

Πολυτεχνείο Κρήτης

Σχολή Χημικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος

Εργαστήριο Τεχνολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος

## Διπλωματική Εργασία

**ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΟΜΠΟΣΤ ΚΑΙ ΒΙΟΞΑΝΘΡΑΚΩΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ  
ΜΑΡΟΥΛΙΟΥ( *LACTUCA SATIVA* L) ΑΡΔΕΥΟΜΕΝΟΥ ΜΕ  
ΔΕΥΤΕΡΟΒΑΘΜΙΑ ΕΚΡΟΗ**



Μποντιώτης Κωνσταντίνος

### Εξεταστική Επιτροπή:

Επίκουρος Καθηγητής Αλέξανδρος Στεφανάκης (επιβλέπων)

Καθηγητής Ευάγγελος Διαμαντόπουλος

Επίκουρος Καθηγητής Απόστολος Γιαννής

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους όσους συνέβαλαν στην εκπόνηση της.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπων καθηγητή μου, κύριο Αλέξανδρο Στεφανάκη καθώς και τον επίκουρο καθηγητή, κύριο Απόστολο Γιαννή, οι οποίοι σε μια πολύ δύσκολο περίοδο, όπως αυτή της πανδημίας, μου ανέθεσαν το συγκεκριμένο θέμα και έγιναν μέλη της τριμελούς επιτροπής μου. Στην συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω ξεχωριστά τον κύριο Στεφανάκη για την επιστημονική του καθοδήγηση, την απίστευτη υπομονή του, καθώς και την συνεχή του υποστήριξη στην διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Πρύτανη του Πολυτεχνείου Κρήτης, για τις εποικοδομητικές του υποδείξεις καθώς και για την παρουσία του ως το τρίτο μέλος της τριμελούς επιτροπής.

Στην προηγούμενη παράγραφο ευχαρίστησα τον κύριο Στεφανάκη για την υπομονή του απέναντι μου. Δεν έχω λόγια να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου, στην κυρία Ελισσάβετ Κουκουράκη (Ε.ΔΙ.Π), στους υποψήφιους Διδάκτορες, κύριο Παναγιώτη Ρεγκούζα και Μουκαζή Ιωάννη για την υπομονή και τον κόπο που κατέβαλαν για την ολοκλήρωση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στην φίλη και συνάδελφο μου Νάνσυ Κατιέ για την στήριξη και την βοήθεια της κατά την διάρκεια της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένεια μου και την κοπέλα μου για την οικονομική και ψυχολογική υποστήριξη, που μου προσφέρουν όλα αυτά τα χρόνια, προκείμενου να πραγματοποιήσω τα όνειρα μου.

## Περίληψη

Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία εφαρμόστηκαν δύο διαφορετικά εδαφοβελτιωτικά σε διάφορες αναλογίες σε καλλιεργήσιμο χώμα και μελετήθηκε η ανάπτυξη των φυτών. Τα δύο εδαφοβελτιωτικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν Compost από την ΔΕΔΙΣΑ και ένα βιοεξανθράκωμα που παρασκευάστηκε από το κομπόστ που προαναφέρθηκε. Το βιοεξανθράκωμα παρασκευάστηκε μέσω πυρόλυσης στους 300° C για 4h. Οι αναλογίες που μελετήθηκαν στα εδαφοβελτιωτικά ήταν 1% 2,5% και 5% σε σχέση με το χώμα. Επίσης επιλέχθηκε και συνδυασμός των δύο εδαφοβελτιωτικών με το χώμα. Επιλέχθηκαν 4 επαναλήψεις σε κάθε μεταχείριση, με αποτέλεσμα το σύνολο της καλλιέργειας να αποτελείται από 40 γλάστρες. Το φυτό που μελετήθηκε ήταν το μαρούλι. Ως μέσο ποτίσματος επιλέχθηκε επεξεργασμένο υγρό απόβλητο, που προέρχεται από δευτεροβάθμια καθίζηση και είναι χλωριωμένο. Έπειτα από περίπου 40 μέρες καλλιέργειας, έγινε συγκομιδή των μαρουλιών και ξεκίνησαν οι εργαστηριακές αναλύσεις, αφού πρώτα έγινε διαχωρισμός των εδαφικών δειγμάτων των καλλιεργειών και των κορμών του φυτού. Αρχικά έγινε χαρακτηρισμός του χώματος που επιλέξαμε ως βάση της καλλιέργειας, καθώς και των άλλων εδαφοβελτιωτικών υλικών. Ο χαρακτηρισμός των αρχικών και τελικών εδαφικών δειγμάτων περιελάμβανε μέτρηση του pH, της αγωγιμότητας (EC), του ολικού αλλά και διαθέσιμου φωσφόρου καθώς και του αζώτου που προέρχεται από ενώσεις αμμωνιακών (NH<sub>4</sub>-N) και νιτρικών (NO<sub>3</sub>-N). Τέλος έγινε προσδιορισμός των μετάλλων στα αρχικά και τελικά εδαφικά δείγματα καθώς και στους κορμούς. Στα αρχικά δείγματα μετρήθηκαν επίσης ο οργανικός και ανόργανος άνθρακας (TOC, IC), η κατιοντοανταλλακτική τους ικανότητα (CEC), έγινε προσδιορισμός τέφρας στο κομπόστ και το βιοεξανθράκωμα και υπολογίστηκε η φαινόμενη πυκνότητά τους. Όσον αφορά στους κορμούς έγιναν μετρήσεις στο ολικό άζωτο (TN) και ολικό φώσφορο P. Μέσω των αποτελεσμάτων παρατηρήθηκε ότι το χώμα που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία, επωφελήθηκε σημαντικά από την χρήση εδαφοβελτιωτικού. Συγκεκριμένα το κομπόστ, ενίσχυσε σημαντικά τις συγκεντρώσεις φωσφόρου και αζώτου, ενώ το βιοεξανθράκωμα δεν κατάφερε να επιδράσει θετικά όπως αναμενόταν. Ο συνδυασμός εμφάνισε παρόμοια και χαμηλότερα αποτελέσματα από τις καλλιέργειες που περιείχαν κομπόστ και βιοεξανθράκωμα.

## ABSTRACT

In this particular dissertation, two different soil improvers were applied in various proportions to arable soil and the growth of plants was studied. The two soil improvers used, were Compost from DEDISA and a Biochar manufactured from the Compost mentioned above. Biochar was prepared by pyrolysis at 300° C for 4h. The proportions we used in soil improvers were 1% 2.5% and 5% compared to soil. A combination of the two soil improvers with the soil was also chosen. Particularly four repetitions were selected in each treatment, resulting in the total crop being 40 pots. As a watering medium, a treated liquid waste was chosen, which comes from secondary precipitation, which is chlorinated. After 40 days of cultivation, the lettuces were harvested and laboratory analyses began, after the soil samples of the crops and the logs of the plant were separated. Initially, the soil we chose as the basis of the crop, as well as the other soil improvers, were characterized. In the characterization of the initial and final soil samples there are measurements of pH, conductivity (EC), total and available phosphorus as well as nitrogen derived from ammonium compounds (NH<sub>4</sub>-N) and nitrates (NO<sub>3</sub>-N). Finally, the metals were determined in the initial and final soil samples as well as in the logs. There are also measurements in the original samples for organic and inorganic carbon (TOC,IC), their cation exchange capacity (CEC), ash determination and bulk density. As far as the logs are concerned, measurements were made on total nitrogen (TN) and phosphorus P (TP). Through the results it was observed that the soil used in the experimental process, benefited significantly from the use of a soil improver. In particular, compost significantly enhanced phosphorus and nitrogen concentrations, while biochar did not manage to have a positive effect as expected. The combination showed similar and lower results than crops containing compost and biochar.

## Πίνακας περιεχομένων

Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό Υπόβαθρο .....	8
2.1 Κομποστοποίηση .....	8
2.1.1 Εφαρμογή Κομπόστ στο έδαφος.....	9
2.2 Πυρόλυση.....	10
2.2.1 Βασικές Έννοιες.....	10
2.2.2 Είδη Πυρόλυσης.....	11
2.2.3 Προϊόντα Πυρόλυσης .....	14
2.2.3.1 Βιοεξανθράκωμα (Biochar) .....	14
2.2.3.2 Βιο-έλαιο (bio-oil) .....	15
2.2.3.3 Βιοαέριο Σύνθεσης (Syngas) .....	15
2.3 Biochar.....	15
2.3.1 Χαρακτηριστικά του Biochar βάσει συγκεκριμένων παραγόντων .....	16
2.4 Ιδιότητες Biochar .....	19
2.4.1 Φυσικές ιδιότητες Biochar.....	19
2.4.2 Χημικές ιδιότητες του Biochar .....	19
2.5 Υγεία του εδάφους .....	20
2.6 Επίδραση Βιοεξανθρακώματος στο έδαφος .....	21
2.7 Λύμα.....	22
2.8 Ποιότητα Λύματος .....	22
2.9 Μαρούλι (Lactuca Sativa) .....	23
2.10 Πειράματα με εφαρμογές κομπόστ, βιοεξανθρακώματος και επεξεργασμένο υγρό απόβλητο.....	24
3.1 Υλικά .....	25
3.1.1 Κομπόστ Δ.Ε.ΔΙ.Σ.Α Χανίων .....	25
3.1.2 Λύμα Δ.Ε.Υ.Α Χανίων .....	26
3.2 Εγκατάσταση Πειράματος.....	27
3.3 Μέθοδοι Ανάλυσης Εδάφους, Κομπόστ και Βιοεξανθρακώματος.....	29
3.3.1 Προσδιορισμός pH-Αγωγιμότητας .....	29
3.3.2 Ph – PZC (Point Zero Charge) .....	30
3.3.3 Προσδιορισμός Μετάλλων και Μεταλλοειδών .....	31
3.3.4 Προσδιορισμός Φαινόμενης Πυκνότητας.....	32
3.3.5 Υπολογισμός Κατιοντοανταλλακτικής Ικανότητας .....	32
3.3.6 Προσδιορισμός Τέφρας .....	33

3.3.2 Ανάλυση στα εδαφικά δείγματα .....	33
3.3.2.1 Λειοτρίβηση/Ξήρανση των εδαφικών δειγμάτων .....	33
3.3.2.2 Υπολογισμός pH – Αγωγιμότητας.....	33
3.3.2.3 Μέτρηση TOC-IC .....	33
3.3.2.4 Προσδιορισμός Διαθέσιμου Φωσφόρου (Olsen-P) .....	34
3.3.2.5 Προσδιορισμός Ολικού Φωσφόρου.....	35
3.3.2.6 Υπολογισμός Αμμωνιακού Αζώτου (NH <sub>4</sub> -N) .....	35
3.3.2.7 Μέτρηση Νιτρικού Αζώτου (NO <sub>3</sub> -N).....	36
3.3.3 Αναλύσεις Φυτικών Ιστών .....	36
3.3.3.1 Λειοτρίβηση / Ξήρανση .....	36
3.3.3.2 Προσδιορισμός Ολικού Φωσφόρου.....	36
3.3.3.3 Προσδιορισμός Ολικού Αζώτου .....	37
3.3.3.4 Προσδιορισμός Μετάλλων και Μεταλλοειδών.....	37
3.3.4 Χαρακτηρισμός Λύματος .....	37
4.1.1 Χαρακτηρισμός του εδάφους και των εδαφοβελτιωτικών.....	38
4.1.2 Προσδιορισμός Μετάλλων και Μεταλλοειδών .....	41
4.2 Αποτελέσματα φυτικών ιστών .....	42
4.2.1 Ανάπτυξη των Φυτικών Ιστών .....	42
4.2.2 Αποτελέσματα Ολικού Φωσφόρου (P) .....	46
4.2.3 Αποτελέσματα Ολικού Αζώτου (TN) .....	48
4.3 Αποτελέσματα Εδαφικών Δειγμάτων .....	51
4.3.1 Συγκεντρωτικός Πίνακας Παρουσίασης Αποτελεσμάτων .....	51
4.3.2 pH – Αγωγιμότητα.....	52
4.3.3 Αποτελέσματα Διαθέσιμου Φωσφόρου Olsen-P .....	52
4.3.4 Αποτελέσματα Αμμωνιακού και Νιτρικού Αζώτου (NH <sub>4</sub> -N,NO <sub>3</sub> -N).....	53
4.3.5 Προσδιορισμός Μετάλλων και Μεταλλοειδών .....	55
Ισοζύγια .....	58
Συμπεράσματα .....	61
Ιδέες για Μελλοντική Έρευνα .....	62
Βιβλιογραφία.....	62
Ελληνική Βιβλιογραφία.....	62
Διεθνής Βιβλιογραφία .....	63
Παραρτήματα.....	69
Παράρτημα Α: Καμπύλες Βαθμονόμησης.....	69

## Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Το σημαντικότερο πρόβλημα που καλούμαστε να αντιμετωπίσουμε, είναι αυτό της προστασίας του περιβάλλοντος. Με την πάροδο του χρόνου και την αυξητική τάση του πληθυσμού, ο όγκος των στερεών, αλλά και υγρών αποβλήτων αυξάνεται ραγδαία. Αυτό έφερε ως αποτέλεσμα την επιτακτική ανάγκη για ανάπτυξη τεχνολογιών αντιρύπανσης, αλλά και ανακύκλωσης των αποβλήτων. Ένα μέρος των στερεών αποβλήτων μπορεί να ανακυκλωθεί και να επαναχρησιμοποιηθεί, ενώ όσον αφορά στα υγρά απόβλητα μέσω επεξεργασίας διατίθενται είτε σε υδάτινους αποδέκτες, είτε χρησιμοποιούνται για αστική χρήση, είτε ως μέσο ποτίσματος σε καλλιέργειες. Για αυτόν τον λόγο, γίνεται συνεχής έλεγχος, στην ποιότητα του επεξεργασμένου αποβλήτου.

Επίσης μέσα από τα υγρά απόβλητα προκύπτει και η ιλύς, η οποία κάτω από πολύ συγκεκριμένες διαδικασίες πρέπει να σταθεροποιηθεί και μέσω της κομποστοποίησης να μετατραπεί σε κομπόστ. Το κομπόστ χρησιμοποιείται κυρίως λόγω της ικανότητας του να καταστείλει ασθένειες στα εδάφη, αλλά και λόγω της ικανότητας του να συγκρατεί νερό. Αποτελεί ενδιαφέρον πολλών ερευνών, λόγω του πολύ χαμηλού κόστους που απαιτείται για την παραγωγή του, αλλά και για τα οικολογικά οφέλη που μπορεί να προσφέρει (Dreher, Amlinger et al., 2001).

Ωστόσο ένα μέρος των στερεών αποβλήτων δεν μπορεί να ανακυκλωθεί. Αυτό οδήγησε τους επιστήμονες στην εύρεση ιδεών, μέσω των οποίων τα συγκεκριμένα στερεά απόβλητα να μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν. Μια τέτοια ιδέα ήταν αυτή της πυρόλυσης. Η πυρόλυση είναι μια διαδικασία κατά την οποία επιλέγεται μια βιομάζα (π.χ τροφικά υπολείμματα) και τοποθετείται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες ( $>300^{\circ}\text{C}$ ), ώστε να παραχθεί ένα προϊόν πλούσιο σε άνθρακα και θρεπτικά στοιχεία (ανάλογα την βιομάζα που έχει επιλεγεί). Το προϊόν αυτό αποκαλείται βιοεξανθράκωμα (ή Biochar) και χρησιμοποιείται κυρίως ως εδαφοβελτιωτικό. Έχει την ικανότητα να αυξάνει το pH του εδάφους, αλλά και να σταθεροποιεί τις συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων (Rees, Simonnot et al., 2014).

Με βάση όσα ειπώθηκαν παραπάνω, γίνονται εύκολα αντιληπτοί οι λόγοι, για τους οποίους η επιστημονική κοινότητα έχει επικεντρωθεί σε αυτά τα δυο προϊόντα. Συγκεκριμένα για το βιοεξανθράκωμα, γίνονται πολλά πειράματα στον τρόπο παραγωγής του, που έχουν ως σκοπό την βελτιστοποίηση του. Οπότε γίνονται δοκιμές για την Παρασκευή του βιοεξανθράκωμα με διάφορες βιομάζες, θερμοκρασίες πυρόλυσης αλλά και χρόνους παραμονής των βιομαζών κατά την πυρόλυση.

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία ασχολήθηκε με την παραγωγή βιοεξανθράκωματος, μέσω πυρόλυσης στους  $300^{\circ}\text{C}$  για 4 ώρες, όπου ως βιομάζα χρησιμοποιήθηκε κομπόστ που συλλέχθηκε από την ΔΕΔΙΣΑ Χανίων. Στην συνέχεια έγινε ανάμειξη των δυο παραπάνω εδαφοβελτιωτικών σε διάφορες αναλογίες με χώμα, αλλά και μεταξύ τους. Τα εδαφικά δείγματα που προέκυψαν, χρησιμοποιήθηκαν ως βάση για την καλλιέργεια μαρουλιών, προκειμένου να παρατηρηθεί κατά πόσο τα εδαφοβελτιωτικά επηρεάζουν την ανάπτυξη των

μαρουλιών. Επιπρόσθετα χρησιμοποιήθηκε και επεξεργασμένο υγρό απόβλητο ως μέσο ποτίσματος της καλλιέργειας.

## Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό Υπόβαθρο

### 2.1 Κομποστοποίηση

Αρχικά κομποστοποίηση είναι η διαδικασία, κατά την οποία η οργανική ύλη ανακυκλώνεται φυσικά και μετατρέπεται σε ένα πολύτιμο λίπασμα που μπορεί να εμπλουτίσει το έδαφος και τα φυτά. Η διαδικασία της κομποστοποίησης είναι μια αερόβια βιολογική διαδικασία, κατά την οποία οι αερόβιοι μικροοργανισμοί χρησιμοποιούν την οργανική ύλη ως υπόστρωμα (Doble , Kumar , 2005). Σκοπός της κομποστοποίησης είναι η σταθεροποίηση της οργανικής ύλης καθώς και της καταστροφής των παθογόνων μικροοργανισμών (Harrison, 2008). Ο λόγος που αποτελεί ενδιαφέρον πολλών ερευνών είναι τα οικονομικά και οικολογικά οφέλη που προσφέρει. Η κομποστοποίηση πρέπει να είναι μια ελεγχόμενη διαδικασία, διότι προκειμένου να χρησιμοποιηθεί ως λίπασμα απαιτείται η τήρηση συγκεκριμένων παραμέτρων. Τέτοιοι παράμετροι είναι (Bernal, Michel Jr., 2017) :

- Σωστές αναλογίες μεταξύ των υλικών
- Κατάλληλες συνθήκες αερισμού
- Συγκεκριμένα ποσοστά υγρασίας
- Συγκεκριμένο μέγεθος των υλικών

Το κομποστ για να λειτουργήσει ως εδαφοβελτιωτικό δεν απαιτείται μόνο να παρασκευαστεί κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Είναι πολύ σημαντικό να χρησιμοποιείται σε πολύ συγκεκριμένες περιπτώσεις όπως (RB Harrison, 2008):

- Για την βελτίωση της κλίσης του εδάφους
- Καταστολή ασθενειών στο έδαφος
- Ικανότητα συγκράτησης νερού

Πρέπει να γίνει κατανοητό ότι μέσω της κομποστοποίησης μας δίνεται η δυνατότητα να συμβάλλει ο καθένας μας ατομικά στον τομέα της ανακύκλωσης και ταυτόχρονα να βελτιώσουμε την οικονομία της χώρας μας. Χαρακτηριστικά στις Η.Π.Α το 28% των αποβλήτων αποτελείται από τρόφιμα και υπολείμματα κήπου. (Shelia Hu , 2020). Στις Η.Π.Α το μέσο κόστος υγειονομικής ταφής αστικών στερεών αποβλήτων είναι 55 \$/tn για το έτος 2019 και παράγονται περισσότερους από 267 εκατομμύρια τόνους αποβλήτων, εκ των οποίων τα 2/3 καταλήγουν σε υγειονομικές ταφές (Shelia



Hu , 2020). Οπότε μπορούμε να διαπιστώσουμε πόσο σημαντική είναι η έννοια της κομποστοποίησης στην καθημερινότητα μας.

### **2.1.1 Εφαρμογή Κομπόστ στο έδαφος**

Προηγουμένως αναφέρθηκε ότι για τη δημιουργία του κομπόστ απαιτούνται πολύ συγκεκριμένες και ελεγχόμενες διαδικασίες, προκειμένου το τελικό μας προϊόν να είναι διαθέσιμο για επαναχρησιμοποίηση. Οι παράγοντες, που πρέπει να προσέξουμε είναι οι εξής (US EPA, 2020) :

- Πρώτες ύλες και τα θρεπτικά συστατικά τους
- Μέγεθος σωματιδίων
- Περιεκτικότητα σε υγρασία
- Ροή οξυγόνου
- Θερμοκρασία

Με την τήρηση των συγκεκριμένων παραμέτρων, αλλά και με την επιλογή συγκεκριμένης τεχνικής κομποστοποίησης μπορούν να δημιουργηθούν διαφορετικά προϊόντα κομπόστ, όπου το καθένα έχει τις ιδιότητες του. Τα πλεονεκτήματα που μπορούν να ληφθούν από το προϊόν αυτό είναι (US Composting Council):

- **Μείωση του συνολικού όγκου των αποβλήτων**

Το 25-50% των οργανικών αποβλήτων προέρχεται από υπολείμματα τροφίμων. Τα συγκεκριμένα απόβλητα οδηγούνται σε χώρους υγειονομικής ταφής, όπου και αποσυντίθενται. Το κομπόστ γενικότερα αποτελείται από αυτού του είδους τα απόβλητα. Οπότε μέσω αυτής της ανακύκλωσης παράγεται ένα ευεργετικό προϊόν.

- **Λειτουργεί σαν εδαφοβελτιωτικό**

Το κομπόστ έχει την δυνατότητα:

1. Να αυξήσει την οργανική ουσία στο χώμα
2. Να εμπλουτίσει το χώμα με θρεπτικά συστατικά, τα οποία θα απορροφήσει αργότερα το φυτό
3. Βοηθάει στην βελτίωση αργιλικών εδαφών, κάνοντας τα πιο ευάερα
4. Εξισορροπεί το pH και την θερμοκρασία του εδάφους
5. Παίζει σημαντικό ρόλο στην πρόληψη της διάβρωσης των εδαφών

- **Εξοικονόμηση νερού**

Με την χρήση κομπόστ στο έδαφος, γίνεται εξοικονόμηση νερού, λόγω της ικανότητας του να συγκρατεί και να μεταφέρει αποτελεσματικά το νερό. Μέσω αυτής της ιδιότητας του προσφέρει και οικονομικά, αλλά και περιβαλλοντικά οφέλη.

- **Βοηθά στην καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής**

Το κομπόστ αποτελεί πολύ σημαντικό παράγοντα για τα φυτά ώστε να καταφέρνουν να προσλαμβάνουν διοξείδιο του άνθρακα και να το μετατρέπουν σε φυλλώδη ανάπτυξη. Εκτός αυτού χρησιμοποιεί το μεθάνιο που εκπέμπεται από τα οργανικά υλικά κατά την αποσύνθεση τους με τέτοιο τρόπο ώστε να οφελεί το περιβάλλον.

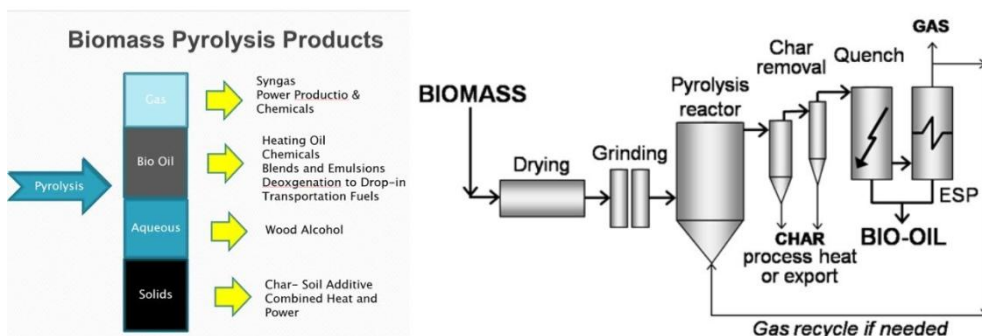
## **2.2 Πυρόλυση**

### **2.2.1 Βασικές Έννοιες**

Πυρόλυση είναι η διαδικασία κατά την οποία η βιομάζα μετατρέπεται σε ένα ενδιάμεσα υγρό προϊόν που μπορεί να εξευγενιστεί σε βιοκαύσιμα υδρογονανθράκων, σε πρόσθετα καυσίμων καθώς και σε πετροχημικές αντικαταστάσεις (USDA, 2021). Για να επιτευχθεί αποτελεσματικά η πυρόλυση, πρέπει το οργανικό υλικό να θερμαίνεται απουσία οξυγόνου. Συνήθως η πυρόλυση της βιομάζας διεξάγεται στους 500° C (μπορεί και σε υψηλότερες θερμοκρασίες), με αποτέλεσμα η βιομάζα να αποσυντίθεται σε εύφλεκτα αέρια και βιοεξανθρακώματα. Η συσσώρευση των συγκεκριμένων εύφλεκτων αερίων προκαλεί την δημιουργία του βιο-ελαίου. Όποτε παρατηρούμε ότι μέσω την συγκεκριμένης διαδικασίας μπορούν να παραχθούν τρία προϊόντα :

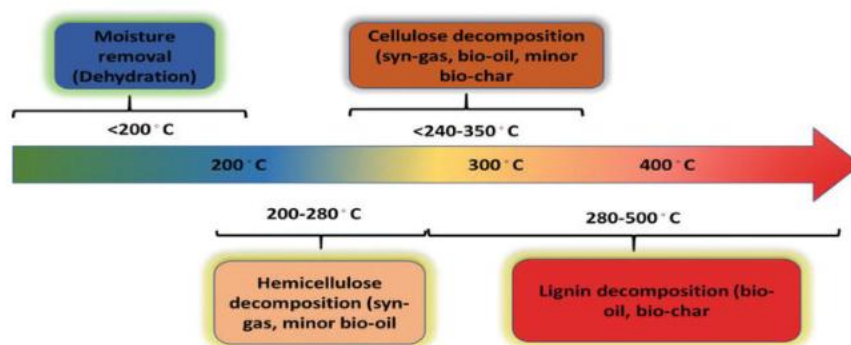
- I. Βίο-έλαιο ( Υγρό )
- II. CO<sub>2</sub> , CO , H<sub>2</sub> , ελαφροί υδρογονάνθρακες (Αέριο)
- III. Βιοαπανθρακωμένο (Στερεό)

Η αναλογία στην οποία παράγονται τα συγκεκριμένα προϊόντα εξαρτάται από την δομή του οργανικού κλάσματος που πυρολύεται και από από τις παραμέτρους της διαδικασίας.



Εικόνα 2.1 : Προϊόντα Πυρόλυσης και τρόπος παραγωγής τους

Η ανάπτυξη της διαδικασίας της πυρόλυσης είναι αρκετά υποσχόμενη μελλοντικά. Τα περισσότερα πειράματα που έχουν γίνει για την απόδειξη της πράσινης οικονομίας που προσφέρει αυτή η διεργασία γίνεται σε μικρή ή πιλοτική κλίμακα (Yehye, 2016). Σημαντικό είναι να γίνει το επόμενο βήμα, δηλαδή πειράματα σε βιομηχανική κλίμακα. Μόνο μέσω αυτών των αποτελεσμάτων θα μπορέσουμε να έχουμε αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα. Μέχρι στιγμής δίνεται η δυνατότητα να δημιουργηθούν 3 διαφορετικά προϊόντα, όπου το καθένα έχει την δικιά του χρησιμότητα και είναι φιλικό προς το περιβάλλον. Εκτός αυτού προέρχονται από υλικά, που υπάρχουν σε διαθεσιμότητα στην φύση και η παραγωγή τους είναι αρκετά γρήγορη και οικονομική. Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που λειτουργεί η πυρόλυση μπορεί να δημιουργήσει βιοκαύσιμα, χρησιμοποιώντας απόβλητα καλλιεργειών, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται η υγρασία του δείγματος. Τέλος λόγω των υψηλών θερμοκρασιών καταστρέφει μεγάλο μέρος των παθογόνων



μικροοργανισμών που υπάρχουν στο χύμα.

Εικόνα 2.2: Προϊόντα πυρόλυσης βάσει διαφορετικών θερμοκρασιών.

## 2.2.2 Είδη Πυρόλυσης

Υπάρχουν διάφορα είδη πυρόλυσης, τα οποία αποσκοπούν στην παραγωγή διαφορετικών βιοκαυσίμων. Ο τρόπος με τον οποίο διαχωρίζονται τα είδη

πυρόλυσης σχετίζεται με τον ρυθμό θέρμανσης. Τα είδη πυρόλυσης που υπάρχουν είναι τα εξής:

i. **Ταχεία πυρόλυση (Fast Pyrolysis)**

Ταχεία πυρόλυση ορίζεται η άμεση θερμοχημική τεχνική, μέσω της οποίας γίνεται υγροποίηση της στερεάς βιομάζας σε υγρό βιο-έλαιο απουσία οξυγόνου. Ο χρόνος παραμονής του δείγματος κυμαίνεται από 1-10 min και μπορεί να λειτουργήσει σε θερμοκρασίες από 850° C-1250° C. Μέσω της συγκεκριμένης διαδικασίας γίνεται υγροποίηση του 65-75% της συνολικής βιομάζας (Pagliuso, 2010), όπου είναι σε συνδυασμό με την παραγωγή αερίων ο κύριος σκοπός της συγκεκριμένης διαδικασίας. Επίσης 15-25% είναι η παραγωγή βιοεξανθρακώματος και 10-20% η παραγωγή αερίων.

ii. **Ακαριαία Πυρόλυση (Flash Pyrolysis)**

Στην ακαριαία πυρόλυση ο ρυθμός θέρμανσης είναι υψηλός, με τον χρόνο παραμονής να είναι από 0,1 -1s. Οι θερμοκρασίες, στις οποίες γίνεται η διαδικασία αυτή είναι >1000° C/s. Μια ακόμη πολύ σημαντική παράμετρος είναι ότι το μέγεθος των σωματιδίων της πρώτης ύλης πρέπει να είναι περίπου 105-250 μm (Dyer, 2013). Λόγω των συγκεκριμένων παραμέτρων το λειτουργικό κόστος είναι αρκετά υψηλό, καθιστώντας την διαδικασία αυτή λιγότερο επιθυμητή σε σχέση με τις υπόλοιπες. Ο συγκεκριμένος τρόπος πυρόλυσης ωστόσο, λόγω των ακραίων συνθηκών στις οποίες λειτουργεί, μπορεί να παράξει βιο-έλαιο έως και 75%

iii. **Ενδιάμεση Πυρόλυση (Intermediate Pyrolysis)**

Η συγκεκριμένη πυρόλυση έχει αυτήν την ονομασία, επειδή αποτελεί ένα συνδυασμό της ταχείας και της βραδείας πυρόλυσης. Ο χρόνος παραμονής των δειγμάτων κυμαίνεται από 5 – 17 min, με την τελική θερμοκρασία να έχει εύρος από 500-650° C. Μέσω αυτής της διαδικασίας μπορούμε να παράξουμε βιο-έλαιο(μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας ως καύσιμο), βιοεξανθράκωμα και βιοαέριο.(Velli , 2019)

iv. **Πυρόλυση Κενού**

Η πυρόλυση κενού διαφέρει σημαντικά με τις υπόλοιπες που έχουν αναφερθεί. Ο ρυθμός θέρμανσης αυτής της διαδικασίας είναι χαμηλότερος καθώς επίσης και η τελική θερμοκρασία στην οποία λειτουργεί. Αναλυτικότερα ο χρόνος παραμονής του δείγματος είναι

από 2-30s, η μέγιστη τελική θερμοκρασία είναι στους 400° C και μέσω αυτής παράγεται βιο-έλαιο. Δίνεται η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν πρώτες ύλες με μεγαλύτερα σωματίδια και δεν απαιτείται φέρον αέριο (Nachenious et al., 2013). Για να επιτευχθεί η συγκεκριμένη διαδικασία πρέπει να λειτουργεί σε απόλυτη πίεση 20 kPa.

