριση με τα νιτρικά στα εδαφικά δείγματα πλην του κόμπποστ

του οποίου παρατηρείται να είναι πιο αυξημένα τα νιτρικά. Η νιτρική μορφή του αζώτου είναι αρκετά διαλυτή και ευκίνητη μέσα στο έδαφος και συμμετέχει σε πολλές αλληλεπιδράσεις [Δημητρέλος, 2021]. Οι κλιματικοί παράγοντες επηρεάζουν τις συγκεντρώσεις των νιτρικών, για παράδειγμα με την μείωση έντασης του ήλιου αυξάνονται οι συγκεντρώσεις των νιτρικών λόγω της έλλειψης αναγωγικής ικανότητας στο σκοτάδι του ενζύμου νιτρική ρεδοукτάση. [Τσεμπερούλη κ.α 2014]. Άλλη μια σημαντική παράμετρος είναι η πτώση της θερμοκρασίας που παρεμποδίζει την δράση του συγκεκριμένου ενζύμου και προκαλείται μεγάλη αύξηση των νιτρικών. Τα επιτρεπτά όρια συγκεντρώσεων των νιτρικών που έχουν προταθεί από την Ε.Ε και συγκεκριμένα για την καλλιέργεια του μαρουλιού είναι 4000 mg NO<sub>3</sub>-N/kg νωπής φυτικής ύλης για συγκομιδή το καλοκαίρι και 5000 mg NO<sub>3</sub>-N/kg για συγκομιδή το χειμώνα. Στα εδάφη με pH>7 το αμμωνιακό άζωτο εκλύεται ευκολότερα στην ατμόσφαιρα με αποτέλεσμα να παρεμποδίζεται η εδαφική συσσώρευση του αζώτου [Μαύρου, 2015]. Στα αποτελέσματα της έρευνας μας παρατηρείται χαμηλότερη τιμή στις συγκεντρώσεις αμμωνιακών για κόμπποστ και χώμα έναντι του βιοεξανθρακώματος τα οποία παρουσιάζει pH>8 .

Τέλος πραγματοποιήθηκαν οι στοιχειακές αναλύσεις για H , N και C. Από την στοιχειακή ανάλυση το σημαντικότερο στοιχείο για το βιοεξανθράκωμα είναι ο άνθρακας, ο οποίος εμφανίζει περίπου 23% υψηλότερη συγκέντρωση από την αρχική βιομάζα το κόμπποστ. Παρόμοια αποτελέσματα αυξημένου ποσοστού άνθρακα σε σχέση με την αρχική βιομάζα τους αναφέρονται και στην έρευνα της Μανωλικάκη (2018) για βιοεξανθρακώματα από σπόρους κριθαριού και μαγιά αντίστοιχα. Επιπρόσθετα και στην έρευνα του Μοναχού (2020) τα βιοεξανθρακώματα που παράχθησαν σε πυρόλυση 300° C από υπολείμματα ραφηναρίας και φύλλα φοίνικα εμφάνισαν υψηλότερα ποσοστά άνθρακα από την αρχική τους βιομάζα. Αντίθετα σε μετρήσεις που πραγματοποίησε για υψηλότερες θερμοκρασίες >400 °C παρατήρησε μείωση άνθρακα σε σύγκριση με το αρχικό υλικό.

Τα ποσοστά αζώτου και υδρογόνου εμφάνισαν παρόμοια αποτελέσματα για το κόμπποστ και το βιοεξανθράκωμα. Αντίστοιχα πανομοιότυπα αποτελέσματα για άζωτο και υδρογόνο στην αρχική βιομάζα από οργανικό κλάσμα απορριμάτων και στο βιοεξανθράκωμα στους 300° C παρατηρήθηκαν και στην έρευνα του Ρεγκούζα (2015).

#### **4.1.2 Προσδιορισμός μετάλλων και μεταλλοειδών στα αρχικά δείγματα.**

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για την περιεκτικότητα των μεταλλικών στοιχείων στο χώμα, κόμπποστ και βιοεξανθράκωμα. Οι τιμές που προέκυψαν για κάθε μέταλλο παρατίθενται στο παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας 4.2:** Συγκεντρώσεις μετάλλων και μεταλλοειδών στα αρχικά εδαφικά δείγματα.

<b>Μέταλλα</b> (mg μετάλλου/ kg εδάφους)	<b>Soil</b>	<b>Compost</b>	<b>Biochar</b>
<b>B</b>	39,62 ±4,80	64,31 ± 0,42	97,42 ±11,51
<b>Na</b>	1355 ±289,91	10965 ±530,33	12465 ±926,31
<b>Mg</b>	6330 ± 1272,79	9375 ±247,49	10555 ±926,31
<b>Al</b>	47535 ±4702,26	11060 ±820,24	13630 ±410,12
<b>K</b>	4215 ±205,06	7200 ±127,28	7925 ±586,90
<b>Ca</b>	58430 ±8584,28	147080 ±21298,06	180495 ±13244,11
<b>Cr</b>	78,07 ±13,87	79,83 ±7,57	107,28 ±42,70
<b>Mn</b>	637,85 ±136,22	236,66 ±16,24	282,47 ±25,04
<b>Fe</b>	23609,28 ±2389,84	7587,79 ±370,21	9389,50 ±97,39
<b>Co</b>	14,32 ±1,81	5,85 ±0,47	6,32 ±0,55
<b>Ni</b>	49,49 ±6,45	55,76 ±5,02	63,11 ±9,14
<b>Cu</b>	41,49 ±4,99	493,09 ±27,55	545,92 ±43,18
<b>Zn</b>	98,43 ±12,15	508,11 ±51,69	480,74 ±30,00
<b>As</b>	-	-	-
<b>Se</b>	-	-	-
<b>Mo</b>	8,29 ±4,54	77,45 ±105,32	4,1 ±0,10
<b>Cd</b>	-	-	-
<b>Hg</b>	4,04 ±4,66	1,09 ±0,04	0,48 ±0,23
<b>Pb</b>	87,76 ±3,76	337,01 ±12,79	369,09 ±33,79

Παρατηρείται ότι οι τιμές των μετάλλων του βιοεξανθρακώματος είναι αρκετά κοντινές με του κόμποστ. Η περιεκτικότητα του συγκεκριμένου βιοεξανθρακώματος αποτελείται κυρίως από ασβέστιο (Ca), και ακολουθούν άργιλος (Al), νάτριο (Na), μαγνήσιο (Mg), σίδηρος (Fe) και κάλιο (K). Η τιμή του αργίλου στα δείγματα και ιδιαίτερα στο χώμα είναι αυξημένη διότι τα προσροφητικά μέσα του εδάφους είναι συνήθως ανόργανα στοιχεία και ο άργιλος αποτελεί ένα απ' αυτά [Δημητρέλος,2021]. Σύμφωνα με την Aller (2016), τα μακροθρεπτικά (K, P, N, Ca, Mg, Na) και τα μικροθρεπτικά (Zn, Mn, Fe, Cu,) υπάρχουν στο βιοεξανθράκωμα σε άλλες μορφές (οξειδία, θειικά, πυριτικά, χλωριούχα, ανθρακικά και φωσφορικά άλατα) και η απελευθέρωση

αυτών μέσω της πυρόλυσης εξαρτάται από τον συνδυασμό δυο παραγόντων, την αποδόμηση των οργανικών ενώσεων της βιομάζας (λιγνίνη, κυτταρίνη, ημικυτταρίνη) και την αλληλεπίδραση των πτητικών συστατικών με το βιοεξανθράκωμα. Στην παρούσα έρευνα παρατηρείται ότι η διαδικασία της πυρόλυσης δεν επηρέασε τις χημικές ιδιότητες του κόμποστ. Επιπρόσθετα στα πειράματα του Μοναχού Μ. (2020) οι τιμές των μετάλλων στα βιοεξανθράκωματα από υπόλειμμα ραφηναρίας και από φύλλα φοίνικα ήταν αρκετά κοντινές με τις τιμές των βιομαζών τους, αντιθέτως οι τιμές μετάλλων για το soil ήταν εμφανώς πιο χαμηλές όπως παρατηρείτε και στην παρούσα έρευνα. Αποδεικνύει ότι το χώμα έχει ανάγκη από θρεπτικά στοιχεία το οποίο θα επιτευχθεί με την προσθήκη εδαφοβελτιωτικού.

Αξίζει να σημειωθεί ότι και στα τρία δείγματα την μεγαλύτερη περιεκτικότητα μακροθρεπτικών την εμφάνισε το ασβέστιο (Ca) ενώ μικροθρεπτικών ο σίδηρος (Fe) με ιδιαίτερα υψηλή τιμή στο χώμα. Τα βαρέα μέταλλα (Cd, Co, Cr, Ni, Pb, Se) εμφανίζουν αρκετά χαμηλές συγκεντρώσεις έως και μη μετρήσιμες με εξαίρεση τον μόλυβδο που εμφάνισε λίγο πιο αυξημένη συγκέντρωση το οποίο ίσως να οφείλεται σε πειραματικό σφάλμα. Στην περίπτωση μεγάλων συγκεντρώσεων θα δημιουργούσαν ρύπανση στο έδαφος και τοξικότητα στα φυτά. Σύμφωνα με έρευνες των Cao et al. (2009), Lu et al. (2012), Regmi et al. (2012) τα βιοεξανθράκωματα ενδείκνυνται για την κατακράτηση βαρέων ή και σπάνιων μετάλλων. Η πρόσληψη των βαρέων μετάλλων εξαρτάται από παράγοντες όπως η οργανική ύλη, το pH, το βαθμό που πραγματοποιείται η ιοντοανταλλαγή των ορυκτών του εδάφους και το είδος φυτού. [Δημητρέλος, 2021]. Είναι σημαντικό λοιπόν να μελετάται η περιεκτικότητα των μετάλλων στο έδαφος και στα φυτά για τις επιπτώσεις της ρύπανσης που μπορεί να προκύψουν στον ανθρώπινο οργανισμό. [Cui et al. 2021].

## 4.2 Αποτελέσματα Φυτικών Ιστών

Σ αυτό το κεφάλαιο αναλύεται η ανάπτυξη των φυτικών ιστών με τα διαγράμμά τους, με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Το ποσοστό μεταβολής ύψους του κορμού **ΠΜΥ(%)** και
- Το ποσοστό αύξησης αριθμού φύλλων **ΠΑΑΦ(%)**.

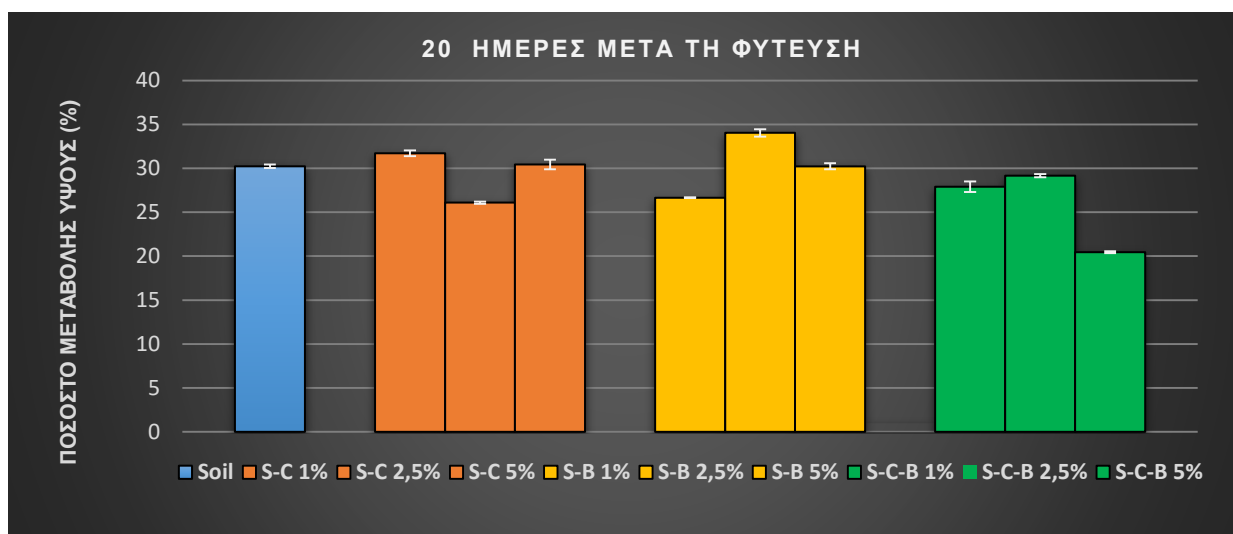
Επιπρόσθετα γίνεται επεξήγηση του διαγράμματος του ξηρού βάρους των κορμών. Στη συνέχεια αναλύονται τα αποτελέσματα των συγκεντρώσεων μέσω διαγραμμάτων του ολικού φωσφόρου και ολικού αζώτου σε σύγκριση με τα ξηρά βάρη των δοχείων τους αντίστοιχα. Τέλος σχολιάστηκαν οι πίνακες με τα αποτελέσματα των μετάλλων στους φυτικούς ιστούς. Στους παρακάτω Πίνακες και Διαγράμματα εμφανίζονται οι μετρήσεις που προέκυψαν από τον μέσο όρο κάθε μεταχείρισης.

#### 4.2.1 Ανάπτυξη Φυτικών Ιστών

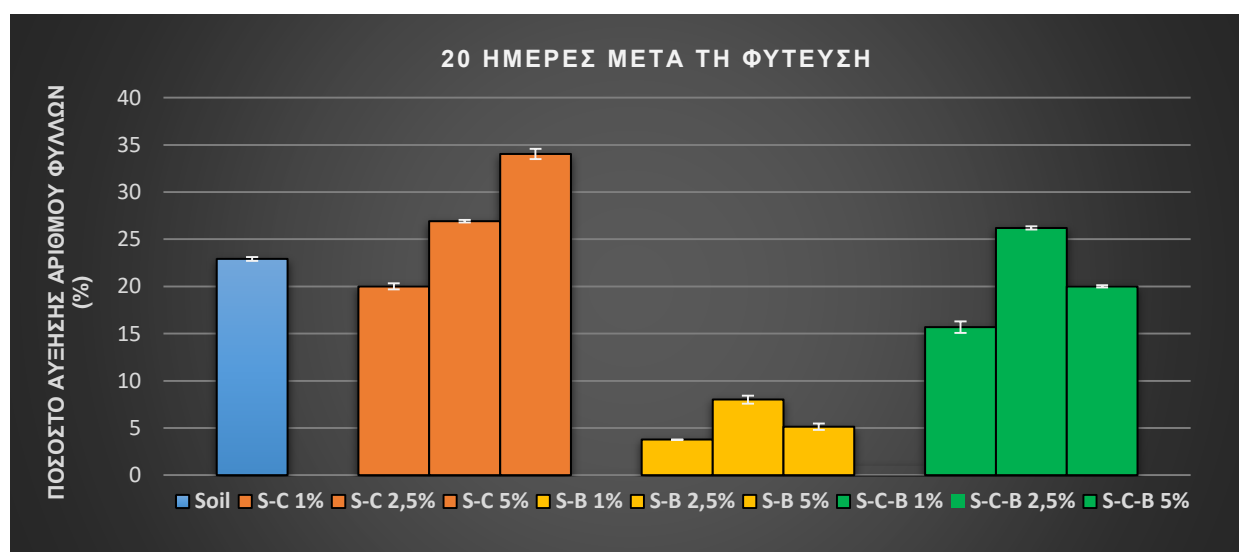
Καθ' όλη την διάρκεια της καλλιέργειας πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για των αριθμό φύλλων και του ύψους των φυτικών ιστών. Στους Πίνακες 4.3 και 4.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ποσοστών μεταβολής ύψους **ΠΜΥ(%)** και των ποσοστών αύξησης αριθμών φύλλων **ΠΑΑΦ(%)**.

