



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**Η επίδραση βιοεξανθρακώματος (biochar) από οργανικά παραπροϊόντα στις
καλλιέργειες *Lolium perenne* L. και *Zea Mays* L.**

**ΙΩΑΝΝΑ ΜΑΝΩΛΙΚΑΚΗ
ΓΕΩΠΟΝΟΣ, MSc**

XANIA 2018

Επταμελής Επιτροπή

Ευάγγελος Διαμαντόπουλος-Επιβλέπων

Καθηγητής

Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος

Πολυτεχνείο Κρήτης

Δανάη Βενιέρη

Επ. Καθηγήτρια

Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος

Πολυτεχνείο Κρήτης

Νικόλαος Μουστάκας

Καθηγητής

Σχολή Αγροτικής Παραγωγής, Υποδομών και Περιβάλλοντος

Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Νικόλαος Νικολαΐδης

Καθηγητής

Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος

Πολυτεχνείο Κρήτης

Κωνσταντίνος Κομνίτσας

Καθηγητής

Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων

Πολυτεχνείο Κρήτης

Νικόλαος Παρανυχιανάκης

Επ. Καθηγητής

Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος

Πολυτεχνείο Κρήτης

Γεώργιος Ψαρράς

Ερευνητής Β΄

Ινστιτούτο Ελιάς, Υποτροπικών Φυτών και Αμπέλου

ΕΛΓΟ ΔΗΜΗΤΡΑ

*Στους γονείς μου Γιάννη και Βάσω και
τις αδερφές μου Έρη και Χρυσούλα*

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τη βαθύτατη ευγνωμοσύνη μου στον επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Ευάγγελο Διαμαντόπουλο, για την επιστημονική καθοδήγηση, την υλικοτεχνική και οικονομική στήριξη που μου παρείχε καθώς και για το χρόνο που μου αφιέρωσε καθ' όλη τη διάρκεια της διδακτορικής μου διατριβής.

Επίσης, ευχαριστώ θερμά την Επ. Καθηγήτρια Δανάη Βενιέρη και τον Καθηγητή Νικόλαο Μουστάκα για την πολύτιμη βοήθειά τους, ως μέλη της τριμελούς μου επιτροπής, αλλά και τον Καθηγητή Νικόλαο Νικολαΐδη, τον Καθηγητή Κωνσταντίνο Κομνίτσα, τον Επ. Καθηγητή Νικόλαο Παρανυχιανάκη και τον Ερευνητή Β' Γεώργιο Ψαρρά που δέχτηκαν να συμμετάσχουν στην Επταμελή Επιτροπή αξιολόγησης της διδακτορικής μου διατριβής.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες στον Καθηγητή Νικόλαο Μπαρμπαγιάννη του εργαστηρίου εδαφολογίας στο ΑΠΘ για τις αναλύσεις των βιοεξανθρακωμάτων, στη Maria-Lilliana Saru και Στέλλα Βουτσαδάκη του εργαστηρίου Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών, καθώς και στη Νεκταρία Διγαλάκη του εργαστηρίου Εδαφολογίας στο Ινστιτούτο Ελιάς, Υποτροπικών φυτών και Αμπέλου για τις αναλύσεις εδάφους και βιοεξανθρακωμάτων.

Ευχαριστώ, ιδιαιτέρως, τον Δρ. Ιωάννη Μετζιδάκη και Δρ. Θωμαή Νικολή για την ηθική ενθάρρυνση, τη βοήθεια και τις συμβουλές του για τη συνέχιση των σπουδών μου.

Ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ σε όλα τα παλιά και νέα μέλη του εργαστηρίου Τεχνολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος και ιδιαίτερα την Ιωάννα Τζατζιμάκη, Αθανασία Κατσώνη, Αλίκη Κόκκα, Παναγιώτη Ρεγκούζα, προπτυχιακούς και μεταπτυχιακούς φοιτητές με τους οποίους συνεργάστηκα αρμονικά και μοιράστηκα επιστημονικούς προβληματισμούς. Ιδιαίτερα θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην υπεύθυνη του εργαστηρίου Ελισάβετ Κουκουράκη, για την πολύτιμη βοήθειά της και τις εποικοδομητικές επιστημονικές και μη συζητήσεις που είχα μαζί της.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου, Αγγελική, Νάνσυ, Αδάμ, Αντωνία και Άντζελα που μου συμπαραστέκονται και με στηρίζουν, δίνοντας μου θάρρος να πραγματοποιώ τα όνειρά μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή μελετήθηκε η αξιοποίηση βιοεξανθρακωμάτων (biochars), προερχόμενα από τέσσερα διαφορετικά αγροτικά οργανικά παραπροϊόντα, με σκοπό την εφαρμογή τους σε καλλιέργειες. Τα οργανικά παραπροϊόντα που χρησιμοποιήθηκαν, ήταν τα στέμφυλα (Σ), οι φλοιοί ρυζιού (ΦΡ), οι εξαντλημένοι σπόροι κριθαριού (ΣΚ) και η πλεονάζουσα μαγιά (Μ). Η επιλογή των φλοιών ρυζιού έγινε λόγω της μεγάλης αφθονίας, παγκοσμίως, ενώ τα στέμφυλα λόγω των μεγάλων ποσοτήτων που παράγονται από τη διαδικασία της οινοποίησης στην Κρήτη. Οι εξαντλημένοι σπόροι κριθαριού και η πλεονάζουσα μαγιά επιλέχθηκαν λόγω της αύξησης της δραστηριότητας ζυθοποίησης τα τελευταία χρόνια στην Ελλάδα, επομένως και παραγωγής παραπροϊόντων ζυθοποιίας.

Στο πρώτο μέρος της μελέτης διερευνήθηκε η επίδραση βιοεξανθρακωμάτων σε θερμοκρασία πυρόλυσης 300°C, που είχαν προέλθει από φλοιούς ρυζιού (BC-ΦΡ) και στέμφυλα (BC-Σ), στο *Lolium perenne* L. Η διάρκεια της καλλιέργειας ήταν 3 μήνες και χρησιμοποιήθηκαν δύο καλλιεργούμενα εδάφη διαφορετικής κοκκομετρικής σύστασης (Sandy Loam-SL και Loam-L). Στόχος ήταν να μελετηθεί (i) αν τα βιοεξανθρακώματα με/χωρίς οργανική (κόμποστ) λίπανση, σε δόση 2% κ.β. είτε χωρίς ανόργανη λίπανση (ΧΛ) είτε σε συνδυασμό με ανόργανη χωρίς P (ΛΧΡ), επηρεάζουν το ξηρό βάρος του υπέργειους μέρους του φυτού, τη συγκέντρωση P στους υπέργειους φυτικούς ιστούς και (ii) αν τα βιοεξανθρακώματα σε συνδυασμό με ή χωρίς κόμποστ, σε δόση 2% κ.β, χωρίς ανόργανη λίπανση (ΧΛ), επηρεάζουν το ξηρό βάρος του υπέργειου μέρους του φυτού, τις συγκεντρώσεις μακροθρεπτικών και μικροθρεπτικών στοιχείων στους υπέργειους φυτικούς ιστούς. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, σημαντική αύξηση στο ξηρό βάρος των υπέργειων φυτικών ιστών του *Lolium perenne* L. στο SL έδαφος στον τρίτο μήνα καλλιέργειας επέφερε η προσθήκη βιοεξανθρακώματος με ή χωρίς κόμποστ (59-78%) και ιδιαίτερα του BC-ΦΡ (3.17 g/δοχείο), σε συνδυασμό με ανόργανη λίπανση, σε σύγκριση με τον μάρτυρα (1.78 g/δοχείο), ενώ στο L έδαφος δεν παρατηρήθηκε καμία σημαντική αύξηση. Καμία σημαντική επίδραση στο ξηρό βάρος δεν παρατηρήθηκε και στα δύο εδάφη, όταν προστέθηκαν τα εδαφοβελτιωτικά χωρίς ανόργανη λίπανση. Η προσθήκη BC-Σ και BC-Σ+κόμποστ αύξησε σημαντικά τη συγκέντρωση P των υπέργειων φυτικών ιστών μόνο στο L έδαφος, σε όλες τις συγκομιδές, είτε παρουσία ανόργανης λίπανσης είτε απουσία. Η συγκέντρωση K στους υπέργειους φυτικούς ιστούς αυξήθηκε από τα BC-Σ και BC-Σ+κόμποστ κυρίως στο SL έδαφος. Η συγκέντρωση Fe, αυξήθηκε στους υπέργειους φυτικούς ιστούς από την προσθήκη BC-ΦΡ+κόμποστ στο SL έδαφος, ενώ η συγκέντρωση Mn και Zn επηρεάστηκε σημαντικά από την προσθήκη κόμποστ και BC-Σ+κόμποστ και στα δύο εδάφη.

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας μελετήθηκε η επίδραση βιοεξανθρακωμάτων, κόμποστ και μίγματα των δύο, στο ξηρό βάρος, τα μορφολογικά χαρακτηριστικά και στις συγκεντρώσεις μακροθρεπτικών και μικροθρεπτικών στοιχείων στους υπέργειους, υπόγειους φυτικούς ιστούς του *Zea Mays* L. και στα εδάφη. Τα βιοεξανθρακώματα παράχθηκαν από την ίδια βιομάζα (BC-Σ και BC-ΦΡ) και στην ίδια θερμοκρασία πυρόλυσης 300°C, όπως και στο πρώτο μέρος της εργασίας. Το

καλαμπόκι αναπτύχθηκε για 30 ημέρες μετά την έκπτυξη των σποροφύτων σε δοχεία που περιείχαν δύο καλλιεργούμενα εδάφη διαφορετικής κοκκομετρικής σύστασης (Sandy Loam-SL και Loam-L) με/χωρίς κόμποστ σε δόση εφαρμογής 2% κ.β. σε συνδυασμό με ανόργανη N λίπανση. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το ξηρό βάρος του καλαμποκιού αυξήθηκε σημαντικά και στα δύο εδάφη. Η εφαρμογή του BC-Σ αύξησε σημαντικά το ξηρό βάρος των υπέργειων φυτικών ιστών (155%), σε σύγκριση με τον μάρτυρα, στο SL έδαφος, ενώ στο L έδαφος η σημαντική αύξηση προήλθε από το BC-ΦΡ+κόμποστ (436%). Η προσθήκη BC-Σ+κόμποστ αύξησε σημαντικά τη συγκέντρωση P των υπέργειων και υπόγειων φυτικών ιστών μόνο στο πηλώδες έδαφος. Η συγκέντρωση K στους υπέργειους και υπόγειους φυτικούς ιστούς αυξήθηκε σχεδόν από όλα τα βιοεξανθρακώματα με ή χωρίς κόμποστ, ενώ η μεγαλύτερη αύξηση προήλθε από την προσθήκη BC-Σ+κόμποστ στο SL έδαφος, ενώ στο L έδαφος η συγκέντρωση K αυξήθηκε μόνο στους υπόγειους φυτικούς ιστούς με τη μεγαλύτερη αύξηση να εμφανίζεται από την προσθήκη BC-Σ. Η συγκέντρωση του Ca αυξήθηκε σημαντικά κυρίως στους υπόγειους φυτικούς ιστούς στο L έδαφος, ενώ η συγκέντρωση του Mg στους υπόγειους φυτικούς ιστούς επηρεάστηκε θετικά από τις μεταχειρίσεις BC-Σ και BC-Σ+κόμποστ στο L και SL έδαφος, αντίστοιχα. Η συγκέντρωση Fe, αυξήθηκε στους υπέργειους φυτικούς ιστούς από την προσθήκη του BC-Σ+κόμποστ και στα δύο εδάφη. Η συγκέντρωση Mn στους υπέργειους και υπόγειους φυτικούς ιστούς επηρεάστηκε σημαντικά από τη μεταχείριση BC-Σ+κόμποστ μόνο στο SL έδαφος. Η συγκέντρωση Zn στους υπόγειους φυτικούς ιστούς επηρεάστηκε θετικά στις μεταχειρίσεις που περιείχαν κόμποστ στο SL έδαφος. Στο τελευταίο μέρος της διατριβής, μελετήθηκε η επίδραση βιοεξανθρακωμάτων προερχόμενα από εξαντλημένους σπόρους κριθαριού (BC-ΣΚ) και πλεονάζουσα μαγιά (BC-M) λαμβάνοντας ανόργανη αζωτούχα λίπανση (Λ) ή χωρίς καθόλου ανόργανη αζωτούχα λίπανση (ΧΛ), στο *Zea Mays* L. σε ένα πηλώδες (L) έδαφος. Η θερμοκρασία πυρόλυσης των βιοεξανθρακωμάτων ήταν 300°C και η συνολική δόση εφαρμογής βιοεξανθρακώματος ήταν 2% κ.β. (BC-ΣΚ-2%; BC-M-2%) και 5% κ.β. (BC-ΣΚ-5%; BC-M-5%) για κάθε είδος βιοεξανθρακώματος και μίγματος (BC-ΣΚ+M-1%+1%; BC-ΣΚ+M-2.5%+2.5%) αποτελούμενο και από τα δύο είδη βιοεξανθρακωμάτων. Αξιολογήθηκε η επίδραση των βιοεξανθρακωμάτων στο ξηρό βάρος και στα μορφολογικά χαρακτηριστικά του φυτού, στις συγκέντρωσεις μακροθρεπτικών και μικροθρεπτικών στοιχείων στους υπέργειους και υπόγειους φυτικούς ιστούς και στις ιδιότητες του εδάφους, συμπεριλαμβανομένων των θρεπτικών συστατικών και του pH, σε ένα πείραμα 30 ημερών μετά την εμφάνιση των σποροφύτων. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν έδειξαν ότι η προσθήκη βιοεξανθρακωμάτων με ανόργανη λίπανση αύξησε σημαντικά το ξηρό βάρος του καλαμποκιού στο υπέργειο μέρος του φυτού (46-157%), σε σύγκριση με τον μάρτυρα, ενώ κατά 59-186% χωρίς ανόργανη λίπανση. Η μεγαλύτερη αύξηση προήλθε από τα βιοεξανθρακώματα είτε μεμονωμένα είτε συνδυαστικά σε δόση 5% κ.β. Η προσθήκη των βιοεξανθρακωμάτων είτε μεμονωμένα είτε συνδυαστικά και κυρίως σε δόση 5% κ.β. αύξησε σημαντικά τη συγκέντρωση P των υπέργειων και υπόγειων φυτικών ιστών με ή χωρίς ανόργανη λίπανση. Τα βιοεξανθρακώματα μαγιάς (BC-M-2% και BC-M-5%), καθώς και του συνδυασμού βιοεξανθρακωμάτων, σε συνολική δόση 5%

αύξησαν τη συγκέντρωση K στους υπέργειους φυτικούς ιστούς χωρίς ανόργανη λίπανση. Η συγκέντρωση του Ca στους υπόγειους φυτικούς ιστούς επηρεάστηκε θετικά μόνο από το BC-ΣΚ-2% χωρίς ανόργανη λίπανση. Η συγκέντρωση του Mg στους υπέργειους φυτικούς ιστούς επηρεάστηκε θετικά από τις μεταχειρίσεις BC-ΣΚ-5% και BC-ΣΚ+M-2.5%+2.5%, χωρίς ανόργανη λίπανση.

Συμπερασματικά, η προσθήκη βιοεξανθρακώματος αυξάνει την απόδοση των φυτών, ωστόσο οι εδαφικές παράμετροι, το είδος βιοεξανθρακώματος, η δόση εφαρμογής και η πρόσθετη λίπανση πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, προκειμένου να αποτελέσει το βιοεξανθράκωμα ένα εργαλείο διαχείρισης των γεωργικών υπολειμμάτων και της ολοκληρωμένης γεωργίας.

ABSTRACT

In the current PhD study, biochars derived from four different agricultural organic byproducts were assessed in plant cultivation. The organic by-products came from agro-industrial activities and were: grape pomace (GP), rice husks (RH), brewery spent grains (BSG) and brewery surplus yeast (BSY). Rice husks were chosen due to their great abundance worldwide, while the grape pomace due to the large quantities produced by the winemaking process in Crete. Brewery spent grain and surplus yeast were chosen due to the increase in brewing activity in Greece, hence the production of brewery by-products.

In the first part of the study, the effect of biochars produced at 300°C pyrolysis temperature and derived from rice husks (BC-RH) and grape pomace (BC-GP), was investigated on ryegrass (*Lolium perenne* L.). A three-month period of ryegrass cultivation was studied on two Mediterranean agricultural soils of different texture (Sandy Loam-SL and Loam-L). The objectives of this study aim to ascertain (i) whether biochar, with or without compost, at an application rate of 2% (w/w), having received all nutrients but P (FNoP) or no inorganic fertilization at all (NoF), affect aboveground dry weight, P concentration and uptake in ryegrass shoot tissues and (ii) the impact of biochars with or without compost, at an application rate of 2% (w/w), having received no inorganic fertilization at all (NoF), on the dry weight and nutrient status of ryegrass shoot tissues. According to the results, application of both types of biochar with or without compost, in the presence of inorganic fertilization except P, significantly increased aboveground dry weight of ryegrass (59-78%), compared to control, in SL soil, particularly, BC-RH (3.17 g/pot), compared to the control (1.78 g/pot), although no statistically significant increase was observed in L soil. No statistically significant differences were observed among the no fertilization treatments (NoF) in all three harvests for both soils. The addition of BC-GP and BC-GP+compost significantly increased the shoot P-concentration only in L soil, in all harvests, either in the presence or absence of inorganic fertilization except P. The application of BC-GP and BC-GP+compost resulted in increased shoot K concentration mainly in SL soil. Shoot Fe concentration increased by the addition of BC-RH+compost in SL soil, whereas Mn and Zn concentrations were significantly affected by the addition of compost and BC-GP+compost in both soils.

The second part of the study looked into the influence of biochar, compost and mixtures of the two on maize (*Zea mays* L.) dry weight, morphological traits and nutrient status of plant tissues and soils. Biochars were produced from the same types of feedstock (GP and RH) and at the same pyrolysis temperature, as in the first part of the study. Maize was grown for 30 days after seedling emergence in a greenhouse pot trial in two Mediterranean agricultural soils of different texture (Sandy Loam-SL and Loam-L) amended with biochar with or without compost at application rate of 2% (w/w) and inorganic N fertilization. The addition of BC-GP amendment resulted in the highest increase (155%) of aboveground dry weight compared to the control in SL soil, whereas in L soil the highest increase of aboveground dry weight resulted from BC-RH+compost (436%). The addition of BC-GP+compost significantly increased P

concentration of the aboveground and belowground tissues only in L soil. K concentration of aboveground and belowground tissues significantly increased almost by all the amendments with the greatest increase observed by the addition of BC-GP+compost in SL soil, while K concentration significantly increased only in belowground tissues with the highest increase by the BC-GP application in L soil. Ca concentration significantly increased mainly in the belowground tissues in the L soil, while Mg concentration of belowground tissues was positively affected by the BC-GP and BC-GP+compost treatment in L and SL soil, respectively. The addition of BC-GP+compost significantly increased aboveground Fe concentration in both soils. The Mn concentration of aboveground and belowground tissues significantly increased by the BC-GP+compost treatment only in the SL soil. Zn belowground concentration was positively influenced by the treatments containing compost in the SL soil.

In the last part of the thesis, the effect of biochar derived from brewery spent grains (BSG) and brewery surplus yeast (BSY) was studied, having received inorganic N fertilization (F) or no inorganic N fertilization at all (NoF), on maize (*Zea Mays* L.) in a Loam (L) soil. The biochars were produced at 300°C pyrolysis temperature, while the total biochar application rate was either 2% (w/w) (BC-BSG-2%; BC-BSY-2%) or 5% (w/w) (BC-BSG-5%; BC-BSY-5%) for each type of biochar, as well as a mixture of both types (BC-BSG+BSY-1%+1%; BC-BSG+BSY-2.5%+2.5%). The influence of biochars on the dry weight and morphological characteristics of the plant, the concentrations of macronutrients and micronutrients of aboveground and belowground plant tissues, and the soil properties, including nutrients and pH, in an experiment 30 days after the seedling emergence were studied. The results showed that the addition of biochars significantly increased the aboveground dry weight of maize (46-157%), compared to the control, having received inorganic N fertilization, while by 59-186% without inorganic fertilization at all. Biochars individually or in a mixture at 5% application rate gave the highest increase of aboveground and belowground maize tissues. P concentration of aboveground and belowground tissues was significantly enhanced by biochars individually or in a mixture and mainly at 5% application rate, having received inorganic N fertilization or not. K concentration of aboveground tissues significantly increased by the addition of BC-BSY (BC-BSY-2% and BC-BSY-5%) at both application rates, and by the mixture at 5% application rate, without inorganic N fertilization. Ca belowground concentration was positively affected by BC-BSG-2% without inorganic N fertilization. Mg aboveground concentration was significantly increased by BC-BSG-5% and BC-BSG+BSY-2.5%+2.5% applications, without inorganic N fertilization.

In conclusion, biochar addition could enhance plant yield, although soil conditions, type of biochar, application rate and additional fertilization should receive special attention in order for biochar to be an effective tool for the management of agricultural residues and sustainable agriculture.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	ii
ABSTRACT	v
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	x
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	xii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	1
Εισαγωγή.....	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Στόχοι της διατριβής.....	2
1.3 Πρωτοτυπίες της διατριβής	3
1.4 Δημοσιεύσεις.....	3
1.5 Διάρθρωση της διατριβής.....	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	6
Ανασκόπηση της βιβλιογραφίας.....	6
2.1 Οργανικά παραπροϊόντα.....	6
2.1.1 Παραπροϊόντα αμπέλου-οίνου	6
2.1.2 Παραπροϊόντα ρυζιού.....	7
2.1.3 Παραπροϊόντα ζυθοποιίας.....	8
2.2 Βιοεξανθράκωμα (Biochar)-πυρόλυση (pyrolysis)	13
2.2.1 Πυρόλυση.....	13
2.2.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση και τα χαρακτηριστικά του βιοεξανθρακώματος.....	14
2.2.3 Δομή βιοεξανθρακώματος.....	17
2.2.4 Φυσικές ιδιότητες βιοεξανθρακώματος και παράγοντες που τις επηρεάζουν....	17
2.2.5 Αγρονομικές/χημικές ιδιότητες βιοεξανθρακώματος και παράγοντες που τις επηρεάζουν.....	18
2.3 Επίδραση του βιοεξανθρακώματος στο έδαφος.....	26
2.3.1 Επίδραση του βιοεξανθρακώματος στις φυσικές ιδιότητες του εδάφους.....	26
2.3.2 Επίδραση του βιοεξανθρακώματος στις χημικές ιδιότητες του εδάφους.....	27
2.3.3 Επίδραση του βιοεξανθρακώματος στις βιολογικές ιδιότητες του εδάφους	28
2.4. Επίδραση του βιοεξανθρακώματος στις καλλιέργειες φυτών	29
2.4.1 Επίδραση βιοεξανθρακώματος σε διαφορετικά είδη φυτών	32
2.4.2 Επίδραση βιοεξανθρακώματος σε διαφορετικής κοκκομετρικής σύστασης εδάφη	32
2.4.3 Επίδραση βιοεξανθρακώματος σε συνδυασμό με ανόργανη ή οργανική λίπανση	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	35

Η επίδραση βιοεξανθρακωμάτων από στέμφυλα και φλοιούς ρυζιού στο <i>Lolium perenne</i> L.	35
3.1 Εισαγωγή.....	35
3.2 Υλικά και Μέθοδοι.....	36
3.2.1 Υλικά.....	36
3.2.2 Εγκατάσταση πειράματος.....	37
3.2.3 Αναλυτικές Μέθοδοι	38
3.2.4 Στατιστική Ανάλυση	41
3.3 Αποτελέσματα και Συζήτηση	41
3.3.1 Ανάπτυξη και απόδοση των φυτών	41
3.3.2 Συγκέντρωση μακροθρεπτικών N, P, K, Ca, Mg στους υπέργειους φυτικούς ιστούς και πρόσληψη μακροθρεπτικών από τους υπέργειους φυτικούς ιστούς.	43
3.3.3 Συγκέντρωση μικροθρεπτικών Fe, Mn, Zn στους υπέργειους φυτικούς ιστούς και πρόσληψη μικροθρεπτικών από τους υπέργειους φυτικούς ιστούς	54
3.4 Συμπεράσματα.....	60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	62
Η επίδραση βιοεξανθρακωμάτων από στέμφυλα και φλοιούς ρυζιού στο <i>Zea Mays</i> L. .	62
4.1 Εισαγωγή.....	62
4.2 Υλικά και Μέθοδοι.....	63
4.2.1 Υλικά.....	63
4.2.2 Εγκατάσταση πειράματος.....	64
4.2.3 Αναλυτικές Μέθοδοι	65
4.2.4 Στατιστική Ανάλυση	68
4.3 Αποτελέσματα και Συζήτηση	68
4.3.1 Χαρακτηρισμός οργανικών παραπροϊόντων και βιοεξανθρακωμάτων.....	68
4.3.2 Ανάπτυξη και απόδοση των φυτών	72
4.3.2 Συγκέντρωση μακροθρεπτικών N, P, K, Ca, Mg στους υπέργειους και υπόγειους φυτικούς ιστούς	77
4.3.3 Συγκέντρωση μικροθρεπτικών Fe, Mn, Zn στους υπέργειους και υπόγειους φυτικούς ιστούς	83
4.4 Συμπεράσματα.....	92
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	94
Η επίδραση βιοεξανθρακωμάτων από παραπροϊόντα ζυθοποιίας στο <i>Zea Mays</i> L.....	94
5.1 Εισαγωγή.....	94
5.2 Υλικά και Μέθοδοι.....	95
5.2.1 Υλικά.....	95
5.2.2 Εγκατάσταση πειράματος.....	95