#### v. Υδροπυρόλυση (Hydropyrolysis)

Μέσω της υδροπυρόλυσης επιτυγχάνονται πολύ υψηλές αποδόσεις πυρολυμάτων σε οργανικά κλάσματα. Σε σχέση με την ακαριαία πυρόλυση, ο ρυθμός θέρμανσης είναι αισθητά πιο χαμηλός (π.χ 8° C/min). Ο χρόνος παραμονής του δείγματος είναι από 1-10 min και οι τελικές θερμοκρασίες έχουν ένα εύρος από 300° C έως 550° C. Σκοπός την υδροπυρόλυσης είναι η παρασκευή βιο-ελαίου. Τέλος απαιτούνται θερμικοί αντιδραστήρες ανοιχτού συστήματος με ατμόσφαιρα υψηλή σε υδρογόνο (>10 MPa)(Grice, Eiserbeck, 2014).

#### vi. Βραδεία Πυρόλυση (Slow Pyrolysis)

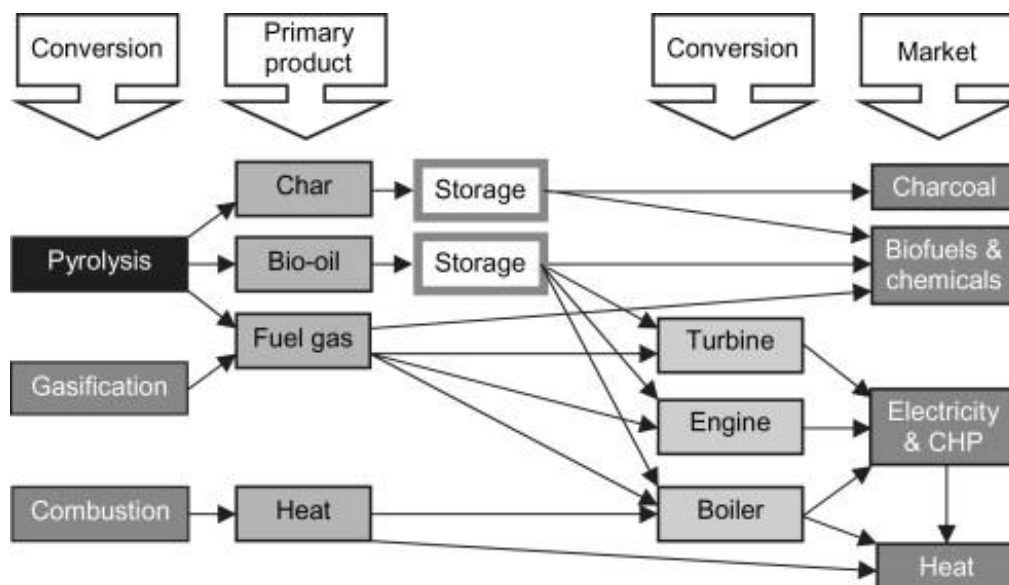
Για την βραδεία πυρόλυση έχουμε ιδιαίτερα αυξημένου χρόνου παραμονής και πολύ χαμηλό ρυθμό θέρμανσης. Αυτό συμβαίνει, διότι με αυτές τις παραμέτρους μπορούμε να παράξουμε βιοεξανθράκωμα. Σε υψηλότερους ρυθμούς θέρμανσης και με χαμηλότερους χρόνους παραμονής, παράγεται κυρίως βιο-έλαιο. Αναλυτικά για την βραδεία πυρόλυση ο χρόνος παραμονής κυμαίνεται από 5-60 min, με τις τελικές θερμοκρασίες να έχουν εύρος από 300-600° C και το κύριο προϊόν να είναι το βιοεξανθράκωμα. (Gopal , Barik, 2019)

Τύπος Πυρόλυσης	Χρόνος Κατακράτησης	Ρυθμός Θέρμανσης	Τελική Θερμοκρασία (C)	Προϊόντα
Ταχεία	1-10 min	Πολύ υψηλός	850-1250	Βιο-έλαιο
Ακαριαία	0,1-1 s	Υψηλός	900-1300	Βιο-έλαιο,χημικά,αέριο
Ενδιάμεση	300-1000 s	Πολύ Υψηλός	500-650	Βιο-έλαιο, Βιοεξανθράκωμα, βιοαέριο
Κενού	2-30 s	Μέτριος	400	Βιο-έλαιο
Υδροπυρόλυση	1-10 min	Υψηλός	<500	Βιο-έλαιο
Βραδεία	5-60 min	Αρκετά Χαμηλός	300-600	Βιοεξανθράκωμα

Πίνακας 2.1: Ο πίνακας είναι σε κάποια σημεία διαφοροποιημένος.

### 2.2.3 Προϊόντα Πυρόλυσης

Μέσω της πυρόλυσης δίνεται η ευκαιρία να παράξουμε πολλά προϊόντα , όπως το βιοεξανθράκωμα , το βιο-έλαιο και το βιοαέριο. Αυτά τα προϊόντα με την σειρά τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πολλές χρήσεις, όπου και παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.



Εικόνα 2.3: Διάφορες χρήσεις που προκύπτουν από τα προϊόντα της πυρόλυσης.

#### 2.2.3.1 Βιοεξανθράκωμα (Biochar)

Αποτελεί το στερεό προϊόν ενός οργανικού κλάσματος, που έχει υποστεί πυρόλυση και όπως και ο άνθρακας είναι ένα εύφλεκτο στέρεο που απαιτεί απαραίτητη προσοχή. Αποτελείται στο 85% από άνθρακα και προέρχεται από την θερμική αποικοδόμηση της λιγνίνης και της ημικυτταρίνης. Ένα μέρος της μάζας του κατά την διαδικασία της πυρόλυσης απομακρύνεται με την μορφή πτητικών. Ανάλογα με την δομή βιομάζας, το είδος πυρόλυσης που έχει επιλεχθεί και με βάση άλλους παράγοντες που αναφέρθηκαν παραπάνω , το ποσοστό παραγωγής βιοαπανθράκων κυμαίνεται από 10-35 %. Η σύσταση του βιοεξανθράκωματος είναι τέτοια που χρησιμοποιείται ως εδαφοβελτιωτικό. Ο λόγος που χρησιμοποιείται είναι η υποβάθμιση των εδαφών και αποτελεί ένα παγκόσμιο πρόβλημα. (Spears, 2018) Οι τρόποι με τους οποίους βοηθάει το βιοεξανθράκωμα είναι οι εξής:

- Μειώνει την οξύτητα του εδάφους
- Μειώνει τις εκπομπές CO
- Βελτιώνει το πορώδες

- Αυξάνει την κατακράτηση και συσσώρευση νερού
- Βελτιώνει την ηλεκτρική αγωγιμότητα
- Ενισχύει την δομή του εδάφους

#### **2.2.3.2 Βιο-έλαιο (bio-oil)**

Το βιο-έλαιο αποτελείται κυρίως από οξυγονωμένες ενώσεις, καρβοξυλικά οξέα και ίχνη νερού, ωστόσο ανάλογα με την μορφή πυρόλυσης μπορεί να αποτελείται από ένα σύνολο 400 διαφορετικών ενώσεων. Αποτελεί μια αρκετά υποσχόμενη εναλλακτική πηγή ενέργειας, αφού κατά την αναβάθμιση του, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υποκατάστατο των συμβατικών καυσίμων. Στα πλεονεκτήματά του, ανήκει η υψηλή ενεργειακή του πυκνότητα, η ευκολία αποθήκευσης του και η μεταφορά του σε σχέση με τα αέρια προϊόντα. Εκτός αυτού το βιοέλαιο είναι βιοδιασπώμενο και παράγει λιγότερα αέρια, τα οποία συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου (NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>) (Lam, Lee, 2019). Το βιο-έλαιο δημιουργείται από την θερμοχημική μετατροπή της βιομάζας, δηλαδή μέσω πυρόλυσης και υδροθερμικής υγροποίησης. Το κινηματικό ιξώδες του βιοελαίου μετριέται στους 40° C, ώστε να προσδιοριστεί η ρευστότητά του. Το αποδεκτό ιξώδες του βιοελαίου μέσω πυρόλυσης (ASTM D7544) ανέρχεται στα 125 cSt (ή mm<sup>2</sup>/s) (Adhikari, Chakraborty, 2018).

#### **2.2.3.3 Βιοαέριο Σύνθεσης (Syngas)**

Βιοαέριο είναι ένα αέριο κλάσμα, το οποίο χρησιμοποιείται ως πρόσθετο υλικό στα πετροχημικά, αλλά συμβάλλει και στην παραγωγή ηλεκτρισμού και ατμού. Το Syngas είναι ένα αρκετό εύφλεκτο αέριο, το οποίο αποτελείται κυρίως από υδρογόνο (H<sub>2</sub>), μονοξείδιο και διοξείδιο του άνθρακα (CO, CO<sub>2</sub>) καθώς επίσης και από μεθάνιο (CH<sub>4</sub>). Ανάλογα με την μορφή πυρόλυσης και την θερμοκρασία διεξαγωγής της πιθανόν να εμπεριέχονται και αρωματικές ενώσεις και φαινόλες.

### **2.3 Biochar**

Το βιοεξανθράκωμα είναι ένα παραπροϊόν της διαδικασίας της πυρόλυσης ή της αναερόβιας θερμικής αποσύνθεσης των οργανικών υλικών. Το μεγάλο ενδιαφέρον γύρω από το βιοεξανθράκωμα υπάρχει, επειδή αποτελεί πολύς καλής ποιότητας εδαφοβελτιωτικό. Με τον όρο εδαφοβελτιωτικό εννοείται:

- Λόγω υψηλού CEC και επιφάνειας χρησιμοποιείται για αποκατάσταση της ρύπανσης. Έχει την ικανότητα να ανταλλάξει τα δικά του κατιόντα (H<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>) με βαρέα μέταλλα σχηματίζοντας έτσι χημικούς

δεσμούς, μέσω των οποίων να μπορεί να τα συγκρατήσει στην επιφάνεια του (Shen, Hou, 2020).

- Έχει την ικανότητα να δεσμεύει σταθερό άνθρακα στο έδαφος.
- Βελτιώνει την γονιμότητα του εδάφους στον τρόπο ασβεστοποίησης , εμπλουτίζοντας το με πτητική ύλη και αυξάνοντας τον όγκο του (Tomczyk, Sokolowska, Bogotá, 2020).

Μέσω της πυρόλυσης της βιομάζας και ανάλογα με την θερμοκρασία στην οποία πραγματοποιείται, παράγεται ένα υλικό πλούσιο σε άνθρακα. Αναλυτικότερα σε θερμοκρασίες από 400 – 500° C διατηρείται ο μισός άνθρακας στην βιομάζα. Σε πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες, της τάξεως των 700° C παράγεται μόνο ένα 10-20% βιοεξανθρακώματος, ενώ το υπόλοιπο είναι αέριο σύνθεσης (Grant Cardin, USU Extension Soils Specialist). Εκτός του άνθρακα σε χαμηλότερες ποσότητες υπάρχουν οξυγόνο, υδρογόνο και ελάχιστη ανόργανη τέφρα. Το βιοεξανθράκωμα έχει πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε θρεπτικά συστατικά. Ωστόσο λόγω της μεγάλης επιφάνειας πόρων του και μέσω αυτών των ποσοτήτων καταφέρει να προσροφάει τα βαρέα μέταλλα από το χώμα και να αποθηκεύει άνθρακα στο έδαφος. Η θερμαντική αξία του βιοαπανθρακώματος είναι 25-32 MJ/kg (Basu, 2018). Συμπερασματικά, το βιοεξανθράκωμα είναι ένα σύνθετο, αλλά πολύ χρήσιμο υλικό, αφού οι ιδιότητες του προσαρμόζονται ανάλογα με τον τρόπο παρασκευής του. Είναι ένα υλικό πολύ οικονομικό και κυρίως φιλικό προς το περιβάλλον, δίνοντας έτσι κίνητρο στους επιστήμονες να πειραματιστούν ακόμα περισσότερο με αυτό για να μπορέσουμε να κατανοήσουμε όλα τα οφέλη που μπορεί να μας προσφέρει.

### **2.3.1 Χαρακτηριστικά του Biochar βάσει συγκεκριμένων παραγόντων**

Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω , το βιοεξανθράκωμα είναι ένα υλικό που διαφοροποιείται αρκετά όταν αλλάζουν οι συνθήκες παρασκευής του. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το βιοεξανθράκωμα να είναι ένα ετερογενές προϊόν με διάφορες φυσικοχημικές, αλλά και βιολογικές ιδιότητες. Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την σύσταση και τις ιδιότητες του βιοεξανθρακώματος είναι οι εξής :

- **Είδος Βιομάζας**

Η βιομάζα αποτελείται από τρία κυρία συστατικά, την κυτταρίνη, την ημικυτταρίνη και την λιγνίνη. Οι αναλογίες αυτών των τριών οργανικών ενώσεων καθώς και η συμπεριφορά τους κατά την θέρμανση, είναι υπεύθυνες για τα διαφορετικά είδη βιοεξανθρακώματος που μπορούμε να λάβουμε. Η κυτταρίνη είναι ένας σύνθετος υδατάνθρακας που αποτελείται από χιλιάδες μόρια γλυκόζης και είναι κύριο συστατικό των φυτών. Αποτελεί το 40-60% της βιομάζας (Γιαννουλιά, 2020). Με βάση τον βαθμό πολυμερισμού της κυτταρίνης έχει αποδειχτεί (αν και δεν



είναι σαφής ο λόγος ακόμη) ότι επηρεάζει τις δομικές παραμέτρους όπως την κρυσταλλικότητα και το πορώδες (Zoghلامي , Paes, 2019). Το εύρος της θερμοκρασίας στο οποίο αποσυντίθεται η κυτταρίνη είναι από 220-315° C (Weber et al., 2018). Η ημικυτταρίνη είναι ετερογενείς ομάδες βιοπολυμερών. Αποτελεί το 20-35% της βιομάζας. Μέσα σε αυτήν εμπεριέχονται διάφορες υπομονάδες μονοσακχαρίτη, όπου μέσω αυτού δημιουργούνται ξυλάνες, γλυκάνες μαννάνες, γλυκομαννάνες (Mansfield et al., 2008). Στην ημικυτταρίνη ο βαθμός πολυμερισμού (DP) είναι πολύ μικρότερος σε σχέση με αυτόν της κυτταρίνης. Σκοπός της ημικυτταρίνης είναι να εμποδίσει την προσβασιμότητα των ενζύμων. Μέσω μελετών έχει αποδειχτεί ότι λόγω απομάκρυνσης της ημικυτταρίνης παρουσιάστηκε βελτίωση στο πορώδες καθώς και στις ίνες των δέντρων (Kruyeniski et al., 2019). Η ημικυτταρίνη αποσυντίθεται από τους 220-315° C (Yang et al., 2007). Η λιγνίνη αποτελεί το δεύτερο πιο άφθονο πολυμερές μετά την κυτταρίνη και είναι ένα πολύπλοκο άμορφο ετεροπολυμερές φαινυλοπροπανοειδών δομικών μονάδων (Valero B. Agbor et al., 2011). Η λιγνίνη έχει αρνητικό ρόλο σε σχέση με τις άλλες δυο ενώσεις. Εμποδίζει την μετατροπή της κυτταρίνης και το επιτυγχάνει, μέσω της περιεκτικότητας της , της σύνθεσης της και της δομής της (Santos et al., 2018). Η λιγνίνη σε αντίθεση με τις προηγούμενες ενώσεις, αποσυντίθεται σε ένα πολύ μεγαλύτερο θερμοκρασιακό εύρος που ξεκινάει από τους 200° C και μπορεί να φτάσει έως και τους 900° C (Manasa, 2020). Συμπερασματικά καταλαβαίνει κανείς ότι μέσω των διαφορετικών τους ιδιοτήτων, αλλά και μέσω των διαφορετικών θερμοκρασιών αποσύνθεσης που απαιτεί η κάθε μια οργανική ένωση, μπορούν να παραχθούν διάφοροι τύποι βιοεξανθρακώματος.

- **Θερμοκρασία πυρόλυσης**

Η θερμοκρασία πυρόλυσης είναι εξαιρετικά σημαντικός παράγοντας, διότι επηρεάζει τις δομικές και φυσικοχημικές ιδιότητες του βιοεξανθρακώματος, καθώς επίσης και την απόδοση του. Με βάση το εύρος των θερμοκρασιών που θα επιλέξουμε, η πυρόλυση χωρίζεται : στην αργή πυρόλυση (<300° C, στην μεσαία (300-500° C) και στην γρήγορη (>500° C). Σκοπός της πυρόλυσης είναι η παραγωγή άνθρακα. Έχει αποδειχτεί σε πολλές μελέτες ότι η δημιουργία ενώσεων οδηγεί στην παραγωγή άνθρακα, μόνο σε περιπτώσεις που η πυρόλυση γινόταν σε υψηλές θερμοκρασίες. Συγκεκριμένα λόγω των υψηλών θερμοκρασιών απελευθερώνονται πτητικές ουσίες, έχουμε αύξηση της επιφάνειας του βιοεξανθρακώματος, υψηλότερο pH, καθώς και υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα. Ωστόσο στις υψηλές θερμοκρασίες τα ποσοστά αζώτου είναι αρκετά χαμηλά. Σε ένα πείραμα που διεξήχθη στο Πανεπιστήμιο του Mississippi, χρησιμοποιήθηκαν 4 διαφορετικά υλικά, το καθένα σε 3 διαφορετικές θερμοκρασίες. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στην επιφάνεια του

βιοεξανθρακώματος, στα ποσοστά τέφρας, άνθρακα , υδρογόνου, αζώτου και οξυγόνου καθώς επίσης και στο pH (Chatterjee et al., 2020). Μέσω του πειράματος παρατηρήθηκε ότι με την αύξηση τη θερμοκρασίας, αυξάνεται και η επιφάνεια του βιοαπανθρακώματος. Αντίστοιχες αυξήσεις παρατηρούνται επίσης στα ποσοστά της τέφρας, του άνθρακα και του pH. Από την άλλη πλευρά τα ποσοστά υδρογόνου, αζώτου και οξυγόνου παρατηρούμε ότι μειώνονται.

- **Ρυθμός θέρμανσης**

Αν και ο ίδιος ο ρυθμός θέρμανσης δεν επηρεάζει σε πολύ σημαντικό βαθμό την δομική σύσταση και τις φυσικοχημικές ιδιότητες του βιοαπανθρακώματος, μέσω του ίδιου του ρυθμού μπορούμε να κατανοήσουμε τι μέθοδος έχει ακολουθηθεί για την μετατροπή της βιομάζας σε βιοεξανθράκωμα. Με αυτόν τον τρόπο παρατηρώντας αν ο ρυθμός θέρμανσης είναι χαμηλός καταλαβαίνουμε ότι χρησιμοποιείται σύστημα βραδείας πυρόλυσης. Αυτό σημαίνει ότι μεγιστοποιούμε την απόδοση του βιοεξανθρακώματος μας, με βάρος του βιο-ελαίου και του συνθετικού αερίου. Σε περίπτωση όμως, όπου ο ρυθμός θέρμανσης είναι υψηλός συμβαίνει το αντίθετο, δηλαδή μεγιστοποίηση των ενεργειακών προϊόντων (bio-oil , syngas), σε βάρος του βιοεξανθρακώματος. Ο ρυθμός θέρμανσης ωστόσο επηρεάζει το δείγμα όταν είναι υψηλός, δημιουργώντας του ομαλότερες και πιο σφαιρικές επιφάνειες (Aller , 2016).

- **Χρόνος παραμονής**

Ο χρόνος παραμονής αποτελεί την τελευταία παράμετρο που μπορεί να επηρεάσει την δομή του βιοεξανθρακώματος. Αν και δεν έχουν γίνει αρκετές ερευνητικές προσπάθειες γύρω από την επίδραση του χρόνου παραμονής στο βιοεξανθράκωμα, υπάρχουν μελέτες, όπως αυτή που διεξήχθη στο Πανεπιστήμιο Μεταλλείων και Τεχνολογίας της Κίνας (Πεκίνο) που αποδεικνύουν μείωση των αποδόσεων των βιοεξανθρακωμάτων σε χρόνους παραμονής από 30-90 min, ενώ από 120-150 min δεν παρουσιάστηκαν διαφορές στις τιμές. Οι μετρήσεις αυτές αναφέρονται σε μείγμα λυματολάσπης και μίσχων βαμβακιού. Συμπερασματικά η μεγαλύτερη αποσύνθεση της ύλης συμβαίνει μεταξύ των πρώτων 120 λεπτών (με θερμοκρασία πυρόλυσης στους 600° C). Ωστόσο μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι οι μετρήσεις αυτές διαφέρουν από υλικό σε υλικό. Σε αντίστοιχη περίπτωση η απόδοση του biogas ήταν αρκετά χαμηλότερη από αυτή του βιοεξανθρακώματος και ο λόγος που συνέβη αυτό οφείλεται λογικά στην διάσπαση των πτητικών ενώσεων.

## 2.4 Ιδιότητες Biochar

### 2.4.1 Φυσικές ιδιότητες Biochar

Το βιοεξανθράκωμα αποτελεί ένα υλικό του οποίου η σύσταση μπορεί να αλλάξει ανάλογα με κάποιες συγκεκριμένες παραμέτρους, οι οποίες αναφέρθηκαν προηγουμένως. Φυσικές ιδιότητες του βιοεξανθρακώματος αποτελούν το σχήμα και η εσωτερική δομή του. Ο τρόπος με τον οποίο το βιοεξανθράκωμα μπορεί να συνεισφέρει μέσω των φυσικών του ιδιοτήτων, είναι ότι μπορεί να αποθηκεύσει νερό πέρα από τον χώρο των πόρων μεταξύ των σωματιδίων. Αυτό μπορεί να το καταφέρει διότι το υλικό αυτό έχει πόρους μέσα σε σωματίδια, τα οποία προσφέρουν επιπλέον χώρο αποθήκευσης (Kayode s. Are, 2018). Τέλος σε περιπτώσεις όπως αυτές του βιοξυλάνθρακα, τα λεπτά σωματίδια που περιέχει μπορούν να γεμίσουν του μεγαλύτερους πόρους που εμπεριέχει το χύμα, μειώνοντας έτσι το μέγεθος των πόρων, αλλά και αλλάζοντας τους σχηματισμούς μεταξύ αυτών.

Όπως προαναφέρθηκε η φυσικές ιδιότητες του βιοεξανθρακώματος, προσδιορίζονται με βάση την αρχική βιομάζα, αλλά και την επεξεργασία που έχει υποστεί. Μέσω της πυρόλυσης και όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, οι κρυσταλλίτες της βιομάζας μεγεθύνονται και αποκτούν πιο αυστηρή διάταξη. Για παράδειγμα, σε θερμοκρασίες από 250-500° C αυξάνεται η επιφάνεια της εξίσωσης BET (Brunauer, Emmett, Teller, 2015) λόγω της εξέλιξης των πτητικών στην αρχική βιομάζα. (Kim et al., 2012)

### 2.4.2 Χημικές ιδιότητες του Biochar

Η σύνθεση του βιοεξανθρακώματος περιέχει σταθερά και ασταθή συστατικά καθιστώντας την αρκετά ετερογενή. Τα κυρία συστατικά, τα οποία υπάρχουν στο βιοεξανθράκωμα είναι ο άνθρακας (C), η υγρασία, η πτητική ύλη καθώς και η στάχτη. Εκτός αυτών το βιοεξανθράκωμα είναι πλούσιο σε άζωτο (N), φώσφορο (P), κάλιο (K), μαγνήσιο (Mg), ασβέστιο (Ca) και θείο (S). Τα συγκεκριμένα στοιχεία διαφοροποιούνται ανάλογα με το είδος της βιομάζας, αλλά και με το είδος πυρόλυσης. Σε έρευνα που πραγματοποιήθηκε στο πανεπιστήμιο του Άρκανσο, συγκρίνονται διάφορες πρώτες ύλες γεωργικών υποπροϊόντων ως προς τα μακροθρεπτικά και μικροθρεπτικά τους στοιχεία. Τα διαφορετικά είδη βιομάζας υποβλήθηκαν στο ίδιο είδος πυρόλυσης (στους 400° C για 2h). Μέσω αυτή της έρευνας παρατηρήθηκε, ότι μέσω της πυρόλυσης αυξήθηκαν τα μακροθρεπτικά στοιχεία της βιομάζας. Από την άλλη πλευρά, παρατηρήθηκε ότι μετά την διαδικασία της πυρόλυσης υπήρξε μείωση των μικροθρεπτικών στοιχείων (Evans, Brian et al., 2017). Τέλος ομοιότητες υπήρξαν μόνο στην περίπτωση των συγκεντρώσεων του θείου.

Εκτός όμως του ρόλου της βιομάζας, πολύ σημαντικός είναι και ο ρόλος της πυρόλυσης που θα υποβληθεί το δείγμα. Έρευνα ωστόσο δείχνει ότι η θερμοκρασία πυρόλυσης μπορεί να προκαλέσει μικρές διαφορές στην

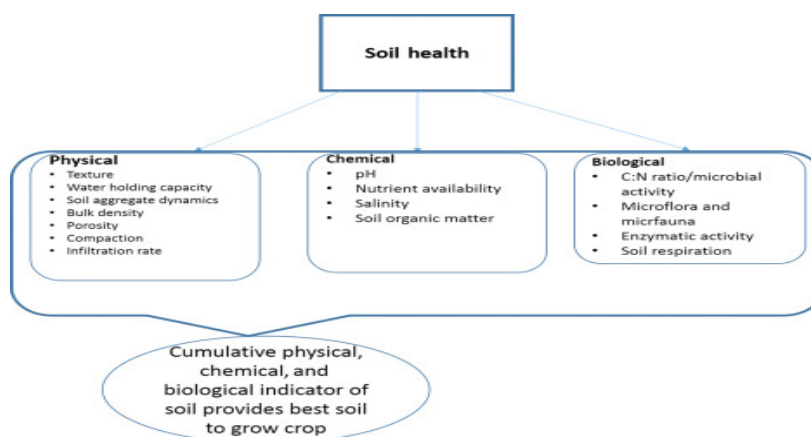
ποσότητα των μικροθρεπτικών και μακροθρεπτικών στοιχείων. Στο συγκεκριμένο πείραμα χρησιμοποιήθηκε ξύλο από ευκάλυπτο. Τα συμπεράσματα, που προέκυψαν από την παραπάνω έρευνα ήταν, ότι εκτός του καλίου και του ασβεστίου, που έχουν μια διαφοροποίηση στις τιμές τους, τα υπόλοιπα στοιχεία δεν εμφανίζουν διαφορές. Συμπερασματικά οι χημικές ιδιότητες του ξύλου του ευκαλύπτου, δεν επηρεάζονται με την άνοδο θερμοκρασίας στην πυρόλυση (Fernandes et al., 2020).

## 2.5 Υγεία του εδάφους

Με τον όρο υγεία του εδάφους αναφερόμαστε στην ποιότητα του εδάφους όσων αφορά τις φυσικές, χημικές και βιολογικές ιδιότητες του. Πριν γίνει η οποιαδήποτε μεταχείριση ενός εδάφους, είναι σημαντικό αρχικά να αξιολογηθεί ως προς αυτές τις τρεις πτυχές που αναφέρθηκαν. Προκειμένου να υπάρξει βέλτιστη παραγωγικότητα πρέπει να γνωρίζουμε εις βάθος της φυσικές ιδιότητες του εδάφους, ώστε σε περίπτωση που είναι υποβαθμισμένο να υποστεί τις απαραίτητες διαδικασίες για την ρύθμιση του. Ένα υποβαθμισμένο έδαφος μπορεί να αναγνωριστεί εάν εμφανίζει τα ακόλουθα συμπτώματα (Langrand J. et al., 2015):

- Κακή διήθηση νερού
- Απορροή νερού από την επιφάνεια
- Σκληρή πήξη
- Κακή ριζοσπαστικότητα
- Κακή εργασιμότητα

Ο Avidano et al., όρισε την υγεία του εδάφους ως << Η συνεχής ικανότητα του εδάφους να λειτουργεί ως ζωτικό ζωντανό σύστημα, εντός των ορίων του οικοσυστήματος και της χρήσης γης, για την διατήρηση της βιολογικής παραγωγικότητας, την προώθηση της ποιότητας του αέρα και του νερού και την διατήρηση της υγείας των φυτών, των ζώων και των ανθρώπων>>. Οι παράγοντες που ορίζουν την ποιότητα του εδάφους χωρίζονται σε 3 κατηγορίες και παρουσιάζονται παρακάτω στην Εικόνα 10 (Tripathi et al., 2020) :



Εικόνα 2.4 : Φυσικές , Χημικές και Βιολογικές παράμετροι που επηρεάζουν την φυσική υγεία του εδάφους.

## 2.6 Επίδραση Βιοεξανθρακώματος στο έδαφος

Η ποιότητα του εδάφους είναι ο σημαντικός περιορισμός όσων αφορά την παραγωγή καλλιεργειών. Προηγουμένως αναφέρθηκαν όλοι οι παράγοντες που προσδιορίζουν την ποιότητα ενός χώματος. Σε χώρες όπως η Νιγηρία παρατηρείται αρκετά το συγκεκριμένο πρόβλημα, όπου το έδαφος έχει χαμηλή γονιμότητα οξύτητα και είναι εξαιρετικά διαβρωτικό (Adekiya et al, 2020). Όλα αυτά τα χρόνια έχουν γίνει αναρίθμητες μελέτες στην επίδραση του βιοεξανθρακώματος στην προσπάθεια βελτίωσης του εδάφους. Συγκεκριμένα :

- Μπορεί να βελτιώσει την ποιότητα του εδάφους
- Την σταθερότητα και το πορώδες των αδρανών του εδάφους
- Την ικανότητα συγκράτησης νερού
- Τον κύκλο των θρεπτικών ουσιών
- Την αντοχή σε εφελκυσμό
- Την αντίσταση διείσδυσης
- Μείωση της διάβρωσης

Εκτός των συγκεκριμένων θετικών μπορεί να συμβάλει στην κατάσταση των θρεπτικών στοιχείων καθώς και στην ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων. Τέλος συμβάλει και στην συγκράτηση θρεπτικών ουσιών, που αποφέρει στην μείωση της οξύτητας του εδάφους.

Εκτός όμως όλων των θετικών που έχει η ανάμειξη χώματος και βιοεξανθράκωμα υπάρχουν και κάποια μειονεκτήματα που αξίζει να αναφερθούν. Το βιοεξανθράκωμα είναι ένα υλικό με χαμηλή βιοδιασπασιμότητα, λόγω του ότι κυριαρχείται από δομές συντηγμένου αρωματικού δακτυλίου. Η εισαγωγή βιοαπανθράκων σχετίζεται αρκετά με με την αύξηση του εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) βραχυπρόθεσμα

(Kammann, Irene et al., 2011). Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι η μικροβιακή μεσολάβηση αποσύνθεσης ασταθών συστατικών βιοεξανθρακωμάτων (Cross and Sohi, 2011). Ένας ακόμη παράγοντας που συμβάλει στην αύξηση των ποσοστών είναι αυτός της ποσότητας του βιοεξανθρακώματος που χρησιμοποιείται. Σε περιπτώσεις όπου χρησιμοποιήθηκαν μεγάλες ποσότητες βιοκάρβουνου παρατηρήθηκαν μεγαλύτερες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα, απ' ότι σε περιπτώσεις που εφαρμόστηκαν μικρότερες ποσότητες στο έδαφος. Βραχυπρόθεσμα παρατηρείται ότι το έδαφος παράγει αέρια, τα οποία συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Παρόλα αυτά μακροπρόθεσμα δεν υπάρχουν ακόμη μελέτες που να εξηγούν την επίδραση του βιοεξανθρακώματος. Ωστόσο γνωρίζοντας ότι με την πάροδο του χρόνου οι ιδιότητες του βιοαπανθρακώματος αλλάζουν, μπορούμε να γνωρίζουμε με σιγουριά ότι και μακροπρόθεσμα οι επιπτώσεις θα διαφέρουν.