**Πίνακας 4.3:** Ποσοστό μεταβολής ύψους και ποσοστό αύξησης αριθμών φύλλων **20** ημέρες μετά τη φύτευση.

Μεταχειρίσεις	ΠΜΥ(%)	ΠΑΑΦ(%)
<b>S</b>	30,23±11,19	22,92±7,53
<b>S-C 1%</b>	31,71±8,76	20,00±13,08
<b>S-C 2,5%</b>	26,09±10,26	26,93±21,00
<b>S-C 5%</b>	30,71±12,30	34,04±18,04
<b>S-B 1%</b>	26,67±9,34	3,74±27,55
<b>S-B 2,5%</b>	34,04±19,45	8,00±32,68
<b>S-B 5%</b>	30,24±19,02	5,13±16,67
<b>S-C-B 1%</b>	27,71±11,64	17,65±15,11
<b>S-C-B 2,5%</b>	29,17±8,17	26,19±22,17
<b>S-C-B 5%</b>	20,46±8,94	20,00±26,70



**Σχήμα 4.1:** Ποσοστό μεταβολής ύψους της καλλιέργειας (%) 20 ημέρες μετά τη φύτευση.



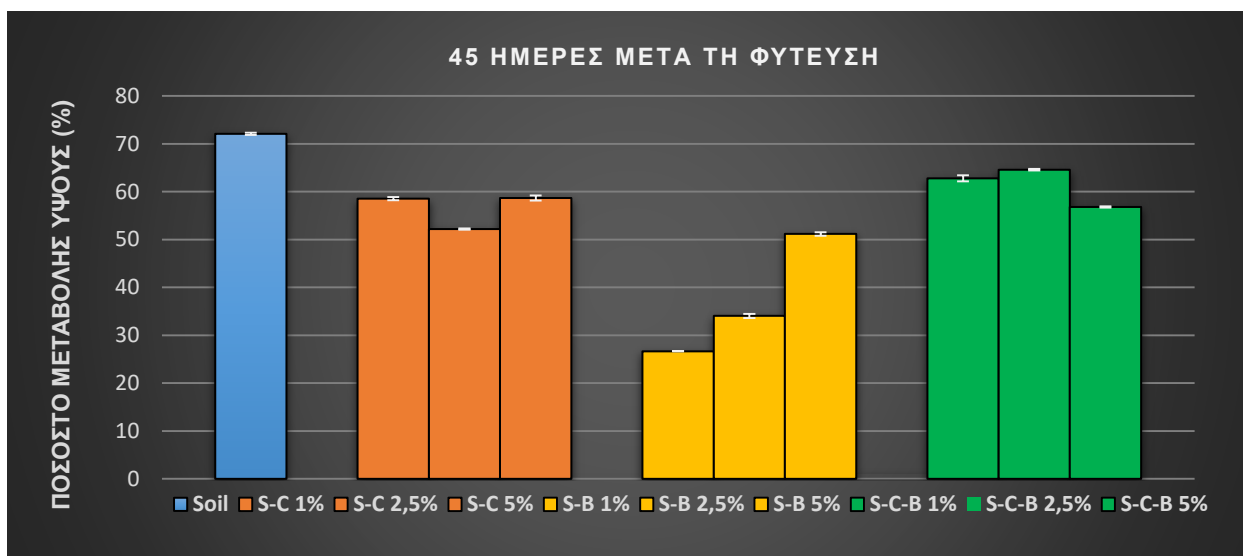
**Σχήμα 4.2:** Ποσοστό αύξησης αριθμού φύλλων της καλλιέργειας 20 ημέρες μετά τη φύτευση.



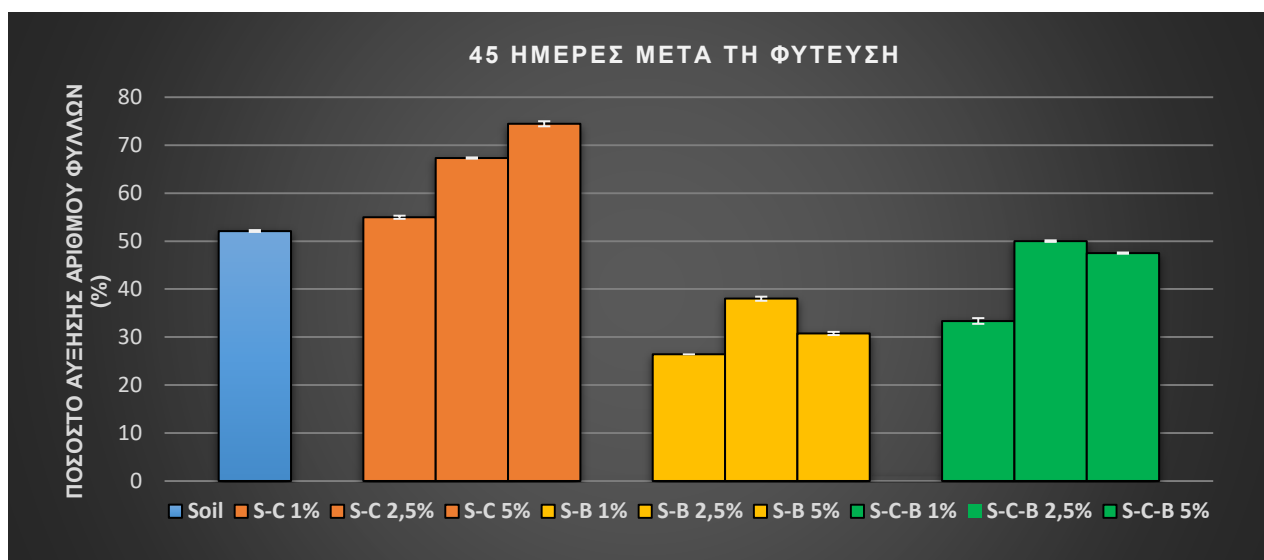
**Εικόνα 17:** Ανάπτυξη φυτών *Lactuca Sativa* L. 20 μέρες μετά τη φύτευση.

**Πίνακας 4.4:** Ποσοστό μεταβολής ύψους και ποσοστό αύξησης αριθμών φύλλων 45 ημέρες μετά τη φύτευση.

Μεταχειρίσεις	ΠΜΥ(%)	ΠΑΑΦ(%)
<b>S</b>	72,09±10,53	52,08±24,20
<b>S-C 1%</b>	58,54±12,95	55,00±19,90
<b>S-C 2,5%</b>	52,17±12,93	67,31±23,64
<b>S-C 5%</b>	58,70±17,56	74,47±20,00
<b>S-B 1%</b>	26,67±18,80	26,42±9,06
<b>S-B 2,5%</b>	34,04±23,35	38,00±17,81
<b>S-B 5%</b>	51,16±33,69	30,77±11,10
<b>S-C-B 1%</b>	62,79±26,64	33,33±29,77
<b>S-C-B 2,5%</b>	64,58±11,43	50,00±25,17
<b>S-C-B 5%</b>	56,82±10,52	47,50±44,13



**Σχήμα 4.3:** Ποσοστό μεταβολής ύψους (%) της καλλιέργειας 45 ημέρες μετά τη φύτευση.



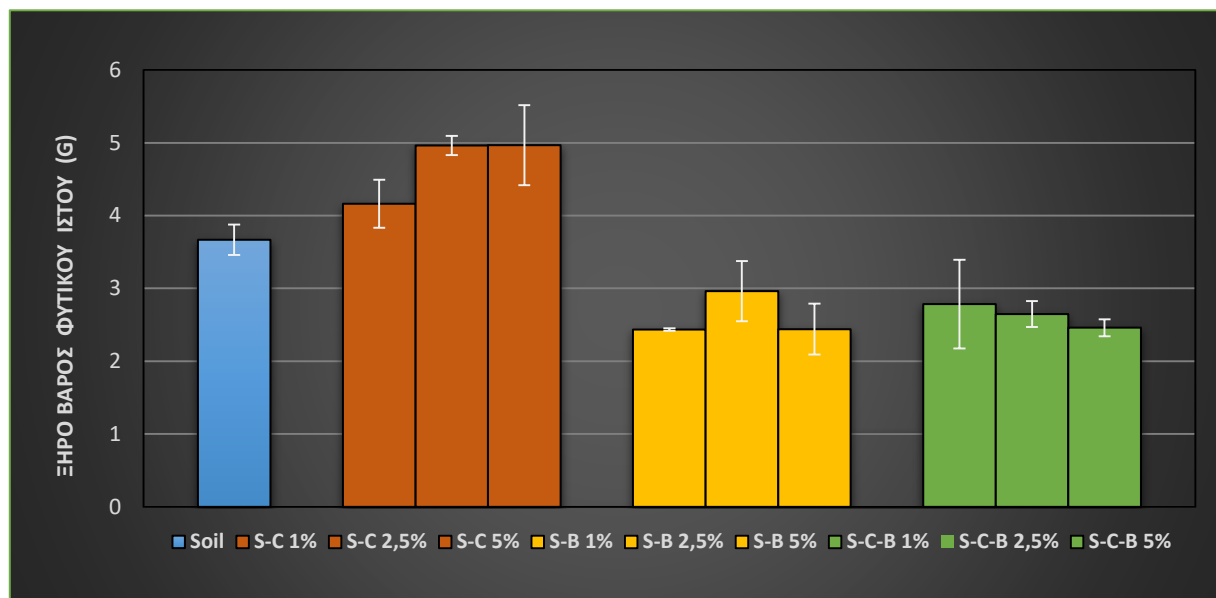
**Σχήμα 4.4:** Ποσοστό αύξησης αριθμού φύλλων (%) της καλλιέργειας 45 ημέρες μετά τη φύτευση.



**Εικόνα 18:** Ανάπτυξη φυτών *Lactuca Sativa L.* 45 μέρες μετά τη φύτευση.

Σε γενικές γραμμές παρατηρείται ότι η αυτοτελής προσθήκη βιοεξανθρακώματος δεν βοήθησε αρκετά την ανάπτυξη της καλλιέργειας σε σύγκριση με το κόμπποστ και τον συνδυασμό αυτών. Στον Πίνακα 4.3 τις πρώτες 20 μέρες της καλλιέργειας υπάρχει μια μικρή αυξητική τάση με τον ίδιο ρυθμό για όλες τις μεταχειρίσεις πλην των 3 μεταχειρίσεων **S-B** στην ανάπτυξη των φύλλων τους. Στις 45 μέρες καλλιέργειας λίγο πριν την συγκομιδή, παρατηρείται στον Πίνακα 4.4 ότι ο μάρτυρας εμφανίζει αρκετά υψηλό ποσοστό στην μεταβολή ύψους έναντι των άλλων μεταχειρίσεων. Από τα αποτελέσματα διακρίνεται ότι και οι συνδυασμοί **S-C** και **S-C-B** λειτούργησαν ευεργετικά στην ανάπτυξη του ύψους και των φύλλων των φυτών. Όσον αφορά στο βιοεξανθράκωμα ως ακέραιο εδαφοβελτιωτικό είναι εμφανές ότι δεν συνετέλεσε στην ανάπτυξη της καλλιέργειας. Σύμφωνα με έρευνες των Schulz and Glaser (2012), εντόπισαν ότι τα φυτά τα οποία έχουν καλλιεργηθεί σε εδάφη που είχε εφαρμοστεί συνδυασμός βιοεξανθρακώματος-κόμπποστ έχουν μεγαλύτερη ανάπτυξη διότι έχουν την δυνατότητα να συγκρατούν και να προσλαμβάνουν περισσότερα θρεπτικά έναντι των φυτών που βρίσκονται σε εδάφη μόνο με βιοεξανθράκωμα.

Οι μετρήσεις για τα ΠΜΥ(%) των υπέργειων φυτικών ιστών προέκυψαν με βάση το ύψος του μεγαλύτερου φύλλου της κάθε μεταχείρισης. Παρακάτω παρατίθεται το διάγραμμα για τα ξηρά βάρη των φυτικών ιστών, ώστε να υπάρχει μια πιο σαφής και εμπεριστατωμένη εικόνα για την ανάπτυξη της καλλιέργειας.

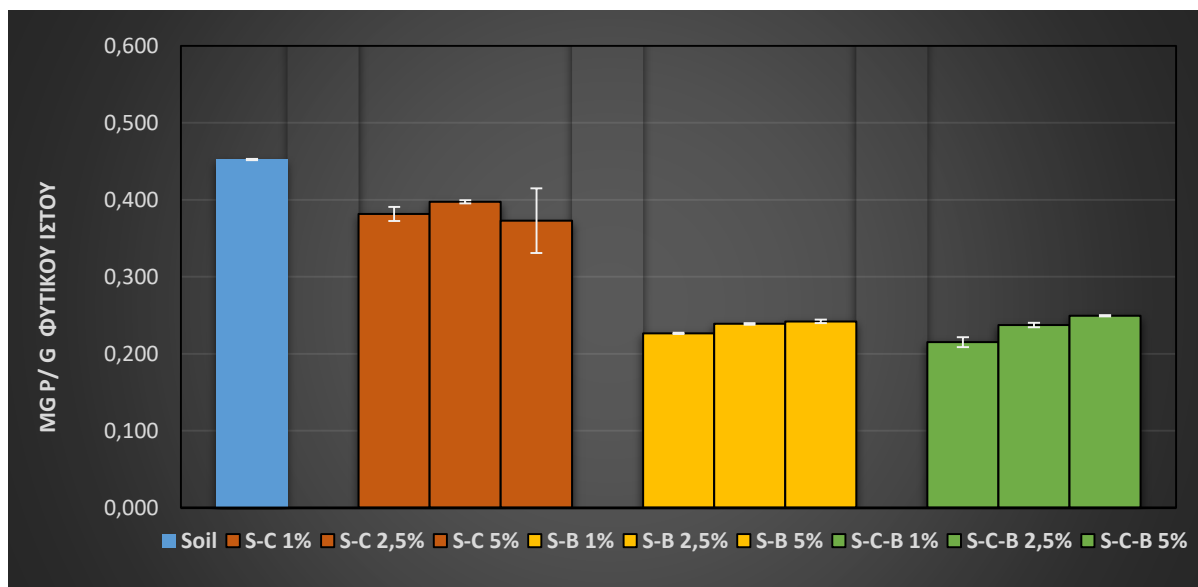


**Σχήμα 4.5:** Μέσος όρος ξηρού βάρους υπέργειων φυτικών ιστών.

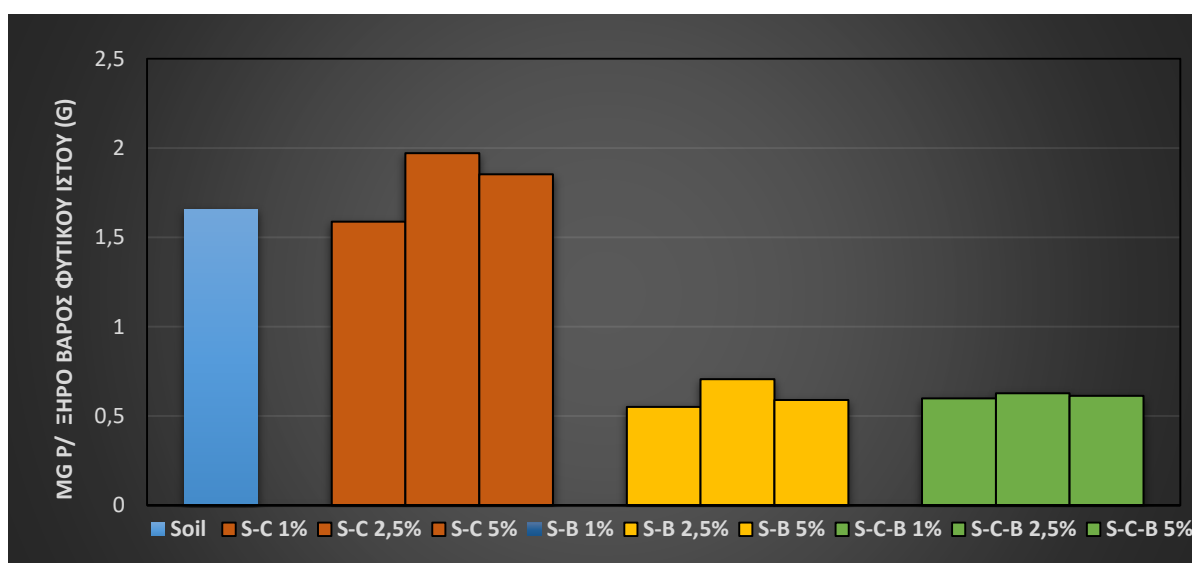
Μέσω του διαγράμματος διακρίνεται ότι και οι 3 μεταχειρίσεις **S-C** εμφάνισαν τη μεγαλύτερη ανάπτυξη στην καλλιέργεια. Τη δεύτερη εμφανώς μεγαλύτερη ανάπτυξη είχε ο μάρτυρας και ακολούθησαν οι μεταχειρίσεις με τον συνδυασμό **S-C-B** ενώ το ξηρό βάρος της μεταχείρισης με βιοεξανθράκωμα ήταν παρόμοιο με ελαφρά χαμηλότερο το 1% και 5% και ελαφρά υψηλότερο το 2,5%. Τα αποτελέσματα του διαγράμματος έρχονται να επιβεβαιώσουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τα ποσοστά που προέκυψαν στους παραπάνω πίνακες. Σε μελέτες τους οι Liang et al. (2006) παρατήρησαν ότι το βιοεξανθράκωμα ίσως να οφείλεται για την μείωση του ξηρού βάρους των φυτών λόγω συγκράτησης θρεπτικών στοιχείων.