5.2.3 Αναλυτικές Μέθοδοι	97
5.2.4 Στατιστική Ανάλυση	99
5.3 Αποτελέσματα και Συζήτηση	99
5.3.1 Χαρακτηρισμός οργανικών παραπροϊόντων και βιοεξανθρακωμάτων	99
5.3.2 Ανάπτυξη και απόδοση των φυτών	103
5.3.2 Συγκέντρωση μακροθρεπτικών N, P, K, Ca, Mg στους υπέργειους και υπόγειους φυτικούς ιστούς	108
5.3.3 Συγκέντρωση μικροθρεπτικών Fe, Mn, Zn στους υπέργειους και υπόγειους φυτικούς ιστούς	115
5.3.4 Χημικές ιδιότητες των εδαφών	118
5.4 Συμπεράσματα	122
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....	123
Συμπεράσματα και Προοπτικές	123
6.1 Γενικά συμπεράσματα	123
6.2 Προοπτικές μελλοντικής έρευνας	124
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	125
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	141

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2-1. Αγροτικά υπολείμματα και παραπροϊόντα που παράγονται στην Ελλάδα ανα έτος.....	10
Πίνακας 2-2. Ποσοστά κυτταρίνης, ημικυτταρίνης, λιγνίνης και εκχυλίσμων συστατικών βιομαζών.....	15
Πίνακας 2-3. Χαρακτηριστικά βιοεξανθρακωμάτων	23
Πίνακας 2-4. Ισχύουσα και προτεινόμενη νομοθεσία των χαρακτηριστικών των βιοεξανθρακωμάτων.....	24
Πίνακας 2-5. Χαρακτηριστικά βιοεξανθρακωμάτων	26
Πίνακας 2-6. Επίδραση βιοεξανθρακωμάτων στις αποδόσεις καλλιεργειών.....	30
Πίνακας 3-1. Σχέδιο πειραματικού με φυτά του <i>Lolium perenne</i> L. σε δοχεία. Οι μεταχειρίσεις για κάθε έδαφος (SL και L)	38
Πίνακας 3-2. Φυσιολογικές ιδιότητες των 2 δειγμάτων εδάφους που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα με φυτά του <i>Lolium perenne</i> L. σε δοχεία.....	39
Πίνακας 3-3. Χαρακτηριστικά των οργανικών παραπροϊόντων, των βιοεξανθρακωμάτων και του κόμποστ που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα με φυτά του <i>Lolium perenne</i> L. σε δοχεία.	40
Πίνακας 3-4. Πρόσληψη P (mg P/ δοχείο) από τους υπέργειους φυτικούς ιστούς του <i>Lolium perenne</i> L. στο SL και L έδαφος	47
Πίνακας 3-5. Πρόσληψη N, K, Ca, Mg (mg / δοχείο) από τους υπέργειους φυτικούς ιστούς του <i>Lolium perenne</i> L. στο SL έδαφος.....	52
Πίνακας 3-6. Πρόσληψη N, K, Ca, Mg (mg / δοχείο) από τους υπέργειους φυτικούς ιστούς του <i>Lolium perenne</i> L. στο L έδαφος	53
Πίνακας 3-7. Πρόσληψη Fe, Mn, Zn (mg / δοχείο) από τους υπέργειους φυτικούς ιστούς του <i>Lolium perenne</i> L. στο SL έδαφος	58
Πίνακας 3-8. Πρόσληψη Fe, Mn, Zn (mg / δοχείο) από τους υπέργειους φυτικούς ιστούς του <i>Lolium perenne</i> L. στο L έδαφος	59
Πίνακας 4-1. Σχέδιο πειραματικού με φυτά του <i>Zea Mays</i> L. σε δοχεία. Οι μεταχειρίσεις για κάθε έδαφος (SL και L).....	65
Πίνακας 4-2. Φυσιολογικές ιδιότητες των 2 δειγμάτων εδάφους που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα με φυτά του <i>Zea Mays</i> L. σε δοχεία.	66
Πίνακας 4-3. Χαρακτηριστικά του κόμποστ που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα με φυτά του <i>Zea Mays</i> L. σε δοχεία.....	67
Πίνακας 4-4. Χαρακτηριστικά των οργανικών παραπροϊόντων και των βιοεξανθρακωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα με φυτά του <i>Zea Mays</i> L. σε δοχεία.	71
Πίνακας 4-5. Επίδραση βιοεξανθρακώματος με/ή κόμποστ στις ιδιότητες του εδάφους pH, EC, TOC, TN, NH ₄ -N, NO ₃ -N, Olsen-P, ανταλλάξιμο K, Ca, Mg και DTPA -Fe, Mn, Zn στα δύο εδάφη (SL και L) όπου καλλιεργήθηκε το <i>Zea Mays</i> L. έπειτα από 30 ημέρες μετά την έκπτυξη των σποροφύτων	91

Πίνακας 5-1. Σχέδιο πειραματικού με φυτά του <i>Zea Mays</i> L. σε δοχεία. Οι μεταχειρίσεις για το έδαφος (L).....	97
Πίνακας 5-2. Φυτικοχημικές ιδιότητες του δείγματος εδάφους (L) που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα με φυτά του <i>Zea Mays</i> L. σε δοχεία.	99
Πίνακας 5-3. Χαρακτηριστικά των οργανικών παραπροϊόντων και των βιοεξανθρακωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα με φυτά του <i>Zea Mays</i> L. σε δοχεία.	102
Πίνακας 5-4. Επίδραση βιοεξανθρακώματος στις ιδιότητες του εδάφους pH, EC, TOC, TN, NH ₄ -N, NO ₃ -N, Olsen-P, ανταλλάξιμο K, Ca, Mg και DTPA -Fe, Mn, Zn στο L έδαφος όπου καλλιεργήθηκε το <i>Zea Mays</i> L. έπειτα από 30 ημέρες μετά την έκπτυξη των σποροφύτων	121
Πίνακας Π3-1. Συγκέντρωση N, P, K (g kg ⁻¹ ξηρής ουσίας) υπέργειων φυτικών ιστών του <i>Lolium perenne</i> L. στο SL έδαφος στις μεταχειρίσεις χωρίς λίπανση (ΧΛ).....	141
Πίνακας Π3-2. Συγκέντρωση N, P, K (g kg ⁻¹ ξηρής ουσίας) υπέργειων φυτικών ιστών του <i>Lolium perenne</i> L. στο L έδαφος στις μεταχειρίσεις χωρίς λίπανση (ΧΛ)	142
Πίνακας Π3-3. Συγκέντρωση Ca, Mg (g kg ⁻¹ ξηρής ουσίας) υπέργειων φυτικών ιστών του <i>Lolium perenne</i> L. στο SL έδαφος στις μεταχειρίσεις χωρίς λίπανση (ΧΛ).....	143
Πίνακας Π3-4. Συγκέντρωση Ca, Mg (g kg ⁻¹ ξηρής ουσίας) υπέργειων φυτικών ιστών του <i>Lolium perenne</i> L. στο L έδαφος στις μεταχειρίσεις χωρίς λίπανση (ΧΛ)	144
Πίνακας Π3-5. Συγκέντρωση Fe, Mn, Zn (mg kg ⁻¹ ξηρής ουσίας) υπέργειων φυτικών ιστών του <i>Lolium perenne</i> L. στο SL έδαφος στις μεταχειρίσεις χωρίς λίπανση (ΧΛ)	145
Πίνακας Π3-6. Συγκέντρωση Fe, Mn, Zn (mg kg ⁻¹ ξηρής ουσίας) υπέργειων φυτικών ιστών του <i>Lolium perenne</i> L. στο L έδαφος στις μεταχειρίσεις χωρίς λίπανση (ΧΛ).....	145
Πίνακας Π4-1. Συγκέντρωση N, P, K, Ca, Mg (g kg ⁻¹ ξηρής ουσίας) και Fe, Mn, Zn (mg kg ⁻¹ ξηρής ουσίας) υπέργειων και υπόγειων φυτικών ιστών του <i>Zea Mays</i> L. στο SL έδαφος ...	145
Πίνακας Π4-2. Συγκέντρωση N, P, K, Ca, Mg (g kg ⁻¹ ξηρής ουσίας) και Fe, Mn, Zn (mg kg ⁻¹ ξηρής ουσίας) υπέργειων και υπόγειων φυτικών ιστών του <i>Zea Mays</i> L. στο L έδαφος.....	145
Πίνακας Π5-1. Συγκέντρωση N, P, K, Ca, Mg (g kg ⁻¹ ξηρής ουσίας) και Fe, Mn, Zn (mg kg ⁻¹ ξηρής ουσίας) υπέργειων και υπόγειων φυτικών ιστών του <i>Zea Mays</i> L. στο L έδαφος στις μεταχειρίσεις με λίπανση (Λ).....	145
Πίνακας Π5-2. Συγκέντρωση N, P, K, Ca, Mg (g kg ⁻¹ ξηρής ουσίας) και Fe, Mn, Zn (mg kg ⁻¹ ξηρής ουσίας) υπέργειων και υπόγειων φυτικών ιστών του <i>Zea Mays</i> L. στο L έδαφος στις μεταχειρίσεις χωρίς λίπανση (ΧΛ).....	145

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 3-1. Ξηρό βάρος (g ξηρής ουσίας/δοχείο) υπέργειων φυτικών ιστών του <i>Lolium perenne</i> L. στο SL (A) και L (B) έδαφος	43
Σχήμα 3-2. Συγκέντρωση N (g N kg ⁻¹ ξηρής ουσίας) υπέργειων φυτικών ιστών του <i>Lolium perenne</i> L. στο SL (A) και L (B) έδαφος	45
Σχήμα 3-3. Συγκέντρωση P (g P kg ⁻¹ ξηρής ουσίας) υπέργειων φυτικών ιστών του <i>Lolium perenne</i> L. στο SL (A) και L (B) έδαφος	47
Σχήμα 3-4. Συγκέντρωση K (g K kg ⁻¹ ξηρής ουσίας) υπέργειων φυτικών ιστών του <i>Lolium perenne</i> L. στο SL (A) και L (B) έδαφος	49
Σχήμα 3-5. Συγκέντρωση Ca (g Ca kg ⁻¹ ξηρής ουσίας) υπέργειων φυτικών ιστών του <i>Lolium perenne</i> L. στο SL (A) και L (B) έδαφος	50
Σχήμα 3-6. Συγκέντρωση Mg (g Mg kg ⁻¹ ξηρής ουσίας) υπέργειων φυτικών ιστών του <i>Lolium perenne</i> L. στο SL (A) και L (B) έδαφος	51
Σχήμα 3-7. Συγκέντρωση Fe (mg Fe kg ⁻¹ ξηρής ουσίας) υπέργειων φυτικών ιστών του <i>Lolium perenne</i> L. στο SL (A) και L (B) έδαφος	55
Σχήμα 3-8. Συγκέντρωση Mn (mg Mn kg ⁻¹ ξηρής ουσίας) υπέργειων φυτικών ιστών του <i>Lolium perenne</i> L. στο SL (A) και L (B) έδαφος	56
Σχήμα 3-9. Συγκέντρωση Zn (mg Zn kg ⁻¹ ξηρής ουσίας) υπέργειων φυτικών ιστών του <i>Lolium perenne</i> L. στο SL (A) και L (B) έδαφος	57
Σχήμα 4-1. Ύψος (cm) του <i>Zea Mays</i> L. στο SL και L έδαφος, 10 ημέρες (A), 20 ημέρες (B) και 30 ημέρες (Γ) μετά την έκπτυξη των σποροφύτων	73
Σχήμα 4-2. Διάμετρος βλαστού (cm) του <i>Zea Mays</i> L. στο SL και L έδαφος	74
Σχήμα 4-3. Ξηρό βάρος (g ξηρής ουσίας/δοχείο) υπέργειων (A) και υπόγειων (B) φυτικών ιστών του <i>Zea Mays</i> L. στο SL και L έδαφος.....	77
Σχήμα 4-4. Συγκέντρωση N (g N kg ⁻¹ ξηρής ουσίας) υπέργειων (A) και υπόγειων (B) φυτικών ιστών του <i>Zea Mays</i> L. στο SL και L έδαφος.....	78
Σχήμα 4-5. Συγκέντρωση P (g P kg ⁻¹ ξηρής ουσίας) υπέργειων (A) και υπόγειων (B) φυτικών ιστών του <i>Zea Mays</i> L. στο SL και L έδαφος.....	79
Σχήμα 4-6. Συγκέντρωση K (g K kg ⁻¹ ξηρής ουσίας) υπέργειων (A) και υπόγειων (B) φυτικών ιστών του <i>Zea Mays</i> L. στο SL και L έδαφος.....	80
Σχήμα 4-7. Συγκέντρωση Ca (g Ca kg ⁻¹ ξηρής ουσίας) υπέργειων (A) και υπόγειων (B) φυτικών ιστών του <i>Zea Mays</i> L. στο SL και L έδαφος.....	82
Σχήμα 4-8. Συγκέντρωση Mg (g Mg kg ⁻¹ ξηρής ουσίας) υπέργειων (A) και υπόγειων (B) φυτικών ιστών του <i>Zea Mays</i> L. στο SL και L έδαφος.....	83
Σχήμα 4-9. Συγκέντρωση Fe (mg Fe kg ⁻¹ ξηρής ουσίας) υπέργειων (A) και υπόγειων (B) φυτικών ιστών του <i>Zea Mays</i> L. στο SL και L έδαφος	84
Σχήμα 4-10. Συγκέντρωση Mn (mg Mn kg ⁻¹ ξηρής ουσίας) υπέργειων (A) και υπόγειων (B) φυτικών ιστών του <i>Zea Mays</i> L. στο SL και L έδαφος	85
Σχήμα 4-11. Συγκέντρωση Zn (mg Zn kg ⁻¹ ξηρής ουσίας) υπέργειων (A) και υπόγειων (B) φυτικών ιστών του <i>Zea Mays</i> L. στο SL και L έδαφος	86

Σχήμα 5-1. Ύψος (cm) του <i>Zea Mays</i> L. 10 ημέρες (Α), 20 ημέρες (Β) και 30 ημέρες (Γ) μετά την έκπτυξη των σποροφύτων στο L έδαφος	105
Σχήμα 5-2. Διάμετρος βλαστού (cm) του <i>Zea Mays</i> L. στο L έδαφος	105
Σχήμα 5-3. Ξηρό βάρος (g ξηρής ουσίας/δοχείο) υπέργειων (Α) και υπόγειων (Β) φυτικών ιστών του <i>Zea Mays</i> L. στο L έδαφος	108
Σχήμα 5-4. Συγκέντρωση N (g N kg^{-1} ξηρής ουσίας) υπέργειων (Α) και υπόγειων (Β) φυτικών ιστών του <i>Zea Mays</i> L. στο L έδαφος	110
Σχήμα 5-5. Συγκέντρωση P (g P kg^{-1} ξηρής ουσίας) υπέργειων (Α) και υπόγειων (Β) φυτικών ιστών του <i>Zea Mays</i> L. στο L έδαφος	111
Σχήμα 5-6. Συγκέντρωση K (g K kg^{-1} ξηρής ουσίας) υπέργειων (Α) και υπόγειων (Β) φυτικών ιστών του <i>Zea Mays</i> L. στο L έδαφος	112
Σχήμα 5-7. Συγκέντρωση Ca (g Ca kg^{-1} ξηρής ουσίας) υπέργειων (Α) και υπόγειων (Β) φυτικών ιστών του <i>Zea Mays</i> L. στο L έδαφος.....	114
Σχήμα 5-8. Συγκέντρωση Mg (g Mg kg^{-1} ξηρής ουσίας) υπέργειων (Α) και υπόγειων (Β) φυτικών ιστών του <i>Zea Mays</i> L. στο L έδαφος.....	115
Σχήμα 5-9. Συγκέντρωση Fe (mg Fe kg^{-1} ξηρής ουσίας) υπέργειων (Α) και υπόγειων (Β) φυτικών ιστών του <i>Zea Mays</i> L. στο L έδαφος.....	116
Σχήμα 5-10. Συγκέντρωση Mn (mg Mn kg^{-1} ξηρής ουσίας) υπέργειων (Α) και υπόγειων (Β) φυτικών ιστών του <i>Zea Mays</i> L. στο L έδαφος.....	117
Σχήμα 5-11. Συγκέντρωση Zn (mg Zn kg^{-1} ξηρής ουσίας) υπέργειων (Α) και υπόγειων (Β) φυτικών ιστών του <i>Zea Mays</i> L. στο L έδαφος.....	118

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.

Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή

Η εντατική γεωργία και η αγροβιομηχανία παράγει μεγάλες ποσότητες γεωργικών υπολειμμάτων πλούσιων σε θρεπτικά συστατικά, των οποίων η διαχείριση και διάθεση μπορεί να προκαλέσει περιβαλλοντικά προβλήματα (Smider and Singh, 2014). Η Ελλάδα παράγει κάθε χρόνο περίπου 19×10^6 t αγροτικών υπολειμμάτων και παραπροϊόντων (Vlyssides et al., 2015). Η μετατροπή των γεωργικών υπολειμμάτων σε βιοεξανθράκωμα (biochar) μέσω της πυρόλυσης έχει περισσότερα πλεονεκτήματα από τις συνήθεις μεθόδους απόρριψης (Singh et al., 2015). Το βιοεξανθράκωμα (biochar) αποτελεί το στερεό υπόλειμμα της διεργασίας της πυρόλυσης βιομάζας (θέρμανσης της βιομάζας σε απουσία οξυγόνου), το οποίο παράγεται με στόχο την εφαρμογή του στο έδαφος. Το επιστημονικό ενδιαφέρον για το βιοεξανθράκωμα έχει αυξηθεί εκθετικά τα τελευταία χρόνια, αφού αποτελεί ένα υλικό που συνεισφέρει στην άμβλυνση της κλιματικής αλλαγής και στην ανακύκλωση θρεπτικών στοιχείων στο έδαφος. Σύμφωνα με μια αναζήτηση που έγινε το 2016, το χρονικό διάστημα 2010 έως 2016 βρέθηκαν 16.500 επιστημονικά αρχεία που αφορούσαν το βιοεξανθράκωμα, ενώ τη χρονική περίοδο 2000 έως 2010 βρέθηκαν 4.400 (Aller, 2016), γεγονός που αποδεικνύει το αυξημένο ενδιαφέρον για το συγκεκριμένο θέμα από την επιστημονική κοινότητα. Οι φυσικές και χημικές ιδιότητες του βιοεξανθρακώματος εξαρτώνται από το είδος της βιομάζας, καθώς και από τις συνθήκες πυρόλυσης, με αποτέλεσμα να χαρακτηρίζεται ως ένα ιδιαίτερα ετερογενές προϊόν (Singh et al., 2015). Ωστόσο, η συμβολή του στην αύξηση των αποδόσεων διαφόρων καλλιεργειών μέσω της βελτίωσης των φυσικοχημικών ιδιοτήτων του εδάφους (Jeffery et al., 2011; Subedi et al., 2017) έχει αναφερθεί από πολλούς συγγραφείς. Οι μηχανισμοί οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την αύξηση της διαθεσιμότητας των θρεπτικών στοιχείων στο φυτό είναι η αύξηση του pH (στα όξινα εδάφη), η συγκράτηση θρεπτικών στοιχείων (λόγω αύξησης CEC και ειδικής επιφάνειας) ή η άμεση απελευθέρωση θρεπτικών στοιχείων από το ίδιο το βιοεξανθράκωμα (Subedi et al., 2017). Επιπρόσθετα, η ενεργοποίηση των μικροοργανισμών με την εφαρμογή του βιοεξανθρακώματος στο έδαφος παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην αύξηση της διαθεσιμότητας των θρεπτικών στοιχείων στο φυτό (Schmalenberger and Fox, 2016). Ο συνδυασμός, επίσης, βιοεξανθρακώματος με ανόργανη ή οργανική λίπανση έχει δείξει θετική επίδραση στην ανάπτυξη των φυτών (Alburquerque et al., 2013; Kammann et al., 2012). Ως εκ τούτου, η παραγωγή νέων εδαφοβελτιωτικών προϊόντων, με βασικό υλικό το βιοεξανθράκωμα, θα μπορούσε να συμβάλει στην αξιοποίηση αγροτικών υπολειμμάτων και παραπροϊόντων στο πλαίσιο τόσο της κυκλικής οικονομίας, όσο και της ολοκληρωμένης γεωργίας.

1.2 Στόχοι της διατριβής

Η επαναχρησιμοποίηση της βιομάζας θεωρείται μέθοδος δημιουργίας εδαφοβελτιωτικών πλούσιων σε μακροθρεπτικά και μικροθρεπτικά στοιχεία. Ιδιαίτερη έμφαση κατά την ανάπτυξη των στόχων δόθηκε στη μελέτη των μακροθρεπτικών και μικροθρεπτικών στοιχείων και συγκεκριμένα του Αζώτου, του Φωσφόρου και του Καλίου, αφού αποτελούν τα σημαντικότερα μακροθρεπτικά στοιχεία για την ανάπτυξη των φυτών. Ειδικότερα ο Φώσφορος αποτελεί μη ανανεώσιμο πόρο και αναντικατάστατο στην ανάπτυξη των φυτών, οπότε μέθοδοι επαναχρησιμοποίησης και ανάκτησής του απασχολούν την ερευνητική κοινότητα τα τελευταία χρόνια. Το βιοεξανθράκωμα έχει χαρακτηριστεί ως εδαφοβελτιωτικό πλούσιο σε θρεπτικά στοιχεία όπου κατά τη δημιουργία του γίνεται επαναχρησιμοποίηση βιομάζας. Η απόκριση των φυτών στην εφαρμογή βιοεξανθρακώματος εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το είδος της καλλιέργειας, το είδος του βιοεξανθρακώματος, ο συνδυασμός του βιοεξανθρακώματος με λίπανση, η δόση εφαρμογής του βιοεξανθρακώματος, η χρονική διάρκεια της καλλιέργειας και οι περιβαλλοντικές συνθήκες.

Γενικός στόχος της εν λόγω διατριβής αποτελεί η μελέτη και σύγκριση της επίδρασης διαφορετικών βιοεξανθρακωμάτων στα φυτά *Lolium perenne* L. και *Zea Mays* L. που αναπτύχθηκαν σε διαφορετικής κοκκομετρικής σύστασης εδάφη είτε χωρίς λίπανση είτε σε συνδυασμό με ανόργανη ή οργανική (compost) λίπανση.

Συγκεκριμένα μελετήθηκαν:

- Τα αγρονομικά/χημικά χαρακτηριστικά τεσσάρων βιοεξανθρακωμάτων παραγόμενα από φλοιούς ρυζιού, στέμφυλα, πλεονάζουσα μαγιά και εξαντλημένους σπόρους κριθαριού.
- Η επίδραση βιοεξανθρακωμάτων, από στέμφυλα και φλοιούς ρυζιού, στο ξηρό βάρος, στη συγκέντρωση μακροθρεπτικών και μικροθρεπτικών, στο φυτό *Lolium perenne* L. καλλιεργούμενο σε δύο εδάφη, συνδυάζοντας είτε ανόργανη λίπανση ή οργανική είτε όχι.
- Η επίδραση βιοεξανθρακωμάτων στην ανάπτυξη του φυτού *Zea Mays* L. καθώς και στη συγκέντρωση μακροθρεπτικών και μικροθρεπτικών στο φυτό, καλλιεργούμενο σε δύο εδάφη, συνδυάζοντας είτε οργανική λίπανση είτε όχι, παρουσία ανόργανης αζωτούχας λίπανσης.
- Η επίδραση βιοεξανθρακωμάτων στην ανάπτυξη του φυτού *Zea Mays* L. καθώς και στη συγκέντρωση μακροθρεπτικών και μικροθρεπτικών στο φυτό, καλλιεργούμενο σε ένα έδαφος, συνδυάζοντας είτε ανόργανη αζωτούχα λίπανση είτε όχι.

1.3 Πρωτοτυπίες της διατριβής

Το βιοεξανθράκωμα και ιδιαίτερα οι αγρονομικές εφαρμογές του έχουν απασχολήσει αρκετά τη διεθνή ερευνητική κοινότητα την τελευταία δεκαετία. Αξίζει να σημειωθεί ότι την περίοδο έναρξης της παρούσας διδακτορικής διατριβής (2013), έρευνα γύρω από τις αγρονομικές εφαρμογές του βιοεξανθρακώματος στον Ελλαδικό χώρο δεν είχε παραγματοποιηθεί. Παράλληλα, η Κρήτη και γενικότερα η Ελλάδα παράγει μεγάλες ποσότητες οργανικών αγροτικών υπολλειμμάτων και παραπροϊόντων για τα οποία η διαχείρισή τους καθίσταται αρκετά δύσκολη.

Οι λόγοι που καθιστούν την παρούσα διδακτορική διατριβή πρωτότυπη, είναι οι εξής:

α) Η παραγωγή βιοεξανθρακώματος επιτεύχθηκε με τη χρήση αγροτικών παραπροϊόντων, όπως τα στέμφυλα, οι φλοιοί ρυζιού, οι εξαντλημένοι σπόροι κριθαριού και η πλεονάζουσα μαγιά. Η διεθνής βιβλιογραφία περιλαμβάνει μελέτες που αφορούν στην παραγωγή βιοεξανθρακωμάτων, από διάφορα αγροβιομηχανικά παραπροϊόντα, ωστόσο η πλεονάζουσα μαγιά αποτελεί καινοτόμο παραπροϊόν, αφού δεν έχει χρησιμοποιηθεί για παραγωγή βιοεξανθρακώματος, ενώ τα στέμφυλα και οι εξαντλημένοι σπόροι κριθαριού έχουν χρησιμοποιηθεί, αλλά είναι σε αρχικό στάδιο .

β) Η εφαρμογή βιοεξανθρακωμάτων από στέμφυλα, εξαντλημένους σπόρους κριθαριού και πλεονάζουσα μαγιά σε εδάφη δεν αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία, ενώ παράλληλα η εφαρμογή βιοεξανθρακωμάτων σε εδάφη και κατ'επέκταση σε καλλιέργειες της Μεσογείου είναι περιορισμένη και στην Ελλάδα ανύπαρκτη.

1.4 Δημοσιεύσεις

Δημοσιευμένα άρθρα από την έρευνα της διατριβής

Manolikaki, I.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. and Diamadopoulos, E. (2017). Ryegrass yield and nutrient status after biochar application in two Mediterranean soils. *Archives of Agronomy and Soil Science* 63(8), 1093-1107.