## 2.7 Λύμα

Ως λύμα χαρακτηρίζουμε το χρησιμοποιημένο νερό που προέρχεται από ανθρώπινα απόβλητα, υπολείμματα τροφίμων, σαπούνια και χημικές ουσίες. Επίσης εργοστάσια και επιχειρήσεις, δημιουργούν τα βιομηχανικά απόβλητα, τα οποία προστίθενται στα απόβλητα οικιακής χρήσης (<https://www.usgs.gov>). Κάθε μέρα τίθενται προς επεξεργασία δισεκατομμύρια τόνοι νερού. Σκοπός της επεξεργασίας αυτής είναι η επαναχρησιμοποίηση του. Η συγκεκριμένη διαδικασία συμβαίνει αιώνες πίσω σε πόλεις από το Βερολίνο και το Παρίσι. Ωστόσο σε σχέση με εκείνες τις περιόδους, σήμερα στόχος μας είναι και η αύξηση της ποιότητας του (Καλαβρουζιώτης et al., 2010). Αν η επεξεργασία του αποβλήτου είναι αποτυχημένη, υπάρχουν πιθανοί κίνδυνοι όχι μόνο για το περιβάλλον, αλλά και για την ανθρώπινη υγεία. Για αυτό λόγο σε πολλές χώρες της Ευρώπης, υποβάλλονται στόχοι, όσων αφορά την ποιότητα του νερού, καθώς και την διασφάλιση της ασφάλειας των τροφίμων (Dobrowolski A. et al., 2008).

## 2.8 Ποιότητα Λύματος

Όπως προαναφέρθηκε δίνεται μεγάλη προτεραιότητα τα τελευταία χρόνια στην ποιότητα του επεξεργασμένου νερού. Στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας υγρών αποβλήτων γίνονται τακτικά μετρήσεις για να ελεγχθούν ποσότητες χημικών στοιχείων και ενώσεων που μπορούν να επηρεάσουν την ανάπτυξη των φυτών ή τις ιδιότητες του εδάφους καθώς επίσης γίνεται και έλεγχος στο (BOD, COD, SS), που σκοπός μας είναι μέσω της πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας καθίζησης να το μειώσουμε σε αρκετά υψηλό βαθμό (Pedrero et al., 2010).

Αναλυτικά οι βασικότερες κατηγορίες οι οποίες επηρεάζουν την ποιότητα του επεξεργασμένου νερού είναι:

- **Θρεπτικές Ουσίες**

Τα επεξεργασμένα λύματα είναι πλούσια σε θρεπτικές ουσίες, το οποίο είναι ταυτόχρονα θετικό και αρνητικό για την ανάπτυξη των φυτών. Ο λόγος που αποτελεί μειονέκτημα είναι ότι σε μεγάλες ποσότητες μπορεί να προκαλέσει υπερβολική βλαστική ανάπτυξη, ανομοιόμορφη ωριμότητα και μειωμένη ποιότητα.

- **Τοξικά Συστατικά**

Ανάλογα με το είδος των αποβλήτων που καταλήγουν σε ένα κέντρο βιολογικού καθαρισμού υπάρχει περιπτωση να υπάρχουν τοξικά ιόντα στο υγρό απόβλητο. Τα φυτά είναι οργανισμοί, που απορροφούν οργανικές ουσίες από το χώμα μέσω του ριζικού τους συστήματος. Αυτό φέρει σαν αποτέλεσμα αν το απόβλητο περιέχει τοξικές ουσίες να υποβαθμιστούν και να μολυνθούν οι καλλιέργειες.

- **Αλατότητα**

Η κάθε καλλιέργεια έχει διαφορετική ανοχή στα επίπεδα αλατιού που μπορεί να δεχτεί. Με την συσσώρευση επεξεργασμένων λυμάτων αυξάνεται η αλατότητα. Αυτό φέρει σαν αποτέλεσμα είτε να γίνεται αποστράγγιση του τελικού προϊόντος για την μείωση της ποσότητας αλατιού, είτε γίνεται ανάμειξη με ποσότητες γλυκού νερού για να γίνει αρραίωση του αλατιού αυξάνοντας τον όγκο του διαλύματος.

## **2.9 Μαρούλι (*Lactuca Sativa*)**

Το μαρούλι ανήκει στην οικογένεια των λαχανικών και συγκεκριμένα στην φυλή *Cicoreae* της οικογένειας *Compositae*. Αποτελεί ένα λαχανικό που καλλιεργείται σε όλες τις ηπείρους, με κύριους καταναλωτές τις χώρες των ΗΠΑ και της Ευρώπης. Έχει σχετικά σύντομο κύκλο ζωής. Αποτελείται κατά βάση από νερό (> 95%), οπότε η εγκατάσταση ενός πειράματος, απαιτεί αρχικά μεγάλες ποσότητες νερού. Στην συνέχεια με βάση το έδαφος, στο οποίο έχει καλλιεργηθεί, οι ποσότητες νερού προσαρμόζονται αναλόγως. Λόγω της μεγάλης ζήτησης του, αποτελεί κεντρικό στοιχείο πολλών προγραμμάτων που έχουν ως στόχο (Pink, Eavan, Keane, 1993) :

- Την αυξημένη απόδοση και την ομοιομορφία
- Αντοχή σε ασθένειες και σε παράσιτα
- Βελτίωση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του

Η ζήτηση του συγκεκριμένου λαχανικού προκύπτει , επειδή είναι πλούσιο σε βιταμίνη Α (21% DV), βιταμίνη Κ (97% DV) που είναι υψηλή σε προβιταμίνη Α και σε βήτα- καροτίνη (π.χ σε σκούρα πράσινα μαρούλια (Romaine)). Εκτός αυτού αποτελεί καλή πηγή φυλλικού οξέος (10-19% DV) και σιδήρου. Το μαρούλι λόγω του μειωμένου αριθμού ενεργών συστατικών, γίνεται αρκετά ελκυστικό σε ζιζάνια, καθώς και σε κάμπιες και γυμνοσάλιαγκες. Εκτός αυτού είναι ευάλωτο σε αρκετές αρρώστιες, με την πιο γνωστή να είναι αυτή του « Μωσαϊκού ιού»

## **2.10 Πειράματα με εφαρμογές κομπόστ, βιοεξανθρακώματος και επεξεργασμένο υγρό απόβλητο**

Έχουν γίνει αρκετές μελέτες γύρω από την εφαρμογή βιοεξανθρακώματος και κομπόστ στο έδαφος, ως εδαφοβελτιωτικό. Σε μελέτες που έγιναν στο Πολυτεχνείο Κρήτης, αποδείχτηκε ότι το βιοεξανθράκωμα αποτέλεσε εμπόδιο στην ανάπτυξη των μαρουλιών. Αυτό συνέβη διότι σε πλούσια και αλκαλικά εδάφη σε συνδυασμό με την εφαρμογή βιοεξανθρακώματος, υπάρχει περίσσεια θρεπτικών στοιχείων , τα οποία δυσκολεύονται να μεταφερθούν στους φυτικούς ιστούς (Regouzas P., 2015).

Σε έρευνα που ασχολήθηκε με την εφαρμογή κομπόστ και βιοεξανθρακώματος σε χώμα χαμηλών θρεπτικών συστατικών παρατηρήθηκε ότι η εφαρμογή του κάθε εδαφοβελτιωτικού υλικού ξεχωριστά, ενισχύει τις φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους. Ωστόσο στην καλλιέργεια που περιείχε συνδυασμό των δύο παραπάνω εδαφοβελτιωτικών υλικών, δεν παρατηρήθηκαν ιδιαίτερα θετικά αποτελέσματα. Η μεταχείριση του κομπόστ εμφάνισε την μεγαλύτερη συσσώρευση βιομάζας, απόδοσης χρήσης του νερού, ενώ εμφάνισε την υψηλότερη διαθεσιμότητα θρεπτικών στοιχείων στο έδαφος. Το βιοεξανθράκωμα (που παρασκευάστηκε από εμπορικό κάρβουνο) ενίσχυσε σημαντικά την ανάπτυξη των μαρουλιών. Αυτό οφείλεται στις φυσικοχημικές του ιδιότητες, που ενισχύουν τις συγκεντρώσεις θρεπτικών στοιχείων στο έδαφος, που φέρει ως αποτέλεσμα την συσσώρευση βιομάζας (Trupiano, Coccozza et al., 2017)

Μία ακόμη έρευνα, η οποία ασχολήθηκε με την καλλιέργεια μαρουλιών, εστίασε στην εφαρμογή διαφορετικών οργανικών υλικών καθώς και κομπόστ σε ένα χαμηλό σε θρεπτικά συστατικά έδαφος. Τα οργανικά υλικά είχαν υποστεί αναερόβια χώνευση. Οι καλλιέργειες που περιείχαν οργανικό υλικό, εμφάνιζαν ιδιαίτερα υψηλά ποσοστά νιτρικού αζώτου και στο χώμα και στα φύλλα του μαρουλιού, αποτέλεσμα που είναι ρυπογόνο προς το περιβάλλον. Συμπερασματικά για την παραγωγή ενός εμπορεύσιμου εδαφοβελτιωτικού υλικού, απαιτούνται πολύ συγκεκριμένες διαδικασίες. Στόχος των εδαφοβελτιωτικών υλικών, είναι η βελτίωση των ρυπογόνων εδαφών και όχι η περαιτέρω ρύπανσή τους (Montemurro, Ferri et al., 2013).



Αντίθετα σε μελέτες που έγιναν όσων αφορά την εφαρμογή επεξεργασμένου υγρού αποβλήτου, ως μέσο ποτίσματος στην ανάπτυξη μαρουλιών, παρατηρήθηκε ότι το ριζικό σύστημα των μαρουλιών λειτουργούσε ως φίλτρο. Συγκεκριμένα παρατηρήθηκε ότι με αύξηση του χρόνου κατακράτησης, αυξάνονταν τα επίπεδα μείωσης των BOD, COD , όπως επίσης και η απομάκρυνση των ρύπων (Jagaba et al., 2021)

Σε διαφορετική μελέτη χρησιμοποιήθηκε αναερόβια εκροή οικιακών λυμάτων, ως θρεπτικό μέσο για την καλλιέργεια μαρουλιών. Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι το μαρούλι επηρεάστηκε αρνητικά από το επεξεργασμένο υγρό απόβλητο. Συγκεκριμένα παρατηρήθηκε μείωση και στο ύψος, αλλά και στον αριθμό φύλλων των μαρουλιών. Ο λόγος που συνέβη αυτό, ήταν η τοξικότητα των νιτρωδών. Ωστόσο οι συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων ήταν αρκετά χαμηλές (Lee, Rout et al., 2021).

## **Κεφάλαιο 3 : Μέθοδοι και Υλικά**

---

### **3.1 Υλικά**

#### **3.1.1 Κομπόστ Δ.Ε.ΔΙ.Σ.Α Χανίων**

Το κομπόστ, που χρησιμοποιήσαμε για να δημιουργήσουμε το βιοεξανθράκωμα που το αναμείξαμε σε διάφορες αναλογίες με το χώμα, προήλθε από τη Δ.Ε.ΔΙ.Σ.Α Χανίων. Το Εργοστάσιο Μηχανικής Ανακύκλωσης και Κομποστοποίησης (ΕΜΑΚ) κατασκευάστηκε για να διαχειρίζεται τα απόβλητα περίπου 155000 μόνιμων κατοίκων και 80000 κλινών με τις διακυμάνσεις της παροχής μεταξύ χειμώνα και καλοκαιριού να είναι στο 50%. Αυτό συμβαίνει διότι τα Χανιά είναι ένας νομός που έχει αρκετά έντονο τουρισμό το εαρινό εξάμηνο. Η διαδικασία με την οποία δημιουργείται το κομπόστ στην συγκεκριμένη εγκατάσταση είναι η εξής :

#### **1) Διαχωρισμός Βιοαποβλήτων**

Στον Διαχωρισμό Βιοαποβλήτων, τα σύμμεικτα απόβλητα που προέρχονται από τους πράσινους κάδους οδηγούνται με μεταφορικές ταινίες από κόσκινα, μαγνήτες και χώρους διαλογής. Μόλις γίνει ο απαραίτητος διαχωρισμός των αδρανών υλικών, τότε οδηγούνται στην δεξαμενή ταχείας κομποστοποίησης.

## **2) Ταχεία Κομποστοποίηση**

Το απόβλητο εισέρχεται στην δεξαμενή ταχείας κομποστοποίησης, όπου και αναμειγνύεται με κλαδιά και αναδεύεται περιοδικά από 4 έως 6 εβδομάδες. Λόγω του ότι οι συνθήκες θερμοκρασίας, αερισμού και υγρασίας είναι ελεγχόμενες, οι πολύπλοκες βιοχημικές διεργασίες που συμβαίνουν ταυτόχρονα βοηθούν το οργανικό κλάσμα να είναι έτοιμο ταχύτερα και ποιοτικά να είναι αρκετά καλό.

## **3) Ωρίμανση του Κομπόστ**

Μετά την δεξαμενή ταχείας κομποστοποίησης, το κομπόστ το οποίο έχει παραχθεί διαχωρίζεται από τα υλικά που δεν κατάφεραν να κομποστοποιηθούν. Στη συνέχεια το κομπόστ ωριμάζει όντας σε σειράδια.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι θερμοκρασίες στην διαδικασία κομποστοποίησης δεν ξεπερνούν τους 50° C και ότι το κομπόστ είναι απαλλαγμένο από παθογόνους μικροοργανισμούς . Σε κάποια στάδια ωστόσο οι θερμοκρασίες στην μάζα του μείγματος αγγίζουν τους 70° C που φέρει ως αποτέλεσμα τον θάνατο όλων αυτών των παθογόνων μικροοργανισμών.

## **4) Προδιαλεγμένα Βιοαπόβλητα**

Με την είσοδο των καφέ κάδων σε μεγάλους παραγωγούς στην πόλη των Χανίων , δεν απαιτείται διαχωρισμός και επεξεργασία των αποβλήτων με αποτέλεσμα τα τρόφιμα που βρίσκονται στους καφέ κάδους να οδηγούνται κατευθείαν στο στάδιο της Κομποστοποίησης και της Ωρίμανσης.

### **3.1.2 Λύμα Δ.Ε.Υ.Α Χανίων**

Εκτός από την εφαρμογή βιοεξανθρακώματος και κομπόστ στο έδαφος, χρησιμοποιήσαμε επεξεργασμένο λύμα από το Δ.Ε.Υ.Α Χανίων ως κύρια πηγή ποτίσματος. Συγκεκριμένα το λύμα προερχόταν μετά την δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης και ήταν χλωριωμένο. Αναλυτικά οι διαδικασίες στις οποίες υποβλήθηκε το απόβλητο είναι (<https://deyach.gr>) :

- Εσχάρωση (Αφαίρεση ογκωδών στερεών)
- Εξάμμωση (Αφαίρεση Λιπών)
- Πρωτοβάθμια Καθίζηση (Απομάκρυνση BOD<sub>5</sub> και αιωρούμενων στερεών)
- Δεξαμενή Επιλογής (Υπεύθυνη ώστε να εμποδίσει την ανάπτυξη ανεπιθύμητων νηματοειδών βακτηρίων)
- Δεξαμενή αερισμού (Αφαίρεση οργανικού φορτίου, νιτροποίηση και απομάκρυνση του αζώτου με απονιτροποίηση στην ανοδική ζώνη κατά την ανακυκλοφορία των νιτροποιημένων εκροών.
- Δεξαμενή Δευτεροβάθμιας Καθίζησης
- Χλωρίωση ( Και αποχλωρίωση στο τέλος της δεξαμενής χλωρίου)

Αρχικά χρησιμοποιήθηκε δείγμα εδάφους, το οποίο συλλέχθηκε από περιοχή καλλιέργειας του νομού Χανίων. Ο τρόπος επεξεργασίας του χώματος έγινε μέσω ξήρανσης στους 60° C, ενώ στην συνέχεια το χώμα περάστηκε από δυο κόσκινα διαφορετικής διαμέτρου, προκειμένου να επιτευχθεί ο πλήρης χαρακτηρισμός του.

Ωστόσο πέρα του χώματος χρησιμοποιήθηκε κομπόστ προερχόμενο από το οργανικό κλάσμα των αστικών απορριμμάτων, που πραγματοποιήθηκε στη Δ.Ε.ΔΙ.Σ.Α (Διαδημοτική Επιχείρηση Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων) Χανίων. Η διαδικασία με την οποία επεξεργάστηκε το οργανικό κλάσμα είναι μέσω αναερόβιας ταχείας κομποστοποίησης.

Τέλος εκτός του κομπόστ επιλέχθηκε και η χρήση βιοεξανθρακώματος, που δημιουργήθηκε μέσω πυρόλυσης και για την δημιουργία του χρησιμοποιήσαμε το κομπόστ που αναφέρθηκε παραπάνω. Συγκεκριμένα έγινε ξήρανση του κομπόστ για 24h σε φούρνο ξήρανσης και στη συνέχεια έγινε πυρόλυση στους 300° C και ο χρόνος παραμονής ήταν 4 ώρες.

### 3.2 Εγκατάσταση Πειράματος

Το πείραμα ξεκίνησε στις 4 Ιουνίου του 2021 σε εξωτερικό χώρο με ανοιχτή οροφή περιβαλλόμενο από τοίχους στο Πολυτεχνείο Κρήτης στα Χανιά. Το επεξεργασμένο χώμα αφού υπέστη ξήρανση αναμείχθηκε σε διάφορες αναλογίες με το κομπόστ και το βιοεξανθράκωμα μέσω ομογενοποίησης.

Αναλυτικά τα μεταχειρίσεις με τις κωδικοποιήσεις τους, τα οποία προέκυψαν:

#### 1. Μάρτυρας (S)

4 γλάστρες με 500g χώματος.

#### 2. Soil – Compost 1% (S-C 1%)

4 γλάστρες με 495g χώματος και 5g κομπόστ.

#### 3. Soil – Compost 2,5% (S-C 2,5%)

4 γλάστρες με 487,5g χώματος και 12,5g κομπόστ.

#### 4. Soil – Compost 5% (S-C 5%)

4 γλάστρες με 475g χώματος και 25g κομπόστ.

#### 5. Soil - Biochar 1% (S-B 1%)

4 γλάστρες με 495 g χώματος και 5g Biochar.

#### 6. Soil – Biochar 2,5% (S-B 2,5%)

4 γλάστρες με 487,5g χώματος και 12,5g Biochar.

## 7. Soil – Biochar 5% (S-B 5%)

4 γλάστρες με 475g χώματος και 25g Biochar.

## 8. Soil – Compost – Biochar 1% (S-C-B 1%)

4 γλάστρες με 495g χώματος, 2,5g κομπόστ και 2,5 g Biochar.

## 9. Soil – Compost – Biochar 2,5% (S-C-B 2,5%)

4 γλάστρες με 487,5g χώματος, 6,25g κομπόστ και 6,25g Biochar.

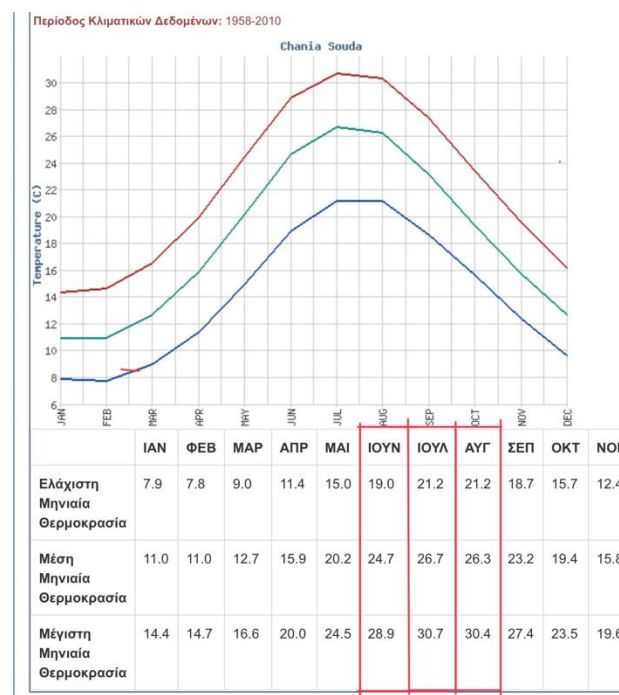
## 10. Soil – Compost – Biochar 5% (S-C-B 5%)

4 γλάστρες με 475g χώματος, 12,5g κομπόστ και 12,5g Biochar.

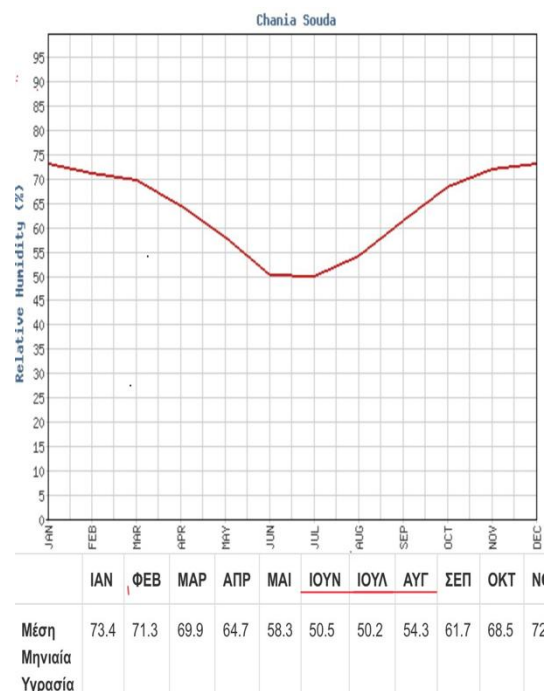
Να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι χρησιμοποιήθηκαν γλάστρες ίδιου μεγέθους για όλα τα δείγματα.

Στη συνέχεια, αφού έγινε η ομογενοποίηση των δειγμάτων μας, αφήσαμε τα δείγματα για ξήρανση για 10 μέρες. Μετά το πέρας της συγκεκριμένης διαδικασίας τοποθετήσαμε τα μείγματά μας σε πλαστικά γλαστράκια βάρους 700g, ποτίσαμε το χώμα με νερό προκειμένου να μαλακώσει και τέλος έγινε η φύτευση των μαρουλιών. Οι γλάστρες τοποθετήθηκαν με τυχαία σειρά προκειμένου να μην υπάρχουν ευνοϊκές συνθήκες για μια μεταχείριση σε σχέση με τις υπόλοιπες. Το πείραμα εκτελέστηκε τους μήνες Ιούνιο και Ιούλιο όπου η μέση θερμοκρασία για αυτούς τους μήνες ήταν 26,7° C, ενώ η μέση μηνιαία υγρασία για αυτούς τους μήνες ήταν κοντά στο 50,2 %.

Τα δεδομένα αυτά συλλέχθηκαν από την ιστοσελίδα της εθνικής μετεωρολογικής υπηρεσίας και παρακάτω παρουσιάζονται τα δεδομένα, τα οποία αναφέρθηκαν.



Εικόνα 3.1: Πληροφορίες Σχετικά με την θερμοκρασία.



Εικόνα 3.2: Πληροφορίες για την υγρασία.

Το πείραμα ξεκίνησε στις 4 Ιουνίου και ολοκληρώθηκε στις 25 Ιουλίου. Την πρώτη εβδομάδα τα φυτά ποτίστηκαν με νερό βρύσης. Ωστόσο το υπόλοιπο διάστημα, τα μαρούλια ποτίζονταν με λύμα προερχόμενο από δευτεροβάθμια καθίζηση, το οποίο είχε υποστεί και χλωρίωση. Μετά το τέλος διεξαγωγής του πειράματος έγινε η συγκομιδή των μαρουλιών και ακολούθησαν μετρήσεις, οι οποίες αφορούσαν την καταγραφή:

- I. Του συνολικού μεγέθους του Μαρουλιού.
- II. Το μέγεθος του κορμού του.
- III. Το μέγεθος της ρίζας του.
- IV. Καθώς επίσης και το νωπό βάρος κορμού
- V. Και ρίζας

Αφού έγινε ο διαχωρισμός κορμού και ρίζας, τοποθετήθηκαν στην ξήρανση για 48 h, με αποτέλεσμα να γίνουν αρχικά μετρήσεις όσων αφορά το ξηρό βάρος, κορμού και ρίζας και στη συνέχεια να αποθηκευτούν σε ειδικά δοχεία ώστε να μην απορροφήσουν υγρασία.



Εικόνα 3.3: Πρόοδος πειράματος μετά από 2 εβδομάδες ποτίσματος

### **3.3 Μέθοδοι Ανάλυσης Εδάφους, Κομπόστ και Βιοεξανθρακώματος**

Για να γίνει εφικτός ο χαρακτηρισμός του εδάφους χρησιμοποιήθηκαν διάφοροι μέθοδοι, οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικά :

#### **3.3.1 Προσδιορισμός pH-Αγωγιμότητας**



Αρχικά έπρεπε να γίνει προσδιορισμός του pH και της αγωγιμότητας. Για να γίνουν οι συγκεκριμένες μετρήσεις, χρειάζονται αναλογίες δείγματος/νερού = 1/2.5 (π.χ. 2g δείγματος σε 5 mL απιονισμένο νερό) και στην συνέχεια ανάδευση για 24h. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση του pH το Crison MicropH 2002 και για την αγωγιμότητα το Crison MicroCM 2202, στα οποία εμπεριέχονται ειδικά ηλεκτρόδια, μέσω των οποίων έγιναν και οι απαραίτητες μετρήσεις.



Εικόνα 3.4: Όργανο μέτρησης pH Crison micropH 2002



Εικόνα 3.5: Όργανο μέτρησης αγωγιμότητας Crison MicroCM 2202

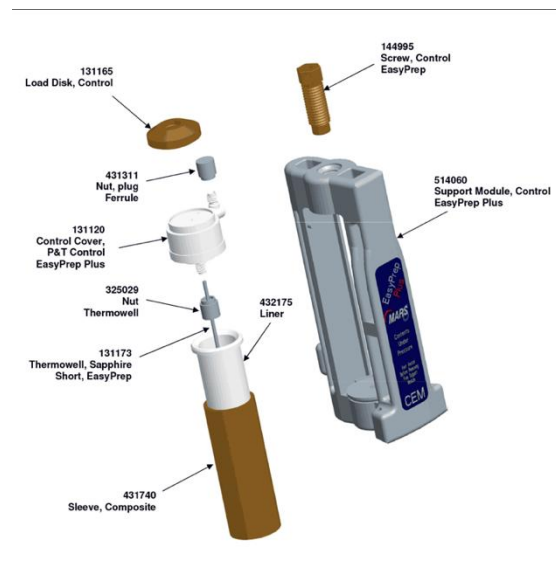
### 3.3.2 Ph – PZC (Point Zero Charge)

Σε κάθε δείγμα έγιναν 2 επαναλήψεις για να υπάρχει μεγαλύτερη ακρίβεια και απαιτούνται 0,06g από το καθένα. Εκτός των δειγμάτων χρειάζεται ένα διάλυμα χλωριούχου ασβεστίου ( $\text{CaCl}_2$ ) 0,005M, το οποίο παρασκευάζεται διαλύοντας 0,278g  $\text{CaCl}_2$  σε 500ml απιονισμένου νερού. Αφού παρασκευαστεί το διάλυμα τοποθετείται για βράσιμο με σκοπό την απομάκρυνση του  $\text{CO}_2$  και στη συνέχεια αφήνεται να κρυώσει ώστε να ρυθμιστεί το Ph του  $\text{CaCl}_2$  σε διάφορες τιμές (Αναλυτικά Ph: 2 , 4 , 6 , 8 , 10 , 12) με την χρήση οξέων και βάσεων (HCL και NaOH αντίστοιχα). Αφού ρυθμιστεί κάθε φορά το Ph του διαλύματος στην τιμή που απαιτείται, αναμειγνύονται 20ml διαλύματος με 0,6g δείγματος σε κωνικές φιάλες και αναδεύονται για 24h σε 150rpm. Τελικά με την χρήση των οργάνων γίνεται μέτρηση του pH σε κάθε κωνική και κατασκευάζεται το διάγραμμα του τελικού Ph συναρτήσει του αρχικού pH. Εκεί όπου η σχηματιζόμενη ευθεία τέμνει την ευθεία  $\text{pH}_{\text{final}} = \text{pH}_{\text{initial}}$  αποτελεί το σημείο μηδενικού φορτίου κάθε δείγματος. Τα διαγράμματα αυτά παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α.

### 3.3.3 Προσδιορισμός Μετάλλων και Μεταλλοειδών

Επιλέχθηκε μέθοδος χώνευσης με μικροκύματα, ώστε να έχουμε άμεση εφαρμογή υψηλών θερμοκρασιών και πιέσεων, το οποίο μας προσφέρει πλήρη διαλυτοποίηση των δειγμάτων μας. Για την χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου απαιτούνται 0,1g δείγματος και 10ml Νιτρικού οξέος ( $\text{HNO}_3$ ), τα οποία τοποθετούνταν σε ειδικά φυαλίδια από teflon. Το όργανο, που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Mars 6 της CEM Corporation, το οποίο έχει τη δυνατότητα να γίνεται χώνευση 12 δειγμάτων τη φορά. Μετά το πέρας της μιας ώρας, τα μείγματα τοποθετούνταν σε ειδικά δοχεία αποθήκευσης.

Τέλος η ολική συγκέντρωση για όλα τα δείγματα μετρήθηκαν στο icp-ms του εργαστηρίου της εταιρείας Agilent και μοντέλου CX 7500 series, στο εργαστήριο Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών της σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης.



### **3.3.4 Προσδιορισμός Φαινόμενης Πυκνότητας**

Για τον υπολογισμό της φαινόμενης πυκνότητας των τριών διαφορετικών υλικών που χρησιμοποιήσαμε, απαιτείται ο λόγος της ξηρής μάζας του υλικού προς τον αντίστοιχο συνολικό του όγκο ( στον όγκο συμπεριλαμβάνεται η μάζα και το πορώδες του κάθε υλικού). Για να καταφέρουμε να υπολογίσουμε τον συγκεκριμένο όγκο θα πρέπει με την βοήθεια εργαστηριακού εξοπλισμού να υπολογίσουμε αυτές τις δυο παραμέτρους. Για να υπολογιστεί ο όγκος του υλικού, τοποθετούμε συγκεκριμένη ποσότητα δείγματος σε ογκομετρικό σωλήνα. Ενώ για την μάζα του υλικού αρκεί να ζυγιστεί η συγκεκριμένη ποσότητα που χρησιμοποιήθηκε προηγουμένως.