#### 4.2.2 Αποτελέσματα Ολικού Φωσφόρου.

Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζονται οι συγκεντρώσεις του φωσφόρου σε mg P ανά γραμμάριο φυτικού ιστού (Σχήμα 4.6) και οι συγκεντρώσεις φωσφόρου σε mg P ανά ξηρό βάρος φυτικού ιστού (Σχήμα 4.7), δηλαδή οι συγκεντρώσεις φωσφόρου που είχαμε συνολικά στην κάθε γλάστρα.



Σχήμα 4.6: Συγκέντρωση P (mg P/ g φυτικού ιστού) υπέργειων φυτικών ιστών.



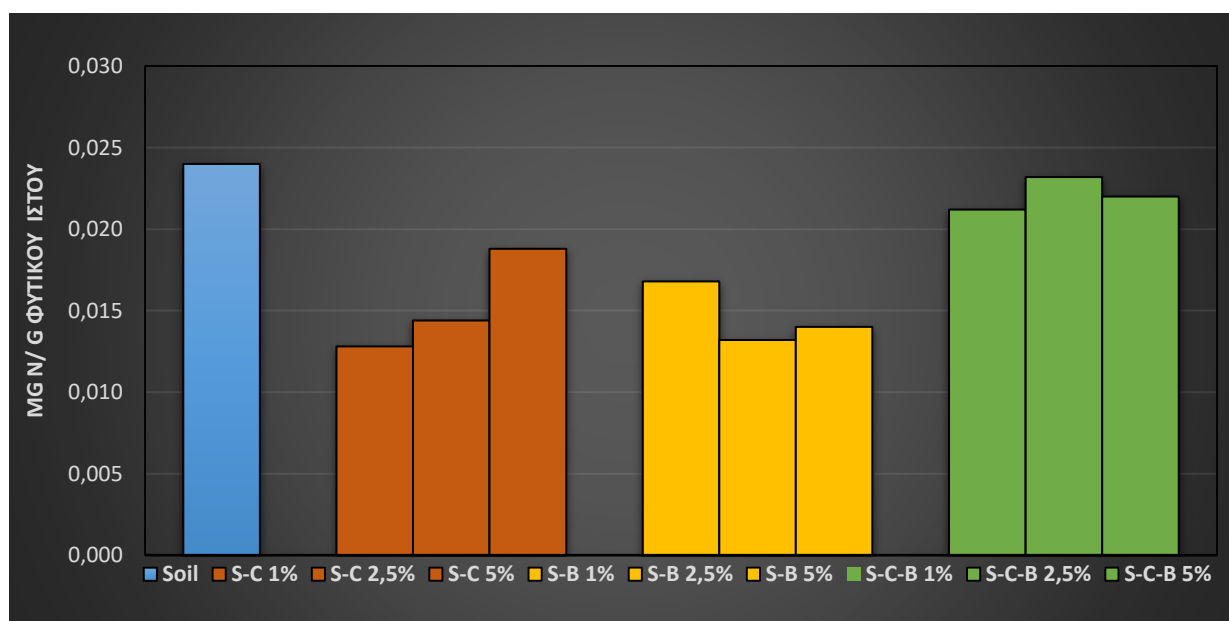
Σχήμα 4.7: Συγκέντρωση P (mg P/ ξηρό βάρος φυτικού ιστού) υπέργειων φυτικών ιστών.

Όπως παρατηρείται από το διάγραμμα στο Σχήμα 4.7, η συγκέντρωση του ολικού φωσφόρου πολλαπλασιασμένη με το ξηρό βάρος φυτικού ιστού κάθε μεταχείρισης μειώθηκε κατά πολύ σ' όλες τις μεταχειρίσεις που πραγματοποιήθηκε προσθήκη βιοεξανθρακώματος και το συνδυασμό κόμποστ-βιοεξανθρακώματος σε σύγκριση με τον μάρτυρα εκτός των μεταχειρίσεων με κόμποστ που υπήρξε μια μικρή αύξηση. Στην έρευνα της Βέλη (2019) παρατηρήθηκε μείωση στη συγκέντρωση του ολικού P στους

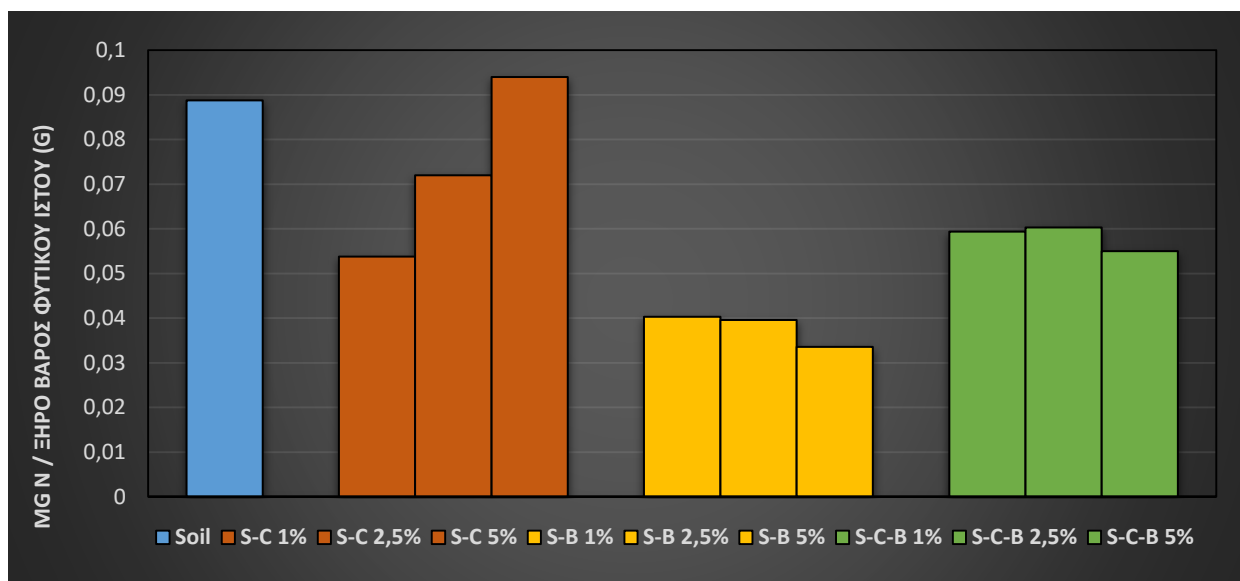
υπέργειους φυτικούς ιστούς στις μεταχειρίσεις με προσθήκη βιοεξανθρακώματος από λυματολάσπη και στο συνδυασμό **S-C-B** ενώ στη μεταχείριση με κόμπποστ υπήρξε σημαντική αύξηση. Σ' άλλες μελέτες που έχουν διεξαχθεί από τον Marks et al. (2014) ανέφεραν ότι η θετική επίδραση του βιοεξανθρακώματος για την πρόσληψη του φωσφόρου από τα φυτά εξαρτάται από το pH και την περιεκτικότητα του ασβεστίου Ca που υπάρχει στο έδαφος. Έχει παρατηρηθεί σε έρευνες θετική πρόσληψη φωσφόρου σε εδάφη με εφαρμογή βιοεξανθρακώματος και τα οποία είχαν υψηλό pH [Gunes et al., 2014]. Αρκετά υψηλές συγκεντρώσεις φωσφόρου παρουσιάζονται στον μάρτυρα αποδεικνύοντας ότι το χώμα ήταν πλούσιο σε φώσφορο το οποίο επιβεβαιώνεται και στις μετρήσεις που έγιναν κατά το χαρακτηρισμό του (Πίνακας 4.1). Συνεπώς με την προσθήκη σωστής δόσης κόμπποστ και συγκεκριμένα στις δόσεις 2,5% και 5% εντοπίζεται η θετικότερη ανάπτυξη των φυτών.

### 4.2.3 Αποτελέσματα Ολικού Αζώτου.

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις ολικού αζώτου N ανά γραμμάριο φυτικού ιστού (Σχήμα 4.8) και οι συγκεντρώσεις ολικού αζώτου N ως προς το ξηρό βάρος του φυτικού ιστού (Σχήμα 4.9).



**Σχήμα 4.8:** Συγκέντρωση N (mg N/ g φυτικού ιστού) υπέργειων φυτικών ιστών.



**Σχήμα 4.9:** Συγκέντρωση N (mg N/ ξηρό βάρος φυτικού ιστού) υπέργειων φυτικών ιστών.

Στο Σχήμα 4.8 ο μάρτυρας εμφανίζει τις υψηλότερες συγκεντρώσεις αζώτου σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις. Επιπρόσθετα ο συνδυασμός κόμποστ-βιοεξανθράκωμα φαίνεται να συνεισφέρει στην μεταφορά αζώτου στους υπέργειους φυτικούς ιστούς. Αντίθετα χαμηλές παρόμοιες συγκεντρώσεις παρουσιάζουν οι μεταχειρίσεις με **S-C** και **S-B**.

Στο Σχήμα 4.9 παρουσιάζονται τα τελικά αποτελέσματα με καθοριστικό ρόλο το ξηρό βάρος του υπέργειου φυτικού ιστού της κάθε γλάστρας ώστε να υπάρχει μια ευκρινέστερη εικόνα για την συγκέντρωση του αζώτου στο σύνολο της κάθε μεταχείρισης. Παρατηρείται μια διαφορετική συμπεριφορά στη συγκέντρωση του N για κάθε μεταχείριση. Στους φυτικούς ιστούς των μεταχειρίσεων **S-B** και **S-C-B** η συγκέντρωση του N μειώθηκε ενώ στη μεταχείριση με κόμποστ και συγκεκριμένα στην προσθήκη της μεγαλύτερης δόσης (**S-C 5%**) παρατηρήθηκε αύξηση σε σύγκριση με τον μάρτυρα. Σε έρευνες που έχουν διεξαχθεί σε αντίστοιχες καλλιέργειες μαρουλιού παρατηρήθηκε αύξηση του ολικού αζώτου σε εδάφη που περιείχαν κόμποστ σε σχέση με εδάφη χωρίς εδαφοβελτιωτικά [Akoto-Danso. et al., 2020]. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι μέσω των δυο διαγραμμάτων η αυτοτελής προσθήκη βιοεξανθρακώματος δεν είχε θετική επίδραση για την μεταφορά αζώτου στους φυτικούς ιστούς. Σε πειράματα για την καλλιέργεια τομάτας των Fornes et al. (2017) παρατηρήθηκε για δυο διαφορετικά είδη βιοεξανθρακωμάτων ότι όσο αυξανόταν η δόση του κάθε είδους στην αντίστοιχη καλλιέργεια υπήρχε μείωση της συγκέντρωσης του N στα φύλλα. Αντίστοιχα αποτελέσματα παρουσιάζονται και στην παρούσα διπλωματική, γεγονός που ίσως να οφείλεται στη συγκράτηση θρεπτικών από το βιοεξανθράκωμα και στην μικρή αύξηση του ξηρού βάρους.

#### 4.2.4 Προσδιορισμός Μετάλλων και Μεταλλοειδών.

Οι μετρήσεις για την περιεκτικότητα των μετάλλων και μεταλλοειδών στοιχείων για τους φυτικούς ιστούς των μεταχειρίσεων παρατίθενται και σχολιάζονται με βάση των παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας 4.5:** Συγκεντρώσεις μετάλλων και μεταλλοειδών στους φυτικούς ιστούς.

Μέταλλα (mg μετάλλου/kg φυτικού ιστού)	S	S-C 1%	S-C 2,5%	S-C 5%	S-B 1%	S-B 2,5%	S-B 5%	S-C-B 1%	S-C-B 2,5%	S-C-B 5%
<b>B</b>	20,74± 0,7	22,47±2, 37	15,94± 5,16	19,32± 0,8	17,85± 0,4	21,46± 3,63	21,28± 2,18	25,18± 2,42	22,22± 0,85	23,59± 0,18
<b>Na</b>	2259,7 ± 669,67	3179,77 ±269,02	2760,88± 754,57	4405,4±1 68,85	2902,53± 29,58	4576,73± 1044	5317,38± 130	3999,33± 1187,49	3500,85± 1201,97	5888,03± 275,69
<b>Mg</b>	1911,1 1± 412,98	1852,2± 10,75	1601,02± 430	1526,61± 152,3	1384,65± 195,37	1763,51± 433,58	1665,33± 42,11	2139,15± 294,73	1660,26± 76,15	1821,62± 55,55
<b>Al</b>	222± 81,46	136,2±2 1,22	77,4±11, 04	231,6±10 6,98	187,8±97 ,59	115,8±25, 25	25,2±10, 19	79,8±2,55	283,20±5 1,26	103,2±62, 23
<b>K</b>	8638,5 4± 426,39	6961,8± 185,39	8495,29± 935,50	8402,58± 1180,2	6480± 679,74	10063± 1235,6	9317,38± 726,19	11937,52 ± 914,56	10038,97 ±572,6	12848,89 ± 500,54
<b>Ca</b>	14945, 79± 1158,2 9	13934,6 8± 734,24	10162,08 ± 919,65	11566,± 1052,28	11186,1± 552,12	13509,39 ±3251,45	12547,49 ± 43,2	15081,33 ± 3478,8	11435,± 404,42	15558,8± 859,89
<b>Cr</b>	0,74±0, 29	0,48±0,1 2	0,34±0,0 3	0,68±0,19	0,47±0,0 4	0,38±0,19	0,21±0,0 1	0,36±0,01	0,53±0,2 1	0,38±0,19
<b>Mn</b>	80,56± 16,75	38,92±0, 83	45,45±29 ,28	40,8±10,7	41,2±1,5	47,05±14, 01	39,61±1, 26	50,53±6,7	39,59±19 ,97	68,75±15, 8
<b>Fe</b>	292,82 ± 52,91	148,51± 2,25	173,67± 15,49	190,36±2 0,15	107,89±2 5,44	102,67±2 3,35	39,16± 11,23	100,32±2 3,23	87,09± 9,53	179,66±9 7,76
<b>Co</b>	0,08± 0,03	0,03± 0,01	0,06± 0,01	0,08± 0,01	0,04± 0,02	0,09± 0,05	0,08± 0,03	0,06± 0,02	<DL	<DL
<b>Ni</b>	6,36± 3,83	0,48± 0,01	0,85± 0,13	0,27± 0,07	0,07± 0,02	0,03±0,01	0,03± 0,02	0,28± 0,03	0,16±0,1	0,14± 0,31
<b>Cu</b>	3,24± 1,4	1,93± 0,01	2,34± 0,53	2,2±0,02	1,44± 0,01	2,54± 0,65	1,78± 0,23	2,37±0,92	2,15± 0,71	2,85± 0,62
<b>Zn</b>	71,81± 40,31	19,6± 0,08	18,47± 5,02	21,22±3	14,89± 1,89	17,31± 2,09	14,5± 2,51	21,74± 4,54	15,8± 1,22	22,47± 0,12
<b>As</b>	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL
<b>Se</b>	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL
<b>Mo</b>	1,01± 0,18	0,6± 0,03	0,59± 0,12	0,72± 0,13	0,66± 0,01	0,89± 0,9	0,9±0,02	1,31± 0,49	1,38± 0,29	1,08± 0,11
<b>Cd</b>	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL
<b>Hg</b>	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL
<b>Pb</b>	19,53± 24,08	0,46± 0,02	0,70±0,5 6	0,44± 0,12	0,31± 0,01	0,26± 0,03	0,23± 0,02	0,49± 0,48	0,39± 0,09	0,43± 0,15

\*Κάτω από το όριο ανίχνευσης (<DL)

Οι συγκεντρώσεις των μακροθρεπτικών στοιχείων Na, Mg, K, Ca στους φυτικούς ιστούς παρουσιάζουν κάποιες αποκλίσεις μεταξύ των μεταχειρίσεων και εμφανίζουν τις υψηλότερες τιμές έναντι των υπολοίπων στοιχείων.

Η συγκέντρωση του νατρίου Na σημείωσε αύξηση στις μεταχειρίσεις με κόμποστ και βιοεξανθράκωμα όπου εφαρμόστηκε η μέγιστη δόση 5%. Την υψηλότερη όμως αύξηση την εμφάνισε στο συνδυασμό των 2 υλικών στην μέγιστη δόση τους.

