



# Πολυτεχνείο Κρήτης

Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος

Επίδραση βιοεξανθρακώματος (biochar) από λυματολάσπη  
στην καλλιέργεια τομάτας (*Solanum lycopersicum* L.)  
Effect of biochar produced from sewage sludge on tomato (*Solanum lycopersicum* L.)

Διπλωματική Εργασία

Βέλλη Παρασκευή

Χανιά, 2019

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

## **Τριμελής Επιτροπή**

**Ευάγγελος Διαμαντόπουλος – Επιβλέπων**

Καθηγητής

Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος

Πολυτεχνείο Κρήτης

**Γεώργιος Καρατζάς**

Καθηγητής

Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος

Πολυτεχνείο Κρήτης

**Δανάη Βενιέρη**

Αναπλ. Καθηγήτρια

Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος

Πολυτεχνείο Κρήτης

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους όσους με βοήθησαν επιστημονικά αλλά και ηθικά, συμβάλλοντας ο καθένας με τον τρόπο του ώστε να καταφέρω να ολοκληρώσω τη διπλωματική μου εργασία. Αρχικά, ευχαριστώ τον επιβλέποντα Καθηγητή μου, κ. Διαμαντόπουλο, που παρά το φόρτο εργασίας του, δέχτηκε να συνεργαστούμε, μου αφιέρωσε τον απαραίτητο χρόνο, αλλά και μου παρείχε την υλικοτεχνική και οικονομική στήριξη για την ολοκλήρωση του πειράματός μου.

Επιπλέον, ευχαριστώ τον Καθηγητή Γ. Καρατζά και την Αναπλ. Καθηγήτρια Δ. Βενιέρη, για τη βοήθειά τους ως μέλη της τριμελούς μου επιτροπής.

Ευχαριστώ από τα βάθη της καρδιάς μου τη Δρ. Ιωάννα Μανωλικάκη, που εκτός του ότι ήταν το άτομο που με βοήθησε όσο κανένας άλλος να φέρω εις πέρας τη διπλωματική μου εργασία, άντεχε την γκρίνια μου σε καθημερινή βάση, άκουγε τις ανησυχίες μου και με συμβούλευε για επιστημονικά ή μη θέματα. Ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ αρμόζει και στην υπεύθυνη του Εργαστηρίου Τεχνολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος, Ελισάβετ Κουκουράκη, που μέσα από τις συμβουλές της και τις συζητήσεις μας με έκανε να δω κάποια πράγματα πιο σφαιρικά. Επίσης, ευχαριστώ τα μέλη του εργαστηρίου για το φιλικό περιβάλλον που συνάντησα και τον διδακτορικό φοιτητή Π. Ρεγκούζα για τις διασκεδαστικές μας «διαμάχες».

Ιδιαίτερες ευχαριστίες στη Maria – Lilliana Saru και Στέλλα Βουτσαδάκη του Εργαστηρίου Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών, καθώς και τον Δρ. Γεώργιο Ψαρρά και Νεκταρία Διγαλάκη του Εργαστηρίου Φυσιολογίας και Θρέψης Φυτών του Ινστιτούτου Ελιάς, Υποτροπικών Φυτών και Αμπέλου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Κωνσταντίνο και Μυρσίνη, καθώς και τον αδερφό μου, που τόσα χρόνια με στηρίζουν, ψυχολογικά και οικονομικά, πιστεύουν σε εμένα και μου δίνουν τα απαραίτητα εφόδια για να κυνηγάω τα όνειρά μου. Ευχαριστώ επίσης τα πολύ κοντινά μου άτομα, Άγγελο, Ανθή, Νικήτα, Λεωνίδα και Γιώργο, που με βοηθούν, μου συμπαραστέκονται και είναι κοντά μου, όταν τους έχω ανάγκη.

## Περίληψη

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας μελετήθηκε η παραγωγή βιοεξανθρακώματος με σκοπό την εφαρμογή του στο έδαφος και την επίδρασή του στην καλλιέργεια της τομάτας (*Solanum Lycopersicum* L.). Η βιομάζα που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή βιοεξανθρακώματος ήταν αναερόβια χωνευμένη και θερμικά αφυδατωμένη ιλύ αστικών λυμάτων, μίγματος πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας ιλύος, από το Κέντρο Επεξεργασίας Λυμάτων της Ψυττάλειας (ΚΕΛΨ), ενώ το έδαφος πάρθηκε από καλλιεργήσιμη περιοχή των Χανίων και ήταν αμμοπηλώδες.

Η παραγωγή βιοεξανθρακώματος έγινε στους 300°C. Έπειτα από την παραγωγή και το χαρακτηρισμό του, το βιοεξανθράκωμα εφαρμόστηκε στο έδαφος, έτσι ώστε να μελετηθεί η επίδρασή του στη καλλιέργεια της *Solanum Lycopersicum* L. Η καλλιέργεια διήρκεσε 3 μήνες. Πραγματοποιήθηκαν 4 μεταχειρίσεις, όπου η κάθε μία είχε 3 επαναλήψεις. Συνολικά εγκαταστάθηκαν 12 διάτρητα πλαστικά δοχεία χωρητικότητας 10 kg. Συγκεκριμένα, οι μεταχειρίσεις ήταν ο Μάρτυρας (έδαφος χωρίς μεταχείριση) (Control), βιοεξανθράκωμα ιλύος σε δόση 2% κ.β. (BC–SS), κόμποστ σε δόση 2% κ.β. (Compost) και συνδυασμός βιοεξανθρακώματος ιλύος με κόμποστ σε συνολική δόση 2% κ.β. (BC–SS+Compost). Οι στόχοι της μελέτης ήταν να διερευνηθεί αν το βιοεξανθράκωμα ιλύος σε συνδυασμό με ή χωρίς κόμποστ, επηρεάζει 1) το ξηρό βάρος και τα μορφολογικά χαρακτηριστικά του φυτού, 2) τις συγκεντρώσεις μακροθρεπτικών, μικροθρεπτικών στοιχείων και βαρέων μετάλλων στους υπέργειους και υπόγειους φυτικούς ιστούς, 3) τις ιδιότητες του εδάφους, συμπεριλαμβανομένων των θρεπτικών στοιχείων και των βαρέων μετάλλων.

Με την εφαρμογή του βιοεξανθρακώματος βελτιώθηκαν αρκετά τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Αυξήθηκε το TOC, καθώς και το NO<sub>3</sub>–N και NH<sub>4</sub>–N. Επιπλέον, αύξηση παρατηρήθηκε στα μικροθρεπτικά και μακροθρεπτικά του εδάφους.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η εφαρμογή του βιοεξανθρακώματος σε συνδυασμό με ή χωρίς κόμποστ, βοήθησε την ανάπτυξη των φυτών ειδικότερα μετά τις 40 μέρες από την εφαρμογή, όπου το ύψος των φυτών των μεταχειρίσεων BC – SS είχε αυξηθεί κατά 34.1% σε σύγκριση με τον μάρτυρα. Το ξηρό βάρος των υπόγειων και υπέργειων φυτικών ιστών αυξήθηκε εξίσου σημαντικά, με τη μεγαλύτερη αύξηση στους καρπούς και τις ρίζες να έχει η μεταχείριση BC–SS+Compost και στους βλαστούς η μεταχείριση BC–SS. Η προσθήκη BC–SS+Compost μείωσε σημαντικά την περιεκτικότητα N στους βλαστούς της τομάτας. Η προσθήκη Compost αύξησε σημαντικά την συγκέντρωση P στους βλαστούς και στα φύλλα καθώς και τη συγκέντρωση K στις ρίζες. Η προσθήκη βιοεξανθρακώματος, compost αλλά και ο συνδυασμός τους αύξησε σημαντικά την περιεκτικότητα του K στα φύλλα των φυτών. Η προσθήκη BC–SS+Compost μείωσε τη συγκέντρωση Ca στον καρπό της τομάτας, ενώ η εφαρμογή compost αύξησε σημαντικά το Ca στους καρπούς. Η συγκέντρωση Na αυξήθηκε σημαντικά με την προσθήκη κόμποστ σε όλα τα μέρη του φυτού. Η προσθήκη BC – SS, Compost και BC–SS+Compost μείωσε σημαντικά τη συγκέντρωση Fe στους καρπούς της τομάτας, ενώ το Compost αύξησε σημαντικά την περιεκτικότητα του Mn στους βλαστούς και στους καρπούς. Οι συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων στους φυτικούς ιστούς ήταν αρκετά μικρές. Συγκεκριμένα τα Cr, Ni και Co ανιχνεύτηκαν μόνο στις ρίζες των μεταχειρίσεων, ενώ το Si υπήρχε στις ρίζες και στους βλαστούς. Το As, Mo και Pb υπήρχαν σε όλους του φυτικούς ιστούς χωρίς κάποιο από αυτά να ξεπερνά τα επιτρεπτά όρια που έχουν θεσπιστεί για τα οπωροκηπευτικά. Τέλος, ο Hg, Se και Cd δεν ανιχνεύτηκαν σε κάποιον από τους ιστούς.

Η προσθήκη βιοεξανθρακώματος βελτιώνει τα χαρακτηριστικά του εδάφους και αυξάνει την απόδοση των φυτών. Παρ'όλα αυτά, πριν την χρήση του πρέπει να ληφθούν υπόψιν διάφορες παράμετροι όπως το είδος της βιομάζας, το έδαφος, η δόση εφαρμογής, η καλλιέργεια κ.α., ώστε να έχουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα.

## Abstract

In the context of this undergraduate thesis the production of biochar was studied so as to apply it to soil and study its effect on the cultivation of tomatoes (*Solanum Lycopersicum* L.). The biomass used in the production of biochar was anaerobically digested and thermo-dehydrated sludge from urban sewage - a mixture of primary and secondary sludge- from the Psyttaleia Wastewater Treatment Plant, while the soil was taken from a cultivated area of Chania and it was sandy loam.

Following its production at 300°C and its characterization, the biochar was applied to the soil for the cultivation of *Solanum Lycopersicum* L. The cultivation period lasted for three months. There were four treatments, with three repetitions each. A total of twelve perforated plastic pots with a 10 kg capacity were installed. Specifically, the treatments were the Control (untreated soil), soil with 2% biochar (BC-SS), soil with 2% compost (Compost) and a mixture of biochar and compost at a 2% level (BC—SS+Compost). The aim of the study was to examine whether sludge biochar in combination with or without compost effects: A. The dry weight and morphological characteristics of the plant. B. The concentrations of macronutrients, micronutrients and heavy metals in aboveground and belowground plant tissues. C. The soil properties, including the nutrients and heavy metals.

With the application of biochar a number of soil properties exhibited substantial improvement. The TOC increased as did the NO<sub>3</sub>–N and NH<sub>4</sub>–N. Additionally, an increase in the micronutrients and macronutrients in the soil was also observed.

According to the results the application of biochar in combination with or without compost improved substantially plant growth. Forty days after the application of biochar, the plants treated with BC—SS showed a 34.1% increase in height compared to the Control. The dry mass of the aboveground and belowground plant tissue equally increased. Plants treated with BS—SS+Compost had the largest increase in the fruit and roots, those treated with BC—SS in the stems. The addition of BC—SS+Compost decreased the amount of N in the stems of the tomatoes. The addition of Compost substantially increased the concentration of P in the stems and leaves as well as the concentration of K in the roots. The addition of biochar, compost as well as their combination increased the amount of K in the leaves of the plant. The addition of BC—SS+Compost decreased the concentration of Ca in the tomato fruit, whereas the application of Compost increased the Ca in the fruit. The concentration of Na was substantially increased with the addition of compost in all plant tissues. The concentration of Mg in the plant tissue was minimally affected in all treatments. The application of BC—SS, Compost and BC—SS+Compost decreased Fe concentration in the tomato fruit, whereas the Compost substantially increased Mn content in the stems and fruit. The concentration of heavy metals was quite low. Specifically, traces of Cr, Ni and Co were found only in roots of those treated, while Si was present in the roots and stems. As, Mo and Pb were present in all plant tissue without them surpassing the permissible levels established for vegetables. Finally, no traces of Hg, Se and CD were found in any of the tissues.

The addition of biochar improves the soil characteristics and increases the plant yield. However, before its use all the different parameters such as the type of biomass, soil, application dose, cultivation, etc. must be taken into account so as to have the desired results.

# Περιεχόμενα

Ευχαριστίες .....	i
Περίληψη .....	ii
Abstract .....	iv
Ευρετήριο Πινάκων.....	vii
Ευρετήριο Σχημάτων .....	vii
Ευρετήριο Εικόνων .....	viii
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή .....	1
1.1. Λυματολάσπη .....	1
1.1.1 Βιομάζα Ψυττάλειας.....	1
1.2. Πυρόλυση.....	2
1.2.1. Βασικές αρχές πυρόλυσης.....	2
1.2.2. Είδη πυρόλυσης.....	3
1.2.3. Προϊόντα πυρόλυσης.....	5
1.3. Βιοεξανθράκωμα (Biochar) .....	7
1.3.1. Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση και τα χαρακτηριστικά του βιοεξανθρακώματος .....	8
1.3.2. Φυσικές ιδιότητες του βιοεξανθρακώματος και παράγοντες που τις επηρεάζουν .....	11
1.3.3. Χημικές ιδιότητες βιοεξανθρακώματος και παράγοντες που τις επηρεάζουν .....	12
1.4. Επίδραση του βιοεξανθρακώματος στο έδαφος .....	17
1.4.1. Φυσικές ιδιότητες .....	18
1.4.2. Χημικές ιδιότητες .....	18
1.4.3. Βιολογικές ιδιότητες .....	19
1.5. Επίδραση βιοεξανθρακώματος στην καλλιέργεια φυτών .....	23
1.6. Τομάτα.....	26
1.7. Επίδραση βιοεξανθρακώματος στην καλλιέργεια τομάτας.....	27
Κεφάλαιο 2: Μεθοδολογία .....	29
2.1. Υλικά και συνθήκες πυρόλυσης.....	29
2.2. Εγκατάσταση πειράματος .....	30
2.3. Αναλυτικές μέθοδοι.....	34
2.3.1. Χαρακτηρισμός εδάφους .....	34
2.3.2. Χαρακτηρισμός ιλύος, κόμποστ και βιοεξανθρακώματος .....	36
2.3.3. Φυτικοί ιστοί.....	36
2.4. Επεξεργασία δεδομένων .....	37
Κεφάλαιο 3: Αποτελέσματα – Συζήτηση .....	38
3.1. Χαρακτηρισμός βιομάζας και βιοεξανθρακώματος .....	38

3.2. Χημικές ιδιότητες εδαφών .....	41
3.3. Ανάπτυξη και απόδοση φυτών .....	47
3.3.1. Ύψος φυτών .....	49
3.3.2. Διάμετρος βλαστών .....	50
3.3.3. Ξηρό και νωπό βάρος υπέργειων και υπόγειων φυτικών ιστών .....	51
3.3.4. Συγκέντρωση μακροθρεπτικών N, P, K, Ca, Mg στους υπέργειους και υπόγειους φυτικούς ιστούς .....	54
3.3.4. Συγκέντρωση μικροθρεπτικών Fe, Mn, Cu, Zn στους υπόγειους και υπέργειους φυτικούς ιστούς.....	59
3.3.5. Συγκέντρωση βαρέων μετάλλων στους υπόγειους και υπέργειους φυτικούς ιστούς.....	63
Κεφάλαιο 4: Συμπεράσματα.....	71
Βιβλιογραφία .....	73
Παράρτημα.....	85

## Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1 - 1: Επίδραση διάφορων ειδών βιοεξανθρακώματος στις ιδιότητες του εδάφους .....	21
Πίνακας 1 - 2: Επίδραση διαφορετικών ειδών βιοεξανθρακώματος σε καλλιέργειες .....	24
Πίνακας 2 - 1: Φυσικοχημικές ιδιότητες εδάφους .....	35
Πίνακας 3 - 1: Χαρακτηριστικά της λυματολάσπης και του βιοεξανθρακώματος που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα .....	40
Πίνακας 3- 2 : Χημικές ιδιότητες εδαφών .....	45
Πίνακας 3- 3: Συγκέντρωση βαρέων μετάλλων στο έδαφος και όρια επικινδυνότητας .....	46
Πίνακας 3 - 4: Νωπό και ξηρό βάρος καρπών .....	53
Πίνακας 3 - 5: Ξηρό βάρος ριζών, βλαστών και φύλλων .....	53
Πίνακας 3 - 6: Συγκέντρωση βαρέων μετάλλων στους καρπούς των φυτών και όρια επικινδυνότητας. ....	70
Πίνακας Π3 - 1 : Ύψος φυτών <i>Solanum Lycopersicum</i> L.....	85
Πίνακας Π3 - 2 : Διάμετρος βλαστών φυτών <i>Solanum Lycopersicum</i> L.....	86
Πίνακας Π3 - 3 : Συγκέντρωση μακροθρεπτικών N, P, K, Ca, Mg και Na στους υπόγειους και υπέργειους φυτικούς ιστούς.....	87
Πίνακας Π3 - 4 : Συγκέντρωση μικροθρεπτικών Fe, Mn, Cu και Zn στους υπόγειους και υπέργειους φυτικούς ιστούς.....	88
Πίνακας Π3 - 5 : Συγκέντρωση βαρέων μετάλλων στους υπόγειους και υπέργειους φυτικούς ιστούς.....	89

## Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 2 - 1 : Χρονοδιάγραμμα υλοποίησης πειραμάτων.....	33
Σχήμα 3 - 1: Ύψος (cm) φυτών <i>Solanum Lycopersicum</i> L. ....	49
Σχήμα 3 - 2: Διάμετρος βλαστού (mm) του φυτού <i>Solanum Lycopersicum</i> L.....	50
Σχήμα 3 - 3 Συγκέντρωση N ( $\text{g N kg}^{-1}$ ξηρής ουσίας) υπόγειων και υπέργειων φυτικών ιστών της <i>Solanum Lycopersicum</i> L.....	54
Σχήμα 3 - 4 : Συγκέντρωση P ( $\text{g P kg}^{-1}$ ξηρής ουσίας) υπόγειων και υπέργειων φυτικών ιστών της <i>Solanum Lycopersicum</i> L.....	55
Σχήμα 3 - 5 : Συγκέντρωση K ( $\text{g K kg}^{-1}$ ξηρής ουσίας) υπόγειων και υπέργειων φυτικών ιστών της <i>Solanum Lycopersicum</i> L.....	56
Σχήμα 3 - 6 : Συγκέντρωση Ca ( $\text{g Ca kg}^{-1}$ ξηρής ουσίας) υπόγειων και υπέργειων φυτικών ιστών της <i>Solanum Lycopersicum</i> L.....	57
Σχήμα 3 - 7 : Συγκέντρωση Mg ( $\text{g Mg kg}^{-1}$ ξηρής ουσίας) υπόγειων και υπέργειων φυτικών ιστών της <i>Solanum Lycopersicum</i> L.....	58
Σχήμα 3 - 8 : Συγκέντρωση Na ( $\text{g Na kg}^{-1}$ ξηρής ουσίας) υπόγειων και υπέργειων φυτικών ιστών της <i>Solanum Lycopersicum</i> L.....	59
Σχήμα 3 - 9 : Συγκέντρωση Fe ( $\text{mg Fe kg}^{-1}$ ξηρής ουσίας) υπόγειων και υπέργειων φυτικών ιστών της <i>Solanum Lycopersicum</i> L.....	60
Σχήμα 3 - 10 : Συγκέντρωση Mn ( $\text{mg Mn kg}^{-1}$ ξηρής ουσίας) υπόγειων και υπέργειων φυτικών ιστών της <i>Solanum Lycopersicum</i> L.....	61
Σχήμα 3 - 11 : Συγκέντρωση Cu .....	62
Σχήμα 3 - 12 : Συγκέντρωση Zn ( $\text{mg Zn kg}^{-1}$ ξηρής ουσίας) υπόγειων και υπέργειων φυτικών ιστών της <i>Solanum Lycopersicum</i> L.....	63
Σχήμα 3 - 13 : Συγκέντρωση Cr ( $\text{mg Cr kg}^{-1}$ ξηρής ουσίας) υπόγειων και υπέργειων φυτικών ιστών της <i>Solanum Lycopersicum</i> L.....	64

Σχήμα 3 - 14 : Συγκέντρωση Ni (mg Ni kg <sup>-1</sup> ξηρής ουσίας) υπόγειων και υπέργειων φυτικών ιστών της <i>Solanum Lycopersicum</i> L.....	65
Σχήμα 3 - 15 : Συγκέντρωση As (mg As kg <sup>-1</sup> ξηρής ουσίας) υπόγειων και υπέργειων φυτικών ιστών της <i>Solanum Lycopersicum</i> L.....	66
Σχήμα 3 - 16 : Συγκέντρωση Mo (mg Mo kg <sup>-1</sup> ξηρής ουσίας) υπόγειων και υπέργειων φυτικών ιστών της <i>Solanum Lycopersicum</i> L.....	67
Σχήμα 3 - 17 : Συγκέντρωση Pb (mg Pb kg <sup>-1</sup> ξηρής ουσίας) υπόγειων και υπέργειων φυτικών ιστών της <i>Solanum Lycopersicum</i> L.....	68
Σχήμα 3 - 18 : Συγκέντρωση Pb (mg Pb kg <sup>-1</sup> ξηρής ουσίας) υπόγειων και υπέργειων φυτικών ιστών της <i>Solanum Lycopersicum</i> L.....	68
Σχήμα 3 - 19 : Συγκέντρωση Si (mg Si kg <sup>-1</sup> ξηρής ουσίας) υπόγειων και υπέργειων φυτικών ιστών της <i>Solanum Lycopersicum</i> L.....	69

## Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1- 1: Διαδικασία πυρόλυσης.....	3
Εικόνα 1- 2: Είδη πυρόλυσης.....	4
Εικόνα 1- 3: Προϊόντα πυρόλυσης .....	5
Εικόνα 1- 4: Επίδραση θερμοκρασίας πυρόλυσης στα χαρακτηριστικά του βιοεξανθρακώματος .....	10
Εικόνα 1- 5: Φωτογραφίες από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. α) Βιομάζα από πευκοβελόνες, β) Βιοεξανθράκωμα με θερμοκρασία πυρόλυσης 950°C και χαμηλό ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας, γ) Βιοεξανθράκωμα με θερμοκρασία πυρόλυσης 950°C και υψηλό ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας. ....	11
Εικόνα 1- 6: Φυσικοχημικές ιδιότητες βιοεξανθρακώματος και η συμβολή του στην την περιβαλλοντική αποκατάσταση και τη βελτίωση του εδάφους .....	12
Εικόνα 1- 7: Επίδραση βιοεξανθρακώματος στις ιδιότητες του εδάφους.....	17
Εικόνα 2- 1: α) Λυματολάσπη από το Κέντρο Επεξεργασίας Λυμάτων Ψυττάλειας, β) Βιοεξανθράκωμα από λυματολάσπη με θερμοκρασία πυρόλυσης 300°C.....	30
Εικόνα 2- 2: Προετοιμασία μιγμάτων εδάφους, βιοεξανθρακώματος και κόμποστ.....	31
Εικόνα 2- 3: Ανάπτυξη φυτών της <i>Solanum Lycopersicum</i> L. 15 ημέρες μετά τη φύτευση. ....	32
Εικόνα 3- 1: Ανάπτυξη φυτών της <i>Solanum Lycopersicum</i> L. 30 ημέρες μετά τη φύτευση. ....	47
Εικόνα 3- 2: Ανάπτυξη φυτών της <i>Solanum Lycopersicum</i> L. 50 ημέρες μετά από τη φύτευση. ....	47
Εικόνα 3- 3: Ανάπτυξη φυτών της <i>Solanum Lycopersicum</i> L. 60 ημέρες μετά τη φύτευση. ....	48
Εικόνα 3- 4: Ανάπτυξη φυτών της <i>Solanum Lycopersicum</i> L. 70 ημέρες μετά τη φύτευση. ....	48
Εικόνα 3- 5: Υπόγειοι και Υπέργειοι Φυτικοί ιστοί του φυτού <i>Solanum Lycopersicum</i> L.....	51
Εικόνα 3- 6: Ρίζες από το φυτό <i>Solanum Lycopersicum</i> L. της μεταχείρισης α) Control β) BC – SS, γ) Compost και δ) BC – SS +Compost. ....	52
Εικόνα 3- 7: Καρπός από το φυτό <i>Solanum Lycopersicum</i> L. ....	52

# Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

## 1.1. Λυματολάσπη

Καθώς ο πληθυσμός αυξάνεται και η τάση για αστικοποίηση συνεχίζεται, ο αριθμός των αστικών εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων μεγαλώνει και μαζί με αυτόν οι ποσότητες λυματολάσπης. Για παράδειγμα, η συνολική παραγωγή λυματολάσπης στην Κίνα είχε μία μέση ετήσια αύξηση 13% από το 2007 έως το 2013 (Yang et al., 2015), ενώ εκτιμάται πως παράχθηκαν 60 εκατομμύρια τόνοι λυματολάσπης το 2015 (Jin et al., 2016).

Η λυματολάσπη είναι ένα αναπόφευκτο υποπροϊόν των διεργασιών επεξεργασίας των λυμάτων, το οποίο παρουσιάζει ορισμένες περιβαλλοντικές ανησυχίες. Είναι πλούσιο σε οργανική ουσία και θρεπτικά στοιχεία, όπως το άζωτο, ο φώσφορος και το κάλιο. Η λυματολάσπη μπορεί να βελτιώσει την οργανική ουσία του εδάφους, το οποίο είναι ευνοϊκό για τα γεωργικά εδάφη που παρουσιάζουν χαμηλές τιμές οργανικής ουσίας. Επιπλέον, η εφαρμογή της μπορεί να βελτιώσει τις φυσικές ιδιότητες των εδαφών, όπως τη δομή και την υδατοϊκανότητά τους (Sort and Alcaniz, 1999).

Παρ'όλα αυτά, η λυματολάσπη φέρει και ανεπιθύμητα συστατικά, όπως βαρέα μέταλλα, σύνθετες οργανικές ενώσεις και παθογόνους μικροοργανισμούς (Huang et al., 2016). Έτσι, η άμεση απόρριψη της ιλύος στο περιβάλλον μπορεί να απελευθερώσει ανόργανους και οργανικούς ρύπους στο νερό και το έδαφος, οι οποίοι θα μπορούσαν να περάσουν μέσα στην τροφική αλυσίδα και να θέσουν σε κίνδυνο την ανθρώπινη υγεία (Bondarczuk et al., 2016).

Σύμφωνα με τον Chen Tan (2014), η διάθεση και η αξιοποίηση της ιλύος έχουν προκαλέσει αυξανόμενη ανησυχία και έχουν χαρακτηριστεί ως «μελλοντικό πρόβλημα αποβλήτων». Υπάρχει μία σειρά από διαδικασίες επεξεργασίας που μπορούν να απαλείψουν τα περισσότερα παθογόνα και τα παράσιτα της ιλύος, έτσι ώστε να μπορεί να φανεί χρήσιμη. Οι πιο συμβατικές χρήσεις της περιλαμβάνουν τη βιομηχανική χρήση, την υγειονομική ταφή, την καύση και την κομποστοποίηση για επικείμενη χρήση στα γεωργικά εδάφη. Ωστόσο, σε ορισμένες χώρες, η εφαρμογή της περιορίζεται σε καλλιέργειες μη εδώδιμων προϊόντων, όπως είναι οι καλλιέργειες κλωστοδοτικών και δασοκομικών προϊόντων (Jin et al., 2016). Ορισμένες μέθοδοι επεξεργασίας περιλαμβάνουν καύση, αλλά αυτό δημιουργεί διοξίνες που εκπέμπονται στον αέρα και η επεξεργασμένη ιλύς μπορεί να περιέχει ακόμη ρύπους, ιδιαίτερα ανόργανους (Chen et al., 2012). Ωστόσο, η θερμική πυρόλυση της ιλύος μπορεί να είναι μία πολλά υποσχόμενη στρατηγική όσον αφορά στη σημαντική μείωση του όγκου της λάσπης, τη θανάτωση των παθογόνων μικροοργανισμών και των παρασίτων και την πλήρη αποσύνθεση των οργανικών υπολειμμάτων (Chen et al., 2014).

### 1.1.1 Βιομάζα Ψυττάλειας

Η λυματολάσπη που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή του βιοεξανθρακώματος πάρθηκε από το Κέντρο Επεξεργασίας Λυμάτων της Ψυττάλειας (ΚΕΛΨ). Το ΚΕΛΨ είναι το τελικό σημείο συγκέντρωσης οικιακών λυμάτων και προ – επεξεργασμένων βιομηχανικών λυμάτων της μείζονος περιοχής της Αθήνας, και είναι μία από τις μεγαλύτερες εγκαταστάσεις επεξεργασίας

λυμάτων στην Ευρώπη και διεθνώς. Η μέση παροχή εισερχομένων λυμάτων είναι της τάξης των 7.300.000m<sup>3</sup> ημερησίως, με υδραυλική ικανότητα 27 m<sup>3</sup>/s και δυναμικότητα ισοδύναμου πληθυσμού 5.600.000 κατοίκων.

Οι εγκαταστάσεις του ΚΕΛΨ περιλαμβάνουν προ – επεξεργασία λυμάτων με απομάκρυνση των βαρέων στερεών, εσχάρωση, εξάμωση και απόσπηση. Στη συνέχεια, τα προεπεξεργασμένα λύματα περνάνε στις δεξαμενές πρωτοβάθμιας καθίζησης, στις οποίες συλλέγεται η πρωτοβάθμια ιλύς. Τα πρωτοβάθμια επεξεργασμένα λύματα υφίστανται προχωρημένη δευτεροβάθμια βιολογική επεξεργασία με το σύστημα της ενεργού ιλύος για την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου και τη σημαντική ελάττωση του φορτίου αζώτου. Αυτή η επεξεργασία συντελείται στη βιολογική βαθμίδα, που αποτελείται από τους βιοαντιδραστήρες και τις δεξαμενές τελικής καθίζησης, στις οποίες καθιζάνει η βιολογική ιλύς. Η τελική εκροή του ΚΕΛΨ έχει αποδέκτη τον Σαρωνικό Κόλπο, στον οποίο διατίθεται μέσω υποθαλάσσιου συστήματος αγωγών βαθιάς διάχυσης σε βάθος 63m. Μέσω της επεξεργασίας τα αιωρούμενα στερεά και το οργανικό φορτίο των λυμάτων μειώνονται κατά 93% περίπου και το ολικό άζωτο μειώνεται κατά 80% περίπου. Μέρος της τελικής εκροής υφίσταται διύλιση (με αμμόφιλτρα) και απολύμανση (με διατάξεις υπεριώδους ακτινοβολίας) για επαναχρησιμοποίησή της στις εγκαταστάσεις της νήσου Ψυττάλειας.

Η παραγόμενη πρωτοβάθμια ιλύς και η περίσσεια βιολογική ιλύς από τις δεξαμενές τελικής καθίζησης περιέχουν τα βιοστερεά, δηλαδή το οργανικό προϊόν της επεξεργασίας των αστικών λυμάτων. Στις εγκαταστάσεις του ΚΕΛ Ψυττάλειας, η επεξεργασία της ιλύος περιλαμβάνει τα επόμενα στάδια: πάχυνση της ιλύος (για την πρωτοβάθμια ιλύ σε δεξαμενές βαρύτητας και για την περίσσεια βιολογική ιλύ σε τράπεζες μηχανικής πάχυνσης), ακολούθως, για το σύνολο της ιλύος, χώνευση (αναερόβια, μεσοφιλική, υψηλού ρυθμού), αφυδάτωση και τελικά θερμική ξήρανση.

Το παραγόμενο προϊόν της μονάδας ξήρανσης είναι 120 - 150 τόνοι/ημέρα με ξηρότητα περίπου 92% και αποτελεί ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, καθώς αξιοποιείται ως καύσιμο σε εργοστάσια παραγωγής τσιμέντου ή θερμοηλεκτρικά εργοστάσια.

Επιπλέον, κατά τη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης της μεικτής ιλύος παράγεται βιοαέριο, το οποίο αποτελείται κυρίως από μεθάνιο (CH<sub>4</sub>) σε ποσοστό 61-65% και διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) σε ποσοστό 34-38%

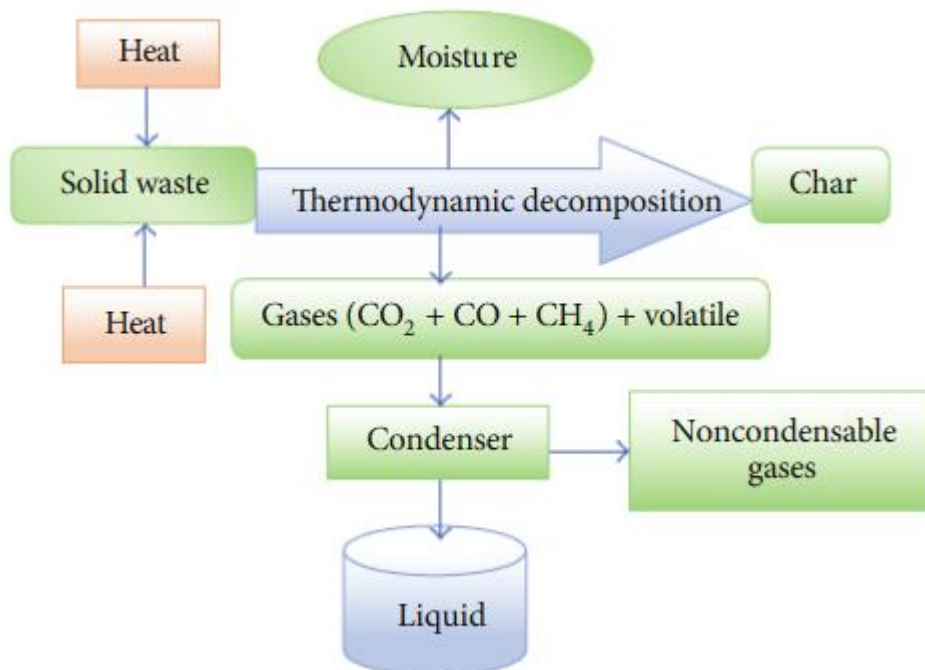
## **1.2. Πυρόλυση**

### **1.2.1. Βασικές αρχές πυρόλυσης**

Η πυρόλυση είναι η θερμική αποσύνθεση βιομάζας σε υψηλές θερμοκρασίες και λαμβάνει χώρα απουσία οξυγόνου υπό αδρανή ατμόσφαιρα (Vaughn et al., 2018). Ως αδρανής ατμόσφαιρα απαιτείται συνήθως παροχή αργού ή αζώτου. Λόγω της έλλειψης οξυγόνου, το υλικό αποσυντίθεται θερμικά σε καύσιμα αέρια και εξανθράκωμα.

Η βασική χημική αντίδραση είναι αρκετά σύνθετη και αποτελείται από διάφορα βήματα. Ανάλογα με το θερμικό περιβάλλον και την τελική θερμοκρασία, τα προϊόντα της πυρόλυσης είναι κυρίως βιοεξανθράκωμα σε χαμηλές θερμοκρασίες (κάτω των 450 °C) όταν ο ρυθμός θέρμανσης είναι αρκετά αργός και αέρια (μεθάνιο, υδρογόνο, μονοξείδιο του άνθρακα και διοξείδιο του άνθρακα) σε υψηλές θερμοκρασίες (πάνω από 800 °C) με ταχύ ρυθμό θέρμανσης. Σε ενδιάμεσες τιμές θερμοκρασίας και υπό σχετικά υψηλές ταχύτητες θέρμανσης,

παράγεται το βιο-έλαιο. Η αναλογία κάθε τελικού προϊόντος εξαρτάται από τη θερμοκρασία, τον χρόνο παραμονής, τον ρυθμό θέρμανσης και την πίεση, τον τύπο της βιομάζας και τον σχεδιασμό και τη διαμόρφωση του αντιδραστήρα (Tripathi et al., 2016).



Εικόνα 1- 1: Διαδικασία πυρόλυσης

Η πυρόλυση έχει αρκετές εφαρμογές που σχετίζονται με την πράσινη τεχνολογία. Βοηθάει στην εξαγωγή χρησικών υλικών από διάφορα είδη βιομάζας, την απομάκρυνση οργανικών ρύπων από εδάφη και λάσπες, και τη δημιουργία βιοκαυσίμων από καλλιέργειες και απόβλητα. Επίσης, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών τα παθογόνα αποδομούνται, ενώ υπάρχει και σημαντική μείωση της υγρασίας της βιομάζας.

Η πυρόλυση της βιομάζας είναι αρκετά υποσχόμενη για την παραγωγή ενεργειακών πηγών που θα μπορούσαν να συμπληρώσουν ή να αντικαταστήσουν την ενέργεια που βασίζεται στο πετρέλαιο. Ουσιαστικά, η πυρόλυση προσφέρει έναν εύελκτο και ελκυστικό τρόπο μετατροπής της βιομάζας σε ένα εύκολα αποθηκευμένο και μεταφερόμενο υλικό, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για την παραγωγή θερμότητας, ηλεκτρικής ενέργειας και οργανικών υλικών.

Σε σύγκριση με άλλες εναλλακτικές μεθόδους έχει μικρότερο αποτύπωμα άνθρακα, παράγει λιγότερα καυσαέρια σε σχέση με την αποτέφρωση και μειώνει την ποσότητα των όξινων αερίων και των διοξινών που σχηματίζονται (Paz-Ferreiro et al., 2018).

### 1.2.2. Είδη πυρόλυσης

Ανάλογα με τον ρυθμό θέρμανσης, η πυρόλυση μπορεί να χαρακτηριστεί ως βραδεία (Slow pyrolysis), ενδιάμεση (intermediate pyrolysis) και ταχεία πυρόλυση (fast pyrolysis). Η βραδεία πυρόλυση λειτουργεί σε μεγάλους χρόνους παραμονής και αργούς ρυθμούς θέρμανσης, μεγιστοποιώντας το στερεό κλάσμα σε βάρος του ενεργειακού προϊόντος. Η ταχεία πυρόλυση

αναλαμβάνει τη θερμοχημική μετατροπή με ρυθμό γρήγορης θέρμανσης, που μεγιστοποιεί τα υγρά και αέρια κλάσματα (Paz-Ferreiro et al., 2018). Οι συνθήκες λειτουργίας της ενδιάμεσης είναι μεταξύ της ταχείας και της βραδείας πυρόλυσης. Επιπλέον, η πυρόλυση μπορεί να είναι ακαριαία (flash pyrolysis), ενώ με βάση το μέσο μπορεί να χαρακτηριστεί υδροπυρόλυση (hydropyrolysis).

Είδος πυρόλυσης	Χρόνος παραμονής	Ρυθμός αύξησης θερμοκρασίας	Τελική Θερμοκρασία (°C)	Προϊόντα
Ταχεία πυρόλυση	1 - 10 min	Πολύ Υψηλός	850 - 1250	Βιοέλαιο
Ακαριαία πυρόλυση	0,1 - 1 s	Υψηλός	900 - 1200	Βιοέλαιο
Ενδιάμεση πυρόλυση	300 - 1000 s	Πολύ Υψηλός	500 - 650	Βιοέλαιο, βιοεξανθράκωμα, βιοαέριο
Πυρόλυση κενού	2 - 30 s	Μέτριος	400	Βιοέλαιο
Υδροπυρόλυση	1 - 10 min	Υψηλός	<500	Βιοέλαιο
Βραδεία πυρόλυση	5 - 60 min	Αρκετά χαμηλός	300 - 600	Βιοεξανθράκωμα

Εικόνα 1- 2: Είδη πυρόλυσης (<https://www.intechopen.com/books/pyrolysis/pyrolysis-a-sustainable-way-to-generate-energy-from-waste>)

### **Βραδεία πυρόλυση ( Slow pyrolysis)**

Η βραδεία πυρόλυση, που χαρακτηρίζεται από μεγάλους χρόνους παραμονής και χαμηλή ταχύτητα θέρμανσης, είναι αυτή που χρησιμοποιείται, όταν το τελικό επιθυμητό προϊόν είναι το βιοεξανθράκωμα. Κατά τη διάρκεια της πυρόλυσης, υπάρχει και παραγωγή των υπόλοιπων κλασμάτων, αλλά σε μικρότερες ποσότητες (Inyang et al., 2015).

Συγκεκριμένα ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας κυμαίνεται από 0,1 έως 1 °C/s και ο χρόνος παραμονής από 5 έως 60min. Οι θερμοκρασίες που συναντώνται σε αυτό το είδος πυρόλυσης είναι συνήθως 300 – 600 °C (Brassard et al., 2016).

### **Ταχεία πυρόλυση (Fast pyrolysis)**

Κατά τη διάρκεια της ταχείας πυρόλυσης η βιομάζα θερμαίνεται σε υψηλή θερμοκρασία χρησιμοποιώντας υψηλό ρυθμό θέρμανσης και σκοπός της είναι η παραγωγή μεγάλου ποσοστού υγρού και αέριου κλάσματος. Με βάση το αρχικό βάρος της βιομάζας παράγονται 60 – 75 % βιοέλαια, 15 – 25 % βιοεξανθράκωμα και 10 – 20 % αέρια (Brassard et al., 2016).

Ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας κυμαίνεται από 10 έως 200 °C/s και ο χρόνος παραμονής από 1 έως 10min. Οι θερμοκρασίες είναι αρκετά υψηλές και κυμαίνονται από 850 έως 1250 °C (Tripathi et al., 2016).

### **Ενδιάμεση πυρόλυση (Intermediate pyrolysis)**

Η διαδικασία αυτή είναι ένας συνδυασμός της ταχείας και της βραδείας πυρόλυσης και έχει στόχο τη μεγαλύτερη δυνατή ισορροπία στα τρία κλάσματα των προϊόντων. Το βασικότερο πλεονέκτημα της ενδιάμεσης πυρόλυσης συγκριτικά με την ταχεία εντοπίζεται στο γεγονός ότι

τα υγρά παράγωγα μπορούν να χρησιμοποιηθούν αυτούσια ως υγρά καύσιμα (Tripathi et al., 2016).

Ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας κυμαίνεται από 0,1 – 10 °C/s και ο χρόνος παραμονής είναι από 300 – 1000s. Οι θερμοκρασίες ανέρχονται στους 500 – 650 °C.

### **Ακαριαία πυρόλυση (Flash pyrolysis)**

Με αυτή την πυρόλυση λόγω των ακραίων συνθηκών λειτουργείας η παραγωγή των βιο – ελαίων μπορεί να φτάσει έως και 75%. Η ποιότητα και η σταθερότητα του παραγόμενου υγρού κλάσματος εξαρτάται από το ποσοστό τέφρας στην αρχική βιομάζα. Ένα βασικό μειονέκτημα αυτής της διαδικασίας είναι το υψηλό κόστος λειτουργίας, κάτι το οποίο την καθιστά οικονομικά ασύμφορη για παραγωγές μικρής κλίμακας (Tripathi et al., 2016).

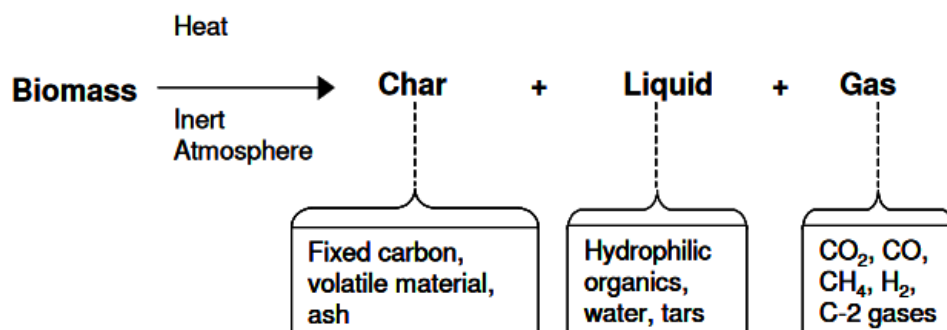
Ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας μπορεί να φτάνει και έως 1000 °C/s και ο χρόνος παραμονής είναι μόλις 0,1 – 1s. Οι θερμοκρασίες ανέρχονται στους 900 – 1200 °C.