Δημοσιεύσεις σε συνέδρια από την έρευνα της διατριβής

Manolikaki, I., Magolis, A., Diamadopoulos, E. Poster: Phosphorus release from biochars prepared from rice husks, grape pomace and olive tree prunings. Final meeting EU-Cost action 'Biochar' & 76. Symposium des ans e.V. Understanding biochar mechanisms for practical implementation, Hochschule Geisenheim University, 28-30/9/2015.

Manolikaki, I.I., Mangolis, A., Diamadopoulos, E. Προφορική ανακοίνωση: Phosphorus release from biochars prepared from rice husks, grape pomace and olive tree prunings. International Conference, "Novel Methods for Integrated Exploitation of Agricultural by-Products", Thessaloniki, 16-18/11/2015.

Manolikaki, I., Mangolis, A., Diamadopoulos, E. Προφορική ανακοίνωση: Phosphorus release from biochars prepared from rice husks, grape pomace and olive tree prunings. 4th International Conference "Sustainable Solid Waste Management", Limassol, 23-25/06/2016.

Manolikaki, I. and Diamadopoulos, E. Προφορική ανακοίνωση: Effects of biochar, compost and biochar-compost on growth and nutrient status of maize in two Mediterranean soils. European Geosciences Union General Assembly "EGU" Vienna, 23-28/4/2017.

Manolikaki, I. and Diamadopoulos, E. Poster: The impact of biochars prepared from brewery wastes on phosphorus availability and growth of maize. 3rd European Sustainable Phosphorus Conference "ESPC3" Helsinki, 11-13/6/2018.

Δημοσιεύσεις σε συνέδρια από συναφή έρευνα

Regkouzas, P., Manolikaki, I., Diamadopoulos, E. Poster: Assessing biochar and compost from the organic fraction of municipal solid waste on nutrient availability and plant growth of lettuce. European Geosciences Union General Assembly "EGU" Vienna, 23-28/4/2017.

1.5 Διάρθρωση της διατριβής

Η παρούσα διδακτορική διατριβή αποτελείται από 6 κεφάλαια. Τα κεφάλαια περιγράφονται, εν συντομία, ως εξής:

Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται η ανασκόπηση της βιβλιογραφίας όσον αφορά στα αγροτικά υπολείμματα και παραπροϊόντα της Ελλάδας, καθώς και στο βιοεξανθράκωμα και στις αγρονομικές/χημικές ιδιότητές του. Επίσης, αναλύονται οι επιδράσεις βιοεξανθρακωμάτων στα εδάφη και σε διαφορετικά είδη φυτών.

Στο κεφάλαιο 3 μελετήθηκαν οι επιδράσεις βιοεξανθρακωμάτων από στέμφυλα και φλοιούς ρυζιού με ή χωρίς κόμποστ στη συγκέντρωση και βιοδιαθεσιμότητα ανόργανων θρεπτικών συστατικών, με έμφαση στον P, στο *Lolium perenne* L. με προσθήκη ή όχι ανόργανης λίπανσης.

Στο κεφάλαιο 4 διερευνήθηκαν οι επιδράσεις βιοεξανθρακωμάτων από στέμφυλα και φλοιούς ρυζιού με ή χωρίς κόμποστ στη συγκέντρωση και βιοδιαθεσιμότητα ανόργανων θρεπτικών συστατικών στο *Zea Mays* L. σε συνδυασμό με ανόργανη αζωτούχα λίπανση.

Στο κεφάλαιο 5 μελετήθηκαν οι επιδράσεις βιοεξανθρακωμάτων από πλεονάζουσα μαγιά και εξαντλημένους σπόρους κριθαριού στη συγκέντρωση και βιοδιαθεσιμότητα ανόργανων θρεπτικών συστατικών στο *Zea Mays* L. σε συνδυασμό με ή χωρίς ανόργανη αζωτούχα λίπανση.

Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα γενικά συμπεράσματα και οι προοπτικές μελλοντικής έρευνας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.

Ανασκόπηση της βιβλιογραφίας

2.1 Οργανικά παραπροϊόντα

Τα παραπροϊόντα και τα απόβλητα που παράγονται κατά τη βιομηχανική μεταποίηση γεωργικών προϊόντων είναι πλούσια σε μέταλλα, σάκχαρα και πρωτεΐνες (Rouilly and Rigal, 2002). Οι διάφορες αγροβιομηχανίες έχουν εισαγάγει νέες μεθόδους και πολιτικές για τον χειρισμό και την επεξεργασία αυτών, ανακτώντας, ανακυκλώνοντας ή μετατρέποντάς τα σε λειτουργικά προϊόντα (Smider and Singh, 2014). Στην Ελλάδα, η ετήσια παραγωγή αγροτικών υπολειμμάτων και παραπροϊόντων κυμαίνεται σε 19×10^6 t (Vlyssides et al., 2015) περιλαμβάνοντας παραπροϊόντα που προέρχονται από σιτηρά, φρούτα, λαχανικά, ξηρούς καρπούς, γαλακτοκομικά προϊόντα κ.α. (Πίνακας 2-1.)

2.1.1 Παραπροϊόντα αμπέλου-οίνου

Η καλλιέργεια αμπέλου (*Vitis vinifera*) είναι μία από τις πιο διαδεδομένες στον κόσμο, ενώ η παραγωγή κρασιού αποτελεί σημαντική αγροβιομηχανική δραστηριότητα σε παγκόσμιο επίπεδο και ιδιαίτερα στην περιοχή της Μεσογείου (Bustamante et al., 2008). Η παγκόσμια παραγωγή σταφυλιών το 2016 και οίνου το 2014, ήταν 77.5×10^6 t και 29×10^6 t, αντίστοιχα. Η έκταση που καταλαμβάνει η καλλιέργεια της αμπέλου υπολογίζεται στα 7×10^6 ha παγκοσμίως. Το 60.7% του παραγόμενου οίνου παγκοσμίως προέρχεται από την Ευρώπη, 22.5% από την Αμερική, 7.2% από τη Ασία, 5.2% από την Ωκεανία και 4.4% από την Αφρική. Στην πραγματικότητα, η μεγαλύτερη παραγωγή οίνου συγκεντρώνεται στην Ιταλία (4.8×10^6 t), Ισπανία (4.6×10^6 t) και Γαλλία (4.3×10^6 t). Παρόλο που αυτές οι χώρες καταλαμβάνουν τις τρεις πρώτες θέσεις στην παραγωγή οίνου, η Κίνα, η Αμερική και η Ιταλία είναι οι χώρες που έχουν τη μεγαλύτερη παραγωγή σταφυλιών. Η Ελλάδα, το 2016, είχε παραγωγή 990×10^3 t σταφυλιών και το 2014, 334×10^3 t οίνου (FAO, 2017).

Η καλλιέργεια της αμπέλου, καθώς και η διαδικασία της οينوποίησης παράγει αγροτικά παραπροϊόντα. Οι ποσότητες παραπροϊόντων που παράγονται κατά το κλάδεμα της αμπέλου κυμαίνονται από 0.56 έως 2.01 kg/πρέμνο ανάλογα με το σύστημα φύτευσης και το έτος (Ye ZhiJing et al., 2016). Στην Ελλάδα εκτιμήθηκε ότι τα υπολείμματα από τα κλαδέματα είναι 5 t ha^{-1} (Nerantzis and Tataridis, 2006). Κατά τη διαδικασία της οينوποίησης παράγονται επίσης υγρά και στερεά παραπροϊόντα. Στην Ευρώπη συλλέγονται ετησίως 14.5×10^6 t υγρών και στερεών παραπροϊόντων οينوποιείων (Teixeira et al., 2014). Τα κύρια παραπροϊόντα και απόβλητα οينوποιίας περιλαμβάνουν τα στέμφυλα (62% του οργανικού παραπροϊόντος), τους βοστρύχους (12% του οργανικού παραπροϊόντος), την οινολάσπη (14% του οργανικού

παραπροϊόντος) και τα απόνερα (Naziri et al., 2014). Τα στέμφυλα ορίζονται ως τα υπολείμματα που προκύπτουν από την πίεση των νωπών σταφυλιών, είτε έχουν υποστεί ζύμωση είτε όχι. Τα στέμφυλα αποτελούνται από τους φλοιούς της ράγας του σταφυλιού, τα γίγαρτα και τους βόστρυχους σε ποσοστό 72%, 17% and 11% του συνολικού ξηρού βάρους, αντίστοιχα (Toscano et al., 2013). Ως στέμφυλα κατά την παραγωγή λευκού οίνου αποτελούν οι βόστρυχοι, οι φλοιοί και τα γίγαρτα, ενώ στον κόκκινο οίνο οι βόστρυχοι αφαιρούνται από τα εκθλιμένα σταφύλια πριν από τη διαδικασία της ζύμωσης και ως εκ τούτου αποτελείται μόνο από φλοιούς και γίγαρτα (Toscano et al., 2013). Η βιομηχανία οίνου παράγει τεράστιες ποσότητες στέμφυλων ως παραπροϊόντα υπολογίζοντας ότι το 20-25% του σταφυλιού που χρησιμοποιείται στην οινοπαραγωγή αποτελεί παραπροϊόν (Yu and Ahmedna, 2013). Η οινολάσπη ορίζεται ως (α) το υπόλειμμα που συσσωρεύεται στον πυθμένα των δοχείων που περιέχουν οίνο μετά τη ζύμωση, κατά την αποθήκευση ή μετά από επιτρεπόμενες επεξεργασίες, (β) το υπόλειμμα που συσσωρεύεται στα δοχεία τα οποία περιέχουν γλέυκος, (γ) το υπόλειμμα που μένει μετά από φιλτράρισμα ή φυγοκέντριση του προϊόντος της περίπτωσης α και β (Καν.(ΕΚ)479/2008). Η παραγόμενη ποσότητα οινολάσπης μπορεί να φτάσει έως και το 8.5% της αρχικής μάζας του σταφυλιού (Nerantzis and Tataridis, 2006). Τα απόνερα παραλαμβάνονται από όλα τα στάδια που γίνεται καθαρισμός με νερό και υπολογίζονται σε 1.2 φορές περισσότερα από τον οίνο που παράγεται κάθε φορά (Naziri et al., 2014). Η μεταχείριση ενός τόσο τεράστιου όγκου παραπροϊόντος αποτελεί σημαντικό περιβαλλοντικό πρόβλημα. Οι προτεινόμενες μέθοδοι διαχείρισης των αποβλήτων του οινοποιείου περιλαμβάνουν την αξιοποίηση των στέμφυλων ως εδαφοβελτιωτικό (Bustamante et al., 2007), την παραγωγή φαινολικών ενώσεων με αντιοξειδωτική δράση (Cruz et al., 2004), τη συμπλήρωση θρεπτικών καλλιέργειας για παραγωγή γαλακτικού οξέος και βιο-επιφανειοδραστικών ουσιών σε βιοτεχνολογικό επίπεδο (Paradelo et al., 2009), και η χρήση τους ως χαμηλού κόστους προσροφητικό υλικό για βαρέα μέταλλα και άλλους ρύπους (Martínez et al., 2006).

2.1.2 Παραπροϊόντα ρυζιού

Η καλλιέργεια ρυζιού (*Oryza sativa*) είναι μία από τις σημαντικότερες στον κόσμο, αφού το ρύζι αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της διατροφής για τον μισό παγκόσμιο πληθυσμό. Η παγκόσμια παραγωγή μη αποφλοιωμένου ρυζιού αυξάνεται συνεχώς και το 2016 έφτασε στους 740×10^6 t. Η έκταση που καταλαμβάνει η καλλιέργεια του ρυζιού υπολογίζεται στα 159×10^6 ha παγκοσμίως. Το 90% του παραγόμενου μη αποφλοιωμένου ρυζιού παγκοσμίως προέρχεται από την Ασία, 5.1% από την Αμερική, 4.2% από την Αφρική, 0.6% από την Ευρώπη και 0.1% από την Ωκεανία. Η μεγαλύτερη παραγωγή ρυζιού συγκεντρώνεται στην Κίνα (211×10^6 t μη αποφλοιωμένου) και Ινδία (157×10^6 t μη αποφλοιωμένου). Η Ελλάδα, το 2016, είχε παραγωγή 227×10^3 t μη αποφλοιωμένου ρυζιού (FAO, 2017).

Η καλλιέργεια του ρυζιού καθώς και η διαδικασία παραγωγής μέχρι το τελικό προϊόν παράγει αγροτικά παραπροϊόντα. Τα στερεά παραπροϊόντα από τη βιομηχανία ρυζιού αποτελούνται από φλοιό ρυζιού (RH), τέφρα φλοιού ρυζιού (RHA), πίτουρο ρυζιού και άχυρο ρυζιού (Pode, 2016). Το 23% της συνολικής συγκομιδής του ρυζιού αποτελούν οι φλοιοί ρυζιού και υπολογίζεται ότι 800×10^6 t φλοιών ρυζιού παράγονται παγκοσμίως κάθε χρόνο (Santos et al., 2016). Στην Ελλάδα τα στερεά παραπροϊόντα εκτιμώνται στους 386×10^3 t (Vlyssides et al., 2015).

2.1.3 Παραπροϊόντα ζυθοποιίας

Στον κλάδο των τροφίμων, ο τομέας της ζυθοποιίας κατέχει στρατηγική οικονομική θέση με ετήσια παγκόσμια παραγωγή μύρας 180×10^6 t το 2014 (FAO, 2017). Η μύρα είναι το πέμπτο σε κατανάλωση ποτό στον κόσμο, μετά από το τσάι, τα αναψυκτικά, το γάλα και τον καφέ, με μέσο όρο κατανάλωσης 9.6 L/ άτομο ηλικίας άνω των 15 ετών (Olajire, 2012). Το 35.5% της παραγόμενης μύρας παγκοσμίως προέρχεται από την Ασία, 32.1% από την Αμερική, 23.6% από την Ευρώπη, 7.7% από την Αφρική και 1.2% από την Ωκεανία. Το 2014, η Κίνα είχε τη μεγαλύτερη παραγωγή μύρας παγκοσμίως με 49.2×10^6 t, έπειτα ακολουθούσε η ΗΠΑ με 22.6×10^6 t και τρίτη η Βραζιλία με 14×10^6 t. Η Ελλάδα είχε παραγωγή μύρας 380×10^3 t το 2014 (FAO, 2017).

Η διαδικασία παραγωγής μύρας παράγει υγρά και στερεά παραπροϊόντα. Τα κύρια στερεά παραπροϊόντα από τη ζυθοποιία είναι οι εξαντλημένοι σπόροι κριθαριού και η πλεονάζουσα μαγιά. Υπολογίζεται ότι παράγονται παραπάνω από 30×10^6 t εξαντλημένων σπόρων κριθαριού κάθε χρόνο παγκοσμίως (Stefanello et al., 2018). Οι 16.9×10^6 t και 2.1×10^6 t στερεών παραπροϊόντων από εξαντλημένους σπόρους κριθαριού και πλεονάζουσας μαγιάς, αντίστοιχα, παράγονται από τις τρεις μεγαλύτερες χώρες σε παραγωγή μύρας (Κίνα, ΗΠΑ, Βραζιλία), κάθε χρόνο (dos Santos Mathias et al., 2014). Το ποσοστό των εξαντλημένων σπόρων είναι 14-20 kg/100 L ζυθόγλεου με υγρασία 80-85%, και της πλεονάζουσας μαγιάς 1.5-3 kg/100 L παραγόμενης μύρας με υγρασία 85-90% (Olajire, 2012). Οι εξαντλημένοι σπόροι κριθαριού συνήθως αξιοποιούνται ως ζωοτροφή, αφού έχουν θρεπτική αξία και λόγω της υγρασίας τους είναι εύπεπτοι από τα ζώα. Συγκεκριμένα αποτελούνται από 15-26% πρωτεΐνες, 70% ίνες (15-25% κυτταρίνη, 28-35% ημικυτταρίνη), λιπίδια, αμινοξέα, βιταμίνες και ανόργανα θρεπτικά στοιχεία. Τα τελευταία χρόνια εκτός από ζωοτροφή και κόμποστ οι έρευνες στρέφονται προς την αξιοποίηση των εξαντλημένων σπόρων κριθαριού ως συμπληρώματα τροφών και μικροβιακών προϊόντων για εμπορική και βιομηχανική χρήση (Nigam, 2017). Επίσης, η μαγιά λόγω των πρωτεϊνών και της βιταμίνης B θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως ζωοτροφή (Olajire, 2012). Οι ποσότητες των υγρών παραπροϊόντων της ζυθοποίησης είναι πολύ μεγάλες, αφού χρησιμοποιούνται μεγάλες ποσότητες νερού. Μια παραγωγική ζυθοποιία χρησιμοποιεί περίπου 4-7 L νερό για να παράξει 1 L μύρας. Υπολογίζεται ότι 3-10 L υγρών παραπροϊόντων παράγονται για 1L μύρας

συμπεριλαμβάνοντας και το νερό που χρησιμοποιείται για την ψύξη, τη θέρμανση, τον καθαρισμό μηχανημάτων και επιφανειών, γυαλικών κ.α (Olaḡire, 2012).

Πίνακας 2-1. Αγροτικά υπολείμματα και παραπροϊόντα που παράγονται στην Ελλάδα ανα έτος (Vlyssides et al., 2015).

Καλλιέργεια	Παραγωγή (t)	Υπολείμματα (t)	Είδος υπολείμματος	Καλλιεργούμενη περιοχή (x 10 ⁶ m ²)	Δείκτης	
					Απόδοση υπολείμματος (kg/1000 m ²)	Υπόλειμμα/προϊόν
Σιτηρά	4,352,100	4,025,570				
Σιτάρι	1,585,600	1,675,080	Άχυρο, φλοιοί, πίτυρο	5,640	297	
Κριθάρι	353,400	262,800	Άχυρο, πίτυρο	1,240	212	
Βρώμη	148,000	236,800	Άχυρο, πίτυρο	782		1.6
Σίκαλη	33,100	102,610	Άχυρο, πίτυρο	167		3.1
Καλαμπόκι	2,185,000	1,362,300	Ρόκα, στελέχη	1,900	717	
Ρύζι	227,000	385,900	Άχυρο, φλοιοί	292		1.7
Βιομηχανικά φυτά	1,201,800	2,329,480				
Καπνός	24,000	24,000	Βλαστοί	157		1
Βαμβάκι	475,000	997,500	Βλαστοί, χνούδι, κάψες	0		2.1
	367,000	770,700		0		2.1
Ζαχαρότευτλο	335,800	537,280	Φύλλα, ξηρή πούλπα	58		1.6
Πατάτες	829,400	331,760	Βλαστοί, φύλλα	327		0.4

Πίνακας 2-1. (συνεχίζεται)

Καλλιέργεια	Παραγωγή (t)	Υπολείμματα (t)	Είδος υπολείμματος	Καλλιεργούμενη περιοχή (x 10 ⁶ m ²)	Δείκτης	
					Απόδοση υπολείμματος (kg/1000 m ²)	Υπόλειμμα/προϊόν
Κηπευτικά	1,384,300	553,720	Βλαστοί, φύλλα			0.4
Τομάτα	979,600	—	—	—	—	—
Μελιτζάνα	73,000	—	—	—	—	—
Κρεμμύδι	23,000	—	—	—	—	—
Λάχανο και άλλα είδη της οικογένειας Brassicaceae	186,400	—	—	—	—	—
Κουνουπίδι και μπρόκολο	88,900	—	—	—	—	—
Πράσσο και άλλα είδη της οικογένειας Alliaceae	33,400	—	—	—	—	—
Σταφύλι	978,200	439,024	Κληματίδες	992	497	

Πίνακας 2-1. (συνεχίζεται)

Καλλιέργεια	Παραγωγή (t)	Υπολείμματα (t)	Είδος υπολείμματος	Καλλιεργούμενη περιοχή (x 10 ⁶ m ²)	Δείκτης	
					Απόδοση υπολείμματος (kg/1000 m ²)	Υπόλειμμα/προϊόν
Εσπεριδοειδή	956,100	1,912,200	Κλαδοδέματα	—	—	—
Πορτοκάλι	791,600	1,617,963	—	353		2-2.9
Λεμόνι	58,600	130,092	—	72		2.22
Μανταρίνι	105,900	164,145	—	68		1.55
Δενδρώδη	1,239,300	465,696	Κλαδοδέματα, σπόροι, φλοιοί	792	588	
Μήλο	251,000	79,380	—	135	—	—
Αχλάδι	77,600	28,812	—	49	—	—
Ροδάκινο και νεκταρίνι	760,200	259,308	—	441	—	—
Βερύκοκο	90,200	37,044	—	63	—	—
Κεράσι	60,300	61,152	—	104	—	—
Ξηροί καρποί	53,200	101,080	Κλαδοδέματα, κελύφη, βλαστοί, φύλλα	—	—	—
Αμύγδαλο	29,000	55,100	—	135		1.9
Καρύδι	24,200	45,980	—	109		1.5-1.9
Ελιές	2,000,000	5,200,000	Κλαδοδέματα, σπόροι	9.3		0.5-2.6
Βρώσιμες	—	—	—	—	—	—
Ελαιοποιήσιμες	—	—	—	—	—	—
Τυρί	224,560	3,592,960	—	—	—	16 (m ³ /t)

2.2 Βιοεξανθράκωμα (Biochar)-πυρόλυση (pyrolysis)

Το "Biochar" είναι ένα εξανθράκωμα που προέρχεται από την πυρόλυση βιομάζας και χρησιμοποιείται ως εδαφοβελτιωτικό, με σκοπό τη βελτίωση των φυσικοχημικών ιδιοτήτων του εδάφους ή την αποκατάσταση περιβαλλοντικών προβλημάτων (Lehmann et al., 2006). Αυτό που κάνει το βιοεξανθράκωμα να διαφέρει από το κάρβουνο και άλλα παραπλήσια υλικά είναι η επικείμενη χρήση του, καθώς παράγεται με σκοπό την εφαρμογή του στο έδαφος (Lehmann et al., 2006). Παρόλο που ο όρος "βιοεξανθράκωμα" είναι μια σύγχρονη ιδέα και η εφαρμογή του εξανθρακώματος στα εδάφη μπορεί να φαίνεται νέα τάση στην έρευνα, η πραγματικότητα όμως είναι ότι το εξανθράκωμα έχει χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση του εδάφους εδώ και πολλούς αιώνες. Αρχαίοι πληθυσμοί στην περιοχή του Αμαζονίου χρησιμοποιούσαν την τεχνική αυτή για να δημιουργήσουν το Terra Preta (Μαύρη Γη), ένα είδος πολύ γόνιμου και σκούρου στο χρώμα εδάφους. Το βιοεξανθράκωμα, λοιπόν, αποκτά τεράστιο επιστημονικό ενδιαφέρον στις αρχές του 21^{ου} αιώνα όταν πολλές έρευνες σχετικά με τα χαρακτηριστικά του βιοεξανθρακώματος και την εφαρμογή του στα εδάφη της Terra Preta δημοσιεύτηκαν (Lehmann et al., 2006). Έκτοτε, το ενδιαφέρον για το βιοεξανθράκωμα αυξήθηκε λόγω των θετικών του επιπτώσεων σε διάφορους τομείς:

(i) Γεωργία: Βελτίωση του εδάφους και αύξηση των αποδόσεων των καλλιέργειων (Ameloot et al., 2013; Joseph et al., 2010; Lehmann et al., 2006).

ii) Περιβάλλον: Με τη διαχείριση και τη μείωση των ροών αποβλήτων, τη μείωση της ρύπανσης των υδάτων και των εδαφών, και τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής με τη μείωση και δέμευση του CO₂ (Lehmann et al., 2006; Macias and Camps Arbestain, 2010)

(iii) Βιώσιμη Ενέργεια: Η παραγωγή βιοεξανθρακώματος έχει αυξηθεί στις αναπτυσσόμενες χώρες. Χρησιμοποιώντας τεχνολογίες χαμηλού κόστους, τα αγροτικά παραπροϊόντα παρέχουν φθηνή ενέργεια στις φτωχές κοινότητες και καθιστούν τις κοινωνίες λιγότερο εξαρτώμενες από τα ορυκτά καύσιμα (Laird, 2008).

2.2.1 Πυρόλυση

Το βιοεξανθράκωμα παράγεται με θερμοχημική μετατροπή της βιομάζας σε συνθήκες περιορισμένου οξυγόνου ή έλλειψης (πυρόλυση) (Lehmann et al., 2006). Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την πυρόλυση βιομάζας περιλαμβάνουν την ταχεία, ενδιάμεση και βραδεία πυρόλυση. Η ταχεία πυρόλυση (fast pyrolysis) χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή βιοέλαιου. Στην ταχεία πυρόλυση η βιομάζα θερμαίνεται σε υψηλές θερμοκρασίες (~500°C), με ταχείς ρυθμούς αύξησης της θερμοκρασίας και σχετικά μικρούς χρόνους παραμονής στον πυρολυτικό αντιδραστήρα. Η βραδεία πυρόλυση (slow pyrolysis) αποτελεί την πιο διαδεδομένη τεχνολογία για την παραγωγή βιοεξανθρακώματος. Η βιομάζα θερμαίνεται σε θερμοκρασία <450°C, με βραδείς ρυθμούς αύξησης της θερμοκρασίας και υψηλούς χρόνους παραμονής στον πυρολυτικό αντιδραστήρα (Brassard et al., 2016). Κατά τη

διεργασία αυτή ευνοείται η παραγωγή στερεού κυρίως κλάσματος και λιγότερου υγρού και αέριου (Tripathi et al., 2016). Οι συνθήκες λειτουργίας της ενδιάμεσης πυρόλυσης (intermediate pyrolysis) είναι μεταξύ της ταχείας και της βραδείας πυρόλυσης. Η βιομάζα θερμαίνεται στους $\sim 500^{\circ}\text{C}$ με βραδύ ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας και με μέτριο χρόνο παραμονής στον αντιδραστήρα (Subedi et al., 2017).

2.2.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση και τα χαρακτηριστικά του βιοεξανθρακώματος

Οι φυσικές και χημικές ιδιότητες του βιοεξανθρακώματος εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το είδος της βιομάζας, τη θερμοκρασία πυρόλυσης και τις παραμέτρους της διεργασίας, όπως ο χρόνος παραμονής και η θερμοκρασία του κλιβάνου, καθώς και ο τρόπος τροφοδοσίας (Bruun et al., 2011; Joseph et al., 2010).