Η συγκέντρωση του Mg σημείωσε μια μικρή μείωση για τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις σε σύγκριση με τον μάρτυρα εκτός από τον συνδυασμό S-C-B 1% που είχε ελαφρώς την υψηλότερη τιμή. Οι Fornes et al.(2017) για καλλιέργεια τομάτας παρατήρησαν ελαφριά μείωση της συγκέντρωσης του Mg για διαφορετικές δόσεις βιοεξανθρακώματος στους υπέργειους φυτικούς ιστούς.

Όσον αφορά την συγκέντρωση του καλίου K στους φυτικούς ιστούς σημαντικές παρόμοιες αυξήσεις σημειώθηκαν στον συνδυασμό S-C-B για όλο το εύρος δόσεων που προστέθηκαν. Παρόμοια αποτελέσματα στην συγκέντρωση K στους φυτικούς ιστούς σε καλλιέργεια μαρουλιού εμφάνισε στην έρευνα του και ο Ρεγκούζας (2015), με την πρωτιά να την διακατέχει το βιοεξανθράκωμα σε συνδυασμό με κόμποστ.

Η συγκέντρωση του Ca αυξήθηκε και μειώθηκε στους φυτικούς ιστούς χωρίς να παρατηρηθούν ιδιαίτερα μεγάλες μεταβολές, με την μεγαλύτερη τιμή να σημειώνεται στο συνδυασμό S-C-B 5% και να ακολουθεί ο μάρτυρας. Η Μανωλικάκη (2018) αποδίδει τις αυξομειώσεις στις συγκεντρώσεις των φυτικών ιστών του ασβεστίου και του καλίου έπειτα από προσθήκη βιοεξανθρακώματος στις πιθανόν ανταγωνιστικές σχέσεις που υπάρχουν μεταξύ αυτών των μετάλλων.

Οι συγκεντρώσεις των μικροθρεπτικών Mn, Fe, Cu και Zn για τους φυτικούς ιστούς κυμάνθηκαν σε χαμηλές τιμές.

Η συγκέντρωση του μαγγανίου Mn στους υπέργειους φυτικούς ιστούς σημείωσε την μεγαλύτερη αύξηση στον μάρτυρα χωρίς να υπάρχουν ιδιαίτερα μεγάλες μεταβολές στις υπόλοιπες μεταχειρίσεις, κάτι που ίσως ευθύνεται στην ήδη αυξημένη συγκέντρωση Mn που είχε σημειωθεί στο χαρακτηρισμό χώματος έναντι των άλλο δυο υλικών.

Η συγκέντρωση σιδήρου Fe με την μέγιστη αύξηση 35% για τους φυτικούς ιστούς σημειώθηκε στο μάρτυρα γεγονός το οποίο μπορεί επίσης να οφείλεται στην μεγάλη συγκέντρωση Fe (60%) που εμφάνισε το χώμα σε σύγκριση με το κόμποστ και το βιοεξανθράκωμα στον αρχικό χαρακτηρισμό του . Ο συνδυασμός βιοεξανθρακώματος με κόμποστ φαίνεται να μην επηρέασε την πρόσληψη Fe από τα φυτά. Αντίθετα η προσθήκη αυτοτελούς κόμποστ επηρέασε θετικά την συγκέντρωση Fe φυτικών ιστούς και τις τρεις μεταχειρίσεις.

Η συγκέντρωση ψευδαργύρου Zn εμφάνισε την μέγιστη αύξηση στο χώμα (70%) έναντι των άλλων μεταχειρίσεων οι οποίες σημείωσαν πολύ παρόμοιες τιμές. Ο ψευδάργυρος Zn για καλλιέργειες σε χαμηλές συγκεντρώσεις έως 70 mg/kg ενδείκνυται από τα βασικά θρεπτικά στοιχεία και κατέχει σημαντικό ρόλο σε ενζυματικές διεργασίες που διενεργούνται, αντίθετα για συγκεντρώσεις >400 mg/g προκαλεί τοξικότητα στα φυτά. [Sofo et al. 2018]

Η συγκέντρωση του χαλκού Cu εμφάνισε αρκετά χαμηλές τιμές σε όλες τις μεταχειρίσεις χωρίς σημαντικές διαφορές μεταξύ τους. Ο χαλκός Cu είναι από τα απαραίτητα ιχνοστοιχεία για την ανάπτυξη των φυτών καθώς κατέχει σημαντικό ρόλο για τις δράσεις των ενζύμων που συμβάλλουν στην φωτοσύνθεση, τα όρια στους φυτικούς ιστούς κυμαίνονται από 5-30 mg/kg.

Τέλος αρκετές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων δεν εμφανίζουν τιμές το οποίο σημαίνει ότι βρίσκονται κάτω από το όριο ανίχνευσης και δεν έχουν προκαλέσει τοξικότητα στα φυτά.

Η συγκέντρωση του χρωμίου Cr ανιχνεύθηκε σε αρκετά χαμηλές τιμές και δεν αποτελεί κίνδυνο τοξικότητας για τα φυτά. Τα όρια συγκέντρωσης Cr για τα λαχανικά είναι 5-30 mg/kg ξηρής ουσίας σύμφωνα με την WHO/FAO (1984).

Η συγκέντρωση του κοβαλτίου Co στους φυτικούς ιστούς ήταν σχεδόν αμελητέες.

Η συγκέντρωση του νικελίου Ni εμφανίστηκε ελαφρώς υψηλότερη στον μάρτυρα σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις. Αντίθετα στις τρεις μεταχειρίσεις με το βιοεξανθράκωμα εμφάνισε τις χαμηλότερες τιμές το οποίο μπορεί να οφείλεται στη θετική δράση του βιοεξανθρακώματος. Τα όρια συγκέντρωσης Ni για τους φυτικούς ιστούς είναι 10 mg/kg ξηρής ουσίας σύμφωνα με την WHO/FAO (1996).

Η συγκέντρωση του μολυβδαίνιου Mo εμφανίζει αρκετά χαμηλές συγκεντρώσεις σε όλες τις μεταχειρίσεις των φυτικών ιστών. Το μολυβδαίνιο αν και απαραίτητο μεταλλικό στοιχείο για τα φυτά αν υπερβεί κάποια όρια μπορεί να προκαλέσει τοξικότητα.

Η συγκέντρωση του μολύβδου Pb εμφανίζεται ιδιαίτερα αυξημένη στο μάρτυρα. Ενώ μείωση της συγκέντρωσης Pb εμφάνισαν οι τρεις μεταχειρίσεις με βιοεξανθράκωμα. Τα όρια συγκέντρωσης Pb για τα λαχανικά είναι 2 mg/kg ξηρής ουσίας σύμφωνα με την WHO/FAO (1996).

#### **4.3 Αποτελέσματα Εδαφικών Δειγμάτων.**

Οι χημικές ιδιότητες των εδαφικών δειγμάτων παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 4.6. Στη συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα των συγκεντρώσεων από τον Πίνακα 4.6 μέσω διαγραμμάτων του διαθέσιμου φωσφόρου, του αμμωνιακού και νιτρικού αζώτου. Τέλος σχολιάστηκε ο προσδιορισμός των μετάλλων για τα εδαφικά δείγματα.

**Πίνακας 4.6:** Χημικές ιδιότητες εδαφικών δειγμάτων.

Μεταχειρίσεις	pH	EC (mS/cm)	Olsen-P (mg P/ kg εδάφους)	NH <sub>4</sub> -N (mg/kg εδάφους)	NO <sub>3</sub> -N (mg/kg εδάφους)
<b>S</b>	7,60 ± 0,06	0,52 ± 0,07	19,62 ± 0,90	44,73 ± 18,53	3,33 ± 0,76
<b>S-C 1%</b>	7,60 ± 0,15	0,81 ± 0,07	19,49 ± 3,04	75,38 ± 11,79	6,47 ± 0,57
<b>S-C 2,5%</b>	7,60 ± 0,03	0,78 ± 0,11	27,87 ± 2,75	84,25 ± 3,27	7,54 ± 1,36
<b>S-C 5%</b>	7,53 ± 0,10	0,74 ± 0,14	33,03 ± 2,70	34,70 ± 10,77	8,65 ± 0,73
<b>S-B 1%</b>	7,53 ± 0,08	0,68 ± 0,07	25,09 ± 8,05	32,10 ± 1,90	3,77 ± 1,02
<b>S-B 2,5%</b>	7,70 ± 0,18	0,65 ± 0,12	37,22 ± 9,28	56,83 ± 1,14	5,40 ± 1,08
<b>S-B 5%</b>	7,71 ± 0,05	0,90 ± 0,12	59,97 ± 3,21	70,54 ± 8,40	3,56 ± 0,64
<b>S-C-B 1%</b>	7,75 ± 0,05	0,52 ± 0,07	28,90 ± 2,80	40,70 ± 5,02	6,24 ± 0,59
<b>S-C-B 2,5%</b>	7,72 ± 0,04	0,62 ± 0,12	41,48 ± 5,28	48,67 ± 9,10	4,48 ± 1,30
<b>S-C-B 5%</b>	7,78 ± 0,06	0,65 ± 0,02	88,92 ± 3,68	69,82 ± 2,42	1,42 ± 0,22

#### 4.3.1 pH – Αγωγιμότητα (EC)

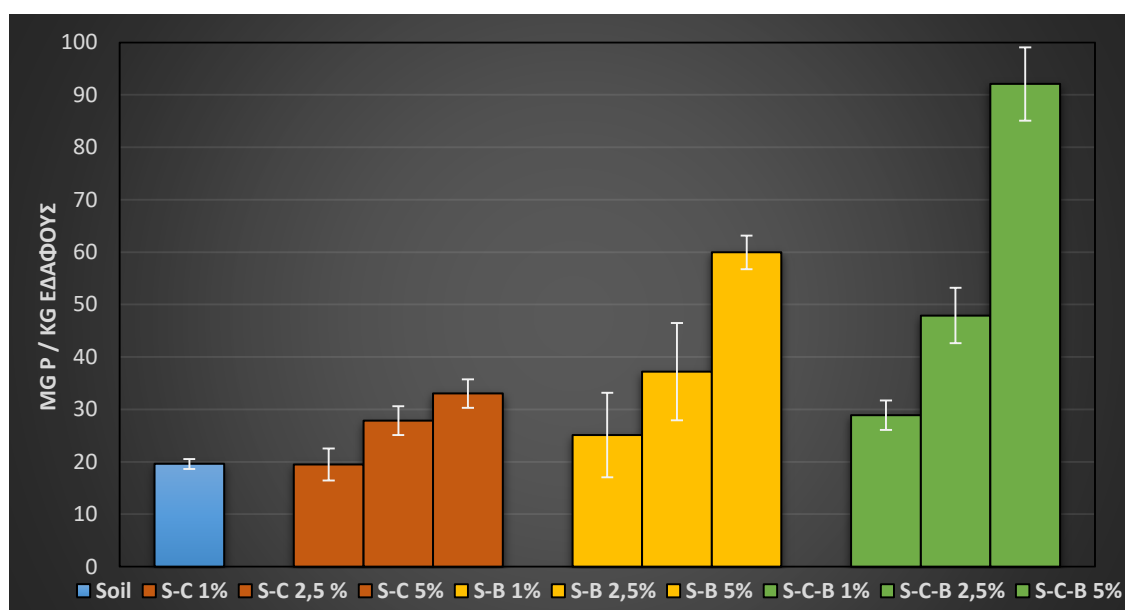
Στον Πίνακα 4.6 παρατηρείται ότι τόσο στις τιμές του pH όσο και στις τιμές της αγωγιμότητας δεν υπάρχουν μεγάλες διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων. Στις μεταχειρίσεις **S-B** και **S-C-B** υπήρξε μια μικρή αύξηση στο pH σε σχέση με τον μάρτυρα, ενώ στη μεταχείριση με το κόμπποστ έμεινε σχεδόν αμετάβλητο με μια μικρή μείωση στο **S-C 5%**. Αρκετές μελέτες αναφέρουν ότι η προσθήκη βιοεξανθρακώματος στο έδαφος μπορεί να μεταβάλλει την τιμή του pH παρουσιάζοντας τιμές από 5,9-12,3. Όμως λόγω της αλκαλικής του ιδιότητας η θετική του επίδραση λειτουργεί σε όξινα εδάφη [Palansooriya et al., 2019]. Στην έρευνα της Βέλη (2019) στις καλλιέργειες με τομάτες παρατηρήθηκαν παρόμοια αποτελέσματα, το pH με την προσθήκη κόμπποστ 2% παρέμεινε ίδιο με τον μάρτυρα ενώ στις μεταχειρίσεις με βιοεξανθράκωμα από λυματολάσπη και στον συνδυασμό με κόμπποστ υπήρξε μια πολύ μικρή μείωση λόγω του χαμηλού pH που εμφάνισε το βιοεξανθράκωμα. Σε πειράματα που πραγματοποιήθηκαν με βάση το βιοεξανθράκωμα στις καλλιέργειες αναφέρθηκαν ότι το pH μπορεί να μειωθεί ή να αυξηθεί κατά μια μονάδα, είτε να παραμείνει αμετάβλητο ανάλογα με τον τύπο βιοεξανθρακώματος και την εφαρμογή δόσεων που θα χρησιμοποιηθούν στο έδαφος [Granatstein et al., 2009, Palansooriya et al., 2019]

Όσον αφορά τις τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας παρατηρείται μια αύξηση σε όλες τις μεταχειρίσεις σε σύγκριση με τον μάρτυρα. Οι μεταχειρίσεις με

προσθήκη κόμποστ στο σύνολό τους παρουσιάζουν την μεγαλύτερη αύξηση EC ακολουθεί η μεταχείριση **S-B 5%** η οποία αυξήθηκε κατά 73% και τέλος ο συνδυασμός **S-C-B**. Παρόμοια αποτελέσματα στις ίδιες μεταχειρίσεις με την καλλιέργεια τομάτας αναφέρθηκαν στα πειράματα της Βέλλη, (2019). Στις έρευνες των Palansooriya et al., (2019) οι τιμές αγωγιμότητας παρουσίαζαν μια αύξηση σε σύγκριση με τον μάρτυρα από 2- 85% ανάλογα με τον τύπο και την δόση βιοεξανθρακώματος που εφαρμόζαν στο έδαφος.

#### 4.3.2 Αποτελέσματα Διαθέσιμου Φωσφόρου P-Olsen

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις διαθέσιμου φωσφόρου (P-Olsen) στα εδαφικά δείγματα σε mg P ανά κιλό εδάφους.



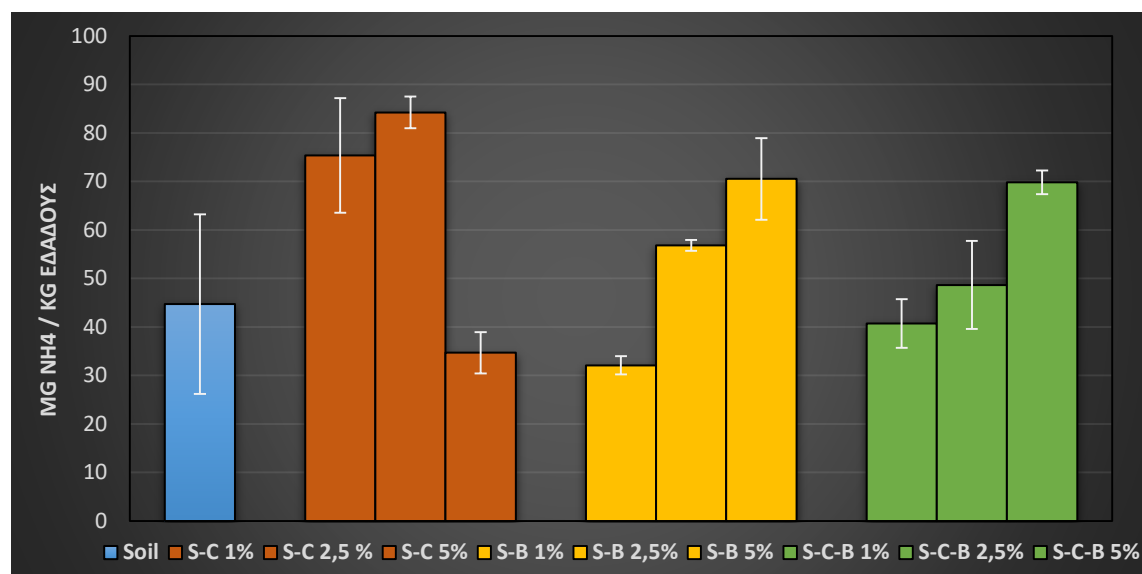
**Σχήμα 4.10:** Συγκέντρωση P-Olsen (mg P/ kg εδάφους) στα εδαφικά δείγματα.