### **3.3.5 Υπολογισμός Κατιοντοανταλλακτικής Ικανότητας**

Μέσω της κατιοντοανταλλακτικής ικανότητας μπορεί να προσδιοριστεί η ικανότητα δέσμευσης θρεπτικών στοιχείων στο έδαφος. Αποτελεί πολύ σημαντική παράμετρο που επηρεάζει την σταθερότητα της δομής του εδάφους καθώς επίσης το pH και την αντίδραση του εδάφους σε εδαφοβελτιωτικά (Katharine Brown, Jeremy Lemon). Στο συγκεκριμένο πείραμα υπολογίστηκε η ικανότητα αυτή και για τα 3 υλικά (Soil, Compost, Biochar). Οι μονάδες στο S.I της κατιοντοανταλλακτικής ικανότητας είναι cmol/kg of solid ή meq/ 100g of solid. Η διαδικασία αυτή χωρίζεται σε 3 στάδια:

#### **Στάδιο 1**

- 1) Γίνεται ζύγισμα 1g υλικού (Soil, Compost, Biochar) και τοποθετείται σε φυγοκεντρικό σωλήνα. Στην συνέχεια προστίθενται 8,25ml NaOAc 1M. Για κάθε δείγμα υπήρχαν συνολικά 3 επαναλήψεις.
- 2) Γίνεται τοποθέτηση των δειγμάτων σε αναδευτήρα για 5 λεπτά σε 150rpm.
- 3) Στο επόμενο βήμα μεταφέρονται τα δείγματα σε φυγόκεντρο για 10 λεπτά στις 4000rpm.
- 4) Τέλος γίνεται απομάκρυνση του υπερκείμενου υγρού.
- 5) Μόλις ολοκληρωθούν τα παραπάνω βήματα, γίνεται επανάληψη της διαδικασίας 3 φορές ακόμη.

#### **Στάδιο 2**

Στο δεύτερο στάδιο γίνεται προσθήκη 8,25ml ισοπροπανόλης (ή ισοπροπυλική αλκοόλη,  $C_3H_8O$ ) στο στέρεο δείγμα που προέκυψε από το πρώτο στάδιο και φυγοκέντριση για 10 λεπτά στις 4000rpm. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται 2 φορές ακόμη.

#### **Στάδιο 3**



- 1) Τέλος γίνεται προσθήκη στο στερεό υπόλειμμα που προέκυψε από το προηγούμενο στάδιο 8,25ml  $\text{NH}_4\text{OAc}$  1M.
- 2) Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται άλλες 2 φορές.
- 3) Στην συνέχεια γίνεται συλλογή των υπερκείμενων υγρών και από τις 3 επαναλήψεις σε ογκομετρική φιάλη των 25ml και αραιώνουμε με  $\text{NH}_4\text{OAc}$  μέχρι την χαραγή.

Αφού ολοκληρωθούν επιτυχώς τα παραπάνω στάδια, πρέπει να γίνει ο υπολογισμός της συγκέντρωσης του  $\text{Na}^+$  στα διαλύματα. Για να επιτευχθεί αυτό, χρησιμοποιήθηκε σύστημα Φασματομετρίας ατομικών μαζών σε επαγωγικά συζευγμένο πλάσμα (icp-ms) του οίκου Agilent και μοντέλο CX 7500 σειρές, στο εργαστήριο Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών της Σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης.

### **3.3.6 Προσδιορισμός Τέφρας**

Προκειμένου να γίνει ο προσδιορισμός της τέφρας, έπρεπε να ζυγιστούν 2g από τα Soil, Compost και Biochar και να τοποθετηθούν για καύση στους  $750^\circ\text{C}$  για 6h. Στην συνέχεια γίνεται ζύγισμα της τέφρας που έχει απομείνει στις κάψες και μέσω μαθηματικού τύπου που παρουσιάζεται επόμενο κεφάλαιο, υπολογίζεται το ποσοστό της τέφρας στα εδαφικά δείγματα.

### **3.3.2 Ανάλυση στα εδαφικά δείγματα**

#### **3.3.2.1 Λειοτρίβηση/Ξήρανση των εδαφικών δειγμάτων**

Αφού τελείωσε η καλλιέργεια των μαρουλιών, έγινε αφαίρεση τους από τις γλάστρες. Στη συνέχεια έγινε διαχωρισμός του φυτικού ιστού από το εδαφικό δείγμα. Τα εδαφικά δείγματα οδηγήθηκαν μετά την συγκομιδή για ξήρανση στους  $60^\circ\text{C}$  σε φούρνο ξήρανσης και πέρασαν από κόσκινο διαμέτρου 2 mm.

#### **3.3.2.2 Υπολογισμός pH – Αγωγιμότητας**

Όπως και στα αρχικά δείγματα έγινε προσδιορισμός του pH και της αγωγιμότητας. Λόγω του ότι τα εδαφικά δείγματα ποτίζονταν με λύμα, ήταν σημαντικό να γνωρίζουμε αν το λύμα σε συνδυασμό με το κομπόστ και το βιοεξανθράκωμα επηρέασαν το πείραμα ως προς το pH και την αγωγιμότητα. Ο προσδιορισμός του pH και της αγωγιμότητας έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο 2.3.1.

#### **3.3.2.3 Μέτρηση TOC-IC**

Οι μετρήσεις για ολικό άνθρακα (TC) και ανόργανο άνθρακα (IC) λαμβάνουν χώρα στο όργανο SSM-5000A της εταιρείας SHIMADZU. Ο οργανικός άνθρακας (TOC) προκύπτει από την αφαίρεσή τους (TC-IC).

Προκειμένου να επιτευχθεί μέτρηση για τον ολικό και ανόργανο άνθρακα απαιτείται συγκεκριμένη ποσότητα ανάλογα με το δείγμα. Για τα αρχικά δείγματα χρειαστήκαμε τις παρακάτω ποσότητες :

- 1) 50 mg Biochar
- 2) 5 mg Compost
- 3) 5 mg Soil

Γίνεται ρύθμιση του οργάνου για το βάρος και επιλογή της κατάλληλης καμπύλης βαθμονόμησης. Οι θερμοκρασίες για TC και IC είναι 900° C και 200° C αντίστοιχα.



Εικόνα 3.7: Όργανο μέτρησης TC(%), IC(%)

#### **3.3.2.4 Προσδιορισμός Διαθέσιμου Φωσφόρου (Olsen-P)**

Για τον προσδιορισμό του διαθέσιμου φωσφόρου χρειάζεται αρχικά να παρασκευαστεί ένα διάλυμα Διπτανθρακικού Νατρίου( $\text{NaHCO}_3$ ) διαλύοντας 42g  $\text{NaHCO}_3$  σε 1L απιονισμένο νερό. Στη συνέχεια πρέπει να ρυθμιστεί το Ph του στο 8,5. Έχοντας εκτελέσει τα παραπάνω στάδια, προστίθεται 50 ml από το διάλυμα σε 2,5g δείγματος που έχουν ζυγιστεί και γίνεται ανάδευση για 30 λεπτά. Μετά την ανάδευση το κάθε μείγμα φυγοκεντρείται (4 λεπτά στις 4010 rpm). Έπειτα από την φυγοκέντρωση η υγρή φάση συλλέγεται με σύριγγα στην οποία προσαρμόζεται φίλτρο μεμβράνης 0,45  $\mu\text{m}$  ώστε να διηθηθεί. Σε 12,5 ml δείγματος προστίθενται 5 ml  $\text{H}_2\text{SO}_4$  1N και ανακινείται μέχρι να σταματήσει η έκλυση  $\text{CO}_2$ , γίνεται ρύθμιση του Ph στην ουδέτερη περιοχή και αραιώνεται μέχρι τα 25ml.

Για να γίνει ο προσδιορισμός του φωσφόρου, εφαρμόζεται η πρότυπη μέθοδος Ascorbic Acid 4500-P. Απαιτείται η δημιουργία ενός εργαστηρίου που θα περιλαμβάνει τα εξής:

**1) Θειικό Οξύ ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) 5 N**

Σε 500 ml απιονισμένου νερού βάζουμε 70g δείγματος

**2) Τρυγικό Καλιοαντιμονούλιο  $\text{KsbO} \cdot \text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6$**

Σε 100 ml απιονισμένου νερού προσθέτουμε 0,2743g δείγματος

**3) Μολυβδαινικό Αμμώνιο  $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$**

Σε 250 ml απιονισμένου νερού προσθέτουμε 10 g δείγματος

**4) Ασκορβικό οξύ (L(+)-Ascorbic acid)**

Σε 50 ml απιονισμένου νερού προσθέτουμε 0,88 g δείγματος

Αφού παρασκευαστούν τα 4 αυτά διαλύματα στο τέλος τα προσθέτουμε όλα μαζί με την σειρά και την αναλογία που φαίνεται παρακάτω, δημιουργώντας έτσι το combined αντιδραστήριο.

Από το combined απαιτούνται 4 ml στα 25 ml δείγματος και αφήνεται σε ηρεμία για 15-20 λεπτά μέχρι να μετρηθεί η απορρόφηση του στο φασματοφωτόμετρο ( $\lambda = 880\text{nm}$ ).

Για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης απαιτείται καμπύλη βαθμονόμησης που φαίνεται στο Παράρτημα Β.

### **3.3.2.5 Προσδιορισμός Ολικού Φωσφόρου**

Για τον προσδιορισμό του ολικού φωσφόρου θα χρειαστεί 1g από το κάθε δείγμα, το οποίο τοποθετείται σε φούρνο High Therm της εταιρείας Linn στους  $500^\circ \text{C}$  για 8h έτσι ώστε να γίνει αποτελεσματικά η καύση. Όταν βγουν από το φούρνο προστίθεται 5ml νιτρικό οξύ και βράζεται στους  $120^\circ \text{C}$  μέχρι τελικού όγκου 1 ml και προσθέτουμε απιονισμένο νερό. Τέλος γίνεται ρύθμιση του Ph αραίωση μέχρι τα 25ml και η μέτρηση του φωσφόρου γίνεται με τη μέθοδο ascorbic acid, όπως προαναφέρθηκε στον Olsen.

### **3.3.2.6 Υπολογισμός Αμμωνιακού Αζώτου ( $\text{NH}_4\text{-N}$ )**

Για να γίνει η εκχύλιση του αμμωνιακού αζώτου από τα δείγματα πρέπει να παρασκευαστεί αρχικά ένα διάλυμα Χλωριούχου Καλίου (KCl). Σε 500 mL απιονισμένου νερού απαιτούνται 74,5 g KCl. Γίνεται ζύγισμα 1g δείγματος και προστίθενται 10 mL του διαλύματος που παρασκευάστηκε. Τοποθετούνται για ανάδευση 1h και στην συνέχεια μεταφέρονται στη φυγόκεντρο (4 min στις 4010 rpm). Τέλος, η υγρή φάση συλλέγεται μέσω σύριγγας και φιλτράρεται με φίλτρο μεμβράνης με μέγεθος πόρων 0,45  $\mu\text{m}$ . Για τη μέτρηση του  $\text{NH}_4\text{-N}$  χρησιμοποιείται το kit έτοιμων αντιδραστηρίων με κωδικό 1.00683.0001 της εταιρείας MERCK. Σύμφωνα με τη διαδικασία σε 200  $\mu\text{L}$  από το διηθημένο δείγμα προστίθενται 5 mL από το αντιδραστήριο της  $\text{NH}_4\text{-1}$  και μια κόφτη κουταλιά από την σκόνη  $\text{NH}_4\text{-2}$ . Αφήνονται σε ηρεμία για 15-20 λεπτά μέχρι

να αναπτυχθεί πράσινο χρώμα και γίνεται η μέτρηση στο φασματοφωτόμετρο στα 690 nm. Ο υπολογισμός γίνεται μέσω της καμπύλης βαθμονόμησης που έχει κατασκευασθεί με πρότυπα διαλύματα και παρουσιάζεται στο Παράρτημα Β.

### **3.3.2.7 Μέτρηση Νιτρικού Αζώτου (NO<sub>3</sub>-N)**

Η εκχύλιση των Νιτρικών απαιτεί την παρασκευή του ίδιου διαλύματος με παραπάνω (KCl) και τις ίδιες αναλογίες μεταξύ δείγματος και διαλύματος (1 g δείγματος / 10 mL διαλύματος). Για τη μέτρηση του NO<sub>3</sub>-N χρησιμοποιείται το kit έτοιμων αντιδραστηρίων με κωδικό 91865 της εταιρείας MACHEREY-NAGEL. Σύμφωνα με τη διαδικασία για τα νιτρικά απαιτούνται 0,5 ml διηθημένου δείγματος, 4 mL από το Nitrate R1, και 0,5 mL από το Nitrate R2. Τα δείγματα αφήνονται σε ηρεμία για 15 λεπτά περίπου μέχρι να αποκτήσουν ένα ροζ χρώμα και το φασματοφωτόμετρο ρυθμίζεται στο λ = 345 nm. Η καμπύλη βαθμονόμησης, που κατασκευάζεται μέσω προτύπων διαλυμάτων, παρουσιάζεται στο Παράρτημα Β.

### **3.3.3 Αναλύσεις Φυτικών Ιστών**

Οι φυτικοί ιστοί υπέστησαν επίσης αναλύσεις παρόμοιες με αυτές των εδαφικών δειγμάτων, ώστε να παρατηρήσουμε τις συγκεντρώσεις που απορρόφησαν οι φυτικοί ιστοί από τα εδαφικά δείγματα.

#### **3.3.3.1 Λειοτρίβηση / Ξήρανση**

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2.3.2 έγινε διαχωρισμός των φυτικών ιστών και στην συνέχεια ξήρανση τους στους 60° C. Μετά την ξήρανση οι φυτικοί ιστοί τοποθετήθηκαν σε εργαστηριακό ηλεκτρικό πολυκόφτη, ώστε να γίνει μείωση του μεγέθους των φύλλων, προκειμένου να χρησιμοποιηθούν για τις παρακάτω αναλύσεις.

#### **3.3.3.2 Προσδιορισμός Ολικού Φωσφόρου**

Αρχικά πραγματοποιήθηκε άλεσμα των φυτικών ιστών και στην συνέχεια συλλέχθηκε 1g από κάθε δείγμα και τοποθετήθηκε στο φούρνο στους 500° C για 5h. Μετά την καύση προστέθηκαν στα δείγματα 10ml HCL 1N και τοποθετήθηκαν για θέρμανση στους 250° C (μέχρι να διαλυτοποιηθεί η στάχτη). Στο επόμενο βήμα μεταφέρονται σε πλαστικά Falcon και οδηγούνται σε εργαστηριακό όργανο φυγοκέντρισης (4000 rpm, 3 min). Για τη μέτρηση του φωσφόρου γίνεται ρύθμιση του pH στην ουδέτερη περιοχή, αραίωση με απιονισμένο νερό στα 25 ml και εφαρμογή της μεθόδου ascorbic acid (όπως προαναφέρθηκε στον Olsen).

### 3.3.3.3 Προσδιορισμός Ολικού Αζώτου

Μετά το άλεσμα των φυτικών ιστών, συλλέχθηκαν 0,25g από το κάθε δείγμα και προστέθηκαν 5 ml  $\text{H}_2\text{SO}_4$  και 10 σταγόνες  $\text{H}_2\text{O}_2$  και τοποθετούνται για βράσιμο στους  $350^\circ\text{C}$  για 30 min. Μετά από 30 min προσθέτουμε άλλες 10 σταγόνες υπεροξειδίου. Η συγκεκριμένη διαδικασία πρέπει να επαναληφθεί συνολικά 3 φορές. Στη συνέχεια γίνεται μεταφορά τους σε πλαστικά Falcon, αφού γίνει αραίωση του δείγματος στα 20 ml και τοποθετούνται σε εργαστηριακή φυγόκεντρο. Για τη μέτρηση του ολικού αζώτου χρησιμοποιείται το kit έτοιμων αντιδραστηρίων με κωδικό 1.14763.0001 της εταιρείας SUPELCO. Σύμφωνα με τη διαδικασία γίνεται χώνευση σε 1 ml δείγματος με 9 ml απιονισμένου νερού και χρήση έτοιμων αντιδραστηρίων στους  $120^\circ\text{C}$  για 1h. Έπειτα 1 ml χωνευμένου δείγματος τοποθετείται σε ειδικά φιαλίδια που περιέχονται στο kit με τα κατάλληλα αντιδραστήρια και γίνεται μέτρηση στο φωτόμετρο Spectroquant NOVA 60 της εταιρείας MERCK.

### 3.3.3.4 Προσδιορισμός Μετάλλων και Μεταλλοειδών

Ο προσδιορισμός των μετάλλων στους φυτικούς ιστούς πραγματοποιήθηκε με διαφορετική μέθοδο από αυτήν των εδαφικών δειγμάτων. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η εξής:

- 1) Ζύγισμα 0,5g από το κάθε δείγμα, τα οποία τοποθετήθηκαν σε ποτήρια ζέσεως, όπου και προστέθηκε πυκνό  $\text{HNO}_3$ .
- 2) Στην συνέχεια γίνεται χώνευση σε μάτι φούρνου στους  $120^\circ\text{C}$  για 2h. Μεταφορά των νέων δειγμάτων σε πλαστικά falcon, ώστε να γίνει φυγοκέντρωση για 3min στις 4000rpm.
- 3) Τέλος γίνεται συλλογή των δειγμάτων με σύριγγα και διήθηση με φίλτρο μεμβράνης ( με μέγεθος πόρων  $0,45\mu\text{m}$ ) και αποθήκευση τους σε γυάλινα σκεύη.

Για να υπολογιστεί η ολική συγκέντρωση των μετάλλων (K, Ca, Mg, Cu, Cr, Ni, As, Mo, Hg, Pb, Co, Si, Se, Cd) έγιναν μετρήσεις στο icp-ms του εργαστηρίου της εταιρείας Agilent και μοντέλου CX 7500 series, στο εργαστήριο Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών της σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης.

### 3.3.4 Χαρακτηρισμός Λύματος

Τέλος έγινε και χαρακτηρισμός του επεξεργασμένου υγρού αποβλήτου, που χρησιμοποιήθηκε ως μέσο ποτίσματος στην καλλιέργεια. Οι μετρήσεις που έγιναν στο λύμα, ασχολήθηκαν με τις συγκεντρώσεις Νιτρικού Αζώτου ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ), Αμμωνιακού Αζώτου ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) και Διαθέσιμου Φωσφόρου (Olsen-P). Ο τρόπος, με τον οποίο πραγματοποιήθηκαν οι παραπάνω μετρήσεις, έχουν σχολιαστεί αναλυτικά στα Κεφάλαια 3.3.2.4, 3.3.2.6, 3.3.2.7.

## Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα

Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το χώμα, το κομπόστ και το βιοεξανθράκωμα πριν την έναρξη της πειραματικής διαδικασίας. Επίσης έγινε χαρακτηρισμός και του λύματος που χρησιμοποιήθηκε, ως μέσο ποτίσματος.

### 4.1.1 Χαρακτηρισμός του εδάφους και των εδαφοβελτιωτικών

Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα Χαρακτηρισμού εδαφικών δειγμάτων

Μετρήσεις	Soil	Compost	Biochar	Λύμα
pH	7,51 ± 0,16	8,03 ± 0,00	8,45 ± 0,15	6,89
pH-PZC	7,67	7,67	8,00	-
EC (mS/cm)	0,56 ± 0,00	9,47 ± 0,20	9,78 ± 0,11	0,591
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	1,59
Ολικός P (mg/kg)	123,69	161,54 ± 30,669	192,24	-
NO <sub>3</sub> -N (mg/kg)	8,23 ± 4,00	81,27 ± 1,60	38,26 ± 1,74	6,59
NH <sub>4</sub> -N (mg/kg)	101,90 ± 54,27	60,05 ± 5,70	94,19 ± 11,41	4,00
Τέφρα (%)	-	-	56,28	-
C (%)	8,17	27,18	35,62	-
N (%)	5,17	2,83	2,81	-
H (%)	0,79	2,27	2,41	-
Φαινόμενη Πυκνότητα (g/ml)	1,06 ± 0,02	1,52 ± 0,00	0,85 ± 0,03	-

Όπως προαναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3, προκειμένου να γίνει ο χαρακτηρισμός του εδάφους και των εδαφοβελτιωτικών έπρεπε να γίνουν συγκεκριμένες μετρήσεις. Αρχικά έγινε μέτρηση του pH και της αγωγιμότητας. Το Soil και το κομπόστ εμφάνισαν παρόμοιες τιμές στα pH τους, αλλά και με το βιοεξανθράκωμα που ήταν λίγο πιο αυξημένο  $pH_{biochar} = 8,45$ . Στην συνέχεια υπολογίστηκε και το pH – Point Zero Charge. Ο υπολογισμός του PZC είναι αρκετά σημαντικός, διότι μέσω αυτού μπορεί να καθοριστεί, κατά πόσο ένα υπόστρωμα είναι ικανό να προσροφά δυνητικά επιβλαβή ιόντα. Αν το pH του εδάφους είναι υψηλότερο από το σημείο μηδενικού φορτίου τότε η επιφάνεια του εδάφους έχει καθαρό αρνητικό φορτίο και παρουσιάζει την ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων. Σε αντίθετη περίπτωση το έδαφος θα διατηρεί ανιόντα (Appel et al., 2003). Παρατηρούμε ότι το Soil παρουσιάζει pH μικρότερο από το PZC του, το οποίο σημαίνει ότι το έδαφος διατηρεί κυρίως ανιόντα. Ωστόσο στην περίπτωση του βιοεξανθρακώματος και του κομπόστ παρατηρούμε ότι το

pH των δειγμάτων είναι μεγαλύτερο από το PZC τους. Αυτό σημαίνει ότι παρουσιάζει ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων.

Όσον αφορά στην αγωγιμότητα, τα δύο τελευταία δείγματα εμφάνισαν παρόμοιες τιμές, ενώ το Soil εμφάνισε την χαμηλότερη τιμή ( $EC = 0,562 \text{ ms/cm}$ ). Όσο μικρότερη είναι η τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στα εδάφη, τόσο πιο ευνοϊκά είναι για την ανάπτυξη των φυτών. Αν και οι τιμές των κομπόστ και βιοεξανθρακωμάτων είναι αρκετά υψηλές σε σχέση με αυτήν του Soil, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι οι αναλογίες των πρώτων δύο είναι 1%, 2,5% και 5% σε σχέση με το Soil.

Η επόμενη μέτρηση, που πραγματοποιήθηκε ήταν αυτή της κατιοντοανταλλακτικής. Βάσει έρευνας που επιτεύχθηκε από τους Dr. Clint Waltz και Edward Ayers, οι τυπικές τιμές CEC για εδαφικά δείγματα με pH 7,00 κυμαίνεται από 5-15 meq/ 100g εδάφους ή cmol/kg. Όπως παρατηρείται από τον παραπάνω Πίνακα η υψηλότερη τιμή εμφανίζεται στο κομπόστ, ενώ η χαμηλότερη στο Soil. Γενικά ισχύει ότι εδαφικά δείγματα με υψηλές τιμές CEC έχουν την δυνατότητα να διατηρούν περισσότερα θρεπτικά συστατικά, έναντι εδαφικών δειγμάτων με χαμηλές τιμές. Οπότε γίνεται εύκολα κατανοητό ότι το Soil προκειμένου να βοηθήσει στην ανάπτυξη του φυτού θα πρέπει να ενισχυθεί με κάποιο εδαφοβελτιωτικό. Η τιμή του βιοεξανθρακώματος αν και υψηλή σε σχέση με το Soil, είναι παρόμοια με αυτήν του κομπόστ. Συνήθως τα βιοεξανθρακώματα που παρασκευάζονται από οργανικά κλάσματα εμφανίζουν τιμές  $CEC = 200-400 \text{ meq} / 100\text{g}$ . Οπότε η τιμή αυτή ενδέχεται να είναι μικρότερη από τις προκαθορισμένες λόγω της βιομάζας, που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή του.

Στην συνέχεια ακολουθούν οι μετρήσεις του οργανικού και ανόργανου άνθρακα. Μέσω του TOC – IC έχουμε την δυνατότητα να εξετάσουμε τα ποσοστά ολικού οργανικού και ανόργανου άνθρακα. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα αποτελέσματα του κομπόστ και του βιοεξανθρακώματος. Μέσω του οργάνου που χρησιμοποιήσαμε είχαμε την δυνατότητα να υπολογίσουμε το  $C_{org}(\%)$  καθώς και το  $C_{inorg}(\%)$ , ενώ μέσω του παρακάτω τύπου μας δόθηκε η δυνατότητα να υπολογίσουμε το  $C_{tc}(\%)$ .

$$C_{tc}(\%) = C_{org}(\%) - C_{inorg}(\%)$$

Όπως προαναφέρθηκε για την παρασκευή του βιοεξανθρακώματος χρησιμοποιήσαμε ως βιομάζα το κομπόστ. Το κομπόστ στην συγκεκριμένη έρευνα εμφάνισε ποσοστά  $C_{org}(\%) = 21,53\%$ , ενώ το βιοεξανθράκωμα φάνηκε ελάχιστα αυξημένο εμφανίζοντας  $C_{org}(\%) = 22,31\%$ . Σε έρευνα που ασχολήθηκε με τον χαρακτηρισμό βιοεξανθρακώματος (παρασκευασμένο από ευκάλυπτο), παρατηρήθηκε  $C_{org}(\%) = 61,43\%$  (Thammasom et al., 2016). Επιπρόσθετα, σε άλλη έρευνα που πραγματοποίησε χαρακτηρισμό σε τρία διαφορετικά βιοεξανθρακώματα (1<sup>ο</sup>: από φλούδες μπανάνας, 2<sup>ο</sup>: από φλούδες πορτοκαλιού, 3<sup>ο</sup>: Milk tea) τα ποσοστά που προέκυψαν είναι  $C_{org1}(\%) = 62,23\%$ ,  $C_{org2}(\%) = 73,58\%$ ,  $C_{org3}(\%) = 71,90\%$  (Shial et al., 2019). Αυτό που είναι εύκολο να παρατηρηθεί, είναι ότι το βιοεξανθράκωμα της συγκεκριμένης έρευνας

διαφέρει σημαντικά στα ποσοστά ολικού οργανικού άνθρακα σε σχέση με τις έρευνες που προαναφέρθηκαν. Οι διαφορές μεταξύ των ερευνών είναι η διαδικασία πυρόλυσης της βιομάζας στον φούρνο καθώς και η ίδια η βιομάζα. Αν και οι χρόνοι παραμονής είναι διαφορετικοί δεν αποτελούν παράμετρο διαφοροποίησης του ολικού οργανικού άνθρακα, όπως απέδειξε το Πανεπιστήμιο Μεταλλείων και Τεχνολογίας της Κίνας (Πεκίνο).

Στην συνέχεια η έρευνα επικεντρώθηκε γύρω από τον υπολογισμό του Ολικού και Διαθέσιμου Φωσφόρου. Μέσω του πίνακα παρατηρείται ότι αν και οι ποσότητες ολικού φωσφόρου είναι υψηλές, ο διαθέσιμος φώσφορος εμφανίζει αρκετά χαμηλά ποσοστά. Ο διαθέσιμος φώσφορος σε σχέση με τον ολικό υπολογίστηκε ότι είναι 24% για το Soil, 21% για το κομπόστ. Σε σχέση με τα δυο προηγούμενα εδαφικά δείγματα, το βιοεξανθράκωμα εμφανίζει 94% διαθέσιμο φώσφορο. Ο ρόλος του φωσφόρου στις καλλιέργειες είναι πολύ σημαντικός, διότι είναι υπεύθυνος για την αποθήκευση και μεταφορά ενέργειας που προέρχεται από την φωτοσύνθεση (NRCS-USDA). Αν και τα ποσοστά του χώματος σε διαθέσιμο φώσφορο είναι χαμηλά, η προσθήκη εδαφοβελτιωτικών στην συνέχεια καθώς και λύματος ενδέχεται να ενισχύσει σημαντικά το εδαφικό δείγμα.

Η επόμενη μέτρηση αφορούσε τις ποσότητες νιτρικών και αμμωνιακών των εδαφικών δειγμάτων. Η ποσότητα του  $\text{NO}_3\text{-N}$  και  $\text{NH}_4\text{-N}$  υποδεικνύει την ποσότητα του διαθέσιμου αζώτου που μπορεί να προσληφθεί αμέσως από τα φυτά. Η κάθε καλλιέργεια απαιτεί διαφορετικές ποσότητες διαθέσιμου αζώτου, ωστόσο αυτές οι ποσότητες ανεξαρτήτου καλλιέργειας θα πρέπει να βρίσκονται μεταξύ των 10-50 mg/kg (LAQUA HORIBA, 2015). Βάσει των πειραματικών μετρήσεων που παρατίθενται στον παραπάνω πίνακα, παρατηρείται ότι η ποσότητα των νιτρικών για το Soil είναι κάτω από τα όρια που αναφέρθηκαν προηγουμένως, ενώ του κομπόστ είναι αρκετά υψηλότερα από τα όρια που έχουν τεθεί, όπως αντίστοιχα και του βιοεξανθρακώματος. Τα εδαφοβελτιωτικά που θα χρησιμοποιηθούν για τις καλλιέργειες, θα χρησιμοποιηθούν σε πολύ μικρές ποσότητες (1%, 2,5%, 5%), οπότε θεωρούμε ότι δεν θα επηρεάσει αρνητικά την καλλιέργεια.

Επόμενη μέτρηση που ακολούθησε ήταν αυτή του ποσοστού της τέφρας. Η τέφρα που προέκυψε από το κομπόστ είναι περίπου 20% μεγαλύτερη από αυτήν του βιοεξανθρακώματος. Επειδή το κομπόστ αποτελεί την βιομάζα, από την οποία προέκυψε το βιοεξανθράκωμα είναι λογικό τα ποσοστά τέφρας να είναι μεγαλύτερα στο κομπόστ από ότι στο βιοεξανθράκωμα. Το βιοεξανθράκωμα παρασκευάστηκε μέσω πυρόλυσης που σημαίνει ότι έχει παρασκευαστεί ένα προϊόν πλουσιότερο σε άνθρακα. Για αυτόν τον λόγο εμφανίζεται αυτή η διαφορά μεταξύ των δύο υλικών.

Τέλος μετρήθηκε και η φαινόμενη πυκνότητα. Ανάλογα με τον τύπο εδάφους ορίζονται κάποια τυπικά όρια, τα οποία αν ξεπεραστούν σημαίνει ότι το έδαφος δεν ενδέχεται να επηρεάσει αρνητικά την ανάπτυξη των φυτών. Το όριο αυτό λόγω του εδάφους που χρησιμοποιούμε είναι  $<1,4 \text{ g/cm}^3$  (Arshad et. al., 1996). Στην περίπτωση του κομπόστ παρατηρούμε ότι η φαινόμενη



πυκνότητα είναι λίγο πάνω από το όριο, ωστόσο λόγω των μικρών ποσοτήτων που χρησιμοποιούνται από τα εδαφοβελτιωτικά, θεωρούμε ότι δεν θα επηρεάσει τα εδαφικά δείγματα, που θα χρησιμοποιηθούν στις μεταχειρίσεις.

Τέλος, όσον αφορά στο λύμα, οι μετρήσεις επικεντρώθηκαν στις ενώσεις φωσφόρου και αζώτου. Η νομοθεσία που έχει ορίσει η Ευρωπαϊκή Ένωση για τα μέγιστα όρια Ολικού Αζώτου στις εκροές Κέντρων Επεξεργασίας Υγρών αποβλήτων είναι 10 mg/L ή 70-80% χαμηλότερα από τις εισροές (EU Directive). Επίσης σε έρευνα που ασχολήθηκε με τον εντοπισμό των μεγίστων ορίων Νιτρικού και Νιτρώδους Αζώτου σε λύματα αποδείχτηκε ότι η συγκέντρωση Νιτρικού Αζώτου στο λύμα δεν πρέπει να είναι **>11,3 mg/L**, ενώ το Αμμωνιακό Άζωτο NH<sub>4</sub>-N δεν πρέπει να είναι **>10 mg/L** (Water Quality Association). Στην περίπτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας η C<sub>NO<sub>3</sub>-N</sub> και Η C<sub>NH<sub>4</sub>-N</sub> είναι χαμηλότερες από τις τιμές που έχουν οριοθετηθεί. Τέλος βάσει των ορίων που έχουν τεθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση τα όρια του ολικού Φωσφόρου πρέπει να είναι 0,5 mg/L < TP < 3mg/L. Στην περίπτωση της συγκεκριμένης εργασίας η C<sub>TPΛ</sub> = 1,59 mg/L.