### **Υδροπυρόλυση (Hydropyrolysis)**

Η υδροπυρόλυση είναι μία διαδικασία μετατροπής της βιομάζας σε βιοέλαιο. Οι αρχές λειτουργίας της είναι ανάλογες με εκείνες της ταχείας πυρόλυσης με τη μόνη διαφορά πως σε αυτή την τεχνική υπάρχει προσθήκη υδρογόνου ή κάποιου άλλου στοιχείου με βάση το υδρογόνο. Αυτό έχει ως σκοπό την μείωση του οξυγόνου στο βιοέλαιο, αλλά και την αύξηση της παραγωγής του βιοεξανθρακώματος (Tripathi et al., 2016).

### **1.2.3. Προϊόντα πυρόλυσης**

Όπως προαναφέρθηκε, το βιοαέριο σύνθεσης (Syngas), το βιοέλαιο (Bio-oil) και το βιοεξανθράκωμα (Biochar) είναι τα τρία διαφορετικά προϊόντα της πυρόλυσης. Το βιοαέριο σύνθεσης και το βιοέλαιο μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμα ή βιομηχανικές χημικές ουσίες και το βιοεξανθράκωμα θεωρήθηκε ως ένα πολύ ελπιδοφόρο εδαφοβελτιωτικό ύστερα από μία ανακάλυψη στον Αμαζόνιο (Yuan et al., 2015).



Εικόνα 1- 3: Προϊόντα πυρόλυσης (<https://core.ac.uk/download/pdf/278793.pdf>)

### **Υγρά προϊόντα – Βιοέλαιο (Bio – oil)**

Το υγρό προϊόν από την πυρόλυση ονομάζεται βιοέλαιο, έχει σκούρο καφέ χρώμα και έντονη μυρωδιά πίσσας. Αποτελεί ένα περίπλοκο μίγμα νερού και οργανικών χημικών ουσιών και χαρακτηρίζεται από μεγάλη πυκνότητα και ιξώδες. Είναι μίγμα περίπου 300-400 ενώσεων, μερικές εκ των οποίων είναι εστέρες, αιθέρες, αλδεΐδες, κετόνες, φαινόλες, καρβοξυλικά οξέα, ετεροκυκλικά παράγωγα, αλκοόλες αλλά και σύνθετοι οξυγονωμένοι υδρογονάνθρακες (Sanchez et al., 2009). Επιπλέον περιέχει ρητίνες, ενδιάμεσους υδατάνθρακες και αρωματικές ενώσεις (Yaman et al., 2004). Χαρακτηρίζεται από χημική αστάθεια καθότι με την πάροδο του χρόνου και σε συνθήκες αποθήκευσης οι τιμές του ιξώδους του αυξάνουν τα έλαια και τείνουν να διαχωριστούν σε μία λεπτή φάση, πλούσια σε νερό και σε μία παχιά φάση, πλούσια σε οργανικά (Βάμβουκα, 2009). Το υγρό κλάσμα της πυρόλυσης έχει χαμηλότερη κατώτερη θερμογόνο ικανότητα, 13 – 18 MJ/kg, σε σχέση με τη βιομάζα από την οποία έχει προκύψει (Basu et al., 2010).

Το βιοέλαιο δεν είναι κατάλληλο για άμεση χρήση, καθώς η υψηλή περιεκτικότητά του σε νερό εμποδίζει την εύκολη ανάφλεξη και τα οργανικά οξέα που περιέχει μπορούν να διαβρώσουν αρκετά υλικά. Παρόλα αυτά, με την κατάλληλη επεξεργασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως σύνθετο καύσιμο, είτε ως υλικό τροφοδοσίας των διυλιστηρίων πετρελαίου (Maschio et al., 1999). Εκτός από τη χρήση τους ως καύσιμα, τα υγρά προϊόντα της πυρόλυσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πρώτη ύλη για τη σύνθεση χημικών, κολλών, λιπασμάτων, κ.α. (Yaman et al., 2004).

### **Στερεά προϊόντα – Βιοεξανθράκωμα (Biochar)**

Το στερεό προϊόν της πυρόλυσης, το βιοεξανθράκωμα, αποτελείται κυρίως από άνθρακα (περίπου 85%), αλλά μπορεί να περιέχει και μικρές ποσότητες οξυγόνου και υδρογόνου. Επίσης, είναι δυνατόν να περιέχει και ορυκτά υλικά καθώς και μία σημαντική ποσότητα συμπυκνωμένων υποπροϊόντων μεγάλου μοριακού βάρους. Το μικρό μέγεθος των σωματιδίων και η υψηλή πτητικότητα του εξανθρακώματος το καθιστούν εύφλεκτο (θερμοκρασία αυτανάφλεξης 200 – 250 °C). Η κατώτερη θερμογόνο ικανότητα του είναι περίπου 32 MJ/kg και είναι σημαντικά μεγαλύτερη από εκείνη της βιομάζας (Basu et al., 2010). Το βιοεξανθράκωμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα ως στερεό καύσιμο, για την παραγωγή ανθρακόπλινθων, αλλά και στην διαδικασία παραγωγής ενεργού άνθρακα όταν τα χαρακτηριστικά του το επιτρέπουν (πορώδες και ειδική επιφάνεια) [Sanchez, 2009]. Επιπλέον, μπορεί να λειτουργήσει ως εδαφοβελτιωτικό, βελτιώνοντας αρκετές φυσικές, χημικές και βιολογικές ιδιότητες των εδαφών με αποτέλεσμα την αύξηση της απόδοσης των καλλιεργειών (Lehmann & Joseph, 2009). Επίσης, η περαιτέρω επεξεργασία του οδηγεί στην ανάκτηση υλικών (Χιονίδης, 2007).

## **Αέρια Προϊόντα – Βιοαέριο σύνθεσης (Syngas)**

Το αέριο κλάσμα που προκύπτει από την πυρόλυση περιλαμβάνει κυρίως υδρογόνο ( $H_2$ ), μονοξείδιο του άνθρακα ( $CO$ ), διοξείδιο του άνθρακα ( $CO_2$ ) και μεθάνιο ( $CH_4$ ). Επιπλέον, μπορεί να περιέχει αμελητέο κλάσμα αζώτου ( $N_2$ ), νερού ( $H_2O$ ), μείγμα αλκανίων, αλκενίων και αλκίνων όπως αιθένιο ( $C_2H_4$ ), αιθάνιο ( $C_2H_6$ ) και πίσσα. Σε θερμοκρασίες πυρόλυσης μικρότερες των  $500^\circ C$  το αέριο κλάσμα περιέχει αρωματικές ενώσεις και φαινόλες. Η κατώτερη θερμογόνος ικανότητα των αερίων κυμαίνεται μεταξύ 11 και 20 MJ/kg (Basu et al., 2010).

Το syngas μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για την παραγωγή ηλεκτρισμού ή ατμού (λόγω της υψηλής θερμαντικής του αξίας), καθώς και ως βασική χημική ουσία στη βιομηχανία πετροχημικών.

Συνοψίζοντας, τα προϊόντα της πυρόλυσης εξαρτώνται από αρκετούς παράγοντες ως προς το ποσοστό παραγωγής, την απόδοση και την σύνθεσή τους. Αυτοί οι παράγοντες αφορούν τη σύσταση της πρώτης ύλης (υγρασία, ανόργανη ύλη, μέγεθος σωματιδίων) και τις συνθήκες λειτουργίας της πυρόλυσης (θερμοκρασία, παρουσία καταλύτη, χρόνος παραμονής) (Βάμβουκα, 2009).

### **1.3. Βιοεξανθράκωμα (Biochar)**

Βιοεξανθράκωμα, το στερεό υλικό που σχηματίζεται κατά τη διάρκεια της θερμοχημικής αποσύνθεσης της βιομάζας, ορίζεται από την International Biochar Initiative ως «ένα στερεό υλικό που παράγεται από την ανθρακοποίηση της βιομάζας».

Το βιοεξανθράκωμα είναι ένα υλικό πλούσιο σε άνθρακα, αλλά η περιεκτικότητά του σε θρεπτικά συστατικά (N, P, K, Ca) είναι μικρή (Maddox et al., 2013). Αν και το κύριο στοιχείο του βιοεξανθρακώματος είναι ο άνθρακας, περιέχει επίσης υδρογόνο (H), οξυγόνο (O), τέφρα και θείο (S) (Liu et al., 2015). Βέβαια, η στοιχειακή σύνθεσή του ποικίλλει ανάλογα με το είδος βιομάζας από το οποίο παράγεται και τα χαρακτηριστικά της διαδικασίας παραγωγής του (Kambo et al., 2015). Επιπλέον, λόγω των συνυπαρχόντων ανθρακούχων και μην ανθρακούχων κλασμάτων, η επιφάνεια των βιοεξανθρακωμάτων είναι ετερογενής (Masebinu et al., 2019). Λόγω των καλών του χαρακτηριστικών (ειδική επιφάνεια, πορώδης μορφή, επιφανειακές λειτουργικές ομάδες), καθώς και το ότι είναι φθινό και φιλικό προς το περιβάλλον υλικό, το βιοεξανθράκωμα απέκτησε μεγάλη προσοχή όσον αφορά στην αντιμετώπιση πολλών θεμάτων περιβαλλοντικής διαχείρισης (Tan et al., 2015), συμπεριλαμβανομένης της αποκατάστασης του εδάφους (Gul et al., 2015), της μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, τη διαχείριση αποβλήτων και την παραγωγή ενέργειας, (Zhang et al., 2019). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απομάκρυνση βαρέων μετάλλων (As, Ni, Cu, Pb), αλλά και για την προσρόφηση οργανικών και ανόργανων ρύπων. Μάλιστα, σύμφωνα με τους Chun et al. (2004), η ικανότητα προσρόφησης των βιοεξανθρακωμάτων τόσο για τους ανόργανους ρύπους όσο και για τα βαρέα μέταλλα είναι παρόμοια ή και καλύτερη από αυτή του ενεργού άνθρακα. Επίσης, μπορεί να χαρακτηριστεί ως υλικό κάλυψης χώρων υγειονομικής ταφής, αλλά και ως οικοδομικό υλικό (Cao et al., 2012).

### **1.3.1. Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση και τα χαρακτηριστικά του βιοεξανθρακώματος**

Η ποσότητα του βιοεξανθρακώματος που θα παραχθεί από την πυρόλυση (απόδοση βιοεξανθρακώματος), καθώς και οι φυσικές, χημικές και βιολογικές του ιδιότητες, εξαρτώνται από το είδος της αρχικής βιομάζας που υπόκειται σε πυρόλυση και από τις διάφορες παραμέτρους της πυρόλυσης, όπως η θερμοκρασία, ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας και ο χρόνος παραμονής στο φούρνο πυρόλυσης (Agrafioti et al., 2014).

Ο πολλαπλός συνδυασμός αυτών των παραγόντων καθιστά το βιοεξανθράκωμα ένα πολύ ετερογενές προϊόν με μεγάλη ποικιλομορφία ως προς τις ιδιότητές του (Shackley and Sohi, 2010).

#### **Είδος βιομάζας**

Η βιομάζα αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες για την παραγωγή βιοεξανθρακώματος (Kavitha et al., 2018). Η βιομάζα αποτελείται κυρίως από τρεις οργανικές ενώσεις την κυτταρίνη, ημικυτταρίνη και λιγνίνη. Αυτές οι τρεις ενώσεις συμπεριφέρονται διαφορετικά κατά τη θέρμανση και επομένως η σύνθεση της βιομάζας επηρεάζει άμεσα την απόδοση του προϊόντος και τις ιδιότητές του (Weber, 2018). Η ημικυτταρίνη είναι μία ομάδα πολυσακχαριτών με δομή διακλαδιζόμενης αλυσίδας. Είναι το πλέον δραστικό από τα τρία κύρια συστατικά της βιομάζας και αποσυντίθεται σε θερμοκρασίες περίπου 220 – 315 °C (Yang et al., 2007). Η κυτταρίνη είναι επίσης ένας πολυσακχαρίτης, αλλά σε αντίθεση με την ημικυτταρίνη, η δομή της δεν είναι διακλαδιζόμενη. Είναι θερμικά πιο σταθερή και αποσυντίθεται σε θερμοκρασίες μεταξύ 280 – 400 °C (Quicker et al., 2016). Η λιγνίνη είναι ένα πολύπλοκο τρισδιάστατο μακρομόριο με μία ποικιλία διαφορετικών χημικών δεσμών. Ως εκ τούτου, η αποσύνθεσή της δεν συμβαίνει σε περιορισμένη περιοχή θερμοκρασιών, όπως στην κυτταρίνη και την ημικυτταρίνη. Αντιθέτως, η λιγνίνη αποσυντίθεται σε μία ευρεία περιοχή θερμοκρασιών λόγω του μεγάλου αριθμού των λειτουργικών ομάδων με διαφορετικές θερμικές σταθερότητες που περιέχει (Weber, 2018). Η θερμική υποβάθμιση ξεκινά από τους 200 °C και για την ολοκλήρωσή της μπορεί να απαιτήσει θερμοκρασίες έως και 900 °C (Yang et al., 2007). Λόγω λοιπόν, της διαφορετικής θερμικής σταθερότητάς τους, η σύνθεση της βιομάζας από άποψη κυτταρίνης, ημικυτταρίνης και λιγνίνης επηρεάζει αρκετά τη δομή και τις ιδιότητες του βιοεξανθρακώματος (Weber, 2018).

Ένα ευρύ φάσμα κοινών υλών χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη, συμπεριλαμβανομένου του ξύλου, των οργανικών αποβλήτων, των υπολειμμάτων φυτών καθώς και κοπριάς πουλερικών (Ding et al., 2016).

Ειδικότερα, σύμφωνα με τους Lei και Zhang (2013) οι υδραυλικές ιδιότητες του βιοεξανθρακώματος ήταν καλύτερες όταν αυτό παράχθηκε από βιομάζα που προερχόταν από ξύλο σε σχέση με εκείνο που παράχθηκε από απόβλητα γαλακτοκομικών βιομηχανιών.

Επιπλέον, τα βιοεξανθρακώματα που παράγονται από διαφορετικές πρώτες ύλες παρουσιάζουν διαφορές στην περιεκτικότητα των θρεπτικών στοιχείων. Παραδείγματος χάριν, το βιοεξανθράκωμα από κοπριά χοίρων περιείχε μεγάλες ποσότητες αζώτου (N) και φωσφόρου (P), αντίθετα με εκείνο από ζαχαροκάλαμο (*Arundo donax*) που παρουσίαζε μικρές

ποσότητες αυτών των συστατικών (Tsai et al., 2012). Επίσης, η περιεκτικότητα τέφρας στο βιοεξανθράκωμα από απορρίμματα πουλερικών ήταν πολύ υψηλότερη από εκείνο που παράχθηκε από ξύλο (Zheng et al., 2013).

Σύμφωνα με τους Gasco et al. (2016), τα τρία δείγματα βιοεξανθρακώματος που εξέτασε, με πρώτες ύλες ξύλο, υπολείμματα χαρτιού και φλοιών σίτου και λυματολάσπη, έδειξαν σημαντικές διαφορές στις ιδιότητες τους, όπως στα θρεπτικά συστατικά, μέταλλα, τέφρα, άνθρακα, πτητικές ύλες, πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs) και πολυφαινόλες.

Επίσης, στα πειράματα των Mancinelli et al. (2016), τα βιοεξανθρακώματα από κομμάτια ξύλου, λυματολάσπη και λιγνίνη έδειξαν σημαντικές στατιστικές διαφορές στο pH, την αγωγιμότητα (EC) και την τέφρα.

### **Θερμοκρασία Πυρόλυσης**

Μεταξύ των συνθηκών πυρόλυσης, η θερμοκρασία κατέχει τον ρόλο «κλειδί», διότι δεν επηρεάζει μόνο την απόδοση, αλλά επηρεάζει επίσης και τις ιδιότητες του βιοεξανθρακώματος (Kim et al., 2012). Όταν η θερμοκρασία της πυρόλυσης είναι υψηλή, παράγονται μικρότερες ποσότητες βιοεξανθρακώματος και η μικροδομή του αναπτύσσεται αποτελεσματικότερα. Εάν η θερμοκρασία είναι πολύ υψηλή, η απώλεια του άνθρακα και άλλων λειτουργικών στοιχείων είναι αρκετά μεγάλη. Επιπλέον, η υψηλή θερμοκρασία προκαλεί την απελευθέρωση ενώσεων που περιέχουν υδρογόνο, άζωτο και οξυγόνο, συμβάλλοντας έτσι στην αύξηση της περιεκτικότητας του σε άνθρακα (Kavitha et al., 2018). Επίσης, το πορώδες, το μέγεθος των πόρων και η ειδική επιφάνεια του βιοεξανθρακώματος εξαρτάται από τη θερμοκρασία της πυρόλυσης, καθώς έχει παρατηρηθεί πως υψηλές θερμοκρασίες πυρόλυσης οδηγούν στον σχηματισμό πόρων μέσω της απελευθέρωσης πτητικών οργανικών ενώσεων (Brewer et al., 2014).

Η χημική σύνθεση, το pH, το επιφανειακό φορτίο και η θερμική σταθερότητα του βιοεξανθρακώματος, καθώς και η τύχη των βαρέων μετάλλων εξαρτώνται αρκετά από τη θερμοκρασία που πραγματοποιείται η πυρόλυση (Chen et al., 2014).

Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τους Hossain et al. (2011) το βιοεξανθράκωμα που παράγεται σε χαμηλές θερμοκρασίες (300 – 400°C) είναι όξινο, ενώ σε υψηλή θερμοκρασία (700°C) μετατοπίζεται σε αλκαλικό pH. Επίσης, η ηλεκτρική αγωγιμότητα αυξάνεται με θερμοκρασία πυρόλυσης μέχρι 500°C, αλλά μειώνεται κατά το ήμισυ σε υψηλότερες θερμοκρασίες (Paz – Ferreira et al., 2018).

Τα θρεπτικά συστατικά στο βιοεξανθράκωμα καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία πυρόλυσης. Για παράδειγμα, η συγκέντρωση του αζώτου (N) τείνει να μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας (Lang et al., 2005). Σε αντίθεση με το άζωτο (N), ο συνολικός φώσφορος (P) αυξήθηκε από 0,12% σε 0,17% με την αύξηση της θερμοκρασίας από 300°C σε 600°C (Zheng, 2013), ενώ σύμφωνα με τον Paz – Ferreira (2018) όταν η θερμοκρασία ξεπέρασε τους 700°C ο συνολικός φώσφορος αυξήθηκε κατά 43%. Ωστόσο, ο διαθέσιμος φώσφορος στο βιοεξανθράκωμα που παράχθηκε σε χαμηλή θερμοκρασία ήταν περισσότερος από εκείνον που υπήρχε στο βιοεξανθράκωμα μεγάλης θερμοκρασίας (Ding, 2016). Επιπλέον, η συνολική περιεκτικότητα καλίου (K) αυξήθηκε από 3,7% που ήταν σε θερμοκρασία πυρόλυσης 300°C σε

5,02% με αύξηση της θερμοκρασίας κατά 300°C, με ταυτόχρονη αύξηση του διαθέσιμου καλίου (Zheng et al., 2013).

Επιπλέον, παρατηρείται αύξηση της συνολικής συγκέντρωσης των κύριων μακρο-μικροθρεπτικών ουσιών (Ca, Fe, Mg, Cu και Zn) με την αύξηση της θερμοκρασίας (Kavitha et al., 2018).

Βιβλιογραφική Αναφορά	Θερμοκρασίες	Συμπεράσματα
Hossain et al. (2011)	350, 400, 500, 700 °C	Η υψηλή θερμοκρασία πυρόλυσης οδηγεί σε λιγότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα, αλλά και σε λιγότερα βαρέα μέταλλα διαθέσιμα στα φυτά (όπως μετρήθηκε με το DTPA). Μεγάλη διαφορά της τιμής του pH καθώς αλλάζει η θερμοκρασία
Agrafioti et al. (2013)	300, 400, 500 °C	Υψηλότερη απόδοση σε χαμηλότερες θερμοκρασίες
Chen et al. (2014)	500, 600, 700, 800, 900 °C	Τα βιοεξανθρακώματα προσροφούν αποτελεσματικότερα τα βαρέα μέταλλα σε σχέση με τον ενεργό άνθρακα. Αυτό σχετίζεται με την αρωματοποίηση και την ανάπτυξη της δομής των πόρων σε υψηλές θερμοκρασίες.
Roberts et al. (2017)	300, 450, 600, 750 °C	Ο φώσφορος που υπάρχει στη βιομάζα είναι διαθέσιμος στα φυτά ύστερα από τον μετασχηματισμό της σε βιοεξανθράκωμα.
Mendez et al. (2013)	400, 600 °C	Η συνολική ποσότητα των βαρέων μετάλλων αυξάνεται με τη θερμοκρασία, αλλά τα μέταλλα είναι λιγότερο εκχυλίσμα.
Antunes et al. (2017)	300, 400, 500, 600, 700, 800 °C	Η ειδική επιφάνεια του βιοεξανθρακώματος τετραπλασιάστηκε με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Εικόνα 1- 4: Επίδραση θερμοκρασίας πυρόλυσης στα χαρακτηριστικά του βιοεξανθρακώματος (Paz – Ferreiro et al. 2018)

### **Ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας**

Ο ρυθμός θέρμανσης είναι μία άλλη παράμετρος πυρόλυσης που επηρεάζει τη δομή του βιοεξανθρακώματος (Aller, 2016).

Αρχικά, ο ρυθμός πυρόλυσης, όπως προαναφέρθηκε χαρακτηρίζει το είδος πυρόλυσης. Η αργή πυρόλυση λειτουργεί με αργούς ρυθμούς αύξησης της θερμοκρασίας, μεγιστοποιώντας το στερεό κλάσμα (βιοεξανθράκωμα) εις βάρος του ενεργειακού προϊόντος (βιοέλαιο, syngas). Αντίθετα, η ταχεία πυρόλυση αναλαμβάνει τη θερμοχημική μετατροπή με ταχύ ρυθμό θέρμανσης, που μεγιστοποιεί τα υγρά και αέρια κλάσματα (Paz – Ferreiro et al., 2018).

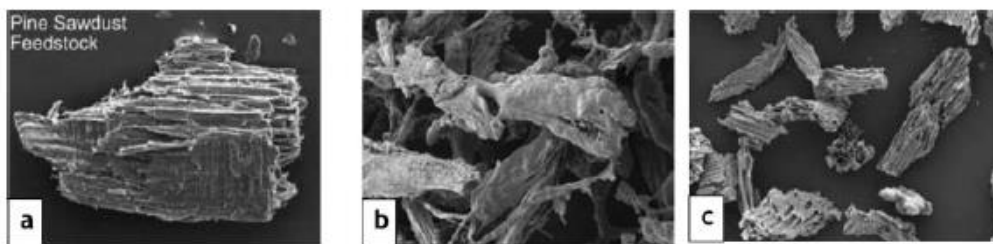
Σύμφωνα με την Aller (2016), υπάρχουν ελάχιστες δομικές διαφορές μεταξύ των βιοεξανθρακωμάτων και της αρχικής βιομάζας όταν ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας είναι χαμηλός. Εντούτοις, παρατηρούνται σημαντικές διαφορές όταν ο ρυθμός είναι υψηλός. Ειδικότερα, η μορφή του βιοεξανθρακώματος είχε ομαλότερες επιφάνειες και σφαιρικές κοιλότητες που δεν έδειχναν ομοιότητα με το αρχικό υλικό.

Έχει παρατηρηθεί πως η ειδική επιφάνεια του βιοεξανθρακώματος μειώνεται σημαντικά με αργούς ρυθμούς θέρμανσης. Συγκεκριμένα, με ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας 30°C/h, η ειδική επιφάνεια των βιοεξανθρακωμάτων από ξύλο αυξήθηκε από 1,5 m<sup>2</sup>/g στους 400°C σε 375 m<sup>2</sup>/g στους 750°C και μειώθηκε πάλι σε 3,5 m<sup>2</sup>/g στους 1000°C. Με ρυθμό θέρμανσης 1000°C/h η τελική επιφάνεια ήταν 355 m<sup>2</sup>/g (Weber, 2018).

Επίσης, ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας φαίνεται να επηρεάζει ελάχιστα την τιμή του pH του βιοεξανθρακώματος (Angin et al., 2013), ενώ έχει διαπιστωθεί πως οι χαμηλοί ρυθμοί συνδέονται με υψηλότερες αποδόσεις (Weber, 2018).

## Χρόνος παραμονής

Ο χρόνος παραμονής της βιομάζας στον αντιδραστήρα είναι ακόμα μία παράμετρος η οποία επηρεάζει το βιοεξανθράκωμα. Η συγκεκριμένη παράμετρος επηρεάζει κυρίως την πορώδη δομή και την ειδική του επιφάνεια (Brassard et al., 2016). Έχει αναφερθεί πως ο μεγάλος χρόνος παραμονής μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια επιφάνειας λόγω της τήξης και της σύντηξης των βιοεξανθρακωμάτων (Brown et al., 2006). Επίσης, έχει αναφερθεί πως ο αυξημένος χρόνος παραμονής μπορεί να αυξήσει τον βαθμό ανθρακοποίησης, αλλά και την τιμή του pH (Weber, 2018). Έχει παρατηρηθεί πως οι ιδανικοί χρόνοι αναφορικά με την βελτιστοποίηση της παραγωγής του βιοεξανθρακώματος κυμαίνονται στο εύρος 30 – 60min.



Εικόνα 1- 5: Φωτογραφίες από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. α) Βιομάζα από πευκοβελόνες, β) Βιοεξανθράκωμα με θερμοκρασία πυρόλυσης 950°C και χαμηλό ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας, γ) Βιοεξανθράκωμα με θερμοκρασία πυρόλυσης 950°C και υψηλό ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας (Cetin et al., 2004)

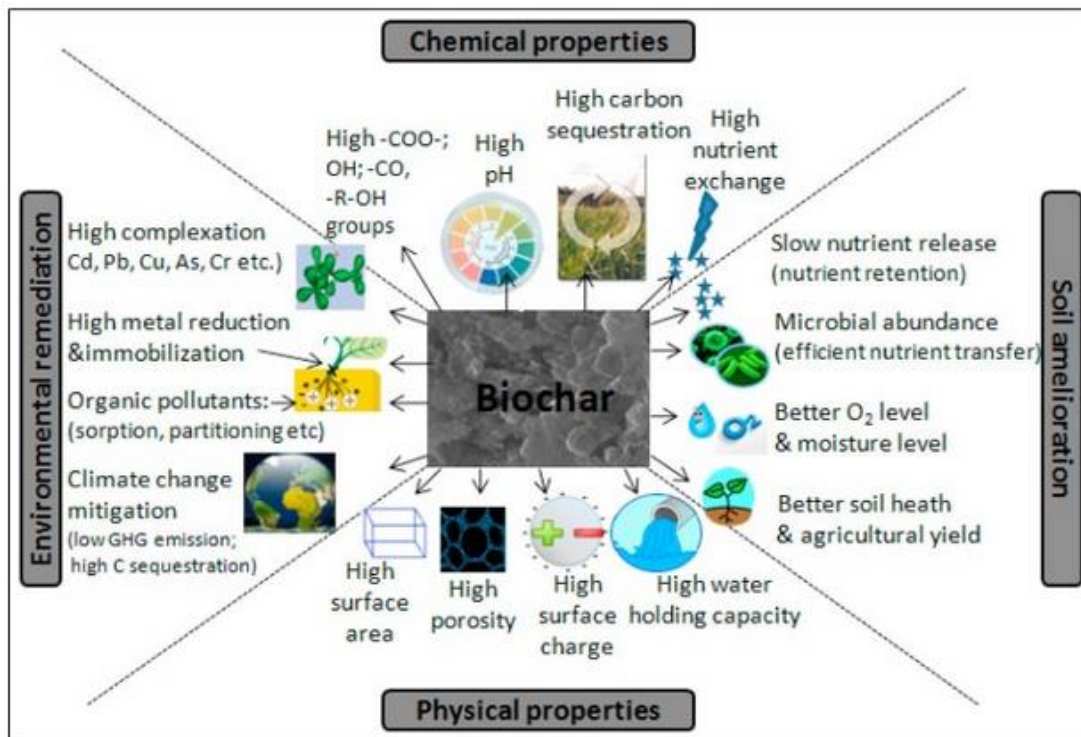
### **1.3.2. Φυσικές ιδιότητες του βιοεξανθρακώματος και παράγοντες που τις επηρεάζουν**

Το βιοεξανθράκωμα διαθέτει μοναδικές φυσικές ιδιότητες όπως μεγάλη ειδική επιφάνεια, μεγάλο πορώδες και αυξημένες επιφανειακές λειτουργικές ομάδες. Τα φυσικά χαρακτηριστικά του βιοεξανθρακώματος εξαρτώνται κυρίως από τις παραμέτρους της πυρόλυσης (ιδιαίτερα της θερμοκρασίας), αλλά και από το αρχικό οργανικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή του.

Έχει παρατηρηθεί πως η ειδική επιφάνεια, αλλά και το πορώδες αυξάνονται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία πυρόλυσης (Vaugh et al., 2018). Επιπλέον, σύμφωνα με τον Lu (2015) η ειδική επιφάνεια και το πορώδες αυξήθηκαν με αυξανόμενο χρόνο παραμονής έως 2h στους 500 – 900 °C, αλλά μειώθηκαν όταν ο χρόνος παραμονής ξεπέρασε τις 2h. Αντίθετα, η Bandoz (2001) παρατήρησε στη μελέτη της ότι με την πυρόλυση ιλύος από μονάδα βιολογικού καθαρισμού, η μειώθηκε η ειδική επιφάνεια (από 141 m<sup>2</sup>/g σε 125 m<sup>2</sup>/g), αλλά και το πορώδες (από 0.209 cm<sup>3</sup>/g σε 0.187 cm<sup>3</sup>/g), όταν ο χρόνος παραμονής αυξήθηκε από 30min σε 1h σε θερμοκρασία πυρόλυσης 950°C. Επίσης, η ειδική επιφάνεια των βιοεξανθρακωμάτων σε σύγκριση με την ακατέργαστη ιλύ αυξήθηκε περίπου μία τάξη μεγέθους μετά από πυρόλυση σε θερμοκρασίες 400 – 600 °C (Jin et al., 2016).

### 1.3.3. Χημικές ιδιότητες βιοεξανθρακώματος και παράγοντες που τις επηρεάζουν

Ως χημικές ιδιότητες του βιοεξανθρακώματος μπορούν να θεωρηθούν το ποσοστό της τέφρας (ash%), το ποσοστό άνθρακα (C%), το ποσοστό αζώτου (N%), το pH, η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC), η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων (CEC) και τα μακροθρεπτικά και μικροθρεπτικά στοιχεία (Manolikaki, 2018). Οι ιδιότητες αυτές εξαρτώνται από το είδος της αρχικής ύλης που χρησιμοποιείται για την παραγωγή του βιοεξανθρακώματος, αλλά και από τις παραμέτρους της πυρόλυσης.



Εικόνα 1- 6: Φυσικοχημικές ιδιότητες βιοεξανθρακώματος και η συμβολή του στην την περιβαλλοντική αποκατάσταση και τη βελτίωση του εδάφους (Oliviera et al., 2017)

Είναι σημαντικό να γνωρίζουμε την περιεκτικότητα σε τέφρα του βιοεξανθρακώματος, επειδή η ποσότητα και ο τύπος των ανόργανων μπορεί να καθορίσει πιθανές εφαρμογές του (Weber, 2018). Η περιεκτικότητα του σε τέφρα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την περιεκτικότητα σε τέφρα της αρχικής βιομάζας (Weber, 2018). Σημαντικές διαφορές παρατηρήθηκαν μεταξύ διάφορων τύπων βιομάζας. Βιοεξανθρακώματα από βιομάζα πλούσια σε λιγνίνη παρουσίασαν μικρή περιεκτικότητα σε τέφρα, ενώ εκείνα από βιομάζα με μικρά ποσοστά λιγνίνης είχαν μεγάλη περιεκτικότητα σε τέφρα (Aller, 2016). Ανεξάρτητα από την θερμοκρασία πυρόλυσης ο Mukome (2013) παρατήρησε πως το βιοεξανθράκωμα από ξύλο είχε μικρότερη περιεκτικότητα σε τέφρα από εκείνα που είχαν ως πρώτη ύλη απόβλητα. Στα πειράματά του ο Jin (2016) παρατήρησε πως υπάρχει θετική συσχέτιση μεταξύ της θερμοκρασίας πυρόλυσης και της περιεκτικότητας σε τέφρα του βιοεξανθρακώματος. Συγκεκριμένα, βρήκε πως το ποσοστό τέφρας αυξήθηκε σημαντικά (κατά 15,6%) με την αύξηση της θερμοκρασίας από 400 σε 600°C. Οι σημαντικές διαφορές που προκύπτουν από τις διαφορετικές θερμοκρασίες οφείλονται στο γεγονός ότι υπάρχουν μικρές μεταβολές στη

συγκέντρωση των μετάλλων κατά τη διάρκεια της θερμοχημικής διεργασίας και τα μέταλλα συγκεντρώνονται στο βιοεξανθράκωμα λόγω της απώλειας πτητικών ενώσεων, όπως οξυγόνο, υδρογόνο και άνθρακας (Aller, 2016).

Επίσης, έχει βρεθεί πως υπάρχει ισχυρή αρνητική συσχέτιση μεταξύ του ποσοστού τέφρας και του ποσοστού άνθρακα (Gasco et al., 2016).

Επειδή μία από τις κύριες εφαρμογές του βιοεξανθρακώματος είναι να δεσμεύει τον άνθρακα από τα εδάφη, το ποσοστό του άνθρακα που περιέχεται σε αυτό είναι μεγάλης σημασίας. Το βιοεξανθράκωμα είναι ουσιαστικά μία μορφή μαύρου άνθρακα αποτελούμενο από άνθρακα, του οποίου η μορφή μπορεί να είναι από στοιχειακή μορφή έως μία μικρή ποσότητα πολυαρωματικού άνθρακα (Chun et al., 2004).

Η περιεκτικότητα σε άνθρακα του βιοεξανθρακώματος εξαρτάται από την πρώτη ύλη, καθώς και τις παραμέτρους που υιοθετήθηκαν για την παραγωγή του (Chintala et al., 2013). Στα πειράματά της, η Aller (2016) παρατήρησε πως τα βιοεξανθρακώματα από υλικά πλούσια σε λιγνίνη (κέλυφος καρυδιών) είχαν υψηλές τιμές άνθρακα, αντίθετα από εκείνα που παράχθηκαν από βιομάζα χαμηλής περιεκτικότητας σε λιγνίνη (κοπριά).

Το ποσοστό του άνθρακα αυξάνεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία πυρόλυσης (Antal et al., 2003). Στην ακατέργαστη βιομάζα, το ποσοστό άνθρακα κυμαίνεται μεταξύ 10 – 30 %. Με την πυρόλυση όμως σε θερμοκρασίες 250 – 350 °C, το ποσοστό άνθρακα αυξάνεται περίπου στο 50 – 60 %. Παρόλο που σε αυτή τη μικρή περιοχή θερμοκρασιών υπάρχει αρκετά μεγάλη αύξηση του ποσοστού, για να φτάσει πάνω από 90% χρειάζεται θερμοκρασίες πάνω από 700°C (Weber, 2018).

Επιπλέον, σύμφωνα με τον Gasco (2016), υπάρχει αρνητική συσχέτιση μεταξύ του ποσοστού άνθρακα και του ποσοστού τέφρας. Το βιοεξανθράκωμα με περιεκτικότητα τέφρας μικρότερη από 20% εμφανίζει μεγαλύτερο ποσοστό άνθρακα από το βιοεξανθράκωμα με ποσοστό τέφρας μεγαλύτερο από 20% (Aller, 2016). Από την Aller (2016) παρατηρήθηκε επίσης πως με πυρόλυση βιομάζας από ξύλο στους 250°C, το ποσοστό άνθρακα αυξήθηκε όταν ο χρόνος παραμονής αυξήθηκε από 30 σε 900min.

Το άζωτο (N) μπορεί να θεωρηθεί το δεύτερο σημαντικότερο στοιχείο μετά τον άνθρακα, καθώς είναι βασικό θρεπτικό στοιχείο για τις καλλιέργειες (Atkinson et al., 2010). Οι διαφορές στις τιμές του αζώτου (N) στο βιοεξανθράκωμα μπορούν να αποδοθούν στην ποικιλομορφία των πρώτων υλών και στις διαφορετικές συνθήκες λειτουργείας της πυρόλυσης (Gascin, 2008). Σύμφωνα με την Aller (2016), η πηγή της βιομάζας είναι ένας σημαντικός παράγοντας για την περιεκτικότητα του αζώτου (N) στο βιοεξανθράκωμα. Βιοεξανθρακώματα από φύκια και κοπριά παρουσίασαν υψηλά ποσοστά αζώτου, ενώ βιοεξανθρακώματα από βιομάζα πλούσια σε λιγνίνη είχαν αρκετά χαμηλά ποσοστά N (<1%) (Aller, 2016).

Η θερμοκρασία πυρόλυσης έχει επίδραση στο ποσοστό αζώτου του βιοεξανθρακώματος (Aller, 2016), αλλά δεν υπάρχει σαφής συσχέτιση [Quicker, 2016]. Στα πειράματά του, ο Hossain (2011) παρατήρησε πως το ποσοστό του αζώτου (N) μειώνεται όταν αυξάνεται η θερμοκρασία πυρόλυσης. Οι μεγαλύτερες απώλειες υπήρχαν σε βιοεξανθρακώματα από κοπριά και λυματολάσπη, ενώ οι μικρότερες απώλειες αζώτου σε βιοεξανθρακώματα από βιομάζα πλούσια σε λιγνίνη (Hossain et al., 2011). Αντίθετα, υπάρχουν μελέτες που δείχνουν ότι η περιεκτικότητα σε άζωτο αυξάνει, όσο αυξάνεται η θερμοκρασία. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τους Keiluweit et al. (2010) το ποσοστό αζώτου (N) των βιοεξανθρακωμάτων από βιομάζα πλούσια σε λιγνίνη αυξήθηκε όταν υπήρξε αύξηση στη θερμοκρασία πυρόλυσης. Παρόμοια αποτελέσματα προέκυψαν και στη μελέτη του Novak (2009), ο οποίος ανέφερε πως

το βιοεξανθράκωμα από κέλυφος καρυδιού είχε μεγαλύτερα ποσοστά αζώτου σε θερμοκρασία πυρόλυσης 700°C από ότι στους 300°C. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι οι βιομάζα από φυτικά υλικά έχει δομές σύνθετου αζώτου που ίσως να χρειάζονται μεγαλύτερες θερμοκρασίες για να αποδομηθούν (Gaskin et al., 2008). Επιπλέον, σύμφωνα με την Aller (2016) η συμπεριφορά του αζώτου χωρίζεται σε δύο στάδια. Στην αρχή, το ποσοστό του αζώτου αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας μέχρι να φτάσει σε κάποιο ανώτατο όριο, και μετά καθώς η θερμοκρασία συνεχίζει να αυξάνεται οι τιμές του αζώτου μειώνονται. Αυτό μπορεί να υποδεικνύει πως και άλλοι παράγοντες, όπως ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας και ο χρόνος παραμονής, επηρεάζουν τα ποσοστά αζώτου στο βιοεξανθράκωμα (Aller, 2016).

Η τιμή του pH είναι μία σημαντική παράμετρος. Οι Lehmann et al. (2007) και οι Shackley και Sohi (2010) ανέφεραν πως το βιοεξανθράκωμα μπορεί να παραχθεί σε σχεδόν οποιοδήποτε pH μεταξύ 4 και 12 επιλέγοντας κατάλληλες πρώτες ύλες και συνθήκες λειτουργίας. Το pH του βιοεξανθρακώματος αυξάνεται σταδιακά με τη διαδικασία της πυρόλυσης από όξινο σε αλκαλικό. Αυτό δικαιολογείται επειδή κατά τη διάρκεια της πυρόλυσης γίνεται απελευθέρωση αλκαλικών αλάτων από την πυρολυτική δομή και το οργανικό άζωτο υπάρχει υπό τη μορφή αμίνης (Huang et al., 2017).

Αποτελέσματα από αρκετές έρευνες υποδηλώνουν ότι ο τύπος της βιομάζας είχε σημαντική επίδραση στις τιμές του pH του βιοεξανθρακώματος. Η ακατέργαστη βιομάζα είναι όξινη ή ελαφρώς βασική με τιμές pH κυμαινόμενες μεταξύ 5 και 7,5. (Vassilev et al., 2010), αλλά με τη διαδικασία της πυρόλυσης το pH αυξάνεται κατά περίπου 2,5 μονάδες (Mendez et al., 2012). Η βιομάζα πλούσια σε λιγνίνη και από κέλυφος καρυδιού παρήγαγαν βιοεξανθράκωμα με μέσες τιμές pH περίπου 8. Υψηλότερες τιμές pH (>9.5) ήταν σε βιοεξανθρακώματα από κοπριά/απορρίμματα και φύκια, ενώ βιομάζα πλούσια σε κυτταρίνη παρουσίασε τιμές pH κοντά στο 9 (Aller, 2016). Επίσης έχει αναφερθεί ότι η εξαιρετικά αρωματική δομή της βιομάζας έχει σημαντική επίδραση στην τιμή του pH του βιοεξανθρακώματος (Lu et al., 2013), καθώς και η περιεκτικότητά της σε ανόργανα άλατα (Yuan, 2011).

Αρκετές μελέτες έχουν δείξει ότι ο τύπος και οι συνθήκες λειτουργίας της πυρόλυσης (θερμοκρασία πυρόλυσης και χρόνος παραμονής) επηρεάζουν τις τιμές του pH του βιοεξανθρακώματος. Τα συστήματα βραδείας πυρόλυσης (μέχρι περίπου 475°C) δίνουν όξινο βιοεξανθράκωμα (pH<7), η ταχεία πυρόλυση σε θερμοκρασία 500°C παράγει ουδέτερο βιοεξανθράκωμα (pH=7), ενώ πάνω από αυτή τη θερμοκρασία το βιοεξανθράκωμα είναι αλκαλικό (pH>8) και σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (>800°C), το βιοεξανθράκωμα μπορεί να φτάσει σε τιμή pH ίση με 12 (Aller, 2016).

Καθώς η θερμοκρασία πυρόλυσης αυξάνεται, οι τιμές του pH αυξάνονται από ελαφρώς όξινο έως έντονα βασικό (Vaugh et al., 2018). Σύμφωνα με τα πειράματα του Tan (2014), με χρήση λυματολάσπης ως πρώτη ύλη και αυξανόμενη θερμοκρασία πυρόλυσης το pH του βιοεξανθρακώματος αυξανόταν όσο μεγάλωνε η θερμοκρασία. Συγκεκριμένα, για θερμοκρασίες 500, 600, 700, 800 και 900°C το pH ήταν 8.81, 9.54, 11.11, 12.18 και 12.15 αντίστοιχα.

Επιπροσθέτως, η τιμή του pH μπορεί να αυξηθεί αυξάνοντας τον χρόνο παραμονής. Εντούτοις, το αποτέλεσμα είναι σημαντικό μόνο κατά τα πρώτα 5 – 10 min της ανθρακοποίησης (Wang et al., 2013). Ο ρυθμός θέρμανσης έχει παρατηρηθεί πως έχει μικρή έως αμελητέα επίδραση στην τιμή του pH (Angin et al., 2013).