Παρατηρείται μέσω του διαγράμματος ότι υπάρχει μια αυξητική τάση στον διαθέσιμο φώσφορο με την αύξηση δόσης των εδαφοβελτιωτικών. Σημαντική αύξηση παρατηρείται στη μεταχείριση **S-C-B 5%**. Στα πειράματα της Manolikaki (2018) ο διαθέσιμος φώσφορος του εδάφους ενισχύθηκε σε όλες τις μεταχειρίσεις, με τον συνδυασμό βιοεξανθράκωματος από στέμφυλα και κόμποστ να εμφανίζουν τις υψηλότερες συγκεντρώσεις. Επιπρόσθετα τα πειράματα της Βέλλη (2019) παρουσίασαν παρόμοια αποτελέσματα με τον συνδυασμό βιοεξανθρακώματος-κόμποστ να εμφανίζει την μεγαλύτερη αύξηση στον διαθέσιμο φωσφόρο. Τέλος και στα πειράματα των Agegnehu et al., (2016a) η μεγαλύτερη αύξηση διαθέσιμου φωσφόρου στο έδαφος παρατηρήθηκε με την εφαρμογή βιοεξανθρακώματος και κόμποστ. Το βιοεξανθράκωμα λόγω του αλκαλικού χαρακτήρα που παρουσιάζει ευνοεί το ανταλλάξιμο Ca και Mg τα οποία επηρεάζουν την αύξηση των φωσφορικών. Πολλές μελέτες παρατήρησαν ότι η προσθήκη βιοεξανθρακώματος συμβάλλει θετικά στη διαθεσιμότητα P στα εδάφη, το οποίο αποδίδεται στις αλλαγές pH

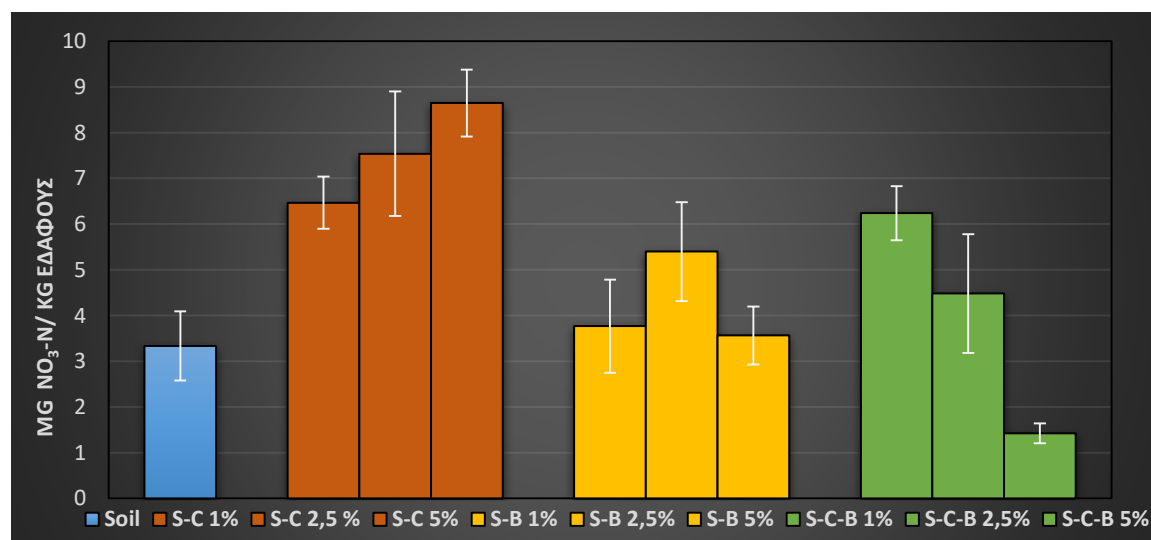
του εδάφους και την άμεση απελευθέρωση του P από το βιοεξανθράκωμα. [Xu et al., 2013]

#### 4.3.3 Αποτελέσματα Αμμωνιακού και Νιτρικού Αζώτου (NH<sub>4</sub>-N, O<sub>3</sub>-N)

Τα διαγράμματα που ακολουθούν αφορούν τις συγκεντρώσεις του αμμωνιακού (Σχήμα 4.11) και νιτρικού αζώτου (Σχήμα 4.12) στα εδαφικά δείγματα υπό την μορφή νιτρικού και αμμωνιακού ανά κιλό εδάφους.



**Σχήμα 4.11:** Συγκέντρωση Αμμωνιακού Αζώτου NH<sub>4</sub>-N (mg/kg εδάφους) στα εδαφικά δείγματα.



**Σχήμα 4.12:** Συγκέντρωση Νιτρικού Αζώτου NO<sub>3</sub>-N (mg/kg εδάφους) στα εδαφικά δείγματα.

Παρατηρείται μέσω των δυο διαγραμμάτων ότι το άζωτο βρίσκεται σε μεγαλύτερες ποσότητες υπό την μορφή του αμμωνιακού. Συγκεκριμένα ο μάρτυρας εμφανίζει υψηλές συγκεντρώσεις αμμωνιακού αζώτου το οποίο είχε αποδειχθεί από τον χαρακτηρισμό του. Επιπρόσθετα η μεταχείριση **S-C** εμφάνισε τις υψηλότερες τιμές που αποδεικνύει ότι το κόμπποστ αναμειγνύοντας το με το χώμα αποδίδει αρκετή ποσότητα αμμωνιακού αζώτου. Οι μεταχειρίσεις με το βιοεξανθράκωμα εμφανίζουν ελαφρώς χαμηλότερες τιμές από τις μεταχειρίσεις με το κόμπποστ, και ακολουθούν οι μεταχειρίσεις με το συνδυασμό βιοεξανθράκωμα - κόμπποστ. Σε μελέτες των Nguyen et al. (2017) παρατήρησαν μείωση των αμμωνιακών συγκεντρώσεων σε χονδρόκοκκα εδάφη με την προσθήκη βιοεξανθρακώματος και οι Ippolito et al. (2016) σημείωσαν μείωση των νιτρικών συγκεντρώσεων με την αύξηση δόσης βιοεξανθρακώματος από κοπριά στο έδαφος κάτι το οποίο αποδεικνύεται και στα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας.

Σε άλλες έρευνες των Agegnehu et al., (2015) μείωση των συγκεντρώσεων  $\text{NO}_3^-$ -N και P εμφάνισαν τα εδάφη με την προσθήκη βιοεξανθρακώματος με κόμπποστ, βελτιώνοντας την ανάπτυξη των φυτών τους. Οι συγκεντρώσεις του αμμωνιακού αζώτου στον μάρτυρα είναι αρκετά χαμηλές σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις αν και το έδαφος στο χαρακτηρισμό εμφάνισε τις υψηλότερες συγκεντρώσεις αμμωνιακού αζώτου. Το αμμωνιακό άζωτο βρίσκεται σε αδράνεια μέσα στο έδαφος, για να απορροφηθεί όμως από τα φυτά θα πρέπει το ριζικό τους σύστημα να μεγαλώσει τόσο ώστε να φτάσει το σημείο που βρίσκεται. Σε αντίθεση το άζωτο στη νιτρική του μορφή είναι ευδιάλυτο στο έδαφος και απορροφάται από τις ρίζες του φυτού παθητικά. [Eurochem,2020]. Το ριζικό σύστημα της συγκεκριμένης καλλιέργειας ήταν αρκετά μικρό και πιθανότατα αυτό να αποτέλεσε έναν περιοριστικό παράγοντα για την απορρόφηση του αμμωνιακού αζώτου.

#### 4.3.4 Προσδιορισμός Μετάλλων και Μεταλλοειδών.

Πραγματοποιήθηκαν και σχολιάστηκαν οι μετρήσεις για την περιεκτικότητα των μετάλλων και μεταλλοειδών στοιχείων στα εδαφικά δείγματα όλων των μεταχειρίσεων. Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται τα αποτελέσματα.

**Πίνακας 4.6:** Συγκεντρώσεις μετάλλων και μεταλλοειδών στα εδαφικά δείγματα.

Μέταλλα (mg μετάλλου/ kg εδάφους)	S	S-C 1%	S-C 2,5%	S-C 5%	S-B 1%	S-B 2,5%	S-B 5%	S-C-B 1%	S-C-B 2,5%	S-C-B 5%
<b>B</b>	25,74± 3,85	38,77± 3,68	32,3± 8,77	32,2± 9,13	13,29± 1,01	12,79± 1,6	11,32± 0,22	28,51± 2,32	25,36± 0,22	23,44± 1,56
<b>Na</b>	1075± 176,78	1115± 162,64	1095± 21,22	1110± 14,15	552,59±7 5,94	541,89±1 24,64	631,34±2 7,05	1100± 268,71	1240± 99	1480± 226,28
<b>Mg</b>	5455± 558,62	6685± 49,51	6545± 49,5	5780±876 ,82	3037,69± 308,62	3181,48± 247,71	2535,37± 225,31	6040± 636,4	4460± 636,41	4315± 57,98
<b>Al</b>	41675± 487,19	58155±1 223,3	54360±2 955,71	47440± 6378,11	37545±5 41,21	37683± 3288,05	25719±8 0,62	49645±49 85,11	34965±2 199,11	32170± 3041,85
<b>K</b>	3595± 77,79	4740± 240,42	4610± 268,81	4240± 240,42	2517,94± 10,98	2659,95± 251,68	2225,18± 23,18	4605± 21,12	3890± 353,26	4075±601 ,36
<b>Ca</b>	40040± 4217,9 3	39675±1 609,23	41800±1 527,36	41980± 7198,15	21332,36 ± 6421,85	21952,9± 337,54	21725,± 431,91	40070±7, 08	41740±1 0069,21	40480± 6745,45
<b>Cr</b>	62,44± 0,58	71,62± 0,54	70,65± 5,85	68,43± 10,65	40,08± 0,14	40,72± 1,68	30,12± 1,5	73,72± 213,08	58,64± 1,86	58,95± 4,98
<b>Mn</b>	588,64 ± 21,67	941,49± 7,87	704,90±3 ,63	719,44±2 26,67	328,93±2 7,58	342,53±1, 79	174,39±1 4,39	705,2± 594	442,24±2 2,49	447,46±1 2,1
<b>Fe</b>	24000± 69,08	28332,1 1±89,79	26681,32 ± 1250,18	25728,94 ± 884,10	17106,79 ± 918,5	17185,27 ± 202,65	14574,44 ± 286,51	21572,65 ± 2,44	22217,34 ± 2355,32	22913,74 ± 1958,17
<b>Co</b>	13,02± 0,43	20,94± 4,98	16,57± 0,29	14,25± 2,3	3,89± 0,22	4,24± 0,03	2,31± 0,01	14,23± 9,46	11,54± 2,27	9,21± 1,96
<b>Ni</b>	42,2± 0,43	64,66± 2,81	60,64± 2,36	53,22± 11,35	25,56± 0,63	26,94± 0,33	17,39± 0,32	41,74± 9,46	39,54± 4,58	38,41± 4,83
<b>Cu</b>	45,23± 2,7	54,86± 1,17	61,35± 1,26	62,05± 22,58	17,17± 1,32	21,28± 1,41	18,22± 0,32	58,92± 7,75	65,81± 18,61	59,12± 6,96
<b>Zn</b>	68,89± 3,9	89,62± 12,32	86,94± 3,78	88,64± 20,03	53,48± 0,61	62,24± 6,17	53,94± 0,58	78,07± 11,71	95,53± 18,61	94,81± 8,9
<b>As</b>	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL
<b>Se</b>	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL
<b>Mo</b>	1,15±0, 63	1,42± 0,09	1,14± 0,04	1,1±0,7	0,91± 0,01	0,73± 0,07	0,61± 0,03	3,24± 0,69	3,22± 1,55	2,83± 1,46
<b>Cd</b>	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL
<b>Hg</b>	7,35± 0,25	7,97± 0,17	8,38± 0,89	8,24± 0,22	<DL	<DL	<DL	6,72± 0,42	7,84± 0,52	8,36± 0,11
<b>Pb</b>	92,84± 10,64	99,13± 14,04	102,09±1 15,72	102,15± 17,55	16,34± 1,06	18,63± 0,85	19,47± 8,31	98,76± 15,54	88,17± 19,84	82,54± 45,88

\*Κάτω από το όριο ανίχνευσης (<DL)

Συγκρίνοντας τον Πίνακα 4.2 με τον Πίνακα 4.6 παρατηρείται ότι οι συγκεντρώσεις μακροθρεπτικών βρίσκονται σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις από κείνες των αρχικών δειγμάτων. Παρατηρώντας και τον Πίνακα 4.5 ένα αρκετά ικανοποιητικό ποσοστό έχουν απορροφήσει οι φυτικοί ιστοί. Αντίθετα οι συγκεντρώσεις μακροθρεπτικών στοιχείων και βαρέων μετάλλων εμφάνισαν μια μικρή αύξηση στις μεταχειρίσεις σε σύγκριση με τα αρχικά δείγματα. Οι τρεις μεταχειρίσεις του κόμποστ εμφανίζουν στο σύνολό τους υψηλότερες συγκεντρώσεις μακροθρεπτικών και μικροθρεπτικών στοιχείων έναντι των μεταχειρίσεων με προσθήκη βιοεξανθρακώματος. Τα μικροθρεπτικά και μικροθρεπτικά εμφανίζουν ακόμα χαμηλότερες συγκεντρώσεις στις μεταχειρίσεις με βιοεξανθράκωμα σε σύγκριση με τον μάρτυρα. Επιπρόσθετα και οι μεταχειρίσεις με τον συνδυασμό των δυο εδαφοβελτιωτικών φαίνεται να μην απέδωσαν όπως αναμενόταν, με τις συγκεντρώσεις των μακροθρεπτικών και μικροθρεπτικών να κυμαίνονται στα ίδια και χαμηλότερα όρια με αυτές των μεταχειρίσεων με προσθήκη κόμποστ. Γενικότερα η προσθήκη βιοεξανθρακώματος στο έδαφος μπορεί να λειτουργήσει ως πηγή θρεπτικών στοιχείων όταν τα εδάφη αυτά παρουσιάζουν έλλειψη από αυτά τα συγκεκριμένα στοιχεία και μετέπειτα να συμβάλλουν στην κάλυψη των αναγκών της εκάστοτε καλλιέργειας. [Βέλλη, 2019]. Στην συγκεκριμένη έρευνα από τα αποτελέσματα που προέκυψαν ο μάρτυρας δεν εμφάνισε μεγάλη ανεπάρκεια των θρεπτικών στοιχείων.

Όσον αφορά τις συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων οι χαμηλότερες έως αμελητέες συγκεντρώσεις έναντι όλων των μεταχειρίσεων εμφανίζονται στις μεταχειρίσεις με προσθήκη βιοεξανθρακώματος, το οποίο δείχνει την θετική επιρροή του συγκεκριμένου εδαφοβελτιωτικού έναντι των βαρέων μετάλλων. Αντίθετα οι υψηλότερες συγκεντρώσεις βαρέων εμφανίζονται στις μεταχειρίσεις με κόμποστ. Τα όρια των βαρέων μετάλλων στο σύνολο των περισσότερων μεταχειρίσεων στα εδαφικά δείγματα ήταν εντός ορίων όπως ορίζεται από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (WHO).

#### 4.3.5 Ισοζύγια

Παρακάτω παρουσιάζονται τα ισοζύγια τα οποία δείχνουν μια πιο εκτενέστερη εικόνα συγκριτικά με τα αποτελέσματα που προέκυψαν στα εδαφικά δείγματα και στους φυτικούς ιστούς.