Είδος βιομάζας

Η χημική σύσταση της βιομάζας είναι μια σύνθεση άνθρακα, οξυγόνου, θείου, αζώτου, τέφρας και μικρών ποσοτήτων λίγων άλλων στοιχείων που περιλαμβάνουν αλκαλικά μέταλλα, μέταλλα αλκαλικών γαιών και βαρέα μέταλλα. Ανάλογα με το είδος ή τον τύπο της βιομάζας, μπορεί να υπάρχουν και άλλα στοιχεία όπως το μαγνήσιο, το χλώριο και το κάλιο. Η αναλογία αυτών των στοιχείων στη βιομάζα είναι συνάρτηση του είδους βιομάζας, καλλιεργητικής πρακτικής και εδαφοκλιματικών συνθηκών (Tripathi et al., 2017). Η επιστημονική βιβλιογραφία παρουσιάζει μια μεγάλη ποικιλία στα είδη βιομάζας που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή βιοεξανθρακώματος (Aller, 2016). Αυτό περιλαμβάνει τη βιομάζα που παράγεται από την ανάπτυξη φυτών, για παράδειγμα, κάθε είδους γεωργικών, υδάτινων, ενεργειακών ή δασικών καλλιεργειών (Aller, 2016). Βιομάζα που παράγεται ως αποτέλεσμα χρήσης, επεξεργασίας και/ή μετατροπής άλλης βιομάζας, για παράδειγμα, πριονίδια, φλοιούς, και κελύφη (Aller, 2016), καθώς και βιομάζα από οργανικά υπολείμματα περιλαμβάνοντας τη λυμματολάσπη, κοπριά, χαρτί και αστικά στερεά απόβλητα (Cao and Harris, 2010; Enders et al., 2012).

Η παραγωγή του άνθρακα από τη λιγνίνη είναι το αποτέλεσμα της αναδιάταξης των σχετικά ασθενών δεσμών και του επακόλουθου σχηματισμού της πιο συμπαγούς στερεάς δομής. Διαφορετικές ποσότητες λιγνίνης που συνδέονται με διάφορα είδη ξύλου έχουν ως αποτέλεσμα διαφορετικούς ρυθμούς αποπολυμερισμού (Aller, 2016). Σε σχετικά χαμηλή θερμοκρασία η κυτταρίνη αποικοδομείται σε σταθερή άνυδρη κυτταρίνη με αποτέλεσμα την παραγωγή αρκετού βιοεξανθρακώματος, αλλά σε υψηλή θερμοκρασία η κυτταρίνη αποσυντίθεται και παράγει πτητικά προϊόντα (Aller, 2016). Η κυτταρίνη και η ημικυτταρίνη αποσυντίθενται στους $200-400^{\circ}\text{C}$, ενώ η λιγνίνη στους $300-700^{\circ}\text{C}$ (Cao et al., 2014).

Συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό της κυτταρίνης, τόσο πιο γρήγορα ολοκληρώνεται η πυρόλυση, ενώ όσο πιο μεγάλο είναι το ποσοστό της λιγνίνης, τόσο πιο αργά (Dangzhen et al., 2010). Τα προκύπτοντα πτητικά από την αποσύνθεση της λιγνίνης συνίστανται κυρίως από αρωματικές ενώσεις σε σύγκριση με τις αλειφατικές ενώσεις που προκύπτουν από την κυτταρίνη και ημικυτταρίνη (Cao et al., 2014).

Η κυτταρίνη συμβάλλει κυρίως στην παραγωγή πίσσας, η οποία τελικά είναι ένα μείγμα κετονών, αλδεϋδών, οργανικών υγρών και βιοεξανθρακώματος, ενώ η λιγνίνη παράγει κυρίως βιοεξανθράκωμα και μικρή ποσότητα νερού κατά την πυρόλυση. Τα συστατικά της κυτταρίνης και ημικυτταρίνης στη βιομάζα είναι υπεύθυνα για τα πτητικά προϊόντα και η λιγνίνη για την απόδοση του βιοεξανθρακώματος (Yang et al., 2006). Η απόδοση του αέριου προϊόντος αυξάνει καθώς αυξάνει η κυτταρίνη, ενώ μειώνεται το βιοεξανθράκωμα και η πίσσα.

Στον Πίνακα 2-2 παρουσιάζονται τα ποσοστά κυτταρίνης, ημικυτταρίνης και λιγνίνης των βιομαζών που χρησιμοποιήθηκαν στην εν λόγω εργασία σύμφωνα με τη βιβλιογραφία. Όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 2-2 το ποσοστό κυτταρίνης, ημικυτταρίνης και λιγνίνης κυμαίνεται από 25-35%, 18-21% και 26-31%, αντίστοιχα, για τους φλοιούς ρυζιού (Santos et al., 2017). Οι εξαντλημένοι σπόροι κριθαριού αποτελούνται από 17.1-20.97% κυτταρίνη, 15.18-32.8% ημικυτταρίνη, 13.4-25.62% λιγνίνη και 3.5% εκχυλίσμα συστατικά (Maiti et al., 2017; Santos et al., 2017; Zhang and Wang, 2016). Η πλεονάζουσα μαγιά δεν αποτελείται από κυτταρίνη, ημικυτταρίνη, λιγνίνη αλλά κυρίως από εκχυλίσμα συστατικά (5.7%) (Maiti et al., 2017). Τα στέμφυλα εμφανίζουν 27-37% κυτταρίνη και 16.8-24.2% λιγνίνη (Teixeira et al., 2014).

Πίνακας 2-2. Ποσοστά κυτταρίνης, ημικυτταρίνης, λιγνίνης και εκχυλίσμων συστατικών βιομαζών

Βιομάζα	Κυτταρίνη	Ημικυτταρίνη	Λιγνίνη	Εκχυλίσμα	Βιβλιογραφία
Φλοιοί ρυζιού	25-35	18-21	26-31	–	Santos et al., 2017
Εξαντλημένοι σπόροι κριθαριού	17.1	32.5	13.4	3.5	Maiti et al., 2017
Εξαντλημένοι σπόροι κριθαριού	18.8-20.97	15.18-32.8	21.7-25.62	–	Santos et al., 2017
Εξαντλημένοι σπόροι κριθαριού	20.2	27.2	13.5		Zhang and Wang, 2016
Πλεονάζουσα μαγιά	0	0	0	5.7	Maiti et al., 2017
Στέμφυλα	27-37	–	16.8-24.2	–	Teixeira et al., 2014

Θερμοκρασία πυρόλυσης (pyrolysis temperature)

Η θερμοκρασία πυρόλυσης επηρεάζει σημαντικά τις ιδιότητες του βιοεξανθρακώματος (Putun et al., 2005). Γενικά, οι υψηλότερες θερμοκρασίες μειώνουν την απόδοση παραγωγής του στερεού προϊόντος (biochar yield) της πυρόλυσης σε σχέση με του υγρού και αέριου, αλλά μπορούν να βελτιώσουν την ποιότητα του βιοεξανθρακώματος, καθώς προσδίδονται περισσότερα ανόργανα συστατικά (όπως P και K), πολύ καλό πορώδες, μεγαλύτερη ειδική επιφάνεια

(Lehmann et al., 2006), αύξηση του περιεχομένου του σε άνθρακα (Kan et al., 2016), μείωση των ενεργών ομάδων οξυγόνου στην επιφάνειά του και αλλαγή του περιεχομένου του σε αρωματικές ενώσεις (Kan et al., 2016). Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία πυρόλυσης, το βιοεξανθράκωμα που παράγεται έχει περισσότερες αρωματικές ενώσεις (Aller, 2016).

Το βιοεξανθράκωμα που προέρχεται από χαμηλή θερμοκρασία πυρόλυσης αποτελείται από άμορφο άνθρακα C, ενώ από υψηλές θερμοκρασίες αποτελείται από τουρμποστρατικό C (Keiluweit et al., 2010). Σε μια μελέτη (Keiluweit et al., 2010) με δύο είδη βιομάζας, όπου η μία είχε υψηλά ποσοστά λιγνίνης ενώ η άλλη χαμηλότερα, σε ένα εύρος θερμοκρασιών πυρόλυσης 100-700°C διαπιστώθηκε ότι η δομή του βιοεξανθρακώματος εξελίχτηκε από την μικροκρυσταλλική κυτταρίνη μέχρι τους τουρμποστρατικούς κρυστάλλους (φύλλα κρυσταλλικού γραφένιου) μέσω τεσσάρων διακριτών κατηγοριών, οι οποίες είναι:

1. Βιομάζα: Κατά τη διάρκεια των αρχικών σταδίων πυρόλυσης (<200°C), η αφυδάτωση της βιομάζας είναι η κύρια διαδικασία που λαμβάνει χώρα. Η αποδόμηση των στοιχείων της βιομάζας αρχίζει στους 100°C. Δεν υπάρχει αλλαγή στη φυσική δομή της βιομάζας.
2. Μεταβατικό στάδιο (200-300°C): Όσο η θερμοκρασία πυρόλυσης αυξάνεται, η αφυδάτωση της βιομάζας συνεχίζεται μαζί με την απώλεια πτητικών ουσιών που προκαλείται από τον αποπολυμερισμό φυτικών βιοπολυμερών. Ορισμένες από αυτές τις ενώσεις, όπως οι κετόνες και οι αλδεΐδες, προέρχονται από τον αποπολυμερισμό της ημικυτταρίνης και κυτταρίνης, ενώ άλλες, όπως πυρένια και φουράνια, είναι τυπικά προϊόντα της θερμικής μετατροπής. Η πρώτη αποδόμηση σχεδόν ολοκληρώνεται στους 100-250°C, ενώ αρχίζει η αποδόμηση των ημικυτταρινών στους 250-350°C. Μικρή αναλογία της αρχικής δομής της βιομάζας παραμένει μαζί με την πυριγενή άμορφη δομή του άνθρακα.
3. Άμορφα εξανθρακώματα (>300-600°C): Κυριαρχούν μικρές αρωματικές δομές διατεταγμένες σε τυχαία σειρά. Κυριαρχεί ο πυριγενής άμορφος άνθρακας, ενώ η αρχική δομή της βιομάζας έχει σχεδόν ολοκληρωτικά αποπολυμεριστεί. Σε αυτό το στάδιο, με θερμοκρασίες >300°C, η κυτταρίνη και η πιο σταθερή λιγνίνη φθάνουν στη μέγιστη αποδόμησή τους.
4. Σύνθετο εξανθράκωμα: Πάνω από τους 600°C η εξανθράκωση της βιομάζας είναι η κυρίαρχη διαδικασία, κατά τη διάρκεια της οποίας σχεδόν όλα τα μη ανθρακικά άτομα άνθρακα της βιομάζας απομακρύνονται, συνεπώς η περιεκτικότητα άνθρακα C στο βιοεξανθράκωμα αυξάνεται. Σε θερμοκρασίες υψηλότερες από 700°C, η θερμική υποβάθμιση προκαλεί σταδιακά πιο οργανωμένες ανθρακικές δομές με μεγαλύτερα φύλλα που μοιάζουν με γραφένιο, δημιουργώντας σημαντικές αλλαγές στη δραστηριότητα του βιοεξανθρακώματος.

Χρόνος παραμονής (Residence time)

Ένας ακόμη παράγοντας που επηρεάζει τα χαρακτηριστικά του βιοεξανθρακώματος είναι ο χρόνος παραμονής της βιομάζας στον πυρολυτικό αντιδραστήρα. Η συγκεκριμένη παράμετρος επηρεάζει κυρίως την πορώδη δομή και την ειδική του επιφάνεια (Brassard et al., 2016). Η δομή των πόρων του βιοεξανθρακώματος συνδέεται στενά με το μέσο μέγεθος των πόρων του και η δομή των πόρων του είναι ένας πρωταρχικός παράγοντας που επηρεάζει την ικανότητα προσρόφησής του. Ως εκ τούτου, τα χαρακτηριστικά των πόρων είναι ένας σημαντικός παράγοντας που συμβάλλει στις ιδιότητες του βιοεξανθρακώματος. Η δομή των πόρων του βιοεξανθρακώματος μπορεί να ρυθμιστεί ελέγχοντας τον χρόνο παραμονής, επειδή υπάρχει ένας κρίσιμος χρόνος για τον αποπολυμερισμό της βιομάζας (Tan et al., 2017). Ο συνδυασμός υψηλού χρόνου παραμονής με χαμηλές θερμοκρασίες πυρόλυσης βελτιστοποιούν την παραγωγή βιοεξανθρακώματος, βοηθώντας τον αποπολυμερισμό της βιομάζας, παρέχοντάς της επαρκή χρόνο, ώστε να πραγματοποιηθούν οι απαραίτητες αντιδράσεις (Tripathi et al., 2016). Η περιεκτικότητα σε τέφρα αυξάνεται με τον αυξανόμενο χρόνο παραμονής (Tan et al., 2017).

2.2.3 Δομή βιοεξανθρακώματος

Το βιοεξανθράκωμα παράγεται με θερμοχημική μετατροπή της βιομάζας σε συνθήκες έλλειψης ή περιορισμένου οξυγόνου σε θερμοκρασίες $<700^{\circ}\text{C}$. Έχει πορώδη δομή, πλούσια σε άνθρακα και μια σειρά από λειτουργικές ομάδες (Tan et al., 2017). Το βιοεξανθράκωμα διαφέρει από άλλα οργανικά υλικά εξαιτίας της υψηλότερης αρωματικότητάς του από ενωμένες ανθρακικές δομές (Schmidt and Noack, 2000). Η εξαιρετικά πορώδης δομή του βιοεξανθρακώματος μπορεί να περιέχει ποσότητες ουσιών που μοιάζουν με χουμικές και φλουβικές (Lin et al., 2012). Η πορώδης δομή του βιοεξανθρακώματος μπορεί να επηρεάσει τη διηθητική ικανότητα του εδάφους, καθώς και τη σταθεροποίηση των θρεπτικών ουσιών του εδάφους (Wang et al., 2012). Η μικρο-πορώδης δομή του βιοεξανθρακώματος παίζει σημαντικό ρόλο στη βελτίωση της ειδικής επιφάνειας και της ικανότητας προσρόφησης (Lin et al., 2012).

2.2.4 Φυσικές ιδιότητες βιοεξανθρακώματος και παράγοντες που τις επηρεάζουν

Διάφορες φυσικές ιδιότητες, όπως η ειδική επιφάνεια, το πορώδες, η φαινομενική πυκνότητα και η υδατοϊκανότητα ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με τις συνθήκες πυρόλυσης (Kinney et al., 2012; Mukherjee and Lal, 2013). Το βιοεξανθράκωμα έχει μεγαλύτερη ειδική επιφάνεια, υψηλότερο πορώδες (μικροπόροι, μεσοπόροι και μακροπόροι), χαμηλότερη φαινομενική πυκνότητα και υψηλότερη υδατοϊκανότητα σε σχέση με τη βιομάζα (Lehmann and Rondon, 2006). Η ειδική επιφάνεια του βιοεξανθρακώματος αυξάνεται, όσο αυξάνεται η θερμοκρασία πυρόλυσης λόγω της

απώλειας πτητικών ουσιών, αυξάνοντας έτσι το πορώδες και μειώνοντας τη φαινομενική πυκνότητα. Μεγάλη ειδική επιφάνεια μπορεί να δημιουργηθεί σε θερμοκρασίες $>500^{\circ}\text{C}$ κατ' επέκταση αυξημένης υδατοϊκανότητας (Kloss et al., 2011). Η συμπύκνωση οργανικών πτητικών ουσιών που πιθανώς εμποδίζουν τους πόρους σε χαμηλότερες θερμοκρασίες πυρόλυσης είναι ένας πιθανός λόγος για χαμηλότερη ειδική επιφάνεια (Downie et al., 2009). Διάφορες μελέτες έχουν δείξει ότι η ειδική επιφάνεια, το μέγεθος των πόρων και η κατανομή τους επηρεάζονται όχι μόνο από τη θερμοκρασία πυρόλυσης, αλλά και από την αλληλεπίδραση συνθηκών πυρόλυσης και βιομάζας (Aller, 2016). Σε μια έρευνα που διεξήχθη από την Aller (2016) με παράγοντες το είδος βιομάζας και τη θερμοκρασία πυρόλυσης βρέθηκε ότι η ειδική επιφάνεια αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας αλλά ποικίλει μεταξύ των διαφορετικών βιομαζών. Πιθανή εξήγηση για αυτά τα αποτελέσματα είναι το ποσοστό της λιγνίνης στα διάφορα είδη βιομάζας, αφού η ειδική επιφάνεια μειωνόταν στο είδος βιομάζας που είχε μικρότερο ποσοστό λιγνίνης.

Εκτός από το είδος της βιομάζας, έχει αναφερθεί ότι το λεπτόκοκκο άλεσμα της βιομάζας πριν την πυρόλυση είναι αναγκαίο για τη δημιουργία ενός βιοεξανθρακώματος με μακροπορώδες (Aller, 2016). Επίσης, στη μελέτη της Aller (2016) διαπιστώθηκε ότι η ειδική επιφάνεια της βιομάζας τείνει να αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας πυρόλυσης, ωστόσο, εάν η πυρόλυση συνεχίζεται μετά την επίτευξη της μέγιστης ειδικής επιφάνειας το αντίθετο αποτέλεσμα μπορεί να δημιουργηθεί. Το εύρος των θερμοκρασιών, όπου η ειδική επιφάνεια αρχίζει να μειώνεται, είναι $600-950^{\circ}\text{C}$ (Keiluweit et al., 2010). Αντίθετα, άλλοι συγγραφείς πρότειναν ότι η μείωση της ειδικής επιφάνειας μπορεί να οφείλεται στην καταστροφή των μικροπορωδών δομών με την αύξηση της θερμοκρασίας πυρόλυσης (Keiluweit et al., 2010). Εκτός από τη θερμοκρασία πυρόλυσης, έχουν μελετηθεί και άλλες παράμετροι, όπως η πίεση, ο ρυθμός αύξησης θερμοκρασίας και ο χρόνος παραμονής. Έχει αναφερθεί ότι οι υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες και ο μεγάλος χρόνος παραμονής οδηγούν σε μείωση της ειδικής επιφάνειας (Brown et al., 2006).

2.2.5 Αγρονομικές/χημικές ιδιότητες βιοεξανθρακώματος και παράγοντες που τις επηρεάζουν

Οι αγρονομικές/χημικές ιδιότητες των βιοεξανθρακωμάτων διαφέρουν σημαντικά λόγω των διαφορετικών ειδών βιομάζας και συνθηκών πυρόλυσης. Οι αγρονομικές αναλύσεις περιλαμβάνουν το ποσοστό τέφρας (ash%), το ποσοστό άνθρακα (C%), το ποσοστό αζώτου (N%), το pH, την ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC), την ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων (CEC) και τα μακρο- και μικροθρεπτικά στοιχεία.

Το ποσοστό τέφρας στο βιοεξανθράκωμα περιλαμβάνει τα ανόργανα συστατικά. Τα ποσοστά τέφρας στη μελέτη της Aller (2016) κυμαίνονται μεταξύ 0.05%-91.5%. Το ποσοστό τέφρας εξαρτάται από το είδος της βιομάζας και συγκεκριμένα βιοεξανθρακώματα που προέρχονται από βιομάζα πλούσια σε λιγνίνη έχουν το χαμηλότερο ποσοστό τέφρας, ακολουθούν αυτά που προέρχονται από κυτταρίνη και ενδιάμεσο ποσοστό λιγνίνης και τέλος το μεγαλύτερο ποσοστό τέφρας

εμφανίζουν αυτά που έχουν πολύ μικρό ποσοστό λιγνίνης (Aller, 2016). Η αύξηση της θερμοκρασίας πυρόλυσης αυξάνει την περιεκτικότητα του βιοεξανθρακώματος σε τέφρα (Mukherjee et al., 2011; Wu et al., 2012)

Το ποσοστό του άνθρακα του βιοεξανθρακώματος έχει πολύ μεγάλη σημασία αφού ο κύριος ρόλος του βιοεξανθρακώματος είναι η ικανότητά του να δεσμεύει τον C στα εδάφη (Bruun et al., 2016). Ωστόσο, οι διάφοροι τύποι άνθρακα των βιοεξανθρακωμάτων μπορεί να είναι σταθεροί ή ασταθείς. Η αναλογία και των δύο τύπων άνθρακα στο βιοεξανθράκωμα εξαρτάται από τη βιομάζα και τη θερμοκρασία πυρόλυσης (Aller, 2016). Το συνολικό ποσοστό άνθρακα στα δείγματα βιοεξανθρακωμάτων που εξετάστηκαν από την Aller (2016) κυμαίνονταν από 0.1% έως 97.4%. Οι υψηλότερες τιμές C βρέθηκαν σε βιοεξανθρακώματα που προερχόταν σπόρους/κελύφη και βιομάζα πλούσια σε λιγνίνη, με μέση περιεκτικότητα σε άνθρακα 80.1% και 74.4% αντίστοιχα, ενώ τα άλγη (23.4%) παρήγαγαν τη χαμηλότερη συγκέντρωση άνθρακα. Τα βιοεξανθρακώματα που παράγονται από βιομάζα με μικρό ποσοστό τέφρας, όπως αυτά που είναι πλούσια σε λιγνίνη, έχουν ποσοστό άνθρακα σχεδόν εξ ολοκλήρου οργανικό (Enders et al., 2012), ενώ βιομάζα που έχει υψηλή περιεκτικότητα σε ανόργανα, συμπεριλαμβανομένων των αποβλήτων και της κοπριάς, μπορεί να παρουσιάσει ένα μεγάλο ποσοστό ανόργανου άνθρακα. Για παράδειγμα, οι Enders et al. (2012) διαπίστωσαν ότι περισσότερο από το 60% του άνθρακα στο βιοεξανθράκωμα από κοπριά πουλερικών που παρήχθη στους 450°C ήταν ανόργανη. Στον Πίνακα 2-3 παρουσιάζεται το ποσοστό C για τα βιοεξανθρακώματα παρόμοια με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη.

Το άζωτο (N) μπορεί να θεωρηθεί το δεύτερο σημαντικότερο στοιχείο μετά τον άνθρακα, αφού είναι βασικό θρεπτικό στοιχείο για τις καλλιέργειες (Atkinson et al., 2010; Major et al., 2010a; Prommer et al., 2014). Η Aller (2016) στη μελέτη της βρήκε ποσοστά αζώτου στα βιοεξανθρακώματα που κυμαίνονταν από 0%-7.52% . Έχει αναφερθεί ότι οι διαφορές στις τιμές N στα βιοεξανθρακώματα μπορούν να αποδοθούν στην ποικιλομορφία των βιομαζών που χρησιμοποιούνται ως πρώτη ύλη και στις μεταβολές των συνθήκων πυρόλυσης (Gaskin et al., 2008). Όσον αφορά στη βιομάζα, στη μελέτη της Aller (2016), οι χαμηλότερες τιμές βρέθηκαν στα βιοεξανθρακώματα που προέρχονταν από υλικά πλούσια σε λιγνίνη (0.53%). Η θερμοκρασία πυρόλυσης έχει επίδραση στην τελική συγκέντρωση N των βιοεξανθρακωμάτων, αφού το N του βιοεξανθρακώματος μειώθηκε, όταν αυξήθηκε η θερμοκρασία, με τις μεγαλύτερες απώλειες να εμφανίζονται σε αυτά από την κοπριά/αποβλήτα και τις μικρότερες σε αυτά από υλικά πλούσια σε λιγνίνη (Aller, 2016). Το άζωτο απομακρύνεται μέσω απώλειας αμμωνιακών ($\text{NH}_4\text{-N}$) και νιτρικών ($\text{NO}_3\text{-N}$) κλασμάτων, καθώς και μέσω οργανικών ουσιών που μπορούν εύκολα να αποδομηθούν και περιέχουν N ομάδες, όπως το ουρικό οξύ (Cao και Harris, 2010; Gaskin et al., 2008). Από την άλλη μεριά, υπάρχουν μελέτες που δείχνουν ότι η περιεκτικότητα σε N αυξάνεται, όταν αυξάνει η θερμοκρασία. Οι Keiluweit et al. (2010) βρήκαν αύξηση της περιεκτικότητας N των βιοεξανθρακωμάτων που προερχόταν από βιομάζα πλούσια σε λιγνίνη με την αύξηση της θερμοκρασίας. Ομοίως, οι Novak et al. (2009) ανέφεραν ότι το βιοεξανθράκωμα που παρήχθη από σπόρους/κελύφη και βιομάζα πλούσια σε κυτταρίνη σε θερμοκρασία 350 και 700°C

είχε υψηλότερο ποσοστό αζώτου σε σχέση με τη βιομάζα. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι η βιομάζα από φυτικά υλικά έχει σύνθετες αζωτούχες δομές που μπορεί να χρειάζονται υψηλότερες θερμοκρασίες για να αποδομηθούν, προκαλώντας μεταβολές στη χημική δομή και συνεπώς στις μορφές N του βιοεξανθρακώματος (Gaskin et al., 2008). Επίσης, μια άλλη τάση δείχνει ότι η συσχέτιση του ποσοστού N με τη θερμοκρασία να έχει δύο στάδια: πρώτα, το N να αυξάνεται με τη θερμοκρασία μέχρι την επίτευξη μια μέγιστη τιμή μετά από την οποία οι τιμές N μειώνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Ο Keiluweit et al. (2010) δείχνει ότι η περιεκτικότητα σε N βιοεξανθρακώματος από υπολείμματα καλλιέργειας κολοκυθιάς ήταν 6.4% στους 100°C, 12.4% στους 400°C, όπου μετά την επίτευξη του μέγιστου, η περιεκτικότητα σε N μειώθηκε στο 7.0%. Η βιβλιογραφία παρουσιάζει πολύ μεγάλες διαφορές στη συγκέντρωση N των βιοεξανθρακωμάτων που προέρχονται από την ίδια βιομάζα και πυρολύονται σε παρόμοιες θερμοκρασίες, γεγονός που υποδεικνύει ότι άλλοι παράγοντες, όπως ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας πυρόλυσης, το ποσοστό οξυγόνου μέσα στον πυρολυτικό φούρνο, ο χειρισμός της βιομάζας και η αποθήκευσή της μπορεί να επηρεάσουν την περιεκτικότητα του βιοεξανθρακώματος σε N (Aller, 2016).