Επιπλέον, υπάρχει μία σημαντική θετική συσχέτιση μεταξύ της περιεκτικότητας σε τέφρα και της τιμής pH των βιοεξανθρακώματων που πυρολύθηκαν στην περιοχή θερμοκρασιών 400 – 600°C (Zheng et al., 2013). Μελέτες έχουν δείξει πως βιοεξανθρακώματα από κοπριά και απόβλητα, που έχουν μεγάλη ποσότητα τέφρας, έδειξαν μεγάλες τιμές pH, ενώ τα βιοεξανθρακώματα από βιομάζα πλούσια σε λιγνίνη, με χαμηλή περιεκτικότητα σε τέφρα, παρουσίασαν χαμηλότερες τιμές pH Yuan et al., 2011).

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) δείχνει την περιεκτικότητα των αλάτων στο βιοεξανθράκωμα. Μπορεί να χαρακτηριστεί ως μία χρήσιμη παράμετρος αφού μπορεί να μας δείξει την ενδεχόμενη αλατότητα του εδάφους όταν υπάρχει σε αυτό υψηλή ποσότητα βιοεξανθρακώματος (Cantrell et al., 2012; Lehmann and Joseph, 2009b).

Η τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC), όπως και των άλλων ιδιοτήτων του βιοεξανθρακώματος, εξαρτάται από την αρχική βιομάζα (Aller, 2016). Στα πειράματά της η Aller (2016) παρατήρησε πως το βιοεξανθράκωμα από φύκια παρουσίασε υψηλές τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας, ενώ το βιοεξανθράκωμα από κέλυφος καρυδιών είχαν τις χαμηλότερες τιμές EC. Βιοεξανθρακώματα από απόβλητα είχαν ενδιάμεσες τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

Έρευνες παρουσιάζουν διαφορές στη συσχέτιση μεταξύ της θερμοκρασίας πυρόλυσης και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Οι Song και Guo (2012) διαπίστωσαν ότι η τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στο βιοεξανθράκωμα από απορρίμματα πουλερικών αυξήθηκε αρκετά όταν αύξησαν τη θερμοκρασία πυρόλυσης. Αντίθετα, ο Cantrell (2012) παρατήρησε χαμηλή σχέση μεταξύ των τιμών της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και της θερμοκρασίας πυρόλυσης. Σύμφωνα με τον Paz – Ferreira (2018), η ηλεκτρική αγωγιμότητα αυξήθηκε με την αύξηση της θερμοκρασίας μέχρι τους 500°C, αλλά μειώθηκε κατά το ήμισυ σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Επιπλέον, έχει αναφερθεί ότι οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας αυξήθηκαν όταν αυξήθηκε η περιεκτικότητα σε τέφρα στα βιοεξανθρακώματα (Song and Guo, 2012; Aller, 2016).

Η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων (CEC) είναι η ποσότητα ανταλλάξιμων κατιόντων  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$  και  $\text{NH}_4^+$  που μπορεί να συγκρατήσει ένα υλικό. Χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη γονιμότητα των εδαφών, επειδή σχεδόν όλα τα θρεπτικά συστατικά που χρησιμοποιούνται από τα φυτά λαμβάνονται στην ιοντική τους μορφή (Robertson, 1999). Οι τιμές της CEC του βιοεξανθρακώματος επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες, όπως τον τύπο βιομάζας, τη διαδικασία πυρόλυσης, τη θερμοκρασία πυρόλυσης, το pH του βιοεξανθρακώματος, την αναλογία O/C και την περιεκτικότητα σε μέταλλα (Fuertes et al., 2010; Kookana et al., 2010).

Αρκετές έρευνες έχουν δείξει πως η πηγή της βιομάζας επηρεάζει την τιμή της CEC του βιοεξανθρακώματος. Συγκεκριμένα, τα βιοεξανθρακώματα από απόβλητα και φύκια τείνουν να έχουν υψηλές τιμές CEC, αντίθετα με εκείνα από κέλυφος καρυδιού (Aller, 2016).

Ο τύπος της πυρόλυσης, αλλά και οι συνθήκες της διεργασίας αναφέρονται επίσης ως παράγοντες που επηρεάζουν τις τιμές της CEC (Aller, 2016). Οι Lee et al. (2010) έδειξαν πως οι τιμές της CEC σε βιοεξανθρακώματα από ταχεία πυρόλυση ήταν περίπου διπλάσιες από εκείνες των βιοεξανθρακώματων που παράχθηκαν από αεριοποίηση. Η θερμοκρασία πυρόλυσης επηρεάζει αρκετά την τιμή της CEC του βιοεξανθρακώματος, αν και ο μηχανισμός δράσης της είναι λίγο ασαφής. Μελέτες έχουν δείξει πως η τιμή της CEC αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας πυρόλυσης, έως ότου φτάσει σε μία μέγιστη τιμή, μετά την οποία η τιμή της CEC μειώνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία (Gaskin et al., 2008; Harvey et al., 2011). Η θερμοκρασία στην οποία η CEC φθάνει τη μέγιστη τιμή της κυμαίνεται από 300 έως

550°C (Kookana et al., 2011; Lee et al., 2010). Οι Harvey et al. (2011) ανέφεραν ότι η μείωση στην τιμή της CEC με την αύξηση της θερμοκρασίας πυρόλυσης οφείλεται στην αρωματοποίηση του βιοεξανθρακώματος, που προκλήθηκε από την απώλεια επιφανειακών λειτουργικών ομάδων.

Επιπλέον, έχει αναφερθεί πως υπάρχει συσχέτιση μεταξύ της τιμής της CEC και του pH του βιοεξανθρακώματος (Lehmann et al., 2007; Silber et al., 2010). Η αύξηση της τιμής της CEC και του pH ήταν διαφορετική για κάθε τύπο βιοεξανθρακώματος. Στο βιοεξανθράκωμα από φύκια η τιμή της CEC διπλασιάζεται κάθε φορά που αυξάνεται το pH κατά μία μονάδα, ενώ η αύξηση αυτή σε βιοεξανθράκωμα από απόβλητα ήταν εκθετική (Aller, 2016).

Οι Harvey et al. (2011) έδειξαν ότι οι υψηλές τιμές CEC σχετίζονται με την εμφάνιση ελεύθερων μορίων υδροξυλίου, τα οποία παράγονται λόγω του πολυμερισμού της λιγνοκυτταρίνης και της θερμικής οξειδωσης των παραγόμενων παραπροϊόντων.

Ο φώσφορος (P) μπορεί να θεωρηθεί ως ένα ακόμα βασικό θρεπτικό στοιχείο για τη γεωργία. Στα βιοεξανθρακώματα υπάρχουν δύο τύποι φωσφόρου: ο ολικός φώσφορος (TP) και ο διαλυτός φώσφορος (Aller, 2016).

Η συνολική περιεκτικότητα του βιοεξανθρακώματος σε φώσφορο εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την πρώτη ύλη (Bridle and Pritchard, 2004) και από τη θερμοκρασία πυρόλυσης (Aller, 2016).

Οι τιμές του ολικού φωσφόρου στο βιοεξανθράκωμα κυμαίνονται από 0,001 έως 73,00 g/kg, ανάλογα με το είδος της βιομάζας που χρησιμοποιήθηκε ως πρώτη ύλη (Atkinson et al., 2010), ενώ του διαλυτού φωσφόρου από 0,014 έως 16,6 g/kg (Song and Guo, 2012). Στην έρευνά της, η Aller (2016) παρατήρησε πως τα βιοεξανθρακώματα από απόβλητα είχαν αρκετά υψηλή περιεκτικότητα σε φώσφορο, σε σχέση με εκείνα που είχαν ως πρώτη ύλη φυτικό υλικό (κέλυφος καρυδιών).

Η περιεκτικότητα του φωσφόρου αυξάνεται με την αύξηση στις θερμοκρασίες. Συγκεκριμένα, η συνολική περιεκτικότητα φωσφόρου του βιοεξανθρακώματος αυξήθηκε κατά 43% όταν η θερμοκρασία πυρόλυσης από 300°C έφτασε τους 700°C (Paz-Ferreiro et al., 2018). Παρόμοια συμπεριφορά έχει αναφερθεί και για το κάλιο (K) (Niето et al., 2018).

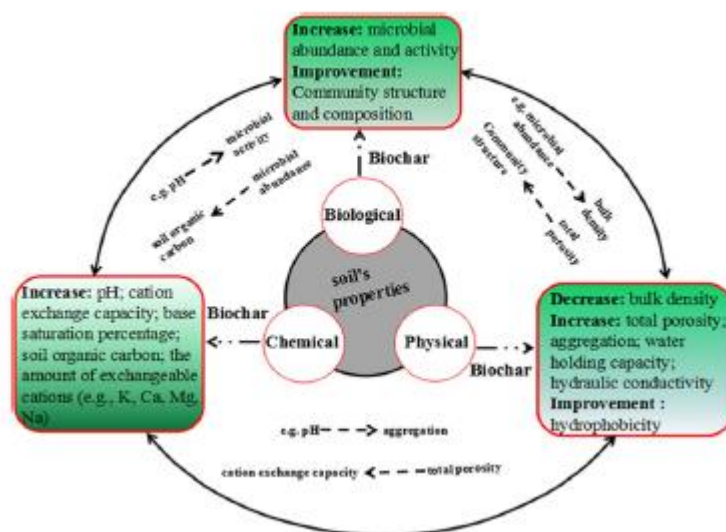
Τα μακροθρεπτικά (K, Na, Ca, Mg) είναι σημαντικά για την ανάπτυξη των φυτών. Υπάρχουν στα βιοεξανθρακώματα υπό την μορφή διαλυτών ή αδιάλυτων ενώσεων. Τα διαλυτά κατιόντα μπορούν να δεσμευτούν εύκολα από τα φυτά όταν εφαρμόσουμε βιοεξανθράκωμα στο έδαφος, σε αντίθεση με τα αδιάλυτα, τα οποία παραμένουν στο βιοεξανθράκωμα (Aller, 2016). Οι συγκεντρώσεις των μακροθρεπτικών ποικίλλουν αρκετά λόγω του τύπου της βιομάζας που χρησιμοποιείται για την παραγωγή του βιοεξανθρακώματος. Βιοεξανθρακώματα από βιομάζα με υψηλή περιεκτικότητα σε τέφρα (κοπριά, απόβλητα) εμφανίζουν μεγάλη συγκέντρωση μακροθρεπτικών, σε σχέση με βιοεξανθρακώματα που προέρχονται από βιομάζα με μικρά ποσοστά τέφρας (κέλυφος καρυδιού) (Gaskin et al., 2008). Η επίδραση της θερμοκρασίας πυρόλυσης εξαρτάται από το είδος κατιόντων (Aller, 2016). Για παράδειγμα, οι Chan και Xu (2009) ανέφεραν απώλειες K και Na λόγω εξάτμισης, 48% και 55% αντίστοιχα, σε βιοεξανθρακώματα από ρύζι, όταν η θερμοκρασία αυξήθηκε από τους 400°C στους 673°C. Αντίθετα, το Ca και το Mg αυξάνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας πυρόλυσης, καθώς οι απώλειες λόγω εξάτμισης για αυτά τα στοιχεία ξεκινούν από τους 1000°C, και συνήθως τα βιοεξανθρακώματα παράγονται σε μικρότερες θερμοκρασίες (Chan and Xu, 2009).

Η διαθεσιμότητα των μικροθρεπτικών (Fe, Zn, Mn, Cu) στα βιοεξανθρακώματα είναι αρκετά σημαντική. Τα βιοεξανθρακώματα, ειδικά εκείνα που έχουν ως πρώτη ύλη κοπριές / απόβλητα, μπορούν να περιέχουν υψηλή συγκέντρωση μικροθρεπτικών, η οποία μπορεί να είναι τοξική για τα φυτά και επιβλαβής για το περιβάλλον (Aller, 2016). Οι Gaskin et al. (2008) μελέτησαν τη συμπεριφορά των μικροθρεπτικών συστατικών σε βιοεξανθρακώματα από απορρίμματα πουλερικών, φλοιό φιστικιών και φλοιό πεύκου που παράχθηκαν στους 400 – 500°C. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα βιοεξανθρακώματα από απορρίμματα πουλερικών είχαν την μεγαλύτερη ολική συγκέντρωση μικροθρεπτικών σε σχέση με εκείνα από φλοιό φιστικιών και φλοιό πεύκου.

Τα μικροθρεπτικά δεν υφίστανται κάποια απώλεια με τη διαδικασία της πυρόλυσης και έτσι συσσωρεύονται με την αύξηση της θερμοκρασίας (Gaskin et al., 2008). Συγκεκριμένα, ο Cantrell (2012) έδειξε πως το βιοεξανθράκωμα από απόβλητα που παράχθηκε στους 700°C είχε διπλάσια συγκέντρωση μικροθρεπτικών από εκείνο που παράχθηκε σε θερμοκρασία 350°C.

#### 1.4. Επίδραση του βιοεξανθρακώματος στο έδαφος

Το βιοεξανθράκωμα μπορεί να αποτελέσει σημαντικό εργαλείο για την αύξηση της γονιμότητας των εδαφών σε περιοχές με εξαντλημένα εδάφη, λιγοστούς οργανικούς πόρους και ανεπαρκή εφοδιασμό σε νερό και θρεπτικά στοιχεία. Η εφαρμογή βιοεξανθρακώματος στο έδαφος μπορεί να επηρεάσει τη δομή, το πορώδες, την κατανομή των σωματιδίων και την πυκνότητα του. Με αυτόν τον τρόπο μεταβάλλει ενδεχομένως την περιεκτικότητα του εδάφους σε οξυγόνο, την ικανότητα αποθήκευσης νερού καθώς και τη μικροβιακή και θρεπτική ικανότητά του στη ζώνη των ριζών (Amonette et al., 2009). Επιπλέον, έχει αναφερθεί πως το βιοεξανθράκωμα μπορεί να επιφέρει αλλαγές στο pH, την ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) και την ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων (CEC) του εδάφους (Liang et al., 2006).



Εικόνα 1- 7: Επίδραση βιοεξανθρακώματος στις ιδιότητες του εδάφους (Ding et al., 2016)

#### 1.4.1. Φυσικές ιδιότητες

Οι φυσικές ιδιότητες του εδάφους μπορούν να τροποποιηθούν με την εφαρμογή βιοεξανθρακώματος. Η προσθήκη βιοεξανθρακώματος μπορεί να αυξήσει τον αερισμό του εδάφους (Chan et al., 2007; Githinji, 2014), το πορώδες και την ικανότητα κατακράτησης αποθήκευσης του νερού, καθώς και να μειώσει τη φαινομενική του πυκνότητα (Lu et al., 2014; Nelissen et al., 2015).

Τα βιοεξανθρακώματα έχουν υψηλό ολικό πορώδες και μπορούν να συγκρατήσουν εύκολα το νερό με αποτέλεσμα την αύξηση της υδατοϊκανότητας του εδάφους στο οποίο έχουν προστεθεί. Επιπλέον, λόγω του μεγάλου πορώδες έχουν την ικανότητα να επιτρέπουν στο νερό να διεισδύσει από την επιφάνεια του εδάφους στη περιοχή των ριζών (Aller, 2016). Έχει αναφερθεί πως η αύξηση της υδατοϊκανότητας μπορεί να είναι έως και 22% (Peake et al., 2014) και ίσως είναι ο κύριος λόγος για τη βελτίωση της απόδοσης του εδάφους (Jeffery et al., 2011). Σύμφωνα με τον Lu (2014), μετά την εφαρμογή βιοεξανθρακώματος από ρύζι στο έδαφος, αυξήθηκε η τιμή του πορώδους κατά 20% και σημειώθηκε μείωση της διόγκωσης του εδάφους κατά 11,1%.

Επιπλέον, υπάρχουν ενδείξεις ότι η προσθήκη βιοεξανθρακώματος στα εδάφη αυξάνει την προσροφητική ικανότητα του εδάφους, γεγονός που μπορεί να επιφέρει είτε θετικά είτε αρνητικά αποτελέσματα στις καλλιέργειες, στα εδάφη και στο περιβάλλον. Οι θετικές επιδράσεις περιλαμβάνουν τη μείωση και την πρόληψη της ρύπανσης των υπόγειων υδάτων από βαρέα μέταλλα, ζιζανιοκτόνα και εξαιρετικά τοξικές οργανικές ενώσεις, όπως PAHs και PCBs (Cabrera et al., 2011).

Οι παράγοντες που σχετίζονται με την αποτελεσματικότητα του βιοεξανθρακώματος στις φυσικές ιδιότητες του εδάφους είναι η βιομάζα με την οποία έχει παραχθεί το βιοεξανθράκωμα, οι συνθήκες πυρόλυσης, η δόση του βιοεξανθρακώματος που θα εφαρμοστεί στο έδαφος, αλλά και η σύσταση του εδάφους (Aller, 2016). Ο Novak (2009), ο οποίος μελέτησε την επίδραση του είδους του βιοεξανθρακώματος στην κατακράτηση νερού, διαπίστωσε πως το βιοεξανθράκωμα από απορρίμματα πουλερικών δεν είχε καμία επίδραση στην κατακράτηση νερού του εδάφους, αντίθετα με το βιοεξανθράκωμα από switchgrass που σχεδόν διπλασίασε την κατακράτηση σε σύγκριση με τον μάρτυρα.

Μελέτες έχουν δείξει πως η δόση του βιοεξανθρακώματος που θα εφαρμοστεί στο έδαφος έχει γραμμική συσχέτιση με την υδατοϊκανότητά του. Συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερη είναι η δόση, τόσο υψηλότερη θα είναι η υδατοϊκανότητα του εδάφους (Githinji et al., 2014).

#### 1.4.2. Χημικές ιδιότητες

Η εφαρμογή βιοεξανθρακώματος στο έδαφος, μπορεί να επιφέρει αρκετές αλλαγές στις χημικές του ιδιότητες. Ειδικότερα, έρευνες έχουν δείξει έντονες αλλαγές στο pH, την ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων, την ηλεκτρική αγωγιμότητα, τον οργανικό άνθρακα, καθώς και στο άζωτο (N) και στον φώσφορο (P).

Με την προσθήκη βιοεξανθρακώματος σε εδάφη έχει παρατηρηθεί αλλαγή στο pH των εδαφών. Η προσθήκη του βιοεξανθρακώματος συνήθως αυξάνει το pH του εδάφους, λόγω της απελευθέρωσης βασικών κατιόντων και της υψηλής περιεκτικότητας σε ανθρακικό ασβέστιο του βιοεξανθρακώματος (Chintala et al., 2014). Μελέτες έχουν δείξει πως η μεταβολή του pH

εξαρτάται αρκετά από τη βιομάζα από την οποία έχει παραχθεί το βιοεξανθράκωμα. Συγκεκριμένα, οι Wang et al. (2014) ανέφεραν πως το βιοεξανθράκωμα από ρύζι αύξησε το pH του εδάφους (όξινο έδαφος) από 3.33 σε 3.63, ενώ το pH γεωργικού εδάφους αυξήθηκε κατά μία μονάδα όταν σε αυτό προστέθηκε βιοεξανθράκωμα από ξύλο (*Quercus spp.* και *Carya spp.*)

Η αύξηση του pH θα μπορούσε να αλλάξει τη μορφή των θρεπτικών ουσιών και να διευκολύνει ορισμένα στοιχεία στην προσρόφησή τους από τη ρίζα (Chintala et al., 2014). Παρόλα αυτά, έχει αναφερθεί ότι οι μεταβολές του pH του εδάφους με την προσθήκη βιοεξανθρακώματος δεν είναι μόνιμες και η τιμή του pH επιστρέφει στην αρχική της τιμή (Castaldi et al., 2011, Mukherjee et al., 2014).

Το βιοεξανθράκωμα μπορεί να αυξήσει την τιμή της CEC του εδάφους βραχυπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα, ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες και το είδος του βιοεξανθρακώματος (Cheng et al., 2008). Ο Laird (2010) παρατήρησε πως το βιοεξανθράκωμα αύξησε την τιμή της ικανότητας ανταλλαγής κατιόντων του εδάφους έως και 30% σε σχέση με το μάρτυρα, ενώ ο Cheng (2008) ανέφερε αύξηση στην τιμή της CEC εδαφών σε μία περίοδο 20 ετών με την πάροδο του χρόνου.

Με την εφαρμογή βιοεξανθρακώματος στο έδαφος παρατηρείται αύξηση της ηλεκτρικής του αγωγιμότητας (Hossain et al., 2010). Συγκεκριμένα, ο Mendez (2012) ανέφερε πως αυτή η αύξηση ήταν τετραπλάσια σε σύγκριση με τον μάρτυρα.

Η περιεκτικότητα του άνθρακα στο έδαφος αυξάνεται σημαντικά με την εφαρμογή βιοεξανθρακώματος, το οποίο μπορεί να οφείλεται στην φύση του άνθρακα που υπάρχει στο βιοεξανθράκωμα (Lehmann et al., 2003).

Μελέτες έδειξαν αύξηση των επιπέδων του διαθέσιμου φωσφόρου (P) στο έδαφος σε σύγκριση με το έδαφος ελέγχου (Faria et al., 2017). Επιπλέον, έχει αναφερθεί αύξηση της περιεκτικότητας των θρεπτικών ουσιών (Na, K, Ca, Mg) του εδάφους με την προσθήκη βιοεξανθρακώματος. Συγκεκριμένα, οι Wang et al (2014) έδειξαν πως οι ποσότητες των θρεπτικών μπορούν να αυξηθούν έως και 670% μετά την προσθήκη βιοεξανθρακώματος.

#### **1.4.3. Βιολογικές ιδιότητες**

Η τροποποίηση των εδαφών από την προσθήκη βιοεξανθρακώματος μπορεί να δημιουργήσει καλοήγη περιβάλλοντα για τους μικροοργανισμούς, δεδομένου ότι η εφαρμογή βιοεξανθρακώματος μπορεί να βελτιώσει τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους και να διορθώσει τα προβλήματα που δημιουργούνται από την αλκαλικότητα, την οξύτητα, την ανεπάρκεια θρεπτικών στοιχείων και την τοξικότητα των μετάλλων (Yu et al., 2019). Οι πόροι του βιοεξανθρακώματος μπορούν να λειτουργήσουν ως χώρος καταφυγής ή μικροβιότοπος για τους μικροοργανισμούς, οι οποίοι χρησιμοποιούν τον άνθρακα (C), τα θρεπτικά συστατικά και το νερό που υπάρχει στο βιοεξανθράκωμα για να αναπτυχθούν και να αναπαραχθούν. Επίσης, με την προσθήκη βιοεξανθρακώματος αυξάνεται ο ρυθμός αναπνοής του εδάφους και αρκετές έρευνες έχουν αναφέρει πως αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των μικροοργανισμών του εδάφους (Ameloot et al., 2013).

Τα βακτήρια και οι μύκητες χρησιμοποιούν τα εξωκυτταρικά τους ένζυμα για να αποδομήσουν τα υποστρώματα, συμπεριλαμβανομένου του άνθρακα από το βιοεξανθράκωμα, σε μικρότερα μόρια που μπορούν να ληφθούν από τα κύτταρά τους και να χρησιμοποιηθούν για

διάφορες μεταβολικές δραστηριότητες (Dahlawi et al., 2018). Η μικροβιακή βιομάζα άνθρακα θεωρείται ένας δείκτης οποιασδήποτε μεταβολής της περιεκτικότητας και της αποσύνθεσης του οργανικού άνθρακα του εδάφους. Επομένως, οι διαδικασίες και τα υλικά που επηρεάζουν την περιεκτικότητα του άνθρακα στο έδαφος, μπορούν να επηρεάσουν και τη δραστηριότητα της μικροβιακής κοινότητας (Yu et al., 2019). Σύμφωνα λοιπόν με τους Yu et al. (2019), η εφαρμογή βιοεξανθρακώματος στα εδάφη βελτίωσε τους συμβιωτικούς μυκορριζικούς μύκητες έτσι ώστε να μπορούν να αποικίσουν στις ρίζες των φυτών αφού βελτιώθηκε το πορώδες του εδάφους, το οποίο παίζει σημαντικό ρόλο στη βελτίωση της αλληλεπίδρασης των μυκήτων με τις ρίζες των φυτών.

Πίνακας 1 - 1: Επίδραση διάφορων ειδών βιοεξανθρακώματος στις ιδιότητες του εδάφους

<i>Είδος Βιοεξανθρακώματος</i>	<i>Τύπος εδάφους</i>	<i>Επίδραση στις ιδιότητες του εδάφους / αλλαγές στην ποιότητα του εδάφους</i>	<i>Βιβλιογραφική Αναφορά</i>
<i>Διάφορα είδη βιομάζας</i>	Διάφορα είδη εδάφους	Αύξηση του pH, της CEC, του διαθέσιμου K, Ca και Mg, του ολικού N και του διαθέσιμου P στο έδαφος. Μείωση του κορεσμού του Al στα όξινα εδάφη.	Glaser et al., 2002; Schulz and Glaser, 2012
<i>Ξυλάνθρακας (Wood charcoal)</i>	Anthrosol, Ferralsol	Αύξηση της περιεκτικότητας του C, του pH και του διαθέσιμου P του εδάφους. Μείωση της έκπλυσης της λίπανσης N, Ca και Mg. Μείωση της περιεκτικότητας του Al.	Chan et al., 2007; Lehmann et al., 2003a
<i>Κορμός ευκαλύπτου, φύλλα καλαμποκιού</i>	Ιλυοπηλώδες	Αύξηση του ολικού N που προέρχεται από την ατμόσφαιρα κατά 78%. Υψηλό ολικό N στο έδαφος που είχε προστεθεί βιοεξανθράκωμα.	Guerena et al., 2012, 2015; Rondon et al., 2007
<i>Ξυλάνθρακας (Wood charcoal)</i>	Haplic Acrisols	Αύξηση του συνολικού πορώδους από 46% σε 51% και κορεσμός της υδραυλικής αγωγιμότητας του εδάφους κατά 88%. Μείωση της πυκνότητας κατά 9%.	Oguntunde et al., 2008
<i>Φλοιός φιστικιών, κέλυφος πεκάν, απορρίμματα πουλερικών</i>	Πηλοαμμώδες	Τα βιοεξανθρακώματα που παράχθηκαν με υψηλή θερμοκρασία πυρόλυσης αύξησαν το pH του εδάφους. Το βιοεξανθράκωμα από απορρίμματα πουλερικών αύξησε το διαθέσιμο P και Na.	Novak et al., 2009
<i>Ξύλο και φλοιός φιστικιών – Κοπριά πουλερικών – Φλοιός σιταριού</i>	Αμμώδες έδαφος	Αύξηση της διαθεσιμότητας του P από 163 σε 208%. Μείωση της AMF του εδάφους.	Madiba et al., 2016; Warnock et al., 2010
<i>Ξύλο, κοπριά</i>	Διάφορα είδη εδάφους	Αύξηση της κορεσμένης υδραυλικής αγωγιμότητας του εδάφους και της πρόσβασης των φυτών στο νερό. Αύξηση της CEC και της συνολικής συγκέντρωσης N στο έδαφος. Μείωση της έκπλυσης του NH <sub>4</sub> -N.	Abel et al., 2013; Ajay et al., 2016; Atkinson et al., 2010; Stavi, 2012
<i>Κοπριά, καλαμπόκι, ξύλο, απόβλητα φαγητού</i>	Alfisol	Η συγκέντρωση και η πρόσληψη του N μειώθηκε με την αύξηση της θερμοκρασίας πυρόλυσης και της δόσης εφαρμογής, αλλά αυξήθηκε η περιεκτικότητα του K και του Na.	Rajkovich et al., 2012
<i>Διάφορα είδη βιομάζας</i>	Διάφορα είδη εδάφους	Αυξημένη απόδοση καλλιέργειας, βελτιωμένος μικροβιακός βιότοπος και μικροβιακή βιομάζα εδάφους, αυξημένη συγκέντρωση K στο φυτό. Αύξηση pH, P, K, ολικό N και ολικός C εδάφους.	Biederman and Harpole, 2013; Thies et al., 2015

Φλοιός φιστικιών	Ultisols	Αύξηση K, Ca και Mg στην επιφάνεια του εδάφους (0 – 15 cm). Αύξηση K στους φυτικούς ιστούς.	Gaskin et al., 2010
<i>Simoca</i>	Πηλοαμμώδες, Αργιλώδες	Αύξηση της μικροβιακής δραστηριότητας περισσότερο στο αργιλώδες έδαφος σε σύγκριση με το πηλώδες.	Jaafar et al., 2015b
<i>Ακακία</i>	Planosol	Αύξηση του πορώδους είτε άμεσα με τη δημιουργία πόρων είτε με τη βελτίωση της σταθερότητας των συσσωματωμάτων.	Hardie et al., 2014
<i>Άχυρο σίτου</i>	Fimi – Orthic Anthrosol	Αύξηση pH, οργανικού C, ολικού N του εδάφους. Μείωση εκπομπών N <sub>2</sub> O.	Li et al., 2015

### 1.5. Επίδραση βιοεξανθρακώματος στην καλλιέργεια φυτών

Η εφαρμογή βιοεξανθρακώματος έχει αποδειχθεί ότι επιφέρει ένα ευρύ φάσμα πλεονεκτημάτων για την ανάπτυξη των φυτών και τη διαχείριση των καταπονήσεων των φυτών. Μελέτες έχουν τεκμηριώσει τον ρόλο του βιοεξανθρακώματος στη βελτίωση των αγρονομικών παραμέτρων και του περιβάλλοντος για διάφορα φυτικά είδη (Kavitha et al., 2018). Η προσθήκη λιγότερου από 5% κ.β. βιοεξανθρακώματος ενίσχυσε τη βλάστηση, την απόδοση και την ανάπτυξη των ριζών αλοφύτων, όπως η *Serbania* και το *Kosteletzkyia* (Zheng et al., 2017). Οι Alvarez – Campos et al. (2018) έδειξαν πως το βιοεξανθράκωμα από ρύζι που εφαρμόστηκε με ρυθμό 2% κ.β. σε αμμώδες έδαφος αύξησε την απόδοση της βιομάζας και την περιεκτικότητα σε σάκχαρα στα φυτά ζαχαροκάλαμου. Οι Manolikaki and Diamadopoulos (2017) βρήκαν ότι με την προσθήκη βιοεξανθρακώματος 2% κ.β. από φλοιούς ρυζιού και στέμφυλα με ή χωρίς κόμποστ, το ξηρό βάρος των υπέργειων φυτικών ιστών του *Lolium perenne* L. (διάρκεια καλλιέργειας 3 μηνών) αυξήθηκε κατά 59 – 78% σε σύγκριση με τον μάρτυρα. Επίσης, οι ίδιοι συγγραφείς σε μία άλλη μελέτη τους (Manolikaki and Diamadopoulos, 2019) διαπίστωσαν ότι η εφαρμογή βιοεξανθρακώματος από στέμφυλα 2% κ.β. αύξησε σημαντικά το ξηρό βάρος των υπέργειων φυτικών ιστών (155%), σε σύγκριση με τον μάρτυρα, ενώ ο συνδυασμός βιοεξανθρακώματος φλοιών ρυζιού με κόμποστ αύξησε κατά 436% το ξηρό βάρος των υπέργειων φυτικών ιστών καλλιέργειας καλαμποκιού (*Zea Mays* L.) διάρκειας 1 μήνα.

Επιπλέον, η προσθήκη βιοεξανθρακώματος από φλοιό καρύδας συσχετίστηκε με αύξηση κατά 90% της βιομάζας του καλαμποκιού (*Zea mays* L.) σε σύγκριση με τον έλεγχο, ο οποίος δεν περιείχε βιοεξανθράκωμα (Gonzaga et al., 2018). Σε άλλη μελέτη, η εφαρμογή βιοεξανθρακώματος από μπαμπού σε συγκεντρώσεις λιγότερο από 10% κ.β. προήγαγε την ανάπτυξης της σόγιας (Scheifele et al., 2017). Όσον αφορά στην ανάπτυξη των ριζών, η ριζική βιομάζα μπορεί να αυξηθεί σημαντικά όταν χρησιμοποιείται αλκαλικό βιοεξανθράκωμα παρά όξινο (Borpp et al., 2016). Η εφαρμογή βιοεξανθρακώματος μπορεί επίσης να βελτιώσει τους κύκλους των θρεπτικών στοιχείων. Για παράδειγμα, στην καλλιέργεια σίτου η προσθήκη βιοεξανθρακώματος (με ρυθμό 10%) βελτίωσε την αγρονομική απόδοση του αζώτου (N) κατά 63% (Abbas et al., 2017).

Οι καταπονήσεις των φυτών είναι ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζουν τα γεωργικά περιβάλλοντα. Υπάρχουν τόσο βιοτικές, όσο και αβιοτικές καταπονήσεις των φυτών. Πολλές μελέτες έχουν αναφέρει πως το βιοεξανθράκωμα έχει τη δυνατότητα να μετριάσει αυτές τις καταπονήσεις των φυτών (Kavitha et al., 2018). Οι Paneque et al. (2016) διαπίστωσαν πως το βιοεξανθράκωμα αύξησε σημαντικά την αποδοτικότητα χρήσης του νερού των ηλιοτρόπιων που αναπτύσσονται κάτω από συνθήκες ανεπαρκούς διαθεσιμότητας νερού. Ομοίως, το βιοεξανθράκωμα μπορεί να εμποδίσει την πρόσληψη ψευδαργύρου (Zn) από το φυτό που αναπτύσσεται σε έδαφος ρυπασμένο από ψευδάργυρο και να βελτιώσει την ανάπτυξη του φυτού (*Ficus benjamina*) υπό συνθήκες μεταβολισμού του μετάλλου (Kumar et al., 2018).

Πίνακας 1 - 2: Επίδραση διαφορετικών ειδών βιοεξανθρακώματος σε καλλιέργειες

<i>Είδος βιοεξανθρακώματος και δόση εφαρμογής</i>	<i>Είδος καλλιέργειας</i>	<i>Επίδραση στην καλλιέργεια</i>	<i>Βιβλιογραφική αναφορά</i>
<i>Ξύλο από μάνγκο (0, 8, 16 t ha<sup>-1</sup>), καλαμπόκι (2,6 – 91 t ha<sup>-1</sup>)</i>	Καλαμπόκι	Αύξηση βιομάζας κατά 30 – 43 % και αύξηση απόδοσης κατά 22% λόγω της βελτίωσης του pH, της CEC, της διαθεσιμότητας των θρεπτικών και της συγκράτησης του νερού στο έδαφος.	Rajkovich et al., 2012; Rondon et al., 2006
<i>Φλοιός ακακίας (10 L m<sup>-2</sup>)</i>	Καλαμπόκι – Φιστίκι	Διπλάσια αύξηση της απόδοσης στο καλαμπόκι και στο φιστίκι λόγω του υψηλού N, των ανταλλάξιμων βάσεων και του χαμηλού Al.	Yamato et al., 2006
<i>Ξύλο από δέντρα (Teak και Rose wood) (4 – 16 t ha<sup>-1</sup>)</i>	Ρύζι – Σόργο	Βελτίωση στην ανάπτυξη του φυτού. Διπλάσια – τριπλάσια αύξηση απόδοσης.	Asai et al., 2009; Steiner et al., 2007
<i>Κοκοφοίνικας (0, 10, 20, 40 t ha<sup>-1</sup>), κόμποστ</i>	Ρύζι	Αύξηση της απόδοσης κατά 141 – 472%.	Bakar et al., 2015
<i>Κέλυφος καρυδιού Macademia (0, 5, 10, 20 t ha<sup>-1</sup>)</i>	Καλαμπόκι – Μαρούλι	Το βιοεξανθράκωμα με υψηλή πτητική ύλη (225 g kg <sup>-1</sup> ) μείωσε την ανάπτυξη των φυτών και την NH <sub>4</sub> – N του εδάφους σε σύγκριση με το βιοεξανθράκωμα με χαμηλή πτητική ύλη (63 g kg <sup>-1</sup> ).	Deenik et al., 2010
<i>Χαρτί (10 t ha<sup>-1</sup>)</i>	Σιτάρι – Ραπανάκι	Αύξηση βιομάζας κατά 250%.	Van Zwieten et al., 2010
<i>Ξύλο, κοπριά αγελάδας (0, 10, 15, 20 t ha<sup>-1</sup>)</i>	Καλαμπόκι	Αύξηση της απόδοσης από 14% σε 150% λόγω της αύξησης της αποδοτικότητας χρήσης του νερού, του pH και του διαθέσιμου Ca και Mg και μείωση της ανταλλάξιμης οξύτητας.	Major et al., 2010; Uzoma et al., 2011

<i>(Ξύλο από καρατομημένα δέντρα) (30, 60 t ha<sup>-1</sup>), ξύλο, σιτάρι (10 t ha<sup>-1</sup>)</i>	Σιτάρι	Αύξηση στη βλάστηση των σπόρων κατά 4 – 9 %, βελτίωση απόδοσης κατά 30%, σταθερή απόδοση για 2 συνεχή έτη.	Solaiman et al., 2012; Vaccari et al., 2011
<i>Βλαστός Cassava, κοπριά αγροκτήματος, καλαμπόκι</i>	Καλαμπόκι – Cassava	Αύξηση της απόδοσης λόγω της βελτίωσης του οργανικού C, N, P, CEC, K του εδάφους.	Abiven et al., 2015; Islami et al., 2011
<i>Φυτικά απόβλητα, απορρίμματα πουλερικών (0, 10, 25, 50, 100 t ha<sup>-1</sup>)</i>	Ραπανάκι	Αύξηση της απόδοσης (42 – 96%) λόγω βελτίωσης των φυσικοχημικών ιδιοτήτων του εδάφους, της διαθεσιμότητας του N και της μείωσης του ανταλλάξιμου Al.	Chan et al., 2007,2008
<i>Λυματολάσπη (10 t ha<sup>-1</sup>)</i>	Κεράσι – Τομάτα	Αύξηση της απόδοσης κατά 64% σε σύγκριση με τον μάρτυρα λόγω της αύξησης της διαθεσιμότητας του N, P.	Hossain et al., 2010
<i>Πευκοβελόνες (0, 5, 10, 15 t ha<sup>-1</sup>)</i>	Τομάτα	Αύξηση της ανάπτυξης του φυτού, της απόδοσης και των ποιοτικών χαρακτηριστικών.	Dunlop et al., 2015
<i>Ακακία, κοπριά πουλερικών (10 t ha<sup>-1</sup>)</i>	Μήλο	Αύξηση της περιμέτρου του κορμού, χωρίς καμία αύξηση στην απόδοση ή την ποιότητα.	Eyles et al., 2015
<i>Ξύλο κίτρου (1,3 ή 5% κ.ο.)</i>	Πυρεριά – Τομάτα	Αύξηση της επιφάνειας των φύλλων, νωπού βάρους φύλλων και απόδοσης.	Grabner et al., 2010
<i>Άχυρο ρυζιού (14 t ha<sup>-1</sup>)</i>	Τομάτα	Αύξηση της CEC, του οργανικού C και διαθέσιμου N, P και K του εδάφους χωρίς να επηρεάσει τον καρπό.	Vaccari et al., 2015
<i>Φλοιοί ρυζιού (25, 50, 150 g kg<sup>-1</sup>)</i>	Μαρούλι – Λάχανο	Αύξηση της βιομάζας κατά 903%, αύξηση του Ca, Mg και K του εδάφους.	Carter et al., 2013
<i>Άχυρο καλαμποκιού (20, 30, 40 t ha<sup>-1</sup>)</i>	Λάχανο – Αμάραντος	Αύξηση της απόδοσης κατά 28 – 48%. Μείωση των εκπομπών N <sub>2</sub> O και CH <sub>4</sub> .	Jia et al., 2012

## 1.6. Τομάτα

Η τομάτα είναι από της σημαντικότερες καλλιέργειες παγκοσμίως λόγω της παραγωγής και του όγκου κατανάλωσής της (Mendez et al., 2011). Για παράδειγμα, το 2008, συλλέχθηκαν 114.116 εκατομμύρια τόνοι τομάτας, και τα πιο αξιοσημείωτα κράτη παραγωγής ήταν η Κίνα, οι Ηνωμένες Πολιτείες, η Ινδία, η Τουρκία, η Αίγυπτος, η Ιταλία, το Ιράν, η Βραζιλία, η Ισπανία και το Μεξικό (FOASTAT, 2011). Η τομάτα είναι γνωστή παγκοσμίως τόσο για τα νωπά προϊόντα της, όσο και για τα επεξεργασμένα προϊόντα που παράγονται από αυτή. Διατίθεται όλο τον χρόνο και είναι πλούσια σε ουσίες όπως βιταμίνη C, φλαβονοειδή, καροτενοειδή, φαινολικές ενώσεις και μέταλλα (Metchell et al., 2012). Ο καρπός της τομάτας περιέχει περίπου 5% ολικά στερεά και 93,41% νερό, ενώ το υπόλοιπο περιλαμβάνει πολύτιμες θρεπτικές ουσίες, κυρίως φυτικές ίνες, πρωτεΐνες και αντιοξειδωτικά (Deolinda, 2009). Η τομάτα είναι μία σημαντική πηγή βιταμινών και μετάλλων. Συγκεκριμένα, οι τομάτες είναι πλούσιες σε βιταμίνες A, B, C, και E, σε κάλιο και σίδηρο (Lavelli et al., 2011; Maroulis and Saravacos, 2003). Μάλιστα, συχνά η κατανάλωση καρπών τομάτας, αλλά και προϊόντων της (χυμός τομάτας, σάλτσες τομάτας), συνδέονται με χαμηλότερο κίνδυνο καρδιαγγειακών και καρκινικών νοσημάτων (Lavelli et al., 2011).

Οι εμπορικές ποικιλίες καλλιεργήσιμης τομάτας ανήκουν στην ποικιλία *Lycopersicon esculentum*, Mill συνώνυμο *Solanum lycopersicum* (Davies and Hobson, 1981).

Στην Ελλάδα η τομάτα καταλαμβάνει τη δεύτερη θέση μετά την πατάτα (Σάββας, 2016). Όπως σε όλες σχεδόν τις μεσογειακές χώρες το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής τομάτας προέρχεται από υπαίθριες καλλιέργειες. Από την συνολική έκταση που καταλαμβάνει η καλλιέργεια της τομάτας στην Ελλάδα για παραγωγή νωπών καρπών, το 80% περίπου εκτιμάται ότι αντιστοιχεί σε υπαίθριες καλλιέργειες. Ωστόσο η καλλιέργειά της εκτός εποχής σε θερμοκήπια αυξάνει συνεχώς (Sargent & Moretti, 2004). Στην Ελλάδα το μεγαλύτερο ποσοστό θερμοκηπίων που καλλιεργούν τομάτα βρίσκεται στην Κρήτη, δεύτερη έρχεται η Πελοπόννησος και η Δυτική Στερεά Ελλάδα και τρίτη η Μακεδονία (Κατσογιάννη, 2010). Το μεγαλύτερο μέρος της έκτασης της καλλιέργειας, περίπου 62,5% αφορά καλλιέργεια βιομηχανικής τομάτας που προορίζεται για μεταποίηση, ενώ το 34,3% αφορά καλλιέργεια τομάτας για επιτραπέζια χρήση (Κατσογιάννη, 2010).

Το άζωτο (N) είναι το πιο περιοριστικό θρεπτικό συστατικό για την ανάπτυξη της τομάτας και απαιτείται σε μεγάλη ποσότητα για τη βέλτιστη παραγωγή, καθώς η τομάτα προσλαμβάνει μεγάλη ποσότητα αζώτου από το έδαφος. Η έλλειψη αζώτου στο έδαφος μπορεί να οδηγήσει σε καχεκτική ανάπτυξη και κιτρίνισμα των φύλλων στη βάση του φυτού (Needham et al., 1973). Τα νεότερα φύλλα παραμένουν μικρά και το χρώμα τους ανοιχτό πράσινο και σε σοβαρές περιπτώσεις, τα υπάρχοντα φύλλα γίνονται κίτρινα και «πεθαίνουν» πρόωρα. Επιπλέον, η έλλειψη αζώτου μπορεί να μειώσει τον αριθμό, το μέγεθος, την ποιότητα, το χρώμα και τη γεύση των καρπών της τομάτας (Sainju et al., 2003).