Τα ισοζύγια χωρίζονται στις τιμές εισόδου και εξόδου όσον αφορά τις συγκεντρώσεις φωσφόρου, αμμωνιακού και νιτρικού αζώτου. Για τις τιμές εισόδου αναφερόμαστε στις συγκεντρώσεις ολικού φωσφόρου αμμωνιακού και νιτρικού αζώτου στα αρχικά δείγματα χώμα ( $C_s$ ), κόμποστ ( $C_c$ ) και βιοεξανθράκωμα ( $C_b$ ), οι παραπάνω παράμετροι πολλαπλασιάζονται με την ποσότητα που χρησιμοποιήθηκε από το κάθε δείγμα. Για τις τιμές εξόδου αναφερόμαστε στις συγκεντρώσεις φωσφόρου, αμμωνιακού και νιτρικού

αζώτου που μετρήθηκαν στα εδαφικά και στους φυτικούς ιστούς ( $C_{\phi.I}$ ) μετά την ολοκλήρωση της πειραματικής διαδικασίας. Όσον αφορά την συγκέντρωση των φυτικών ιστών είναι πολλαπλασιασμένη με το ξηρό βάρος του φυτικού ιστού κάθε μεταχείρισης, π.χ:

#### Ισοζύγιο φωσφόρου για μάρτυρα.

$$C_{in\ P} = C_S * 0,5\ kg \left( 30,30 \frac{mg\ P}{kg\ εδάφους} * 0,5\ kg\ εδάφους \right)$$

$$C_{out\ P} = C_{Sout} * 0,5\ kg + C_{\phi.I} = \left( 19,62 \frac{mg\ P}{kg\ εδάφους} * 0,5\ kg\ εδάφους \right) + 1,66\ mg$$

#### Ισοζύγιο φωσφόρου για S-C 1%.

$$C_{in\ P} = C_S * 0,495\ kg + C_C * 0,005\ kg$$

$$C_{out\ P} = C_{S-C1\%out} * 0,5\ kg + C_{\phi.I}$$

#### S-C 2,5%.

$$C_{in\ P} = C_S * 0,4875\ kg + C_C * 0,0125\ kg$$

$$C_{out\ P} = C_{S-C2,5\%out} * 0,5\ kg + C_{\phi.I}$$

#### S-C 5%.

$$C_{in\ P} = C_S * 0,475\ kg + C_C * 0,025\ kg$$

$$C_{out\ P} = C_{S-C5\%out} * 0,5\ kg + C_{\phi.I}$$

Ακολουθείται αντίστοιχη διαδικασία για τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις και συγκεντρώσεις.

Στον Πίνακα 4.7 παρατίθενται τα αποτελέσματα των τελικών τιμών των συγκεντρώσεων, τα οποία έχουν προκύψει από το μέσο όρο για κάθε μεταχείριση.

**Πίνακας 4.7:** Αποτελέσματα ισοζυγίων, Φωσφόρου (P), Αμμωνιακού αζώτου ( $NH_4-N$ ) και Νιτρικού αζώτου ( $NO_3-N$ )

Δείγματα	Cin P	Cout P	Cin NH <sub>4</sub> -N	Cout NH <sub>4</sub> -N	Cin NO <sub>3</sub> -N	Cout NO <sub>3</sub> -N
S	15,15	11,47	35,40	16,09	4,11	0,93
S-C 1%	15,17	12,42	35,35	30,66	4,48	3,28
S-C 2,5%	15,21	11,91	35,27	28,61	5,03	3,84
S-C 5%	15,26	12,72	35,13	14,39	5,94	4,41
S-B 1%	15,96	13,1	35,52	23,89	4,26	2,53
S-B 2,5%	17,18	13,62	36,23	24,89	4,60	2,82
S-B 5%	19,22	15,58	35,99	29,40	4,86	1,81
S-C-B 1%	15,57	13,05	35,43	20,41	4,26	3,18
S-C-B 2,5%	16,20	14,58	35,48	17,45	4,60	2,30
S-C-B 5%	17,24	16,12	35,56	30,87	4,86	0,39

Παρατηρείται από τα αποτελέσματα που προέκυψαν ότι οι τιμές στην είσοδο του ισοζυγίου είναι μεγαλύτερες από την έξοδο. Μια πρώτη εικόνα υπήρχε και από τους πίνακες των μετάλλων και μεταλλοειδών οι οποίοι έδειξαν ότι αρκετή ποσότητα από τα στοιχεία αυτά είχε συσσωρευτεί στο χώμα. Την εξήγηση για τις συγκεντρώσεις στα συγκεκριμένα αποτελέσματα αποδίδονται στο κύκλο του φωσφόρου και του αζώτου.

Το άζωτο μεταφέρεται από το έδαφος στους φυτικούς ιστούς μέσω των μικροοργανισμών, οι οποίοι μεταφέρουν μέχρι ένα συγκεκριμένο όριο ποσότητας. Το αμμώνιο που παράγεται μέσω της αμμωνιοποίησης συσσωρεύεται στο έδαφος για να προσληφθεί από τα φυτά. Μέσω της νιτροποίησης η αμμωνία μετατρέπεται σε νιτρώδη και νιτρικά τα οποία παραλαμβάνονται από τα φυτά. Στην έξοδο του ισοζυγίου οι τιμές του νιτρικού αζώτου είναι αρκετά χαμηλές λόγω της απονιτροποίησης που συμβαίνει, όπου τα απονιτροποιητικά βακτήρια μετατρέπουν τα νιτρικά ιόντα σε μοριακό άζωτο και απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα.

Ο φώσφορος βρίσκεται στο έδαφος είτε σαν αφομοιώσιμος ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) είτε σαν οργανική ουσία. Αυτές οι δυο μορφές φωσφόρου μπορούν να απορροφηθούν από τα φυτά. Ο φώσφορος ο οποίος βρίσκεται στα φυτά και στα ζώα μετά το θάνατό τους μέσω της αποσύνθεσης επιστρέφει στο έδαφος. Ο φώσφορος ο οποίος βρίσκεται στα πετρώματα απορροφάται από τα φυτά αλλά ένα μεγάλο μέρος κατακρατείται από τον άργιλο του εδάφους και έτσι συσσωρεύεται μεγάλη ποσότητα στο έδαφος κάτι το οποίο φαίνεται απ τις τιμές που εμφανίζονται στην είσοδο και την έξοδο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

### 5.1 Συμπεράσματα

Με βάση τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν, το κόμπποστ ως πλούσια θρεπτική ουσία απέδειξε ότι δεν χρήζει βελτίωσης με την μετατροπή του σε βιοεξανθράκωμα εφόσον η αυτοτελής εφαρμογή του στο έδαφος εμφάνισε αποδοτικότερα αποτελέσματα ως προς την ανάπτυξη των φυτικών ιστών. Σημαντική αύξηση παρατηρήθηκε με την προσθήκη κόμπποστ στα ξηρά βάρη των φυτικών ιστών, στις συγκεντρώσεις ολικού φωσφόρου P και ολικού αζώτου N, ακολούθησε ο μάρτυρας, ο συνδυασμός βιοεξανθράκωματος - κόμπποστ και τέλος η μεταχείριση με βιοεξανθράκωμα. Όσον αφορά τις μετρήσεις των θρεπτικών στοιχείων των φυτικών ιστών των μαρουλιών τα αποτελέσματα έδειξαν παρόμοιες συγκεντρώσεις στα μακροθρεπτικά και μικροθρεπτικά στοιχεία ανάμεσα στις μεταχειρίσεις με προσθήκη κόμπποστ και στις μεταχειρίσεις με προσθήκη βιοεξανθράκωματος. Ελαφρώς αυξημένες τιμές στα θρεπτικά στοιχεία των φυτικών ιστών εμφάνισε η συνδυαστική δράση

των δυο εδαφοβελτιωτικών στην μεγαλύτερη δόση S-C-B 5%. Στα αποτελέσματα των συγκεντρώσεων των βαρέων μετάλλων, ο ρόλος του βιοεξανθρακώματος έδειξε θετική επιρροή εφόσον στις μεταχειρίσεις με βιοεξανθράκωμα παρατηρήθηκαν οι χαμηλότερες έως αμελητέες συγκεντρώσεις. Τα όρια των βαρέων μετάλλων για τους φυτικούς ιστούς καθώς οι συγκεντρώσεις νιτρικών και μικροθρεπτικών στοιχείων κυμάνθηκαν οι περισσότερες στις προδιαγραφές όπως ορίζεται από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (WHO), πράγμα το οποίο καθιστά την καλλιέργεια μαρουλιών βρώσιμη.

Στα εδαφικά δείγματα των μεταχειρίσεων που έχει προστεθεί βιοεξανθράκωμα αλλά και συνδυασμός βιοεξανθρακώματος – κόμποστ σημειώθηκε αύξηση στις συγκεντρώσεις του διαθέσιμου φωσφόρου P-Olsen ενώ το έδαφος το οποίο περιείχε μόνο κόμποστ σημείωσε σημαντική αύξηση στις συγκεντρώσεις NH<sub>4</sub>-N έναντι των υπολοίπων 3 μεταχειρίσεων. Τα μακροθρεπτικά και μικροθρεπτικά στοιχεία στα εδαφικά δείγματα φαίνεται ότι δεν επηρεάστηκαν με την αυτοτελή προσθήκη βιοεξανθρακώματος αφού εμφάνισαν τις χαμηλότερες συγκεντρώσεις σε σύγκριση με τις υπόλοιπες τρεις μεταχειρίσεις. Αντίθετα ο θετικός ρόλος του βιοεξανθρακώματος ήταν αρκετά εμφανής στις χαμηλές συγκεντρώσεις που εμφάνισαν τα βαρέα μέταλλα στις μεταχειρίσεις με την αυτοτελή εφαρμογή του σε όλο το εύρος δόσεων που προστέθηκαν.

Συγκρίνοντας τα διαγράμματα παρατηρείται ότι μεγάλο μέρος των συγκεντρώσεων φωσφόρου έχουν συσσωρευτεί στα εδαφικά δείγματα των 3 μεταχειρίσεων με το βιοεξανθράκωμα και στο συνδυασμό βιοεξανθρακώματος - κόμποστ ενώ δεν εντοπίζεται η αντίστοιχη θετική επίδραση στους φυτικούς ιστούς.

Το ριζικό σύστημα των μαρουλιών λόγω του μικρού μήκους του ήταν ένας παράγοντας που συνετέλεσε περιοριστικά για την απορρόφηση των θρεπτικών στοιχείων από τα φυτά καθώς και η μικρή διάρκεια καλλιέργειας επηρέασε αρνητικά για την απελευθέρωση πιθανόν ευεργετικών ιδιοτήτων από το βιοεξανθράκωμα.

Καταλήγοντας έχει παρατηρηθεί και από άλλες μελέτες ότι οι ιδιότητες του βιοεξανθρακώματος απελευθερώνονται κατά κύριο λόγο με την εφαρμογή του σε ρυπασμένα και όξινα εδάφη. Εν αντιθέσει σε πλούσια οργανικά εδάφη όπως στην συγκεκριμένη έρευνα η προσθήκη βιοεξανθρακώματος επιβραδύνει την ανάπτυξη των φυτών και περιορίζει την απελευθέρωση ευεργετικών ιδιοτήτων του.

## 5.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Λαμβάνοντας υπόψιν τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής σε μελλοντικές μελέτες για την παραγωγή και χρήση βιοεξανθρακώματος θα μπορούσαν να εξεταστούν τα εξής:

- Καλλιέργεια κάποιου άλλου είδους οπωροκηπευτικού (π.χ τομάτα) μεγαλύτερης χρονικής διάρκειας εφόσον υφίσταται η παράταση με τις κατάλληλες καιρικές συνθήκες, σε μεγαλύτερο πεδίο είτε σε εδαφική έκταση είτε σε μεγάλου όγκου δοχεία. Πραγματοποίηση άλλης μιας συγκομιδής μεγαλύτερης διάρκειας ώστε να μελετηθεί εκτενέστερα η επίδραση βιοεξανθρακώματος από κόμποστ και η ανάπτυξη του ριζικού συστήματος.
- Μελέτη για εφαρμογή μεγαλύτερων δόσεων βιοεξανθρακώματος προερχόμενο από κόμποστ.
- Εφαρμογή βιοεξανθρακώματος προερχόμενο από κόμποστ και των συνδυασμό αυτών σε ρυπασμένα/όξινα εδάφη και παρακολούθηση των ιδιοτήτων τους για την δέσμευση βαρέων μετάλλων.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### Ελληνική Βιβλιογραφία

Αγραφιώτη Εβίτα, (2014). “Παραγωγή Εξανθρακώματος από Βιομάζα για Περιβαλλοντικές Εφαρμογές” . Διδακτορική διατριβή. Πολυτεχνείο Κρήτης.

Βάμβουκα Δ., (2002). “Βιομάζα, Βιοενέργεια και Περιβάλλον”. Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ. Αθήνα.

Βέλλη Παρασκευή. (2019). “Επίδραση βιοεξανθρακώματος (biochar) από λυματολάσπη στην καλλιέργεια τομάτας (*Solanum lycopersicum* L.) ” . Διπλωματική εργασία. Πολυτεχνείο Κρήτης.

Βοσνάκη Όλγα, (2021). «Προσρόφηση  $Ni^{2+}$ ,  $As^{5+}$ ,  $Pb^{2+}$  σε τροποποιημένα με οξείδιο του γραφένιου βιοεξανθρακώματα απο φλοιούς ρυζιού και λυματολάσπης». Διπλωματική εργασία. Πολυτεχνείο Κρήτης.

Γραμμέλης Π., (2003). “Ενεργειακή αξιοποίηση βιομάζας σε εγκαταστάσεις ρευστοποιημένης κλίνης”. Διδακτορική Διατριβή. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Δημητρέλος Ηλίας. (2021). “Η αξιολόγηση της διαθεσιμότητας των μετάλλων κατά τη χρήση των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων” . Διπλωματική εργασία (MSc). Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο. Αθήνα.

Μαλαμάκη Ε. (2009). “Διερεύνηση οικονομικών εργαλείων για τη βέλτιστη ολοκληρωμένη διαχείριση οργανικών στερεών αποβλήτων”. Διδακτορική Διατριβή. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Μαύρος Παναγιώτης. (2015). «Μελέτη ρύπανσης επιφανειακού εδάφους, σε περιοχή που γειτνιάζει σε κτηνοτροφικές μονάδες (CAFOs) με προσδιορισμό φυσικοχημικών παραμέτρων (pH, αγωγιμότητας) καθώς και νιτρικού και αμμωνιακού αζώτου σε δείγματα επιφανειακού εδάφους με χρήση αναλυτικών μεθόδων». Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Μαντωνανάκη, Α. (2014). “Έρευνα απομάκρυνσης Cu(II) και Pb(II) από υδατικό διάλυμα με χρήση βιοεξανθρακώματος (biochar) σε πειράματα συνεχούς ροής.” Μεταπτυχιακή Διατριβή. Πολυτεχνείο Κρήτης.

Μανωλικάκη Ι. (2018). “ Η επίδραση βιοεξανθρακώματος (biochar) από οργανικά παραπροϊόντα στις καλλιέργειες *Lolium perenne* L. και *Zea Mays* L.” Διδακτορική διατριβή. Πολυτεχνείο Κρήτης.

Μοναχός Μάριος. (2020) “ Παραγωγή βιοεξανθρακώματος μέσω πυρόλυσης και εφαρμογή στο έδαφος.” Διπλωματική εργασία. Πολυτεχνείο Κρήτης.

Μουργελά Ραφαήλα-Νικόλα (2021). “Επίδραση βιοεξανθρακώματος λυματολάσπης στην καλλιέργεια τομάτας (*Solanum lycopersicum* L.) σε ρυπασμένο με μέταλλα έδαφος” . Μεταπτυχιακή διατριβή. Πολυτεχνείο Κρήτης.

Ντούρμα Ευαγγελία (2018). “Διερεύνηση μείωσης τοξικότητας υγρών αποβλήτων και κομπόστ μέσω προσθήκης βιοεξανθρακώματος (biochar)”. Μεταπτυχιακή εργασία. Πολυτεχνείο Κρήτης.

Ράκκας Ιωάννης. (2016). “Χρήσεις Εξανθρακώματος (biochar) παραγόμενου από στερεά αγροτικά απόβλητα ως βελτιωτικό εδάφους”. Διπλωματική εργασία. Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο. Αθήνα.

Ρεγκούζας Παναγιώτης. (2015). “ Παραγωγή βιοεξανθρακώματος από το οργανικό κλάσμα των απορριμμάτων και παραγωγή για αγρονομικές.” Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης.

Σπυριδάκης Στυλιανός. (2015). “Εκτίμηση της ποιότητας των εξανθρακωμάτων από δημοτικά και ζωικά απόβλητα για ενεργειακές ή περιβαλλοντικές” . Διπλωματική εργασία. Πολυτεχνείο Κρήτης.

Στάμου Αικατερίνη, (2020). “Εφαρμογή πυρολυτικού βιο-εξανθρακώματος (BIOCHAR) στην γεωργία με σκοπό την βελτίωση της γονιμότητας του εδάφους και ταυτόχρονα την ελαχιστοποίηση κλιματικής”. Διπλωματική εργασία. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Τσεμπερούλη Μαρία, Φουσκάκη Μαρία, Χανιωτάκης Νίκος. Πρωτόκολλο ανάλυσης NO<sub>3</sub>- σε τομάτα και μαρούλι στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος. (2014). «Ορθολογική διαχείριση βιοτικών και αβιοτικών παραμέτρων σε υδροπονική καλλιέργεια τομάτας και μαρουλιού». Εργαστήριο Αναλυτικής Χημείας. Πανεπιστήμιο Κρήτης.