Ο λόγος C/N είναι ένας σημαντικός λόγος, ο οποίος χρησιμοποιείται ευρέως στη γονιμότητα του εδάφους για την αξιολόγηση της διαθεσιμότητας N σε εδάφη. Μια αναλογία άνω του 10 υποδεικνύει μια ακινητοποίηση του N σε εδάφη. Η Aller (2016) βρήκε τιμές C/N βιοεξανθρακωμάτων που κυμαίνονταν μεταξύ 1.58-1483. Ο C/N του βιοεξανθρακώματος εξαρτάται από το είδος της βιομάζας. Το βιοεξανθράκωμα που προήλθε από βιομάζα πλούσια σε λιγνίνη έχει την υψηλότερη αναλογία C/N (286.9), λόγω του μεγάλου ποσοστού του C και χαμηλή περιεκτικότητα σε N, ενώ τα βιοεξανθρακώματα από άλγη (8.7) και απόβλητα/κοπριά (36.3) παρουσίασαν τις χαμηλότερες τιμές λόγω της μεγαλύτερης περιεκτικότητάς τους σε N (Aller, 2016). Με αυτές τις υψηλές αναλογίες C/N μπορεί να προκληθεί η ακινητοποίηση N στο έδαφος, προκαλώντας τροφопενία N στο φυτό (Atkinson et al., 2010).

Η κύρια διαδικασία κατά τη διάρκεια της ανθρακοποίησης (carbonization) είναι η θερμική αποδόμηση της δομής της βιομάζας, η οποία οδηγεί στην αποδέσμευση λειτουργικών ομάδων και στην απελευθέρωση O και H (Weber and Quicker, 2018). Η πυρόλυση της βιομάζας οδηγεί σε αλλαγές στη στοιχειακή σύνθεση του βιοεξανθρακώματος σε σύγκριση με τη βιομάζα, συνεπώς, περιλαμβάνει μεταβολές στις αναλογίες O/C και H/C, καθώς και στις λειτουργικές ομάδες (όπως αυξημένες αρωματικές C=C και μειωμένες O-H και αλειφατικές ομάδες) (Aller, 2016). Μια γραμμική μείωση των αναλογιών H/C και O/O και (O+N)/O παρατηρείται με την αύξηση της θερμοκρασίας πυρόλυσης λόγω του σχηματισμού αρωματικών συμπυκνωμένων δομών άνθρακα που σχηματίζονται από τις συνεχείς αντιδράσεις αφυδάτωσης και αποκαρβοξυλίωσης (Cao et al., 2014; Enders et al., 2012). Οι Weber and Quicker (2018) αναφέρουν ότι σε μία αύξηση της θερμοκρασίας κατά 100°C όπως από 250 στους 350°C προκύπτει η μεγαλύτερη μείωση των λόγων O/C και H/C και συγκεκριμένα ο λόγος O/C μειώνεται από 0.7 σε 0.3 καθώς και ο λόγος H/C από 1.5 σε 0.8. Οι χαμηλοί λόγοι καταλήγουν σε πιο σταθερά

βιοεξανθρακώματα και οι υψηλότεροι λόγοι σε περισσότερο ασταθή σε άνθρακα βιοεξανθρακώματα στα εδάφη (Aller, 2016). Το European Biochar Certificate (EBC) χρησιμοποιεί το δείκτη O/Corg για να πιστοποιήσει την ποιότητα του βιοεξανθρακώματος υποδεικνύοντας ότι ο λόγος O/Corg βιοεξανθρακώματος δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0.4. (Πίνακας 2-4).

Ο λόγος H:C είναι ένας δείκτης που εκφράζει τη σταθερότητα του βιοεξανθρακώματος και την ανθεκτικότητα στη μικροβιακή και χημική αποδόμηση (Aller, 2016). Βιοεξανθρακώματα με χαμηλό λόγο H/C (δηλαδή υψηλότερος βαθμός ανθρακοποίησης) εμπεριέχουν λιγότερες λειτουργικές ομάδες και περισσότερες αρωματικές δομές σε σχέση με τα βιοεξανθρακώματα χαμηλών θερμοκρασιών (Weber and Quicker, 2018). Το European Biochar Certificate (EBC) χρησιμοποιεί το δείκτη H/Corg για να πιστοποιήσει την ποιότητα του βιοεξανθρακώματος υποδεικνύοντας ότι ο λόγος H/Corg βιοεξανθρακώματος δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0.7 (Πίνακας 2-4).

Το είδος και η ποσότητα των λειτουργικών ομάδων επηρεάζουν την αλκαλικότητα του βιοεξανθρακώματος. Η μερική αποδέσμευση λειτουργικών ομάδων οδηγεί σε ελεύθερα αρνητικά φορτία και επομένως σε ικανότητα δεκτικότητας πρωτονίων. Αυτές οι λειτουργικές ομάδες περιλαμβάνουν καρβοξυλικές $-\text{COOH}$ ($-\text{COO}^-$) ή υδροξυλικές $-\text{OH}$ ($-\text{O}^-$) ομάδες. Μερικές ομάδες που προσδίδουν αλκαλικότητα είναι οι επιφανειακές οργανικές ομάδες, διαλυτές οργανικές ενώσεις, ανθρακικά και άλλα ανόργανα αλκάλια (Weber and Quicker, 2018). Γενικά, η τέφρα και η περιεκτικότητα σε αλκαλικά στοιχεία (Na, K, Mg και Ca) και τα ανθρακικά είναι αυτά που συσχετίζονται άμεσα με το pH του βιοεξανθρακώματος και οδηγούν στην αύξησή του (Singh et al., 2010), ενώ η οξείδωση του C σε όξινες καρβοξυλικές ομάδες οδηγεί στη μείωση του pH (Cheng et al., 2006). Η Aller (2016) βρήκε στη μελέτη της pH βιοεξανθρακωμάτων που κυμαίνονταν από 3.7-12.7 (Πίνακας 2-5). Στην ίδια μελέτη η συγγραφέας αναφέρει ότι το pH του βιοεξανθρακώματος εξαρτάται από το είδος της βιομάζας. Συγκεκριμένα τα βιοεξανθρακώματα που προέρχονταν από βιομάζα πλούσια σε λιγνίνη και σπόρους/κελύφη έδωσαν βιοεξανθρακώματα με το χαμηλότερο pH 8, ενώ οι μεγαλύτερες τιμές παρατηρήθηκαν σε βιοεξανθρακώματα που προήλθαν από κοπριές/απόβλητα και άγλη, περίπου 9.5, και ενδιάμεσες τιμές pH κοντά στο 9 από βιομάζα πλούσια σε κυτταρίνη. Άλλες μελέτες αναφέρουν ότι το είδος και οι συνθήκες πυρόλυσης (Mukherjee et al., 2011), ιδιαίτερα η θερμοκρασία (Cao and Harris, 2010), επηρεάζουν σημαντικά το pH των βιοεξανθρακωμάτων.

Το βιοεξανθράκωμα έχει μεγαλύτερη EC από τη βιομάζα, με τιμές να κυμαίνονται από 0.42-4.92 dS m⁻¹ (Kloss et al., 2011). Η Aller (2016) βρήκε στη μελέτη της EC από 0.01 to 61.2 dS m⁻¹ με μέσο όρο 1.59 dS m⁻¹. Η EC αυξάνει όσο αυξάνει η θερμοκρασία πυρόλυσης (Kloss et al., 2011; Singh et al., 2010), λόγω του διαχωρισμού και της συσσώρευσης αλκαλικών αλάτων σε υψηλότερες θερμοκρασίες (Singh et al. 2015). Ωστόσο, οι Cantrell et al. (2012) βρήκαν χαμηλή συσχέτιση μεταξύ της EC και της θερμοκρασίας πυρόλυσης, ενώ μεγαλύτερη συσχέτιση υπήρξε μεταξύ της EC και του K και Na. Η Aller (2016) βρήκε ότι η EC του βιοεξανθρακώματος εξαρτάται από το είδος της βιομάζας από την οποία προέρχεται.

Συγκεκριμένα, τα βιοεξανθρακώματα από άλγη έδειξαν τη μεγαλύτερη EC, ενώ σπόρους/κελύφη and πλούσια σε κυτταρίνη βιομάζα έδειξαν τη μικρότερη EC (Πίνακας 2-5).

Η CEC ορίζεται ως η ποσότητα των ανταλλάξιμων κατιόντων (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , NH_4^+) που ένα υλικό μπορεί να συγκρατήσει. Είναι το αποτέλεσμα επιφανειών αρνητικού φορτίου που προσελκύουν κατιόντα και χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη γονιμότητα ενός εδάφους, αφού όλα τα θρεπτικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται από τα φυτά και τους μικροοργανισμούς προσλαμβάνονται σε ιοντική μορφή. Η μεγαλύτερη CEC έχει βρεθεί σε βιοεξανθρακώματα που έχουν παραχθεί σε χαμηλές θερμοκρασίες πυρόλυσης, με τις οποίες η επιφάνεια έχει αυξηθεί σε σχέση με τη βιομάζα, αλλά έχουν παραμείνει αρκετές λειτουργικές ομάδες που προσφέρουν αρνητικό φορτίο (Weber and Quicker, 2018).

Σύμφωνα με τους Weber and Quicker (2018) η CEC βιοεξανθρακωμάτων που έχουν παραχθεί σε θερμοκρασία μικρότερη των 300°C έχει μέση τιμή $32.7 \text{ cmolc kg}^{-1}$, ενώ σε θερμοκρασίες $>800^\circ\text{C}$ έχουν CEC μικρότερη από 5 cmolc kg^{-1} . Σε άλλες μελέτες, έχει παρατηρηθεί ότι η CEC αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας (από 300 σε 550°C) μέχρι μια μέγιστη τιμή, η οποία αρχίζει να μειώνεται όταν συνεχίζεται η αύξηση της θερμοκρασίας (Gaskin et al., 2008; Lee et al., 2010). Η Aller (2016) βρήκε τις τιμές CEC να κυμαίνονται από 2.1 σε $562.0 \text{ cmolc kg}^{-1}$ με μέση τιμή $52.7 \text{ cmolc kg}^{-1}$ (Πίνακας 2-5). Στη ίδια μελέτη αναφέρεται ότι το είδος της βιομάζας επηρεάζει τη CEC, αφού τα βιοεξανθρακώματα που προέρχονταν από άλγη και κοπριές/απόβλητα είχαν την υψηλότερη τιμή, ενώ από σπόρους/κελύφη και πλούσια σε λιγνίνη είχαν τις μικρότερες τιμές.

Τα μακροθρεπτικά και μικροθρεπτικά στοιχεία απαντώνται στα βιοεξανθρακώματα υπό μορφή οξειδίων και η συγκέντρωση, δομή και διαθεσιμότητα εξαρτώνται από το είδος της βιομάζας και τις συνθήκες πυρόλυσης (Gaskin et al., 2008). Η Aller (2016) βρήκε τις υψηλότερες τιμές θρεπτικών στοιχείων στα βιοεξανθρακώματα που προέρχονταν από άλγη, κοπριές/απόβλητα και κυταρρινούχα βιομάζα, ενώ τις χαμηλότερες τιμές στα βιοεξανθρακώματα από σπόρους/κελύφη. Ωστόσο, η θερμοκρασία πυρόλυσης διαδραματίζει επίσης σημαντικό ρόλο, αφού τα θρεπτικά στοιχεία έχουν διαφορετικά σημεία ζέσεως.

Ο φώσφορος (P) είναι επίσης ένα σημαντικό θρεπτικό στοιχείο για τη γεωργία. Η Aller (2016) βρήκε τιμές P από 0.001 έως 73 g kg^{-1} με μέση τιμή 8.3 g kg^{-1} (Πίνακας 2-5). Ο P εξαρτάται από το είδος της βιομάζας και τη θερμοκρασία πυρόλυσης. Τα βιοεξανθρακώματα που προήλθαν από κοπριές/απόβλητα είχαν υψηλότερη συγκέντρωση P 17.5 g kg^{-1} , ενώ αυτά που προήλθαν από σπόρους/κελύφη εμφάνισαν τη μικρότερη συγκέντρωση P 0.65 g kg^{-1} (Aller, 2016). Η Aller (2016) παρατήρησε ότι στα βιοεξανθρακώματα από κοπριές/απόβλητα αυξήθηκε ο P με την αύξηση της θερμοκρασίας, ενώ στα υπόλοιπα βιοεξανθρακώματα ο P αυξήθηκε μέχρι μια συγκεκριμένη θερμοκρασία ($400\text{-}500^\circ\text{C}$) και έπειτα από αυτή υπήρξε μια μείωση στον P, όσο αυξανόταν η θερμοκρασία. Από την άλλη, οι Wang et al. (2012) αναφέρουν ότι ο P υπάρχει κυρίως στην τέφρα ως σύμπλοκα κατιόντων φωσφόρου.

Τα μακροθρεπτικά ασβέστιο (Ca), μαγνήσιο (Mg), κάλιο (K) και νάτριο (Na) διαφέρουν σημαντικά λόγω της σύστασης της βιομάζας από την οποία προέρχονται

τα βιοεξανθρακώματα. Βιοεξανθρακώματα που προέρχονται από βιομάζα με υψηλό ποσοστό τέφρας, όπως κοπριές/απόβλητα, έχουν υψηλότερες συγκεντρώσεις μακροθρεπτικών σε σύγκριση με εκείνα που προέρχονται από βιομάζα με μικρό ποσοστό τέφρας όπως τα σπόρους/κελύφη (Aller, 2016). Ωστόσο, η θερμοκρασία πυρόλυσης είναι σημαντικός παράγοντας, αφού το K και το Na εξατμίζονται σε θερμοκρασίες πυρόλυσης πάνω από 700°C, ενώ το Ca και το Mg σε θερμοκρασίες πυρόλυσης πάνω από 1000°C (Aller, 2016; Gaskin et al., 2008).

Πίνακας 2-3. Χαρακτηριστικά βιοεξανθρακωμάτων

Βιοεξανθράκωμα	Θερμοκρασία πυρόλυσης (°C)	C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	O (%)	Τέφρα (%)	pH	Βιβλιογραφία
Στέμφυλα	300	62.90	5.41	2.65	-	29.04	10.5	-	Pala et al., 2014
Υπολείμματα οινοποιίας	450	68.7	2.6	2.2	0	-	-	-	Zabaniotou et al., 2018
Φλοιοί ρυζιού	600	54.5	2.1	1.1	0.0	5.4	47	9.9	Windeatt et al., 2014
Φλοιοί ρυζιού	400	52.2	-	0.85	-	-	30.47	9.83	Bian et al., 2016
Εξαντλημένοι σπόροι κριθαριού	500	65.5	-	5.62	-	-	13.17	-	Balogun et al., 2017
Εξαντλημένοι σπόροι κριθαριού	400	-	-	-	-	-	22.5	6	Zhang and Wang, 2016

Πίνακας 2-4. Ισχύουσα και προτεινόμενη νομοθεσία των χαρακτηριστικών των βιοεξανθρακωμάτων (Meyer et al., 2017)

Προαιρετικά πρότυπα προϊόντων					Εθνική νομοθεσία					EC κανονισμός 2003/2003	EC κανονισμός 2003/2003
Ιδιότητες βιοεξανθρακώματος	IBI-BS	EBC		BQM		Γερμανία	Αυστρία	Ελβετία	Ιταλία	Refertil προτάσεις	ESPP προτάσεις
		Βασική	Ανώτερη	Βασική	Ανώτερη	Κανονισμός λιπάσματος	Κανονισμός λιπάσματος, Εδαφοβελτιω- τικών	Κανονισμός λιπάσματος	Διάταγμα λιπάσματος #75		
C _{org} (%)	≥10		≥ 50	≥10		>80	–	≥ 50	≥ 20	≥ 50 για PBC, δήλωση για ABC	>30
H/C _{org}	≤0.7		<0.7	≤0.7		–	–	<0.7	≤0.7	προαιρετική δήλωση	<0.7
O/C _{org}	–		<0.4	–	–	–	–	–	–	–	–
Τέφρα (%)	–	–	–	–	–	–	–	–	≤60	προαιρετική δήλωση	–
pH	–	–	–	–	–	–	–	–	4–12	6–10	–
EC (mS m ⁻¹)	–	–	–	–	–	–	–	–	≤1000	προαιρετική δήλωση	–
Υγρασία (%)	–		≥30	≥20		–	–	≥30	≥20	≥40 για PBC, ≥20 για ABC	30–40
PAH (mg kg ⁻¹ dm)	≤300	<12	<4	<20	<20	–	<6	≤4	<6	≤6	<6
B(a)P (mg kg ⁻¹ dm)	≤3	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
PCBs (mg kg ⁻¹ dm)	≤1	<0.2		<0.5		–	<0.2	–	<0.5	≤0.2	<0.2
PFTs (mg kg ⁻¹ dm)	–	–	–	–	–	≤0.1	<0.1	–	–	–	–
PCDDs/Fs (mg kg ⁻¹ dm)	≤17		<20	<20		≤30	≤20	≤20	<9	≤20	<20

Πίνακας 2-4. (συνεχίζεται)

Προαιρετικά πρότυπα προϊόντων						Εθνική νομοθεσία						
	IBI-BS		EBC		BQM		Γερμανία	Αυστρία	Ελβετία	Ιταλία	EC κανονισμός 2003/2003	EC κανονισμός 2003/2003
Ιδιότητες βιοεξανθρακώματος		Βασική	Ανώτερη	Βασική	Ανώτερη	Κανονισμός λιπάσματος	Κανονισμός λιπάσματος, Εδαφοβελτιωτικών	Κανονισμός λιπάσματος	Διάταγμα λιπάσματος #75	Refertil προτάσεις	ESPP προτάσεις	
<i>Campylobacter</i> species	–	–	–	–	–	–	μη ανιχνεύσιμο στα 50 g	–	–	–	–	
<i>Escherichia Coli</i>	–	–	–	–	–	–	μη ανιχνεύσιμο στα 50 g	–	–	1000 CFU/g	–	
<i>Listeria monocytogenes</i>	–	–	–	–	–	–	μη ανιχνεύσιμο στα 50 g	–	–	–	–	
<i>Salomonella</i> species	–	–	–	–	–	–	μη ανιχνεύσιμο στα 50 g	–	–	μη ανιχνεύσιμο στα 25 g	–	
As (mg kg ⁻¹ dm)	≤100	<13	<13	≤100	≤10	≤40	≤40	–	–	≤10	–	
Cd (mg kg ⁻¹ dm)	≤39	<1.5	<1	≤39	≤3	≤1.5	≤3	≤1	≤1.5	≤1.5	≤3	
Cr (mg kg ⁻¹ dm)	≤1200	<90	<80	≤100	≤15	–	–	–	–	≤100	–	
Cr VI (mg kg ⁻¹ dm)	–	–	–	–	–	≤2	≤2	–	≤0.5	≤0.5	≤2	
Co (mg kg ⁻¹ dm)	≤100	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
Cu (mg kg ⁻¹ dm)	≤6000	<100	<100	≤1500	≤40	–	–	≤100	≤230	≤200	–	
Pb (mg kg ⁻¹ dm)	≤300	<150	<120	≤500	≤60	≤150	≤100	≤120	≤140	≤120	≤150	
Hg (mg kg ⁻¹ dm)	≤17	<1	<1	≤17	≤1	≤1	≤1	≤1	≤1.5	≤1	≤1-1.3	
Mn (mg kg ⁻¹ dm)	–	–	–	–	≤3500	–	–	–	–	–	–	
Mo (mg kg ⁻¹ dm)	≤75	–	–	≤75	≤10	–	–	–	–	–	–	
Ni (mg kg ⁻¹ dm)	≤420	<50	<30	≤600	≤10	≤80	≤100	≤30	≤100	≤50	≤90	
Se (mg kg ⁻¹ dm)	≤200	–	–	≤100	≤5	–	–	–	–	–	–	
Ti (mg kg ⁻¹ dm)	–	–	–	–	–	≤1	–	–	–	–	–	
Zn (mg kg ⁻¹ dm)	≤7400	<400	<400	≤2800	≤150	–	–	≤400	≤500	≤600	–	

Πίνακας 2-5. Χαρακτηριστικά βιοεξανθρακωμάτων

Βιοεξανθράκωμα	pH	EC (dS m ⁻¹)	CEC (cmol _C kg ⁻¹)	P (g kg ⁻¹)	Βιβλιογραφία
Άλγη	~ 9.5	34.62	93.8	–	Aller, 2016
Κοπριά/ απόβλητα	~ 9.5	3.23	74.8	17.5	Aller, 2016
Πλούσια σε κυτταρίνη	~ 9	1.5	–	–	Aller, 2016
Πλούσια σε λιγνίνη	8	2.42	21.2	–	Aller, 2016
Σπόροι/κελύφη	8	1.5	16.3	0.65	Aller, 2016
Εύρος τιμών	3.7-12.7	0.01-61.2	2.1-562	0.001-73	Aller, 2016

2.3 Επίδραση του βιοεξανθρακώματος στο έδαφος

2.3.1 Επίδραση του βιοεξανθρακώματος στις φυσικές ιδιότητες του εδάφους

Έχει αναφερθεί ότι το βιοεξανθράκωμα βελτιώνει τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους και συγκεκριμένα αυξάνει την υδατοϊκανότητα και μειώνει τη φαινομενική πυκνότητα του εδάφους (Agegnehu et al., 2017). Η ικανότητα του βιοεξανθρακώματος να αυξάνει την υδατοϊκανότητα του εδάφους οφείλεται στο συνδυασμό του πορώδους του και της λειτουργικότητας της επιφάνειάς του (Suliman et al., 2017). Το βιοεξανθράκωμα αυξάνει το πορώδες του εδάφους λόγω της εσωτερικής πορώδους δομής του και έτσι το νερό εισχωρεί καλύτερα στο έδαφος (Agegnehu et al., 2017). Ωστόσο, οι παράγοντες που επηρεάζουν την αποδοτικότητα του βιοεξανθρακώματος στη βελτίωση της υδατοϊκανότητας του εδάφους είναι το είδος του βιοεξανθρακώματος, η δόση του βιοεξανθρακώματος και η κοκκομετρική σύσταση του εδάφους, στο οποίο προστίθεται το βιοεξανθράκωμα (Aller, 2016). Οι Novak et al. (2009) μελέτησαν την επίδραση βιοεξανθρακωμάτων από απόβλητα πουλερικών και switchgrass και βρήκαν ότι το βιοεξανθράκωμα από απόβλητα πουλερικών δεν είχε επίδραση στην υδατοϊκανότητα του εδάφους, ενώ το βιοεξανθράκωμα από switchgrass σχεδόν διπλασίασε την υδατοϊκανότητα, αποδίδοντάς το στο διαφορετικό πορώδες και μέγεθος σωματιδίων μεταξύ των βιοεξανθρακωμάτων. Μελέτες έχουν δείξει ότι η προσθήκη βιοεξανθρακώματος σε φτωχά σε οργανική ουσία εδάφη μειώνει τη φαινομενική πυκνότητα του εδάφους και αυξάνει το πορώδες και την υδατοϊκανότητα του εδάφους. Σύμφωνα με τους Oguntunde et al. (2008) η φαινομενική πυκνότητα μειώθηκε κατά 9% στο έδαφος που είχε προστεθεί βιοεξανθράκωμα, ενώ το πορώδες αυξήθηκε κατά 11%. Επίσης, στη μελέτη τους οι Tan et al. (2017) παρατήρησαν ότι η φαινομενική πυκνότητα του εδάφους, στο οποίο προστέθηκε βιοεξανθράκωμα μειώθηκε κατά 20.45% σε σχέση με το έδαφος, στο οποίο δεν είχε γίνει προσθήκη.

2.3.2 Επίδραση του βιοεξανθρακώματος στις χημικές ιδιότητες του εδάφους

Μελέτες έχουν δείξει ότι η προσθήκη βιοεξανθρακώματος στο έδαφος βελτιώνει τις χημικές ιδιότητες του εδάφους και συγκεκριμένα αυξάνει το pH, τον οργανικό άνθρακα, τα ανταλλάξιμα κατιόντα και την αποδοτικότητα χρήσης του N κατά την ανόργανη λίπανση N (Chan et al., 2008; Glaser et al., 2002; Laird et al., 2010b). Οι μηχανισμοί για αυξημένη διαθεσιμότητα θρεπτικών στοιχείων στα εδάφη που έχει προστεθεί βιοεξανθράκωμα είναι οι μεταβολές στο pH, η συγκράτηση θρεπτικών στοιχείων (λόγω της αυξημένης CEC) και η απευθείας απελευθέρωση θρεπτικών από το βιοεξανθράκωμα (Subedi et al., 2017). Οι Van Zwieten et al. (2010) βρήκαν ότι το pH, η CEC, το ανταλλάξιμο Ca και ο ολικός C αυξήθηκαν, ενώ μειώθηκε η διαθεσιμότητα Al, σε ένα Ferrosol και συγχρόνως αυξήθηκε ο C και το ανταλλάξιμο K σε ένα Calcarosol έδαφος με την προσθήκη βιοεξανθρακώματος σε δόση 10 t ha⁻¹.

Η προσθήκη βιοεξανθρακώματος μπορεί να μεταβάλλει το pH του εδάφους, αλλά εξαρτάται από το είδος του βιοεξανθρακώματος και την κοκκομετρική σύσταση του εδάφους. Οι Jeffery et al. (2011) αναφέρουν ότι η προσθήκη βιοεξανθρακώματος στο έδαφος μπορεί να αυξήσει το pH του εδάφους από 0.6 έως 1 μονάδα ή να το μειώσει έως και 0.5 μονάδα. Οι μεταβολές αυτές μπορεί να έχουν θετική επίδραση στις καλλιέργειες, αλλά εξαρτώνται από το έδαφος και το είδος του βιοεξανθρακώματος. Αρκετές μελέτες έχουν δείξει ότι η CEC του εδάφους αυξάνεται και βελτιώνεται η ικανότητα συγκράτησης θρεπτικών στοιχείων με την προσθήκη βιοεξανθρακώματος σε σχέση με το έδαφος που δεν έχει προστεθεί βιοεξανθράκωμα (Zhao et al., 2015). Οι Peng et al. (2011) βρήκαν ότι η CEC του εδάφους αυξήθηκε από 4 σε 7% με την προσθήκη του βιοεξανθρακώματος.