Ο φώσφορος (P) συμβάλλει στην έναρξη της ανάπτυξης της ρίζας της τομάτας (Sainju et al., 2003). Η έντονη ανάπτυξη των ριζών που προκαλείται από τον φώσφορο βοηθά

στην καλύτερη αξιοποίηση του νερού και άλλων θρεπτικών συστατικών στο έδαφος και προάγει τη ανάπτυξη υγιούς βλαστού και φυλλώματος (Gould et al., 1983). Όπως και το άζωτο (N), το κάλιο (K) λαμβάνεται από την τομάτα σε μεγάλη ποσότητα, καθώς η συγκέντρωση του καλίου στην τομάτα είναι η υψηλότερη σε σχέση με τη συγκέντρωση των άλλων θρεπτικών στοιχείων. Το κάλιο βοηθά στην ανάπτυξη του φυτού, του καρπού και προκαλεί πρόωπη άνθηση, αυξάνοντας έτσι την απόδοση του φυτού τομάτας (Varis et al., 1985). Επιπλέον, το κάλιο μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα των καρπών της τομάτας (Sainju et al., 2003).

### **1.7. Επίδραση βιοεξανθρακώματος στην καλλιέργεια τομάτας**

Μελέτες έχουν δείξει πως με την προσθήκη βιοεξανθρακώματος οι ιδιότητες των φυτών όπως το ύψος των φυτών της τομάτας, ο αριθμός των φύλλων, η διάμετρος των βλαστών, τα νωπά και ξηρά βάρη των υπέργειων και υπόγειων τμημάτων των φυτών βελτιώθηκαν σημαντικά (Agbna, 2017; Hossain et al., 2010).

Το ύψος των φυτών τομάτας, στα πειράματα των Hossain et al. (2011), που άρχισε να μετριέται από την 5<sup>η</sup> εβδομάδα έως την 15<sup>η</sup> παρουσίασε τη διπλάσια ανάπτυξη από εκείνη που είχαν τα φυτά, στα οποία δεν είχε εφαρμοστεί βιοεξανθράκωμα. Στα πειράματα της η Agbna (2017) βρήκε πως το νωπό και το ξηρό βάρος του φυτού αυξήθηκε σημαντικά καθώς αύξησε τη δόση του βιοεξανθρακώματος. Το ίδιο ανέφερε και για την απόδοση παραγωγής της τομάτας όταν αύξησε την παροχή νερού και τη δόση του βιοεξανθρακώματος. Όμοια αποτελέσματα αναφέρθηκαν από τους Hossain et al. (2011), όπου οι μεταχειρίσεις που είχαν βιοεξανθράκωμα παρουσίασαν αύξηση στον αριθμό των καρπών έως και 122% σε σύγκριση με τον μάρτυρα. Επιπλέον, έχει παρατηρηθεί πως οι καρποί της τομάτας στις μεταχειρίσεις που έχει εφαρμοστεί βιοεξανθράκωμα είναι ομοιόμορφοι και με καλό σχήμα (Hossain et al., 2015).

Επίσης, η εφαρμογή βιοεξανθρακώματος στην καλλιέργεια τομάτας αύξησε αρκετά τα ποσοστά φωτοσύνθεσης των φύλλων και τα ποσοστά διαπνοής, καθώς και άλλες φυσιολογικές ιδιότητες (Kammann et al., 2011; Wang et al., 2014). Αυτό οφείλεται κυρίως στη βελτίωση της υδατικής κατάστασης του φυτού και της οργανικής ουσίας του εδάφους που ενισχύουν τη φωτοσυνθετική ικανότητα των φυτών της τομάτας. (Agbna, 2017).

Τα βιοεξανθρακώματα, ανάλογα με την πηγή πρώτης ύλης, εκτός από θρεπτικά στοιχεία πολλές φορές περιέχουν και επικίνδυνες ουσίες, όπως βαρέα μέταλλα. Η συσσώρευση βαρέων μετάλλων, κυρίως αρσενικού (As), καδμίου (Cd), χρωμίου (Cr), χαλκού (Cu), μόλυβδου (Pb), νικελίου (Ni), σεληνίου (Se) και ψευδάργυρου (Zn) προκαλεί μεγάλη ανησυχία στα αγροτικά προϊόντα λόγω πιθανής απειλής για την υγεία των ανθρώπων και των ζώων. Παρόλα αυτά, τα αποτελέσματα αναλύσεων καρπών τομάτας έδειξαν ότι όλα αυτά τα μέταλλα λαμβάνονται από τους καρπούς, αλλά η ποσότητά τους δεν είναι επιβλαβής, καθώς είναι κάτω από τα όρια επικινδυνότητας (Hossain et al., 2011). Οι συγκεντρώσεις των μετάλλων στους καρπούς τομάτας που προέρχονταν από τις μεταχειρίσεις με τα βιοεξανθρακώματα

ήταν χαμηλότερες από αυτές που προέρχονταν από τις μεταχειρίσεις με την αρχική βιομάζα, επειδή οι ρίζες των φυτών είναι οι κύριοι αποδέχτες συσσώρευσης μετάλλων για τα φυτικά είδη (Piechalak et al., 2002).

Τα ευεργετικά αποτελέσματα του βιοεξανθρακώματος στην ανάπτυξη των φυτών τομάτας οφείλονται σε μεγάλο βαθμό στη φυσική δομή του βιοεξανθρακώματος. Το υψηλό μικροπορώδες οδηγεί σε υψηλή ειδική επιφάνεια, η οποία με τη σειρά της αυξάνει την προσροφητική ικανότητα του εδάφους – βιοεξανθρακώματος (Cornelissen et al., 2004). Επιπλέον, η προσθήκη βιοεξανθρακώματος στο έδαφος βελτιώνει τον αερισμό του εδάφους, αυξάνει την ικανότητα κατακράτησης νερού και οδηγεί σε καλές περιβαλλοντικές συνθήκες απαραίτητες για ένα υγιές σύστημα ριζών των φυτών (Glaser et al., 2002; Lehmann et al., 2003; Chan et al., 2007).

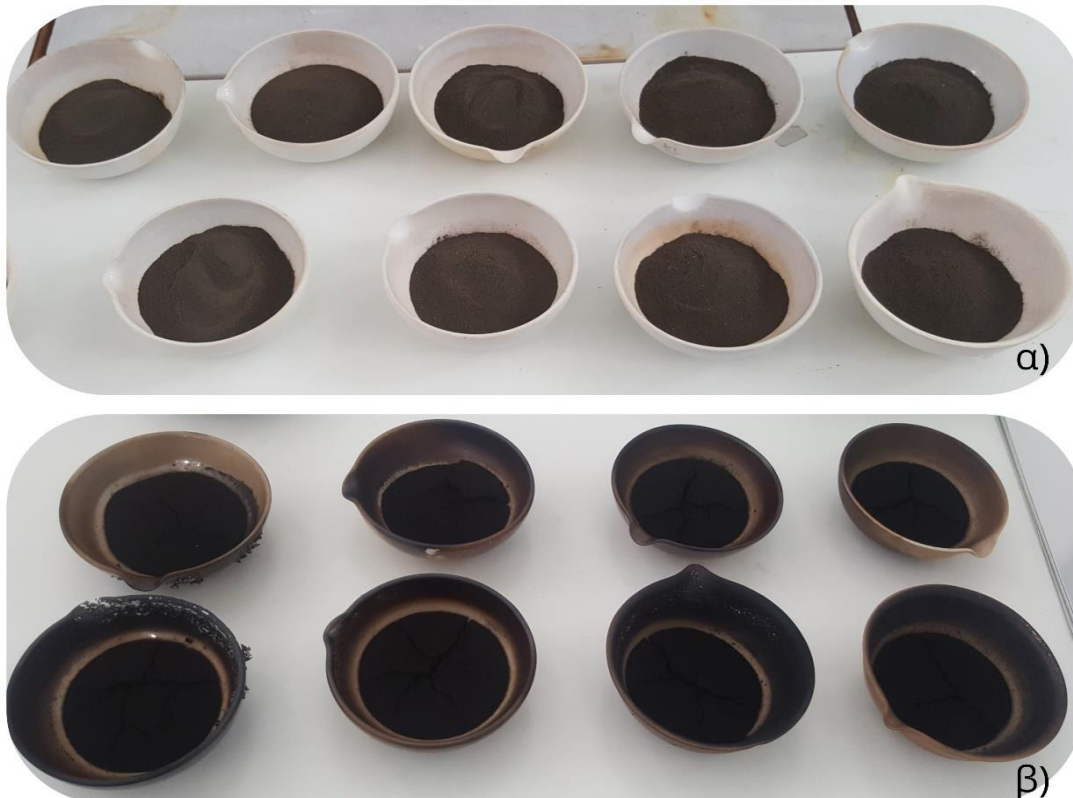
## Κεφάλαιο 2: Μεθοδολογία

### 2.1. Υλικά και συνθήκες πυρόλυσης

Δείγμα εδάφους ελήφθη από βάθος 0-20 cm από καλλιεργούμενη περιοχή του νομού Χανίων. Το δείγμα εδάφους αεροξηράνθηκε, πέρασε από κόσκινο 10 mm και έπειτα από κόσκινο 2 mm για τον πλήρη χαρακτηρισμό του. Το έδαφος που χρησιμοποιήθηκε ήταν αμμοπηλώδες.

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με βιοεξανθράκωμα προερχόμενα από αναερόβια χωνευμένη και θερμικά αφυδατωμένη ιλύ αστικών λυμάτων από το Κέντρο Επεξεργασίας Λυμάτων της Ψυττάλειας. Η αναερόβια χωνευμένη και θερμικά αφυδατωμένη ιλύ αστικών λυμάτων ξηράνθηκε στους 68°C για 48 h, μετέπειτα αλέστηκε σε μαχαιρόμυλο προκειμένου το μέγεθος των σωματιδίων της να μην ξεπερνάει τα 0.5 mm, και τέλος αποθηκεύτηκε σε αεροστεγή δοχεία μέχρι την περαιτέρω χρήση τους. Συνθήκες απουσίας οξυγόνου διατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια της διαδικασίας πυρόλυσης με παροχή 99% καθαρού αζώτου στο σύστημα και παροχή 200 L·h<sup>-1</sup>. Η θερμοκρασία πυρόλυσης ήταν 300 °C, ο ρυθμός θέρμανσης για να φτάσει αυτή τη θερμοκρασία ήταν 3 °C·min<sup>-1</sup> και ο χρόνος παραμονής ήταν 60 min. Μετά το τέλος της πυρόλυσης, το βιοεξανθράκωμα απομακρύνθηκε από τον φούρνο, μεταφέρθηκε σε ξηραντήρα, ζυγίστηκε και αποθηκεύτηκε σε αεροστεγή πλαστικά δοχεία. Προς συντομία, το βιοεξανθράκωμα θα αναφέρεται ως BC-SS (Biochar-Sewage Sludge).

Το κόμποστ που χρησιμοποιήθηκε προερχόταν από τη Διαδημοτική Επιχείρηση Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων (ΔΕΔΙΣΑ) των Χανίων.



Εικόνα 2- 1: α) Λυματολόαση από το Κέντρο Επεξεργασίας Λυμάτων Ψυττάλειας, β) Βιοεξανθράκωμα από λυματολόαση με θερμοκρασία πυρόλυσης 300°C.

## 2.2. Εγκατάσταση πειράματος

Η εγκατάσταση του πειράματος έγινε το καλοκαίρι του 2018 σε θερμοκήπιο με ανοιχτά πλαϊνά του Πολυτεχνείου Κρήτης στα Χανιά. Το έδαφος αναμειχθηκε με το βιοεξανθράκωμα (BC-SS), αφού πρώτα είχε αεροξηρανθεί και περάσει από κόσκινο 10 mm και 6.3 mm. Οι μεταχειρίσεις ήταν οι εξής:

- 1) Μάρτυρας (έδαφος χωρίς μεταχείριση) (Control)
- 2) Βιοεξανθράκωμα ιλύος σε δόση 2% κ.β. (BC-SS)
- 3) Κόμποστ σε δόση 2% κ.β (Compost), και
- 4) Συνδυασμός βιοεξανθρακώματος ιλύος με κόμποστ σε συνολική δόση 2% κ.β. (BC-SS (1% κ.β.)+compost (1% κ.β.)).

Σε κάθε μεταχείριση εφαρμόστηκε λίπανση N ( $100 \text{ mg kg}^{-1}$  εδάφους), P ( $58 \text{ mg kg}^{-1}$  εδάφους) και K ( $67 \text{ mg kg}^{-1}$  εδάφους). Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 4 μεταχειρίσεις. Η κάθε μεταχείριση είχε 3 επαναλήψεις. Συνολικά εγκαταστάθηκαν 12 διάτρητα πλαστικά δοχεία χωρητικότητας 10 kg. Τα μείγματα εξισορροπήθηκαν για 15 ημέρες και αεροξηράνθηκαν. Έπειτα τα μείγματα τοποθετήθηκαν σε πλαστικά διάτρητα δοχεία (24.5x24.5cm) και φυτεύτηκαν τα σπορόφυτα *Solanum lycopersicum* L. σε κάθε δοχείο (16/7/2018). Το πειραματικό σχέδιο ήταν το πλήρως τυχαίοποιημένο σχέδιο (CRD). Κατά τη διάρκεια του πειράματος, η μέση μέγιστη θερμοκρασία αέρα τον μήνα Ιούλιο ήταν  $32.9^{\circ}\text{C}$  και η μέση ελάχιστη  $23^{\circ}\text{C}$ , τον μήνα Αύγουστο η μέση μέγιστη

Θερμοκρασία ήταν 31.5 °C και η μέση ελάχιστη 23.1 °C, τον μήνα Σεπτέμβριο η μέση μέγιστη θερμοκρασία ήταν 28.2 °C και η μέση ελάχιστη 20.3 °C, και τέλος τον μήνα Οκτώβριο η μέση μέγιστη θερμοκρασία ήταν 23.6 °C και η μέση ελάχιστη 16.3 °C. Δέκα ημέρες μετά τη φύτευση των σποροφύτων (26/7/2018), τα δοχεία των μεταχειρίσεων δέχθηκαν 100 mg N kg<sup>-1</sup> εδάφους και είκοσι ημέρες μετά τη φύτευση (4/8/2018) εφαρμόστηκε 58 mg P kg<sup>-1</sup> εδάφους και 67 mg K kg<sup>-1</sup> εδάφους υπό τη μορφή υδατικών διαλυμάτων. Πραγματοποιήθηκαν πέντε ψεκασμοί με κατάλληλα εντομοκτόνα και μυκητοκτόνα κατά τη διάρκεια της καλλιέργειας. Το πείραμα διήρκησε 3 μήνες μετά τη φύτευση των σποροφύτων και πραγματοποιήθηκαν διαδοχικές συγκομιδές.

Στις μεταχειρίσεις μελετήθηκαν:

- i) Το νωπό βάρος των καρπών
- i) Το ξηρό βάρος των υπέργειων (καρποί, φύλλα, βλαστοί) και υπόγειων φυτικών ιστών (ρίζες)
- ii) Μορφολογικά χαρακτηριστικά (ύψος υπέργειου μέρους σε χρονικά διαστήματα 10 ημερών, διάμετρος βλαστού)
- iii) Η συγκέντρωση των μακροθρεπτικών, μικροθρεπτικών και βαρέων μετάλλων στο υπέργειο (καρποί, φύλλα, βλαστοί) / υπόγειο (ρίζες) μέρος του φυτού
- iv) pH, EC, CEC, TOC%, TN%, συγκέντρωση NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N, Olsen-P, ανταλλάξιμων μακροθρεπτικών K, Ca, Mg, διαθέσιμων μικροθρεπτικών Fe, Mn, Zn, Cu στο έδαφος
- v) Ολικών συγκεντρώσεων μακροθρεπτικών, μικροθρεπτικών και βαρέων μετάλλων στο έδαφος.

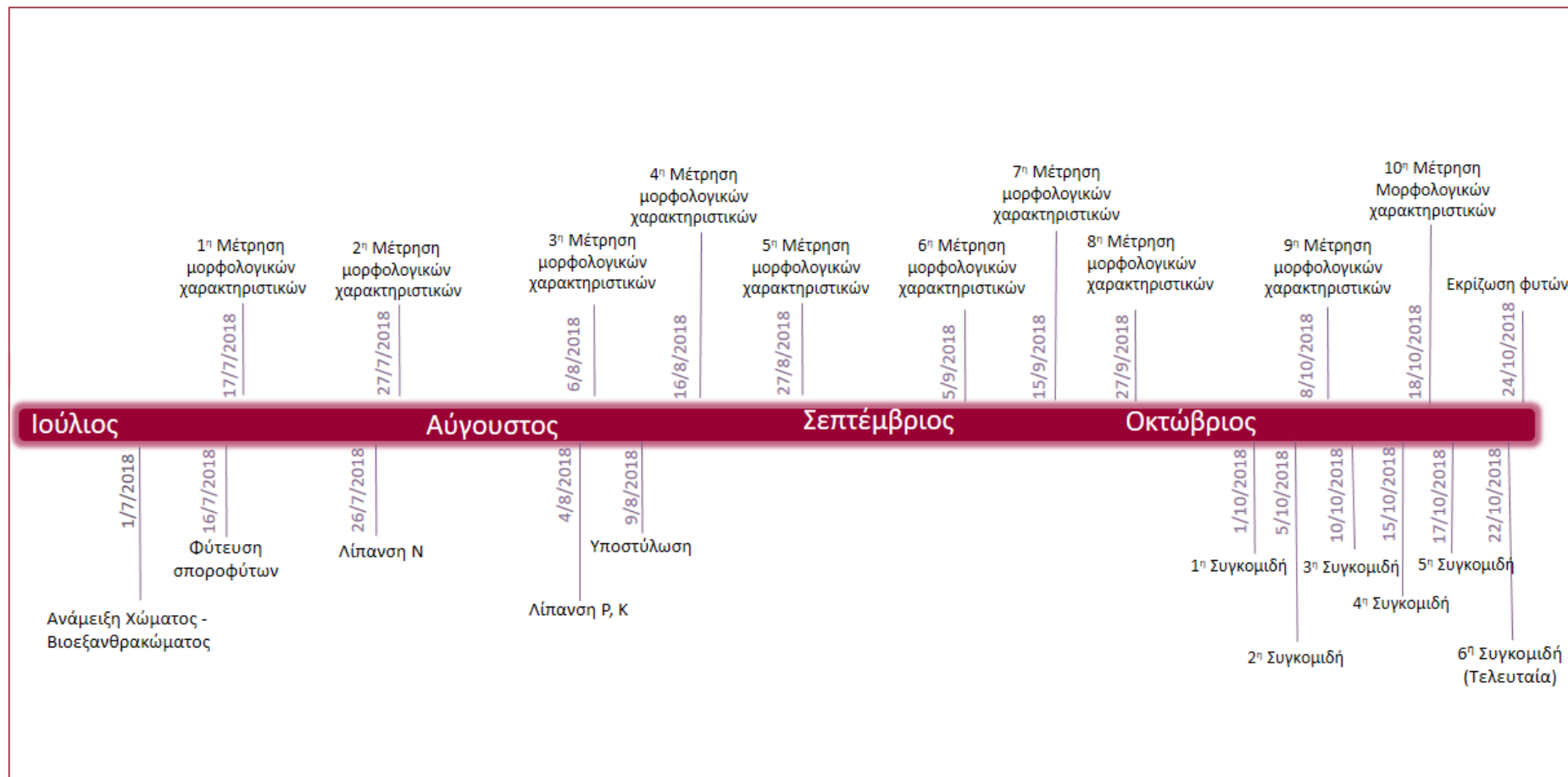


Εικόνα 2- 2: Προετοιμασία μιγμάτων εδάφους, βιοεξανθρακώματος και κόμποστ.



Εικόνα 2- 3: Ανάπτυξη φυτών της *Solanum Lycopersicum* L. 15 ημέρες μετά τη φύτευση.

Σχήμα 2 - 1 : Χρονοδιάγραμμα υλοποίησης πειραμάτων.



## 2.3. Αναλυτικές μέθοδοι

### 2.3.1. Χαρακτηρισμός εδάφους

Η μηχανική σύσταση του εδάφους προσδιορίστηκε με τη μέθοδο Βουγιούκου (Βουγιουκος, 1962). Το pH προσδιορίστηκε σε αιώρημα αναλογίας 1:2 (1 έδαφος : 2 νερό) και η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) σε πάστα εδάφους, χρησιμοποιώντας τα σχετικά ηλεκτρόδια σε ένα πολύμετρο (Seven Multi, Mettler-Toledo, Switzerland). Το ποσοστό της οργανικής ουσίας (OM%) υπολογίστηκε με τη μέθοδο Walkley-Black (Nelson and Sommers, 1996). Τα ποσοστά οργανικού άνθρακα (TOC%) και αζώτου (TN%) προσδιορίστηκαν με τη χρήση στοιχειακού αναλυτή (multi N/C 2100S, AnalytikJena). Η CEC προσδιορίστηκε σύμφωνα με τη μέθοδο 9081 της USEPA (United States Environmental Protection Agency). Το ποσοστό ανθρακικού ασβεστίου ( $\text{CaCO}_3\%$ ) προσδιορίστηκε με τη μέθοδο Bernard. Ο αφομοιώσιμος P προσδιορίστηκε κατά Olsen (Black et al., 1965). Τα ανταλλάξιμα κατιόντα (K, Ca και Mg) προσδιορίστηκαν μετά από εκχύλιση οξικού αμμωνίου (2.5g εδάφους σε αναλογία 1:20) χρησιμοποιώντας ICP-MS (Agilent-CX, 7500 Series). Τα μικροθρεπτικά Fe, Mn και Zn καθορίστηκαν μετά από εκχύλιση με 0.005 M DTPA (pH=7.3) (10g εδάφους σε αναλογία 1:2.5) χρησιμοποιώντας ICP-MS (Lindsay and Norvell, 1978). Το νιτρικό άζωτο του εδάφους ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) καθορίστηκε φασματοφωτομετρικά στα 400 nm μετά από εκχύλιση 2M KCl (20g εδάφους σε αναλογία 1:2.5) και χρήση του αντιδραστηρίου Nitrover (Hach-Lange, Germany), ενώ το  $\text{NH}_4\text{-N}$  καθορίστηκε φασματοφωτομετρικά μετά από εκχύλιση 2M KCl (20g εδάφους σε αναλογία 1:2.5) με τη μέθοδο του Nessler. Επίσης οι ολικές συγκεντρώσεις K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, Cr, Ni, As, Mo, Hg, Pb, Co, Si, Se και Cd προσδιορίστηκαν με ICP-MS έπειτα από χώνευση με πυκνό  $\text{HNO}_3$ . Τα χαρακτηριστικά του εδάφους εμφανίζονται στον Πίνακα 2 – 1.

Πίνακας 2 - 1: Φυσικοχημικές ιδιότητες εδάφους

Χαρακτηριστικά	Έδαφος
Άμμος (%)	55.76
Ιλύς (%)	30.00
Άργιλος (%)	14.24
pH	7.56 ± 0.15
EC ( $\mu S\ cm^{-1}$ )	720.33 ± 33.61
CEC ( $cmol\ kg^{-1}$ )	19.41 ± 2.86
TOC(%)	0.79 ± 0.07
OM (%)	1.21 ± 0.13
CaCO <sub>3</sub> (%)	5.25 ± 0.04
TN ( $g\ kg^{-1}$ )	1.06 ± 0.16
NO <sub>3</sub> – N ( $mg\ kg^{-1}$ )	68.05 ± 1.04
NH <sub>4</sub> – N ( $mg\ kg^{-1}$ )	2.27 ± 0.62
Αφομοιώσιμος P - P_OLSEN ( $g\ kg^{-1}$ )	0.12 ± 0.03
K ( $g\ kg^{-1}$ )	0.84 ± 0.02
Ca ( $g\ kg^{-1}$ )	32.06 ± 4.82
Mg ( $g\ kg^{-1}$ )	2.03 ± 0.10
Na ( $g\ kg^{-1}$ )	0.22 ± 0.06
Fe ( $mg\ kg^{-1}$ )	18307 ± 553
Mn ( $mg\ kg^{-1}$ )	369.38 ± 35.68
Zn ( $mg\ kg^{-1}$ )	49.97 ± 6.19
Cu ( $mg\ kg^{-1}$ )	73.60 ± 17.85
Cr ( $mg\ kg^{-1}$ )	7.82 ± 0.91
Ni ( $mg\ kg^{-1}$ )	8.94 ± 0.74
As ( $mg\ kg^{-1}$ )	<DL
Mo ( $mg\ kg^{-1}$ )	1.85 ± 0.18
Hg ( $mg\ kg^{-1}$ )	<DL
Pb ( $mg\ kg^{-1}$ )	19.99 ± 1.37
Co ( $mg\ kg^{-1}$ )	<DL
Si ( $mg\ kg^{-1}$ )	<DL
Se ( $mg\ kg^{-1}$ )	<DL
Cd ( $mg\ kg^{-1}$ )	<DL
Ανταλλάξιμο_K ( $g\ kg^{-1}$ )	0.20 ± 0.02
Ανταλλάξιμο_Ca ( $g\ kg^{-1}$ )	19.18 ± 1.50
Ανταλλάξιμο_Mg ( $g\ kg^{-1}$ )	0.32 ± 0.05
DTPA_Mn ( $mg\ kg^{-1}$ )	14.24 ± 0.72
DTPA_Fe ( $mg\ kg^{-1}$ )	6.18 ± 0.25
DTPA_Cu ( $mg\ kg^{-1}$ )	3.31 ± 0.17
DTPA_Zn ( $mg\ kg^{-1}$ )	2.71 ± 0.09

TOC: Total Organic Carbon (Ολικός Οργανικός Άνθρακας), TN: Total Nitrogen (Ολικό Άζωτο), EC: electrical conductivity (ηλεκτρική αγωγιμότητα), Κάτω από το όριο ανίχνευσης (<DL), Μέσος όρος ± τυπική απόκλιση (n=3).

### 2.3.2. Χαρακτηρισμός ιλύος, κόμποστ και βιοεξανθρακώματος

Τα οργανικά παραπροϊόντα και τα αντίστοιχα βιοεξανθρακώματα υπολογίστηκαν ως προς το ποσοστό τέφρας (ash%), το ποσοστό άνθρακα (C%), το ποσοστό ολικού οργανικού άνθρακα (TOC%) και αζώτου (TN%), το pH, την ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC), τη CEC και τις ολικές συγκεντρώσεις P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, Cr, Ni, As, Mo, Hg, Pb, Co, Si, Se και Cd. Το ποσοστό τέφρας των δειγμάτων προσδιορίστηκε σύμφωνα με τη μέθοδο ASTM D1762-84 (ASTM 2007) στους 750°C για 6 ώρες. Τα ποσοστά άνθρακα (C%), οργανικού άνθρακα (TOC%) και αζώτου (TN%) προσδιορίστηκαν με τη χρήση στοιχειακού αναλυτή. Το pH και η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) των δειγμάτων μετρήθηκαν σε αιώρημα βιοεξανθρακώματος με απιονισμένο νερό (αναλογία 1:10) μετά από ανακίνηση για 24 ώρες στις 60 rpm (Marks et al., 2014). Η CEC προσδιορίστηκε σύμφωνα με τη μέθοδο 9081 της USEPA (United States Environmental Protection Agency). Ο προσδιορισμός των ολικών συγκεντρώσεων των στοιχείων P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, Cr, Ni, As, Mo, Hg, Pb, Co, Si, Se και Cd στα δείγματα έγινε έπειτα από χώνευση με πυκνό HNO<sub>3</sub>. Οι ολικές συγκεντρώσεις των στοιχείων P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, Cr, Ni, As, Mo, Hg, Pb, Co, Si, Se και Cd προσδιορίστηκαν με τη χρήση ICP-MS (Agilent-CX, 7500 Series) ενώ ο P, προσδιορίστηκε με τη μέθοδο Ascorbic Acid Molybdenum Blue Method (Murphy and Riley, 1962) σε φασματοφωτόμετρο σε μήκος κύματος 880 nm. Το νιτρικό άζωτο των βιοεξανθρακωμάτων (NO<sub>3</sub>-N) καθορίστηκε φασματοφωτομετρικά στα 400 nm μετά από εκχύλιση 2M KCl (20g βιοεξανθρακώματος σε αναλογία 1:4) και χρήση του αντιδραστηρίου Nitrover (Hach-Lange, Germany), ενώ το NH<sub>4</sub>-N καθορίστηκε φασματοφωτομετρικά μετά από εκχύλιση 2M KCl (20g βιοεξανθρακώματος σε αναλογία 1:4) με τη μέθοδο του Nessler.

### 2.3.3. Φυτικοί ιστοί

Το υπέργειο φυτικό μέρος (φύλλα, βλαστοί και καρποί) διαχωρίστηκε από το υπόγειο (ρίζες), ξεπλύθηκε με νερό βρύσης και έπειτα δύο φορές με απιονισμένο νερό. Η ξήρανση των υπέργειων και υπόγειων φυτικών ιστών έγινε στους 68 °C για 48 ώρες και ακολούθησε ζύγιση για να προσδιοριστεί το ξηρό βάρος των φυτικών μερών. Οι ολικές συγκεντρώσεις P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, Cr, Ni, As, Mo, Hg, Pb, Co, Si, Se και Cd στα υπέργεια και υπόγεια μέρη του φυτού καθορίστηκαν έπειτα από ξηρή καύση (Kalra, 1998). Οι ολικές συγκεντρώσεις των στοιχείων K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, Cr, Ni, As, Mo, Hg, Pb, Co, Si, Se και Cd προσδιορίστηκαν με τη χρήση ICP-MS, ενώ ο P μετρήθηκε με τη μέθοδο vanadate-molybdate-yellow colorimetric στα 470nm (Chapman and Pratt, 1961). Η συγκέντρωση N προσδιορίστηκε φασματοφωτομετρικά στα 662nm (Evenhuis, 1978) έπειτα από χώνευση των φυτικών ιστών με H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

## **2.4. Επεξεργασία δεδομένων**

Η στατιστική ανάλυση έγινε με one-way ANOVA χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα SPSS (Version 22, SPSS Inc., Chicago, IL USA) και οι στατιστικές σημαντικές διαφορές των μέσων όρων των συγκεντρώσεων μακροθρεπτικών, μικροθρεπτικών στοιχείων και βαρέων μετάλλων των υπέργειων και των υπόγειων φυτικών ιστών, καθώς και των νωπών και ξηρών βαρών των υπέργειων και υπόγειων φυτικών ιστών καθορίστηκαν σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε επίπεδο σημαντικότητας ( $p < 0.05$ ). Η παραπάνω στατιστική ανάλυση εφαρμόστηκε επίσης για όλες τις παραμέτρους που αναλύθηκαν στα εδάφη με τη λήξη του πειράματος.

## Κεφάλαιο 3: Αποτελέσματα – Συζήτηση

### 3.1. Χαρακτηρισμός βιομάζας και βιοεξανθρακώματος

Τα χαρακτηριστικά της ιλύος και του βιοεξανθρακώματος που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-1. Η ιλύς και το βιοεξανθράκωμα είχαν ποσοστό τέφρας 30.47% και 54.18% αντίστοιχα. Οι Song et al. (2014) στην έρευνά τους βρήκαν σε θερμοκρασία 550°C ποσοστά τέφρας 26.4% στη βιομάζα και 52.0% στο βιοεξανθράκωμα. Επιπλέον, παρόμοια αποτελέσματα παρουσίασαν και οι Huang et al. (2017), οι οποίοι ανέφεραν ποσοστό τέφρας στο βιοεξανθράκωμα από λυματολάσπη 52.0%. Η βιομάζα μετά την πυρόλυση παρουσιάζει αύξηση στο ποσοστό τέφρας περίπου 45%, το οποίο μπορεί να οφείλεται στην αύξηση της θερμοκρασίας, η οποία οδηγεί σε βαθμιαία συγκέντρωση των υπολειμμάτων της καύσης, τα οποία με τη σειρά τους καθορίζουν την αύξηση της περιεκτικότητας σε τέφρα (Cao and Harris, 2010).

Το ποσοστό άνθρακα (C%) στην ιλύ και στο βιοεξανθράκωμα ήταν 36.39% και 22.49% αντίστοιχα. Οι Song et al. (2014) ανέφεραν πως το ποσοστό άνθρακα στην ιλύ βρέθηκε 37.5%, ενώ στο βιοεξανθράκωμα 22.6%. Το ποσοστό του άνθρακα (C%) του βιοεξανθρακώματος στην έρευνά μας, αλλά και στην έρευνα των Song et al (2014), μειώθηκε σε σχέση με το ποσοστό άνθρακα της βιομάζας. Αντίθετα, στην έρευνα της Manolikaki (2018) αναφέρεται πως το ποσοστό άνθρακα σε βιοεξανθρακώματα από μαγιά και κριθαρόσπορο είχε αύξηση C σε σύγκριση με την αρχική βιομάζα. Ο TOC (%) του βιοεξανθρακώματος παρουσίασε περίπου τριπλάσια μείωση σε σχέση με την αρχική βιομάζα (11.42% και 30.48% αντίστοιχα).

Το ποσοστό αζώτου, N (%), στο βιοεξανθράκωμα και στην ιλύ βρέθηκε ίσο με 4.50% και 4.71%, αντίστοιχα. Οι Song et al. (2014) ανέφεραν παρόμοια ποσοστά αζώτου στην αρχική τους βιομάζα (λυματολάσπη) και στο βιοεξανθράκωμα με θερμοκρασία πυρόλυσης 400°C (3.5% και 5.7% αντίστοιχα). Το  $\text{NO}_3 - \text{N}$  και το  $\text{NH}_4 - \text{N}$  μειώθηκε αρκετά στο βιοεξανθράκωμα σε σύγκριση με την αρχική βιομάζα. Συγκεκριμένα το  $\text{NO}_3 - \text{N}$  ήταν 4 φορές μικρότερο στο βιοεξανθράκωμα σε σχέση με τη λυματολάσπη, ενώ η μείωση στο  $\text{NH}_4 - \text{N}$  ήταν υπερβολικά μεγάλη (19 φορές μικρότερο). Έχει αναφερθεί πως η συμπεριφορά του αζώτου διαφέρει ανάλογα με τον τύπο βιομάζας και τη θερμοκρασία πυρόλυσης (Gaskin et al., 2008; Streubel et al., 2011). Στη βιβλιογραφία παρουσιάζονται μεγάλες διαφορές στη συγκέντρωση του αζώτου (N) των βιοεξανθρακωμάτων που έχουν παραχθεί από διαφορετική βιομάζα αλλά σε παρόμοιες θερμοκρασίες πυρόλυσης (Atkinson et al., 2010; Chan and Xu, 2009), επομένως δεν υπάρχει ξεκάθαρη συσχέτιση της θερμοκρασίας πυρόλυσης και του ποσοστού αζώτου (Weber, 2018). Για παράδειγμα, στα βιοεξανθρακώματα από βιομάζα ξύλου, η επίδραση της θερμοκρασίας στην περιεκτικότητα του αζώτου δεν είναι προφανής από τη σύγκριση των δεδομένων που υπάρχουν στη βιβλιογραφία (Quicker, 2016). Όταν όμως η πρώτη ύλη είναι τα ζωικά απόβλητα ή η ιλύς από βιολογικό καθαρισμό παρατηρείται μείωση της περιεκτικότητας του αζώτου λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας επεξεργασίας (Weber, 2018). Αντίθετα, σύμφωνα με τα δεδομένα από την έρευνα των Keiluweit et al. (2010), το ποσοστό αζώτου του

βιοεξανθρακώματος από βιομάζα πλούσια σε λιγνίνη αυξήθηκε με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Το pH της λυματολάσπης αλλά και του βιοεξανθρακώματος ήταν όξινο. Συγκεκριμένα, βρέθηκε πως το pH της λυματολάσπης ήταν 6.92 ενώ του βιοεξανθρακώματος 6.68. Αντίθετα, το pH του κόμποστ ήταν αλκαλικό με μέση τιμή ίση με 8.12. Το pH του βιοεξανθρακώματος μειώθηκε ελάχιστα σε σύγκριση με το pH της ιλύος, παρότι συνήθως προκαλείται αύξηση του pH με τη διαδικασία της πυρόλυσης. Συνήθως, η ακατέργαστη βιομάζα είναι ελαφρώς όξινη ή ελαφρώς βασική με τιμές pH κυμαινόμενες μεταξύ 5 και 7.5 (Quicker, 2016), ενώ έχει αναφερθεί πως το βιοεξανθράκωμα μπορεί να πάρει τιμές pH από 3.7 έως 12.7 (Al-Wabel et al., 2013; Spokas et al., 2011).

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) της ιλύος και του βιοεξανθρακώματος βρέθηκε  $3.21 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$  και  $3.04 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ , αντίστοιχα. Οι Huang et al. (2017) ανέφεραν EC ιλύος ίση με  $3.20 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$  και βιοεξανθρακώματος (θερμοκρασία πυρόλυσης  $300^\circ\text{C}$ )  $130 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . Οι Bird et al. (2011a) και οι Enders et al. (2012) βρήκαν στα πειράματά τους πάνω από 80 διαφορετικές τιμές EC, οι οποίες κυμαίνονταν από 0,01 έως  $61,2 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ . Η μεγάλη ποικιλία των τιμών της ηλεκτρικής αγωγιμότητας είναι αποτέλεσμα των διαφορετικών βιομαζών, των συνθηκών πυρόλυσης, καθώς και του ποσοστού τέφρας της αρχικής βιομάζας (Aller, 2016). Η τιμή της EC του βιοεξανθρακώματος ήταν ελάχιστα μικρότερη από την αρχική βιομάζα, το οποίο δείχνει πως ορισμένα διαλυτά άλατα αποδομήθηκαν κατά τη διαδικασία της πυρόλυσης (Yuan et al., 2015). Παρόμοια μείωση αναφέρεται και στα πειράματα των Huang et al. (2017).

Η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων (CEC) βρέθηκε στην ιλύ ίση με  $67.26 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  και στο βιοεξανθράκωμα  $113.66 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Οι Khanmohammadi et al. (2017) βρήκαν CEC για την λυματολάσπη  $99.3 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  και για το βιοεξανθράκωμα (θερμοκρασία πυρόλυσης  $350^\circ\text{C}$ )  $191.8 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Η Aller (2016) στα πειράματά της βρήκε διάφορες τιμές CEC, οι οποίες κυμαίνονταν από 2.1 έως  $562 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ , με μέση τιμή ίση με  $52.7 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Πολλές μελέτες έχουν δείξει πως η βιομάζα επηρεάζει αρκετά την ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων των βιοεξανθρακωμάτων (Silber et al., 2010). Συγκεκριμένα, βιοεξανθρακώματα από φύκια και απόβλητα παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές CEC σε σύγκριση με βιοεξανθρακώματα από κέλυφος καρυδιού και βιομάζα πλούσια σε λιγνίνη (Aller, 2016).

Η περιεκτικότητα του βιοεξανθρακώματος αποτελείται κυρίως από φώσφορο (P), ασβέστιο (Ca) και μαγνήσιο (Mg) και λιγότερο από κάλιο (K) και νάτριο (Na). Συγκεκριμένα, βρέθηκε πως η συγκέντρωση του P ήταν  $68.61 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , του Ca  $91.48 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , του Fe  $15.23 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , του Mg  $13.32 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , του K  $4.25 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , του Co  $3.35 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , του Na  $2.95 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  και του Zn  $1.56 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Επιπλέον, η συγκέντρωση των θρεπτικών στο βιοεξανθράκωμα έχει αυξηθεί αρκετά σε σχέση με την αρχική βιομάζα. Η συγκέντρωση των θρεπτικών του βιοεξανθρακώματος διαφέρει αρκετά ανάλογα με την βιομάζα που έχει χρησιμοποιηθεί, αλλά και με τη θερμοκρασία πυρόλυσης (Aller, 2016). Στα πειράματα των Vaugh et al (2018), οι οποίοι χρησιμοποίησαν ως πρώτη ύλη λυματολάσπη και διαφορετικές θερμοκρασίες πυρόλυσης ( $300 - 900^\circ\text{C}$ ), η περιεκτικότητα των βιοεξανθρακωμάτων σε P κυμαινόταν από  $24.38 - 40.65 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , σε Ca από  $51.76 - 83.33 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  και σε K από  $3.89 - 9.83 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Στην έρευνα των Tan et al. (2014), με τις ίδιες συνθήκες, η περιεκτικότητα των βιοεξανθρακωμάτων σε Mg

κυμαινόταν από 14.74 – 17.52 g·kg<sup>-1</sup> και σε Na από 1.18 – 3.42 g·kg<sup>-1</sup>. Επιπλέον, συγκέντρωση των στοιχείων Fe, Mn, Zn, Cu, Cr, Ni, As, Mo, Pb, Co και Si αυξήθηκε με τη διαδικασία της πυρόλυσης, ενώ η συγκέντρωση του Hg μειώθηκε. Τα στοιχεία που περιέχει το βιοεξανθράκωμα είναι με φθίνουσα σειρά: Ca>P>Fe>Mg>K >Na>Zn>Cr>Cu>Si>Mn>Pb>Ni>Mo>As>Co >Hg.

Πίνακας 3 - 1: Χαρακτηριστικά της λυματολάσπης και του βιοεξανθρακώματος που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα

Χαρακτηριστικά	Sewage_Sludge (SS)	Compost	Biochar (BC-SS)
ash (%)	30.47 ± 0.09	ND	54.18 ± 0.19
C(%)	36.39 ± 0.50	ND	22.49 ± 0.30
N(g kg <sup>-1</sup> )	4.71 ± 0.10	24.89 ± 1.34	4.50 ± 0.08
TOC (%)	30.48 ± 3.48	24.89 ± 1.34	11.42 ± 0.52
pH	6.92 ± 0.06	8.12 ± 0.07	6.68 ± 0.03
EC (mS cm <sup>-1</sup> )	3.21 ± 0.06	9.11 ± 0.32	3.04 ± 0.05
CEC (cmol kg <sup>-1</sup> )	67.26 ± 6.66	72.25 ± 4.94	113.66 ± 10.70
NO <sub>3</sub> - N (mg kg <sup>-1</sup> )	397.05 ± 33.94	466.56 ± 27.44	97.03 ± 18.37
NH <sub>4</sub> - N (mg kg <sup>-1</sup> )	645.06 ± 39.40	76.33 ± 1.29	33.89 ± 1.77
P – OLSEN (g kg <sup>-1</sup> )	0.93 ± 0.12	0.15 ± 0.06	0.91 ± 0.07
P (g kg <sup>-1</sup> )	20.40 ± 10.72	5.83 ± 0.54	68.61 ± 3.25
K (g kg <sup>-1</sup> )	2.57 ± 0.43	9.56 ± 2.66	4.25 ± 0.25
Ca (g kg <sup>-1</sup> )	52.75 ± 3.38	202.21 ± 57.85	91.48 ± 5.10
Mg (g kg <sup>-1</sup> )	7.49 ± 0.47	7.79 ± 1.92	13.32 ± 0.41
Na (g kg <sup>-1</sup> )	1.77 ± 0.18	8.77 ± 0.26	2.95 ± 0.17
Fe (mg kg <sup>-1</sup> )	7526 ± 388	16057 ± 4185	15231 ± 809
Mn (mg kg <sup>-1</sup> )	162.07 ± 8.63	222.84 ± 58.80	298.58 ± 20.63
Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	876.49 ± 32.62	526.13 ± 130.45	1566 ± 100
Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	424.67 ± 21.54	205.26 ± 55.39	546.02 ± 36.93
Cr (mg kg <sup>-1</sup> )	401.18 ± 5.23	35.20 ± 12.38	624.55 ± 29.83
Ni(mg kg <sup>-1</sup> )	48.35 ± 1.74	37.22 ± 10.23	82.60 ± 4.76
As(mg kg <sup>-1</sup> )	1.98 ± 0.57	<DL	4.37 ± 0.53
Mo(mg kg <sup>-1</sup> )	7.82 ± 0.55	3.77 ± 1.11	11.10 ± 0.38
Hg(mg kg <sup>-1</sup> )	2.39 ± 0.34	3.15 ± 0.77	0.68 ± 0.37
Pb(mg kg <sup>-1</sup> )	124.67 ± 2.86	127.40 ± 28.94	218.33 ± 12.52
Co(mg kg <sup>-1</sup> )	0.74 ± 0.24	3.32 ± 1.15	3.35 ± 0.28
Si(mg kg <sup>-1</sup> )	207.00 ± 15.59	<DL	324.00 ± 27.00
Se(mg kg <sup>-1</sup> )	<DL	<DL	<DL
Cd(mg kg <sup>-1</sup> )	<DL	<DL	<DL

TOC: Total Organic Carbon (Ολικός Οργανικός Άνθρακας), TN: Total Nitrogen (Ολικό Άζωτο), EC: electrical conductivity (ηλεκτρική αγωγιμότητα), Κάτω από το όριο ανίχνευσης (<DL), Μέσος όρος ± τυπική απόκλιση (n=3).