Τσώλης Βασίλειος Ι. (2019). "Επίδραση βιοεξανθρακώματος και βιοδιεγέρτη στις εδαφικές ιδιότητες και στη θρεπτική κατάσταση μαρουλιού (LACTUCA SATIVA L.) υπό συνθήκες αλατότητας. " Διπλωματική Εργασία. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Χαζιράκης, Π.Ι. (2007). " Παράμετροι επιρροής στην συν-Κομποστοποίηση ιλύος και οργανικού κλάσματος αστικών στερεών απορριμμάτων". Μεταπτυχιακή Διατριβή. Πολυτεχνείο Κρήτης.

## **Διεθνής Βιβλιογραφία**

Agegnehu, G., Bass, A. M., Nelson, P. N., Muirhead, B., Wright, G., & Bird, M. I. (2015). Biochar and biochar-compost as soil amendments: effects on peanut yield, soil properties and greenhouse gas emissions in tropical North Queensland, Australia. *Agriculture, ecosystems & environment*, 213, 72-85.

Agegnehu, G., Bass, A. M., Nelson, P. N., & Bird, M. I. (2016a). Benefits of biochar, compost and biochar-compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil. *Science of the Total Environment*, 543, 295-306.

Agegnehu, G., Srivastava, A. K., & Bird, M. I. (2017). The role of biochar and biochar-compost in improving soil quality and crop performance: A review. *Applied soil ecology*, 119, 156-170.

Ahmedna, M., Johns, M. M., Clarke, S. J., Marshall, W. E., & Rao, R. M. (1997). Potential of agricultural by-product-based activated carbons for use in raw sugar decolourisation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 75(1), 117-124.

Akoto-Danso, E. K., Manka'abusi, D., Steiner, C., Werner, S., Häring, V., Nyarko, G., ... & Buerkert, A. (2019). Agronomic effects of biochar and wastewater irrigation in urban crop production of Tamale, northern Ghana. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 115(2), 231-247.

Aller M.F. (2016). Biochar properties: Transport, fate, and impact. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 46, 1183-1296.

Angst, T.E. and Sohi, S.P. (2013). Establishing release dynamics for plant nutrients from biochar. *GCB Bioenergy* 5(2), 221-226.

Appel Chip, Lena Q Ma, R Dean Rhue, Elizabeth Kennelley,(2003). «Point of zero charge determination in soils and minerals via traditional methods and detection of electroacoustic mobility». Article, Science Direct, 77-93.

Banik, C. , Lawrinenko M., Bakshi, S. , & Laird, D. A. (2018). Impact of pyrolysis temperature and feedstock on surface charge and functional group chemistry of biochars. *Journal of environmental quality*, 47(3), 452-461.

Bolan, N.S., Thangarajan, R., Seshadri, B., Jena, U., Das, K.C., Wang, H., Naidu, R., 2013. Landfills as a biorefinery to produce biomass and capture biogas. *Bioresource Technology*. 135, 578-587.

Brassard P., Godbout S., Raghavan V. (2016). Soil biochar amendment as a climate change mitigation tool: Key parameters and mechanisms involved. *Journal of Environmental Management* 181, 484-497.

Brewer, C.E., Schmidt-Rohr, K., Satrio, J.A., Brown, R.C. (2009). Characterization of biochar from fast pyrolysis and gasification systems. *Environmental Progress & Sustainable Energy* 28(3), 386-396.

Cantrell, K. B., Hunt, P. G., Uchimiya, M., Novak, J. M., & Ro, K. S. (2012). Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar. *Bioresource technology*, 107, 419-428.

Cao, X., Ma, L., Gao, B., & Harris, W. (2009). Dairy-manure derived biochar effectively sorbs lead and atrazine. *Environmental science & technology*, 43(9), 3285-3291.

Cao, X. and Harris, W. (2010). Properties of dairy-manure-derived biochar pertinent to its potential use in remediation. *Bioresource Technology* 101(14), 5222-5228.

Chintala R., Clay D., Schumach T. (2013). Optimization of oxygen parameters for determination of carbon and nitrogen in biochar material. *Analytical Letters* 46, 532–538.

Damartzis, D., Zabaniotou, A., (2011). Thermochemical conversion of biomass to second generation biofuels through integrated process design – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 366-378.

Diebold, J. P., & Bridgwater, A. V. (1997). Overview of fast pyrolysis of biomass for the production of liquid fuels. In *Developments in thermochemical biomass conversion* (pp. 5-23). Springer, Dordrecht.

Doležalová, I., Lebeda, A., Janeček, J., Číhalíková, J., Křístková, E., & Vránová, O. (2002). Variation in chromosome numbers and nuclear DNA contents in genetic resources of *Lactuca L.* species (Asteraceae). *Genetic Resources and Crop Evolution*, 49(4), 385-397.

Gaskin J., Steiner C., Harris K., Das K., Bibens B. (2008). Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 51 (6), 2061–2069.

Enders, A., & Lehmann, J. (2012). Comparison of wet-digestion and dry-ashing methods for total elemental analysis of biochar. *Communications in soil science and plant analysis*, 43(7), 1042-1052.

Faria, W. M., Figueiredo, C. C. D., Coser, T. R., Vale, A. T., & Schneider, B. G. (2018). Is sewage sludge biochar capable of replacing inorganic fertilizers for corn production? Evidence from a two-year field experiment. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 64(4), 505-519.

Glaser, B., Lehmann, J., Zech, W. (2002). Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal: a review. *Biology and Fertility of Soils* 35(4), 219-230.

Granatstein, D., Kruger, C., Collins, H., Garcia-Perez, M., & Yoder, J. (2009). Use of biochar from the pyrolysis of waste organic material as a soil amendment. Washington State University.

Gunes, A., Inal, A., Taskin, M.B., Sahin, O., Kaya, E.C., Atakol, A. (2014). Effect of phosphorus-enriched biochar and poultry manure on growth and mineral composition of lettuce (*Lactuca sativa* L. cv.) grown in alkaline soil. *Soil Use and Management*, 30(2), 182- 188.

Huang, H. J., Yang, T., Lai, F. Y., & Wu, G. Q. (2017). Co-pyrolysis of sewage sludge and sawdust/rice straw for the production of biochar. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 125, 61-68.

Ippolito, J.A., Stromberger, M.E., Lentz, R.D., Dungan, R.S. (2016). Hardwood biochar and manure co-application to a calcareous soil. *Chemosphere*. 142, 84-91.

Kambo, H. S., & Dutta, A. (2015). A comparative review of biochar and hydrochar in terms of production, physico-chemical properties and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 359-378.

Kavitha, B., Reddy, P. V. L., Kim, B., Lee, S. S., Pandey, S. K., & Kim, K. H. (2018). Benefits and limitations of biochar amendment in agricultural soils: A review. *Journal of environmental management*, 227, 146-154.

Kuete, V. (Ed.). (2017). Medicinal spices and vegetables from Africa: therapeutic potential against metabolic, inflammatory, infectious and systemic diseases. Academic Press.

Li, A. M., Li, X. D., Li, S. Q., Ren, Y., Shang, N., Chi, Y., ... & Cen, K. F. (1999). Experimental studies on municipal solid waste pyrolysis in a laboratory-scale rotary kiln. *Energy*, 24(3), 209-218.

Lua, A. C., Yang, T., & Guo, J. (2004). Effects of pyrolysis conditions on the properties of activated carbons prepared from pistachio-nut shells. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 72(2), 279-287.

Lu, H., Zhang, W., Yang, Y., Huang, X., Wang, S., & Qiu, R. (2012). Relative distribution of Pb<sup>2+</sup> sorption mechanisms by sludge-derived biochar. *Water research*, 46(3), 854-862.

Lv, C., Chen, J., & Wang, X. (2017). Evaluation of surfactant performance in in situ foam flushing for remediation of dichlorodiphenyltrichloroethane-contaminated soil. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 14(3), 631-638.

- Maddox, N. (2013). The promise [and uncertainties] of Biochar. *CSA News*, 58(9), 4-9.
- Marks, E.A.N., Alcañiz, J.M., Domene, X. (2014). Unintended effects of biochars on shortterm plant growth in a calcareous soil. *Plant and Soil* 385(1-2), 87-105.
- Mia, S., Singh, B., & Dijkstra, F. A. (2017). Aged biochar affects gross nitrogen mineralization and recovery: a  $^{15}\text{N}$  study in two contrasting soils. *Gcb Bioenergy*, 9(7), 1196-1206.
- Mohamed, A. R., Mohammadi, M., & Darzi, G. N. (2010). Preparation of carbon molecular sieve from lignocellulosic biomass: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(6), 1591-1599.
- Mukherjee, A., Zimmerman, A. R., & Harris, W. (2011). Surface chemistry variations among a series of laboratory-produced biochars. *Geoderma*, 163(3-4), 247-255.
- Nguyen, T. T. N., Xu, C. Y., Tahmasbian, I., Che, R., Xu, Z., Zhou, X., ... & Bai, S. H. (2017). Effects of biochar on soil available inorganic nitrogen: a review and meta-analysis. *Geoderma*, 288, 79-96.
- Noumedem, J. A. K., Djeussi, D. E., Hritcu, L., Mihasan, M., & Kuete, V. (2017). *Lactuca sativa*. In *Medicinal spices and vegetables from Africa* (pp. 437-449). Academic Press.
- Novak, J. M., Busscher, W. J., Laird, D. L., Ahmedna, M., Watts, D. W., & Niandou, M. A. (2009). Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil. *Soil science*, 174(2), 105-112.
- Palansooriya K., Ok Y., Awad Y., Lee S., Sung J., Koutsospyros A., Moon D. (2019). Impacts of biochar application on upland agriculture: A review. *Journal of Environmental Management* 234, 52-64.
- Rees, F., Simonnot, M. O., & Morel, J. L. (2014). Short-term effects of biochar on soil heavy metal mobility are controlled by intra-particle diffusion and soil pH increase. *European Journal of Soil Science*, 65(1), 149-161.
- Regmi, P., Moscoso, J. L. G., Kumar, S., Cao, X., Mao, J., & Schafran, G. (2012). Removal of copper and cadmium from aqueous solution using switchgrass biochar produced via hydrothermal carbonization process. *Journal of environmental management*, 109, 61-69.
- Rynk, R., Van de Kamp, M., Willson, G. B., Singley, M. E., Richard, T. L., Kolega, J. J., ... & Brinton, W. F. (1992). *On-farm composting handbook* (NRAES 54). Northeast Regional Agricultural Engineering Service (NRAES).
- Schulz, H. and Glaser B. (2012). Effects of biochar compared to organic and inorganic fertilizers on soil quality and plant growth in a greenhouse experiment. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 175(3), 410-422.
- Shaaban M., Van Zwieten L., Younas S., Núñez-Delgado A., Chhajro M., Kubar K., Ali U., Rana M., Mehmood M., Hu R. (2018). A concise review of biochar application to agricultural soils to improve soil conditions and fight pollution. *Journal of Environmental Management* 228, 429-440.

Sharma, G. K., Jena, R. K., Hota, S., Kumar, A., Ray, P., Fagodiya, R. K., ... & Ray, S. K. (2020). Recent development in bioremediation of soil pollutants through biochar for environmental sustainability. In *Biochar applications in agriculture and environment management* (pp. 123-140). Springer, Cham.

Silber, A., Levkovitch, I., & Graber, E. R. (2010). pH-dependent mineral release and surface properties of cornstraw biochar: agronomic implications. *Environmental science & technology*, 44(24), 9318-9323.

Singh, B., Camps-Arbestain, M., & Lehmann, J. (Eds.). (2017). *Biochar: a guide to analytical methods*. Csiro Publishing.

Sofo, A., Moreira, I., Gattullo, C.E., Martins, L.L., Mourato, M., (2018). Antioxidant responses of edible and model plant species subjected to subtoxic zinc concentrations. *J. Trace Elem. Med. Biol.* 49: 261–268.

Tan, Y., & Chang, S. K. (2017). Digestive enzyme inhibition activity of the phenolic substances in selected fruits, vegetables and tea as compared to black legumes. *Journal of functional foods*, 38, 644-655.

Tripathi M., Sahu J.N., Ganesan P. (2016). Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 55, 467-481.

White, J. E., Catallo, W. J., & Legendre, B. L. (2011). Biomass pyrolysis kinetics: a comparative critical review with relevant agricultural residue case studies. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 91(1), 1-33.

Xi B., Yu H., Li Y., Dang Q., Tan W., Wang Y., & Cui D. (2021) «Insights into the effects of heavy metal pressure driven by long-term treated wastewater irrigation on bacterial communities and nitrogen-transforming genes along vertical soil profiles» *Journal of Hazardous Materials* 403 p. 123853.

Xu, G., Wei, L. L., Sun, J. N., Shao, H. B., & Chang, S. X. (2013). What is more important for enhancing nutrient bioavailability with biochar application into a sandy soil: Direct or indirect mechanism?. *Ecological engineering*, 52, 119-124.

## **Διαδίκτυο**

International Energy Agency, 2007, Annual report 2006, IEA Bioenergy.

[www.agroenergy.gr/categories](http://www.agroenergy.gr/categories)

[http://www.3lyk-evosm.thess.sch.gr/files/projects/2011\\_2012\\_A\\_group6\\_text.pdf](http://www.3lyk-evosm.thess.sch.gr/files/projects/2011_2012_A_group6_text.pdf)

[www.dedisa.gr/kobostopoihsh](http://www.dedisa.gr/kobostopoihsh)

[www.intechopen.com/chapters/56034](http://www.intechopen.com/chapters/56034)

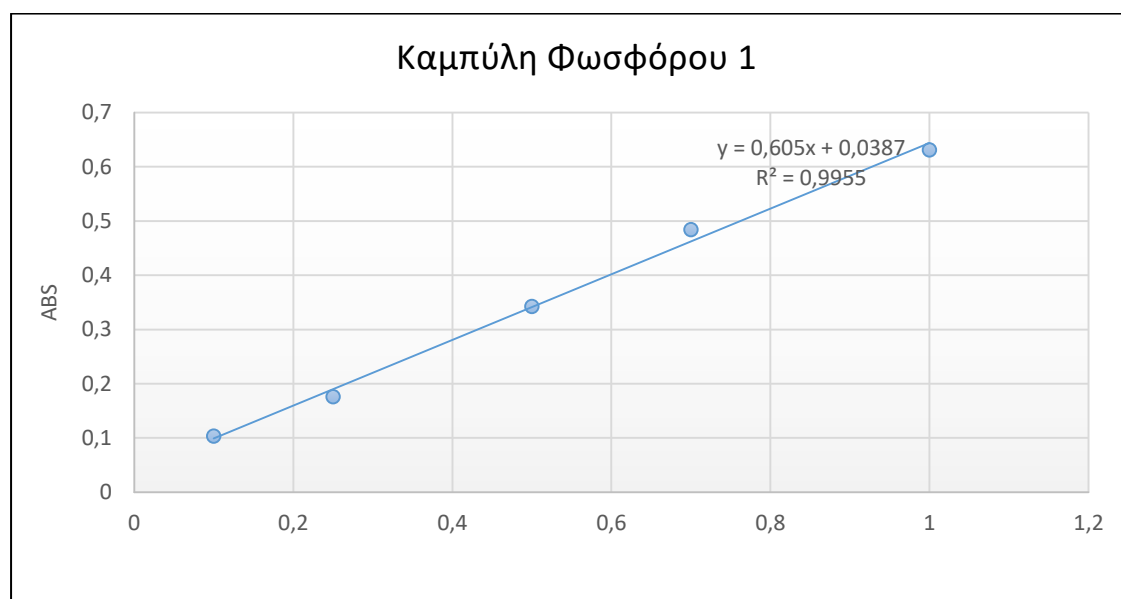
[https://www.itis.gov/servlet/SingleRpt/SingleRpt?search\\_topic=TSN&search\\_value=36607#null](https://www.itis.gov/servlet/SingleRpt/SingleRpt?search_topic=TSN&search_value=36607#null)