Η διαφοροποίηση των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών των βιοεξανθρακωμάτων επηρεάζει σημαντικά τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών συστατικών στο έδαφος. Βιοεξανθρακώματα που προέρχονται από κοπριά ή από ζωικά προϊόντα είναι πολύ πλούσια σε θρεπτικά συστατικά σε σύγκριση με τα βιοεξανθρακώματα που προέρχονται από φυτικά υλικά ή ξυλώδη (Alburquerque et al., 2014; Singh et al., 2010). Ωστόσο, τα βιοεξανθρακώματα πιθανόν να είναι πιο σημαντικά ως εδαφοβελτιωτικά, διότι υποβοηθούν στην πρόσληψη των θρεπτικών, από ότι ως πηγές θρεπτικών συστατικών (DeLuca et al., 2009). Πολλές μελέτες έχουν δείξει τη δυνατότητα του βιοεξανθρακώματος να μειώνει την έκπλυση NH₄-N όσο και ανόργανου-N στα εδάφη (Clough et al., 2013; Prommer et al., 2014; Taghizadeh-Toosi et al., 2012). Ωστόσο, η βιβλιογραφία παρουσιάζει αντιφατικές πληροφορίες σχετικά με την απελευθέρωση και τη διαθεσιμότητα N στα εδάφη που έχει προστεθεί βιοεξανθράκωμα. Οι Clough et al. (2013) έδειξαν ότι υπάρχει περιορισμένη διαθεσιμότητα και απελευθέρωση του N στα εδάφη που έχει προστεθεί βιοεξανθράκωμα (Clough et al., 2013). Αντίθετα, άλλες εργασίες, όπως αυτή των Taghizadeh-Toosi et al. (2012), χρησιμοποιώντας ισότοπο αζώτου (¹⁵N), βρήκαν ότι τα NH₄⁺ προσροφούνται από το βιοεξανθράκωμα, αλλά ταυτόχρονα είναι διαθέσιμα στα φυτά. Οι Silber et al. (2010) βρήκε ότι η διαθεσιμότητα φωσφόρου με την προσθήκη βιοεξανθρακώματος εξαρτάται από το pH και ότι η διαλυτότητα P στο έδαφος αυξάνεται με τη μείωση του pH. Αντίθετα, στη μελέτη του Novak et al.

(2009) αναφέρεται ότι στα εδάφη που προστέθηκε βιοεξανθράκωμα από απόβλητα πουλερικών (2% w/w), ο διαθέσιμος P αυξήθηκε από 20 έως 28 φορές, αποδίδοντας το στο P που υπήρχε στο βιοεξανθράκωμα. Άλλες μελέτες έδειξαν επίσης ότι η προσθήκη βιοεξανθρακωμάτων σε ένα καλλιεργούμενο έδαφος μειώνει ουσιαστικά την έκπλυση των N, P και Mg (Laird et al., 2010a), καθώς και Ca και Mg (Major et al., 2012). Οι Agegnehu et al. (2015) ανέφεραν επίσης ότι τα βιοεξανθρακώματα που προέρχονταν από ξύλο ιτιάς και ακακίας μείωσαν σημαντικά την έκπλυση των NO₃-N, P, K, Ca, Mg και Na.

2.3.3 Επίδραση του βιοεξανθρακώματος στις βιολογικές ιδιότητες του εδάφους

Οι μικροοργανισμοί του εδάφους παίζουν σημαντικό ρόλο στη σταθεροποίηση του C στο έδαφος. Οι περισσότερες μελέτες που έχουν γίνει για να διερευνηθεί η επίδραση του βιοεξανθρακώματος στους μικροοργανισμούς του εδάφους έχουν δείξει θετικά αποτελέσματα (Ameloot et al., 2013; Lehmann et al., 2011). Συγκεκριμένα, έχει παρατηρηθεί ότι η προσθήκη βιοεξανθρακώματος στο έδαφος αυξάνει τα Gram αρνητικά βακτήρια και τους μύκητες ως αποτέλεσμα της βελτίωσης των φυσικοχημικών ιδιοτήτων του εδάφους (Atkinson et al., 2010). Ωστόσο, η απόκριση των μικροοργανισμών του εδάφους με την προσθήκη βιοεξανθρακώματος εξαρτάται από το είδος του βιοεξανθρακώματος και τις ιδιότητές του, καθώς και από τις φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους (Aller, 2016). Η Aller (2016) βρήκε ότι το βιοεξανθράκωμα που προήλθε από σπόρους/κελύφη και βιομάζα πλούσια σε λιγνίνη είχαν τον πιο σταθερό C, ο οποίος είναι πιο ανθεκτικός στη μικροβιακή αποδόμηση. Στην ίδια μελέτη αναφέρεται ότι η ανοργανοποίηση του C γίνεται σε τρία στάδια, με το πρώτο στάδιο να περιλαμβάνει μια γρήγορη ανοργανοποίηση, να ακολουθεί το δεύτερο στάδιο που είναι πιο αργό και το τελικό στάδιο κατά το οποίο γίνεται μια πιο σταθερή ανοργανοποίηση C. Η δημιουργία ενός βιοεξανθρακώματος με ασταθή C οφείλεται κυρίως στη θερμοκρασία πυρόλυσης, αφού αυξάνοντας τη θερμοκρασία αυξάνεται η σταθερότητα του C και ο βαθμός αρωματικότητας (Aller, 2016). Μελέτες έχουν δείξει ότι το ίδιο βιοεξανθράκωμα, όταν προστέθηκε σε διαφορετικά εδάφη, εμφάνισε διαφορετικά αποτελέσματα. Οι Watzinger et al. (2014) βρήκαν καλύτερη απόκριση του βιοεξανθρακώματος στις φυσικοχημικές ιδιότητες ενός όξινου αμμώδους σε σχέση με ένα ασβεστούχο πηλώδες. Το ποσοστό της αργίλου στο έδαφος παίζει σπουδαίο ρόλο, αφού προστατεύει το βιοεξανθράκωμα από αποδόμηση. Ωστόσο, το βιοεξανθράκωμα μπορεί να τροποποιήσει και άλλες ιδιότητες του εδάφους όπως το pH, EC, CEC, οι οποίες με τη σειρά τους τροποποιούν τις μικροβιακές κοινότητες του εδάφους και κατ'επέκταση την ανοργανοποίηση του C (Cantrell et al., 2012; Jeffery et al., 2011). Επίσης, παράγοντες όπως, η προσθήκη ανόργανων ή οργανικών λιπάνσεων, η θερμοκρασία και η υγρασία του εδάφους (Ameloot et al., 2013), καθώς και η καλλιέργεια μπορούν να τροποποιήσουν την ανοργανοποίηση C (Van Zwieten et al., 2010).

2.4. Επίδραση του βιοεξανθρακώματος στις καλλιέργειες φυτών

Η προσθήκη βιοεξανθρακώματος στο έδαφος ενισχύει την παροχή θρεπτικών συστατικών (Camps-Arbestain et al., 2014; Lehmann et al., 2011; Schmalenberger and Fox, 2016), καθώς και βελτιώνει την επέκταση των ριζών κάνοντας τα θρεπτικά στοιχεία του εδάφους διαθέσιμα στα φυτά, αυξάνοντας έτσι την αποδοτικότητα της καλλιέργειας. Οι πιθανοί μηχανισμοί επίδρασης του βιοεξανθρακώματος στις ρίζες είναι οι αλλαγές στις φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους (De la Rosa et al., 2014; Mukherjee and Lal, 2013; Mukherjee et al., 2014; Subedi et al., 2016b), οι αλλαγές στη βιοποικιλότητα των μικροοργανισμών (Gul et al., 2015; Nielsen et al., 2014) και οι αλλαγές στη ροή δευτερογενών μεταβολιτών επηρεάζοντας την ανάπτυξη των ριζών (Spokas et al., 2010).

Το βιοεξανθράκωμα έχει εφαρμοστεί σε πολλές σημαντικές καλλιέργειες με διαφορετικό αντίκτυπο στην καθεμία (Πίνακας 2-6). Στην καλλιέργεια του σιταριού έχει παρατηρηθεί αύξηση απόδοσης στο σπόρο έως και 30% (Vaccari et al., 2011) ενώ στη βιομάζα αύξηση 20-57% (Mandal et al., 2016) ή και καθόλου (Tammeorg et al., 2014). Στην καλλιέργεια του Italian ryegrass η απόδοση του φυτού αυξήθηκε από 20-333% (De la Rosa et al., 2014; Fox et al., 2014; Kammann et al., 2012; Subedi et al., 2016a), ενώ του Perennial ryegrass αυξήθηκε από 29-120% (Baronti et al., 2010; Gregory et al., 2014). Στην καλλιέργεια του καλαμποκιού έχει βρεθεί αύξηση στην απόδοση του σπόρου από 11-322% (Cornelissen et al., 2013; Rogovska et al., 2014), ενώ στη βιομάζα αύξηση 115-600% (Butnan et al., 2015), μείωση στη βιομάζα 50% (Deenik et al., 2010) και χωρίς καθόλου επίδραση (Jones et al., 2012). Ωστόσο, η απόκριση των φυτών στην προσθήκη βιοεξανθρακώματος εξαρτάται από παράγοντες όπως το έδαφος, το είδος καλλιέργειας, το είδος του βιοεξανθρακώματος, ο συνδυασμός του βιοεξανθρακώματος με λίπανση, η δόση εφαρμογής του βιοεξανθρακώματος, η χρονική διάρκεια της καλλιέργειας και οι περιβαλλοντικές συνθήκες (Biederman and Harpole, 2013; Jeffery et al., 2011).

Πίνακας 2-6. Επίδραση βιοεξανθρακωμάτων στις αποδόσεις καλλιιεργειών

Βιομάζα	Συνθήκες πυρόλυσης	Δόση εφαρμογής	Είδος πειράματος	Είδος καλλιέργειας	Είδος εδάφους	Επίδραση στην απόδοση της καλλιέργειας	Χώρα διεξαγωγής πειράματος	Βιβλιογραφία
Μείγμα σκληρού ξύλου	500°C	30 και 60 t ha ⁻¹	Αγρός	Σκληρό Σιτάρι	Όξινο SiL	+ 30 % (σπόρος)	Ιταλία	Vaccari et al., 2011
Απόβλητα πουλερικών	550°C	50 g kg ⁻¹	Δοχεία (γλάστρες)	Σιτάρι	Υψηλή OM (pH=8.3) Μεσαία OM (pH=5.5)	+ (20-57%) (βιομάζα)	Αυστραλία	Mandal et al., 2016
Τεμαχισμένο ξύλο από έλατο και πεύκο	550-600°C	5 και 10 t ha ⁻¹	Αγρός	Σιτάρι	SCL (pH=6.6)	Καμία	Φινλανδία	Tammeorg et al., 2014
Απόβλητα πουλερικών και χοίρων	400 και 600°C	20 g kg ⁻¹	Δοχεία (γλάστρες)	Italian ryegrass	Όξινο SiL, Αλκαλικό S	+ (10-50%) (βιομάζα)	Ιταλία	Subedi et al., 2016a
Μίσχανθος	600°C	10 και 20 g kg ⁻¹	Δοχεία (γλάστρες)	Italian ryegrass	Ελαφρώς όξινο L	+ (93-145%) (βιομάζα)	Ιρλανδία	Fox et al., 2014
Ξύλο, λάσπη χαρτιού, λυμματολάσπη	500-600°C	10, 20 και 40 t ha ⁻¹	Δοχεία (γλάστρες)	Italian ryegrass	Calcic Cambisol, SL (pH=8.6)	+ (67-333%) (βιομάζα)	Ισπανία	De la Rosa et al., 2014
Κελύφη φυστικιού	500°C	50 t ha ⁻¹	Θερμοκήπιο	Italian ryegrass	Ελαφρώς όξινο SL	+ 20% (βιομάζα)	Γερμανία	Kammann et al., 2012

Πίνακας 2-6. (συνεχίζεται).

Βιομάζα	Συνθήκες πυρόλυσης	Δόση εφαρμογής	Είδος πειράματος	Είδος καλλιέργειας	Είδος εδάφους	Επίδραση στην απόδοση της καλλιέργειας	Χώρα διεξαγωγής πειράματος	Βιβλιογραφία
Μείγμα σκληρού ξύλου	500°C	30 και 60 t ha ⁻¹	Δοχεία (γλάστρες)	Perennial ryegrass	Ελαφρώς όξινο SL	+ (29-120%) (βιομάζα)	Ιταλία	Baronti et al., 2010
Ξύλο ακακίας	350 και 550°C	30 και 60 t ha ⁻¹	Θερμοκήπιο	Perennial ryegrass	Gravelly (pH=5.6)	+ (50-66%) (βιομάζα)	N. Ζηλανδία	Gregory et al., 2014
Ρόκα καλαμποκιού, μείγμα σκληρού ξύλου	400°C	4 t ha ⁻¹	Αγρός	Καλαμπόκι	Όξινο SL	+ (233-322%) (σπόρο)	Ζάμπια	Cornellisen et al., 2013
Σκληρό ξύλο	500-575°C	0-96 t ha ⁻¹	Αγρός	Καλαμπόκι	Όξινο L	+ (11-55%) (σπόρο)	ΗΠΑ	Rogovska et al., 2014
Ξύλο Ευκάλυπτου	350°C	10, 20 και 40 g kg ⁻¹	Θερμοκήπιο	Καλαμπόκι	LS (pH=5.5) και SiCL (pH=6)	Καμία στην 1η καλλιεργητική περίοδο, +115-600% (βιομάζα) στη 2η καλλιεργητική περίοδο	Ταϊλάνδη	Butnan et al., 2015
Κελύφη από Macademia	300-800°C	50 g kg ⁻¹	Θερμοκήπιο	Καλαμπόκι	Ultisol (pH=4.7)	-50% (βιομάζα)	ΗΠΑ	Deenik et al., 2010
Τεμαχισμένο σκληρό ξύλο	450°C	25 και 50 t ha ⁻¹	Αγρός	Καλαμπόκι	SCL (pH=6.7)	Καμία	Αγγλία	Jones et al., 2012

2.4.1 Επίδραση βιοεξανθρακώματος σε διαφορετικά είδη φυτών

Η επίδραση του βιοεξανθρακώματος σε διαφορετικά είδη φυτών έχει εξεταστεί σε άλλες μελέτες (Biederman and Harpole, 2013; Jeffery et al., 2011), ωστόσο οι Subedi et al. (2017) αναφέρουν ότι όλοι οι υπόλοιποι παράγοντες που επηρεάζουν την καλλιέργεια θα πρέπει να είναι σταθεροί για να γίνει μια αποτίμηση της επίδρασης του βιοεξανθρακώματος σε μία συγκεκριμένη καλλιέργεια. Έτσι, οι Lin et al. (2015) παρατήρησαν αύξηση της απόδοσης του σπόρου σόγιας (11%) και στο σπόρο του σιταριού (28%) όταν πρόσθεσαν βιοεξανθράκωμα από βλαστούς καλαμποκιού σε ένα παράκτιο αλατούχο έδαφος. Οι Inal et al. (2015) παρατήρησαν αύξηση της απόδοσης της βιομάζας καλαμποκιού (62-113%) και του φασολιού (26-56%) έπειτα από την προσθήκη βιοεξανθρακώματος από κοπριά πουλερικών σε ένα ασβεστούχο αργιλοπηλώδες έδαφος. Αντίθετα, οι Nelissen et al. (2015) δεν βρήκαν καμία επίδραση στην απόδοση του κριθαριού και της σίκαλης σε ένα αμμοπηλώδες έδαφος, στο οποίο είχε προστεθεί βιοεξανθράκωμα από μείγμα μαλακού και σκληρού ξύλου. Παρόμοια, οι Tammeorg et al. (2014) δεν παρατήρησαν αύξηση στην απόδοση των φυτών κύαμου, σιναπιού και σιταριού όταν πρόσθεσαν βιοεξανθράκωμα από κομμάτια ξύλου έλατου και πεύκου. Επίσης, οι Kloss et al. (2014) δεν βρήκαν αύξηση στην απόδοση του τριφυλλιού, ενώ στα φυτά σιναπιού και κριθαριού βρήκαν μείωση της απόδοσης έως και 68%, όταν εφαρμόστηκαν βιοεξανθρακώματα από άχυρο σιταριού, μείγμα ξύλου και κλαδέματα αμπελιού, σε τρία εδάφη, ένα αμμοπηλώδες, ένα αργιλοπηλώδες και ένα ιλυοπηλώδες. Επίσης, οι Nelissen et al. (2015) βρήκε μείωση στις αποδόσεις 10-48% στο φυτό ρεπανιού και μείωση 3-35% στην απόδοση του κριθαριού, όταν πρόσθεσαν βιοεξανθράκωμα από ξύλο ιτιάς σε ένα αμμοπηλώδες έδαφος, ενώ μικρότερη ήταν η μείωση, όταν πρόσθεσαν βιοεξανθράκωμα από πεύκο στο ίδιο έδαφος, υποδεικνύοντας τη σημασία του είδους του βιοεξανθρακώματος. Επιπρόσθετα, οι Baronti et al. (2010) παρατήρησαν αύξηση της απόδοσης του ryegrass κατά 29-120%, όταν η δόση του βιοεξανθρακώματος ήταν 30 και 60 t ha⁻¹, ενώ μείωση στην απόδοση του ίδιου φυτού όταν προστέθηκε το ίδιο βιοεξανθράκωμα σε δόση 100 και 120 t ha⁻¹, σε ένα αμμοπηλώδες έδαφος. Η ίδια τάση παρατηρήθηκε από τους Laghari et al. (2015) στην απόδοση του σόργου, όταν προστέθηκε βιοεξανθράκωμα σε δόση 22 t ha⁻¹ σε αντίθεση με δόση βιοεξανθρακώματος 45 t ha⁻¹.

2.4.2 Επίδραση βιοεξανθρακώματος σε διαφορετικής κοκκομετρικής σύστασης εδάφη

Η επίδραση του βιοεξανθρακώματος εξαρτάται σημαντικά από το έδαφος. Η μελέτη των Subedi et al. (2016a) έδειξε μια αύξηση από 10-50% στην απόδοση του ryegrass έπειτα από την προσθήκη βιοεξανθρακώματος από απόβλητα πουλερικών σε ένα ιλυοπηλώδες έδαφος, ενώ στο ασβεστούχο αμμώδες μια αύξηση 44%. Επίσης, οι Cornelissen et al. (2013) βρήκαν αύξηση στην απόδοση του καλαμποκιού 233-322% μετά από εφαρμογή βιοεξανθρακώματος σε ένα όξινο αμμώδες έδαφος, 30-42% αύξηση σε ένα όξινο αμμοαργιλοπηλώδες και καθόλου επίδραση σε ένα ουδέτερο

αργιλοπηλώδες, ένα όξινο αμμοπηλώδες και ιλυοαργιλώδες έδαφος. Παρόμοια, οι Butnan et al. (2015) παρατήρησαν ότι στον πρώτο κύκλο καλλιέργειας καλαμποκιού η απόδοση του καλαμποκιού μειώθηκε 7-24% σε ένα όξινο πηλοαμμώδες, ενώ δεν είχε καθόλου επίδραση στο ιλυοαργιλοπηλώδες όταν προστέθηκε βιοεξανθράκωμα που είχε παραχθεί από ξύλο ευκαλύπτου, στους 800°C με ταχεία πυρόλυση. Στην ίδια μελέτη όταν χρησιμοποιήθηκε βιοεξανθράκωμα που είχε παραχθεί από ξύλο ευκαλύπτου στους 350°C με βραδεία πυρόλυση, δεν βρέθηκε καμία επίδραση και στα δύο εδάφη στον πρώτο κύκλο καλλιέργειας, ενώ στον δεύτερο κύκλο οι αποδόσεις αυξήθηκαν έως και 600% στο ιλυοαργιλοπηλώδες και έως 250% στο πηλοαμμώδες έδαφος.

2.4.3 Επίδραση βιοεξανθρακώματος σε συνδυασμό με ανόργανη ή οργανική λίπανση

Πολλές μελέτες έχουν δείξει ότι ο συνδυασμός βιοεξανθρακώματος με ανόργανη ή οργανική λίπανση επιφέρει θετικά αποτελέσματα στην απόδοση των καλλιεργειών σε σχέση μόνο με την προσθήκη βιοεξανθρακώματος. Αυτό ισχύει κυρίως για τα βιοεξανθρακώματα που προέρχονται από ξυλώδη βιομάζα ή άλλων φυτικών ιστών λόγω των χαμηλών τους συγκεντρώσεων σε σχέση με τα βιοεξανθρακώματα που προέρχονται από κοπριές (Deenik et al., 2010; Steiner et al., 2007; Subedi et al., 2015). Τα θετικά αποτελέσματα στην απόδοση των καλλιεργειών ρυζιού και σόργου (4-12 φορές μεγαλύτερη) από τον συνδυασμό βιοεξανθρακώματος με ανόργανη λίπανση ή/και οργανική λίπανση σε σύγκριση με μόνο ανόργανη λίπανση παρατήρησαν οι Steiner et al. (2007). Επίσης, οι Christoph et al. (2007) βρήκαν διπλάσιες αποδόσεις σε καλλιέργεια ρυζιού και σόργου σε σύγκριση με μόνο ανόργανη λίπανση (NPK λίπανση), όπως και οι Uzoma et al. (2011) σε καλλιέργεια καλαμποκιού (98-150%). Επιπρόσθετα οι Schmidt et al. (2015) ανέφεραν αύξηση 85-300% στην απόδοση καλλιέργειας κολοκυθιάς έπειτα από τον συνδυασμό βιοεξανθρακώματος με οργανική λίπανση. Παρόμοια, βρήκαν αύξηση στις αποδόσεις του ryegrass (Kammann et al., 2012) και του σιταριού (Albuquerque et al., 2013; Mandal et al., 2016), όταν συνδυάστηκε το βιοεξανθράκωμα με οργανική λίπανση ή/και ανόργανη λίπανση. Από την άλλη μεριά, μειωμένες αποδόσεις βρέθηκαν σε καλλιέργεια ρεπανιού και κριθαριού (Nelissen et al., 2014) καθώς και μαρουλιού και καλαμποκιού (Deenik et al., 2010), όταν συνδυάστηκε βιοεξανθράκωμα με ανόργανη λίπανση σε σχέση με ανόργανη λίπανση μόνο.

Η προσθήκη βιοεξανθρακώματος και βιοεξανθρακώματος με κόμποστ επηρεάζουν άμεσα τη διαθεσιμότητα είτε των θρεπτικών στοιχείων που ήδη υπάρχουν στο έδαφος είτε των θρεπτικών στοιχείων που προστίθενται από αυτά (Hussain et al., 2017). Οι Agegnehu et al. (2015) αναφέρουν στη μελέτη τους ότι η αύξηση στην ανάπτυξη του φυτού, η διαθεσιμότητα των θρεπτικών στοιχείων στο έδαφος και στο φυτό κατατάσσονται ως εξής βιοεξανθράκωμα+κόμποστ > βιοεξανθράκωμα > κομποστοποιημένο βιοεξανθράκωμα > λίπανση > μάρτυρας. Η αύξηση στην ανάπτυξη των φυτών που καλλιεργούνται σε έδαφη που έχει εφαρμοστεί βιοεξανθράκωμα με κόμποστ οφείλεται στην αυξημένη διαθεσιμότητα

των θρεπτικών και πρόσληψή τους από τα φυτά σε σύγκριση με το βιοεξανθράκωμα χωρίς κόμποστ (Agegnehu et al., 2016b; Schulz and Glaser, 2012).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.

Η επίδραση βιοεξανθρακωμάτων από στέμφυλα και φλοιούς ρυζιού στο *Lolium perenne* L.

3.1 Εισαγωγή

Έχει αναφερθεί ότι το βιοεξανθράκωμα συντελεί στη βελτίωση της απόδοσης των φυτών (Biederman and Harpole, 2013) λόγω της βελτίωσης των φυσικοχημικών ιδιοτήτων του εδάφους. Συγκεκριμένα, το βιοεξανθράκωμα συντελεί στην αύξηση της περιεκτικότητας του εδάφους σε οργανική ουσία (Glaser et al., 2002), της υδατοϊκανότητας (Atkinson et al., 2010) και του αερισμού του εδάφους, της διαθεσιμότητας και συγκράτησης των θρεπτικών συστατικών, στη μείωση της ανάγκης για λίπανση και της έκπλυσης των θρεπτικών συστατικών (Laird, 2008; Lehmann et al., 2003). Επιπλέον, τα ίδια τα βιοεξανθρακώματα μπορεί να περιέχουν σημαντικά μακροθρεπτικά και μικροθρεπτικά συστατικά, όπως N, K, P, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τα φυτά (Laird et al., 2010a). Μεταξύ των θρεπτικών στοιχείων, ο P χρήζει ιδιαίτερης προσοχής τα τελευταία χρόνια σε σύγκριση με τα άλλα στοιχεία, λόγω του γεγονότος ότι ο P είναι μη ανανεώσιμος πόρος και αναντικατάστατος στην ανάπτυξη των φυτών. Μελέτες έχουν δείξει ότι τα αποθέματα μεταλλευμάτων πλούσια σε φωσφόρο θα εξαντληθούν σε 50-100 χρόνια (Driver et al., 1999) λόγω μεγάλης κατανάλωσης P από τον αγροτικό τομέα και πολύ αργό ρυθμό ανακύκλωσης P μέσω φυσικών διεργασιών (Weikard and Seyhan, 2009). Εκτιμάται ότι περίπου το 80% των φωσφορικών αλάτων χρησιμοποιούνται σήμερα στην παραγωγή λιπασμάτων (Shu et al., 2006). Επομένως, οι μέθοδοι και οι στρατηγικές επαναχρησιμοποίησης και ανάκτησης του P παρουσιάζουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια. Οι συγκεντρώσεις του P στα βιοεξανθρακώματα είναι υψηλότερες από εκείνες των μη πυρολυμένων οργανικών υλικών, καθιστώντας τα έτσι πιθανές πηγές P (Angst and Sohi, 2013; Brewer et al., 2009; Cao και Harris, 2010; Hale et al., 2013; Mukherjee and Zimmerman, 2013; Silber et al., 2010).