### 3.2. Χημικές ιδιότητες εδαφών

Η επίδραση του βιοεξανθρακώματος στις χημικές ιδιότητες του εδάφους παρουσιάζονται στους Πίνακα 3–2 και Πίνακα 3–3. Στις μεταχειρίσεις BC–SS και BC–SS+Compost το pH μειώθηκε, αλλά η μείωση δεν ήταν στατιστικώς σημαντική, ενώ στη μεταχείριση Compost το pH έμεινε αμετάβλητο. Αυτή η μείωση στο pH των μεταχειρίσεων σε σχέση με τον μάρτυρα μπορεί να εξηγηθεί λόγω του χαμηλού pH που είχε το βιοεξανθράκωμα (6.68) σε σχέση με το έδαφος που χρησιμοποιήθηκε (7.56). Μελέτες αναφέρουν πως η εφαρμογή βιοεξανθρακώματος σε διάφορες δόσεις στο έδαφος μπορεί να μειώσει ή να αυξήσει το pH του εδάφους (Palansooriya et al., 2019). Συγκεκριμένα, οι Jeffery et al. (2011) ανέφεραν πως το pH μπορεί να μείνει αμετάβλητο, να μειωθεί κατά 0.5 μονάδα ή να αυξηθεί κατά 0.6 – 1 μονάδα, ανάλογα με τον τύπο του βιοεξανθρακώματος που θα εφαρμοστεί στο έδαφος (Granatstein et al., 2009). Οι Palansooriya et al. (2019) στα πειράματά τους βρήκαν πως τα βιοεξανθρακώματα που προέρχονταν από απορρίμματα πουλερικών παρουσίασαν αύξηση του pH, τα βιοεξανθρακώματα από πριονίδι πεύκου έδειξαν μείωση του pH, ενώ τα βιοεξανθρακώματα από φλοιό ρυζιού δεν επέφεραν καμία αλλαγή στο pH του εδάφους.

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους αυξήθηκε αρκετά (διπλασιάστηκε) σε όλες τις μεταχειρίσεις σε σχέση με τον μάρτυρα. Ωστόσο αυτή η αύξηση δεν ήταν στατιστικώς σημαντική. Οι Mendez et al. (2012) και οι Hossain et al (2010) ανέφεραν τετραπλασιασμό της τιμής της EC των εδαφών με την προσθήκη βιοεξανθρακώματος, ενώ οι Oguntunde et al (2004) βρήκαν πως η EC αυξήθηκε κατά 124.6%. Οι Palansooriya et al. (2019) στα πειράματά τους, εφαρμογή βιοεξανθρακώματος από διάφορες βιομάζες σε διαφορετικές δόσεις στο έδαφος, βρήκαν αύξηση στη EC σε σχέση με τον μάρτυρα από 2 – 85%. Συγκεκριμένα, το βιοεξανθράκωμα από πριονίδι πεύκου με δόση εφαρμογής  $45 \text{ t ha}^{-1}$  παρουσίασε τη μεγαλύτερη αύξηση EC. Ομοίως, η εφαρμογή βιοεξανθρακώματος από switchgrass με δόση εφαρμογής 25, 50 και  $100 \text{ t ha}^{-1}$  αύξησε την τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας κατά 20%, 29% και 65% αντίστοιχα. Επιπλέον, η εφαρμογή βιοεξανθρακώματος σε συνδυασμό με τέφρα που περιέχει διαλυτά άλατα, μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερη αύξηση της EC του εδάφους (Kelly et al., 2015; Usman et al., 2016).

Η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων (CEC) στις μεταχειρίσεις BC–SS μειώθηκε, ενώ στις μεταχειρίσεις Compost και BC–SS+Compost αυξήθηκε σε σχέση με τον μάρτυρα, χωρίς όμως οι μεταβολές να είναι στατιστικώς σημαντικές. Συγκεκριμένα, η τιμή της CEC του μάρτυρα, του BC–SS, του Compost και του BC–SS+Compost ήταν 20.86, 19.68, 25.94 και 22.91 αντίστοιχα. Με την προσθήκη βιοεξανθρακώματος, η CEC του εδάφους μπορεί να αλλάξει σημαντικά ανάλογα με το είδος της βιομάζας και τη θερμοκρασία πυρόλυσης (Rondon et al., 2007). Για παράδειγμα, η εφαρμογή βιοεξανθρακωμάτων που παράγονται σε χαμηλές θερμοκρασίες παρουσιάζουν σημαντική αύξηση στη CEC των εδαφών, ένδειξη της δυνατότητας της βελτίωσης της γονιμότητας του εδάφους (Igalavithana et al., 2016). Εν τούτοις, βιοεξανθρακώματα που παράγονται σε υψηλές θερμοκρασίες δεν είναι κατάλληλα για εδάφη με χαμηλή

περιεκτικότητα σε θρεπτικά συστατικά (Suliman et al., 2016). Πολλές μελέτες δείχνουν μία ευεργετική επίδραση των βιοεξανθρακωμάτων στη CEC του εδάφους (Lehmann and Joseph, 2015). Η οξείδωση του αρωματικού άνθρακα και η ανάπτυξη καρβοξυλικών ομάδων του βιοεξανθρακώματος μπορεί να είναι οι λόγοι για την αύξηση της CEC του εδάφους (Glaser et al., 2002). Παρόλα αυτά η εφαρμογή βιοεξανθρακώματος από ευκάλυπτο με δόση εφαρμογής  $10 \text{ t ha}^{-1}$  μείωσε τη CEC του εδάφους (Palansooriya et al., 2019). Ωστόσο, οι Granatstein et al. (2009) ανέφεραν πως η εφαρμογή βιοεξανθρακώματος δεν μετέβαλε σημαντικά την ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων.

Ο ολικός οργανικός άνθρακας (TOC) αυξήθηκε στατιστικώς σημαντικά σε όλες τις μεταχειρίσεις σε σχέση με τον μάρτυρα. Συγκεκριμένα, τη μεγαλύτερη αύξηση παρουσίασαν οι μεταχειρίσεις Compost και BC-SS+Compost. Σύμφωνα με τους Khanmohammadi et al. (2016) η εφαρμογή του βιοεξανθρακώματος αύξησε σημαντικά τον οργανικό άνθρακα του εδάφους σε σύγκριση με τον μάρτυρα. Στα πειράματά τους, χρησιμοποίησαν αργιλώδες έδαφος από δύο διαφορετικές περιοχές (Falavarjan και Ziar) και παρατήρησαν αύξηση TOC και για τα δύο. Συγκεκριμένα στο έδαφος από το Falavarjan ο TOC αυξήθηκε κατά  $1.4 \text{ g kg}^{-1}$  σε σύγκριση με τον μάρτυρα, ενώ στο έδαφος του Ziar η αύξηση ήταν περίπου  $1 \text{ g kg}^{-1}$ . Επιπλέον, η αύξηση της δόσης του βιοεξανθρακώματος αυξάνει την τιμή του TOC του εδάφους (Khanmohammadi et al., 2016).

Το ολικό άζωτο (N) αυξήθηκε σε όλες τις μεταχειρίσεις σε σύγκριση με τον μάρτυρα. Συγκεκριμένα στη μεταχείριση BC-SS, Compost και BC-SS+Compost αυξήθηκε κατά 136%, 180% και 255% αντίστοιχα. Το  $\text{NO}_3 - \text{N}$  αυξήθηκε στις μεταχειρίσεις BC-SS και BC-SS+Compost, ενώ μειώθηκε στη μεταχείριση compost σε σύγκριση με τον μάρτυρα. Η συγκέντρωση του  $\text{NH}_4 - \text{N}$  αυξήθηκε σε όλες τις μεταχειρίσεις σε σύγκριση με τον μάρτυρα. Συγκεκριμένα τη μεγαλύτερη αύξηση εμφάνισε η μεταχείριση BC-SS (αύξηση κατά 145%), ενώ τη μικρότερη η μεταχείριση Compost (αύξηση κατά 29%). Στατιστικώς σημαντικές διαφορές στα  $\text{NO}_3 - \text{N}$  και  $\text{NH}_4 - \text{N}$  παρουσίασαν οι μεταχειρίσεις BC-SS+Compost και BC-SS, αντίστοιχα. Η εφαρμογή βιοεξανθρακωμάτων έχει αναφερθεί πως μειώνει τις απώλειες N από τα εδάφη (Liu et al., 2018). Οι Yao et al. (2012) διαπίστωσαν συγκράτηση  $\text{NO}_3 - \text{N}$  στο έδαφος χρησιμοποιώντας διάφορα είδη βιοεξανθρακώματος που παράχθηκαν σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Επίσης, οι Kameyama et al. (2012) παρατήρησαν προσρόφηση  $\text{NO}_3 - \text{N}$  σε έδαφος, στο οποίο είχε προστεθεί βιοεξανθράκωμα. Η αυξημένη προσρόφηση του  $\text{NO}_3 - \text{N}$  οφείλεται σε λειτουργικές ομάδες (αλειφατικός αιθέρας (-O-), καρβονυλική ομάδα (-C=O) και υδροξύλιο (-OH) και όχι σε φυσική προσρόφηση (Shaaban et al., 2018). Επιπλέον, οι Liu et al. (2017d) και οι Wang et al. (2017a) ανέφεραν πως η εφαρμογή βιοεξανθρακωμάτων μείωσε την έκπλυση N, κρατώντας τα νιτρικά άλατα με αποτέλεσμα την αύξηση της απόδοσης της καλλιέργειας. Η μηχανική διαταραχή από την εφαρμογή βιοεξανθρακώματος αυξάνει τον αερισμό του εδάφους και προάγει τη νιτροποίηση, προκαλώντας ταχύ μετασχηματισμό του  $\text{NH}_4 - \text{N}$  σε  $\text{NO}_3 - \text{N}$  (Abujabhah et al., 2016; He et al., 2016).

Ο αφομοιώσιμος φώσφορος (P – OLSEN) αυξήθηκε στατιστικώς σημαντικά σε όλες τις μεταχειρίσεις σε σύγκριση με τον μάρτυρα εκτός από τη μεταχείριση compost.

Συγκεκριμένα, η μεγαλύτερη αύξηση υπήρχε στη μεταχείριση BC-SS+Compost, ενώ η μικρότερη στη μεταχείριση Compost. Σε χαμηλά pH, οι φωσφορικές μορφές δημιουργούν σύμπλοκα με  $\text{Fe}^{3+}$  και  $\text{Al}^{3+}$ , ενώ σε αλκαλικό pH δημιουργούν σύμπλοκα με  $\text{Ca}^{2+}$  και  $\text{Mg}^{2+}$  (Shaaban et al., 2018). Η προσθήκη βιοεξανθρακώματος στο έδαφος μπορεί να μειώσει τον σχηματισμό ιζημάτων του φωσφόρου και επομένως να αυξήσει τη διαθεσιμότητα του P στα φυτά (Zheng et al., 2016). Μία μελέτη πεδίου που διεξήχθη στο Lombok της Ινδονησίας, έδειξε πως η προσθήκη βιοεξανθρακώματος αύξησε σημαντικά το διαθέσιμο P του εδάφους, το οποίο στη συνέχεια αύξησε την απόδοση της καλλιέργειας του καλαμποκιού (*Zea mays* L.) (Utomo et al., 2011). Οι θετικές επιδράσεις του βιοεξανθρακώματος στο διαθέσιμο P έχουν παρατηρηθεί μέσω της αύξησης της υδατοϊκανότητας των εδαφών (Chen et al., 2012). Η αυξημένη διαθεσιμότητα P σε φυτά μετά από την εφαρμογή βιοεξανθρακώματος έχει παρατηρηθεί σε αρκετές μελέτες, ακόμα και σε έδαφος με χαμηλά επίπεδα διαθέσιμου φωσφόρου.

Το ανταλλάξιμο K αυξήθηκε σε όλες τις μεταχειρίσεις σε σύγκριση με τον μάρτυρα, με τη μεγαλύτερη στατιστικώς σημαντική αύξηση να παρουσιάζεται στη μεταχείριση Compost. Το ανταλλάξιμο Ca αυξήθηκε ή δεν επηρεάστηκε με την εφαρμογή βιοεξανθρακώματος στο έδαφος, χωρίς όμως οι μεταβολές να είναι στατιστικώς σημαντικές. Συγκεκριμένα, το ανταλλάξιμο Ca του εδάφους αυξήθηκε στις μεταχειρίσεις BC-SS και BC-SS+Compost, ενώ δεν επηρεάστηκε στη μεταχείριση Compost. Το ανταλλάξιμο Mg αυξήθηκε περίπου 1,5 φορές σε όλες τις μεταχειρίσεις σε σχέση με τον μάρτυρα. Οι στατιστικώς σημαντικές αυξήσεις Mg παρουσιάστηκαν στις μεταχειρίσεις BC-SS και BC-SS+Compost. Σύμφωνα με τους Palansooriya et al. (2019) η εφαρμογή βιοεξανθρακώματος από πριονίδι πεύκου και απορρίμματα πουλερικών αυξάνει αρκετά το ανταλλάξιμο K. Ο διαθέσιμος Fe είχε διαφορετική συμπεριφορά στην κάθε μεταχείριση σε σύγκριση με τον μάρτυρα. Συγκεκριμένα, ο DTPA – Fe στη μεταχείριση BC-SS μειώθηκε, στη μεταχείριση Compost αυξήθηκε, ενώ στη μεταχείριση BC-SS+Compost δεν επηρεάστηκε, χωρίς όμως οι μεταβολές να είναι στατιστικώς σημαντικές. Το διαθέσιμο Mn, ο διαθέσιμος Cu και ο διαθέσιμος Zn μειώθηκαν αρκετά σε όλες τις μεταχειρίσεις σε σύγκριση με τον μάρτυρα, χωρίς όμως οι μεταβολές να είναι στατιστικώς σημαντικές. Η μεγαλύτερη μείωση του DTPA – Mn, του DTPA – Cu καθώς και του DTPA Zn βρέθηκε στη μεταχείριση BC-SS+Compost, ενώ η μικρότερη μείωση του DTPA – Mn και του DTPA – Cu στη μεταχείριση BC-SS και του DTPA – Zn στη μεταχείριση Compost. Παρόμοια συμπεριφορά παρατήρησαν και οι Jatav et al. (2018), οι οποίοι ανέφεραν μείωση των διαθέσιμων Fe, Mn, Cu και Zn με τη προσθήκη βιοεξανθρακώματος στο έδαφος. Η περιεκτικότητα των K, Ca, Na, Mg, Fe, Mn και Zn αυξήθηκε με την προσθήκη βιοεξανθρακώματος σε όλες τις μεταχειρίσεις σε σχέση με τον μάρτυρα, ενώ μειώθηκε αρκετά η περιεκτικότητα σε Cu. Τα βιοεξανθρακώματα μπορούν να λειτουργήσουν ως πηγή θρεπτικών συστατικών στο έδαφος (Akhtan et al., 2014; Chan and Xu, 2009). Ανάλογα με την ανεπάρκεια των θρεπτικών ουσιών στα εδάφη, τα βιοεξανθρακώματα μπορούν να εφαρμοστούν στα εδάφη αυτά έτσι ώστε να καλύψουν την ανάγκη των φυτών για συγκεκριμένα θρεπτικά συστατικά. Για παράδειγμα, βιοεξανθρακώματα από ρύζι ή γρασίδι είναι γνωστά για την υψηλή περιεκτικότητά τους σε Si, βιοεξανθρακώματα

από σπόρους σόγιας περιέχουν υψηλά επίπεδα N, ενώ βιοεξανθρακώματα από τσόφλι αυγού έχουν μεγάλη ποσότητα Ca (Yu et al., 2019).

Οι ολικές συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων δεν παρουσίασαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές εκτός από το Cr το οποίο αυξήθηκε σημαντικά με την προσθήκη BC-SS και BC-SS+Compost. Συγκεκριμένα, στο έδαφος δεν ανιχνεύτηκαν τα As, Hg, Co, Si, Se και Cd. Η συγκέντρωση του Cr αυξήθηκε σε όλες τις μεταχειρίσεις και παρουσίασε σημαντική στατιστική διαφορά στις μεταχειρίσεις BC-SS και BC-SS+Compost. Η μεγαλύτερη συγκέντρωση Cr παρατηρείται στη μεταχείριση BC-SS+Compost και είναι ίση με  $27.24 \text{ mg kg}^{-1}$ . Σύμφωνα με την Agency for environmental protection (2013), η συγκέντρωση του Cr πρέπει να είναι  $18.43 - 147.5 \text{ mg kg}^{-1}$  ξηρής ουσίας, επομένως οι τιμές μας είναι εντός ορίων. Η συγκέντρωση του Ni αυξήθηκε σε όλες τις μεταχειρίσεις σε σύγκριση με τον μάρτυρα, χωρίς όμως να είναι στατιστικώς σημαντικές οι μεταβολές αυτές. Σύμφωνα με τον WHO/FAO (2001) η μέγιστη τιμή Ni στο έδαφος δεν πρέπει να ξεπερνά τα  $50 \text{ mg kg}^{-1}$  ξηρής ουσίας. Στα δικά μας πειράματα η μέγιστη τιμή Ni που βρέθηκε στο χώμα ήταν  $11.83 \text{ mg kg}^{-1}$  ξηρής ουσίας στη μεταχείριση BC-SS. Η συγκέντρωση του Mo μειώθηκε σε όλες τις μεταχειρίσεις σε σύγκριση με τον μάρτυρα, με τη μεγαλύτερη στατιστικώς σημαντική μείωση να συναντάται στη μεταχείριση BC-SS+Compost. Η συγκέντρωση του Pb αυξήθηκε σε όλες τις μεταχειρίσεις σε σύγκριση με τον μάρτυρα, χωρίς κάποια από τις αυξήσεις να είναι στατιστικώς σημαντική. Η μέγιστη τιμή παρατηρήθηκε στη μεταχείριση Compost ίση με  $28.78 \text{ mg kg}^{-1}$  ξηρής ουσίας, η οποία δεν ξεπερνάει τα όρια επικινδυνότητας σύμφωνα με το WHO/FAO (2011).

Πίνακας 3- 2 : Χημικές ιδιότητες εδαφών

	<i>pH</i>	<i>CEC</i> ( <i>cmol kg<sup>-1</sup></i> )	<i>EC</i> ( <i>μS cm<sup>-1</sup></i> )	<i>TOC (%)</i>	<i>TN (g kg<sup>-1</sup>)</i>	<i>NO<sub>3</sub> – N</i> ( <i>mg kg<sup>-1</sup></i> )	<i>NH<sub>4</sub> – N</i> ( <i>mg kg<sup>-1</sup></i> )	<i>P – OLSEN</i> ( <i>g kg<sup>-1</sup></i> )
<i>Control</i>	7.89 ± 0.13a	20.86 ± 2.22a	600.33 ± 107.77a	0.55 ± 0.08a	0.44 ± 0.02a	12.06 ± 1.72b	2.40 ± 0.31a	0.11 ± 0.03a
<i>BC–SS</i>	7.71 ± 0.13a	19.68 ± 2.20a	1218.33 ± 773.72a	0.92 ± 0.05b	1.04 ± 0.47ab	12.52 ± 1.43b	5.89 ± 1.59b	0.16 ± 0.01bc
<i>Compost</i>	7.89 ± 0.06a	25.94 ± 0.48a	1270.67 ± 192.03a	1.02 ± 0.03b	1.23 ± 0.14b	2.05 ± 0.68a	3.10 ± 0.58a	0.12 ± 0.00ab
<i>BC–SS+Compost</i>	7.61 ± 0.18a	22.91 ± 3.77a	1117.67 ± 517.54a	1.02 ± 0.04b	1.56 ± 0.22b	18.66 ± 1.72c	3.38 ± 0.57ab	0.17 ± 0.01c
	<b>K (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Ca (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Mg (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Na (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Fe (mg kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Mn (mg kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Zn (mg kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Cu (mg kg<sup>-1</sup>)</b>
<i>Control</i>	0.72 ± 0.08a	29.73 ± 3.88a	2.02 ± 0.42a	235.09 ± 23.70a	16762 ± 2240a	388.43 ± 97.33a	74.87 ± 15.11a	186.26 ± 50.24a
<i>BC–SS</i>	0.75 ± 0.30a	40.85 ± 2.26a	2.44 ± 0.06a	295.65 ± 53.55ab	18352 ± 93a	390.90 ± 17.80a	124.89 ± 41.63a	176.55 ± 50.73a
<i>Compost</i>	1.08 ± 0.21b	31.58 ± 7.08a	2.81 ± 0.95a	424.73 ± 14.99c	20647 ± 4031a	444.75 ± 124.20a	111.62 ± 45.51a	146.24 ± 47.68a
<i>BC–SS+Compost</i>	0.85 ± 0.11ab	33.94 ± 5.91a	2.59 ± 0.33a	341.70 ± 51.97bc	18007 ± 3017a	303.45 ± 42.64a	111.18 ± 15.37a	132.18 ± 2.81a
	<b>Exch. Ca</b> <b>(mg kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Exch. K</b> <b>(g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Exch. Mg</b> <b>(mg kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>DTPA Fe</b> <b>(mg kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>DTPA Mn</b> <b>(mg kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>DTPA Zn</b> <b>(mg kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>DTPA Cu</b> <b>(mg kg<sup>-1</sup>)</b>	
<i>Control</i>	13.59 ± 0.86a	0.10 ± 0.03a	0.23 ± 0.01a	27.88 ± 3.65a	50.96 ± 1.61b	14.37 ± 2.36a	27.38 ± 6.41b	
<i>BC–SS</i>	15.10 ± 1.33a	0.10 ± 0.07a	0.36 ± 0.04b	21.27 ± 8.50a	42.53 ± 9.08ab	10.28 ± 3.05a	12.86 ± 4.08a	
<i>Compost</i>	13.38 ± 1.15a	0.16 ± 0.03b	0.40 ± 0.01ab	35.72 ± 4.34a	37.88 ± 2.02ab	11.47 ± 3.28a	9.72 ± 2.09a	
<i>BC–SS+Compost</i>	15.81 ± 2.01a	0.11 ± 0.08a	0.36 ± 0.05b	27.47 ± 7.52a	35.09 ± 5.20a	8.75 ± 0.85a	7.74 ± 1.14a	

Μέσος όρος ± τυπική απόκλιση (n=3), Κάτω από το όριο ανίχνευσης (<DL). Εφαρμόστηκε one-way ANOVA. Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε p<0.05.

Πίνακας 3- 3: Συγκέντρωση βαρέων μετάλλων στο έδαφος και όρια επικινδυνότητας

	Control	BC – SS	Compost	BC – SS +Compost	Όρια
<i>Cr (mg kg<sup>-1</sup>)</i>	7.49 ± 1.45a	26.59 ± 10.05b	13.07 ± 3.29ab	27.24 ± 5.10b	18.43-147.5 (Agency for environmental protection, 2013) 150 (Salvoa et al., 2018)
<i>Ni (mg kg<sup>-1</sup>)</i>	9.49 ± 2.76a	11.83 ± 1.78a	11.46 ± 2.02a	11.63 ± 2.08a	23.40-311.40 (Agency for environmental protection 2013) 120 (Salvoa et al., 2018) 50 (WHO/FAO 2001)
<i>As (mg kg<sup>-1</sup>)</i>	<DL	<DL	<DL	<DL	20 (Salvoa et al., 2018, WHO/FAO 2001)
<i>Mo (mg kg<sup>-1</sup>)</i>	3.74 ± 0.39b	3.01 ± 0.52ab	2.44 ± 0.77ab	2.20 ± 0.23a	-
<i>Hg (mg kg<sup>-1</sup>)</i>	<DL	<DL	<DL	<DL	1 (Salvoa et al., 2018) 2 (WHO/FAO 2001)
<i>Pb (mg kg<sup>-1</sup>)</i>	22.54 ± 3.85a	26.42 ± 4.18a	28.78 ± 5.36a	27.05 ± 5.29a	2.12-110.2 (Agency for environmental protection 2013) 100 (Salvoa et al., 2018) 50 (WHO/FAO 2001)
<i>Co (mg kg<sup>-1</sup>)</i>	<DL	<DL	<DL	<DL	-
<i>Si (mg kg<sup>-1</sup>)</i>	<DL	<DL	<DL	<DL	-
<i>Se (mg kg<sup>-1</sup>)</i>	<DL	<DL	<DL	<DL	-
<i>Cd (mg kg<sup>-1</sup>)</i>	<DL	<DL	<DL	<DL	0.20-0.73 (Agency for environmental protection 2013) 2 (Salvoa et al., 2018) 3 (WHO/FAO 2001)

Μέσος όρος ± τυπική απόκλιση (n=3), Κάτω από το όριο ανίχνευσης (<DL). Εφαρμόστηκε one-way ANOVA. Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε p<0.05.

### 3.3. Ανάπτυξη και απόδοση φυτών



Εικόνα 3- 1: Ανάπτυξη φυτών της *Solanum Lycopersicum* L. 30 ημέρες μετά τη φύτευση.



Εικόνα 3- 2: Ανάπτυξη φυτών της *Solanum Lycopersicum* L. 50 ημέρες μετά από τη φύτευση.



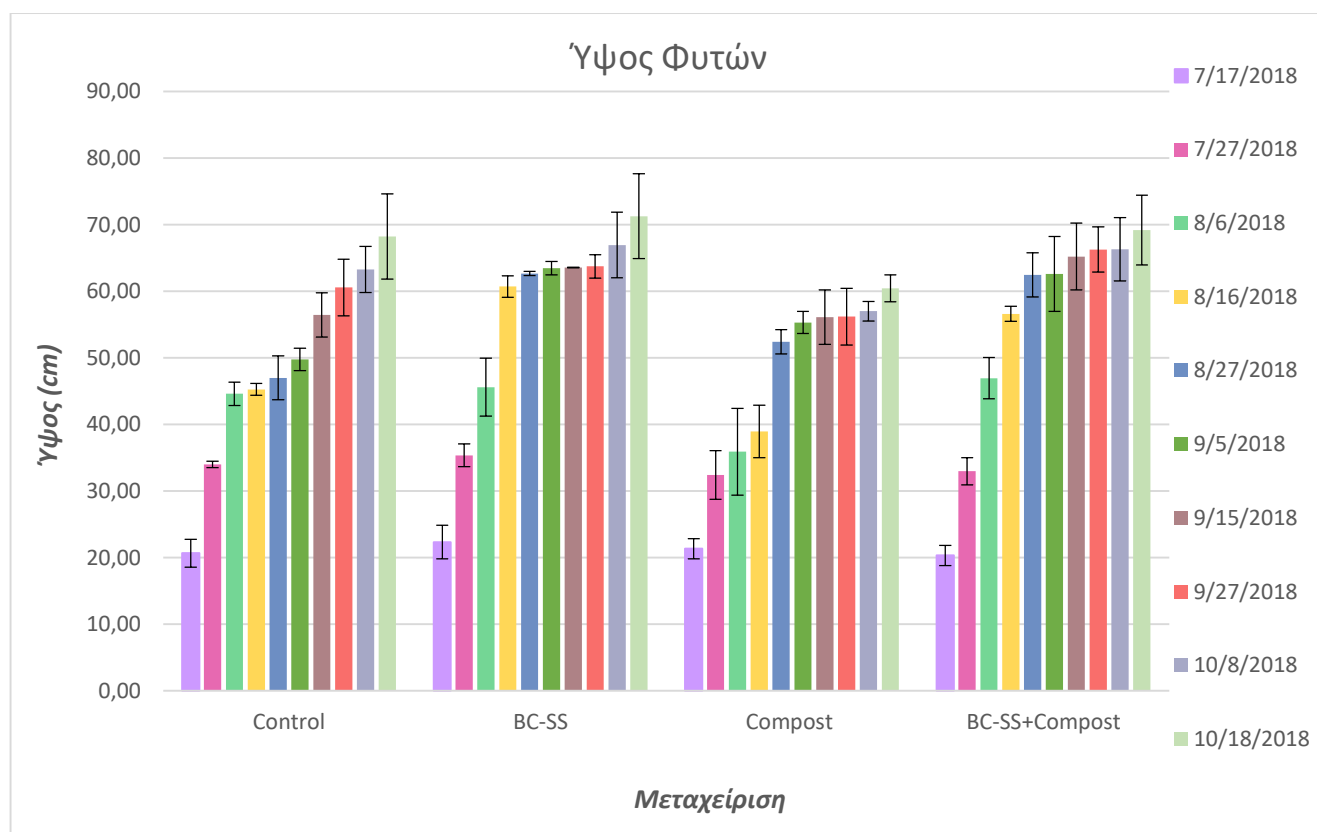
Εικόνα 3- 3: Ανάπτυξη φυτών της *Solanum Lycopersicum* L. 60 ημέρες μετά τη φύτευση.



Εικόνα 3- 4: Ανάπτυξη φυτών της *Solanum Lycopersicum* L. 70 ημέρες μετά τη φύτευση.

### 3.3.1. Ύψος φυτών

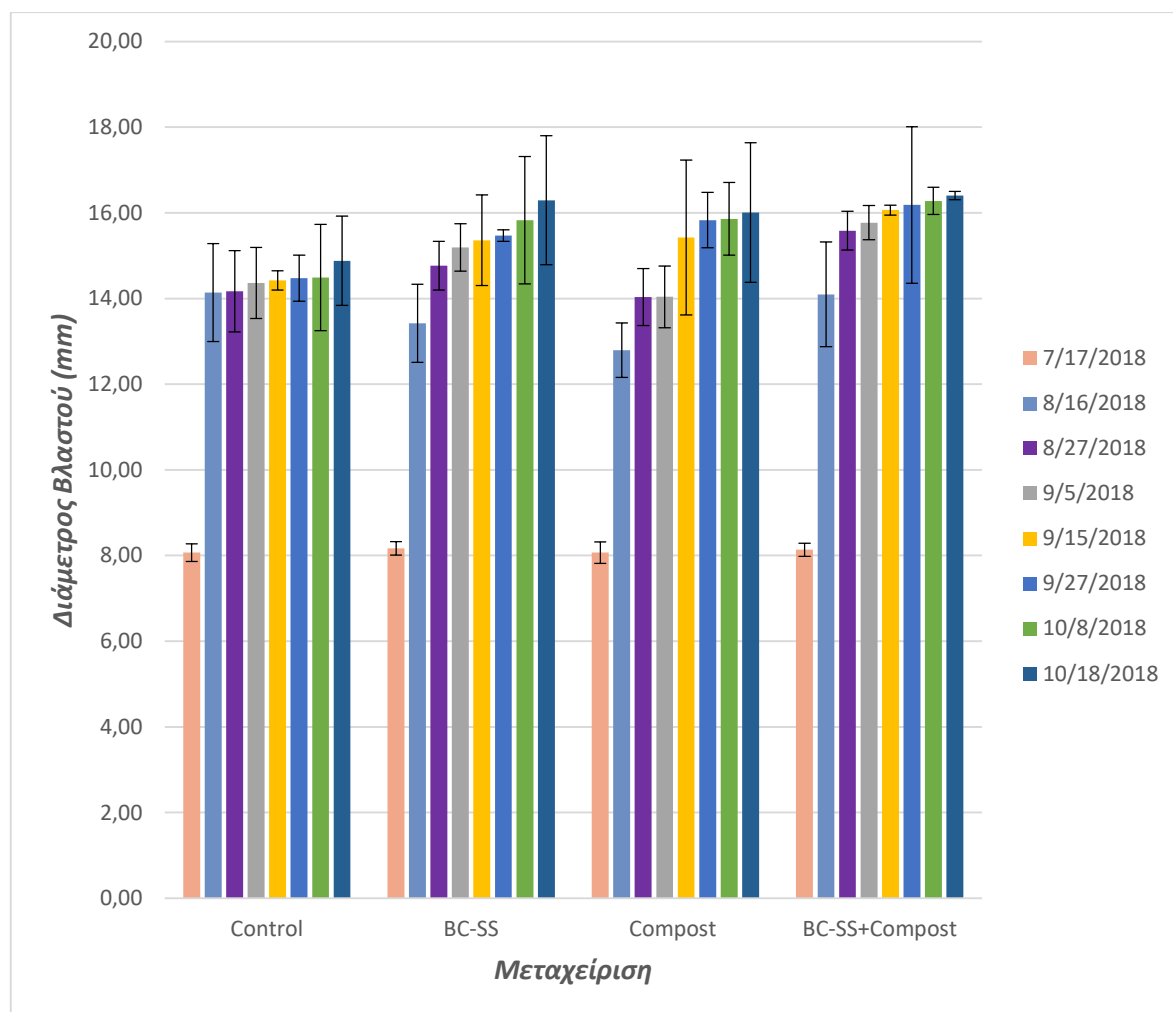
Η προσθήκη βιοεξανθρακώματος είχε θετική επίδραση στο ύψος των φυτών. Συγκεκριμένα, για τις πρώτες 20 ημέρες το ύψος των φυτών αυξανόταν περίπου με τον ίδιο ρυθμό σε όλες τις μεταχειρίσεις. Στις 30 μέρες συνεχίστηκε το ίδιο, με τη μόνη διαφορά πως η μεταχείριση compost άρχισε να αναπτύσσεται πιο αργά. Στη μέτρηση των 40 ημερών, το ύψος των φυτών των μεταχειρίσεων BC-SS και BC-SS+Compost αυξήθηκε κατά 34.1% και 25% αντίστοιχα σε σχέση με τον μάρτυρα, ενώ το ύψος της μεταχείρισης compost ήταν μικρότερο σε σύγκριση με τον μάρτυρα. Στις 50 μέρες το ύψος των φυτών της μεταχείρισης Compost αυξήθηκε αρκετά (αύξηση 34,6%) σε σχέση με την προηγούμενη μέτρηση, αλλά όχι σε σχέση με τις άλλες μεταχειρίσεις. Στο διάστημα των 60 – 90 ημερών το ύψος των φυτών όλων των μεταχειρίσεων έμεινε στάσιμο ή αυξανόταν λίγο. Τέλος, στη μέτρηση των 100 ημερών το μεγαλύτερο ύψος παρατηρήθηκε στη μεταχείριση BC-SS και ακολουθούσαν οι BC-SS+Compost, Control και Compost. Παρόμοια αύξηση στο ύψος των φυτών της τομάτας παρατήρησαν και οι Agbna et al. (2017) και Hossain et al. (2011), οι οποίοι χρησιμοποίησαν βιοεξανθράκωμα από άχυρο σιταριού στους 350 – 550 °C και λυματολάσπη στους 550 °C αντίστοιχα. Επιπλέον, σύμφωνα με τους Li et al. (2018) η αύξηση του ύψους των μεταχειρίσεων με βιοεξανθράκωμα δεν ήταν γραμμική, κάτι που ισχύει και στο δικό μας πείραμα.



Σχήμα 3 - 1: Ύψος (cm) φυτών *Solanum Lycopersicum* L.

### 3.3.2. Διάμετρος Βλαστών

Η διάμετρος των βλαστών αυξήθηκε σε όλες τις μεταχειρίσεις σε σχέση με τον μάρτυρα. Η εφαρμογή βιοεξανθρακώματος, compost αλλά και ο συνδυασμός τους αύξησε τη διάμετρο του βλαστού περίπου 2mm σε σύγκριση με τον μάρτυρα. Μετά τη μέτρηση των 50 ημερών η διάμετρος των μεταχειρίσεων BC-SS και BC-SS+Compost αυξήθηκε κατά 5.8% και 9.8% αντίστοιχα σε σύγκριση με τον μάρτυρα. Ωστόσο, η μεγαλύτερη διάμετρος βλαστού βρέθηκε στη μεταχείριση BC-SS+Compost και ακολουθούσαν οι μεταχειρίσεις BC-SS και Compost. Αύξηση στη διάμετρο των βλαστών παρατήρησαν και οι Li et al. (2018) στις μετρήσεις τους κατά την περίοδο ωρίμανσης του καρπού. Η αύξηση της διαμέτρου των βλαστών, καθώς και του ύψους των φυτών, οφείλεται στη μεγάλη συσσώρευση ξηρής μάζας στα βλαστικά τμήμα πιθανόν λόγω της υψηλής διαθεσιμότητας σε N και P στο έδαφος (Vaccari et al., 2015).



Σχήμα 3 - 2: Διάμετρος βλαστού (mm) του φυτού *Solanum Lycopersicum* L.

### 3.3.3. Ξηρό και νωπό βάρος υπέργειων και υπόγειων φυτικών ιστών



Εικόνα 3- 5: Υπόγειοι και Υπέργειοι Φυτικοί ιστοί του φυτού *Solanum Lycopersicum* L.

Η εφαρμογή βιοεξανθρακώματος, compost αλλά και ο συνδυασμός αυτών επηρέασε με διαφορετικό τρόπο το ξηρό βάρος των υπέργειων φυτικών ιστών. Το ξηρό βάρος των καρπών μειώθηκε ή αυξήθηκε σε σύγκριση με τον μάρτυρα, αλλά η μεταβολή αυτή δεν ήταν στατιστικώς σημαντική. Συγκεκριμένα, η μεταχείριση BC–SS+Compost είχε τη μεγαλύτερη αύξηση και ακολουθούσε η μεταχείριση BC–SS, ενώ το ξηρό βάρος των καρπών της μεταχείρισης Compost ήταν το μισό σε σύγκριση με τον μάρτυρα, αλλά και με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις. Το ξηρό βάρος των βλαστών της τομάτας στις μεταχειρίσεις BC–SS και BC–SS+Compost αυξήθηκε κατά 79.4 % και 71.4% αντίστοιχα σε σύγκριση με τον μάρτυρα παρουσιάζοντας σημαντική στατιστική διαφορά, ενώ στη μεταχείριση Compost μειώθηκε κατά 24.5% σε σχέση με τον μάρτυρα. Το ξηρό βάρος των φύλλων αυξήθηκε κατά 4 – 19% σε όλες τις μεταχειρίσεις σε σύγκριση με τον μάρτυρα, και η μεγαλύτερη αύξηση παρατηρήθηκε στη μεταχείριση compost, χωρίς όμως οι αυξήσεις να είναι στατιστικώς σημαντικές. Το ξηρό βάρος των υπόγειων φυτικών ιστών (ρίζες) αυξήθηκε σε όλες τις μεταχειρίσεις συγκριτικά με τον μάρτυρα. Σημαντική στατιστική διαφορά είχαν οι μεταχειρίσεις BC–SS+Compost και BC–SS οι οποίες παρουσίασαν αύξηση κατά 59.8% και 40.5% αντίστοιχα. Τα ξηρά βάρη τόσο των υπέργειων όσο και των υπόγειων φυτικών ιστών βελτιώθηκαν με την προσθήκη βιοεξανθρακώματος (Agbna et al., 2017). Παρόμοια αποτελέσματα παρουσίασαν στα πειράματά τους και οι Hossain et al. (2010), Lehmann et al. (2003) και Liu et al. (2014).



Εικόνα 3- 6: Ρίζες από το φυτό *Solanum Lycopersicum* L. της μεταχείρισης α) Control β) BC – SS, γ) Compost και δ) BC – SS +Compost.

Το νωπό βάρος των καρπών της τομάτας αυξήθηκε στη μεταχείριση BC–SS+Compost και μειώθηκε στις μεταχειρίσεις BC–SS και Compost, σε σύγκριση με τον μάρτυρα. Σαν εμπορεύσιμο νωπό βάρος θεωρούμε τον καρπό της τομάτας ο οποίος ζυγίζει 80g και άνω. Έτσι, το εμπορεύσιμο νωπό βάρος ήταν μεγαλύτερο στις μεταχειρίσεις BC–SS και BC–SS+Compost σε σύγκριση με τον μάρτυρα, χωρίς να υπάρχει σημαντική στατιστική διαφορά. Ο μεγαλύτερος μέσος όρος νωπού βάρους βρέθηκε στους καρπούς της μεταχείρισης BC–SS, ενώ ο μικρότερος στη μεταχείριση Compost.



Εικόνα 3- 7: Καρπός από το φυτό *Solanum Lycopersicum* L.

Πίνακας 3 - 4: Νωπό και ξηρό βάρος καρπών

	Βάρος καρπών (g/pot)	Εμπορεύσιμο νωπό βάρος (g/pot)	Μ.Ο. νωπού βάρους (g)	Ξηρό Βάρος (g/pot)	Μ.Ο. Ξηρού Βάρους (g)
<i>Control</i>	427.97 ± 75.38a	376.67 ± 122.60a	84.66 ± 4.88ab	24.82 ± 8.84a	6.35 ± 1.49a
<i>BC – SS</i>	414.40 ± 119.92a	387.23 ± 136.40a	87.28 ± 9.78b	29.08 ± 6.47a	6.60 ± 0.26a
<i>Compost</i>	223.80 ± 121.44a	223.8 ± 121.43a	49.68 ± 25.46a	17.81 ± 9.25a	3.87 ± 1.71a
<i>BC – SS + Compost</i>	442.70 ± 105.62a	406.27 ± 83.54a	84.63 ± 7.06ab	32.66 ± 6.31a	6.79 ± 1.01a

Μέσος όρος ± τυπική απόκλιση (n=3), Κάτω από το όριο ανίχνευσης (<DL). Εφαρμόστηκε one-way ANOVA. Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε p<0.05.