#### 4.1.2 Προσδιορισμός Μετάλλων και Μεταλλοειδών

Πίνακας 4.2: Τιμές μακροθρεπτικών, μικροθρεπτικών και βαρέων μετάλλων στοιχείων στα εδαφικά δείγματα πριν την φύτευση

Μέταλλα/Μεταλλοειδή	Soil	Compost	Biochar
Element Name	mg Στοιχείου/ kg εδάφους	mg Στοιχείου/ kg εδάφους	mg Στοιχείου/ kg εδάφους
B	39,62 ±4,801	64,31 ± 0,42	97,41 ±11,51
Na	1355,00 ±289,91	10965,00 ±530,33	12465,00 ±926,31
Mg	6330,00 ± 1272,79	9375,00 ±247,49	10555,00 ±926,31
Al	47535,00 ±4702,26	11060,00 ±820,24	13630,00 ±410,12
K	4215,00 ±205,06	7200,00 ±127,28	7925,00 ±586,90
Ca	58430,00 ±8584,28	147080,00 ±21298,06	180495,00 ±13244,11
Cr	73,07 ±13,87	73,83 ±7,57	107,27 ± 42,70
Mn	637,84 ±136,22	236,66 ±16,24	282,46 ± 25,04
Fe	23609,28 ±2389,84	7587,79 ±370,21	9389,49 ± 97,39
Co	14,32 ±1,81	5,85 ±0,47	6,32 ± 0,55
Ni	49,49 ±6,45	55,76 ±5,02	63,11 ±9,14
Cu	41,49 ±4,99	493,09 ±27,55	545,92 ± 43,18
Zn	98,43 ±12,15	508,11 ±51,69	480,73 ±30,00
As	—	—	—
Se	—	—	—
Mo	8,29 ±4,54	77,45 ±105,32	4,10 ± 0,10
Cd	—	—	—

<b>Hg</b>	4,03 ±4,66	1,09 ± 0,04	0,47 ± 0,23
<b>Pb</b>	87,75 ±3,75	337,00 ±12,79	369,09 ±33,79

Όπως αναφέρθηκε, τα θρεπτικά στοιχεία χωρίζονται σε μακροθρεπτικά (K, P, S, Ca) και μικροθρεπτικά (Zn, Cu, Fe, B). Τα μακροθρεπτικά συστατικά είναι απαραίτητο να βρίσκονται σε μεγάλες ποσότητες, ενώ τα μικροθρεπτικά πρέπει να βρίσκονται σε μικρότερες αναλογίες (Arit Efretuei, 2016). Τέλος υπάρχει και η κατηγορία των βαρέων μετάλλων, όπου οι τιμές τους πρέπει να είναι είτε πολύ μικρές λόγω της τοξικότητάς τους (Cd, Co, Hg, Mo, Se). Μέσω του Πίνακα 2, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι οι ποσότητες των μακροθρεπτικών στοιχείων είναι αρκετά υψηλές, ενώ των μικροθρεπτικών βρίσκονται σε χαμηλά επίπεδα. Εξαίρεση αποτελεί ο σίδηρος Fe, ο οποίος ιδιαίτερα στο χώμα είναι αρκετά υψηλός. Θετικό επίσης είναι ότι οι ποσότητες των βαρέων μετάλλων είναι ιδιαίτερα χαμηλές, έως και μηδενικές σε κάποιες περιπτώσεις.

Μια ακόμη παρατήρηση, που μπορεί να γίνει, είναι ότι οι τιμές του κομπόστ δεν διαφέρουν πολύ από τις τιμές του βιοεξανθρακώματος. Στην παράγραφο 2.4.2 αναφέρθηκε ότι οι χημικές ιδιότητες της βιομάζας (κομπόστ) δεν θα επηρεαστούν σε μεγάλο βαθμό από την διαδικασία της πυρόλυσης. Αυτό σημαίνει ότι το βιοεξανθράκωμα θα εμφανίζει παρόμοιες και λίγο αυξημένες τιμές σε σχέση με το κομπόστ. Σε έρευνα που γινόταν χρήση ξύλου από ευκάλυπτο ως βιομάζα για την παραγωγή βιοεξανθρακώματος, η μεγαλύτερη διαφορά παρατηρήθηκε στις τιμές του ασβεστίου Ca, όπως συμβαίνει και σε αυτήν την έρευνα. (Fernandes, Brian et al., 2020)

Μία τελευταία σημαντική παρατήρηση είναι οι συγκεντρώσεις μακροθρεπτικών και μικροθρεπτικών στοιχείων στο χώμα, είναι σε όλες τις περιπτώσεις μικρότερες σε σχέση με το κομπόστ και το βιοεξανθράκωμα. Αυτό υποδηλώνει την ανάγκη του χώματος για θρεπτικά στοιχεία, τα οποία θα λάβει από τα άλλα δύο εδαφοβελτιωτικά.

## 4.2 Αποτελέσματα φυτικών ιστών

### 4.2.1 Ανάπτυξη των Φυτικών Ιστών

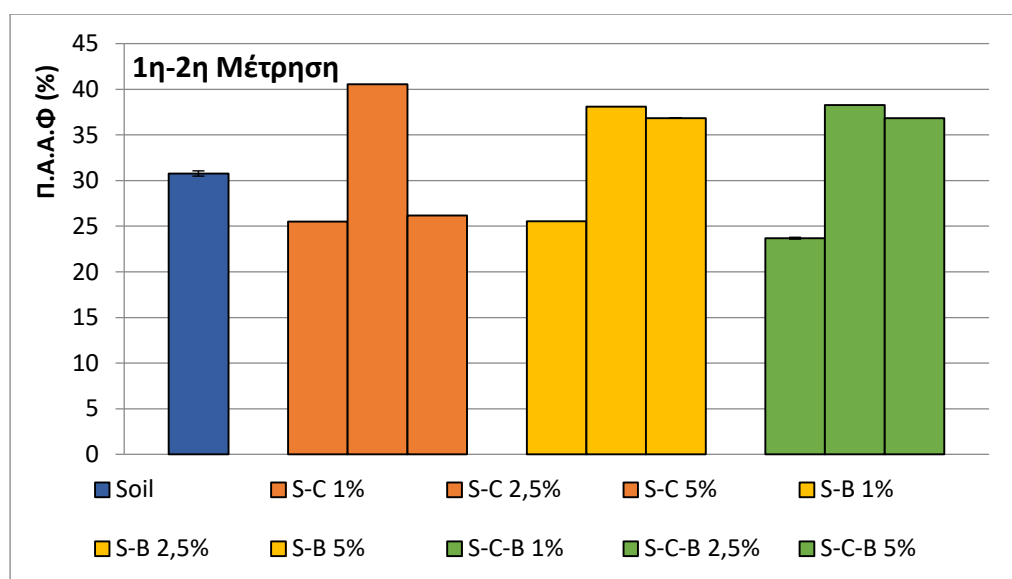
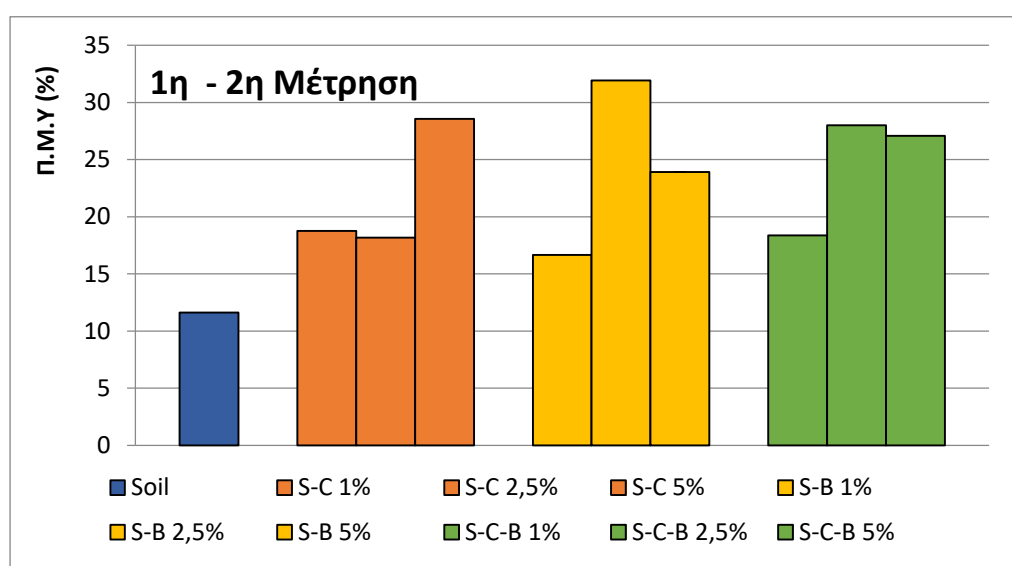
Οι διαδικασίες και μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό μετάλλων, μεταλλοειδών, φωσφόρου, νιτρικών καθώς και η συνολική ανάπτυξη των φυτικών ιστών (ύψος, ξηρό βάρος, αριθμός φύλλων) έχουν αναλυθεί στο Κεφάλαιο 3.

Στους Πίνακες 3 και 4 που ακολουθούν παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα Ποσοστού Μεταβολής Ύψους (ΠΜΥ(%)) και Αύξησης Αριθμού Φύλλων (ΠΑΑΦ(%)) που προέκυψαν έπειτα από 20 και 40 μέρες καλλιέργειας αντίστοιχα.

Πίνακας 4.3: Ποσοστό Μεταβολής Ύψους και Αύξησης Αριθμού Φύλλων (%) 20 μέρες μετά την φύτευση

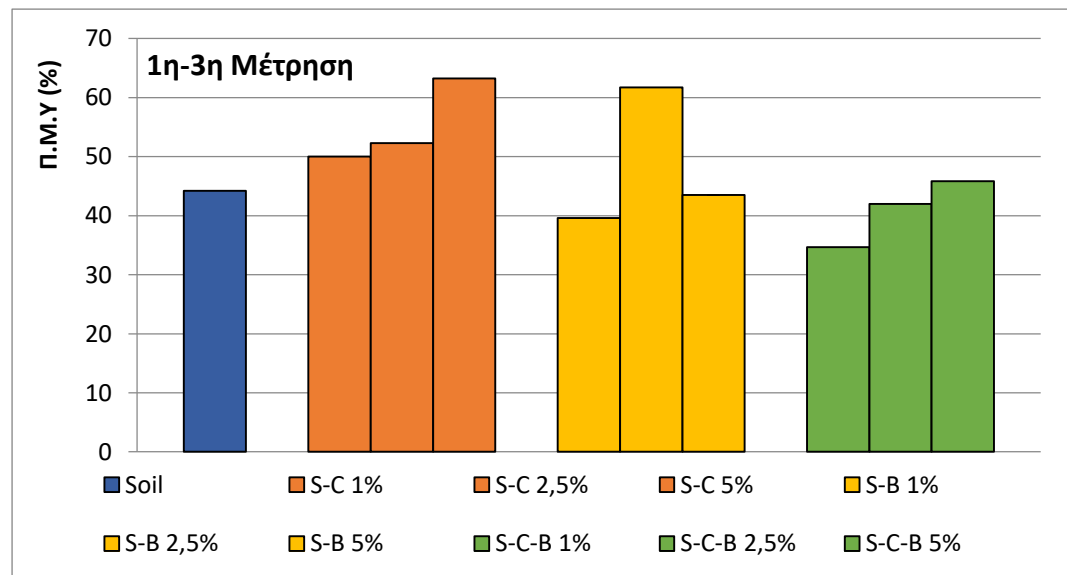
Δείγματα	ΠΜΥ (%)	ΠΑΑΦ (%)
----------	---------	----------

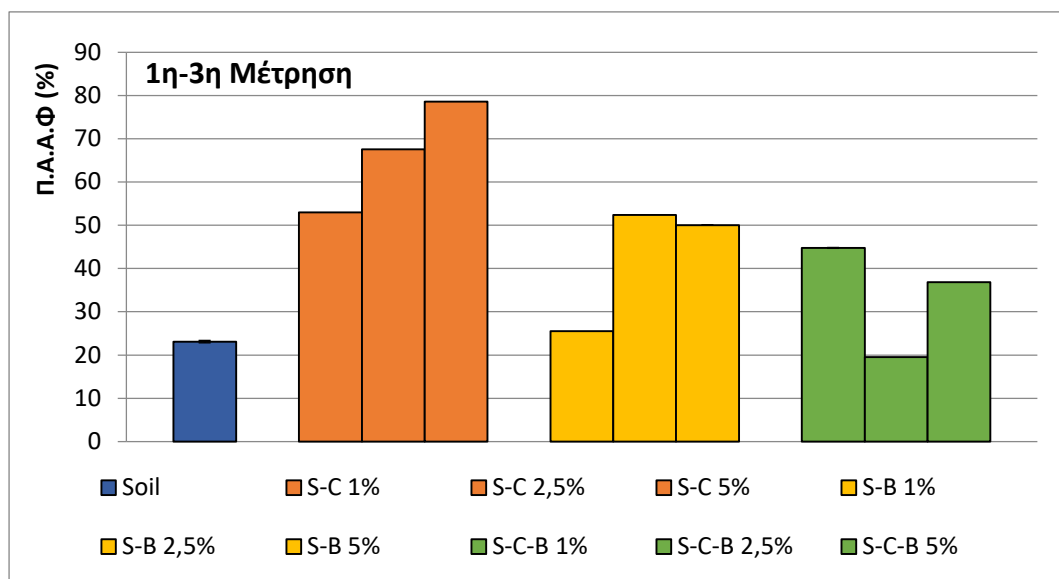
<b>Soil</b>	11,63 ± 8,28	30,77 ± 16,07
<b>Soil Compost 1%</b>	18,75 ± 4,64	25,49 ± 6,96
<b>Soil - Compost 2,5%</b>	18,18 ± 13,71	40,54 ± 12,33
<b>Soil - Compost 5%</b>	28,57 ± 14,30	26,19 ± 13,36
<b>Soil - Biochar 1%</b>	16,67 ± 5,37	25,53 ± 9,64
<b>Soil - Biochar 2,5%</b>	31,92 ± 18,94	38,09 ± 18,73
<b>Soil Biochar 5%</b>	23,91 ± 16,23	36,84 ± 11,02
<b>Soil - Compost - Biochar 1%</b>	18,37 ± 8,99	23,68 ± 14,36
<b>Soil - Compost - Biochar 2,5%</b>	28,00 ± 8,27	38,28 ± 6,87
<b>Soil - Compost - Biochar 5%</b>	27,08 ± 14,28	36,84 ± 6,50



Πίνακας 4.4: Ποσοστό Μεταβολής Ύψους και Αύξησης Αριθμού Φύλλων (%) κατά την συγκομιδή (40 μέρες μετά την φύτευση)

Δείγματα	ΠΜΥ (%)	ΠΑΑΦ (%)
Soil	44,19 ± 18,37	23,08 ± 41,17
Soil Compost 1%	50,00 ± 9,8	52,94 ± 31,15
Soil - Compost 2,5%	52,27 ± 9,17	67,57 ± 26,76
Soil - Compost 5%	63,26 ± 24,43	78,57 ± 20,62
Soil - Biochar 1%	39,58 ± 8,21	25,53 ± 20,55
Soil - Biochar 2,5%	61,70 ± 26,15	52,38 ± 30,71
Soil Biochar 5%	43,48 ± 29,32	50,00 ± 18,86
Soil - Compost - Biochar 1%	34,69 ± 16,16	44,74 ± 22,11
Soil - Compost - Biochar 2,5%	42,00 ± 7,03	19,53 ± 32,66
Soil - Compost - Biochar 5%	45,83 ± 13,18	36,84 ± 14,78



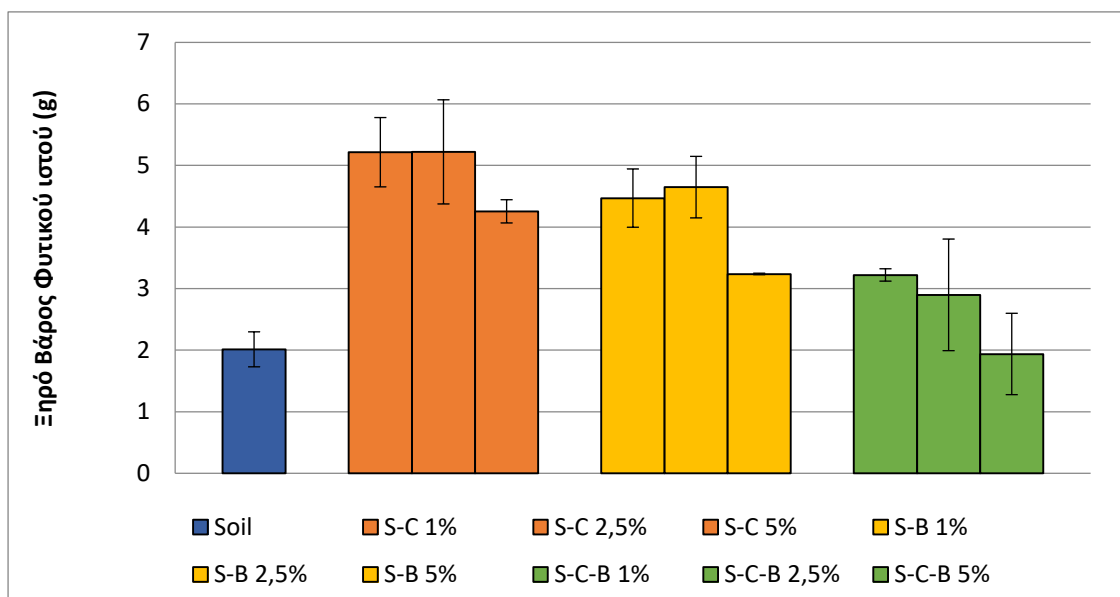


Όπως προαναφέρθηκε στον χαρακτηρισμό των εδαφικών δειγμάτων, το Soil είχε έλλειψη σε θρεπτικά στοιχεία και αυτό φαίνεται και στην ανάπτυξη των μαρουλιών στο Πίνακα 3. Αντίθετα παρατηρούμε ότι τα δείγματα που περιείχαν κομπόστ και βιοεξανθράκωμα παρουσιάζουν μεγαλύτερη ανάπτυξη από αυτήν του μάρτυρα. Αντίθετα όσον αφορά τον αριθμό των φύλλων γίνεται αντιληπτό ότι όλα τα δείγματα αναπτύσσονται με ίδιους ρυθμούς εκτός των δειγμάτων **S-C 1%**, **S-B 1%** και **S-C-B 1%** όπου παρουσιάζουν μικρότερη ανάπτυξη. Στο διάστημα αυτό να σημειωθεί ότι όλα τα δείγματα ποτίζονται με δευτεροβάθμια χλωριωμένη εκροή. Άρα ο μάρτυρας, αλλά και τα υπόλοιπα δείγματα εμπλουτίζονται σημαντικά από το επεξεργασμένο λύμα.

Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται οι μετρήσεις με χρονική διάρκεια από το ξεκίνημα της πειραματικής διαδικασίας, μέχρι πριν την συγκομιδή. Από τον Πίνακα 3 παρατηρούμε ότι το Soil αν και εμφανίζει αρκετά υψηλό ποσοστό μεταβολής ύψους, όσον αφορά στον αριθμό φύλλων εμφανίζει πολύ μικρά ποσοστά ανάπτυξης. Αντίστοιχα ίδια αποτελέσματα παρατηρούμε και για την μεταχείριση **S-B 1%**. Οι μεταχειρίσεις του κομπόστ έχουν εμφανίσει πολύ υψηλά ποσοστά αύξησης όπως και του βιοεξανθράκωματος και ο συνδυασμός τους, εξαιρουμένου το **ΠΑΑΦ(%)** του **S-B 2,5%**. Οπότε εκτός των εδαφοβελτιωτικών φαίνεται και το λύμα να έχει επηρεάσει θετικά την συνολική ανάπτυξη της καλλιέργειας

Να σημειωθεί ότι οι μετρήσεις του Πίνακα 3 και 4 προέκυψαν από τους μέσους όρους των επαναλήψεων της κάθε μεταχείρισης.

Ωστόσο οι παραπάνω πίνακες δεν είναι πλήρως ενδεικτικοί όσον αφορά στην ανάπτυξη των φυτών. Αυτό συμβαίνει, διότι το **ΠΜΥ(%)** των φυτών προκύπτει από το ύψος του μεγαλύτερου φύλλου της κάθε μεταχείρισης. Για να υπάρξει μεγαλύτερη ακρίβεια απαιτείται και το ξηρό βάρος των κορμών για την κάθε μεταχείριση. Παρακάτω παρουσιάζεται το Διάγραμμα 1 του ξηρού βάρους των κορμών των καλλιεργειών (g).

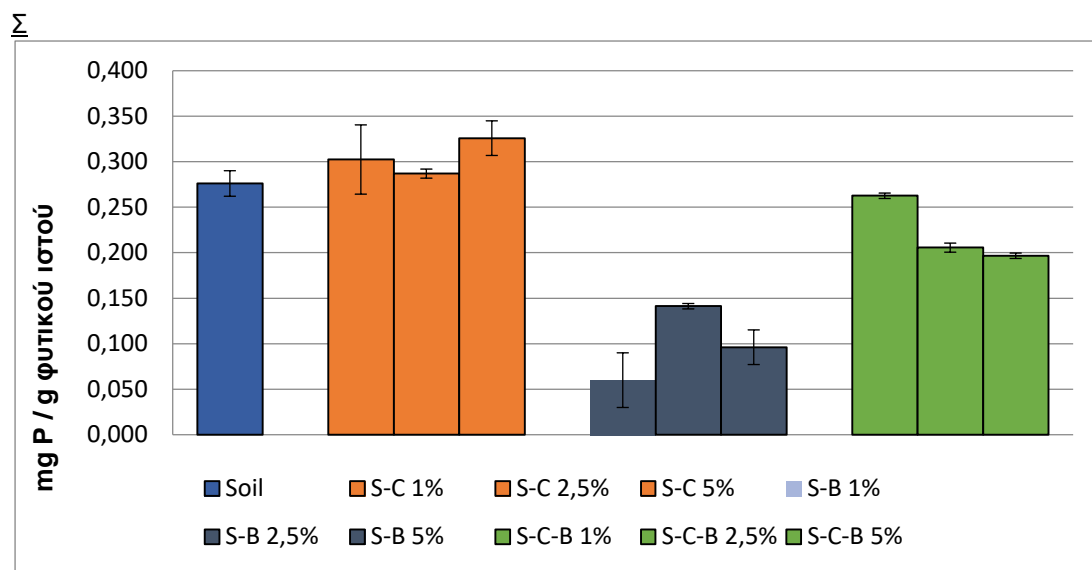


Σχήμα 4.1: Ξηρό Βάρος του Μέσου Όρου της κάθε μεταχείρισης

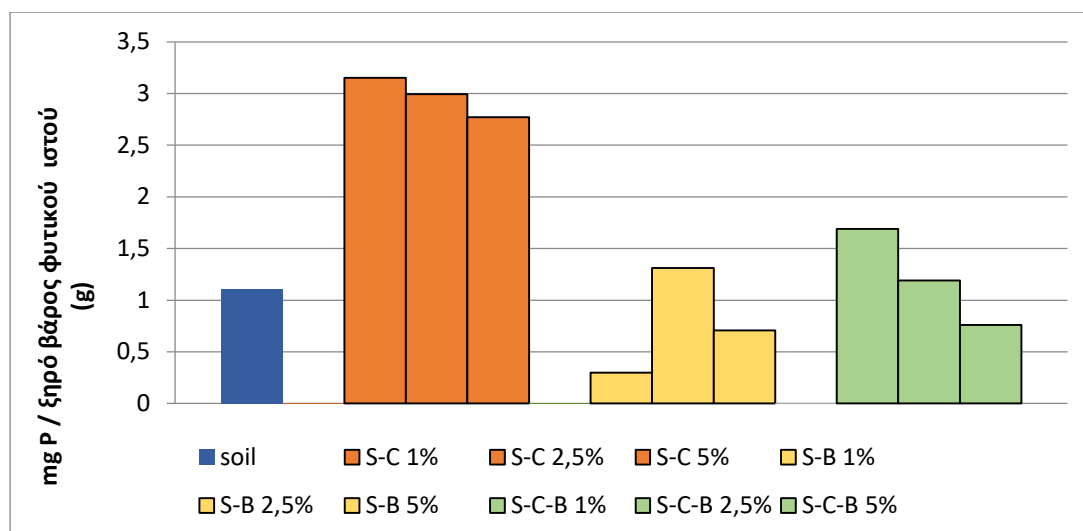
Μέσω του σχήματος διαφοροποιούνται κάπως τα συμπεράσματα σε σχέση με τους Πίνακες 2-3. Αρχικά γίνεται αντιληπτό ότι το Soil εμφανίζει το μικρότερο ξηρό βάρος σχεδόν από όλες τις μεταχειρίσεις. Επίσης οι μεταχειρίσεις S-C 1%, S-B 1% και S-C-B 1% έχουν αναπτυχθεί πολύ περισσότερο από ότι παρουσιάζουν οι προηγούμενοι Πίνακες. Τέλος παρατηρείται μείωση στις μεταχειρίσεις με το βιοεξανθράκωμα και τον συνδυασμό. Πιθανόν η προσθήκη του βιοεξανθρακώματος δεν αποδίδει, όπως αναμενόταν.

#### 4.2.2 Αποτελέσματα Ολικού Φωσφόρου (P)

Όπως προαναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4.1.1 ο ρόλος του φωσφόρου είναι ζωτικής σημασίας για την ανάπτυξη του φυτού, αφού είναι υπεύθυνος για την μεταφορά και αποθήκευση ενέργειας που προέρχεται από την διαδικασία της φωτοσύνθεσης. Το Σχήμα 2 παρουσιάζει τις συγκεντρώσεις του Φωσφόρου σε mg P ανά γραμμάριο φυτικού ιστού και το Σχήμα 3 παρουσιάζει τις συγκεντρώσεις Φωσφόρου σε mg P/ ξηρό βάρος φυτικού ιστού. Ο λόγος που παρουσιάζονται και τα δυο διαγράμματα είναι διότι τα ξηρά βάρη της κάθε μεταχείρισης διαφέρουν μεταξύ τους και είναι σημαντικό να γνωρίζουμε τις συγκεντρώσεις του φωσφόρου συνολικά στην κάθε γλάστρα.



Σχήμα 4.2: mg P/ g φυτικού ιστού για όλες τις μεταχειρίσεις.



Σχήμα 4.3: mg P / ξηρό βάρος δοχείου

Σε δημοσίευση, που ασχολήθηκε με την καλλιέργεια γκαζόν, παρατηρήθηκε ότι σε όλες τις καλλιέργειες που χρησιμοποιήθηκε βιοεξανθράκωμα υπήρξε αύξηση του ολικού φωσφόρου ειδικά στις μεταχειρίσεις **S-B 5%** και **S-C-B 5%**. Αντίθετα στην παρούσα εργασία παρατηρείται μείωση της συγκέντρωσης του φωσφόρου P όσο αυξάνεται η ποσότητα βιοεξανθρακώματος (Diamadoroulos et al., 2021).

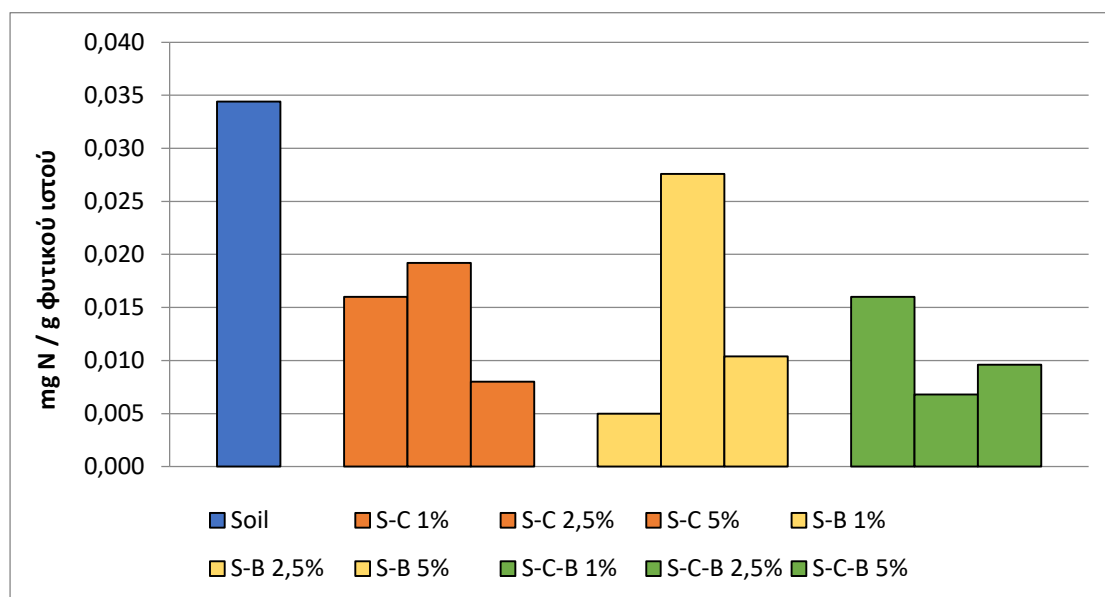
Στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται οι ποσότητες φωσφόρου για κάθε μεταχείριση πολλαπλασιαζόμενη με το ξηρό βάρος. Σε αυτό το διάγραμμα ο ολικός φώσφορος του μάρτυρα ανά ξηρό βάρος φυτικού ιστού είναι μικρότερος σε σχέση με την πλειοψηφία των μεταχειρίσεων. Ωστόσο και μέσα από αυτό το διάγραμμα προκύπτει η μείωση του ολικού φωσφόρου όσο αυξάνουμε τις αναλογίες του βιοεξανθρακώματος.

Μέσω του Σχήματος 3 παρατηρείται αρχικά ότι οι μεταχειρίσεις του βιοεξανθρακώματος και του κομπόστ - βιοεξανθράκωμα δεν έχουν απορροφήσει αρκετό φώσφορο σε σχέση με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις. Αντίθετα η καλλιέργεια

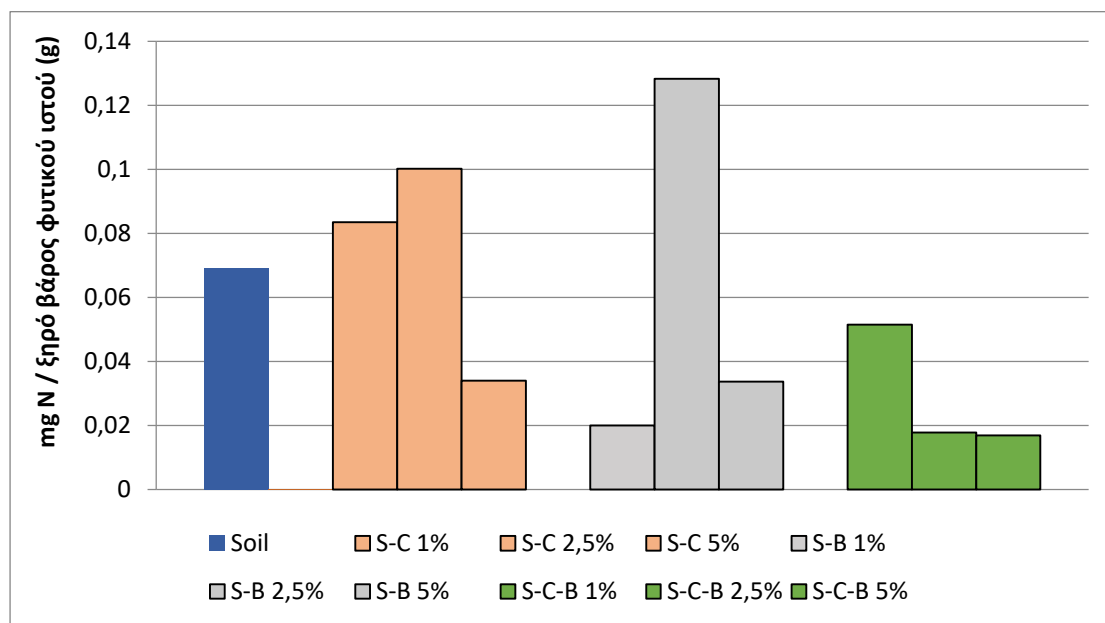
με το κομπόστ εμφανίζει αρκετά υψηλά ποσοστά ολικού φωσφόρου, ιδιαίτερα στην περίπτωση του **S-C 1%**.