Η θετική επίδραση του βιοεξανθρακώματος στις καλλιέργειες διαφόρων φυτών έχει διερευνηθεί κυρίως σε τροπικές (Agegnehu et al., 2016; Lehmann et al., 2003; Major et al., 2010b; Rondon et al., 2007) και λιγότερο σε Μεσογειακές χώρες, όπως Ιταλία και Ισπανία (Baronti et al., 2010; Beesley et al., 2013; De La Rosa et al., 2014; Genesio et al., 2015; Subedi et al., 2016a, 2016b; Vaccari et al., 2011). Γι' αυτό το λόγο, περαιτέρω έρευνα απαιτείται για τις επιδράσεις του βιοεξανθρακώματος κατά την εφαρμογή του στο έδαφος και σε άλλες Μεσογειακές χώρες, όπως η Ελλάδα. Η παρούσα εργασία διενεργήθηκε για να γίνει κατανοητή η επίδραση βιοεξανθρακωμάτων στην ανάπτυξη του φυτού *Lolium perenne* L. και στην πρόσληψη των θρεπτικών συστατικών από το φυτό, σε δύο διαφορετικής κοκκομετρικής σύστασης εδάφη από την ευρύτερη περιοχή του νομού Χανίων. Πιο συγκεκριμένα ο σκοπός ήταν να διαπιστωθεί 1) αν τα βιοεξανθρακώματα, που έχουν προέλθει από στέμφυλα και φλοιούς ρυζιού, είτε χωρίς λίπανση είτε σε συνδυασμό με

ανόργανη ή οργανική (compost) λίπανση, επηρεάζουν το ξηρό βάρος του υπέργειου μέρους του φυτού, τη συγκέντρωση P στους υπέργειους φυτικούς ιστούς και την πρόσληψη P από τους υπέργειους φυτικούς ιστούς και 2) αν τα βιοεξανθρακώματα σε συνδυασμό με ή χωρίς κομπόστ, μη έχοντας δεχθεί καθόλου ανόργανη λίπανση, επηρεάζουν το ξηρό βάρος του υπέργειου μέρους του φυτού, τις συγκεντρώσεις μακροθρεπτικών και μικροθρεπτικών στοιχείων στους υπέργειους φυτικούς ιστούς και την πρόσληψη μακροθρεπτικών και μικροθρεπτικών στοιχείων από τους υπέργειους φυτικούς ιστούς.

Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής θα μπορούσαν να ενισχύσουν την κατανόηση της θρέψης των φυτών, όταν εφαρμόζεται βιοεξανθράκωμα στο έδαφος. Επιπλέον, οι δύο διαφορετικοί τύποι εδάφους μπορούν να μας δώσουν σημαντικές πληροφορίες για τις αλληλεπιδράσεις φυτού-εδάφους που προκύπτουν από τις ιδιαίτερες συνθήκες που επικρατούν σε ένα έδαφος που έχει εφαρμοστεί βιοεξανθράκωμα.

3.2 Υλικά και Μέθοδοι

3.2.1 Υλικά

Πάρθηκαν 2 δείγματα εδάφους (0-20 cm) από καλλιεργούμενες περιοχές του νομού Χανίων. Τα εδαφικά δείγματα, ένα ελαφριάς και ένα μέσης σύστασης, διέφεραν ως προς τις φυσικοχημικές τους ιδιότητες και κυρίως ως προς το pH (ένα ελαφρώς όξινο και ένα αλκαλικό) και την κοκκομετρική σύστασή τους (αμμοπηλώδες-SL και πηλώδες-L). Το αμμοπηλώδες εδαφικό δείγμα πάρθηκε από την περιοχή κοντά στο χωριό Βλάτος (35°23'19"N, 23°40'08"E) και το πηλώδες εδαφικό δείγμα κοντά στο χωριό Καλλεργιανά (35°29'21"N, 23°40'24"E). Τα δείγματα εδάφους αεροξηράνθηκαν, πέρασαν από κόσκινο 10 mm και έπειτα από κόσκινο 2 mm. Από τη λεπτή γη συλλέχθηκε μια μικρή ποσότητα (~500gr) για τις αναλύσεις χαρακτηρισμού των εδαφικών δειγμάτων, ενώ το υπόλοιπο δείγμα χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα με τα φυτά του *Lolium perenne* L.

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με βιοεξανθρακώματα προερχόμενα από διάφορα είδη οργανικών παραπροϊόντων (στέμφυλα, φλοιοί ρυζιού) που προκύπτουν από τον αγροβιομηχανικό τομέα. Τα στέμφυλα (Σ) συλλέχθηκαν από ένα τοπικό οινοποιείο στα Χανιά και οι φλοιοί ρυζιού (ΦΡ) από ένα ορυζόμυλο της βόρειας Ελλάδας. Τα οργανικά υπολείμματα και παραπροϊόντα ξηράνθηκαν σε φούρνο ξήρανσης στους 105°C για 24 h, μετέπειτα αλέστηκαν σε μαχαιρόμυλο προκειμένου το μέγεθος των σωματιδίων τους να μην ξεπερνάει τα 0.5 mm, και τέλος αποθηκεύτηκαν σε αεροστεγή δοχεία μέχρι την περαιτέρω χρήση τους. Τα δείγματα των βιοεξανθρακωμάτων παράχθηκαν χρησιμοποιώντας φούρνο πυρόλυσης. Συνθήκες απουσίας οξυγόνου διατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια της διαδικασίας πυρόλυσης με παροχή 99% καθαρού αζώτου στο σύστημα και παροχή ροής 200 L h⁻¹. Η θερμοκρασία πυρόλυσης ήταν 300°C. Ο ρυθμός θέρμανσης ήταν 12°C min⁻¹ μέχρι τους 150°C, όπου στη συγκεκριμένη θερμοκρασία ο ρυθμός θέρμανσης μειωνόταν

στους $6^{\circ}\text{C min}^{-1}$ μέχρι την επιθυμητή θερμοκρασία πυρόλυσης. Ο χρόνος παραμονής (residence time) ήταν 60 min. Μετά το τέλος της πυρόλυσης, τα βιοεξανθρακώματα απομακρύνθηκαν από τον φούρνο, μεταφέρθηκαν σε ξηραντήρα, ζυγίστηκαν και αποθηκεύτηκαν σε αεροστεγή πλαστικά δοχεία. Προς συντομία, τα βιοεξανθρακώματα θα αναφέρονται ως BC-Σ (Biochar-Στέμφυλα) και BC-ΦΡ (Biochar-Φλοιοί Ρυζιού).

Το κομπόστ δόθηκε από τη Διαδημοτική Επιχείρηση Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων (ΔΕΔΙΣΑ) των Χανίων.

3.2.2 Εγκατάσταση πειράματος

Η εγκατάσταση του πειράματος έγινε το καλοκαίρι του 2014, σε θερμοκήπιο του Πολυτεχνείου Κρήτης στα Χανιά. Το κάθε εδαφικό δείγμα αναμείχθηκε με καθένα από τα υλικά (BC-Σ; BC-ΦΡ; κόμποστ). Οι μεταχειρίσεις ήταν οι εξής: 1) Μάρτυρας (έδαφος χωρίς μεταχείριση), 2) Κόμποστ, 3) Βιοεξανθράκωμα στέμφυλων (BC-Σ), 4) Βιοεξανθράκωμα φλοιών ρυζιού (BC-ΦΡ), 5) Συνδυασμός βιοεξανθρακώματος στέμφυλων με κόμποστ (BC-Σ+κόμποστ), 6) Συνδυασμός βιοεξανθρακώματος φλοιών ρυζιού με κόμποστ (BC-ΦΡ+κόμποστ). Η δόση εφαρμογής του βιοεξανθρακώματος και του κόμποστ ήταν 2% κατά βάρος (κ.β.). Στα δύο εδάφη και σε κάθε μεταχείριση εφαρμόστηκε ανόργανη λίπανση με θρεπτικά εκτός από φώσφορο (ΛΧΡ) ή καθόλου ανόργανη λίπανση (ΧΛ). Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 24 μεταχειρίσεις. Η κάθε μεταχείριση είχε 3 επαναλήψεις. Συνολικά εγκαταστάθηκαν 72 διάτρητα πλαστικά δοχεία χωρητικότητας 0.8 kg. Στον Πίνακα 3-1 συνοψίζονται οι μεταχειρίσεις που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα. Ποσότητα, 0.8 kg για κάθε μεταχείριση τοποθετήθηκε σε πλαστική σακούλα. Τα μείγματα υγράνθηκαν ώστε να μπορούν εύκολα να αναμειχθούν και να ομογενοποιηθούν. Τα μείγματα εξισορροπήθηκαν για 15 ημέρες και αεροξηράνθηκαν. Έπειτα τα μείγματα τοποθετήθηκαν σε πλαστικά διάτρητα δοχεία (12.5x10.5 cm) και σπάρθηκαν με 1 g *Lolium perenne* L., σε 3 επαναλήψεις (1/7/2014). Το πειραματικό σχέδιο ήταν το πλήρως τυχαίοποιημένο σχέδιο (CRD), η άρδευση γινόταν με νερό από το Δήμο Χανίων. Οι γλάστρες ποτίζονταν με στάγδην άρδευση, ώστε η εδαφική υγρασία να διατηρείται στο 70% της υδατοϊκανότητας. Κατά τη διάρκεια του πειράματος, η μέση θερμοκρασία αέρα ήταν στους 26.3°C . Μία εβδομάδα μετά από την έκπτυξη των σποροφύτων και μετά από κάθε συγκομιδή, τα δοχεία των μεταχειρίσεων ΛΧΡ δέχθηκαν λίπανση με 160 mg kg^{-1} εδάφους θεικής αμμωνίας $[(\text{NH}_4)\text{SO}_4]$ και 40 mg kg^{-1} εδάφους νιτρικού καλίου (KNO_3). Τα μικροστοιχεία Fe και Mn, Zn, Cu και B εφαρμόστηκαν σε όλα τα ΛΧΡ δοχεία εφάπαξ, δύο εβδομάδες μετά την έκπτυξη των σποροφύτων. Ο σίδηρος (Fe), το μαγγάνιο (Mn), ο ψευδάργυρος (Zn), ο χαλκός (Cu) και το βόριο (B) προστέθηκαν σε ποσά ίσα με 5,3,3,1 και 1 mg kg^{-1} εδάφους, αντίστοιχα. Οι μορφές των μικροστοιχείων ήταν ένυδρος θεικός σίδηρος ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), ένυδρο θεικό μαγγάνιο ($\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), ένυδρος θεικός ψευδάργυρος ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), ένυδρος θεικός χαλκός ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) και βορικό οξύ (H_3BO_3). Όλα

τα θρεπτικά εφαρμόστηκαν ως υδατικά διαλύματα. Το πείραμα διήρκησε 3 μήνες και πραγματοποιήθηκαν τρεις συγκομιδές, μία κάθε μήνα.

Στις μεταχειρίσεις ΛΧΡ μελετήθηκαν:

- i) Το ξηρό βάρος των υπέργειων φυτικών ιστών σε κάθε συγκομιδή
- ii) Η συγκέντρωση P στο υπέργειο μέρος του φυτού και η πρόσληψη P από το υπέργειο μέρος του φυτού σε κάθε συγκομιδή.

Στις μεταχειρίσεις ΧΛ μελετήθηκαν:

- i) Το ξηρό βάρος υπέργειων φυτικών ιστών σε κάθε συγκομιδή
- ii) Η συγκέντρωση P στο υπέργειο μέρος του φυτού και η πρόσληψη P από το υπέργειο μέρος του φυτού σε κάθε συγκομιδή.
- iii) Η συγκέντρωση των μακροθρεπτικών K, Ca, Mg και μικροθρεπτικών Fe, Mn, Zn στο υπέργειο μέρος του φυτού και εκτιμήθηκε η πρόσληψη των μακροθρεπτικών K, Ca, Mg και μικροθρεπτικών Fe, Mn, Zn από το υπέργειο μέρος του φυτού σε κάθε συγκομιδή.

Πίνακας 3-1. Σχέδιο πειραματικού με φυτά του *Lolium perenne* L. σε δοχεία. Οι μεταχειρίσεις για κάθε έδαφος (SL και L)

SL		L	
Μεταχειρίσεις		Μεταχειρίσεις	
Με ανόργανη λίπανση χωρίς P (ΛΧΡ)	Χωρίς ανόργανη λίπανση (ΧΛ)	Με ανόργανη λίπανση χωρίς P (ΛΧΡ)	Χωρίς ανόργανη λίπανση (ΧΛ)
0 % BC + 0% κόμποστ (Μάρτυρας ΛΧΡ)	0 % BC + 0% κόμποστ (Μάρτυρας ΧΛ)	0 % BC + 0% κόμποστ (Μάρτυρας ΛΧΡ)	0 % BC + 0% κόμποστ (Μάρτυρας ΧΛ)
0% BC + 2% κ.β κόμποστ (Κόμποστ ΛΧΡ)	0% BC + 2% κ.β κόμποστ (Κόμποστ ΧΛ)	0% BC + 2% κ.β κόμποστ (Κόμποστ ΛΧΡ)	0% BC + 2% κ.β κόμποστ (Κόμποστ ΧΛ)
2% κ.β. BC-Σ + 0% κ.β. κόμποστ (BC-Σ ΛΧΡ)	2% κ.β. BC-Σ + 0% κ.β. κόμποστ (BC-Σ ΧΛ)	2% κ.β. BC-Σ + 0% κ.β. κόμποστ (BC-Σ ΛΧΡ)	2% κ.β. BC-Σ + 0% κ.β. κόμποστ (BC-Σ ΧΛ)
2% κ.β. BC-ΦΡ + 0% κ.β. κόμποστ (BC-ΦΡ ΛΧΡ)	2% κ.β. BC-ΦΡ + 0% κ.β. κόμποστ (BC-ΦΡ ΧΛ)	2% κ.β. BC-ΦΡ + 0% κ.β. κόμποστ (BC-ΦΡ ΛΧΡ)	2% κ.β. BC-ΦΡ + 0% κ.β. κόμποστ (BC-ΦΡ ΧΛ)
2% κ.β. BC-Σ + 2% κ.β. κόμποστ (BC-Σ+κόμποστ ΛΧΡ)	2% κ.β. BC-Σ + 2% κ.β. κόμποστ (BC-Σ+κόμποστ ΧΛ)	2% κ.β. BC-Σ + 2% κ.β. κόμποστ (BC-Σ+κόμποστ ΛΧΡ)	2% κ.β. BC-Σ + 2% κ.β. κόμποστ (BC-Σ+κόμποστ ΧΛ)
2% κ.β. BC-ΦΡ + 2% κ.β. κόμποστ (BC-ΦΡ+κόμποστ ΛΧΡ)	2% κ.β. BC-ΦΡ + 2% κ.β. κόμποστ (BC-ΦΡ+κόμποστ ΧΛ)	2% κ.β. BC-ΦΡ + 2% κ.β. κόμποστ (BC-ΦΡ+κόμποστ ΛΧΡ)	2% κ.β. BC-ΦΡ + 2% κ.β. κόμποστ (BC-ΦΡ+κόμποστ ΧΛ)

3.2.3 Αναλυτικές Μέθοδοι

Χαρακτηρισμός εδαφών

Η μηχανική σύσταση του εδάφους προσδιορίστηκε με τη μέθοδο Βουγιούκου. Το pH του εδάφους προσδιορίστηκε σε αιώρημα με νερό αναλογίας 1:2 (1 έδαφος:2 νερό) και η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) σε πάστα εδάφους, χρησιμοποιώντας τα σχετικά ηλεκτρόδια σε ένα πολύμετρο. Το ποσοστό της οργανικής ουσίας (OM%) υπολογίστηκε με τη μέθοδο Walkley-Black. 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 με οξικό αμμώνιο (2.5g εδάφους σε αναλογία 1:20) χρησιμοποιώντας ICP-OES. Τα μικροθρεπτικά Fe, Mn και Zn καθορίστηκαν μετά από εκχύλιση με DTPA (10g εδάφους σε αναλογία 1:2.5) χρησιμοποιώντας ICP-OES. Το νιτρικό άζωτο του εδάφους ($\text{NO}_3\text{-N}$) καθορίστηκε φασματοφωτομετρικά στα 400 nm μετά από εκχύλιση KCl (20g εδάφους σε αναλογία 1:2.5) και χρήση του αντιδραστηρίου Nitraver (Hach-Lange, Germany). Οι φυσικοχημικές ιδιότητες των δύο δειγμάτων εδάφους εμφανίζονται στον Πίνακα 3-2.

Πίνακας 3-2. Φυσικοχημικές ιδιότητες των 2 δειγμάτων εδάφους που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα με φυτά του *Lolium perenne* L. σε δοχεία.

Ιδιότητες	Έδαφος	
	SL	L
pH (1:2)	6.7	8.2
Άμμος-Sand (%)	55.6	45.6
Πλύς-Silt (%)	30	40
Άργιλος-Clay (%)	14.4	14.4
Οργανική Ουσία-OM (%)	5.49	2.88
CaCO_3 (%)	5.81	25.87
Ηλεκτρική Αγωγιμότητα-EC (dS m^{-1})	0.78	0.44
$\text{NO}_3\text{-N}$ (mg kg^{-1})	22.6	16.3
Αφομοιώσιμος P-Olsen P (g kg^{-1})	0.04	0.01
Ανταλλάξιμο K-Exchangeable K (g kg^{-1})	0.21	0.86
Ανταλλάξιμο Ca-Exchangeable Ca (g kg^{-1})	4.80	6.90
Ανταλλάξιμο Mg-Exchangeable Mg (g kg^{-1})	0.23	0.30
DTPA Fe (mg kg^{-1})	25	1.54
DTPA Mn (mg kg^{-1})	9.06	4.14

Χαρακτηρισμός οργανικών παραπροϊόντων, βιοεξανθρακωμάτων και κόμποστ

Τα οργανικά παραπροϊόντα και τα αντίστοιχα βιοεξανθρακώματα, υπολογίστηκαν ως προς, το ποσοστό τέφρας (ash%), τα ποσοστά άνθρακα (C%), και αζώτου (N%), το pH, την ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) και τις συγκεντρώσεις P, K, Ca, Mg, Fe, Mn και Zn. 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%), και αζώτου (N%) 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). Ο προσδιορισμός των ολικών συγκεντρώσεων των στοιχείων P, Ca, K, Mg, Mn, Fe, Zn στα δείγματα έγινε με ξηρή καύση (Kalra, 1998). Οι ολικές συγκεντρώσεις των στοιχείων Ca, K, Mg, Mn, Fe, Zn προσδιορίστηκαν με τη χρήση ICP-MS, ενώ ο P προσδιορίστηκε με τη μέθοδο Ascorbic Acid Molybdenum Blue Method (Murphy and Riley, 1962) σε φασματοφωτόμετρο υπεριώδους ορατού σε μήκος κύματος 880 nm. Τα χαρακτηριστικά των οργανικών παραπροϊόντων και των αντίστοιχων βιοεξανθρακωμάτων και του κόμποστ φαίνονται στον Πίνακα 3-3.

Πίνακας 3-3. Χαρακτηριστικά των οργανικών παραπροϊόντων, των βιοεξανθρακωμάτων και του κόμποστ που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα με φυτά του *Lolium perenne* L. σε δοχεία.

Χαρακτηριστικά	Σ	ΦΡ	BC-Σ	BC-ΦΡ	Κόμποστ
OM (%)	nd	nd	nd	nd	>20
C ^a (%)	49.60	37	46.60	20.55	nd
N ^a (%)	2	0.43	1.60	0.8	1.5-2
Ash ^b (%)	1.82	4.73	25.67	63.54	nd
pH	5	6.10	10.80	7.50	7.5-8.5
EC (dS m ⁻¹)	0.27	0.12	1.06	0.27	<37
P (g kg ⁻¹)	0.99	0.21	3.63	1.80	4-5
Mg (g kg ⁻¹)	0.77	0.18	4.86	0.65	nd
K (g kg ⁻¹)	29.09	4.48	164.72	14.51	10-15
Ca (g kg ⁻¹)	0.10	0.01	1.13	0.04	<130
Mn (mg kg ⁻¹)	10	90	120	340	nd
Fe (mg kg ⁻¹)	60	10	1750	80	nd

^a Όπως παραλήφθηκε (As received basis), ^b Επί ξηρού (Dry basis) C: Carbon (Ανθρακας), N: Nitrogen (Αζωτο), EC: electrical conductivity (ηλεκτρική αγωγιμότητα), nd (δεν προσδιορίστηκε)

Φυτικοί ιστοί

Συνολικά, πραγματοποιήθηκαν τρεις συγκομιδές των υπέργειων φυτικών ιστών ανά μήνα (1/8/2014, 1/9/2014, 1/10/2014). Το υπέργειο φυτικό μέρος συγκομίστηκε, ξεπλύθηκε με νερό βρύσης και έπειτα δύο φορές με απιονισμένο νερό. Η ξήρανση των υπέργειων φυτικών ιστών έγινε στους 68°C για 48 ώρες και ακολούθησε ζύγιση. Οι ολικές συγκεντρώσεις P, Ca, K, Mg, Mn, Fe και Zn στους υπέργειους φυτικούς ιστούς καθορίστηκαν έπειτα από ξηρή καύση (Kalra, 1998). Οι ολικές συγκεντρώσεις των στοιχείων Ca, K, Mg, Mn, Fe, προσδιορίστηκαν με τη χρήση ICP-OES 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 H₂SO₄ - H₂O₂.

3.2.4 Στατιστική Ανάλυση

Η στατιστική ανάλυση έγινε με one-way ANOVA χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα SPSS (Version 22, SPSS Inc., Chicago, IL USA) και οι στατιστικώς σημαντικές διαφορές των μέσων όρων των συγκεντρώσεων και της πρόσληψης των μακροθρεπτικών N, P, K, Ca, Mg και μικροθρεπτικών Fe, Mn, Zn στους υπέργειους φυτικούς ιστούς, καθώς και των ξηρών βαρών των υπέργειων φυτικών ιστών καθορίστηκαν σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε επίπεδο σημαντικότητας ($p < 5\%$) ξεχωριστά για κάθε έδαφος και σετ πειράματος (μεταχειρίσεις ΛXP και μεταχειρίσεις ΧΛ).

3.3 Αποτελέσματα και Συζήτηση

3.3.1 Ανάπτυξη και απόδοση των φυτών

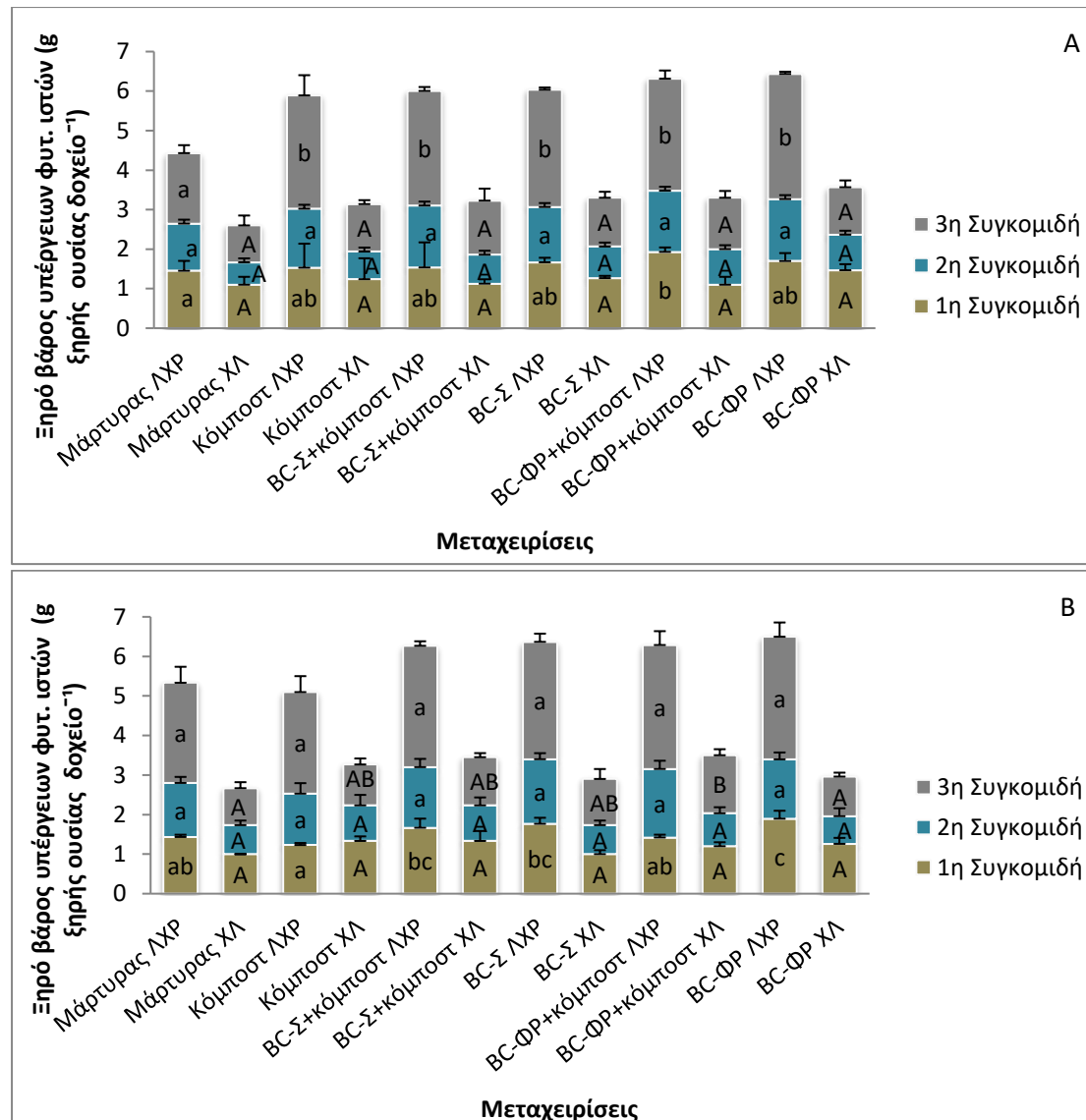
Ξηρό βάρος υπέργειων φυτικών ιστών

Η εφαρμογή και των δύο ειδών βιοεξανθρακωμάτων με ή χωρίς κόμποστ παρουσία ανόργανης λίπανσης χωρίς P (ΛXP), αύξησε σημαντικά ($p < 0.05$) το ξηρό βάρος του υπέργειου μέρους του φυτού (59-78%), σε σύγκριση με τον μάρτυρα, στο SL έδαφος, κυρίως στην 3η συγκομιδή, με την υψηλότερη αύξηση να παρατηρείται για το βιοεξανθράκωμα από φλοιούς ρυζιού (78%) μετά την προσθήκη ανόργανης λίπανσης (ΛXP), ενώ δεν παρατηρήθηκε στατιστικά σημαντική αύξηση στο L έδαφος, εκτός από το βιοεξανθράκωμα φλοιών ρυζιού, στην 1η συγκομιδή (Σχήμα 3-1). Αυτές οι αυξήσεις στο ξηρό βάρος των φυτών είναι υψηλότερες σε σύγκριση με τη μελέτη της Kammann et al. (2012), όπου παρατηρήθηκε αύξηση 20% στο ξηρό βάρος του ryegrass, όταν εφαρμόσε βιοεξανθράκωμα σε συνδυασμό με ανόργανη λίπανση. Έχει αναφερθεί σε μελέτες ότι η επίδραση του βιοεξανθρακώματος στο ξηρό βάρος των φυτών εξαρτάται από το είδος του βιοεξανθρακώματος (Gaskin et al., 2010), από την καλλιέργεια (Kloss et al., 2014; Lin et al., 2015) και τον τύπο του εδάφους (Lim et al., 2016). Φαίνεται ότι η κοκκομετρική σύσταση του εδάφους είναι ένας κρίσιμος παράγοντας όπως υποστηρίζεται από τη μελέτη του Atkinson et al. (2010), ο οποίος υποστήριξε ότι η αύξηση της υδατοϊκανότητας ενός εδάφους, στο οποίο έχει προστεθεί βιοεξανθράκωμα, πιθανότερα μπορεί να ωφελήσει τα αμμώδη εδάφη από ό,τι τα πηλώδη και αργιλώδη εδάφη, αυξάνοντας τη συγκράτηση των θρεπτικών στη ριζόσφαιρα. Αυτή η θεωρία ενισχύεται ακόμα περισσότερο με τα αποτελέσματα από τη μελέτη του Cornelissen et al. (2013), ο οποίος παρατήρησε αύξηση στην απόδοση του καλαμποκιού 233-322% σε ένα αμμώδες έδαφος, 30-42% σε ένα αμμοαργιλοπηλώδες και καθόλου αύξηση σε ένα αργιλοπηλώδες και ιλυοαργιλώδες έδαφος, όταν πρόσθεσε τα ίδια βιοεξανθρακώματα στην ίδια δόση σε όλα τα εδάφη, αποδίδοντας τις αυξημένες αποδόσεις στην αύξηση της CEC και του διαθέσιμου εδαφικού νερού.