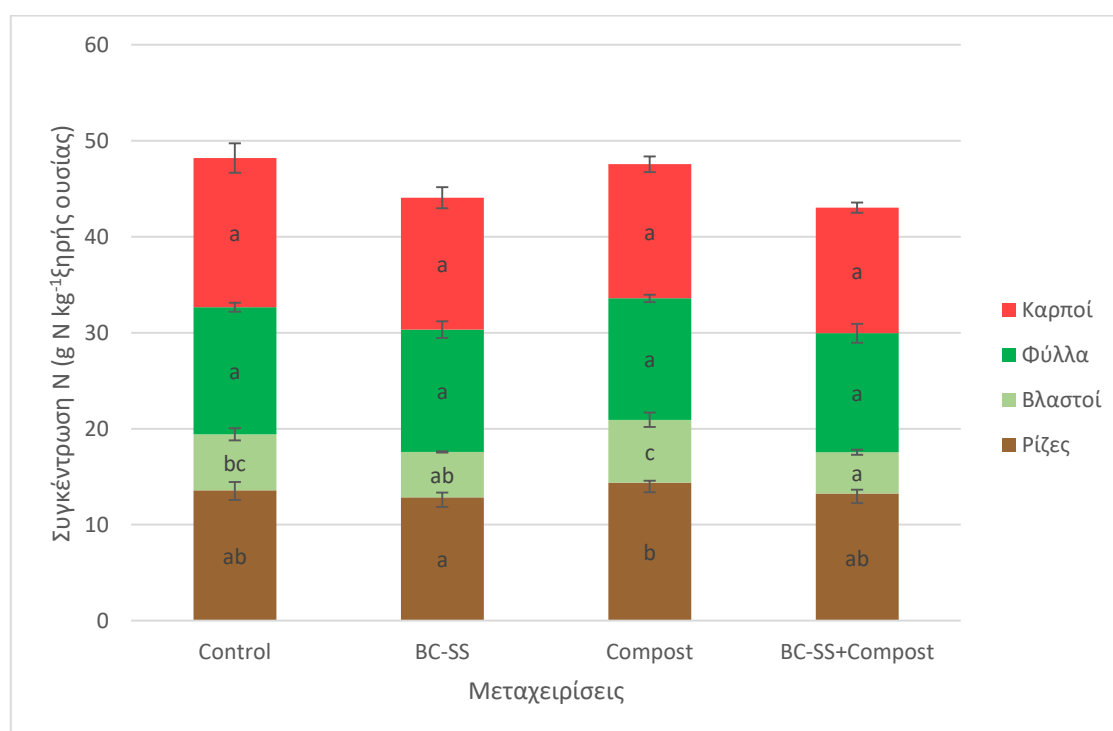
Πίνακας 3 - 5: Ξηρό βάρος ριζών, βλαστών και φύλλων

	Ξηρό Βάρος Ριζών (g)	Ξηρό Βάρος Βλαστών (g)	Ξηρό Βάρος Φύλλων (g)
<i>Control</i>	3.63 ± 0.38a	36.67 ± 8.22a	8.43 ± 0.76a
<i>BC – SS</i>	5.10 ± 0.17bc	65.80 ± 10.84b	9.07 ± 2.42a
<i>Compost</i>	4.60 ± 0.56ab	27.67 ± 6.05a	10.03 ± 2.46a
<i>BC – SS + Compost</i>	5.80 ± 0.35c	62.87 ± 6.70b	8.77 ± 2.02a

Μέσος όρος ± τυπική απόκλιση (n=3), Κάτω από το όριο ανίχνευσης (<DL). Εφαρμόστηκε one-way ANOVA. Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε p<0.05.

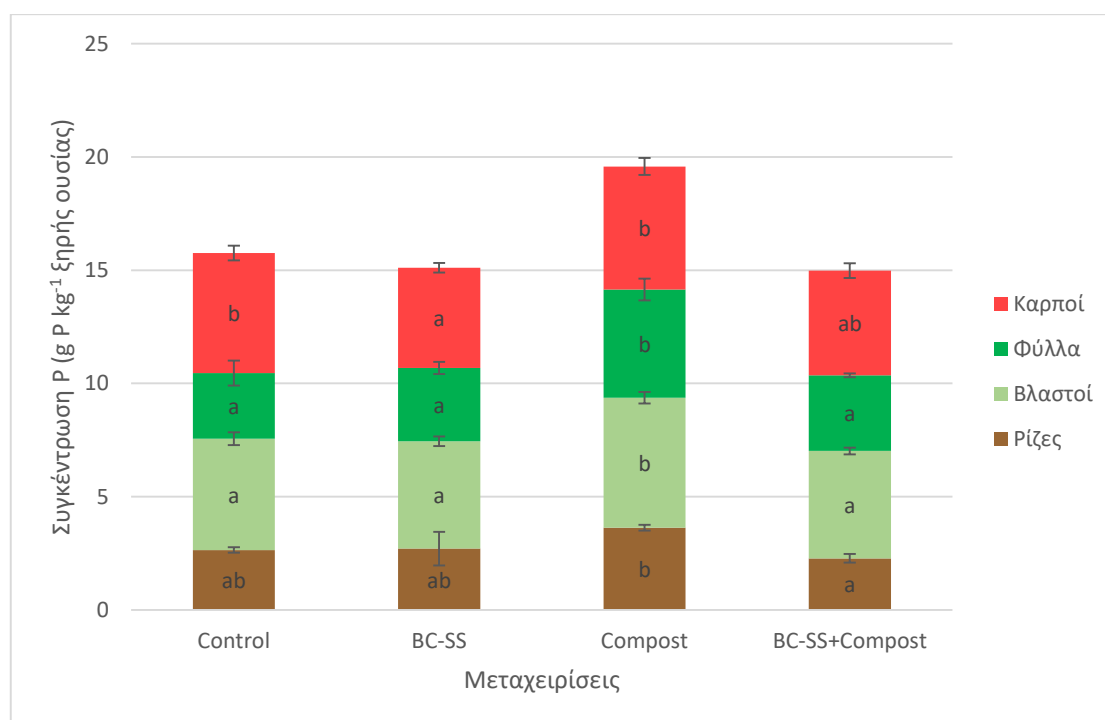
### 3.3.4. Συγκέντρωση μακροθρεπτικών N, P, K, Ca, Mg στους υπέργειους και υπόγειους φυτικούς ιστούς

Η συγκέντρωση του αζώτου (N) είχε διαφορετική συμπεριφορά για κάθε φυτικό ιστό και μεταχείριση. Στις ρίζες των φυτών των μεταχειρίσεων BC-SS και BC-SS+Compost η συγκέντρωση του N μειώθηκε και στη μεταχείριση Compost αυξήθηκε σε σύγκριση με τον μάρτυρα, όμως οι μεταβολές δεν ήταν στατιστικά σημαντικές. Οι βλαστοί των φυτών είχαν την ίδια συμπεριφορά με τις ρίζες, με τη μόνη διαφορά πως η μεταβολή της συγκέντρωσης N στους βλαστούς της μεταχείρισης BC-SS+Compost είχε σημαντική στατιστική διαφορά με τον μάρτυρα. Η συγκέντρωση του N στα φύλλα αλλά και στους καρπούς μειώθηκε σε σύγκριση με τον μάρτυρα, χωρίς όμως να υπάρχει σημαντική στατιστική διαφορά. Η μείωση του N στα φύλλα ήταν κατά 3.6 – 6.3% ενώ στους καρπούς κατά 10.2 – 15.8%. Οι Fornes et al. (2017) στα πειράματά τους παρατήρησαν διαφορετική συμπεριφορά της συγκέντρωσης N των φύλλων της τομάτας ανάλογα με τη δόση βιοεξανθρακώματος που εφαρμόζαν. Συγκεκριμένα, χρησιμοποίησαν δύο διαφορετικά βιοεξανθρακώματα, από δασικά απόβλητα και από απόβλητα ελαιολαιού, σε δόσεις 10 – 100% και παρατήρησαν πως στις μικρές δόσεις (10 – 25 %) η συγκέντρωση του N αυξανόταν, ενώ καθώς οι δόσεις αυξάνονταν ( 50 – 100%) η συγκέντρωση του N στα φύλλα μειωνόταν.



Σχήμα 3 - 3 Συγκέντρωση N ( $\text{g N kg}^{-1}$  ξηρής ουσίας) υπόγειων και υπέργειων φυτικών ιστών της *Solanum Lycopersicum* L. (μέσος όρος  $\pm$  τυπική απόκλιση,  $n=3$ ). Εφαρμόστηκε one-way ANOVA. Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε  $p<0.05$ .

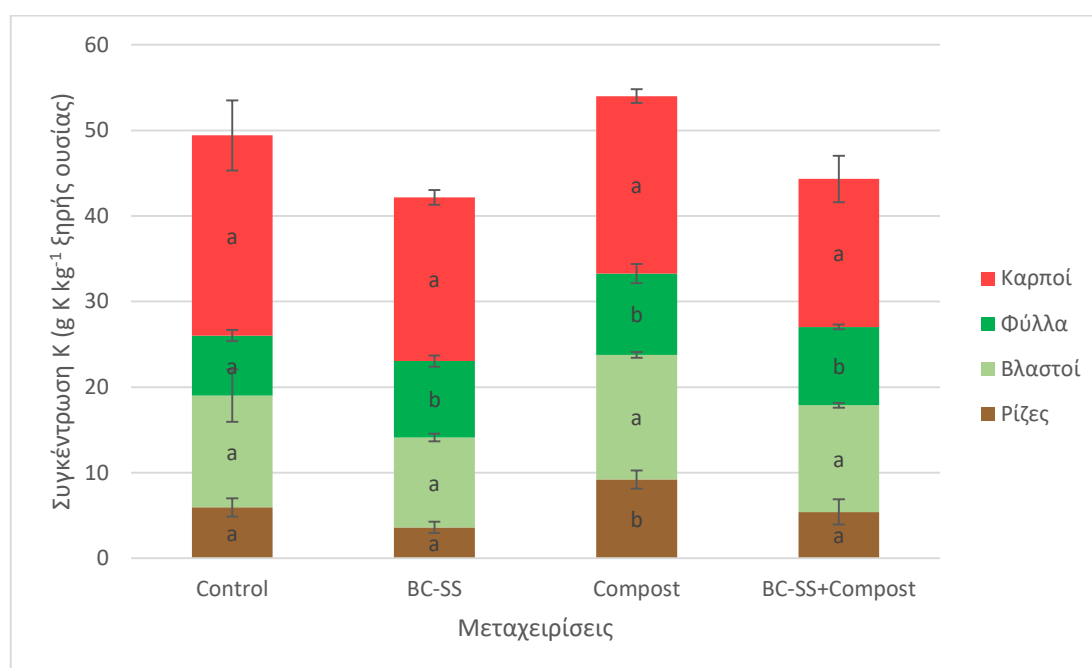
Η συγκέντρωση του φωσφόρου (P) αυξήθηκε ή μειώθηκε στους υπόγειους και υπέργειους φυτικούς ιστούς της τομάτας. Στις ρίζες υπήρξε αύξηση για όλες τις μεταχειρίσεις σε σχέση με τον μάρτυρα, όμως δεν υπήρχε σημαντική στατιστική διαφορά. Στους βλαστούς και στα φύλλα η συγκέντρωση του P μειώθηκε στις μεταχειρίσεις BC-SS και BC-SS+Compost, ενώ η μεταχείριση Compost παρουσίασε στατιστικώς σημαντική αύξηση. Οι καρποί των μεταχειρίσεων BC-SS και BC-SS+Compost σημείωσαν μείωση της συγκέντρωσης φωσφόρου με τη μεταχείριση BC-SS να έχει σημαντική στατιστική διαφορά. Η μεταχείριση Compost είχε αυξημένο P σε σύγκριση με τον μάρτυρα. Οι Fornes et al. (2017) εφαρμόζοντας διαφορετικές δόσεις βιοεξανθρακώματος από δασικά απόβλητα, 75% και 100%, παρατήρησαν μείωση στον P στα φύλλα των φυτών τομάτας καθώς αυξανόταν η δόση εφαρμογής. Αντίθετα, οι Usman et al. (2016) στα πειράματά τους με εφαρμογή βιοεξανθρακώματος από *Conocarpus* με δόση 4% και 8% ανέφεραν αύξηση της συγκέντρωσης του φωσφόρου του φυτού κατά 67% και 33% αντίστοιχα.



Σχήμα 3 - 4 : Συγκέντρωση P ( $\text{g P kg}^{-1}$  ξηρής ουσίας) υπόγειων και υπέργειων φυτικών ιστών της *Solanum Lycopersicum* L. (μέσος όρος  $\pm$  τυπική απόκλιση,  $n=3$ ). Εφαρμόστηκε one-way ANOVA. Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε  $p<0.05$ .

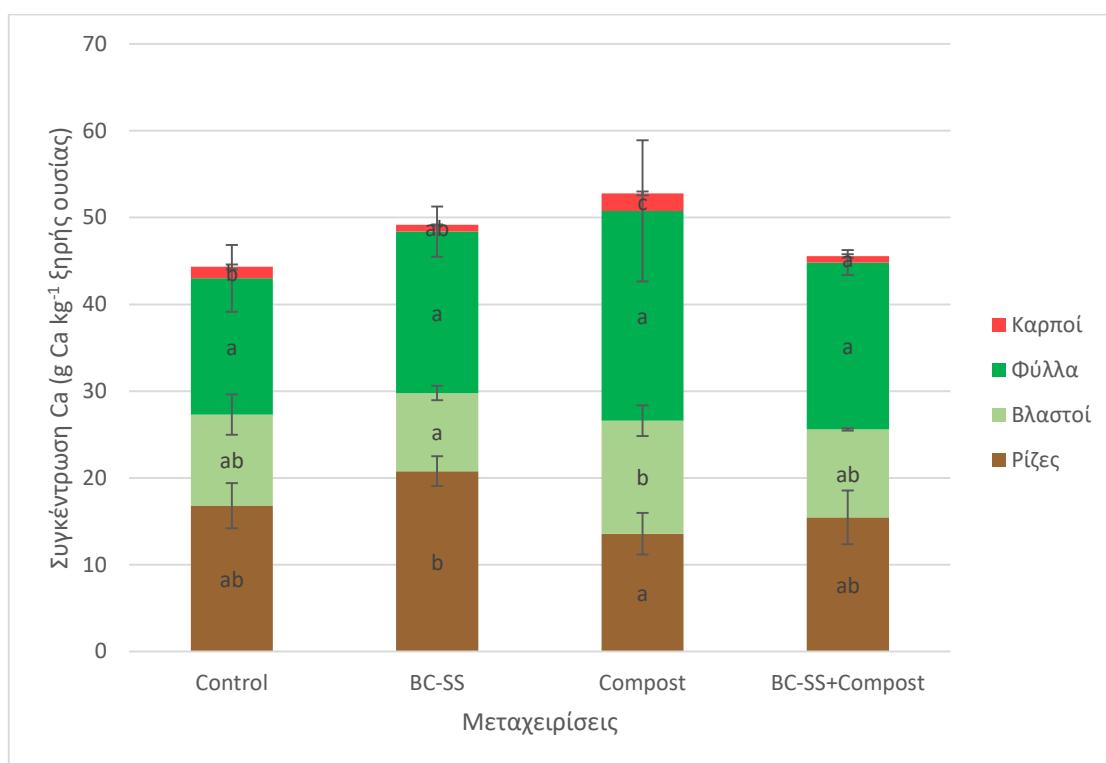
Η συγκέντρωση του καλίου (K) είτε μειώθηκε είτε αυξήθηκε στους υπόγειους και υπέργειους φυτικούς ιστούς. Στις ρίζες στατιστικώς σημαντική διαφορά παρουσίασε η μεταχείριση compost, η οποία είχε αυξημένο K κατά 54.7%. Μείωση στη συγκέντρωση του K στις ρίζες παρουσίασαν οι μεταχειρίσεις BC-SS και BC-SS+Compost, χωρίς όμως να παρουσιάζουν σημαντική στατιστική διαφορά. Στους

βλαστούς των φυτών δεν υπήρχε σημαντική στατιστική διαφορά μεταξύ των μεταχειρίσεων και του μάρτυρα. Συγκεκριμένα, οι μεταχειρίσεις BC–SS και BC–SS+Compost είχαν μειωμένη συγκέντρωση K στους βλαστούς κατά 19.7% και 4.7% αντίστοιχα, ενώ η μεταχείριση Compost παρουσίασε αύξηση 11.4%. Η συγκέντρωση του K στα φύλλα των φυτών αυξήθηκε στατιστικώς σημαντικά σε όλες τις μεταχειρίσεις, ενώ η μεγαλύτερη αύξηση παρατηρήθηκε στη μεταχείριση Compost. Η συγκέντρωση του K μειώθηκε στους καρπούς όλων των μεταχειρίσεων, χωρίς αυτές οι μεταβολές να είναι στατιστικώς σημαντικές. Σημαντικά στατιστικές διαφορές στο K των φύλλων της τομάτας ανέφεραν και οι Fornes et al. (2017).



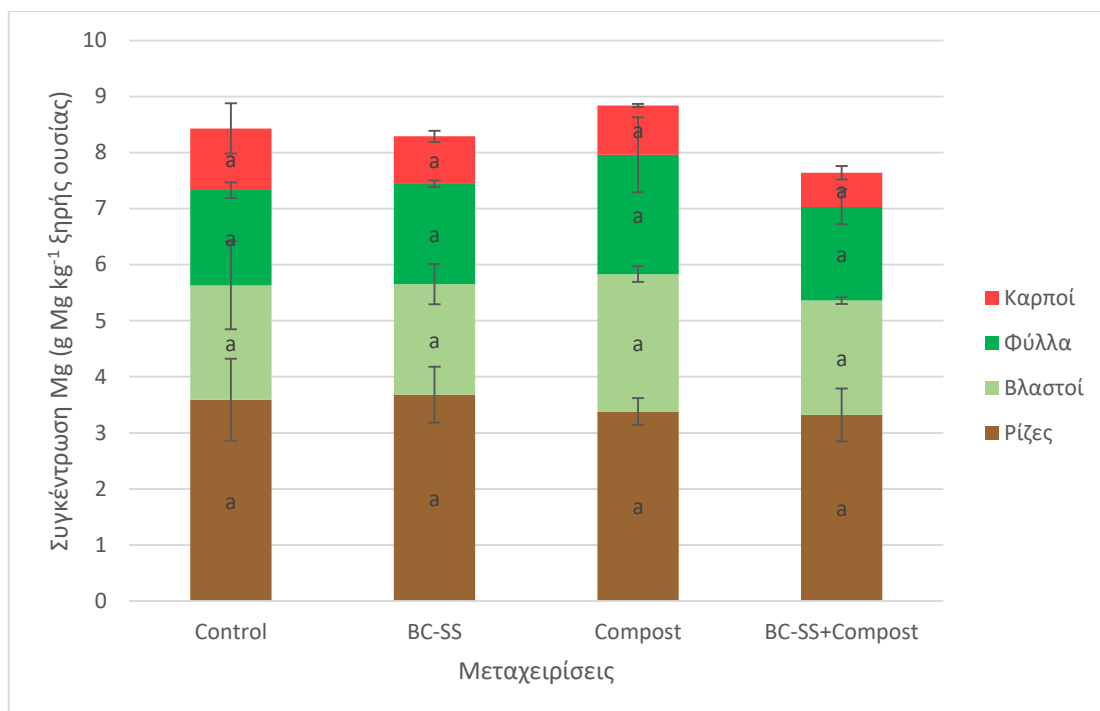
Σχήμα 3 - 5 : Συγκέντρωση K ( $\text{g K kg}^{-1}$  ξηρής ουσίας) υπόγειων και υπέργειων φυτικών ιστών της *Solanum Lycopersicum* L. (μέσος όρος  $\pm$  τυπική απόκλιση,  $n=3$ ). Εφαρμόστηκε one-way ANOVA. Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε  $p<0.05$ .

Η συγκέντρωση του ασβεστίου (Ca) είτε αυξήθηκε είτε μειώθηκε στους υπόγειους και υπέργειους φυτικούς ιστούς, χωρίς όμως οι μεταβολές να είναι στατιστικώς σημαντικές, εκτός από τη μεταχείριση compost που είχε σημαντική αύξηση Ca στους καρπούς. Ειδικότερα, η συγκέντρωση του Ca αυξήθηκε στη μεταχείριση BC–SS κατά 23.6%, ενώ μειώθηκε στις μεταχειρίσεις Compost και BC–SS+Compost κατά 19.2% και 8% αντίστοιχα. Στους βλαστούς των φυτών, η συγκέντρωση Ca μειώθηκε στις μεταχειρίσεις BC–SS και BC–SS+Compost σε σύγκριση με το μάρτυρα, ενώ αυξήθηκε στη μεταχείριση Compost. Τα φύλλα σε όλες τις μεταχειρίσεις παρουσίασαν αυξημένη συγκέντρωση Ca σε σύγκριση με τον μάρτυρα, ενώ οι καρποί είχαν μείωση Ca στις μεταχειρίσεις BC–SS και BC–SS+Compost, και σημαντική στατιστική αύξηση στη μεταχείριση Compost. Οι Fornes et al. (2017) στα πειράματά τους ανέφεραν αύξηση της συγκέντρωσης του Ca στα φύλλα των φυτών τομάτας ύστερα από την εφαρμογή βιοεξανθρακώματος από δασικά απόβλητα με δόση 10 και 25%.



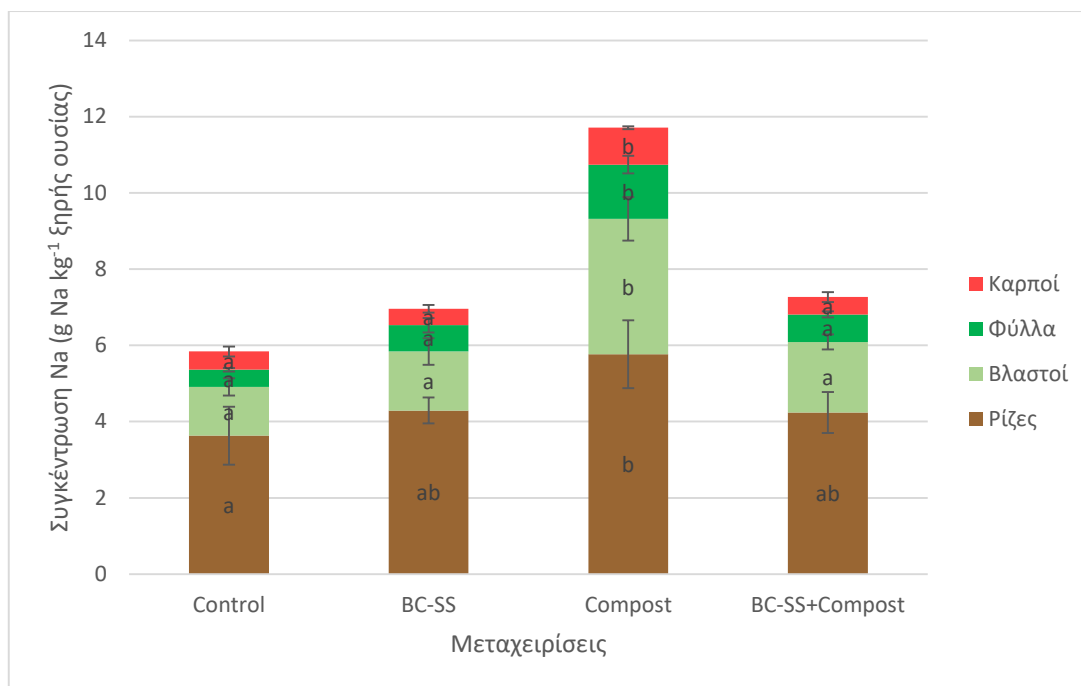
Σχήμα 3 - 6 : Συγκέντρωση Ca ( $\text{g Ca kg}^{-1}$  ξηρής ουσίας) υπόγειων και υπέργειων φυτικών ιστών της *Solanum Lycopersicum* L. (μέσος όρος  $\pm$  τυπική απόκλιση,  $n=3$ ). Εφαρμόστηκε one-way ANOVA. Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε  $p<0.05$ .

Η συγκέντρωση του μαγνησίου (Mg), είτε αυξήθηκε είτε μειώθηκε ή δεν επηρεάστηκε στους φυτικούς ιστούς των μεταχειρίσεων, χωρίς να υπάρχουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές. Στις ρίζες των φυτών οι μεταχειρίσεις παρουσίασαν μικρή αύξηση (μεταχείριση BC-SS) ή μικρή μείωση (μεταχειρίσεις Compost και BC-SS+Compost) σε σύγκριση με τη συγκέντρωση του Mg στον μάρτυρα. Η συγκέντρωση του Mg στους βλαστούς μειώθηκε στη μεταχείριση BC-SS, αυξήθηκε στη μεταχείριση Compost, ενώ δεν επηρεάστηκε στη μεταχείριση BC-SS+Compost. Τα φύλλα των μεταχειρίσεων BC-SS και Compost είχαν αυξημένη συγκέντρωση Mg σε σύγκριση με τον μάρτυρα, σε αντίθεση τη μεταχείριση BC-SS+Compost όπου παρατηρήθηκε μείωση. Η συγκέντρωση του Mg στους καρπούς μειώθηκε σε όλες τις μεταχειρίσεις κατά 44.5 – 20% σε σχέση με τον μάρτυρα. Στα πειράματά τους οι Fornes et al. (2017) παρατήρησαν μείωση στη συγκέντρωση Mg στα φύλλα της τομάτας. Συγκεκριμένα, η μείωση αυτή παρατηρήθηκε για όλες τις διαφορετικές δόσεις βιοεξανθρακώματος (10, 25, 50, 70 και 100%) από δασικά απόβλητα και απόβλητα ελαιοτριβείου, χωρίς να υπάρχουν σημαντικά στατιστικές διαφορές.



Σχήμα 3 - 7 : Συγκέντρωση Mg ( $\text{g Mg kg}^{-1}$  ξηρής ουσίας) υπόγειων και υπέργειων φυτικών ιστών της *Solanum Lycopersicum L.* (μέσος όρος  $\pm$  τυπική απόκλιση,  $n=3$ ). Εφαρμόστηκε one-way ANOVA. Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε  $p<0.05$ .

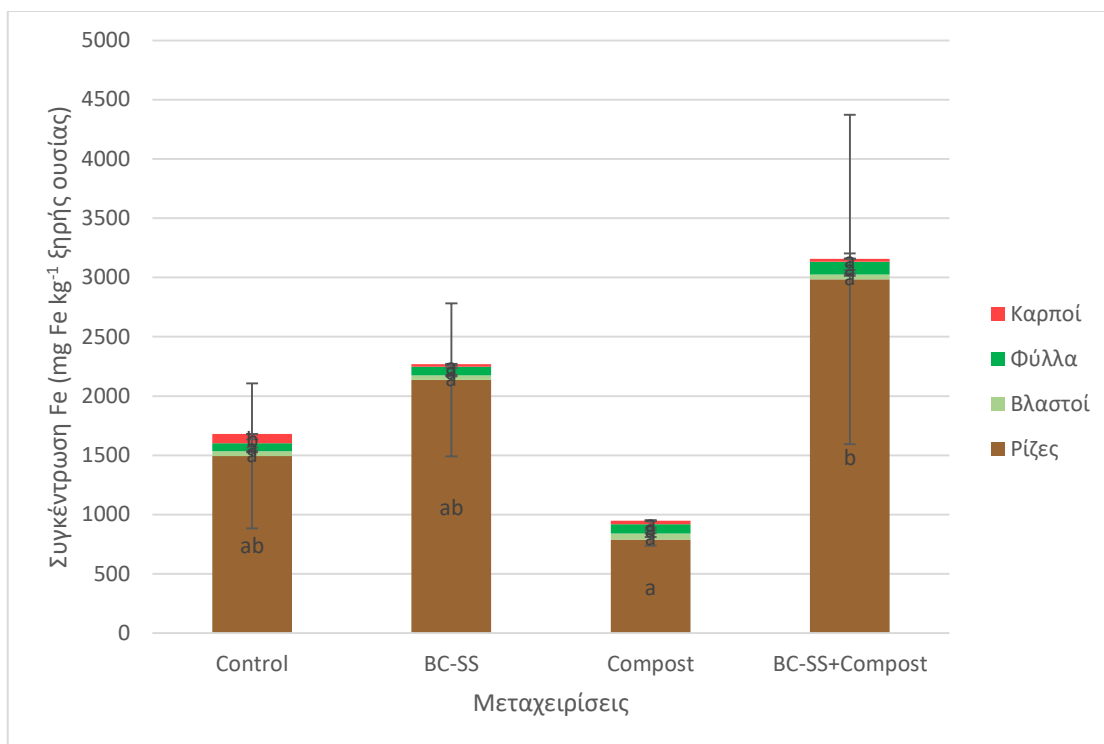
Η συγκέντρωση νατρίου (Na) αυξήθηκε στους υπόγειους και υπέργειους φυτικούς ιστούς όλων των μεταχειρίσεων, εκτός από τις μεταχειρίσεις BC-SS και BC-SS+Compost στους καρπούς όπου μειώθηκε ελάχιστα. Στις ρίζες των φυτών υπήρχε αύξηση της συγκέντρωσης του Na σε όλες τις μεταχειρίσεις, ενώ τη μεγαλύτερη στατιστικώς σημαντική αύξηση παρουσιάζει η μεταχείριση Compost. Την ίδια ακριβώς συμπεριφορά έχει το Na και στους βλαστούς των φυτών, όπου υπάρχει 21% αύξηση στη μεταχείριση BC-SS, 44.5% στη BC-SS+Compost, ενώ η μεταχείριση Compost εμφανίζει σημαντική στατιστική διαφορά με αύξηση συγκέντρωσης Na 177.3%. Στατιστικώς σημαντική διαφορά στη συγκέντρωση Na στα φύλλα παρουσιάζει η μεταχείριση compost με αύξηση κατά 215.5%, ενώ οι άλλες μεταχειρίσεις έχουν μικρή αύξηση σε σύγκριση με τον μάρτυρα. Οι καρποί των μεταχειρίσεων BC-SS και BC-SS+Compost παρουσίασαν μικρή μείωση στη συγκέντρωση Na, ενώ στους καρπούς της μεταχείρισης Compost το Na αυξήθηκε στατιστικώς σημαντικά.



Σχήμα 3 - 8 : Συγκέντρωση Na ( $\text{g Na kg}^{-1}$  ξηρής ουσίας) υπόγειων και υπέργειων φυτικών ιστών της *Solanum Lycopersicum L.* (μέσος όρος  $\pm$  τυπική απόκλιση,  $n=3$ ). Εφαρμόστηκε one-way ANOVA. Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε  $p<0.05$ .

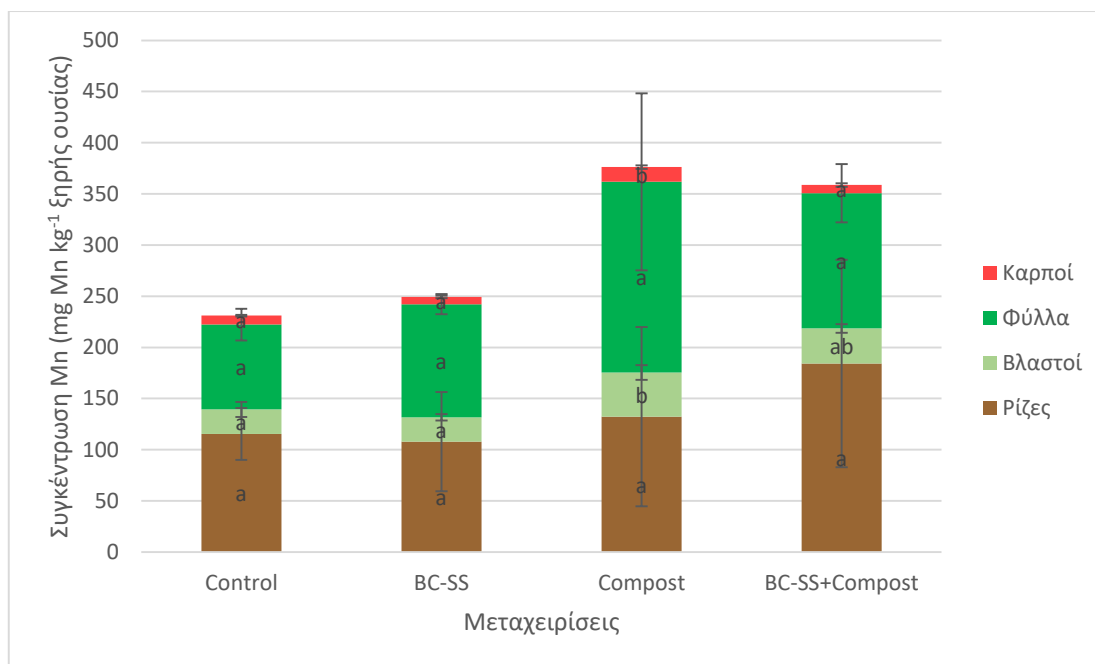
### 3.3.4. Συγκέντρωση μικροθρεπτικών Fe, Mn, Cu, Zn στους υπόγειους και υπέργειους φυτικούς ιστούς

Η συγκέντρωση του σιδήρου (Fe), είτε μειώθηκε είτε αυξήθηκε στους υπόγειους και υπέργειους φυτικούς ιστούς με την προσθήκη βιοεξανθρακώματος, compost και με τον συνδυασμό αυτών. Στις ρίζες των φυτών δεν υπήρχε σημαντική στατιστική διαφορά, παρόλα αυτά στις μεταχειρίσεις BC-SS και BC-SS+Compost ο Fe αυξήθηκε κατά 43% και 99.6%, ενώ στη μεταχείριση Compost μειώθηκε κατά 47.1%. Η συγκέντρωση του Fe στους βλαστούς μειώθηκε στη μεταχείριση BC-SS και αυξήθηκε στις μεταχειρίσεις Compost και BC-SS+Compost, χωρίς όμως οι μεταβολές αυτές να είναι στατιστικώς σημαντικές. Οι μεταβολές στη συγκέντρωση του Fe στα φύλλα δεν είναι στατιστικά σημαντικές. Παρόλα αυτά, ο Fe των φύλλων αυξήθηκε σε όλες τις μεταχειρίσεις, με την μέγιστη αύξηση (64%) να εμφανίζεται στην μεταχείριση BC-SS+Compost. Η συγκέντρωση του Fe στους καρπούς μειώθηκε στατιστικώς σημαντικά σε όλες τις μεταχειρίσεις. Συγκεκριμένα, η συγκέντρωση του Fe στους καρπούς στις μεταχειρίσεις BC-SS, Compost και BC-SS+Compost ήταν  $21.26 \text{ mg kg}^{-1}$ ,  $28.24 \text{ mg kg}^{-1}$  και  $24.04 \text{ mg kg}^{-1}$  αντίστοιχα, ενώ στον μάρτυρα ο Fe ήταν ίσος με  $77.98 \text{ mg kg}^{-1}$ . Στα πειράματά τους οι Usman et al. (2016), οι οποίοι χρησιμοποίησαν βιοεξανθράκωμα από *copocarpus* σε δύο διαφορετικές δόσεις (4% και 8%), παρατήρησαν πως η συγκέντρωση του Fe του φυτού του μάρτυρα ήταν  $143 \text{ mg kg}^{-1}$  και με εφαρμογή βιοεξανθρακώματος με δόση 4% ήταν  $198 \text{ mg kg}^{-1}$ . Όταν όμως, η δόση αυτή έγινε διπλάσια (8%), παρατήρησαν μείωση της συγκέντρωσης του Fe.



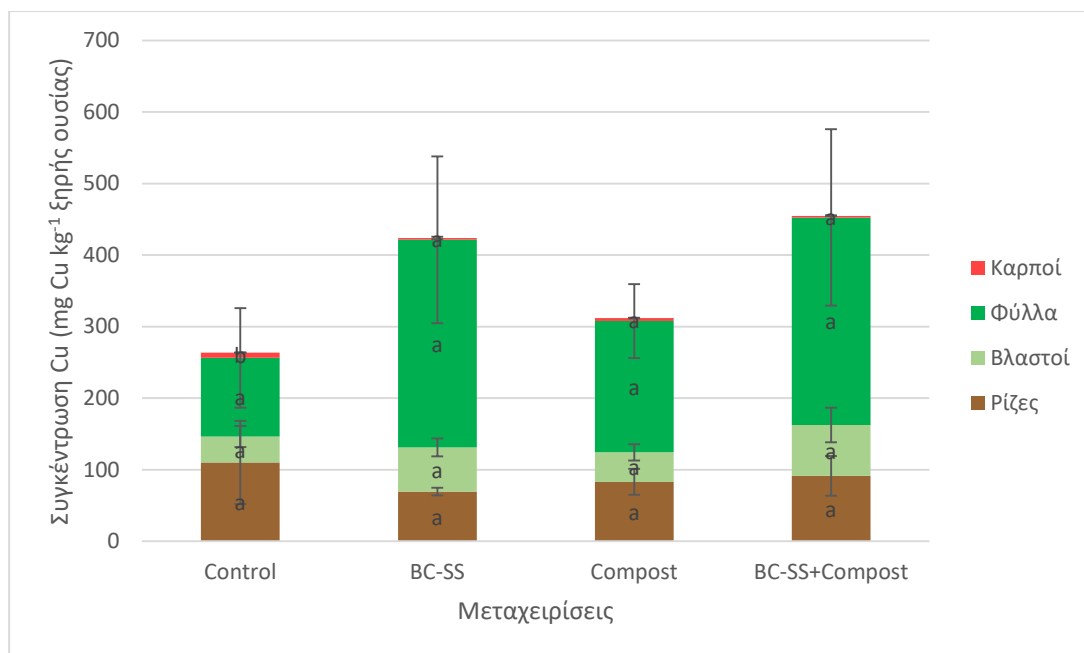
Σχήμα 3 - 9 : Συγκέντρωση Fe ( $\text{mg Fe kg}^{-1}$  ξηρής ουσίας) υπόγειων και υπέργειων φυτικών ιστών της *Solanum Lycopersicum L.* (μέσος όρος  $\pm$  τυπική απόκλιση,  $n=3$ ). Εφαρμόστηκε one-way ANOVA. Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε  $p<0.05$ .

Η συγκέντρωση του μαγγανίου (Mn) στους υπόγειους και υπέργειους φυτικούς ιστούς αυξήθηκε ή μειώθηκε. Οι μεταβολές στη συγκέντρωση του Mn των ριζών δεν είναι στατιστικώς σημαντικές, παρόλα αυτά υπήρχε αύξηση στις μεταχειρίσεις Compost και BC-SS+Compost και μείωση στη μεταχείριση BC-SS. Η συγκέντρωση του Mn στους βλαστούς έμεινε σχεδόν αμετάβλητη στη μεταχείριση BC-SS, αυξήθηκε κατά 42.6% στη μεταχείριση BC-SS+Compost και παρουσίασε τη μεγαλύτερη στατιστική αύξηση στη μεταχείριση Compost. Τα φύλλα των φυτών είχαν αύξηση του Mn, χωρίς να υπάρχει σημαντική στατιστική διαφορά και την μεγαλύτερη αύξηση είχε η μεταχείριση Compost. Στατιστικώς σημαντική διαφορά στη συγκέντρωση Mn στους καρπούς παρουσιάζει η μεταχείριση Compost με αύξηση 65% σε σύγκριση με το μάρτυρα, ενώ στις μεταχειρίσεις BC-SS και BC-SS+Compost υπήρχε μείωση Mn. Οι Usman et al. (2016) πως καθώς αύξαναν τη δόση εφαρμογής βιοεξανθρακώματος από *conocarpus* αυξανόταν και η συγκέντρωση του Mn στο φυτό της τομάτας.



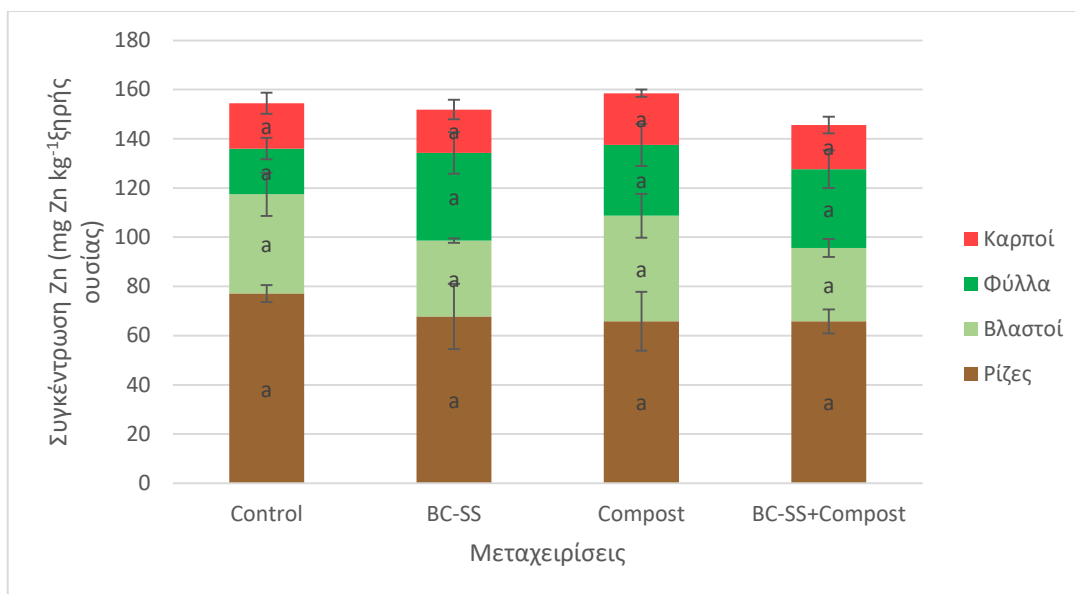
Σχήμα 3 - 10 : Συγκέντρωση Mn ( $\text{mg Mn kg}^{-1}$  ξηρής ουσίας) υπόγειων και υπέργειων φυτικών ιστών της *Solanum Lycopersicum L.* (μέσος όρος  $\pm$  τυπική απόκλιση,  $n=3$ ). Εφαρμόστηκε one-way ANOVA. Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε  $p<0.05$ .

Η συγκέντρωση του χαλκού (Cu) είτε αυξήθηκε είτε μειώθηκε στους υπόγειους και υπέργειους φυτικούς ιστούς της τομάτας. Ειδικότερα, οι ρίζες όλων των μεταχειρίσεων είχαν μικρότερη συγκέντρωση Cu σε σύγκριση με τον μάρτυρα, χωρίς όμως οι διαφορές να είναι στατιστικώς σημαντικές. Στους βλαστούς των φυτών υπήρξε αύξηση του Cu σε σχέση με τον μάρτυρα, με την μεγαλύτερη αύξηση να συναντάται στη μεταχείριση BC-SS+Compost και τη μικρότερη στη μεταχείριση Compost. Η συγκέντρωση του Cu στα φύλλα αυξήθηκε σε όλες τις μεταχειρίσεις, αλλά δεν υπήρχε σημαντική στατιστική διαφορά. Μείωση στη συγκέντρωση του Cu στον καρπό παρουσίασαν όλες οι μεταχειρίσεις, με τη μεγαλύτερη μείωση να υπάρχει στη μεταχείριση BC-SS+Compost. Στα πειράματά τους οι Hossain et al. (2011), οι οποίοι εφάρμοσαν σε εδάφη βιοεξανθράκωμα από λυματολάσπη, εδαφοβελτιωτικό, και συνδυασμό αυτών των δύο ανέφεραν πως η συγκέντρωση του Cu στον καρπό της τομάτας αυξήθηκε στις μεταχειρίσεις με βιοεξανθράκωμα και με τον συνδυασμό βιοεξανθρακώματος – εδαφοβελτιωτικού και μειώθηκε με στη μεταχείριση με το εδαφοβελτιωτικό. Αντίθετα, οι Usman et al. (2016) ανέφεραν μείωση της συγκέντρωσης του Cu με εφαρμογή βιοεξανθρακώματος δόσης 4 και 8%. Η συγκέντρωση του Cu σύμφωνα με την Australian MPC στους καρπούς της τομάτας πρέπει να είναι  $10 - 70 \text{ mg kg}^{-1}$ , πράγμα που συμβαίνει και στους καρπούς του πειράματός μας.



Σχήμα 3 - 11 : Συγκέντρωση Cu ( $\text{mg Cu kg}^{-1}$  ξηρής ουσίας) υπόγειων και υπέργειων φυτικών ιστών της *Solanum Lycopersicum L.* (μέσος όρος  $\pm$  τυπική απόκλιση,  $n=3$ ). Εφαρμόστηκε one-way ANOVA. Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε  $p<0.05$ .