### 4.2.3 Αποτελέσματα Ολικού Αζώτου (TN)

Στο κεφάλαιο 4.1.1 έγινε αναφορά στην σημασία του αζώτου που προέρχεται κυρίως από τα Νιτρικά ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) και τα Αμμωνιακά ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ). Οι συγκεκριμένες ενώσεις αζώτου εκτός από τα εδαφικά δείγματα, εμπεριέχονται επίσης και στο επεξεργασμένο λύμα, που χρησιμοποιήθηκε για το πότισμα. Παρακάτω όπως και στο Κεφάλαιο 4.2.2 παρουσιάζονται δύο διαγράμματα. Στο Σχήμα 4 παρουσιάζονται οι ποσότητες ολικού αζώτου N ανά γραμμάριο φυτικού ιστού, ενώ στο Σχήμα 5, οι συγκεντρώσεις ολικού αζώτου N ως προς το ξηρό βάρος του δοχείου.



Σχήμα 4.4: mg N / g φυτικού ιστού



Σχήμα 4.5: mg N/ ξηρό βάρος δοχείου.



Στο Σχήμα 4 τα αποτελέσματα δεν διαφέρουν πολύ από τα διαγράμματα του ολικού φωσφόρου. Σε αυτήν την περίπτωση επίσης ο μάρτυρας εμφανίζει πολύ υψηλές συγκεντρώσεις αζώτου σε σχέση με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις. Το **S-B 2,5%** σε αυτήν την περίπτωση φαίνεται να έχει συνεισφέρει αρκετά στην μεταφορά αζώτου προς τους κορμούς της καλλιέργειας, ενώ μειώνεται η συγκέντρωση αζώτου στην μεταχείριση του **S-B 5%**.

Στο Σχήμα 5, ωστόσο παρατηρούμε ξανά την σημαντικότητα του ξηρού βάρους ως προς τις τελικές μετρήσεις. Ενώ στο προηγούμενο διάγραμμα η συγκέντρωση του ολικού αζώτου του μάρτυρα εμφάνιζε την υψηλότερη τιμή, τώρα στο Σχήμα 4.5 παρατηρείται ότι δεν ισχύει. Η μεταχείριση του **S-B 2,5%** φαίνεται να εμφανίζει τις υψηλότερες ποσότητες και στην συνέχεια ακολουθεί η μεταχείριση του κομπόστ. Κοινό στοιχείο είναι ότι η μεταχείριση του συνδυασμού συνεχίζει να δείχνει αρκετά χαμηλές ποσότητες, που μας οδηγεί στο συμπέρασμα, ότι η υπόλοιπη ποσότητα έχει συσσωρευτεί στο χώμα και στις ρίζες.

Σε αντίστοιχη έρευνα, που ασχολήθηκε με την καλλιέργεια τομάτας, οι συγκεντρώσεις αζώτου κατά την αύξηση της ποσότητας του βιοεξανθρακώματος, αλλά και στον συνδυασμό βιοεξανθράκωμα - κομπόστ εμφάνιζαν αρνητικές τάσεις (Velli P, Ioanna Manolikaki et al., 2021). Επίσης σε εργασία που δημοσιεύτηκε παρατηρήθηκε ότι στις περιπτώσεις προσθήκης κομπόστ σε καλλιέργειες μαρουλιού, το ολικό άζωτο ήταν περισσότερο από τις καλλιέργειες που ήταν σκέτο χώμα. Τέλος απέδειξαν ότι οι καλλιέργειες που είχαν βιοεξανθράκωμα εμφάνιζαν υψηλότερες συγκεντρώσεις αζώτου και από τον μάρτυρα και από την καλλιέργεια που περιείχε κομπόστ (Edmund Kyei Akoto Danso et al., 2018).

#### 4.2.3 Αποτελέσματα Μετάλλων και Μεταλλοειδών

Στον Πίνακα 4.6 καταγράφονται οι τιμές των μετάλλων και μεταλλοειδών, για τους φυτικούς ιστούς. Τα μέταλλα χωρίζονται σε μακροθρεπτικά στοιχεία (K, Na, Mg, Ca) που πρέπει να βρίσκονται σε μεγάλες συγκεντρώσεις, στα μικροθρεπτικά στοιχεία (Zn, Cu, Fe, B) και στα βαρέα μέταλλα (Cd, Co, Hg, Mo, Se), που πρέπει στην πλειοψηφία τους να βρίσκονται σε μικρές συγκεντρώσεις. Εξαιρούνται το κοβάλτιο (Co), ο σίδηρος (Fe) και ο ψευδάργυρος (Zn) που αποτελούν θρεπτικά στοιχεία.

Πίνακας 4.6: Αποτελέσματα Προσδιορισμού Μετάλλων και Μεταλλοειδών για τους φυτικούς ιστούς.

Μέταλλο/Μεταλλοειδής	Soil	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%
Element Name	(mg Στοιχείο u/kg εδάφους)									
B	16,51 ± 2,04	14,15 ± 0,15	10,07 ± 1,9	13,23 ± 2,41	13,45 ± 1,30	13,74 ± 0,87	15,39 ± 0,2	16,61 ± 2,05	16,97 ± 0,32	15,97 ± 0,56
Na	6545,71 ± 576,18	5929,18 ± 1016,9	4347,39 ± 796,54	5570,33 ± 295,73	6540,70 ± 456,65	7005,74 ± 782,23	8220,58 ± 737,4	6412,82 ± 1155,67	6371,68 ± 362,5	8481,63 ± 568,55
Mg	1404,98	1458,	833,5	1041,	1153,	1261,6	1349,	1448,	1254,	1290,

	$\pm 51,96$	$07 \pm 401,5$ 1	$5 \pm 128,2$	$26 \pm 181,1$ 4	$6 \pm 124,6$	$4 \pm 165,11$	$87 \pm 43,9$	$69 \pm 244,5$ 7	$98 \pm 70,6$	$71 \pm 116,8$ 2
<b>Al</b>	$143,4 \pm 121,34$	$378 \pm 293,6$	$119,4 \pm 138,3$ 2	$133,2 \pm 76,37$	$230,5 \pm 80,62$	$135,6 \pm 91,65$	$48 \pm 22,07$	$80,4 \pm 32,25$	$57,6 \pm 13,58$	$106,2 \pm 0,85$
<b>K</b>	$5507,78 \pm 954,73$	$5894,48 \pm 475,8$ 2	$4900,42 \pm 726,0$ 2	$6611,08 \pm 1890,91$	$6467,5 \pm 420,3$	$6595,7 \pm 478,91$	$7187,86 \pm 160,6$ 7	$7537,42 \pm 1260,61$	$8660,38 \pm 543,8$ 8	$8900,71 \pm 766,2$ 5
<b>Ca</b>	$10303,17 \pm 388,72$	$1013,936 \pm 2046,89$	$6312,12 \pm 1250,56$	$7685,04 \pm 903,78$	$9560,65 \pm 1400,49$	$9620,18 \pm 1990,69$	$9414,73 \pm 247,37$	$9728,46 \pm 1099,4$	$8662,33 \pm 94,24$	$7349,1 \pm 200,2$ 5
<b>Cr</b>	$0,68 \pm 0,62$	$0,95 \pm 0,58$	$0,38 \pm 0,28$	$0,53 \pm 0,16$	$0,42 \pm 0,12$	$0,37 \pm 0,13$	$0,24 \pm 0,05$	$0,36 \pm 0,06$	$0,29 \pm 0,04$	$0,54 \pm 0,13$
<b>Mn</b>	$64,87 \pm 6,12$	$36,64 \pm 12,14$	$65,09 \pm 37,36$	$50,46 \pm 2,4$	$40,5 \pm 3,2$	$37,65 \pm 1,81$	$32,22 \pm 8,51$	$29,76 \pm 10,17$	$27,52 \pm 1,83$	$29,5 \pm 0,05$
<b>Fe</b>	$1252,51 \pm 1653,24$	$391,41 \pm 293,52$	$111,74 \pm 110,43$	$171,81 \pm 92,41$	$210,56 \pm 90,8$	$167,41 \pm 90,47$	$68,34 \pm 15,41$	$123,17 \pm 36,32$	$71,11 \pm 13,91$	$157,87 \pm 9,83$
<b>Co</b>	$0,18 \pm 0,13$	$0,15 \pm 0,00$	$0,08 \pm 0,00$	$0,04 \pm 0,03$	--	$0,02 \pm 0,00$	--	$0,07 \pm 0,00$	--	--
<b>Ni</b>	$0,5 \pm 0,23$	$0,49 \pm 0,00$	$0,16 \pm 0,00$	$0,16 \pm 0,05$	$0,12 \pm 0,02$	$0,09 \pm 0,06$	$0,01 \pm 0,00$	$0,14 \pm 0,02$	$0,03 \pm 0,00$	$0,09 \pm 0,06$
<b>Cu</b>	$1,84 \pm 0,22$	$1,64 \pm 0,74$	$0,91 \pm 0,18$	$1,29 \pm 0,06$	$1,40 \pm 0,14$	$1,44 \pm 0,34$	$1,43 \pm 0,27$	$1,92 \pm 0,42$	$1,76 \pm 0,06$	$1,57 \pm 0,03$
<b>Zn</b>	$14,04 \pm 2,11$	$14,65 \pm 3,86$	$10,17 \pm 1,92$	$12,26 \pm 0,37$	$10,81 \pm 0,58$	$11,45 \pm 0,48$	$12,99 \pm 1,88$	$15,4 \pm 1,62$	$15,55 \pm 1,06$	$13,76 \pm 0,03$
<b>As</b>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<b>Se</b>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<b>Mo</b>	$3,99 \pm 2,19$	$1,49 \pm 0,22$	$1,13 \pm 0,38$	$12,87 \pm 5,09$	$1,1 \pm 0,20$	$0,89 \pm 0,07$	$0,56 \pm 0,11$	$0,6 \pm 0,02$	$2,59 \pm 2,1$	$3,7 \pm 0,62$
<b>Cd</b>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<b>Hg</b>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<b>Pb</b>	$0,4 \pm 0,21$	$0,53 \pm 0,3$	$0,25 \pm 0,1$	$0,39 \pm 0,12$	$0,19 \pm 0,03$	$0,24 \pm 0,12$	$0,2 \pm 0,04$	$0,39 \pm 0,03$	$0,23 \pm 0,06$	$0,39 \pm 0,1$

Αρχικά από τον πίνακα γίνεται αντιληπτό, ότι τα μακροθρεπτικά βρίσκοντα σε πολύ υψηλότερες συγκεντρώσεις από τα υπόλοιπα στοιχεία. Υψηλές τιμές εμφανίζει και ο σίδηρος. Αν γίνει μια σύγκριση με τον Πίνακα 2 του Κεφαλαίου 4.1.2, αλλά και με τον Πίνακα 4.6 του κεφαλαίου 4.3.5 προκύπτει το συμπέρασμα ότι οι φυτικοί ιστοί έχουν απορροφήσει περίπου το 15% των διαθέσιμων θρεπτικών στοιχείων που υπάρχει στο έδαφος. Ένας βασικός λόγος, που εξηγεί αυτήν την διαφορά είναι οι γλάστρες που επιλέχθηκαν για το πείραμα. Λόγω του όγκου των δειγμάτων του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν μικρές γλάστρες, οι οποίες περιόρισαν το ριζικό σύστημα του μαρουλιού και

κατά επέκταση το ίδιο το μαρούλι. Αυτό συνεπάγεται ότι οι ανάγκες του μαρουλιού σε θρεπτικά στοιχεία, θα είναι μικρότερες από το αναμενόμενο (Reggouzas, 2015). Επίσης μέρος των θρεπτικών στοιχείων ενδέχεται να απομακρύνθηκε κατά την διάρκεια του ποτίσματος. Τέλος το ριζικό σύστημα των μαρουλιών, όπως προαναφέρθηκε λειτουργεί ως φίλτρο των φυτικών ιστών, προκειμένου το φυτό να μην έχει περίσσεια θρεπτικών στοιχείων που δεν μπορεί να αξιοποιήσει (Jagaba et al., 2021). Θετικό στοιχείο αποτελεί οι μικρές έως και μηδενικές συγκεντρώσεις μικροθρεπτικών στοιχείων και βαρέων μετάλλων στους φυτικούς ιστούς. Σε παρόμοια ερευνητική εργασία που ασχολήθηκε με τις συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων που περνούν από το ριζικό σύστημα και καταλήγουν στους φυτικούς ιστούς παρατηρήθηκε ότι μόνο το 10% βαρέων μετάλλων κατάφεραν να εισχωρήσουν στους φυτικούς ιστούς (Eissa, Negim, 2018).

Η Ευρωπαϊκή Ένωση ένωσε έχει θέσει κάποια όρια για κάποια μικροθρεπτικά στοιχεία και βαρέα μέταλλα. Εάν το μαρούλι ξεπερνάει τα συγκεκριμένα όρια σημαίνει ότι είναι απαγορευτικό για ανθρώπινη κατανάλωση. Αρχικά τα όρια που έχουν δοθεί για τον Zn είναι 80 mg/ kg ξηρού βάρους. Μέσω του Πίνακα 4.6 παρατηρούμε ότι όλες οι μεταχειρίσεις βρίσκονται χαμηλότερα από τα επίπεδα που έχει θέσει η ΕΕ. Άρα είναι ασφαλή για να καταναλωθούν από τον άνθρωπο. Στην συνέχεια έχουμε την περίπτωση του Cu. Τα όρια που έχουν τεθεί από την ΕΕ είναι 40 mg / kg ξηρού βάρους, οπότε και σε αυτήν την περίπτωση οι μεταχειρίσεις βρίσκονται εντός ορίων. Στην περίπτωση του Pb τα όρια που έχει θέσει η ΕΕ είναι πολύ πιο αυστηρά. Στο μαρούλι το όριο είναι 0,3 mg/ kg ξηρού βάρους. Σε αυτήν την περίπτωση μέρος των μεταχειρίσεων βρίσκεται οριακά εκτός των απαιτούμενων ορίων. Στην συνέχεια προηγείται το Cd με όρια 0,2 mg/ kg ξηρού βάρους. Στην περίπτωση του καδμίου όλες οι μεταχειρίσεις βρίσκονται εντός των ορίων. Τέλος εξετάζεται και η περίπτωση του Ni. Το μέγιστο επιτρεπτό επίπεδο κατανάλωσης από άνθρωπο το 1,5 mg/kg ξηρού βάρους, όπου σε αυτήν την περίπτωση επίσης οι καλλιέργειες βρίσκονται εντός των απαιτούμενων ορίων (Eissa, Negim, 2018).

### 4.3 Αποτελέσματα Εδαφικών Δειγμάτων

Στις παρακάτω υποπαραγράφους παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα, που προέκυψαν από τις εδαφικές αναλύσεις και γίνεται σύγκριση τους με παρόμοια πειράματα.

#### 4.3.1 Συγκεντρωτικός Πίνακας Παρουσίασης Αποτελεσμάτων

Στον Πίνακα 4.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μεταχειρίσεων που προέκυψαν από τις αναλύσεις που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 3.3.2.

Πίνακας 4.7: Συγκεντρωτικός Πίνακας παρουσίασης αποτελεσμάτων που προέκυψαν στις μεταχειρίσεις.

Δείγματα	pH	EC (μs/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>	7,45 ± 0,18	1283,00 ± 190,92	20,91 ± 1,4	137,47 ± 47,52	26,54 ±
<b>S-C 1%</b>	7,32 ± 0,09	2010,00 ± 28,28	19,69 ± 2,01	41,24 ± 7,22	32,4 ± 6,28
<b>S-C 2,5%</b>	7,65 ± 0,05	1321,75 ± 166,37	22,39 ± 2,15	80,75 ± 10,47	24,27 ± 1,74
<b>S-C 5%</b>	7,28 ± 0,04	1689,67 ± 68,13	24,79 ± 4,26	71,43 ± 9,16	33,63 ± 2,67
<b>S-B 1%</b>	7,48 ± 0,03	1039,00 ± 219,98	10,07 ± 1,41	215,16 ± 28,29	10,45 ± 1,45
<b>S-B 2,5%</b>	7,34 ± 0,04	1663,33 ± 212,1	26,86 ± 2,59	45,99 ± 3,46	20,19 ± 2,97
<b>S-B 5%</b>	7,33 ± 0,26	1995,00 ± 176,78	42,23 ± 3,96	164,62 ± 3,80	22,3 ± 2,93
<b>S-C-B 1%</b>	7,25 ± 0,17	1383,33 ± 310,92	24,97 ± 2,66	40,61 ± 3,1	29,56 ± 7,62
<b>S-C-B 2,5%</b>	7,31 ± 0,16	1417,00 ± 169,39	40,25 ± 3,75	38,28 ± 6,84	24,93 ± 0,267
<b>S-C-B 5%</b>	7,48 ± 0,17	1358,00 ± 366,3	90,15 ± 8,27	70,72 ± 5,38	15,74 ± 1,42

#### 4.3.2 pH – Αγωγιμότητα

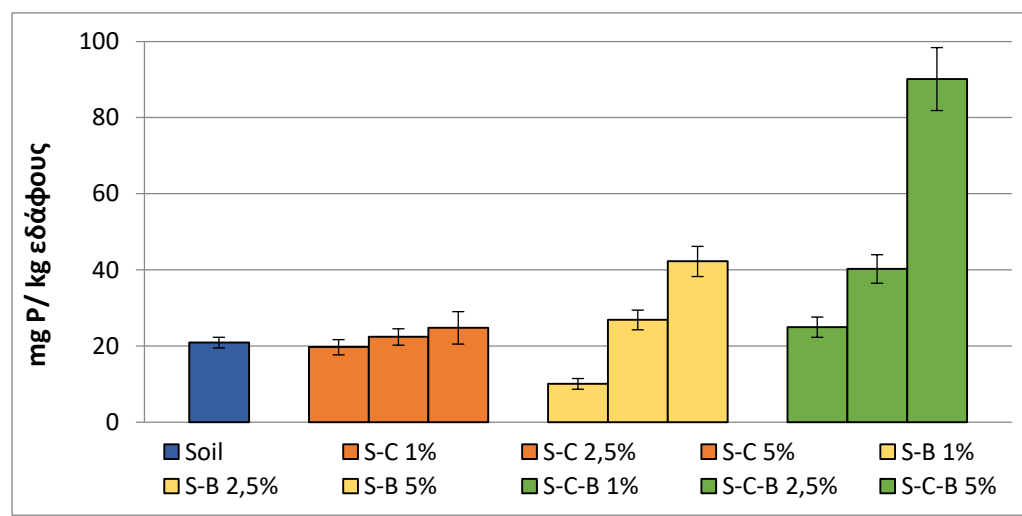
Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από τον Πίνακα 5, δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές στις τιμές των pH στο τέλος της καλλιέργειας. Αυτό αποτελεί ένα λογικό αποτέλεσμα, διότι ενώ το κομπόστ και το βιοεξανθράκωμα τείνουν να αυξάνουν το pH, η χρήση λύματος τείνει να το μειώσει. Σε παρόμοια έρευνα, που ασχολήθηκε με την καλλιέργεια ντομάτας, χρησιμοποιήθηκε κομπόστ σε διάφορες αναλογίες και επεξεργασμένο υγρό απόβλητο ως μέσο ποτίσματος. Στην αναλογία του 5% η τιμή του pH ήταν 7,17, ενώ στην συγκεκριμένη έρευνα ήταν στο 7,28. Όσον αφορά στην αγωγιμότητα η τιμή είναι EC= 1,38 mS/cm, ενώ στην παρούσα έρευνα είναι 1,69. Η διαφορά αυτή οφείλεται κυρίως στη διαφορετική σύσταση του κομπόστ και του επεξεργασμένου υγρού αποβλήτου (Tzortzakakis et al., 2019)

Σε διαφορετική έρευνα που ασχολήθηκε με την επίδραση βιοκάρβουνου και την χρήση επεξεργασμένου υγρού αποβλήτου ως μέσο ποτίσματος η τιμή του pH= 6,71, ενώ στην συγκεκριμένη έρευνα οι τιμές του βιοεξανθρακώματος είναι κοντά στο pH= 7,35. Η μικρή αυτή διαφορά οφείλεται κυρίως , στην διαφορά σύστασης του βιοεξανθρακώματος καθώς και στο απόβλητο που χρησιμοποιήθηκε. Όσον αφορά στην αγωγιμότητα, η έρευνα με το βιοκάρβουνο εμφάνισε EC=2,4 mS/cm , ενώ σε αυτήν την έρευνα η τιμή είναι EC=1,99 mS/cm. Σε αυτήν την περίπτωση επίσης, οι διαφορές οφείλονται κυρίως στην σύσταση του βιοεξανθρακώματος και του υγρού αποβλήτου (Woldetsadik et al., 2019) .

Τέλος στον συνδυασμό Soil-Compost-Biochar μπορεί να παρατηρηθεί ότι δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές στις τιμές του pH. Η χρήση εδαφοβελτιωτικού και η χρήση υγρού αποβλήτου σταθεροποιεί αρκετά το τελικό εδαφικό δείγμα. Ταυτόχρονα το ίδιο μπορεί να παρατηρηθεί και για την αγωγιμότητα.

#### 4.3.3 Αποτελέσματα Διαθέσιμου Φωσφόρου Olsen-P

Οι λόγοι για την σημαντικότητα του φωσφόρου στην ανάπτυξη φυτών, έχουν αναφερθεί αναλυτικά παραπάνω. Στο Σχήμα 6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του διαθέσιμου φωσφόρου που μετρήθηκαν στα εδαφικά δείγματα των καλλιεργειών μετά την συγκομιδή.



Σχήμα 4.6: Αποτελέσματα Διαθέσιμου Φωσφόρου σε mg P/ kg εδάφους.

Μέσω του παραπάνω σχήματος, παρατηρείται μια αυξητική τάση όσο γίνεται αύξηση της ποσότητας των εδαφοβελτιωτικών. Όλες οι καλλιεργείες, εκτός του **S-B 1%** εμφανίζουν κυρίως μεγαλύτερες συγκεντρώσεις διαθέσιμου φωσφόρου P σε σχέση με τον μάρτυρα. Η υψηλότερη τιμή του σχήματος, εμφανίζεται στον συνδυασμό **S-C-B 5%**. Κάνοντας μια σύγκριση του Σχήματος 3 ( mg P/ ξηρό βάρος δοχείου), είναι εύκολο να παρατηρηθεί, ότι μεγάλο μέρος των συγκεντρώσεων φωσφόρου, έχει συσσωρευτεί στο χώμα. Αυτό συμβαίνει αρχικά λόγω της μικρής διάρκειας του πειράματος (40 μέρες) και λόγω του ριζικού συστήματος των μαρουλιών, που δεν επιτρέπει στο φυτό να απορροφήσει μεγάλες ποσότητες θρεπτικών στοιχείων.

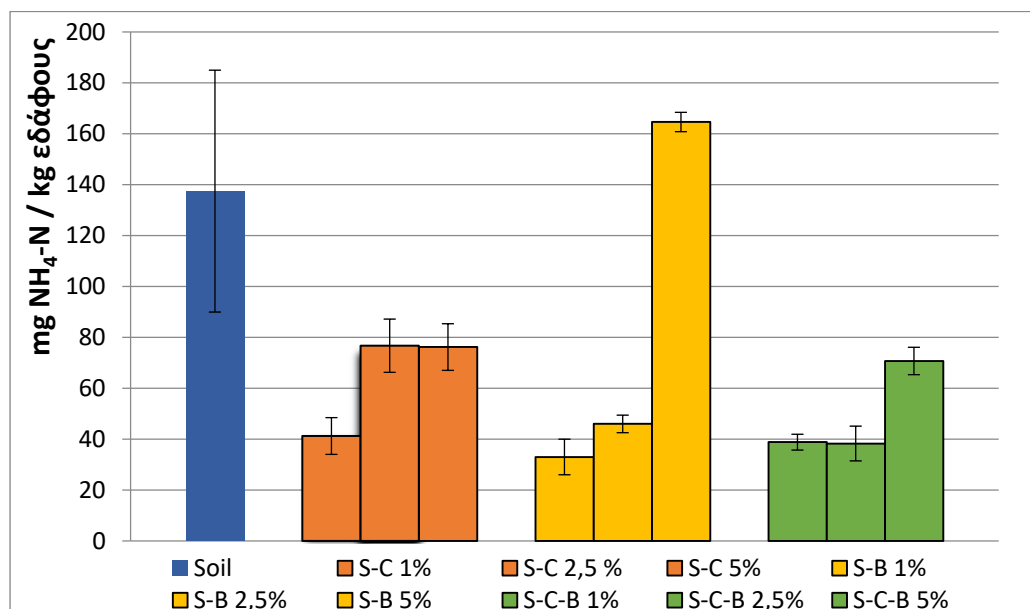
Σε αντίστοιχη έρευνα που ασχολήθηκε με την καλλιέργεια μαρουλιών, στην οποία χρησιμοποιήθηκε βιοεξανθράκωμα που παρασκευάστηκε από οστά σε συνδυασμό με χώμα, παρατηρήθηκε ότι οι συγκεντρώσεις διαθέσιμου φωσφόρου ήταν υψηλότερες από αυτές του μάρτυρα (Deogratus Luyima et al., 2021). Όπως και στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, όσο αυξάνονται οι αναλογίες του βιοεξανθράκωματος, τόσο αυξάνεται και η συγκέντρωση του διαθέσιμου φωσφόρου.

Σε άλλη έρευνα έγινε χρήση βιοεξανθράκωματος, που παρασκευάστηκε από κοπριά χοίρου, ενώ η κοπριά χρησιμοποιήθηκε σε συνδυασμό με χώμα για την καλλιέργεια μαρουλιών ( Malik et al., 2022). Οι ποσότητες του κομπόστ και βιοεξανθράκωματος που χρησιμοποιήθηκαν ήταν σε αναλογίες 5% και 7%. Οι συγκεντρώσεις φωσφόρου στα εδαφικά δείγματα και σε αυτήν την δημοσίευση βρίσκονται πολύ κοντά με τις τιμές της παρούσας εργασίας και παρόμοια αποτελέσματα εμφανίζονται και στον συνδυασμό S-C-B.

#### 4.3.4 Αποτελέσματα Αμμωνιακού και Νιτρικού Αζώτου ( $\text{NH}_4\text{-N}$ , $\text{NO}_3\text{-N}$ )

Όπως προαναφέρθηκε το άζωτο βρίσκεται στο χώμα και στους φυτικούς ιστούς σε διάφορες ενώσεις, με τις κυριότερες να είναι αυτή του Αμμωνιακού Αζώτου ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) και Νιτρικού Αζώτου ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ). Μέσω του Πίνακα 5, παρατηρείται ότι το άζωτο

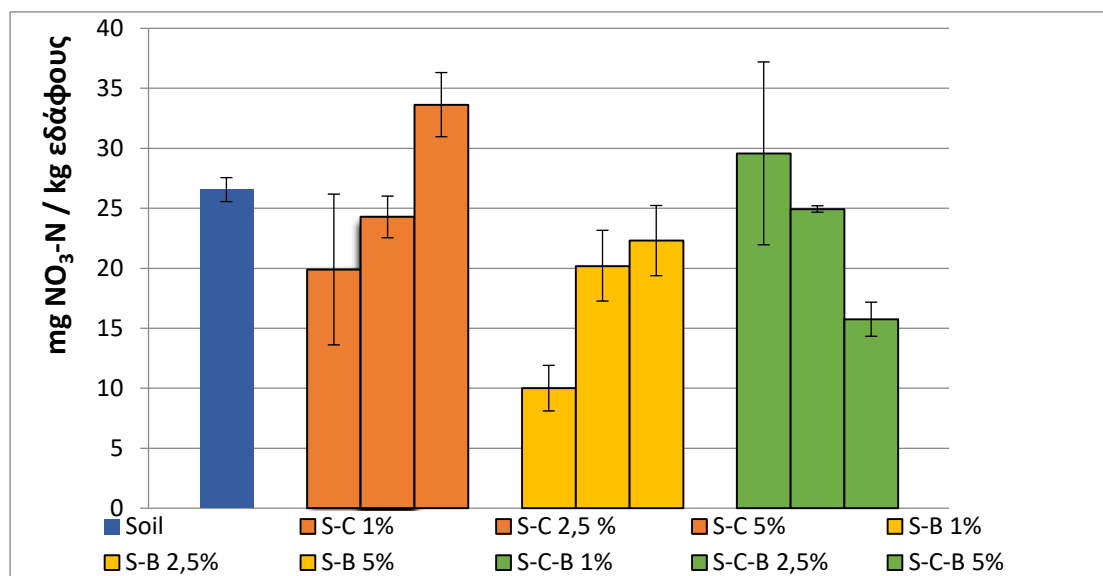
βρίσκεται σε μεγαλύτερες ποσότητες με την μορφή αμμωνιακού από ότι με την μορφή νιτρικού αζώτου. Παρακάτω στα Σχήματα 7 και 8, παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις αζώτου ανά κιλό εδάφους στην μορφή αμμωνιακού και νιτρικού.



Σχήμα 4.7: Αποτελέσματα Αμμωνιακού Αζώτου NH<sub>4</sub>-N σε όλες τις μεταχειρίσεις

Μέσω του Πίνακα 1 στο Κεφάλαιο 4.1.1, αναφέρθηκε ότι οι συγκεντρώσεις αμμωνιακού αζώτου στο χώμα πριν την φύτευση ήταν πολύ υψηλότερες, απ ότι στο Compost, ενώ το βιοεξανθράκωμα εμφάνιζε παρόμοιες τιμές. Και σε αυτά τα διαγράμματα παρατηρείται ότι η συγκέντρωση του μάρτυρα στα αμμωνιακά είναι αρκετά υψηλότερη από την πλειοψηφία των καλλιεργειών. Το βιοεξανθράκωμα πριν την φύτευση εμφάνισε επίσης υψηλή συγκέντρωση αμμωνιακού αζώτου. Οπότε είναι λογικό η καλλιέργεια του βιοεξανθρακώματος να εμφανίζει επίσης υψηλές συγκεντρώσεις.

Το Compost είναι ένα υλικό που ανάλογα με την ωριμότητα του διαφέρει ως προς τις συγκεντρώσεις των θρεπτικών του συστατικών. Όσο πιο ώριμο είναι το κομπόστ τόσο μικρότερη είναι η συγκέντρωση του ολικού αζώτου σε αυτό (Mangan et al., 2013). Στην συγκεκριμένη περίπτωση η καλλιέργεια κομπόστ εμφανίζει αρκετά χαμηλές συγκεντρώσεις αμμωνιακού αζώτου σε σχέση με τις υπόλοιπες καλλιέργειες, κάτι το οποίο φαίνεται να επηρεάζει και τον συνδυασμό **S-C-B**.



Σχήμα 4.8: Αποτελέσματα Νιτρικού Αζώτου NO<sub>3</sub>-N για όλες τις μεταχειρίσεις.

Μέσω των Σχημάτων 7 και 8 μπορεί να γίνει εύκολα κατανοητό, ότι το άζωτο ήταν διαθέσιμο σε υψηλότερες συγκεντρώσεις μέσω αμμωνιακού αζώτου. Οι συγκεντρώσεις νιτρικού αζώτου εμφανίζουν παρόμοια τάση με αυτή των αμμωνιακών εκτός από την περίπτωση του συνδυασμού S-C-B.