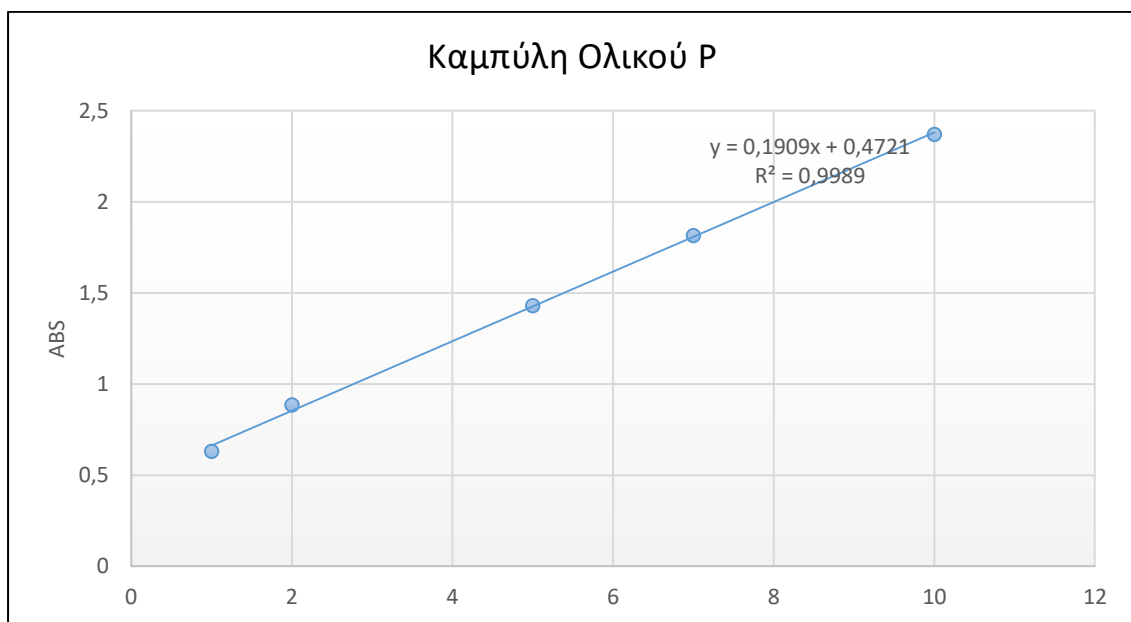
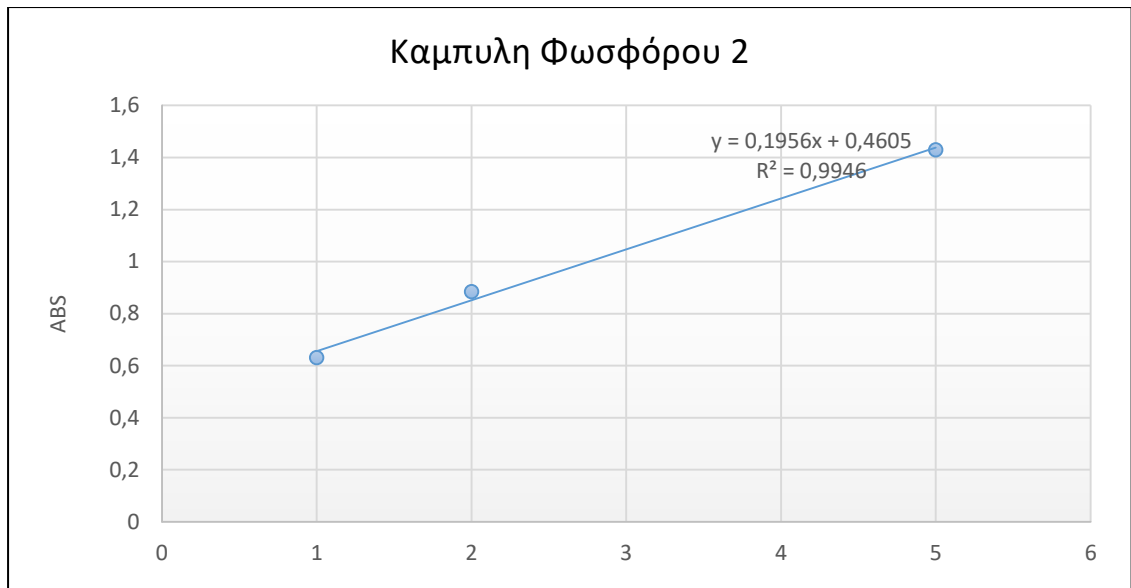
[www.geo-analysis.gr/enimerwseis/vasikes-fysikes-kai-chimikes-parametroi-toy-edafos/](http://www.geo-analysis.gr/enimerwseis/vasikes-fysikes-kai-chimikes-parametroi-toy-edafos/).

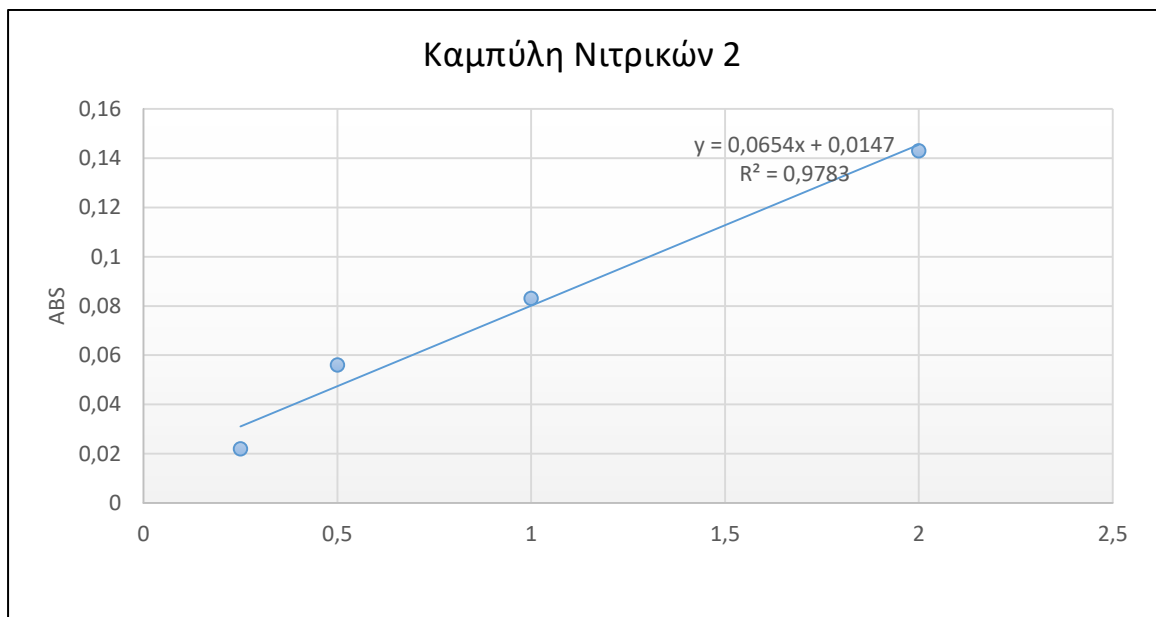
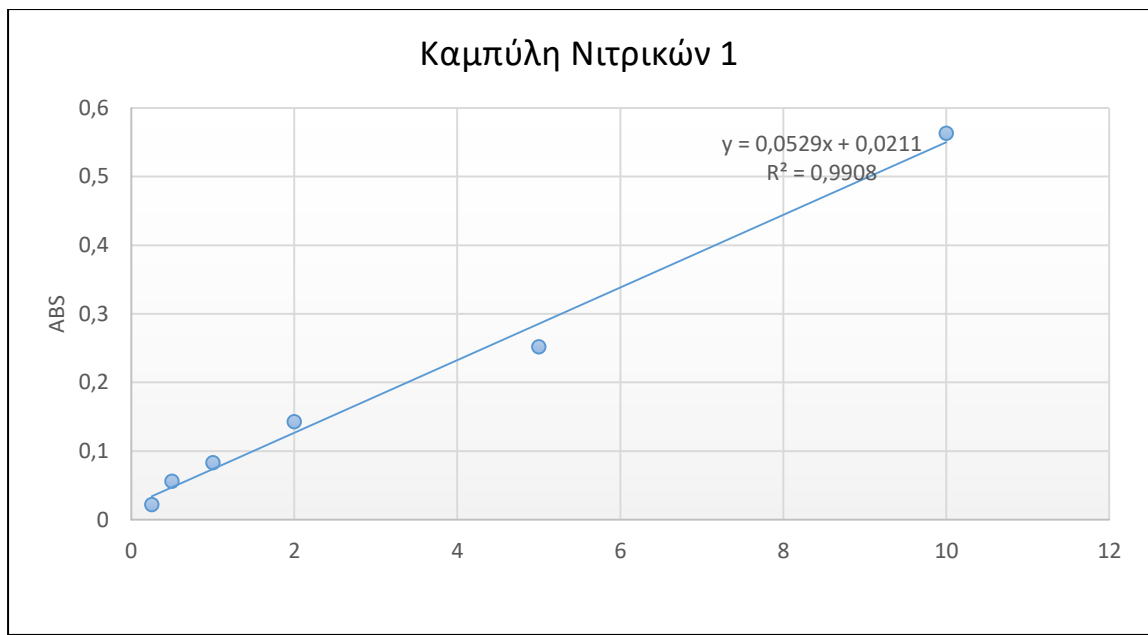
[www.eurochemgreece.gr](http://www.eurochemgreece.gr)

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

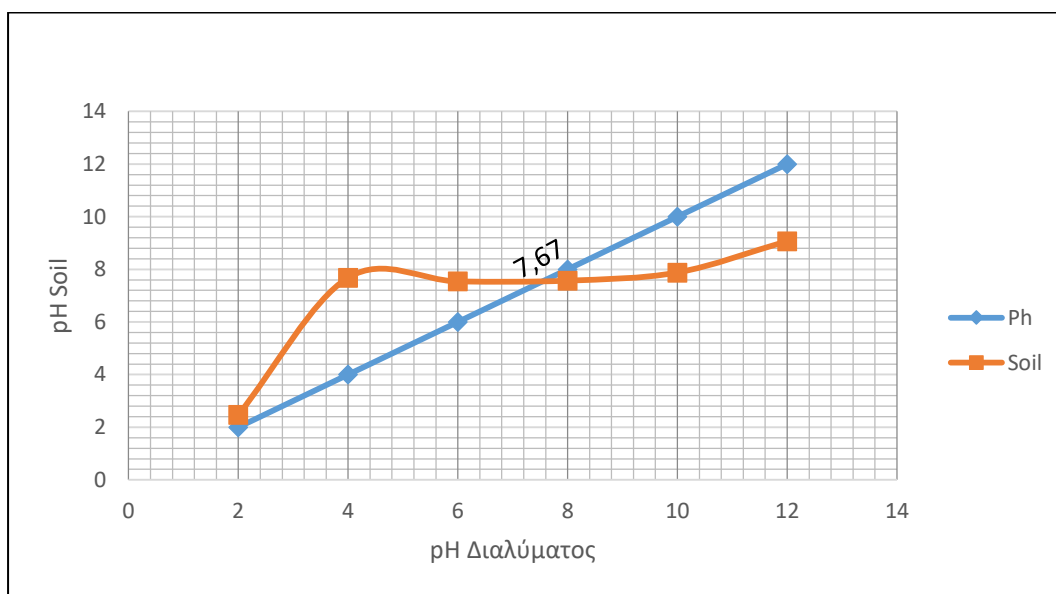
### ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Καμπύλες Βαθμονόμησης



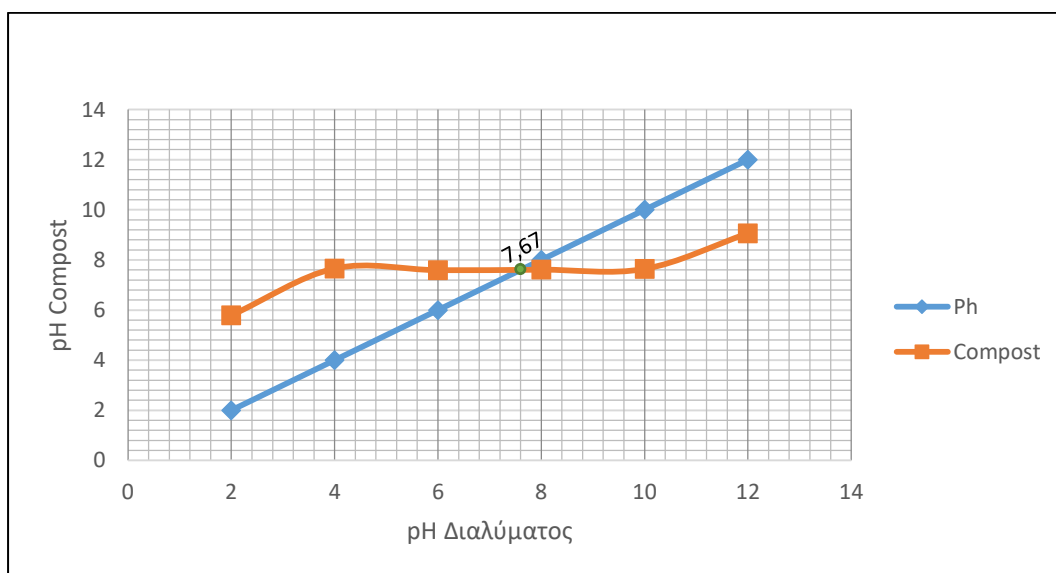




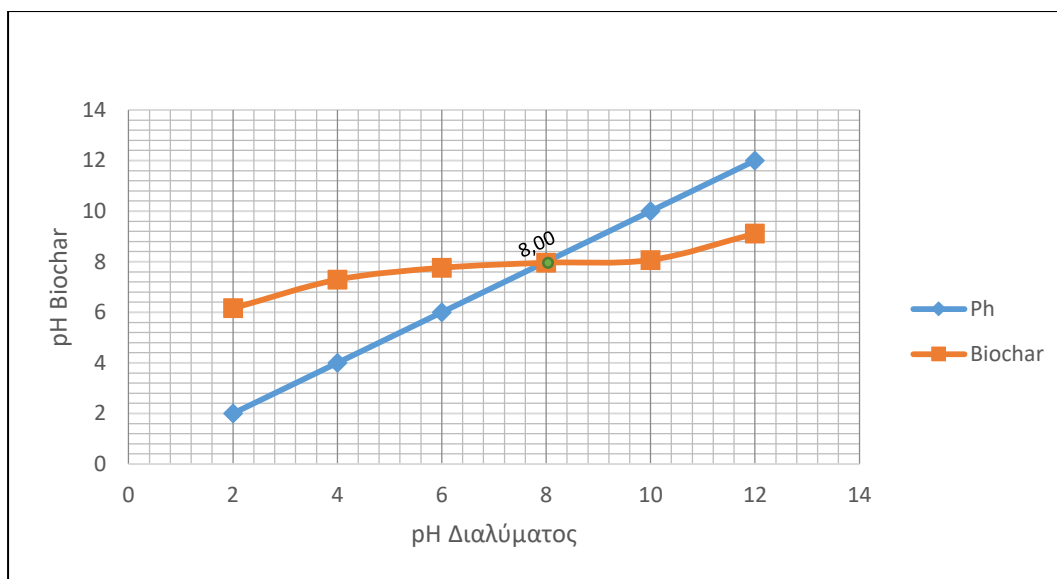
## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Μετρήσεις σε Soil, Compost, Biochar



**Σχήμα B1:** Διάγραμμα pH-PzC για το Soil



**Σχήμα B2:** Διάγραμμα pH-PzC για το Compost



**Σχήμα B3:** Διάγραμμα pH-PzC για το Biochar

**Πίνακας B1 :** Απόδοση Biochar – yield (%)

Δείγμα	Βάρος Χωνευτηρίου (g)	Compost (g)	Biochar (g)
1	38,440	46,769	38,772
2	38,125	44,955	38,310
3	36,072	48,577	41,669
4	38,621	44,647	37,025
5	34,717	49,061	42,346
6	38,441	46,99	39,816
7	34,676	48,273	41,045
8	36,055	47,425	40,103
9	38,049	45,793	38,356
10	34,684	49,696	39,481
11	38,437	45,809	36,52
12	38,302	47,192	37,632
13	38,447	42,451	34,046
14	38,361	50,833	42,887
15	38,258	48,070	38,631
16	36,129	46,925	40,141
17	34,927	46,497	37,888

18	36,006	49,636	42,623
19	34,532	48,021	41,766
20	37,928	47,535	38,741
21	38,292	45,568	40,253
22	37,858	46,571	39,481
23	38,189	45,793	38,649
24	34,127	49,435	41,993
25	36,015	45,264	37,841
	<b>Σύνολο =</b>	1177,786	986,015
	<b>Yield (%) =</b>	0,837	<b>84 %</b>