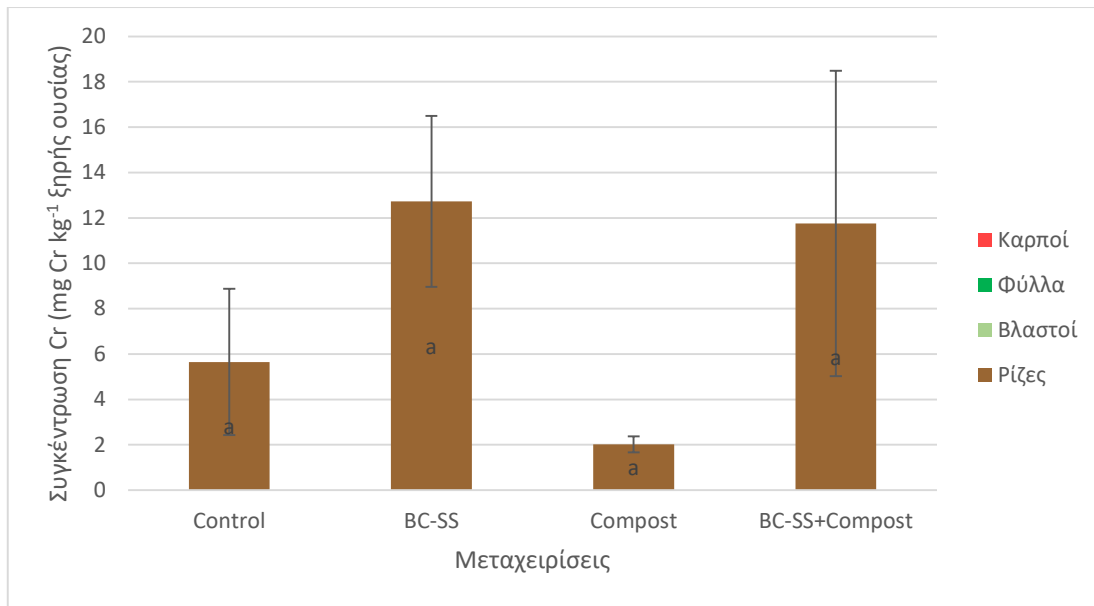
Η συγκέντρωση του ψευδαργύρου (Zn) αυξήθηκε ή μειώθηκε στους υπόγειους και υπέργειους φυτικούς ιστούς της τομάτας, χωρίς να εμφανίζει πουθενά στατιστικώς σημαντική διαφορά. Συγκριμένα, ο Zn στις ρίζες των φυτών μειώθηκε σε όλες τις μεταχειρίσεις σε σύγκριση με τον μάρτυρα, αντίθετα με τα φύλλα στα οποία αυξήθηκε. Η συγκέντρωση του Zn στους βλαστούς αλλά και στους καρπούς της τομάτας μειώθηκε στις μεταχειρίσεις BC-SS και BC-SS+Compost, ενώ αυξήθηκε στη μεταχείριση Compost. Στα πειράματά τους οι Hossain et al. (2011) ανέφεραν αύξηση της συγκέντρωσης του Zn στον καρπό της τομάτας στις μεταχειρίσεις με βιοεξανθράκωμα και με συνδυασμό βιοεξανθρακώματος – εδαφοβελτιωτικού, ενώ παρατήρησε μείωση του Zn στην μεταχείριση που είχε εφαρμόσει μόνο εδαφοβελτιωτικό. Η οριακή συγκέντρωση Zn που είναι αποδεκτή για τον καρπό της τομάτας σύμφωνα με το WHO/FAO (1984) είναι  $27.3 \text{ mg kg}^{-1}$  ξηρής ουσίας. Στο δικό μας πείραμα, η μεγαλύτερη συγκέντρωση Zn στον καρπό βρέθηκε στη μεταχείριση Compost και ήταν  $20.9 \text{ mg kg}^{-1}$  ξηρής ουσίας.



Σχήμα 3 - 12 : Συγκέντρωση Zn ( $\text{mg Zn kg}^{-1}$  ξηρής ουσίας) υπόγειων και υπέργειων φυτικών ιστών της *Solanum Lycopersicum* L. (μέσος όρος  $\pm$  τυπική απόκλιση,  $n=3$ ). Εφαρμόστηκε one-way ANOVA. Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε  $p<0.05$ .

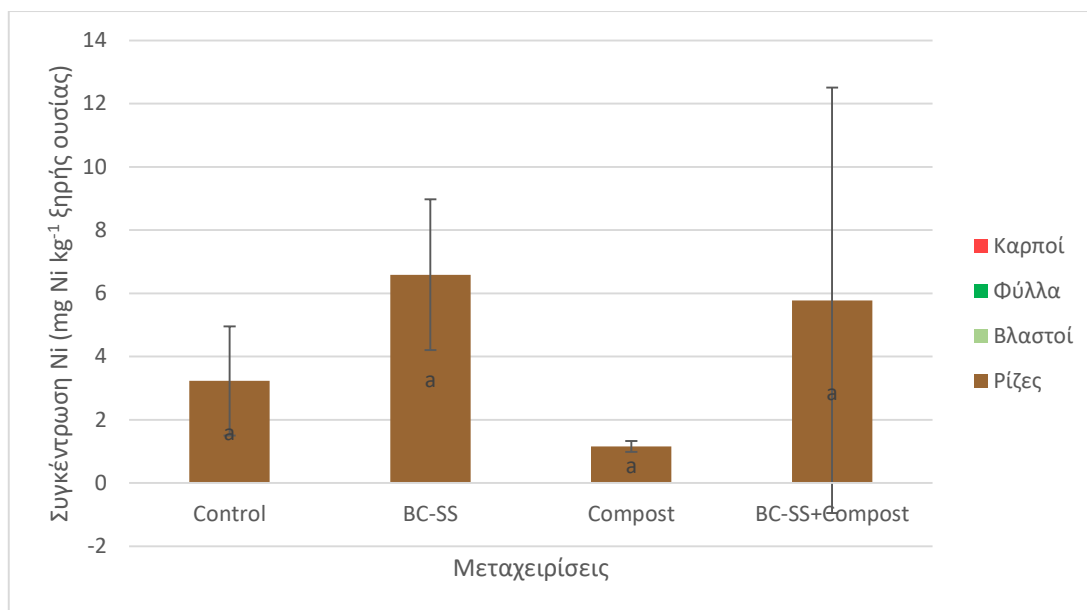
### 3.3.5. Συγκέντρωση βαρέων μετάλλων στους υπόγειους και υπέργειους φυτικούς ιστούς

Το χρώμιο (Cr), αν και υπήρχε στο έδαφος των μεταχειρίσεων, απορροφήθηκε μόνο από τους υπόγειους φυτικούς ιστούς. Ειδικότερα, η συγκέντρωση του Cr στις ρίζες των μεταχειρίσεων είτε αυξήθηκε είτε μειώθηκε σε σύγκριση με τον μάρτυρα. Στις μεταχειρίσεις BC-SS και BC-SS+Compost το Cr αυξήθηκε κατά 125.3% και 108% αντίστοιχα, ενώ στη μεταχείριση Compost μειώθηκε κατά 64.2%, χωρίς κάποια από τις μεταβολές να είναι στατιστικώς σημαντική. Σε κανέναν από τους υπέργειους φυτικούς ιστούς (βλαστοί, φύλλα, καρποί) δεν ανιχνεύτηκε Cr. Αντίστοιχα αποτελέσματα ανάφεραν και οι Hossain et al. (2011), οι οποίοι εφάρμοσαν βιοεξανθράκωμα από λυματολάσπη σε φυτά τομάτας. Αντίθετα, οι Rajenί et al. (2018), οι οποίοι καλλιέργησαν τομάτες σε έδαφος με μεγάλες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων παρατήρησαν πως ο καρπός της τομάτας είχε συγκέντρωση Cr  $1.2 \mu\text{g g}^{-1}$  ξηρής ουσίας. Σύμφωνα με την WHO/FAO (1984), τα όρια της συγκέντρωσης χρωμίου στα οπωροκηπευτικά είναι  $5.00 - 30.00 \text{ mg kg}^{-1}$  ξηρής ουσίας.



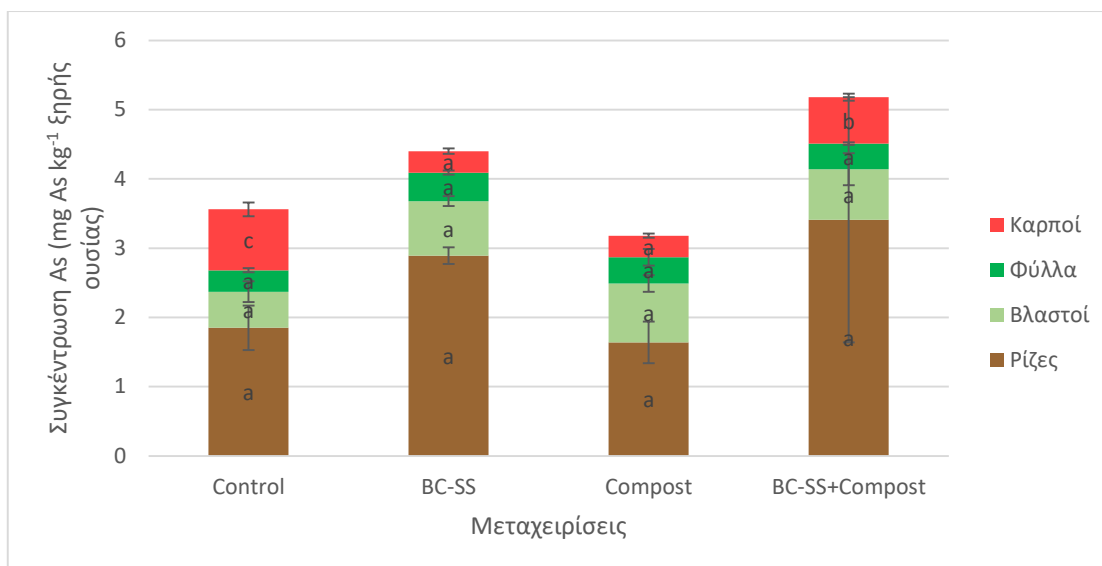
Σχήμα 3 - 13 : Συγκέντρωση Cr (mg Cr kg<sup>-1</sup> ξηρής ουσίας) υπόγειων και υπέργειων φυτικών ιστών της *Solanum Lycopersicum* L. (μέσος όρος  $\pm$  τυπική απόκλιση, n=3). Εφαρμόστηκε one-way ANOVA. Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε  $p < 0.05$ .

Το νικέλιο (Ni) βρέθηκε μόνο στις ρίζες των φυτών της τομάτας σε όλες τις μεταχειρίσεις. Στις ρίζες των μεταχειρίσεων BC-SS, Compost και BC-SS+Compost η συγκέντρωση του Ni βρέθηκε 6.59 mg kg<sup>-1</sup> ξηρής ουσίας, 1.16 mg kg<sup>-1</sup> ξηρής ουσίας και 5.78 mg kg<sup>-1</sup> ξηρής ουσίας, αντίστοιχα. Το Ni αυξήθηκε στις μεταχειρίσεις, οι οποίες περιείχαν βιοεξανθράκωμα, και μειώθηκε στη μεταχείριση που περιείχε μόνο compost σε σύγκριση με τον μάρτυρα, παρόλα αυτά οι μεταβολές δεν ήταν στατιστικώς σημαντικές. Οι Hossain et al (2011) παρατήρησαν πως η συγκέντρωση του Ni στους καρπούς της τομάτας ήταν 1.2 mg kg<sup>-1</sup> ξηρής ουσίας στις μεταχειρίσεις με βιοεξανθράκωμα, ενώ σε εκείνες με συνδυασμό βιοεξανθρακώματος – εδαφοβελτιωτικού ήταν 0.61 mg kg<sup>-1</sup> ξηρής ουσίας. Τα όρια της συγκέντρωσης Ni στα οπωροκηπευτικά είναι 1.63 mg kg<sup>-1</sup> ξηρής ουσίας (WHO/FAO, 1984).



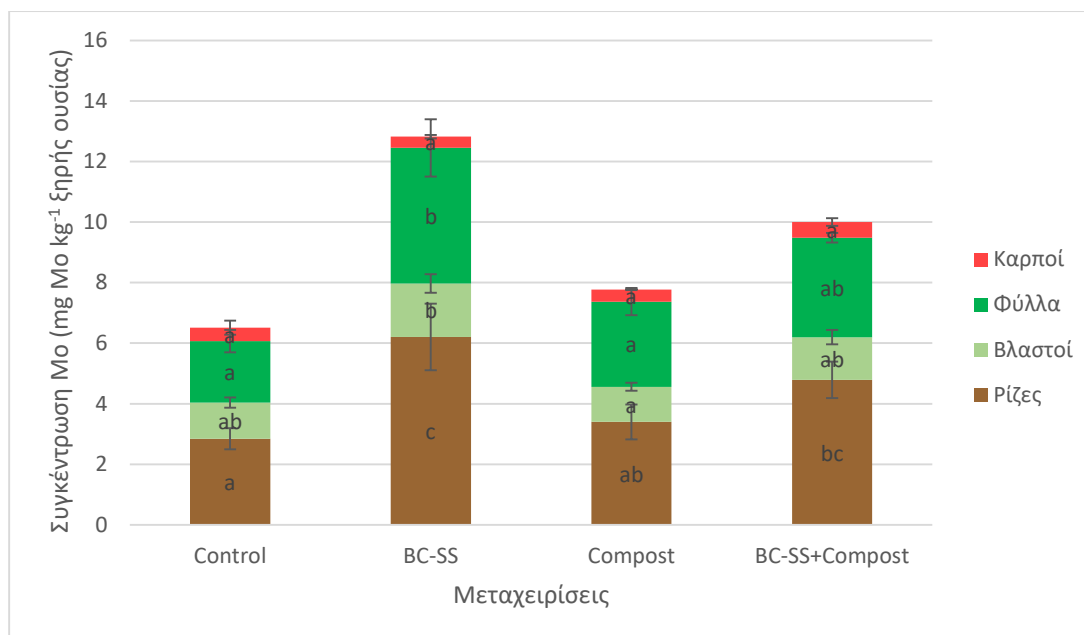
Σχήμα 3 - 14 : Συγκέντρωση Ni (mg Ni kg<sup>-1</sup> ξηρής ουσίας) υπόγειων και υπέργειων φυτικών ιστών της *Solanum Lycopersicum* L. (μέσος όρος  $\pm$  τυπική απόκλιση, n=3). Εφαρμόστηκε one-way ANOVA. Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε  $p < 0.05$ .

Η συγκέντρωση του αρσενικού (As) είτε αυξήθηκε είτε μειώθηκε στους υπόγειους και υπέργειους φυτικούς ιστούς όλων των μεταχειρίσεων. Συγκεκριμένα, στις ρίζες των φυτών στις μεταχειρίσεις BC–SS και BC–SS+Compost αυξήθηκε κατά 56.2% και 84.3% αντίστοιχα, ενώ στη μεταχείριση Compost μειώθηκε κατά 11.4% σε σύγκριση με τον μάρτυρα, χωρίς όμως οι μεταβολές να είναι στατιστικώς σημαντικές. Οι βλαστοί των φυτών όλων των μεταχειρίσεων παρουσίασαν αύξηση στη συγκέντρωση του As σε σύγκριση με τον μάρτυρα. Τη μέγιστη αύξηση (63.2%) παρουσίασε η μεταχείριση Compost, αλλά δεν ήταν στατιστικά σημαντική διαφορά. Η συγκέντρωση του As στα φύλλα αυξήθηκε σε όλες τις μεταχειρίσεις σε σχέση με τον μάρτυρα, χωρίς όμως κάποια αύξηση να είναι σημαντική στατιστικά. Στατιστικώς σημαντική μείωση στη συγκέντρωση του As των καρπών παρουσίασαν όλες οι μεταχειρίσεις. Συγκεκριμένα, ο μάρτυρας είχε συγκέντρωση As ίση με 0.88 mg kg<sup>-1</sup> ξηρής ουσίας, ενώ οι μεταχειρίσεις BC–SS, Compost και BC–SS+Compost είχαν 0.31, 0.31 και 0.67 mg kg<sup>-1</sup> ξηρής ουσίας αντίστοιχα. Τα όρια επικινδυνότητας για τον καρπό της τομάτας σύμφωνα με την Australian MPC είναι 1 mg kg<sup>-1</sup> ξηρής ουσίας, οπότε δεν υπάρχει κάποιος κίνδυνος. Παρόμοια αποτελέσματα ανέφεραν και οι Hossain et al. (2011), οι οποίοι παρατήρησαν μείωση της συγκέντρωσης του As στους καρπούς των φυτών της τομάτας, όταν εφαρμόσανε στο έδαφος βιοξανθράκωμα από λυματολάσπη.



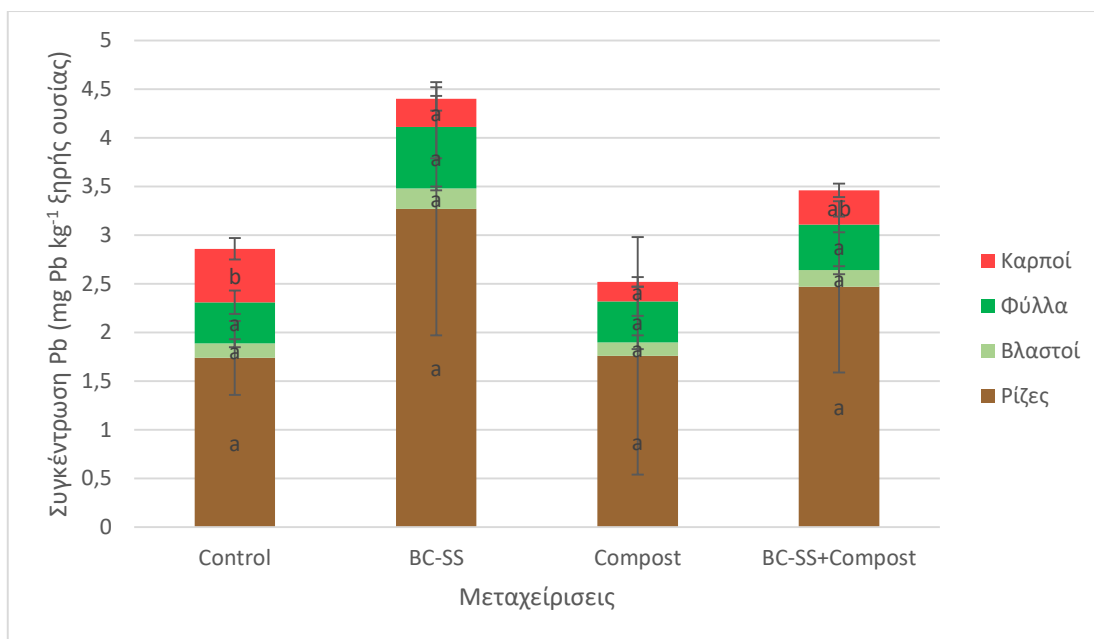
Σχήμα 3 - 15 : Συγκέντρωση As ( $\text{mg As kg}^{-1}$  ξηρής ουσίας) υπόγειων και υπέργειων φυτικών ιστών της *Solanum Lycopersicum L.* (μέσος όρος  $\pm$  τυπική απόκλιση,  $n=3$ ). Εφαρμόστηκε one-way ANOVA. Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε  $p<0.05$ .

Η συγκέντρωση του μολυβδένιου (Mo) είτε αυξήθηκε είτε μειώθηκε στους υπόγειους και υπέργειους φυτικούς ιστούς όλων των μεταχειρίσεων. Στις ρίζες των φυτών στατιστικώς σημαντική αύξηση στη συγκέντρωση Mo παρουσίασαν οι μεταχειρίσεις BC-SS και BC-SS+Compost με αύξηση 118.7% και 68.7% αντίστοιχα. Η συγκέντρωση Mo των ριζών στη μεταχείριση compost αυξήθηκε σε σύγκριση με τον μάρτυρα, χωρίς όμως αυτή η αύξηση να είναι στατιστικώς σημαντική. Οι βλαστοί των φυτών των μεταχειρίσεων BC-SS και BC-SS+Compost παρουσίασαν αύξηση της συγκέντρωσης του Mo, ενώ στη μεταχείριση compost έμεινε σχεδόν αμετάβλητη, χωρίς κάποια μεταβολή να είναι στατιστικά σημαντική. Στα φύλλα αυξήθηκε σε όλες τις μεταχειρίσεις η συγκέντρωση του Mo, όμως την μεγαλύτερη στατιστικώς σημαντική αύξηση παρουσιάζει η μεταχείριση BC-SS. Οι μεταβολές της συγκέντρωσης Mo στους καρπούς δεν είναι στατιστικώς σημαντικές. Συγκεκριμένα, στις μεταχειρίσεις BC-SS και Compost η συγκέντρωση Mo μειώθηκε, ενώ στη μεταχείριση BC-SS+Compost αυξήθηκε σε σύγκριση με τον μάρτυρα.



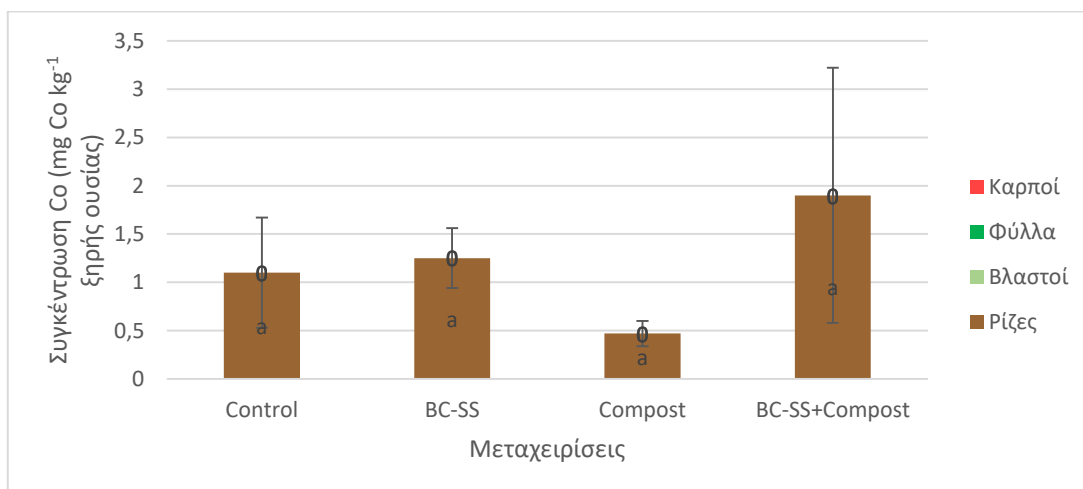
Σχήμα 3 - 16 : Συγκέντρωση Mo ( $\text{mg Mo kg}^{-1}$  ξηρής ουσίας) υπόγειων και υπέργειων φυτικών ιστών της *Solanum Lycopersicum L.* (μέσος όρος  $\pm$  τυπική απόκλιση,  $n=3$ ). Εφαρμόστηκε one-way ANOVA. Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε  $p<0.05$ .

Η συγκέντρωση του μόλυβδου (Pb) είτε αυξήθηκε είτε μειώθηκε στους υπόγειους και υπέργειους φυτικούς ιστούς όλων των μεταχειρίσεων, εκτός από τη μεταχείριση compost στα φύλλα, όπου η συγκέντρωση του Pb έμεινε αμετάβλητη. Ειδικότερα, στις ρίζες των φυτών υπήρχε αύξηση της συγκέντρωσης σε σύγκριση με τον μάρτυρα, χωρίς όμως αυτή η αύξηση να είναι στατιστικώς σημαντική. Αύξηση στη συγκέντρωση του Pb υπήρχε και στους βλαστούς των μεταχειρίσεων BC-SS και BC-SS+Compost, ενώ μικρή μείωση εμφάνισε στους βλαστούς η μεταχείριση Compost. Στατιστικώς μη σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης Pb υπήρχε και στα φύλλα των φυτών. Συγκεκριμένα, στις μεταχειρίσεις BC-SS και BC-SS+Compost υπήρχε αύξηση κατά 50% και 11.9% αντίστοιχα, ενώ στη μεταχείριση Compost ο Pb έμεινε αμετάβλητος. Μείωση στη συγκέντρωση του Pb των καρπών εμφάνισαν όλες οι μεταχειρίσεις με τη μεγαλύτερη στατιστικώς μείωση να παρουσιάζει η μεταχείριση Compost. Συγκεκριμένα, η συγκέντρωση του Pb στον μάρτυρα βρέθηκε ίση με  $0,55 \text{ mg kg}^{-1}$  ξηρής ουσίας ενώ στις μεταχειρίσεις BC-SS, Compost και BC-SS+Compost  $0,29$ ,  $0,20$  και  $0,35 \text{ mg kg}^{-1}$  ξηρής ουσίας αντίστοιχα. Τα όρια για τον Pb στα οπωροκηπευτικά, σύμφωνα με τον WHO/FAO (1984) είναι  $0,43 \text{ mg kg}^{-1}$  ξηρής ουσίας, ενώ σύμφωνα με τη Australian MPC το όριο για τον καρπό της τομάτας είναι  $1.5 - 2.5 \text{ mg kg}^{-1}$ . Στα πειράματα τους οι Hossain et al. (2011) ανίχνευαν Pb στους καρπούς της τομάτας σε καμία από τις μεταχειρίσεις που είχαν προσθέσει βιοεξανθράκωμα.



Σχήμα 3 - 17 : Συγκέντρωση Pb ( $\text{mg Pb kg}^{-1}$  ξηρής ουσίας) υπόγειων και υπέργειων φυτικών ιστών της *Solanum Lycopersicum L.* (μέσος όρος  $\pm$  τυπική απόκλιση,  $n=3$ ). Εφαρμόστηκε one-way ANOVA. Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε  $p<0.05$ .

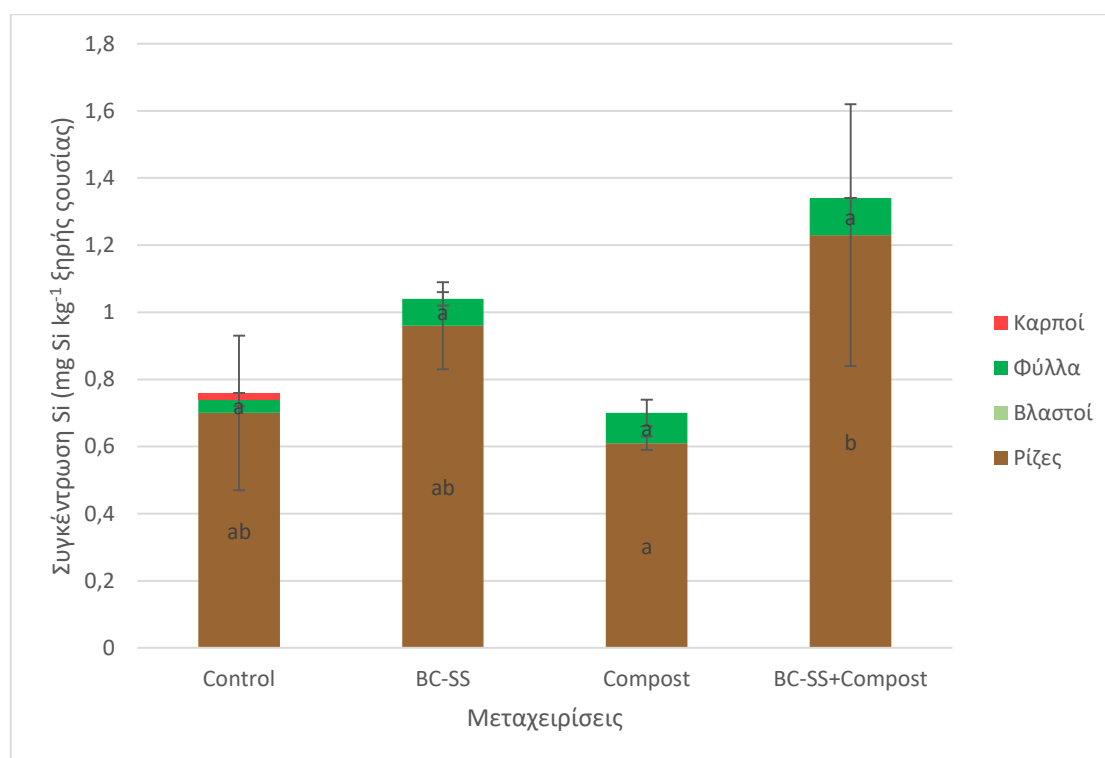
Το κοβάλτιο (Co) εντοπίστηκε μόνο τους υπόγειους φυτικούς ιστούς των φυτών όλων των μεταχειρίσεων. Συγκεκριμένα, στις μεταχειρίσεις BC-SS και BC-SS+Compost η συγκέντρωση του Co αυξήθηκε κατά 13.6% και 72.7% αντίστοιχα σε σύγκριση με τον μάρτυρα, ενώ στη μεταχείριση Compost μειώθηκε κατά 59.1%. Καμία όμως από τις μεταβολές δεν είναι στατιστικώς σημαντικές. Στους υπέργειους φυτικούς ιστούς (βλαστοί, φύλλα, καρπός) δεν ανιχνεύθηκε Co. Οι Hossain et al. (2011) στα πειράματά τους, που εφάρμοσαν βιοεξανθράκωμα από λυματολάσπη, εδαφοβελτιωτικό και συνδυασμό βιοεξανθράκωματος – εδαφοβελτιωτικού, ανέφεραν πως οι καρποί είχαν συγκέντρωση 0.03, 0.3 και 0.27  $\text{mg kg}^{-1}$  ξηρής ουσίας αντίστοιχα, σε σύγκριση με τον μάρτυρα ο οποίος είχε 0.06  $\text{mg kg}^{-1}$  ξηρής ουσίας.



Σχήμα 3 - 18 : Συγκέντρωση Pb ( $\text{mg Pb kg}^{-1}$  ξηρής ουσίας) υπόγειων και υπέργειων φυτικών ιστών της *Solanum Lycopersicum L.* (μέσος όρος  $\pm$  τυπική απόκλιση,  $n=3$ ). Εφαρμόστηκε one-way ANOVA. Οι

μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε  $p < 0.05$ .

Το πυριτίου (Si) δεν ανιχνεύτηκε σε όλους του φυτικούς ιστούς των φυτών. Συγκεκριμένα, βρέθηκε στις ρίζες και στα φύλλα όλων των μεταχειρίσεων και στους καρπούς του μάρτυρα. Οι βλαστοί καμίας μεταχείρισης δεν παρουσίασαν Si. Η συγκέντρωση του Si στους φυτικούς ιστούς στους οποίους ανιχνεύθηκε αυξήθηκε σε όλες τις μεταχειρίσεις, εκτός από τη μεταχείριση compost, όπου στις ρίζες εμφάνισε μία μικρή μείωση της συγκέντρωσης του Si. Στις ρίζες των φυτών των μεταχειρίσεων BC-SS και BC-SS+Compost το Si αυξήθηκε κατά 37% και 75.8% αντίστοιχα σε σύγκριση με το μάρτυρα. Στα φύλλα των φυτών όλων των μεταχειρίσεων υπήρξε αύξηση της συγκέντρωσης του Si, με την μεγαλύτερη αύξηση να εμφανίζεται στη μεταχείριση BC-SS+Compost. Παρόλα αυτά, καμία από τις μεταβολές της συγκέντρωσης του Si είναι στατιστικώς σημαντική.



Σχήμα 3 - 19 : Συγκέντρωση Si ( $\text{mg Si kg}^{-1}$  ξηρής ουσίας) υπόγειων και υπέργειων φυτικών ιστών της *Solanum Lycopersicum* L. (μέσος όρος  $\pm$  τυπική απόκλιση,  $n=3$ ). Εφαρμόστηκε one-way ANOVA. Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε  $p < 0.05$ .

Οι φυτικοί ιστοί, υπόγειοι και υπέργειοι, ελέγχθηκαν επίσης για υδράργυρο (Hg), σελήνιο (Se) και κάδμιο (Cd). Κανένα από αυτά τα βαρέα μέταλλα όμως δεν ανιχνεύτηκε στους φυτικούς ιστούς των μεταχειρίσεων.

Πίνακας 3 - 6: Συγκέντρωση βαρέων μετάλλων στους καρπούς των φυτών και όρια επικινδυνότητας.

Καρποί	Control	BC-SS	Compost	BC- SS+Compost	Όρια
<i>Cr</i> ( $mg\ kg^{-1}$ )	<DL	<DL	<DL	<DL	5.00 – 30.00 (WHO/FAO 1984) 2.3 (WHO/FAO 2001)
<i>Ni</i> ( $mg\ kg^{-1}$ )	<DL	<DL	<DL	<DL	1.63 (WHO/FAO 1984)
<i>As</i> ( $mg\ kg^{-1}$ )	0.88 ± 0.10c	0.31 ± 0.04a	0.31 ± 0.03a	0.67 ± 0.05b	1.0 (Australian MPC)
<i>Mo</i> ( $mg\ kg^{-1}$ )	0.44 ± 0.23a	0.37 ± 0.06a	0.40 ± 0.01a	0.52 ± 0.13a	-
<i>Hg</i> ( $mg\ kg^{-1}$ )	<DL	<DL	<DL	<DL	-
<i>Pb</i> ( $mg\ kg^{-1}$ )	0.55 ± 0.11b	0.29 ± 0.12a	0.20 ± 0.05a	0.35 ± 0.07ab	1.5 – 2.5 (Australian MPC) 0.43 (WHO/FAO 1984)
<i>Co</i> ( $mg\ kg^{-1}$ )	<DL	<DL	<DL	<DL	
<i>Si</i> ( $mg\ kg^{-1}$ )	0.02 ± 0.03a	<DL	<DL	<DL	-
<i>Se</i> ( $mg\ kg^{-1}$ )	<DL	<DL	<DL	<DL	1.0 (Australian MPC)
<i>Cd</i> ( $mg\ kg^{-1}$ )	<DL	<DL	<DL	<DL	0.05-2 (Australian MPC) 0.2 (WHO/FAO 2001, 2007)

Μέσος όρος ± τυπική απόκλιση (n=3), Κάτω από το όριο ανίχνευσης (<DL). Εφαρμόστηκε one-way ANOVA. Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε  $p < 0.05$ .

## Κεφάλαιο 4: Συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα του πειράματός μας προκύπτει πως η εφαρμογή βιοεξανθρακώματος με ή χωρίς κόμποστ επηρέασε θετικά το έδαφος. Στο έδαφος στο οποίο προστέθηκε βιοεξανθράκωμα, αλλά και συνδυασμός βιοεξανθρακώματος – κόμποστ, υπήρξε σημαντική αύξηση του P κατά OLSEN (αύξηση κατά 45% και 55% αντίστοιχα), ενώ το έδαφος το οποίο είχε μόνο βιοεξανθράκωμα παρουσίασε σημαντική αύξηση του  $\text{NH}_4 - \text{N}$  (αύξηση κατά 145%). Τα μακροθρεπτικά στοιχεία αυξήθηκαν σε όλα τα εδάφη που είχε εφαρμοστεί βιοεξανθράκωμα με ή χωρίς κόμποστ με τη σημαντικότερη αύξηση να παρουσιάζει το έδαφος με κόμποστ στη συγκέντρωση του Na με αύξηση κατά 81%. Επίσης, στα μικροθρεπτικά στοιχεία, Fe, Mn, Zn και Cu, του εδάφους υπήρξε αύξηση σε όλες τις εφαρμογές βιοεξανθρακώματος και κόμποστ, χωρίς όμως αυτές οι αυξήσεις να είναι σημαντικές. Τα βαρέα μέταλλα του εδάφους δεν επηρεάστηκαν από την προσθήκη του βιοεξανθρακώματος, εκτός από τη συγκέντρωση του Cr που αυξήθηκε στο έδαφος που εφαρμόστηκε βιοεξανθράκωμα αλλά και ο συνδυασμός βιοεξανθρακώματος – κόμποστ κατά 255% και 264% αντίστοιχα. Επιπλέον, το έδαφος στο οποίο είχε προστεθεί βιοεξανθράκωμα – κόμποστ παρουσίασε σημαντική μείωση στη συγκέντρωση του Mo (μείωση κατά 41%) . Σημαντική αύξηση παρατηρήθηκε στη συγκέντρωση του ανταλλάξιμου Mg του εδάφους με την προσθήκη βιοεξανθρακώματος και του συνδυασμού βιοεξανθρακώματος – κόμποστ (αύξηση κατά 57%), ενώ σημαντική μείωση βρέθηκε στο DTPA – Mn στο έδαφος με συνδυασμό βιοεξανθρακώματος – κόμποστ (μείωση κατά 59%) και στο DTPA – Cu σε όλες τις εφαρμογές βιοεξανθρακώματος με ή χωρίς κόμποστ (εύρος μειώσεων 53% - 72%) .

Η εφαρμογή βιοεξανθρακώματος στο έδαφος είχε θετική επίδραση στα φυτά της τομάτας. Οι μεταχειρίσεις, οι οποίες περιείχαν βιοεξανθράκωμα με ή χωρίς κόμποστ, παρουσίασαν μεγάλη αύξηση στην ανάπτυξη του φυτού. Το ύψος των φυτών, η διάμετρος του βλαστού, αλλά και οι υπόγειοι και οι υπέργειοι φυτικοί ιστοί είχαν αυξηθεί αρκετά σε σύγκριση με τον μάρτυρα. Συγκεκριμένα το ύψος των φυτών αυξήθηκε μετά τις πρώτες 40 ημέρες 25% - 34% σε σύγκριση με το μάρτυρα ενώ η διάμετρος των βλαστών των φυτών ήταν έως και 10% μεγαλύτερη από τον μάρτυρα στο πέρας των πειραμάτων.

Τα θρεπτικά στοιχεία των υπόγειων φυτικών ιστών αυξήθηκαν, χωρίς όμως οι αυξήσεις να είναι στατιστικώς σημαντικές. Αντίθετα με τους υπέργειους φυτικούς ιστούς, όπου οι βλαστοί παρουσίασαν σημαντική μείωση (26%) της συγκέντρωσης του N στις μεταχειρίσεις BC–SS+Compost και τα φύλλα των φυτών των μεταχειρίσεων BC–SS και BC–SS+Compost σημαντική αύξηση στη συγκέντρωση K (εύρος αυξήσεων 27% - 31%). Στους καρπούς των φυτών υπήρξε μείωση κατά 16% στη συγκέντρωση του P μόνο στη μεταχείριση BC–SS καθώς και στη συγκέντρωση του Ca κατά 44% στη μεταχείριση BC–SS+Compost. Αξίζει να σημειωθεί ότι το Na αυξήθηκε σε όλα τα μέρη του φυτού στη μεταχείριση που προστέθηκε κόμποστ (εύρος αυξήσεων 59% - 216%). Επιπλέον, σημαντική μείωση υπήρχε και στις συγκεντρώσεις του Fe (εύρος μειώσεων

69% - 73%) και του Cu (μείωση κατά 69%) στους καρπούς των μεταχειρίσεων BC–SS και BC–SS+Compost. Παρότι το βιοεξανθράκωμα που χρησιμοποιήθηκε είχε μεγάλες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων, δεν επηρεάστηκε η ποιότητα του φυτού καθώς και του καρπού της τομάτας. Συγκεκριμένα, στους υπόγειους φυτικούς ιστούς υπήρξε σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης του Mo στις μεταχειρίσεις BC–SS και BC–SS+Compost (αύξηση κατά 119% και 69% αντίστοιχα). Στους υπέργειους φυτικούς ιστούς σημαντική αύξηση (121%) παρουσίασε μόνο η συγκέντρωση του Mo στα φύλλα των μεταχειρίσεων BC–SS. Στους καρπούς των φυτών δεν ανιχνεύτηκαν αρκετά από τα βαρέα μέταλλα, ενώ εκείνα που βρέθηκαν ήταν κάτω από τα όρια επικινδυνότητας. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε μείωση της συγκέντρωσης του As σε όλες τις μεταχειρίσεις (εύρος μειώσεων 24 % - 65%) και της συγκέντρωσης του Pb στις μεταχειρίσεις BC–SS και Compost (μείωση κατά 47% και 64% αντίστοιχα). Ως εκ τούτου, η προσθήκη βιοεξανθρακώματος με ή χωρίς κόμποστ είχε θετική επίδραση στο έδαφος, καθώς και στην καλλιέργεια της *Solanum Lycopersicum* L.

## Βιβλιογραφία

- Abbas A., Yaseen M., Khalid M., Naveed M., Aziz M.Z., Hamid Y., Saleem M. (2017). Effect of biochar-amended urea on nitrogen economy of soil for improving the growth and yield of wheat (*triticum aestivum* L.) under field condition. *Plant Nutrition* 40, 2303–2311.
- Abujabhah I.S., Doyle R., Bound S.A., Bowman J.P. (2016). The effect of biochar loading rates on soil fertility, soil biomass, potential nitrification, and soil community metabolic profiles in three different soils. *Soils and Sediments* 16, 2211–2222.
- Agbna G., Dongli S., Zhipeng L., Elshaikh N., Guangcheng S., Timm L. (2017). Effects of deficit irrigation and biochar addition on the growth, yield, and quality of tomato. *Scientia Horticulturae* 222, 90-101.
- Agrafioti E., Bouras G., Kalderis D., Diamadopoulos E. (2013). Biochar production by sewage sludge pyrolysis. *Analytical and Applied Pyrolysis* 101, 72–78.
- Akhtar S., Li G., Andersen M., Liu F. (2014). Biochar enhances yield and quality of tomato under reduced irrigation. *Agricultural Water Management* 138, 37–44.
- Aller M.F. (2016). Biochar properties: Transport, fate, and impact. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 46, 1183-1296.
- Alvarez-Campos O., Lang T.A., Bhadha J.H., McCray J.M., Glaz B., Daroub S.H. (2018). Biochar and mill ash improve yields of sugarcane on a sand soil in Florida. *Agricultural, Ecosystems and Environment* 253, 122–130.
- Al-Wabel M.I., Al-Omran A., El-Naggar A.H., Nadeem M., Usman A.R.A. (2013). Pyrolysis temperature induced changes in characteristics and chemical composition of bio-char produced from *conocarpus* wastes. *Bioresource Technology* 131, 374–379.
- Ameloot N., Graber E.R., Verheijen F.G.A., De Neve S. (2013). Interactions between biochar stability and soil organisms: Review and research needs. *European Journal of Soil Science* 64, 379–390.
- Amonette J.E., Joseph S., Lehmann J. (2009). Characteristics of biochar: Microchemical properties. In J. Lehmann and S. Joseph (Eds.), *Biochar for environmental management: Science and technology*, Earthscan, London, 33–52.
- Angin D. (2013). Effect of pyrolysis temperature and heating rate on biochar obtained from pyrolysis of safflower seed press cake. *Bioresource Technology* 128, 593–597.
- Antal M.J., Grønli M. (2003). The art, science, and technology of charcoal production. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 42 (8), 1619–1640.
- Antal M.J., Mochidzuki K., Paredes L.S. (2003). Flash carbonization of biomass. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 42 (16), 3690–3699.
- ASTM D1762-84, (2007). Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal. West Conshohocken, PA, USA.