Σε έρευνα που ασχολήθηκε με την εφαρμογή κομπόστ και βιοεξανθρακώματος στην καλλιέργεια γκαζόν, ο συνδυασμός εμφάνισε τις υψηλότερες τιμές ενώ στην συνέχεια ακολουθούν οι μεταχειρίσεις που περιέχουν κομπόστ (Manolíkaki, 2018). Παρόμοια αποτελέσματα εμφανίζονται και στην συγκεκριμένη έρευνα.

Σημαντικό είναι να τονιστούν δύο ακόμη παράγοντες που επηρεάζουν τις τελικές συγκεντρώσεις του αμμωνιακού αζώτου, αλλά και των ενώσεων στις οποίες περιέχεται. Ο πρώτος παράγοντας είναι οι καιρικές συνθήκες. Σε περιπτώσεις, που οι καλλιέργειες γίνονται σε καλοκαιρινούς μήνες έχει παρατηρηθεί μείωση των συγκεντρώσεων του αμμωνιακού αζώτου. Κάτι τέτοιο μπορεί να επιβεβαιωθεί και από το Σχήμα 6, που οι συγκεντρώσεις του αμμωνιακού αζώτου είναι ιδιαίτερα χαμηλές (Doerge et al., 2000). Ο δεύτερος παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει τις συγκεντρώσεις αζώτου είναι αυτός του επεξεργασμένου υγρού αποβλήτου, που χρησιμοποιήθηκε για το πότισμα των καλλιεργειών. Το επεξεργασμένο υγρό απόβλητο είναι πλούσιο σε νιτρικά και αμμωνιακά, κάτι το οποίο εξηγεί τις πολύ υψηλές συγκεντρώσεις των αμμωνιακών στις μεταχειρίσεις.

#### 4.3.5 Προσδιορισμός Μετάλλων και Μεταλλοειδών

Στο Κεφάλαιο 4.1.2 έγινε προσδιορισμός των μετάλλων στο χώμα, το κομπόστ και το βιοεξανθράκωμα πριν την έναρξη της καλλιέργειας. Μέσω του παραπάνω Πίνακα έγινε αντιληπτό ότι ο μάρτυρας εμφανίζει πολύ χαμηλά θρεπτικά στοιχεία. Στον Πίνακα 4.8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετάλλων και μεταλλοειδών των εδαφικών δειγμάτων μετά το πέρας της καλλιέργειας.

Πίνακας 4.8: Προσδιορισμός Μετάλλων και Μεταλλοειδών για τα εδαφικά δείγματα της καλλιέργειας.

Μέταλλα /Μεταλλ οειδή	Soil	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%
Element Name	(mg Στοιχε ίου/kg εδάφο υς)	(mg Στοιχε ίου/kg εδάφο υς)	(mg Στοιχε ίου/kg εδάφο υς)	(mg Στοιχε ίου/kg εδάφο υς)	(mg Στοιχ είου/ kg εδάφ ους)	(mg Στοιχ είου/ kg εδάφ ους)	(mg Στοιχ είου/ kg εδάφ ους)	(mg Στοιχε ίου/kg εδάφο υς)	(mg Στοιχε ίου/kg εδάφο υς)	(mg Στοιχε ίου/kg εδάφο υς)
<b>B</b>	13,93 ± 9,66	15,4 ± 8,36	9,79 ± 1,8	13,02 ± 6,92	27,17 ± 8,09	15,03 ± 8,51	21,27 ± 2,22	13,66 ± 5,89	23,2 ± 2,49	9,24 ± 0,61
<b>Na</b>	960,15 ± 461,91	905,52 ± 230,54	673,83 ± 85,91	822,1 ± 420,26	1215 ,00 ± 176, 78	980,3 3 ± 338,9 6	1103, 34 ± 125,0 4	922,11 ± 268,62	1350,0 0 ± 156,21	864,54 ± 51,00
<b>Mg</b>	2663,4 3± 1062,2 9	3959,2 ± 1590,6 8	2606,9 4 ± 285,33	3394,4 8 ± 1319,5 0	5065, 00 ± 134,3 0	4037, 43 ± 2011, 82	5086, 67 ± 40,42	3320,6 7 ± 977,81	4096,6 7 ± 516,37	1777,4 5 ± 114,67
<b>Al</b>	28662, 67± 9457,9 8	37663, 5 ± 11327, 55	33774 ± 6236,6 9	35374, 67 ± 6601,4 2	51605 ,00 ± 5579, 08	37189 ± 10395 ,89	41436 ,67 ± 1126, 96	5620,2 9 ± 0,00	35193, 34 ± 2470,3 4	18478 ± 1298,5 6
<b>K</b>	3065,8 3 ± 1996,1 8	2994,4 6 ± 945,42	2555,7 3 ± 528,96	2985,2 7 ± 975,71	4445, 00 ± 346,4 9	3353, 22 ± 1423, 81	3910 ± 645,8 4	2716,9 3 ± 664,91	4383,3 4 ± 614,93	2106,2 6 ± 131,57
<b>Ca</b>	13415, 04 ± 6443,2 7	24229, 86 ± 6814,7 3	22720, 55 ± 320,01	19873, 16 ± 11233, 66	29765 ,00 ± 1675, 85	24267 ,35 ± 8361, 77	34806 ,67 ± 4535, 87	25722, 13 ± 7577,0 7	26476, 67 ± 2008,1 0	15641, 23 ± 1273,5 2
<b>Cr</b>	38,57 ± 22,56	49,15 ± 21,13	36,03 ± 4,95	44,2 ± 17,62	78,00 ± 7,53	48,55 ± 23,67	65,05 ± 2,61	39,78 ± 13,32	55,23 ± 7,07	21,42 ± 1,5
<b>Mn</b>	287,50 ± 212,57	526,74 ± 272,01	310,54 ± 24,13	441,1 ± 233,01	874,8, 00 ± 24,92	507,8 ± 322,2 5	771,0 9 ± 47,16	370,42 ± 167,05	454,85 ± 93,97	107,5 ± 8,43
<b>Fe</b>	17406, 12 ± 5573,7 2	18237, 48 ± 3369,9 8	16838, 66 ± 1567,3 4	17372, 94 ± 2393,7 1	22087 ,65 ± 2212, 26	18109 ,23 ± 4560, 78	20852 ,27 ± 1514, 82	15194, 00 ± 1879,1 5	18766, 54 ± 1905,6 8	10671, 63 ± 696,05
<b>Co</b>	4,48 ± 3,91	7,56 ± 5,03	3,55 ± 0,39	5,77 ± 4,17	11,84 ± 0,37	7,14 ± 5,743	11,39 ± 0,45	6,14 ± 3,45	8,45 ± 0,85	1,32 ± 0,18
<b>Ni</b>	23,58 ± 12,93	34,65 ± 15,31	23,5 ± 2,03	30,41 ± 12,78	51,36 ± 3,22	34,19 ± 18,76	47,53 ± 2,82	27,05 ± 9,73	35,59 ± 5,07	12,06 ± 1,03
<b>Cu</b>	18,66 ± 14,33	29,6 ± 17,28	17,9 ± 0,97	28,03 ± 18,7	50,67 ± 2,85	29,91 ± 20,07	55,84 ± 4,3	28,66 ± 12,70	45,38 ± 4,41	17,91 ± 1,46
<b>Zn</b>	38,26 ± 12,62	55,29 ± 14,01	47,16 ± 2,06	58,42 ± 19,16	80,59 ± 16,33	58,74 ± 21,04	82,98 ± 9,13	51,32 ± 13,52	71,95 ± 5,88	44,24 ± 2,77



<b>As</b>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<b>Se</b>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<b>Mo</b>	1,61 ± 0,32	--	0,72 ± 0,14	0,69 ± 0,34	0,79 ± 0,5	0,56 ± 0,38	--	0,92 ± 0,24	1,4 ± 0,26	1,46 ± 0,11
<b>Cd</b>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<b>Hg</b>	--	1,24 ± 0,99	--	9,56 ± 0,00	9,91 ± 0,73	8,95 ± 0,00	9,22 ± 0,7	10,15 ± 0,24	9,82 ± 1,26	--
<b>Pb</b>	24,31 ± 15,81	28,92 ± 14,69	16,72 ± 0,33	24,13 ± 15,04	42,64 ± 1,46	26,89 ± 18,02	46,25 ± 2,12	30,28 ± 13,65	44,31 ± 1,7	16,35 ± 1,47

Στον συγκεκριμένο πίνακα τα αποτελέσματα διαφέρουν από εκείνα των φυτικών ιστών. Τα μακροθρεπτικά στοιχεία βρίσκονται σε αρκετά χαμηλότερες ποσότητες από αυτές των φυτικών ιστών και των αρχικών δειγμάτων. Ωστόσο αποτελεί λογική εξήγηση, διότι το μεγαλύτερο μέρος των θρεπτικών έχει απορροφηθεί από τα φυτά. Παρατηρείται επίσης ότι οι συγκεντρώσεις μικροθρεπτικών στοιχείων και βαρέων μετάλλων έχουν αυξηθεί. Ωστόσο λόγω της ικανότητας του ριζικού συστήματος των μαρουλιών να μην τα απορροφούν, έχουν απλά συσσωρευτεί στο χώμα. Τέλος πρέπει να γίνει μια αναφορά στην περίπτωση του αργιλίου (Al). Το αργίλιο βρίσκεται σε ιδιαίτερα υψηλές συγκεντρώσεις. Για να αποτελέσει πρόβλημα θα έπρεπε το pH των εδαφικών δειγμάτων να ήταν κάτω από 4,5, όπου σε αυτήν την περίπτωση θα ήταν και για τους φυτικούς ιστούς, αλλά και για την υγεία του ανθρώπου. Στην συγκεκριμένη έρευνα το pH των δειγμάτων δεν έπεσε κάτω από 6, οπότε θεωρούμε ότι δεν υπάρχει κίνδυνος να ελευθερώσει τις τοξικές του ιδιότητες (Gazey, Azam, 2018). Η μεταχείριση του βιοεξανθρακώματος και του κομπόστ εμφανίζει υψηλότερες συγκεντρώσεις και σε μακροθρεπτικά και σε μικροθρεπτικά στοιχεία. Αυτό αποτελεί ένα λογικό συμπέρασμα, λόγω της υψηλής κατιοντοανταλλακτικής ικανότητας που έχουν τα δύο εδαφοβελτιωτικά υλικά. Στην πλειοψηφία των μεταχειρίσεων παρατηρείται η θετική επίδραση των εδαφοβελτιωτικών στο χώμα. Η μεταχείριση που περιείχε τον συνδυασμό των δύο εδαφοβελτιωτικών φαίνεται να επηρέασε αρνητικά τις μεταχειρίσεις, αφού εμφανίζει μικρότερες συγκεντρώσεις από αυτές του μάρτυρα. Εξαίρεση αποτελεί η καλλιέργεια S-C-B 2,5% που φαίνεται να έχει επιδράσει καλύτερα από όλες τις μεταχειρίσεις.

Ωστόσο, όπως και στην περίπτωση των φυτικών ιστών, έτσι και στην περίπτωση των χωμάτων έχουν τεθεί κάποια όρια όσων αφορά τις συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων και των μικροθρεπτικών στοιχείων. Ο λόγος που δίνονται τα παρακάτω όρια, είναι διότι σε περιπτώσεις που το pH του εδάφους είναι αρκετά πιο όξινο ή βασικό, τα βαρέα μέταλλα απελευθερώνουν τις τοξικές τους ιδιότητες. Στον Πίνακα 9 Παρουσιάζονται τα παρακάτω όρια, που έχει θέσει ο παγκόσμιος οργανισμός υγείας (WHO, 1996) :

Πίνακας 4.9: Επιτρεπτά όρια βαρέων μετάλλων και μικροθρεπτικών στοιχείων του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (WHO)

Στοιχεία	Επιτρεπτές τιμές για το έδαφος (mg/kg)
<b>Cd</b>	<b>0,8</b>
<b>Zn</b>	<b>50</b>
<b>Cu</b>	<b>36</b>

<b>Cr</b>	<b>100</b>
<b>Pb</b>	<b>85</b>
<b>Ni</b>	<b>35</b>

Αν γίνει σύγκριση των δύο Πινάκων, παρατηρεί κανείς ότι η πλειοψηφία των δειγμάτων μας βρίσκεται εντός των επιτρεπτών ορίων. Εξαιρέσεις αποτελούν κάποιες μεταχειρίσεις, όπως αυτή του S-C-B 2,5% στην περίπτωση του χαλκού (Cu).

## Ισοζύγια

Τέλος είναι πολύ σημαντικό να γίνει μια σύγκριση των αποτελεσμάτων των εδαφών με τα αποτελέσματα, που προέκυψαν στους φυτικούς ιστούς. Η διαδικασία για να υπολογίσουμε με ακρίβεια τα ποσοστά των στοιχείων, που απορροφήθηκαν από τους φυτικούς ιστούς, είναι μέσω ενός ισοζυγίου. Το ισοζύγιο αποτελείται από 3 μεταβλητές.

Τα ισοζύγια που παρουσιάζονται παρακάτω, χωρίζονται στις τιμές εισόδου και εξόδου. Στις τιμές εισόδου ανήκουν οι συγκεντρώσεις Ολικού Φωσφόρου, Αμμωνιακού και Νιτρικού αζώτου για το χώμα, το κομπόστ και το βιοεξανθράκωμα πριν την έναρξη της καλλιέργειας και συμβολίζονται ως  $C_{S,O}$ ,  $C_{C,O}$ ,  $C_{B,O}$ . Η συγκεκριμένη παράμετρος πολλαπλασιάζεται με την ποσότητα των παραπάνω εδαφικών δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκε σε κάθε καλλιέργεια. Παράμετρο αποτελεί επίσης και η τελική ποσότητα λύματος που χρησιμοποιήθηκε στις 40 μέρες που διήρκεσε το πείραμα και συμβολίζεται ως  $C_W$  (Απαιτούνταν 180 ml ημερησίως για το πότισμα της κάθε μεταχείρισης). Από την άλλη πλευρά στις τιμές εξόδου ανήκουν οι συγκεντρώσεις P,  $NH_4-N$ ,  $NO_3-N$ , που μετρήθηκαν μετά το πέρας της πειραματικής διαδικασίας. Οι συγκεντρώσεις χωρίζονται σε αυτές των εδαφικών δειγμάτων, αλλά και στις συγκεντρώσεις που μετρήθηκαν στους φυτικούς ιστούς, που συμβολίζονται ως  $C_{pl}$ . Η συγκέντρωση των φυτικών ιστών είναι πολλαπλασιασμένη με το ξηρό βάρος του φυτικού ιστού, οπότε εξαρτάται μόνο από την μάζα του. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα παράδειγμα για τον υπολογισμό του ολικού φωσφόρου.

### Για τον μάρτυρα το ισοζύγιο φωσφόρου θα λειτουργούσε ως εξής:

$$mg P_{in} = C_{S,O} * 0,5 \text{ kg} + C_W * 180ml * 40(\text{μέρες ποτίσματος}) = \left( 30,30 \frac{mg P}{kg \text{ εδάφους}} * 0,5 \text{ kg εδάφους} + 1,59 \text{ mg PL} \right) * 40 = 26,45 \text{ mg P}$$

$$mg P_{final} = C_{soil,out} * 0,5 \text{ kg} + C_{pl} = \left( 20,91 \frac{mg P}{kg \text{ εδάφους}} * 0,5 \text{ kg εδάφους} \right) + 3,1 \text{ mg P} = 13,55 \text{ mg P}$$

### Για την μεταχείριση του S-C ισχύει ότι :

#### Για το S-C 1%

$$mg P_{in} = C_{S,O} * 0,495 \text{ kg} + C_{C,O} * 0,005 \text{ kg} + C_W * 180ml * 40$$

$$mg P_{final} = C_{S-C1\%} * 0,5 \text{ kg} + C_{pl}$$

#### Για το S-C 2,5%

$$mg P_{in} = C_{S,O} * 0,4875 \text{ kg} + C_{C,O} * 0,0125 \text{ kg} + C_W * 180ml * 40$$

$$mg P_{final} = C_{s-c2,5\%} * 0,5 \text{ kg} + C_{pl}$$

Για το S-C 5%

$$mg P_{in} = C_{S,O} * 0,475 \text{ kg} + C_{C,O} * 0,025 \text{ kg} + C_W * 180 \text{ ml} * 40$$

$$mg P_{final} = C_{s-c5\%} * 0,5 \text{ kg} + C_{pl} =$$

**Για την μεταχείριση S-B:**

Για το S-B 1%

$$mg P_{in} = C_{S,O} * 0,495 \text{ kg} + C_{B,O} * 0,005 \text{ kg} + C_W * 180 \text{ ml} * 40$$

$$mg P_{final} = C_{s-b1\%} * 0,5 \text{ kg} + C_{pl}$$

Για το S-B 2,5%

$$mg P_{in} = C_{S,O} * 0,4875 \text{ kg} + C_{B,O} * 0,0125 \text{ kg} + C_W * 180 \text{ ml} * 40$$

$$mg P_{final} = C_{s-b2,5\%} * 0,5 \text{ kg} + C_{pl}$$

Για το S-B 5%

$$mg P_{in} = C_{S,O} * 0,475 \text{ kg} + C_{B,O} * 0,025 \text{ kg} + C_W * 180 \text{ ml} * 40$$

$$mg P_{final} = C_{s-b5\%} * 0,5 \text{ kg} + C_{pl}$$

**Για την μεταχείριση S-C-B:**

Για το S-C-B 1%

$$mg P_{in} = C_{S,O} * 0,495 \text{ kg} + C_{B,O} * 0,0025 \text{ kg} + C_{C,O} * 0,0025 \text{ kg} + C_W * 180 \text{ ml} * 40$$

$$mg P_{final} = C_{s-c-b1\%} * 0,5 \text{ kg} + C_{pl}$$

Για το S-C-B 2,5%

$$mg P_{in} = C_{S,O} * 0,4875 \text{ kg} + C_{B,O} * 0,00625 \text{ kg} + C_{C,O} * 0,00625 \text{ kg} + C_W * 180 \text{ ml} * 40 \text{ mg P}$$

$$mg P_{final} = C_{s-c-b2,5\%} * 0,5 \text{ kg} + C_{pl}$$

Για το S-C-B 5%

$$mg P_{in} = C_{S,O} * 0,475 \text{ kg} + C_{B,O} * 0,0125 \text{ kg} + C_{C,O} * 0,0125 \text{ kg} + C_W * 180 \text{ ml} * 40$$

$$mg P_{final} = C_{s-c-b5\%} * 0,5 \text{ kg} + C_{pl}$$

Αντίστοιχα Ισοζύγια γίνονται για το Αμμωνιακό και Νιτρικό Άζωτο. Οι τελικές τιμές που παρουσιάζονται στον Πίνακα 10, έχουν προκύψει από τον μέσο όρο των τεσσάρων γλαστρών που ανήκουν στην κάθε μεταχείριση.

Πίνακας 4.10: Αποτελέσματα ισοζυγίων εισόδου και εξόδου, όσον αφορά στον φώσφορο P, στο νιτρικό άζωτο (NO<sub>3</sub>-N) και στο αμμωνιακό άζωτο (NH<sub>4</sub>-N)

Δείγματα	C <sub>in</sub> NH <sub>4</sub> -N	C <sub>out</sub> NH <sub>4</sub> -N	C <sub>in</sub> NO <sub>3</sub> -N	C <sub>out</sub> NO <sub>3</sub> -N	C <sub>in</sub> P	C <sub>out</sub> P
Soil	63,85	39,61	51,56	7,17	26,45	6,54
S-C 1%	64,15	50,17	51,93	9,64	26,62	8,73

<b>S-C 2,5%</b>	64,07	44,31	52,47	11,61	26,66	10,69
<b>S-C 5%</b>	63,93	26,81	53,39	11,64	26,71	10,24
<b>S-B 1%</b>	64,32	50,86	51,71	33,25	27,41	3,02
<b>S-B 2,5%</b>	65,03	17,34	52,05	10,93	28,63	8,96
<b>S-B 5%</b>	64,79	56,32	52,31	7,35	30,66	12,76
<b>S-C-B 1%</b>	64,23	56,33	51,71	12,98	27,02	9,29
<b>S-C-B 2,5%</b>	64,28	15,24	52,05	10,39	27,64	16,55
<b>S-C-B 5%</b>	64,36	49,67	52,31	5,92	28,69	27,84

Προκειμένου να εξηγηθούν τα αποτελέσματα του Πίνακα 6 είναι σημαντικό να γνωρίζει κανείς, ποιες διεργασίες συμβαίνουν κατά τον κύκλο του αζώτου και του φωσφόρου. Ο κύκλος του αζώτου αποτελείται από πέντε στάδια (Aczel Miriam R., 2019):

1. Σταθεροποίηση του Αζώτου
2. Αμμωνιοποίηση
3. Νιτροποίηση
4. Ακινητοποίηση
5. Απονιτροποίηση

Επίσης είναι πολύ σημαντικό να τονιστεί, ότι το άζωτο μεταφέρεται από το χώμα στους κορμούς με την βοήθεια μικροοργανισμών. Οπότε αρχικά γίνεται εύκολα κατανοητό, για ποιον λόγο η είσοδος του ισοζυγίου εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές από την έξοδο. Οι μικροοργανισμοί που υπάρχουν στο χώμα μπορούν να μεταφέρουν πολύ συγκεκριμένες ποσότητες αζώτου.

Μέσω του σταδίου της αμμωνιοποίησης η αμμωνία ( $\text{NH}_3$ ) αντιδρά με το νερό μετατρέπεται σε αμμώνιο ( $\text{NH}_4$ ), το οποίο συγκρατείται από το έδαφος και είναι διαθέσιμο να προσληφθεί από τους κορμούς. Αυτό εξηγεί στην παρούσα διπλωματική εργασία για ποιον λόγο οι ποσότητες του αμμωνιακού αζώτου αρχικά και τελικά είναι υψηλότερες από τις ποσότητες του νιτρικού αζώτου.

Στο στάδιο της νιτροποίησης που συμβαίνει στο έδαφος, η αμμωνία μετατρέπεται αρχικά σε νιτρώδη ( $\text{NO}_2$ ) και τελικώς σε Νιτρικά ( $\text{NO}_3$ ). Ωστόσο μόνο τα νιτρικά μπορούν να απορροφηθούν από το φυτά. Μέσω των αποτελεσμάτων μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι ποσότητες νιτρικού αζώτου στο χώμα είναι αρκετά υψηλές, ωστόσο στην έξοδο του ισοζυγίου οι ποσότητες αζώτου που προέρχονται από το νιτρικό άλας είναι αρκετά μικρότερες. Ο λόγος που παρατηρείται αυτή η μεγάλη διαφορά είναι λόγω του σταδίου της απονιτροποίησης. Κατά την απονιτροποίηση τα νιτρικά άλατα μετατρέπονται σε ατμοσφαιρικό άζωτο ( $\text{N}_2$ ) μέσω βακτηρίων, που απελευθερώνεται σε ατμόσφαιρα.

Ο φώσφορος βρίσκεται σε διάφορες μορφές στο έδαφος με την κυριότερη να είναι αυτή του φωσφορικού ιόντος ( $\text{PO}_4^{3-}$ ). Το φωσφορικό ιόν βρίσκεται μέσα στο νερό, στο έδαφος και σε ιζήματα. Μεγάλο μέρος του φωσφόρου δεν είναι διαθέσιμο, λόγω του ότι είναι κλειδωμένο στα ιζήματα και σε πετρώματα (Slocumbe S. P., 2020). Αυτό εξηγεί τα αποτελέσματα του Πίνακα 6, όπου ο φώσφορος εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές στην είσοδο από ότι στην έξοδο σε όλες τις μεταχειρίσεις. Ένας ακόμη λόγος που υπάρχει αυτή η διαφορά μεταξύ εισόδου-εξόδου είναι ότι υπάρχουν βακτήρια

που μετατρέπουν τα διαθέσιμα φωσφορικά σε μορφές που δεν μπορούν να προσληφθούν από τα φυτά.

## Συμπεράσματα

Η βιομάζα που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή βιοεξανθρακώματος, είναι το κομπόστ που χρησιμοποιήθηκε στην καλλιέργεια. Το κομπόστ αυτό, αποτελεί εμπορικό προϊόν (κατάλληλο για καλλιέργειες), που σημαίνει ότι είναι αρκετά σταθερό και δεν χρήζει βελτίωσης. Επίσης επιβεβαιώθηκε ότι ο χρόνος παραμονής μετά τις 2 ώρες δεν αυξάνει σημαντικά την απόδοση του βιοεξανθρακώματος, αφού οι συγκεντρώσεις άνθρακα και στην βιομάζα και στο βιοεξανθράκωμα αποδείχτηκαν σχεδόν ίδιες. Παρόμοιες τιμές εμφανίστηκαν και στο pH και στην κατιοντοανταλλακτική. Επίσης προκύπτει το συμπέρασμα, ότι το βιοεξανθράκωμα δεν έχει αποδώσει και αυτό οφείλεται στην βιομάζα που χρησιμοποιήθηκε καθώς και στο χρονικό διάστημα της καλλιέργειας (40 μέρες. Συγκεκριμένα το κομπόστ και το βιοεξανθράκωμα χρησιμοποιήθηκαν σε διάφορες αναλογίες. Μέσω όλων των παραπάνω σχημάτων, παρατηρείται ότι η καλλιέργεια του S-C 1%, 2,5% και 5% καθώς και ο μάρτυρας εμφανίζουν τα πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα. Οι μεταχειρίσεις του S-B 1%, 2,5% και 5% και του συνδυασμού S-C-B 1%, 2,5% και 5% εμφάνισαν πολύ χαμηλά ποσοστά και Ολικού Αζώτου (TN) καθώς και Διαθέσιμου Φωσφόρου Olsen-P. Ωστόσο είναι σημαντικό να τονιστεί ότι λόγω των καιρικών συνθηκών (Ιούνιο- Αύγουστο) και διάρκειας της πειραματικής διαδικασίας, είναι λογικό να μην παρατηρούνται αυξημένες συγκεντρώσεις Αζώτου και Φωσφόρου. Πολλές έρευνες, που ασχολούνται με την καλλιέργεια λαχανικών, δίνουν περιθώριο τουλάχιστον ένα χρόνο για να παρατηρηθεί η απόδοση του βιοεξανθρακώματος. Ωστόσο η καλλιέργεια μαρουλιών δεν μπορεί να διαρκέσει τόσο. Ένας ακόμη παράγοντας που επηρέασε το σύνολο της καλλιέργειας ήταν το επεξεργασμένο υγρό απόβλητο, που χρησιμοποιήθηκε ως μέσο ποτίσματος. Το λύμα προέρχεται από δευτεροβάθμια χλωριωμένη εκροή. Η συνεισφορά του λύματος ήταν ιδιαίτερα σημαντική, αφού εμπλούτισε τα εδαφικά δείγματα της καλλιέργειας με ενώσεις αζώτου και φωσφόρου, που όπως φάνηκε το χώμα της καλλιέργειας είχε σε χαμηλά ποσοστά. Ωστόσο μέσω των σχημάτων παρατηρήθηκε, πως μεγάλο ποσοστό των συγκεντρώσεων αζώτου φωσφόρου είχαν συσσωρευτεί στο χώμα. Οι λόγοι που συνέβη αυτό είναι δύο. Ο πρώτος λόγος είναι το ριζικό σύστημα των ίδιων των μαρουλιών, που είναι πολύ λεπτό, με αποτέλεσμα να μην επιτρέπει την είσοδο μεγάλων συγκεντρώσεων στους κορμούς. Ο δεύτερος λόγος είναι η μικρή χρονική διάρκεια του πειράματος, με αποτέλεσμα τα εδαφοβελτιωτικά να μην καταφέρουν αποδώσουν στο μέγιστο σημείο. Ο σημαντικότερος στόχος της συγκεκριμένης εργασίας είναι να αποδείξει αν κάτω από τις συγκεκριμένες συνθήκες, το μαρούλι είναι βρώσιμο. Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (WHO) έχει θέσει κάποια όρια, όσων αφορά κάποια βαρέα μέταλλα και μικροθρεπτικά στοιχεία καθώς και για τις συγκεντρώσεις των νιτρικών στο βρώσιμο μέρος των μαρουλιών που είναι οι φυτικοί ιστοί (σε συνθήκες μολυσμένου εδάφους). Παρόμοια όρια έχουν δοθεί και για τις συγκεντρώσεις στο έδαφος. Και οι δύο κατηγορίες, στην πλειοψηφία τους, βρίσκονται εντός ορίων, που σημαίνει ότι τα μαρούλια είναι βρώσιμα. Το αποτέλεσμα αυτό είναι αξιοσημείωτο για δύο λόγους. Ο πρώτος λόγος είναι ότι το επεξεργασμένο λύμα αποδεικνύεται ως ένας οικονομικός και οικολογικός τρόπος ποτίσματος των καλλιεργειών για τους γεωργούς και χωρίς να υπερβαίνει τα επιτρεπτά όρια των

μετάλλων και μεταλλοειδών που μπορούν να προκαλέσουν πρόβλημα στην ανθρώπινη υγεία.

## Ιδέες για Μελλοντική Έρευνα

Όπως παρατηρήθηκε μέσω της έρευνας, για την ολοκλήρωση της συγκεκριμένης εργασίας, η χρήση εδαφοβελτιωτικών είναι κεντρικό θέμα ενδιαφέροντος. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, έγινε προσπάθεια παραγωγής βιοεξανθρακώματος από κομπόστ. Οι προσπάθειες για παραγωγή βιοεξανθρακωμάτων θα μπορούσαν να επεκταθούν με τις παρακάτω προτάσεις:

- Παραγωγή βιοεξανθρακώματος από ιατρικά απόβλητα. Στην περίοδο που ζούμε υπάρχει ραγδαία αύξηση των ιατρικών αποβλήτων λόγω της πανδημίας. Με κατάλληλο διαχωρισμό των ιατρικών αποβλήτων (λόγω του ότι ένα μέρος τους είναι ραδιενεργό) θα ήταν εφικτή η παραγωγή βιοεξανθρακώματος από αυτά. Επίσης θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί περαιτέρω έρευνα για την παραγωγή βιοεξανθρακώματος από ηλεκτρονικά απόβλητα.
- Μελέτη γύρω από την ενίσχυση των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων του κομπόστ και του βιοεξανθρακώματος, καθώς και περαιτέρω έρευνα για την δημιουργία βιοεξανθρακώματος από κομπόστ.
- Παραγωγή βιοεξανθρακώματος από άλλα οργανικά απόβλητα, όπως πράσινα απόβλητα (π.χ φυτικά, κλαδέματα).
- Εμποτισμό των εδαφικών δειγμάτων στις καλλιέργειες με βαρέα μέταλλα, ώστε να παρατηρηθεί, πως επηρεάζεται η ανάπτυξη των φυτών.

## Βιβλιογραφία

### Ελληνική Βιβλιογραφία

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

Γιαννουλιά Στεφανία, 2020. «Τροποποίηση ροφητικών υλικών με τεχνολογία ψυχρού πλάσματος και ακινητοποίηση βιομάζας και αξιολόγησή τους για την απομάκρυνση χρωστικών από υδατικά διαλύματα». Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πάτρας.

ΔΕΔΙΣΑ, 2017. «Κομποστοποίηση».

Ηλιόπουλος Χρήστος, 2008. «Μελέτη των επίπεδων διαθέσιμου φώσφορου σε γεωργικά εδάφη της περιοχής Αλμυρού Ν. Μαγνησίας. Απεικόνιση της χωρικής παραλλακτικότητας του στοιχείου αυτού σε επιλεγμένες περιοχές της μελέτης». Προπτυχιακή Διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Καλαβρουζιώτης Ιωάννης , Κουκουλάκης Πρόδρομος , Francisco Pedrero, Juan Jose Alarcon, , Takashi Asano, 2010. «Use of treated municipal wastewater in

irrigated agriculture—Review of some practices in Spain and Greece». Science Direct, 1234.