- Atkinson C., Fitzgerald J., Hips N. (2010). Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: A review. *Plant and Soil* 337, 1–18.
- Bird M.I., Wurster C.M., De Paula Silva P.H., Bass A.M., De Nys R. (2011). Algal biochar: Production and properties. *Bioresource Technology* 102, 1886–1891.
- Black C.A., Evans D.D., White J.L., Ensminger L.E., Clark F.E., (1965). *Methods of soil analysis: Chemical and microbiological properties (part 2)*. American Society of Agronomy, Madison, WI, USA.
- Bopp C., Christl I., Schulin R., Evangelou M.W. (2016). Biochar as possible long-term soil amendment for phytostabilisation of TE-contaminated soils. *Environmental Science and Pollution Research* 23 (17), 17449–17458.
- Bouyoukos G.J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agronomy* 54, 464-465.
- Brassard P., Godbout S., Raghavan V. (2016). Soil biochar amendment as a climate change mitigation tool: Key parameters and mechanisms involved. *Journal of Environmental Management* 181, 484-497.
- Brewer C.E., Chuang V.J., Masiello C.A., Gonnermann H., Gao X., Dugan B., Driver L.E., Panzacchi P., Zygourakis K., Davies C.A. (2014). New approaches to measuring biochar density and porosity. *Biomass and Bioenergy* 66, 176–185.
- Brown R.A., Kercher A.K., Nguyen T.H., Nagle D.C., Ball W.P. (2006). Production and characterization of synthetic wood chars for use as surrogates for natural sorbents. *Organic Geochemistry* 37, 321–333.
- Cabrera A., Cox L., Spokas K.A., Celis R., Hermos M.C., Cornejo J., Koskinen W.C. (2011). Comparative sorption and leaching study of the herbicides fluometuron and 4-chloro-2-methylphenoxyacetic acid (MCPA) in a soil amended with biochars and other sorbents. *Agricultural and Food Chemistry* 59 (23), 12550–12560.
- Cabrera Mesa A., Spokas K. (2011). Impacts of Biochar (black carbon) additions on the sorption and efficacy of herbicides. *Herbicides and environment*, 315–340.
- Cantrell K.B., Hunt P.G., Uchimiya M., Novak J.M., Ro K.S. (2012). Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar. *Bioresource Technology* 107, 419–428.
- Cao X., Harris W. (2010). Properties of dairy-manure-derived biochar pertinent to its potential use in remediation. *Bioresource Technology* 101, 5222–5228.
- Cao Y., Pawłowski A. (2012). Sewage sludge to energy approaches based on anaerobic digestion and pyrolysis: brief overview and energy efficiency assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 1657–1665.
- Castaldi S., Riondino M., Baronti S., Esposito F.R., Marzaioli R., Rutigliano F.A., Vaccari F.P., Miglietta F. (2011). Impact of biochar application to a Mediterranean wheat crop on soil microbial activity and greenhouse gasfluxes. *Chemosphere* 85, 1464–1471.

- Cetin E., Moghtaderi B., Gupta R., Wall T.F. (2004). Influence of pyrolysis conditions on the structure and gasification reactivity of biomass chars. *Fuel* 83, 2139–2150.
- Chan K.Y., Van Zwieten L., Meszaros I., Downie A., Joseph S. (2007). Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. *Australian Journal of Soil Research* 45, 629–634.
- Chan K.Y., Xu Z. (2009). Biochar–nutrient properties and their enhancement. In J. Lehmann and S. Joseph (Eds.) *Biochar for environmental management: Science and technology*, Earthscan, London, 67–84.
- Chapman H.D., Pratt P.F. (1961). *Methods of analysis for soils, plants and water*. University of California, Division of Agricultural Sciences, Riverside, CA, USA.
- Chen T., Wang Z., Lu H., Zhou H., Zhang Z., Ren Y., Lulu (2014). Influence of pyrolysis temperature on characteristics and heavy metal adsorptive performance of biochar derived from municipal sewage sludge. *Bioresource Technology* 164, 47–54.
- Chen W.H., Cheng H.C. (2014). Molecular modeling and simulation of physical properties and behavior of low-dimensional carbon Allotropes. In V. Harik (Ed.) *Trends in nanoscale mechanics*, Springer, New York, 45–109.
- Chen W.H., Du S.W., Tsai C.H., Wang Z.Y. (2012). Torrefied biomasses in a drop tube furnace to evaluate their utility in blast furnaces. *Bioresource Technology* 111, 433–438.
- Chen W.H., Ye S.C., Sheen H.K. (2012). Hydrothermal carbonization of sugarcane bagasse via wet torrefaction in association with microwave heating. *Bioresource Technology* 118, 195–203.
- Cheng C.H., Lehmann J., Engelhard M.H. (2008). Natural oxidation of black carbon in soils: Changes in molecular form and surface charge along a climosequence. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 72, 1598–1610.
- Chintala R., Clay D., Schumach T. (2013). Optimization of oxygen parameters for determination of carbon and nitrogen in biochar material. *Analytical Letters* 46, 532–538.
- Chun Y., Sheng G., Chiou C.T., Xing, B. (2004). Compositions and sorptive properties of crop residue-derived chars. *Environmental Science & Technology* 38 (17), 4649–4655.
- Cornelissen G., Kukulska Z., Kalaitzidis S., Christanis K., Gustafsson Ö. (2004). Relations between environmental black carbon sorption and geochemical sorbent characteristics. *Environmental Science and Technology* 38 (13), 3632–3640.
- Dahlawi S., Naeem A., Rengel Z., Naidu R. (2018). Biochar application for the remediation of salt-affected soils: Challenges and opportunities. *Science of the Total Environment* 625, 320–335.
- Deolinda (2009). *Tomato processing by heat treatment in Mozambique*. M.Sc Thesis. Public University of Navarra, Navarra.

Ding Y., Liu Y., Liu S., Li Z., Tan X., Huang X., Zeng G., Zhou L., Zheng B. (2016). Biochar to improve soil fertility. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, Springer, Paris.

Enders A., Hanley K., Whitman T., Joseph S., Lehmann J. (2012). Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance. *Bioresource Technology* 644 (53), 644–653.

Evenhuis B. (1978). Simplified methods for foliar analysis: communication. Department of Agricultural Research, Royal Tropical Institute, Amsterdam, Netherlands.

FAOSTAT. Food and agricultural commodities production 2008. Rome (It.): Food and Agriculture Organization of the United Nations (2011). <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>.

Faria W., Figueiredo C., Coser T., Vale A., Schneider B. (2017). Is sewage sludge biochar capable of replacing inorganic fertilizers for corn production? Evidence from a two-year field experiment. *Archives of Agronomy and Soil Science* 64, 505-519.

Fornes F., Belda R., Fernández de Córdova P., Cebolla-Cornejo J. (2017). Assessment of biochar and hydrochar as minor to major constituents of growing media for containerized tomato production, *Journal of the Science of Food and Agriculture* 97(11), 3675–3684.

Fuertes A.B., Arbestain M.C., Sevilla M., Macia-Agullo J.A., Fiol S., Lopez R., Smernik R.J., Aitkenhead W.P., Arce F., Macias F. (2010). Chemical and structural properties of carbonaceous products obtained by pyrolysis and hydrothermal carbonization of corn stover. *Australian Journal of Soil Research* 48, 618–626.

Gascó G., Cely P., Paz-Ferreiro J., Plaza C., Méndez A. (2016). Relation between biochar properties and effects on seed germination and plant development. *Biological Agriculture and Horticulture* 32, 237-247.

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

Githinji L. (2014). Effect of biochar application rate on soil physical and hydraulic properties of a sandy loam. *Archives of Agronomy and Soil Science* 60 (4), 457–470.

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

Gonzaga M.I.S., Mackowiak C., de Almeida A.Q., de Carvalho Junior J.I.T., Andrade K.R. (2018). Positive and negative effects of biochar from coconut husks, orange bagasse and pine wood chips on maize (*Zea mays*L.) growth and nutrition. *Catena* 162, 414–420.

Gould W.A. (1983). Tomato Production, Processing, and Quality Evaluation. AVI Publishing Co., Westport, CT.

Granatstein D., Kruger C., Collins H., Galinato S., Garcia-Perez M., Yoder J. (2009). Use of Biochar from the Pyrolysis of Waste Organic Material as a Soil Amendment. Final Project Report. Center for Sustaining Agriculture and Natural Resources, Washington State University, Wenatchee, WA.

Gul S., Whalen J.K., Thomas B.W., Sachdeva V. (2015). Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: mechanisms and future directions. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 206, 46-59.

Harvey O.R., Herbert B.E., Rhue R.D., Kuo L.J. (2011). Metal interactions at the biochar-water interface: Energetics and structure-sorption relationships elucidated by flow adsorption microcalorimetry. *Environmental, Science & Technology* 45 (13), 5550–5556.

He L., Liu Y., Zhao J., Bi Y., Zhao X., Wang S., Xing G. (2016a). Comparison of straw-biochar-mediated changes in nitrification and ammonia oxidizers in agricultural oxisols and cambosols. *Biology and Fertility of Soils* 52, 137–149.

Hossain M., Strezov V., Nelson P. (2015). Comparative Assessment of the Effect of Wastewater Sludge Biochar on Growth, Yield and Metal Bioaccumulation of Cherry Tomato. *Pedosphere* 25, 680–685.

Hossain M.K., Strezov V., Chan K.Y., Nelson P.F. (2010). Agronomic properties of wastewater sludge biochar and bioavailability of metals in production of cherry tomato (*Lycopersicon esculentum*). *Chemosphere* 78, 1167–1171.

Hossain M.K., Strezov V., Chan K.Y., Ziolkowski A., Nelson P.F. (2011). Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar. *Journal of Environmental Management* 92, 223–228.

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

Huang H., Yuan X. (2016). The migration and transformation behaviors of heavy metals during the hydrothermal treatment of sewage sludge. *Bioresource Technology* 200, 991–998.

Igalavithana A.D., Ok Y.S., Usman A.R., Al-Wabel M.I., Oleszczuk P., Lee S.S. (2016). The effects of biochar amendment on soil fertility. In *Agricultural and Environmental Applications of Biochar Advances and Barriers*, SSSA Special Publication 63, Soil Science Society of America, 123–144.

Inyang M., Dickenson E. (2015). The potential role of biochar in the removal of organic and microbial contaminants from potable and reuse water: A review. *Chemosphere* 134, 232 -240.

- Jatav H., Singh S., Singh Y., Kumar O. (2018). Biochar and Sewage Sludge Application Increases Yield and Micronutrient Uptake in Rice (*Oryza sativa* L.). *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 49, 1617–1628.
- Jeffery S., Verheijen F.G.A., van der Velde M., Bastos A.C. (2011). A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 144, 175–187.
- Jin J, Li Y., Zhang J., Wu S., Cao Y., Peng Liang P., Bondarczuk K., Markowicz A., Piotrowska-Seget Z. (2016). The urgent need for risk assessment on the antibiotic resistance spread via sewage sludge land application. *Environment International* 87, 49–55.
- Kalra Y.P. (1998). *Handbook of reference methods for plant analysis*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- Kambo H.S., Dutta A. (2015). A comparative review of biochar and hydrochar in terms of production, physico-chemical properties and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 45, 359–378.
- Kameyama K., Miyamoto T., Shiono T., Shinogi Y. (2012). Influence of sugarcane bagasse-derived biochar application on nitrate leaching in calcaric dark red soil. *Journal of Environmental Quality* 41 (4), 1131–1137.
- 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, 195–210.
- Kavitha B., Reddy P., Kim B., Lee S., Pandey S., Kim K. (2018). Benefits and limitations of biochar amendment in agricultural soils: A review. *Journal of Environmental Management* 227, 146–154.
- Keiluweit M., Nico P.S., Johnson M.G., Kleber M. (2010). Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (Biochar). *Environmental Science & Technology* 44 (4), 1247–1253.
- Kelly C.N., Calderón F.C., Acosta-Martinez V., Mikha M.M., Benjamin J., Rutherford D.W., Rostad C.E. (2015). Switchgrass biochar effects on plant biomass and microbial dynamics in two soils from different regions. *Pedosphere* 25, 329–342.
- Khanmohammadi Z., Afyuni M., Mosaddeghi M. (2017). Effect of sewage sludge and its biochar on chemical properties of two calcareous soils and maize shoot yield. *Archives of Agronomy and Soil Science* 63, 198–212.
- 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.
- Kookana R.S. (2010). The role of biochar in modifying the environmental fate, bioavailability, and efficacy of pesticides in soils: A review. *Australian Journal of Soil Research* 48 (7), 627–637.

- Kumar A., Tsechansky L., Lew B., Raveh E., Frenkel O., Graber E.R. (2018). Biochar alleviates phytotoxicity in *figus elastica* grown in Zn-contaminated soil. *Science of the Total Environment* 15, 188–198.
- Lang T., Jensen A.D., Jensen P.A. (2005). Retention of organic elements during solid fuel pyrolysis with emphasis on the peculiar behavior of nitrogen. *Energy & Fuels* 19 (4), 1631–1643.
- Lee J.W., Kidder M., Evans B.R., Paik S., Buchanan Iii A.C., Garten C.T., Brown R.C. (2010). Characterization of biochars produced from corn stovers for soil amendment. *Environmental Science & Technology* 44 (20), 7970–7974.
- Lehmann J., Kern D., Glaser B., Woods W. (2003). *Amazonian dark earths: Origin properties management*. Netherlands: Springer.
- Lehmann J. (2007a). Bio-energy in the black. *Frontiers in Ecology and the Environment* 5, 381–387.
- Lehmann J. (2007b). A handful of carbon. *Nature* 447, 143–144.
- Lehmann J., Joseph S. (2009a). Biochar for environmental management: An introduction. In: J. Lehmann and S. Joseph (Eds.), *Biochar for environmental management: Science and technology*, 1–12. London: Earthscan Publications.
- Lehmann J., Joseph S. (Eds.) (2009b). *Biochar for environmental management: Science and technology*. London, Sterling, VA: Earthscan Publications.
- Lehmann J., Joseph, S. (2015). *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*, Earthscan, London.
- Lei O., Zhang R. (2013). Effects of biochars derived from different feedstocks and pyrolysis temperatures on soil physical and hydraulic properties. *Journal of Soils Sediments* 13, 1561–1572.
- Li G., Khan S., Ibrahim M., Sun T., Tang J., Cotner J.B., Xu Y. (2018). Biochars induced modification of dissolved organic matter (DOM) in soil and its impact on mobility and bio accumulation of arsenic and cadmium. *Hazardous Materials* 348, 100–108.
- Liang B., Lehmann J., Solomon D., Kinyangi J., Grossman J., O'Neill B. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Science Society of America* 70, 1719–1730.
- Lindsay W.L., Norvell W.A. (1978). Development of a DTPA test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America* 42, 421–428.
- Liu L., Wang Y., Yan X., Li J., Jiao N., Hu S. (2017). Biochar amendments increase the yield advantage of legume-based intercropping systems over monoculture. *Agriculture Ecosystems and Environment* 237, 16–23.
- Liu Q., Zhang Y., Liu B., Amonette J.E., Lin Z., Liu G., Ambus P., Xie Z. (2018). How does biochar influence soil N cycle? A meta-analysis. *Plant and Soil* 426, 211–225.

- Liu X., Zhang A., Ji C., Joseph S., Bian R., Li L., Pan G., Paz-Ferreiro J. (2013). Biochar's effect on crop productivity and the dependence on experimental conditions: a meta-analysis of literature data. *Plant and Soil* 373, 583-594.
- Lu S.G., Sun F.F., Zong Y.T. (2014). Effect of rice husk biochar and coal fly ash on some physical properties of expansive clayey soil (Vertisol). *Catena* 114, 37-44.
- Lu T., Yuan H., Wang Y., Huang H., Chen Y. (2015). Characteristic of heavy metals in biochar derived from sewage sludge. *Journal of Material Cycles and Waste Management* 164 (4), 725-733.
- Maddox N. (2013). The promise (and uncertainties) of biochar. *CSA News* 58, 4-9.
- Mancinelli E., Baltrėnaitė E., Baltrėnas P., Paliulis D., Passerini G. (2016). Trace Metals in Biochars from Biodegradable By-products of Industrial Processes. *Water, Air, and Soil Pollution* 227 (6).
- Manolikaki I., Mangolis A., Diamadopoulos E. (2016). The impact of biochars prepared from agricultural residues on phosphorus release and availability in two fertile soils. *Journal of Environmental Management* 181, 536-543.
- Manolikaki I., Diamadopoulos E. (2017). Ryegrass yield and nutrient status after biochar application in two Mediterranean soils. *Archives of Agronomy and Soil Science* 63, 1093-1107.
- Manolikaki I., Diamadopoulos E. (2019). Positive effects of biochar and biochar-compost on maize growth and nutrient availability in two agricultural soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 50, 512-526.
- Marks E.A.N., Alcañiz J.M., Domene X. (2014). Unintended effects of biochars on short-term plant growth in a calcareous soil. *Plant and Soil* 385, 87-105.
- Masebinua S.O., Akinlabia E.T., Muzendab E., Aboyade A.O. (2019). A review of biochar properties and their roles in mitigating challenges with anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 103, 291-307.
- Méndez I., Vera G., Chávez S., Carrillo R. (2011). Quality of fruits in Mexican tomato (*Lycopersicon Esculentum* Mill.) landraces. *Vitae* 18 (1), 26-32.
- Méndez A., Gómez A., Paz-Ferreiro J., Gascó G. (2012). Effects of sewage sludge biochar on plant metal availability after application to a Mediterranean soil. *Chemosphere* 89, 1354 - 1359.
- Metchell A. E., Koh E., Charoenprasert S. (2012). Effects of industrial tomato paste processing on ascorbic acid, flavonoids and carotenoids and their stability over one year storage. *Science, Food and Agriculture* 92 (1), 23-28.
- Mukherjee A., Lal R., Zimmerman A.R. (2014). Effects of biochar and other amendments on the physical properties and greenhouse gas emissions of an artificially degraded soil. *Science of The Total Environment* 487, 26-36.

- Mukome F.N.D., Zhang X., Silva L.C.R., Six J., Parikh S.J. (2013). Use of chemical and physical characteristics to investigate trends in biochar feedstocks. *Agricultural and Food Chemistry* 61, 2196–2204.
- Murphy J., Riley J.P. (1962). A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta* 27, 31-36.
- Needham P. (1973). Nutritional disorders. In: *The U.K. Tomato Manual*. Grower Books, London.
- Nelissen V., Ruyschaert G., Manka'Abusi D., D'Hose T., De Beuf K., Al-Barri B., Cornelis W., Boeckx P. (2015). Impact of a woody biochar on properties of a sandy loam soil and spring barley during a two-year field experiment. *European Journal of Agronomy* 62, 65-78.
- Novak J.M., Busscher W.J., Laird D.L., Ahmedna M., Watts D.W., Niandou, M.A.S. (2009a). Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil. *Soil Science* 174, 105–112.
- Novak J.M., Lima I., Xing B., Gaskin J.W., Steiner C., Das K., Ahmedna M., Rehrah D., Watts D.W., Busscher W.J. (2009b). Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand. *Annals of Environmental Science* 3, 195–206.
- Palansooriya K., Ok Y., Awad Y., Lee S., Sung J., Koutsospyros A., Moon D. (2019). Impacts of biochar application on upland agriculture: A review. *Journal of Environmental Management* 234, 52-64.
- Paz-Ferreiro J., Nieto A., Méndez A., Askeland M., Gascó (2018). Biochar from Biosolids Pyrolysis: A Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 15 (5), 956.
- Peake L.R., Reid B.J., Tang X. (2014). Quantifying the influence of biochar on the physical and hydrological properties of dissimilar soils. *Geoderma* 235–236, 182–190.
- Piechalak A., Tomaszewska B., Baralkiewicz D., Malecka A. (2002). Accumulation and detoxification of lead ions in legumes. *Phytochemistry* 60 (2), 153–162.
- Pimchuai A., Dutta A., Basu P. (2010). Torrefaction of agriculture residue to enhance combustible properties. *Energy Fuels* 24 (9), 4638–4645.
- Quicker P., Weber K. (2016). Herstellung, Eigenschaften und Verwendung von Biomass ekarbonisaten. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Robertson G., Sollins P., Ellis B., Lajtha K. (1999). Exchangeable Ions, pH, and Cation Exchange Capacity. In: Robertson G., editor. *Stand. Soil Methods Long-term Ecol. Reserach*, Oxford University Press.
- Rondon M. A., Lehmann J., Ramirez J., Hurtado M. (2007). Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with bio-char additions. *Biology and Fertility of Soils* 43, 699–708.

- Sainju U., Dris R., Singh B. (2003). Mineral nutrition of tomato. *Journal of food, Agriculture and Environment* 1, 176–183.
- Sanchez M.E., Lindao E., Margaleff D., Martinez O., Moran A. (2009). Biofuels and biochar production from pyrolysis of sewage sludge. *Journal of Residuals Science & Technology* 6 (1), 35–41.
- Sargent S. A., Moretti C. L. (2004). Tomato. In, USDA, ARS The Commercial Storage of Fruits, Vegetables, and Florist & Nursery Crops. Agriculture Handbook Number 66. Beltsville Agricultural Research Center.
- Scheifele M., Hobi A., Buegger F., Gatteringer A., Schulin R., Boller T., Mäder P. (2017). Impact of pyrochar and hydrochar on soybean (*glycine max* L.) root nodulation and biological nitrogen fixation. *Plant Nutrition and Soil Science* 180, 199–211.
- Shaaban M., Van Zwieten L., Younas S., Núñez-Delgado A., Chhajro M., Kubar K., Ali U., Rana M., Mehmood M., Hu R. (2018). A concise review of biochar application to agricultural soils to improve soil conditions and fight pollution. *Journal of Environmental Management* 228, 429–440.
- Shackley S.J., Sohi S.P. (Eds) (2010). An assessment of the benefits and issues associated with the application of biochar to soil. Department for Environment, Food and Rural Affairs, London, UK.
- Silber A., Levkovitch I., Graber E.R. (2010). pH-Dependent mineral release and surface properties of corn straw biochar: Agronomic implications. *Environmental Science & Technology* 44 (24), 9318–9323.
- Song W., Guo M. (2012). Quality variations of poultry litter biochar generated at different pyrolysis temperatures. *Analytical and Applied Pyrolysis* 94, 138–145.
- Song Y., Zhang X., Ma B., Chang S.X., Gong J. (2014). Biochar addition affected the dynamics of ammonia oxidizers and nitrification in microcosms of a coastal alkaline soil. *Biology and Fertility of Soils* 50, 321–332.
- Sort X., Alcañiz J.M. (1999). Effects of sewage sludge amendment on soil aggregation. *Land Degradation and Development* 10, 3–12.
- Spokas K.A., Novak J.M., Stewart C.E., Cantrell K.B., Uchimiya M., DuSaire M.G., Ro K.S. (2011). Qualitative analysis of volatile organic compounds on biochar. *Chemosphere* 85, 869–882.
- Streubel J.D., Collins H.P., Garcia-Perez M., Tarara J., Granatstein D., Kruger C.E. (2011). Influence of contrasting biochar types on five soils at increasing rates of application. *Soil Science Society of America Journal* 75 (4), 1402–1413.
- Suliman W., Harsh J.B., Abu-Lail N.I., Fortuna A.-M., Dallmeyer I., Garcia-Pérez M. (2017). The role of biochar porosity and surface functionality in augmenting hydrologic properties of a sandy soil. *Science of the Total Environment* 574, 139–147.
- Tan X., Liu Y., Zeng G., Wang X., Hu X., Gu Y., Yang Z. (2015). Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions. *Chemosphere* 125, 70–85.

- Tripathi M., Sahu J.N., Ganesan P. (2016). Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 55, 467-481.
- Usman A., Al – Wabel M., Ok Y., Al – Harbi A., Wahb – Allah M., El – Naggar A., Ahmad M., Al – Faraj A., Al – Omran A. (2016). Conocarpus biochar induces changes in soil nutrient availability and tomato growth under saline irrigation. *Pedosphere* 26, 27-38.
- Utomo W.H., Kusuma Z., Nugroho W.H. (2011). Soil fertility status, nutrient uptake, and maize (*Zea mays* L.) yield following biochar and cattle manure application on sandy soils of Lombok, Indonesia. *Tropical Agriculture* 49, 47–52.
- Vaccari F.P., Maienza A., Miglietta F., Baronti S., Di Lonardo S., Giagnoni L., Lagomarsino A., Pozzi A., Pusceddu E., Ranieri R., Valboa G., Genesio L. (2015). Biochar stimulates plant growth but not fruit yield of processing tomato in a fertile soil. *Agriculture Ecosystems & Environment* 207, 163-170.
- Varis S., George R.A.T. (1985). The influence of mineral nutrition on fruit yield, seed yield, and quality in tomato. *Journal of Horticultural Science* 60 (3), 373-376.
- Vassilev S.V., Baxter D., Andersen L.K., Vassileva C.G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel* 89, 913–933.
- Vaughn S., Dinelli F., Kenar J., Jackson M., Thomas A., Peterson S. (2018). Physical and chemical properties of pyrolyzed biosolids for utilization in sand-based turfgrass rootzones. *Waste Management* 76, 98-105.
- Wang H., Kim B., Wunder S.L. (2014). Nanoparticle-supported lipid bilayers as an in situ remediation strategy for hydrophobic organic contaminants in soils. *Environmental Science and Technology* 49 (1), 529–536.
- Wang X., Xing Y. (2017). Evaluation of the effects of irrigation and fertilization on tomato fruit yield and quality: a principal component analysis. *Scientific Reports* 7, 1-13.
- Wang Z., Zheng H., Luo Y., Deng X., Herbert S., Xing B. (2013). Characterization and influence of biochars on nitrous oxide emission from agricultural soil. *Environmental Pollution* 174, 289–296.
- Weber K., Quicker P. (2018). Properties of biochar. *Fuel* 217, 240-261.
- Yang G., Zhang G.M., Wang H.C. (2015). Current state of sludge production management, treatment and disposal in China. *Water Resource* 78, 60–73.
- Yang H., Yan R., Chen H., Lee D.H., Zheng C. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel* 86, 1781–1788.
- Yao Y., Gao B., Zhang M., Inyang M., Zimmerman A.R. (2012). Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil. *Chemosphere* 89 (11), 1467–1471.

Yu H., Zou W., Chen J., Chen H., Yu Z., Huang J., Tang H., Wei X., Gao B. (2019). Biochar amendment improves crop production in problem soils: A review. *Journal of Environmental Management* 232, 8-21.

Yuan J.H., Xu R.K., Zhang H. (2011). The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures. *Bioresource Technology* 102, 3488–3497.

Yuan Y., Liu T., Fu P., Tang J., Zhou S. (2015). Conversion of sewage sludge into high-performance bifunctional electrode materials for microbial energy harvesting. *Journal of Materials Chemistry* 3, 8475–8482.

Zhang J., Wong M., Wang M., Shan S., Christie P. (2016). Influence of pyrolysis temperature on properties and environmental safety of heavy metals in biochars derived from municipal sewage sludge. *Journal of Hazardous Materials* 320, 417-426.

Zhang Z., Zhu Z., Shen B., Liu L. (2019). Insights into biochar and hydrochar production and applications: A review. *Energy* 171, 581-598.

Zheng H., Wang Z., Deng X., Herbert S., Xing B. (2013). Impacts of adding biochar on nitrogen retention and bioavailability in agricultural soil. *Geoderma* 206, 32-39.

Zheng J., Chen J., Pan G., Liu X., Zhang X., Li L., Bian R., Cheng K., Jinwei Z. (2016). Biochar decreased microbial metabolic quotient and shifted community composition four years after a single incorporation in a slightly acid rice paddy from southwest China. *Science of the Total Environment* 571, 206–217.

Zheng R., Li C., Sun G., Xie Z., Chen J., Wu J., Wang Q. (2017). The influence of particle size and feedstock of biochar on the accumulation of Cd, Zn, Pb, and As by *brassica chinensis* L. *Environmental Science and Pollution Research* 24 (28), 22340–22352.

Δ. Βάμβουκα (2009). Βιομάζα, βιοενέργεια & περιβάλλον. Εκδόσεις Τζιόλα. Αθήνα, Ελλάδα.

Κατσογιάννη Α. (2010). Μεταπτυχιακή Μελέτη «Μεταβολή φυσιολογικών, μηχανικών και λοιπών ποιοτικών χαρακτηριστικών συντηρούμενης τομάτας βιολογικής καλλιέργειας». Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα.

Μανωλικάκη Ι. (2019). Διδακτορική Διατριβή «Η επίδραση βιοεξανθρακώματος (biochar) από οργανικά παραπροϊόντα στις καλλιέργειες *Lolium perenne* L. και *Zea Mays* L.». Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Σάββας Δ., 2016. Γενική Λαχανοκομία. Εκδόσεις Πεδίο, Αθήνα, σελ. 706.

## Παράρτημα

Πίνακας Π3 - 1 : Ύψος φυτών *Solanum Lycopersicum* L.

	17/7/2018	27/7/2018	6/8/2018	16/8/2018	27/8/2018	5/9/2018	15/9/2018	27/9/2018	8/10/2018	18/10/2018
<i>Control</i>	20.67 ± 2.08	34.00 ± 0.50	44.60 ± 1.77	45.25 ± 0.90	47.00 ± 3.29	49.77 ± 1.69	56.43 ± 3.32	60.57 ± 4.26	63.27 ± 3.45	68.23 ± 6.39
<i>BC-SS</i>	22.33 ± 2.52	35.37 ± 1.71	45.60 ± 4.34	60.70 ± 1.59	62.67 ± 0.32	63.47 ± 1.02	63.57 ± 0.06	63.73 ± 1.76	66.93 ± 4.93	71.27 ± 6.37
<i>Compost</i>	21.30 ± 1.53	32.40 ± 3.66	35.9 ± 6.53	38.93 ± 3.94	52.4 ± 1.82	55.30 ± 1.66	56.10 ± 4.10	56.20 ± 4.25	57.00 ± 1.47	60.43 ± 2.03
<i>BC-SS+Compost</i>	20.33 ± 1.53	32.97 ± 2.04	46.93 ± 3.10	56.60 ± 1.13	62.43 ± 3.32	62.60 ± 5.62	65.20 ± 5.03	66.27 ± 3.39	66.30 ± 4.75	69.17 ± 5.23

Μετρήσεις ανά 10 μέρες, Μέσος όρος ± τυπική απόκλιση (n=3)

Πίνακας Π3 - 2 : Διάμετρος βλαστών φυτών *Solanum Lycopersicum* L.

	17/7/2018	16/8/2018	27/8/2018	5/9/2018	15/9/2018	27/9/2018	8/10/2018	18/10/2018
<i>Control</i>	8.07 ± 0.21	14.14 ± 1.15	14.17 ± 0.95	14.36 ± 0.83	14.42 ± 0.22	14.48 ± 0.54	14.49 ± 1.24	14.88 ± 1.04
<i>BC-SS</i>	8.17 ± 0.16	13.42 ± 0.91	14.77 ± 0.57	15.19 ± 0.55	15.36 ± 1.06	15.47 ± 0.13	15.83 ± 1.49	16.29 ± 1.51
<i>Compost</i>	8.07 ± 0.25	12.79 ± 0.64	14.03 ± 0.67	14.04 ± 0.72	15.42 ± 1.81	15.83 ± 0.65	15.86 ± 0.85	16.00 ± 1.63
<i>BC-SS+Compost</i>	8.13 ± 0.15	14.10 ± 1.22	15.58 ± 0.45	15.77 ± 0.40	16.06 ± 0.12	16.18 ± 1.82	16.28 ± 0.32	16.40 ± 0.09

Μετρήσεις ανά 10 μέρες, Μέσος όρος ± τυπική απόκλιση (n=3)

Πίνακας Π3 - 3 : Συγκέντρωση μακροθρεπτικών N, P, K, Ca, Mg και Na στους υπόγειους και υπέργειους φυτικούς ιστούς

<i>Ρίζες</i>	<i>N (g kg<sup>-1</sup>)</i>	<i>P (g kg<sup>-1</sup>)</i>	<i>K (g kg<sup>-1</sup>)</i>	<i>Ca (g kg<sup>-1</sup>)</i>	<i>Mg (g kg<sup>-1</sup>)</i>	<i>Na (g kg<sup>-1</sup>)</i>
<i>Control</i>	13.57 ± 0.88ab	2.65 ± 0.12ab	5.95 ± 1.06a	16.82 ± 2.60ab	3.59 ± 0.73a	3.63 ± 0.76a
<i>BC-SS</i>	12.84 ± 0.52a	2.71 ± 0.74ab	3.62 ± 0.66a	20.79 ± 1.71b	3.68 ± 0.50a	4.29 ± 0.34ab
<i>Compost</i>	14.38 ± 0.19b	3.63 ± 0.13b	9.21 ± 1.06b	13.59 ± 2.39a	3.38 ± 0.24a	5.77 ± 0.89b
<i>BC-SS+Compost</i>	13.23 ± 0.43ab	2.28 ± 0.19a	5.42 ± 1.48a	15.47 ± 3.11ab	3.32 ± 0.47a	4.24 ± 0.54ab
<i>Βλαστοί</i>	<i>N (g kg<sup>-1</sup>)</i>	<i>P (g kg<sup>-1</sup>)</i>	<i>K (g kg<sup>-1</sup>)</i>	<i>Ca (g kg<sup>-1</sup>)</i>	<i>Mg (g kg<sup>-1</sup>)</i>	<i>Na (g kg<sup>-1</sup>)</i>
<i>Control</i>	5.85 ± 0.64bc	4.91 ± 0.28a	13.07 ± 3.06a	10.49 ± 2.33ab	2.04 ± 0.78a	1.28 ± 0.23a
<i>BC-SS</i>	4.74 ± 0.07ab	4.74 ± 0.21a	10.50 ± 0.46a	8.99 ± 0.83a	1.97 ± 0.36a	1.55 ± 0.35a
<i>Compost</i>	6.55 ± 0.76c	5.74 ± 0.26b	14.56 ± 0.33a	13.01 ± 1.78b	2.45 ± 0.14a	3.55 ± 0.57b
<i>BC-SS+Compost</i>	4.32 ± 0.27a	4.74 ± 0.15a	12.46 ± 0.28a	10.12 ± 0.12ab	2.04 ± 0.06a	1.85 ± 0.20a
<i>Φύλλα</i>	<i>N (g kg<sup>-1</sup>)</i>	<i>P (g kg<sup>-1</sup>)</i>	<i>K (g kg<sup>-1</sup>)</i>	<i>Ca (g kg<sup>-1</sup>)</i>	<i>Mg (g kg<sup>-1</sup>)</i>	<i>Na (g kg<sup>-1</sup>)</i>
<i>Control</i>	13.23 ± 0.47a	2.90 ± 0.55a	7.01 ± 0.64a	15.69 ± 3.86a	1.70 ± 0.14a	0.45 ± 0.05a
<i>BC-SS</i>	12.75 ± 0.87a	3.23 ± 0.27a	8.93 ± 0.65b	18.60 ± 2.90a	1.79 ± 0.06a	0.69 ± 0.19a
<i>Compost</i>	12.66 ± 0.38a	4.78 ± 0.48b	9.50 ± 1.11b	24.17 ± 8.12a	2.13 ± 0.67a	1.42 ± 0.23b
<i>BC-SS+Compost</i>	12.40 ± 0.99a	3.34 ± 0.08a	9.16 ± 0.29b	19.24 ± 1.44a	1.67 ± 0.31a	0.72 ± 0.08a
<i>Καρποί</i>	<i>N (g kg<sup>-1</sup>)</i>	<i>P (g kg<sup>-1</sup>)</i>	<i>K (g kg<sup>-1</sup>)</i>	<i>Ca (g kg<sup>-1</sup>)</i>	<i>Mg (g kg<sup>-1</sup>)</i>	<i>Na (g kg<sup>-1</sup>)</i>
<i>Control</i>	15.55 ± 1.53a	5.30 ± 0.33 b	23.38 ± 4.11a	1.32 ± 0.29b	1.10 ± 0.45a	0.48 ± 0.13a
<i>BC-SS</i>	13.73 ± 1.10a	4.43 ± 0.21 a	19.13 ± 0.87a	0.78 ± 0.06ab	0.85 ± 0.10a	0.43 ± 0.10a
<i>Compost</i>	13.97 ± 0.82a	5.43 ± 0.37b	20.73 ± 0.81a	2.01 ± 0.23c	0.88 ± 0.03a	0.97 ± 0.04b
<i>BC-SS+Compost</i>	13.09 ± 0.54a	4.62 ± 0.32ab	17.29 ± 2.72a	0.74 ± 0.21a	0.61 ± 0.12a	0.46 ± 0.13a

Μέσος όρος ± τυπική απόκλιση (n=3), Κάτω από το όριο ανίχνευσης (<DL). Εφαρμόστηκε one-way ANOVA. Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε p<0.05.

Πίνακας Π3 - 4 : Συγκέντρωση μικροθρεπτικών Fe, Mn, Cu και Zn στους υπόγειους και υπέργειους φυτικούς ιστούς.

<i>Ρίζες</i>	<i>Fe (mg kg<sup>-1</sup>)</i>	<i>Mn (mg kg<sup>-1</sup>)</i>	<i>Cu (mg kg<sup>-1</sup>)</i>	<i>Zn (mg kg<sup>-1</sup>)</i>
<i>Control</i>	1494.67 ± 611.13ab	115.40 ± 25.29a	110.15 ± 58.25a	77.13 ± 3.42a
<i>BC–SS</i>	2137.46 ± 645.33ab	107.83 ± 48.46a	69.58 ± 5.33a	67.81 ± 13.27a
<i>Compost</i>	790.26 ± 52.60a	132.34 ± 87.57a	82.95 ± 18.18a	65.87 ± 11.98a
<i>BC–SS+Compost</i>	2983.61 ± 1389.86b	184.31 ± 101.34a	91.29 ± 27.77a	65.80 ± 4.90a
<i>Βλαστοί</i>	<i>Fe (mg kg<sup>-1</sup>)</i>	<i>Mn (mg kg<sup>-1</sup>)</i>	<i>Cu (mg kg<sup>-1</sup>)</i>	<i>Zn (mg kg<sup>-1</sup>)</i>
<i>Control</i>	39.33 ± 7.24a	24.02 ± 7.31a	36.35 ± 14.72a	40.36 ± 8.79a
<i>BC–SS</i>	36.31 ± 6.14a	23.87 ± 2.98a	61.59 ± 12.53a	30.81 ± 0.96a
<i>Compost</i>	49.02 ± 29.37a	43.15 ± 7.34b	41.33 ± 11.33a	42.87 ± 8.90a
<i>BC–SS+Compost</i>	40.28 ± 10.33a	34.26 ± 4.21ab	71.20 ± 24.17a	29.82 ± 3.68a
<i>Φύλλα</i>	<i>Fe (mg kg<sup>-1</sup>)</i>	<i>Mn (mg kg<sup>-1</sup>)</i>	<i>Cu (mg kg<sup>-1</sup>)</i>	<i>Zn (mg kg<sup>-1</sup>)</i>
<i>Control</i>	67.13 ± 33.20a	82.92 ± 15.49a	109.75 ± 69.56a	18.54 ± 4.40a
<i>BC–SS</i>	72.95 ± 10.20a	110.51 ± 9.87a	290.25 ± 116.59a	35.66 ± 8.51a
<i>Compost</i>	80.70 ± 30.25a	186.30 ± 86.62a	183.47 ± 51.78a	28.82 ± 8.60a
<i>BC–SS+Compost</i>	110.07 ± 70.12a	132.05 ± 28.52a	290.12 ± 123.12a	32.06 ± 7.67a
<i>Καρποί</i>	<i>Fe (mg kg<sup>-1</sup>)</i>	<i>Mn (mg kg<sup>-1</sup>)</i>	<i>Cu (mg kg<sup>-1</sup>)</i>	<i>Zn (mg kg<sup>-1</sup>)</i>
<i>Control</i>	77.98 ± 0.70b	8.75 ± 0.72a	7.54 ± 0.43b	18.42 ± 4.32a
<i>BC–SS</i>	21.26 ± 4.60a	7.17 ± 1.22a	2.34 ± 1.72a	17.63 ± 3.92a
<i>Compost</i>	28.24 ± 3.82a	14.44 ± 1.64b	4.24 ± 0.53a	20.99 ± 1.56a
<i>BC–SS+Compost</i>	24.04 ± 3.02a	8.07 ± 1.65a	2.25 ± 0.68a	17.94 ± 3.43a

Μέσος όρος ± τυπική απόκλιση (n=3), Κάτω από το όριο ανίχνευσης (<DL). Εφαρμόστηκε one-way ANOVA. Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε p<0.05.

Πίνακας Π3 - 5 : Συγκέντρωση βαρέων μετάλλων στους υπόγειους και υπέργειους φυτικούς ιστούς.

Ρίζες	Cr (mg kg <sup>-1</sup> )	Ni (mg kg <sup>-1</sup> )	As (mg kg <sup>-1</sup> )	Mo (mg kg <sup>-1</sup> )	Hg (mg kg <sup>-1</sup> )	Pb (mg kg <sup>-1</sup> )	Co (mg kg <sup>-1</sup> )	Si (mg kg <sup>-1</sup> )	Se (mg kg <sup>-1</sup> )	Cd (mg kg <sup>-1</sup> )
Control	5.65 ± 3.22a	3.23 ± 1.73a	1.85 ± 0.32a	2.84 ± 0.35a	<DL	1.74 ± 0.38a	1.10 ± 0.57a	0.70 ± 0.23ab	<DL	<DL
BC–SS	12.73 ± 3.77a	6.59 ± 2.38a	2.89 ± 0.12a	6.21 ± 1.10c	<DL	3.27 ± 1.30a	1.25 ± 0.31a	0.96 ± 0.13ab	<DL	<DL
Compost	2.02 ± 0.35a	1.16 ± 0.17a	1.64 ± 0.30a	3.40 ± 0.58ab	<DL	1.76 ± 1.22a	0.47 ± 0.13a	0.61 ± 0.02a	<DL	<DL
BC–SS+Compost	11.75 ± 6.73a	5.78 ± 3.26a	3.41 ± 1.77a	4.79 ± 0.60bc	<DL	2.47 ± 0.88a	1.90 ± 1.32a	1.23 ± 0.39b	<DL	<DL
Βλαστοί	Cr (mg kg <sup>-1</sup> )	Ni (mg kg <sup>-1</sup> )	As (mg kg <sup>-1</sup> )	Mo (mg kg <sup>-1</sup> )	Hg (mg kg <sup>-1</sup> )	Pb (mg kg <sup>-1</sup> )	Co (mg kg <sup>-1</sup> )	Si (mg kg <sup>-1</sup> )	Se (mg kg <sup>-1</sup> )	Cd (mg kg <sup>-1</sup> )
Control	<DL	<DL	0.52 ± 0.15a	1.20 ± 0.17ab	<DL	0.15 ± 0.04a	<DL	<DL	<DL	<DL
BC–SS	<DL	<DL	0.79 ± 0.07a	1.76 ± 0.31b	<DL	0.21 ± 0.02a	<DL	<DL	<DL	<DL
Compost	<DL	<DL	0.85 ± 0.12a	1.16 ± 0.13a	<DL	0.14 ± 0.07a	<DL	<DL	<DL	<DL
BC–SS+Compost	<DL	<DL	0.73 ± 0.23a	1.41 ± 0.24ab	<DL	0.17 ± 0.04a	<DL	<DL	<DL	<DL
Φύλλα	Cr (mg kg <sup>-1</sup> )	Ni (mg kg <sup>-1</sup> )	As (mg kg <sup>-1</sup> )	Mo (mg kg <sup>-1</sup> )	Hg (mg kg <sup>-1</sup> )	Pb (mg kg <sup>-1</sup> )	Co (mg kg <sup>-1</sup> )	Si (mg kg <sup>-1</sup> )	Se (mg kg <sup>-1</sup> )	Cd (mg kg <sup>-1</sup> )
Control	<DL	<DL	0.31 ± 0.03a	2.03 ± 0.37a	<DL	0.42 ± 0.12a	<DL	0.04 ± 0.02a	<DL	<DL
BC–SS	<DL	<DL	0.41 ± 0.03a	4.48 ± 0.95b	<DL	0.63 ± 0.32a	<DL	0.08 ± 0.02a	<DL	<DL
Compost	<DL	<DL	0.38 ± 0.12a	2.81 ± 0.45a	<DL	0.42 ± 0.15a	<DL	0.09 ± 0.04a	<DL	<DL
BC–SS+Compost	<DL	<DL	0.37 ± 0.02a	3.28 ± 0.16ab	<DL	0.47 ± 0.08a	<DL	0.11 ± 0.00a	<DL	<DL

Μέσος όρος ± τυπική απόκλιση (n=3), Κάτω από το όριο ανίχνευσης (<DL). Εφαρμόστηκε one-way ANOVA. Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε p<0.05.