Μουργελά Ραφαήλα-Νίκολα, 2018. « Προσρόφηση Ni (II) σε βιοεξανθρακώματα (biochars) διαφορετικών ειδών βιομάζας». Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης.

Ξούρα Τριανταφυλλιά, 2009. «Σύγκριση μεθόδων προσδιορισμού φωσφορικών ιόντων και αφομοιώσιμου φωσφόρου (με την μέθοδο OLSEN). Απεικόνιση της ρύπανσης στην περιοχή του Αλμυρού Ν. Μαγνησίας, με χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών». Προπτυχιακή Διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Παντελάκης Δημήτριος Γ., 2020. «Φυσικές και Μηχανικές Ιδιότητες των Εδαφών». Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας.

Ρεγγούζας Παναγιώτης, 2015. «Παραγωγή βιο-εξανθρακώματος απο το οργανικό κλάσμα των απορριμμάτων και παραγωγή για αγρονομικές εφαρμογές». Διπλωματική Εργασία , Πολυτεχνείο Κρήτης.

<http://www.instruments.gr/el/>

## Διεθνής Βιβλιογραφία

Aczel, M. R. (2019). What is the nitrogen cycle and why is it key to life?. Article, frontiersin.

Agnieszka Tomczyk, Zofia Sokolowska and Patrycja Boguta, 2020. «Biochar physicochemical properties: Pyrolysis temperature and feedstock kind effects». Paper Review, Springer Link, 191-215.

Alberto Palma\* Víctor M., Doña-Grimaldi Mercedes, Ruiz-Montoya, Inmaculada Giráldez, Juan Carlos García, Javier Mauricio Loaiza, Francisco López and Manuel J. Díaz, 2020. «MSW Compost Valorization by Pyrolysis: Influence of Composting Process Parameters». Article, ACS Publications, 20810-20816.

Ana Uroic Stefanko, Danuta Leszczynska, 2020. «Impact of Biomass Source and Pyrolysis Parameters on Physicochemical Properties of Biochar Manufactured for Innovative Applications». Article, Frontiers.

Andrew Cross, Saran P. Sohi, 2011. «The priming potential of biochar products in relation to labile carbon contents and soil organic matter status». Article, Science Direct, Volume 43.

Aranzazu Moreno, Alberto Fereres, 2012. «Advances in Virus Research, Chapter 7 - Virus Diseases in Lettuce in the Mediterranean Basin». Article, ResearchGate, Volume 30, 94-97.

Arifa Malik , Shamim Gul, Muhammad Hanan Buriro , Hidayatullah Kakar , Tariq Ziad, 2022. Particle size of biochar as co-composted fertilizer: Influence on growth performance of lettuce and concentration of bioavailable soil nutrients under salinity stress conditions.

Arshad, M.A., Lowery, B. and Grossman. B., 1996. «Physical Tests for Monitoring Soil Quality. In: Doran, J.W. and Jones, A.J., Eds., Methods for Assessing Soil Quality». Article, Soil Science Society of America Special Publication 49, SSSA, Madison, WI, 123-142.

Aruna Olasekan Adekiya, Taiwo Michael Agbede, Adeniyi Olayanju, Wutem Sunny Ejue, Timothy A, Adenkanye, Titilayo Tolulope Adensui and Jerry Femi Ayeni, 2020. «Effect of Biochar on Soil Properties, Soil Loss, and Cocoyam Yield on a Tropical Sandy Loam Alfisol». Article, Hindawi, Volume 2020.

Aya Zoghalmi and Gabriel Paes, 2019. «Lignocellulosic Biomass: Understanding Recalcitrance and Predicting Hydrolysis». Article, Frontiers.

Boguta Patrycja, Sokolowska Zofia, Skic Kamil, Tomczyk Agnieszka, 2019. «Chemically engineered Biochar-Effect of concentration and type of modifier on sorption and structural properties of Biochar from wood waste». Journal, Research Gate, Volume 257.

Brieuc Hardy, Steven Sleutel, Joseph E. Dufey and Jean-Thomas Cornelis, 2019. «The Long-Term Effect of Biochar on Soil Microbial Abundance, Activity and Community Structure Is Overwritten by Land Management ». Article, Frontiers.

Bruno Caio Chaves Fernandes, Kassio Ferreira Mendes , Ananias Francisco Dias Júnior, Vinícius Patrício da Silva Caldeira, Taliane Maria da Silva Teófilo, Tatiane Severo Silva, Vander Mendonça, Matheus de Freitas Souza and Daniel Valadão Silva, 2020. «Impact of Pyrolysis Temperature on the Properties of Eucalyptus Wood-Derived Biochar». Article, MDPI.

Chip Appel, 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.

Chowdhury Zaira Zaman, Kaushik Pal, Wageeh A. Yehye, Suresh Sagadevan, Syed Tawab Shah, Ganiyu Abimbola Adebisi, Emy Marlina, Rahman Faijur Rafique and Rafie Bin Johan, 2017. Pyrolysis: «A Sustainable Way to Generate Energy from Waste, Chapter Metrics Overview». Chapter from Book Pyrolysis, Research Gate, 1-6.

Cross, A. and Sohi, S.P., 2011. «The Priming Potential of Biochar Products in Relation to Labile Carbon Contents and Soil Organic Matter Status». Soil Biology and Biochemistry, Scientific Research, 2127-2134.

Dalila Trupiano, Claudia Cocozza, Silvia Baronti, Carla Amendola, Francesco Primo Vaccari, Giuseppe Lustrato, Sara Di Lonardo, Francesca Fantasma, Roberto Tognetti, and Gabriella Stefania Scippa, 2017. «The Effects of Biochar and Its Combination with Compost on Lettuce (*Lactuca sativa* L.) Growth, Soil Properties, and Soil Microbial Activity and Abundance». Research Article, Hindawi, Volume 2017.

Desta Woldetsadik, Pay Drechsel, Bernd Marschner, Fisseha Itanna and Heluf Gebrekidan, 2018. «Effect of biochar derived from faecal matter on yield and nutrient content of lettuce (*Lactuca sativa*) in two contrasting soils». Research, Springer Open.



Deogratus Luyima, Michael Egyir, Yeo-Uk Yun, Seong-Jin Park 3 and Taek-Keun Oh, 2021. «Nutrient Dynamics in Sandy Soil and Leaf Lettuce Following the Application of Urea and Urea-Hydrogen Peroxide Impregnated Co-Pyrolyzed Animal Manure and Bone Meal». Article, MDPI.

Dominik Weber Sven Knaak, Kay Hettrich, Mindaugas Andrulis, Frank Momburg, Mandy Quade, Michael Gelinsky, Richard Schartz-Albiez, 2018. «Influence of Regioselectively Sulfated Cellulose on in Vitro Vascularization of Biomimetic Bone Matrices». Article, ACS Publications, 4228-4238.

Dobrowolski Edward G., 2008. «Assessment of water quality changes resulting from municipal sewer installation in the Killbuck-Mud Creek Watershed, Indiana». Thesis, Ball State University.

Dr. Clint Waltz, Edward Ayers, Dr Frank Sikora, Dr Robert Miller, 2017. «Cation Exchange Capacity and Base Saturation». Article, University of Georgia Extension.

Edmund Kyei Akoto-Danso, Delphine Manka'abusi, Christoph Steiner, Steffen Werner, Volker Haering, George Nyarko, Bernd Marschner, Pay Drechsel, Andreas Buerkert. «Agronomic effects of Biochar and wastewater irrigation in urban crop production of Tamale, northern Ghana». Article, CGSpace, 115:231–247.

Eissa, M. A., & Negim, O. E. (2018). Heavy metals uptake and translocation by lettuce and spinach grown on a metal-contaminated soil. *Journal of soil science and plant nutrition*, 18(4), 1097-1107.

EPA, 2021. «Types Of Composting and Understanding the Process». Article, United States Environmental Protection Agency.

Florian Amlinger, Bettina Gotz, Peter Dreher, Jutta Geszti, Christof Weissteiner, 2003. «Nitrogen in biowaste and yard waste compost: dynamics of mobilization and availability- a review». Article, Elsevier, 107-116.

Francisco Pedrero, Ioannis Kalavrouziotis, Juan Jose Alarcon, Prodromos Koukoulakis, Takashi Asano, 2010. «Use of treated municipal wastewater in irrigated agriculture—Review of some practices in Spain and Greece». Article, Science Direct, 1233-1241.

Frank Mangan, Allen Barker, Steven Bodine and Peter Borten, 2013. «Compost use and Soil Fertility». Article, University of Massachusetts Extension.

Grant Cardon, 2020. «What is Biochar». Article, Utah State University.

Hardeep Singh, Bruce Dunn, 2017. «Electrical Conductivity and pH Guide for Hydroponics». Article, Oklahoma State University.

<https://wqa.org/>

Jagaba, A. H., Kutty, S. R. M., Hayder, G., Baloo, L., Noor, A., Yaro, N. S. A., ... & Usman, A. K. (2021). A systematic literature review on waste-to-resource potential of palm oil clinker for sustainable engineering and environmental applications. *Materials*, 14(16), 4456.

J.D Pagliuso, 2010. «Advanced Direct Injection Combustion Engine Technologies and Development». Chapter 9 Biofuels for spark-ignition engines, Science Direct, 229-259.

Julia Kruyeniski, Paulo J.Y. Ferreira, Maria da Graca Videira Sousa Carvalho, Maria E. Vallejos, Fernando E. Fellisia, Maria C. Area, 2019. «Physical and chemical characteristics of pretreated slash pine sawdust influence its enzymatic hydrolysis». Article, Science Direct, Volume 130, 528-536.

Kammann, C. I., Linsel, S., Gößling, J. W., & Koyro, H. W. (2011). Influence of biochar on drought tolerance of *Chenopodium quinoa* Willd and on soil-plant relations. *Plant and soil*, 345(1), 195-210.

Kayode S. Are, 2019. «Biochar and Soil Physical Health». Article, Chapter Metrics Overview.

K. Grice, C. Eiserbeck, 2012. « Treatise on Geochemistry (Second Edition)». Article, Sscience Direct, Volume 12, 47-78.

Kim, K. H., Kim, J. Y., Cho, T. S., & Choi, J. W. (2012). Influence of pyrolysis temperature on physicochemical properties of biochar obtained from the fast pyrolysis of pitch pine (*Pinus rigida*). *Bioresource technology*, 118, 158-162.

Langrand, J., Médernach, C., Schmitt, C., Blanc-Brisset, I., Villa, A. F., de Haro, L., & Garnier, R. (2015). Intoxications par pignons d'Inde (*Jatropha curcas*): 24 observations rapportées aux centres antipoison de Paris et Marseille. *Bulletin de la Société de pathologie exotique*, 108(2), 139-143.

Lee, E., Rout, P. R., & Bae, J. (2021). The applicability of anaerobically treated domestic wastewater as a nutrient medium in hydroponic lettuce cultivation: Nitrogen toxicity and health risk assessment. *Science of the Total Environment*, 780, 146482.

Leiyu Feng, Jingyang Luo and Yinguang Chen, 2015. «Dilemma of Seage Sludge Treatment and Disposal in China». Article, ACS Publications, 4781-4782.

Lei Wang, Liang Chen, Daniel C.W Tsang, Binglin Guo, Jian Yang, Zhengtao Shen, Deyi Hou, Yong Sik Ok, Chi Sun Poon, 2020. «Biochar as green additives in cement-based composites with carbon dioxide curing». Article, Elsevier, Volume 258.

Li Li, Jack S. Rowbotham, H. Christopher Greenwell, Phillip W. Dyer, 2013. «An Introduction to Pyrolysis and Catalytic Pyrolysis: Versatile Techniques for Biomass Conversion». Article, Science Direct, 173-208.

Lorena Avidano, Elisa Gamlero, Gian Paolo Coss, Elisabetta Carraro, 2005. «Charecterization of Soil Health in an Italian Polluted Site by Using Microorganisms as Bioindicators». Article, ResearchGate.

Manasa, M. R. K., Katukuri, N. R., Nair, S. S. D., Haojie, Y., Yang, Z., & bo Guo, R. (2020). Role of biochar and organic substrates in enhancing the functional characteristics and microbial community in a saline soil. *Journal of Environmental Management*, 269, 110737.

M. Fernanda Aller, 2016. «Biochar Properties: Transport, Fate and Impact». Article, Taylor & Francis Online, Volume 46, 1183-1296.

Michael R. Evans, Brian E. Jackson, Michael Popp, Sammy Sadaka, 2017. «Chemical Properties of Biochar Materials Manufactured from Agricultural Products Common to the Southeast United States». Research Article, American Society for Horticultural Science, Volume 27.

Montemurro, F., Ferri, D., Tittarelli, F., Canali, S., & Vitti, C. (2010). Anaerobic digestate and on-farm compost application: Effects on lettuce (*Lactuca sativa* L.) crop production and soil properties. *Compost science & utilization*, 18(3), 184-193.

M. Pilar Bernal, Sven G. Sommer, Dave Chadwick, Chen Qing, Li Guoxue, Frederick C. Michel Jr. « Chapter Three - Current Approaches and Future Trends in Compost Quality Criteria for Agronomic, Environmental, and Human Health Benefits». *Journals and Books, Science Direct, Volume 144*, 143-233.

Nachenius, R. W., Ronsse, F., Venderbosch, R. H., & Prins, W. (2013). Biomass pyrolysis. In *Advances in chemical engineering* (Vol. 42, pp. 75-139). Academic Press.

Nikolaos Tzortzakis, Christos Saridakis and Antonios Chrysargyris, 2020. «Treated Wastewater and Fertigation Applied for Greenhouse Tomato Cultivation Grown in Municipal Solid Waste Compost and Soil Mixtures». Article, MDPI.

Nipa Thammasom, Patma Vityakon, Patcharee Saenjan, 2016. « Response of methane emissions, redox potential, and pH to eucalyptus biochar and rice straw addition in a paddy soil». Article, Research Gate, 192-198.

Palige J., Ptaszek S., Dobrowolski A., Chmielewski A. G., 2008. « Application of radiotracer and CFD methods for investigation of internal flow structure in wastewater treatment plant apparatus». Article, ETDEWEB.

P.M Gopal, N.m Sivaram, Debabrata Barik, 2019. « Energy From Toxic Organic Waste for Heat and Power Generation». Article, Science Direct, Chapter 7, 83-97.

Prabir Basu, 2018. « Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction (Third Edition), Chapter 5 – Pyrolysis». Article, Science Direct, 318-325.

Ranjana Das, Chiranjib Bhattacharjee, 2020. «Nutritional Composition and Antioxidant Properties of Fruits and Vegetables». Book, Science Direct, 745-756.

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.

Richard Stehauer, 2010. « What is sewage sludge and what can be done with it?». Article, Pennstate Extension.

Riya Chatterjee, Baharak Sajjadi, Wei-Yin Chen, Daniell L. Mattern, Nathan Hammer, Vijayasankar Raman and Austin Dorris, 2020. «Effect of Pyrolysis Temperature on PhysicoChemical Properties and Acoustic-Based Amination of Biochar for Efficient CO<sub>2</sub> Adsorption». Article, Frontiers.

Juan Santos, Bent Herrmann, Bernd Mieske, Ludvig A. Krag. Stefanie Haase, Daniel Stepputtis, 2018. «The efficiency of sieve-panels for bycatch separation in Nephrops trawls». Article, Research Gate.

Sachchidanand Tripathi, Pratap Srivastava, Rajkumari S. Devi, Rahul Bhaduria, 2020. « Agrochemicals Detection, Treatment and Remediation». Article, Science Direct, 25-54.

Shawn D. Mansfield, Caitriona Mooney, John N. Saddler, 2008. «Substrate and Enzyme Characteristics that Limit Cellulose Hydrolysis». Article, *AIChE*, Volume 15, 804-816.

Shelia Hu, 2020. «Composting 101». Article, NRDC.

Slocombe, S. P., Zúñiga-Burgos, T., Chu, L., Wood, N. J., Camargo-Valero, M. A., & Baker, A. (2020). Fixing the broken phosphorus cycle: wastewater remediation by microalgal polyphosphates. *Frontiers in plant science*, 11, 982.

Stephane Godbut, 2012. «Biofuels Production from Biomass by Thermochemical Conversion Technologies». Article, ResearchGate, Volume 2012.

Stefanie Spears, 2018. «What is Biochar ?». Article, *Regeneration International*, 1.

Sushil Adhikari, Hyungseok Nam, Jyoti P. Chakraborty, 2018. «Waste Biorefinery». Article, *Science Direct*, Chapter 8, 239-263.

Thomas A. Doerge, Robert L. Roth, Bryant R. Gardner, 2000. «Nitrogen Fertilizer Mangement in Arizona». Article, *University of Arizona*, Volume 64, 406-411.

Trupiano, D., Cocozza, C., Baronti, S., Amendola, C., Vaccari, F. P., Lustrato, G., ... & Scippa, G. S. (2017). The effects of biochar and its combination with compost on lettuce (*Lactuca sativa* L.) growth, soil properties, and soil microbial activity and abundance. *International Journal of Agronomy*, 2017.

T. Sial, Zhilong Lan, Limei Wang, Ying Zhao, Jian-guo Zhang, F. Kumbhar, M. Memon, Muhammad Siddique Lashari, A. Shah, 2019. « Effects of Different Biochars on Wheat Growth Parameters, Yield and Soil Fertility Status in a Silty Clay Loam Soil». Article, *National Library of Medicine*.

US Composting Council, 2020. «Benefits of Compost».

US Composting Council, 2020. «Combating Climate Change».

USDA Agricultural Research Service, USDA, 2021. «What is Pyrolysis?».

Valero B. Abgor, Nazim Cicek, Richard Sparling, Alex Berlin, David B. Levin, 2011. «Biomass pretreatment: Fundamentals toward application». Article, *Science Direct*, Volume 29, 675-685 .

Velli P. , Manolikaki Ioanna, Diamadopoulos Evan., 2021. «Effect of Biochar from seage sludge on tomato growth, soil chemical properties and heave metal concentrations». Article, *Science Direct*, Volume 297, 113-325.

Victor Tabosa de Oliveira Santos, Germano Siqueira, Adriane Maria Ferreira Milagres, André Ferraz, 2018. «Role of hemicellulose removal during dilute acid pretreatment on the cellulose accessibility and enzymatic hydrolysis of compositionally diverse sugarcane hybrids». Article, *Science Direct*, 722-730.

Wittorf, L. (2017). Denitrifying and nitrous oxide reducing genotypes (Vol. 2017, No. 2017: 98).

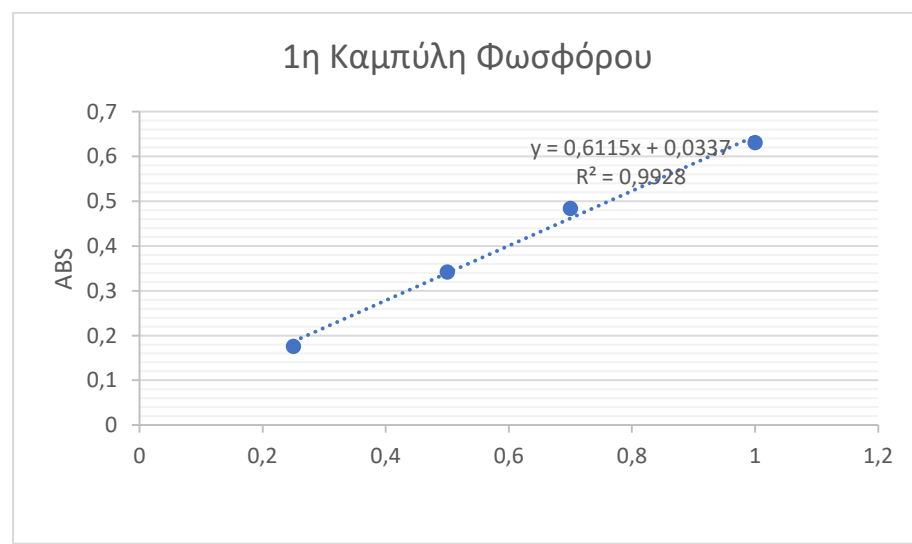
Yaleeni Kanna Dasan, Kee Lam, Suzana Yusup, Jun Wei Lim, 2019. «Science of the Total Enviroment». *Journal, Science Direct*, 112-128.

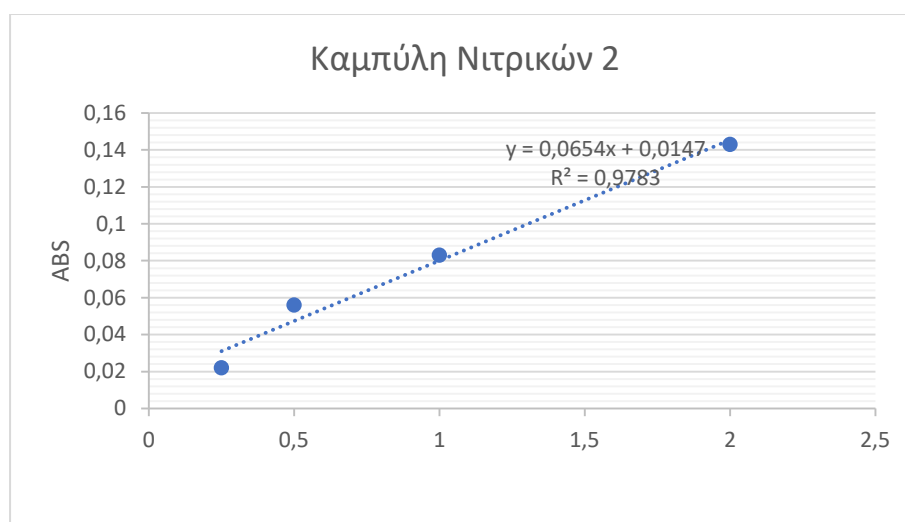
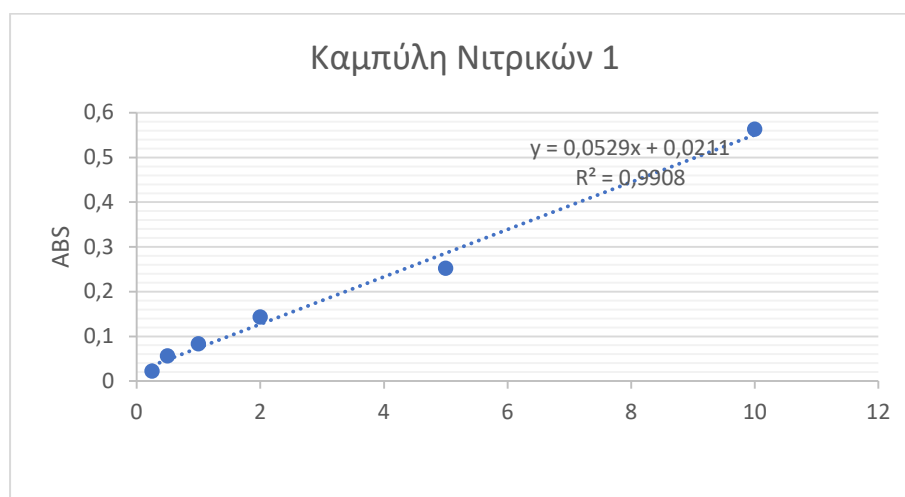
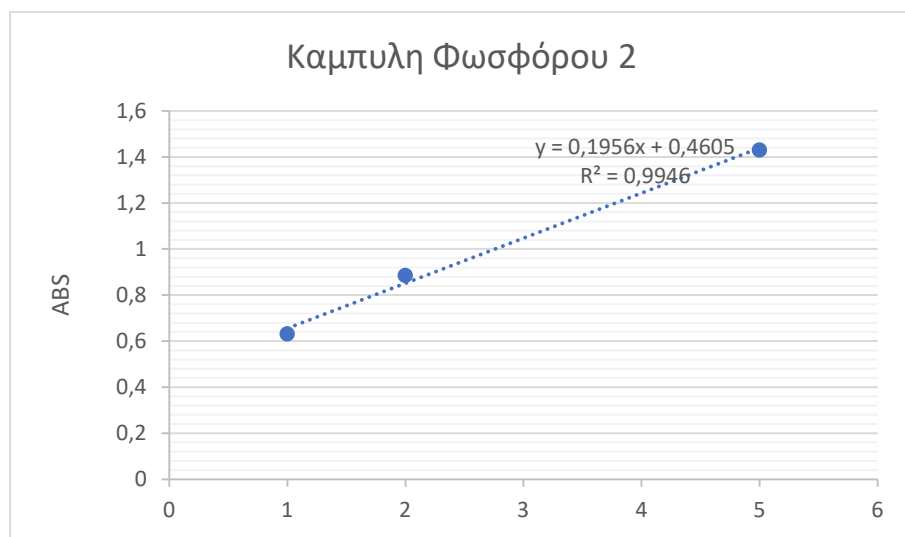
Yun-Gu Kang , , Jin-Hyuk Chun , Jae-Han Lee , Seong-Yong Park , Deogratius Luyima , Taek-Keun Oh , Yeo-Uk Yun. « Effects of Varying Rates of Nitrogen and Biochar pH on NH<sub>3</sub> Emissions and Agronomic Performance of Chinese Cabbage (*Brassica rapa ssp. pekinensis*) ». Article, MDPI.

Zhipu Wang, Kai Liu, Like Xie, Henan Zhu, Shibo Ji, Xinqian Shu, 2019. «Effects of residence time on characteristics of biochars prepared via co-pyrolysis of sewage sludge and cotton stalks». Article, Science Direct, Volume 142, 104659.

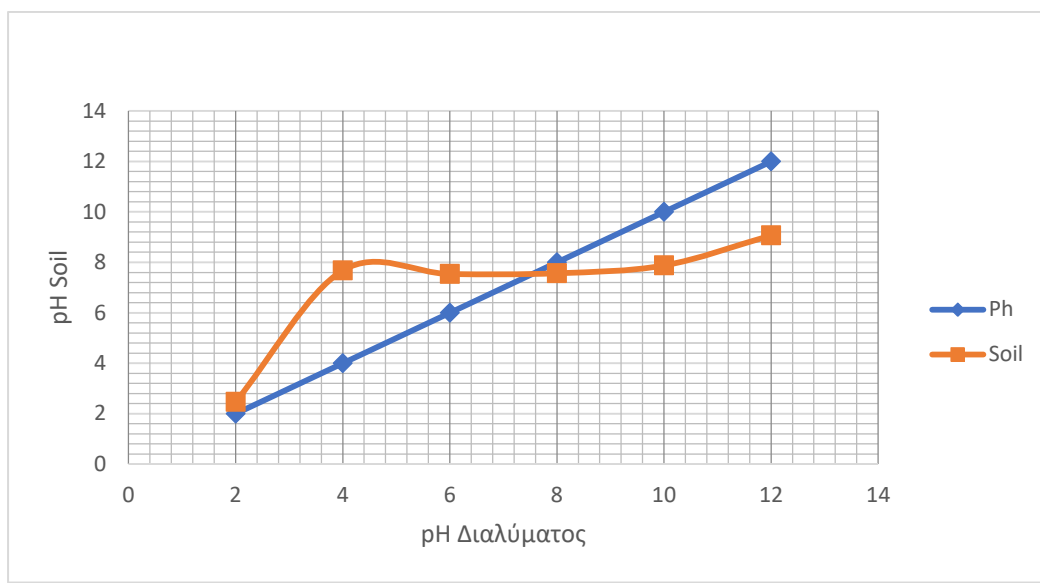
## Παραρτήματα

### Παράρτημα Α: Καμπύλες Βαθμονόμησης

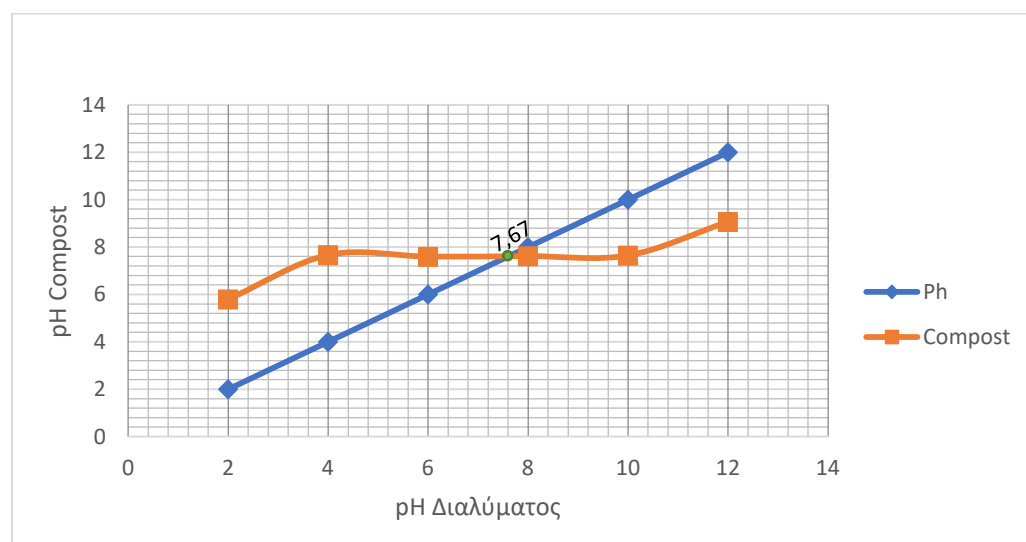




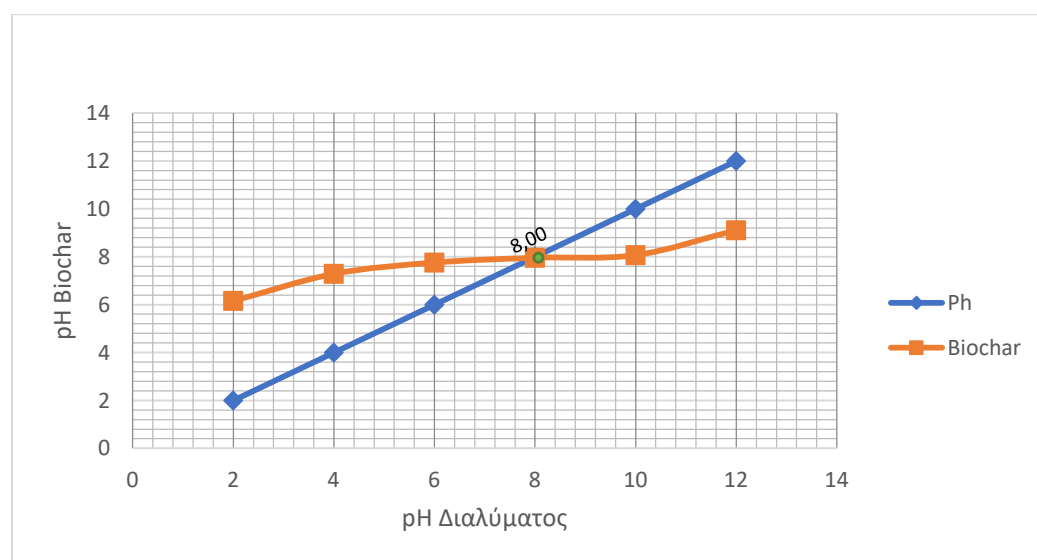
## Παράρτημα Β: Αναλυτική Καταγραφή ανάπτυξης των φυτών



Σχήμα 9: Διάγραμμα pH-PzC για το Soil



Σχήμα 10: Διάγραμμα pH-PzC για το Compost



Σχήμα 11: Διάγραμμα pH-PzC για το Biochar

**Πίνακας 11: Απόδοση Biochar – yield (%)**

<b>Δείγμα</b>	<b>Βάρος Χωνευτηρίου (g)</b>	<b>Compost (g)</b>	<b>Biochar (g)</b>
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>	<b>1177,786</b>	<b>986,015</b>
	<b>Yield (%) =</b>	<b>0,837</b>	<b>Ή 84 %</b>