Σημαντικές διαφορές (σε επίπεδο $p < 0.05$) δεν παρατηρήθηκαν στις μεταχειρίσεις σε σύγκριση με τον μάρτυρα όταν δεν δέχτηκαν ανόργανη λίπανση (ΧΛ) και στις τρεις συγκομιδές και για τα δύο εδάφη, εκτός από τη μεταχείριση συνδυασμού βιοεξανθρακώματος φλοιών ρυζιού με κόμποστ στην 3η συγκομιδή για το L έδαφος, όπου διαπιστώθηκε αύξηση 57% (Σχήμα 3-1). Οι μη σημαντικές αυξήσεις στο ξηρό βάρος των υπέργειων φυτικών ιστών συμφωνούν με τη μελέτη του Subedi et al. (2016 a) όπου εφαρμόσε βιοεξανθράκωμα από ξύλο σε ένα ιλυοπηλώδες και αμμώδες έδαφος και δεν παρατήρησε σημαντικές αυξήσεις στο ξηρό βάρος του ryegrass. Ωστόσο, σε άλλες μελέτες το ξηρό βάρος του ryegrass αυξήθηκε έως 50.1% όταν προστέθηκε βιοεξανθράκωμα από απόβλητα πουλερικών πυρολυμένα στους 400°C σε ένα ιλυοπηλώδες έδαφος (Subedi et al., 2016a), ενώ η αύξηση κυμάνθηκε από 32 έως 42%, όταν προστέθηκε βιοεξανθράκωμα από *Miscanthus x giganteus* σε συνδυασμό με κοπριά χοίρων σε ένα έδαφος από εύκρατους λειμώνες (Schimmelpfennig et al., 2014). Οι Baronti et al. (2010), De la Rosa et al. (2014) και Fox et al. (2014), παρατήρησαν μία πολύ μεγαλύτερη αύξηση (29-120%, 67-333% και 93-145%, αντίστοιχα) από αυτή του δικού μας πειράματος.

Η προσθήκη ανόργανης λίπανσης χωρίς P, διαδραμάτισε ένα κρίσιμο ρόλο στην αύξηση του ξηρού βάρους του υπέργειου μέρους του φυτού και στα δύο εδάφη, αφού για κάθε μεταχείριση παρατηρήθηκε αύξηση 8.5-114% και 48-164% για τη 2η και 3η συγκομιδή, αντίστοιχα, στο SL έδαφος, και 37-123% και 114-210% για τη 2η και 3η συγκομιδή, αντίστοιχα, στο L έδαφος, σε σύγκριση με τις ίδιες μεταχειρίσεις, όταν δεν δέχτηκαν ανόργανη λίπανση χωρίς P (Σχήμα 3-1). Τα αποτελέσματά της παρούσας μελέτης συμφωνούν με αυτά των Jeffery et al. (2011), οι οποίοι ανέφεραν σημαντικές αυξήσεις στην παραγωγικότητα των καλλιεργειών με εφαρμογή βιοεξανθρακωμάτων σε συνδυασμό με ανόργανη λίπανση, σε σύγκριση με τον μάρτυρα, ο οποίος είχε δεχθεί μόνο ανόργανη λίπανση. Οι Chan et al. (2007) βρήκαν αύξηση στις αποδόσεις έως και 266% στην καλλιέργεια του ρεπανιού, στη μεγαλύτερη δόση βιοεξανθρακώματος 100 t ha⁻¹ και ανόργανη λίπανση 100 kg N ha⁻¹, ενώ όταν προστέθηκαν τα βιοεξανθρακώματα χωρίς ανόργανη λίπανση δεν υπήρξε αύξηση στις αποδόσεις. Επιπρόσθετα, οι Xu et al. (2016) παρατήρησαν ότι το ξηρό βάρος των φυτών *Suaeda salsa* ήταν μικρότερο με εφαρμογή βιοεξανθρακώματος και ανόργανη P λίπανση από ό,τι η εφαρμογή μόνο βιοεξανθρακώματος ή ανόργανης P λίπανσης, ενώ μεταξύ μόνο της εφαρμογής βιοεξανθρακώματος ή μόνο ανόργανης λίπανσης με P, η εφαρμογή βιοεξανθρακώματος έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα. Άλλες μελέτες έχουν επισημάνει ότι η χρήση βιοεξανθρακώματος αυξάνει την αποδοτικότητα της λίπανσης, οπότε και την παραγωγικότητα της καλλιέργειας, είτε μέσω συνδυασμού βιοεξανθρακώματος και κόμποστ (Doan et al., 2015; Kammann et al., 2015; Schulz and Glaser, 2012), είτε μέσω συνδυασμού βιοεξανθρακώματος και ανόργανης λίπανσης (Alburquerque et al., 2013; Kammann et al., 2015; Steiner et al., 2008). Συγκεκριμένα, οι Steiner et al. (2008) παρατήρησαν συγκράτηση των θρεπτικών από την προσθήκη ανόργανης λίπανσης σε εδάφη που είχε εφαρμοστεί οργανική λίπανση. Έχει αναφερθεί επίσης, ότι το βιοεξανθράκωμα προκαλεί μια θετική επίδραση στην ανοργανοποίηση του N, λόγω του ότι το βιοεξανθράκωμα ως

νέα πηγή C διεγείρει τη μικροβιακή δραστηριότητα του εδάφους (Naisse et al., 2015; Zimmerman et al., 2011).

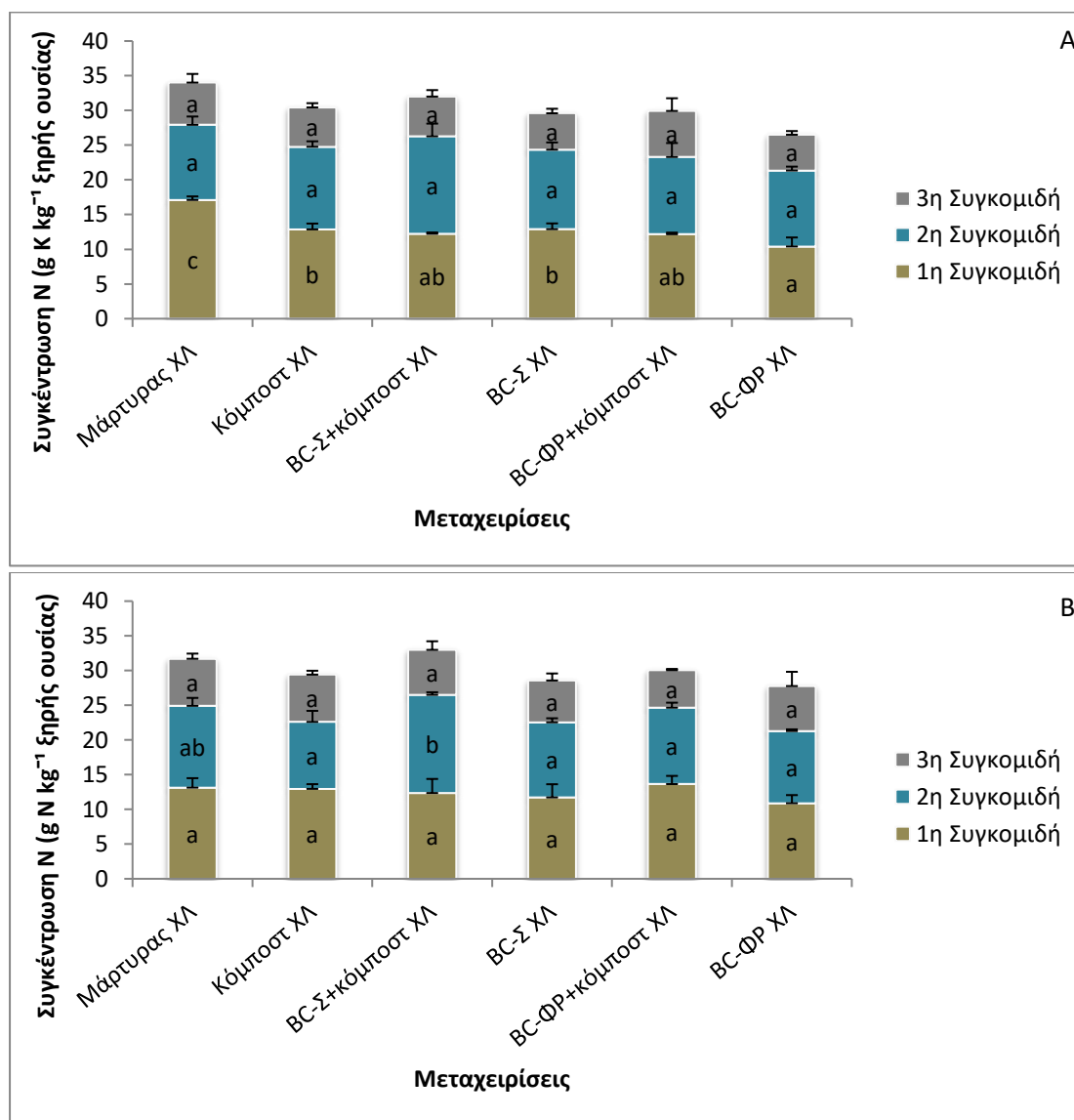


Σχήμα 3-1. Ξηρό βάρος (g ξηρής ουσίας/δοχείο) υπέργειων φυτικών ιστών του *Lolium perenne* L. στο SL (A) και L (B) έδαφος (μέσος όρος±τυπική απόκλιση, n=3). Στα ξηρά βάρη, για κάθε συγκομιδή, εφαρμόστηκε one-way ANOVA. Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε $p<0.05$. Τα κεφαλαία και πεζά γράμματα υποδηλώνουν ότι το κριτήριο εφαρμόστηκε ξεχωριστά σε κάθε πειραματικό σετ (ΛΧΡ και ΧΛ).

3.3.2 Συγκέντρωση μακροθρεπτικών N, P, K, Ca, Mg στους υπέργειους φυτικούς ιστούς και πρόσληψη μακροθρεπτικών από τους υπέργειους φυτικούς ιστούς.

Η συγκέντρωση του N στους υπέργειους φυτικούς ιστούς μειώθηκε σε όλες τις μεταχειρίσεις στην 1η συγκομιδή στο SL έδαφος, ενώ στο L έδαφος δεν επηρεάστηκε σημαντικά, όπως και στις υπόλοιπες συγκομιδές και στα δύο εδάφη (Σχήμα 3-2.). Η πρόσληψη του N από τους υπέργειους φυτικούς ιστούς δεν επηρεάστηκε σημαντικά,

σε σύγκριση με τον μάρτυρα, στην 1η, 2η και 3η συγκομιδή και στα δύο εδάφη (Πίνακας 3-5, 3-6). Οι Fox et al. (2014) παρατήρησαν ότι η συγκέντρωση N στους φυτικούς ιστούς του ryegrass μειώθηκε με την εφαρμογή βιοεξανθρακώματος. Ωστόσο οι Smider and Singh (2014) βρήκαν ότι η συγκέντρωση N στους φυτικούς ιστούς του καλαμποκιού μειωνόταν, αλλά η πρόσληψη του N από το φυτό αυξανόταν σε ένα Ferolsol έδαφος, αποδίδοντάς το στην αύξηση του ξηρού βάρους των φυτών. Στην παρούσα μελέτη η μη αύξηση του ξηρού βάρους στις μεταχειρίσεις που δεν δέχτηκαν ανόργανη λίπανση σε συνδυασμό με τη μειωμένη συγκέντρωση N στους φυτικούς ιστούς είχε ως αποτέλεσμα μειωμένη πρόσληψη N από το φυτό. Οι Chan et al. (2007) διαπίστωσαν ότι η ανάπτυξη των φυτών με την εφαρμογή βιοεξανθρακώματος χωρίς την προσθήκη ανόργανης λίπανσης N παρεμποδίστηκε από παράγοντες διαθεσιμότητας του N στα εδάφη. Επίσης, η μείωση του N στους φυτικούς ιστούς και συγχρόνως η μείωση του ξηρού βάρους των φυτών μπορεί να οφείλεται στη συγκράτηση των θρεπτικών από το βιοεξανθράκωμα, όπως έχει παρατηρηθεί και σε άλλες μελέτες (Laird et al., 2010a; Liang et al., 2006).

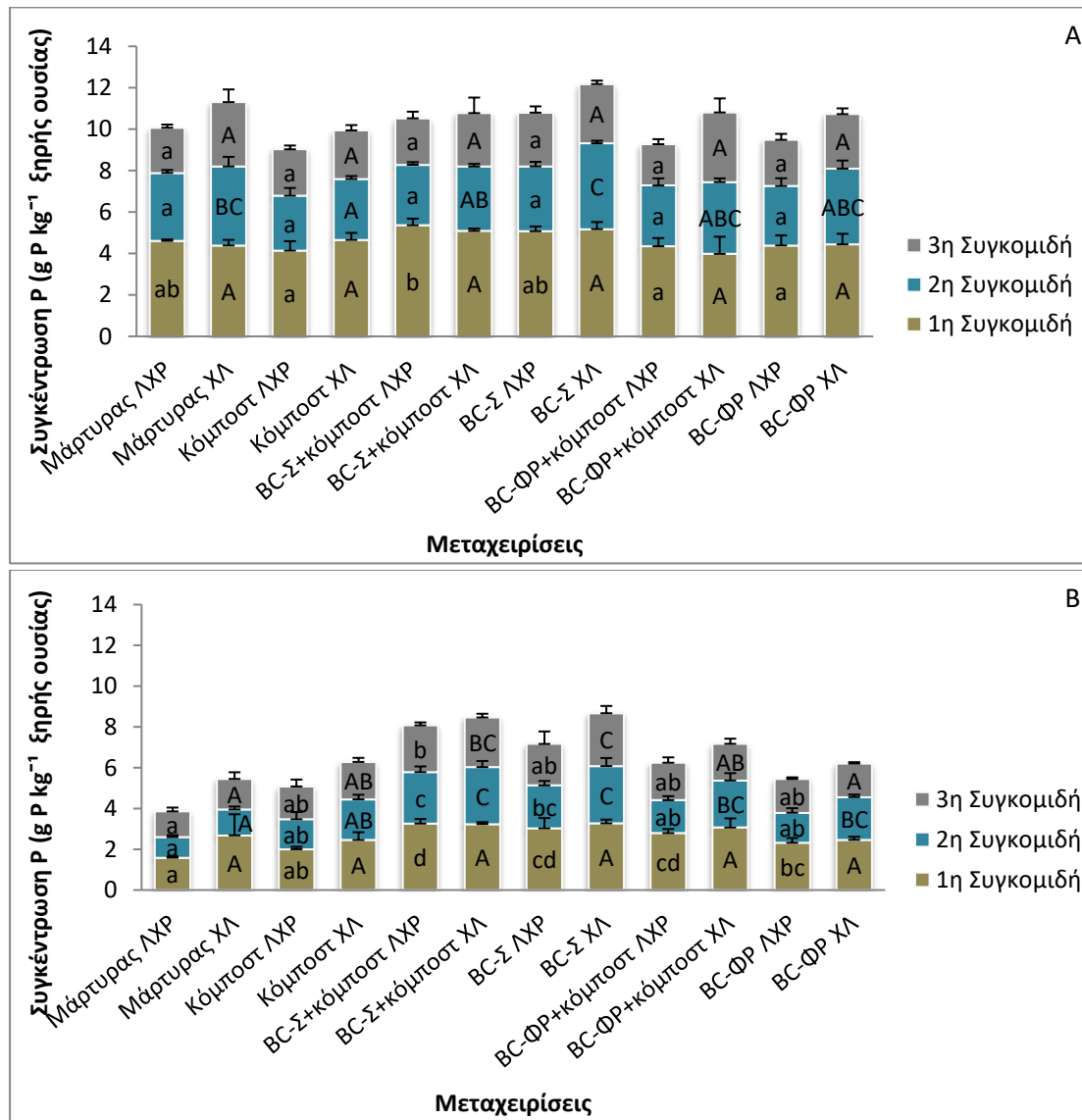


Σχήμα 3-2. Συγκέντρωση N (g N kg^{-1} ξηρής ουσίας) υπέργειων φυτικών ιστών του *Lolium perenne* L. στο SL (A) και L (B) έδαφος (μέσος όρος \pm τυπική απόκλιση, $n=3$). Στα ξηρά βάρη, για κάθε συγκομιδή, εφαρμόστηκε one-way ANOVA. Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε $p<0.05$.

Όσον αφορά στη συγκέντρωση P στους υπέργειους φυτικούς ιστούς, οι μεταχειρίσεις με ανόργανη λίπανση χωρίς P (ΛΧΡ) δεν παρουσίασαν σημαντικές διαφορές (σε επίπεδο $p<0,05$) με τις ίδιες μεταχειρίσεις χωρίς ανόργανη λίπανση (ΧΛ) και στις τρεις συγκομιδές και για τα δύο εδάφη, εκτός από τις μεταχειρίσεις που περιελάμβαναν το βιοεξανθράκωμα των στέμφυλων ή το συνδυασμό βιοεξανθρακώματος φλοιών ρυζιού με κόμποστ, στη 2η συγκομιδή και 3η συγκομιδή, αντίστοιχα, στο SL έδαφος (Σχήμα 3-3). Δεν παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές των συγκεντρώσεων P σε σύγκριση με το μάρτυρα στο SL έδαφος παρουσία ανόργανης λίπανσης σε όλες τις συγκομιδές, ενώ απουσία ανόργανης λίπανσης η μεταχείριση του κόμποστ παρουσίασε μείωση της συγκέντρωσης P στη 2η συγκομιδή (Σχήμα 3-3). Στο L έδαφος παρουσία ανόργανης λίπανσης, όλες οι μεταχειρίσεις εκτός από το κόμποστ παρουσίασαν αύξηση στη συγκέντρωση P σε σύγκριση με τον μάρτυρα στην 1η συγκομιδή, στη 2η συγκομιδή οι μεταχειρίσεις των βιοεξανθρακωμάτων στέμφυλων και συνδυασμού στέμφυλων με κόμποστ και στην 3η συγκομιδή το βιοεξανθράκωμα στέμφυλων με κόμποστ (Σχήμα 3-3). Απουσία ανόργανης λίπανσης, όλες οι μεταχειρίσεις εκτός από το κόμποστ παρουσίασαν αύξηση σε σύγκριση με τον μάρτυρα στην 2η συγκομιδή, ενώ στην 3η συγκομιδή μόνο οι μεταχειρίσεις των βιοεξανθρακωμάτων στέμφυλων και συνδυασμού στέμφυλων με κόμποστ, στο L έδαφος (Σχήμα 3-3). Σε όλες τις συγκομιδές, στο L έδαφος, παρουσία ανόργανης λίπανσης τη μεγαλύτερη πρόσληψη P την παρουσίασε η μεταχείριση του συνδυασμού βιοεξανθρακώματος στέμφυλων με κόμποστ, ενώ απουσία ανόργανης λίπανσης, η μεταχείριση βιοεξανθρακώματος στέμφυλων (Πίνακας 3-4). Η προσθήκη ανόργανης λίπανσης χωρίς P αύξησε την πρόσληψη του P από το φυτό και στα δύο εδάφη, ιδιαίτερα στη 2η και 3η συγκομιδή (Πίνακας 3-4).

Οι Fox et al. (2014) βρήκαν αυξημένες συγκεντρώσεις P στο ryegrass έπειτα από εφαρμογή βιοεξανθρακώματος σε ένα πηλώδες έδαφος και οι Subedi et al. (2016a) σε ένα ιλοπηλώδες έδαφος. Αρκετές άλλες μελέτες έχουν αναφέρει αυξημένες συγκεντρώσεις P σε διάφορες καλλιέργειες με την εφαρμογή βιοεξανθρακώματος τόσο σε αργιλοπηλώδη (Inal et al., 2015), ιλοαργιλώδη (Vaccari et al., 2015), αμμοπηλώδη ή αργιλοπηλώδη εδάφη (Kloss et al., 2014). Επίσης, η θετική επίδραση της εφαρμογής βιοεξανθρακώματος στην πρόσληψη του P από τα φυτά, σε εδάφη με υψηλό pH έχει αναφερθεί και σε άλλες μελέτες (Gunes et al., 2014; Inal et al., 2015). Στη μελέτη των Marks et al. (2014) βρέθηκε ότι η συγκέντρωση του P σε ένα ασβεστούχο έδαφος που έχει δεχθεί την προσθήκη βιοεξανθρακώματος εξαρτάται από το pH και το ποσοστό Ca που υπάρχει στο έδαφος. Επίσης, οι Wang et al. (2012) στη δική τους μελέτη αναφέρουν ότι η διαθεσιμότητα του P επηρεάζεται από τα σύμπλοκα Ca/Mg-P περισσότερο από ότι των Al/Ca-P σε ένα πείραμα με ryegrass, όπου προστέθηκε βιοεξανθράκωμα σε ένα αμμώδες έδαφος με $\text{pH}=5.8$.

Οι πιθανοί μηχανισμοί ενίσχυσης της διαθεσιμότητας του P στα εδάφη από την εφαρμογή του βιοεξανθρακώματος είναι (α) η άμεση απελευθέρωση διαλυτών αλάτων P από το βιοεξανθράκωμα, (β) η συγκράτηση Fe, Ca, and Al στο έδαφος μέσω της προσθήκης βιοεξανθρακώματος, (γ) η αυξημένη CEC, (δ) οι διακυμάνσεις του pH στο έδαφος έπειτα από την εφαρμογή του βιοεξανθρακώματος επηρεάζοντας τους μηχανισμούς προσρόφησης και εκρόφησης (Singh et al. 2015), (ε) η ενεργοποίηση μικροοργανισμών διαλυτοποίησης και ανοργανοποίησης του P (Fox et al., 2014; Vanek and Lehmann, 2015). Στην παρούσα μελέτη φαίνεται ότι η αύξηση της συγκέντρωσης του P στους υπέργειους φυτικούς ιστούς στο L έδαφος, κυρίως από την προσθήκη βιοεξανθρακώματος στέμφυλων και του συνδυασμού βιοεξανθρακώματος στέμφυλων με κόμποστ οφείλεται στο συνδυασμό των παραπάνω μηχανισμών. Η προσθήκη βιοεξανθρακώματος στέμφυλων πιθανόν να αύξησε τη συγκέντρωση P στους υπέργειους φυτικούς ιστούς λόγω της υψηλότερης συγκέντρωσης P που διαθέτει το βιοεξανθράκωμα στέμφυλων σε σχέση με το βιοεξανθράκωμα φλοιών ρυζιού.



Σχήμα 3-3. Συγκέντρωση P (g P kg⁻¹ ξηρής ουσίας) υπέργειων φυτικών ιστών του *Lolium perenne* L. στο SL (A) και L (B) έδαφος (μέσος όρος±τυπική απόκλιση, n=3). Στα ξηρά βάρη, για κάθε συγκομιδή, εφαρμόστηκε one-way ANOVA. Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε $p<0.05$. Τα κεφαλαία και πεζά γράμματα υποδηλώνουν ότι το κριτήριο εφαρμόστηκε ξεχωριστά σε κάθε πειραματικό σετ (ΛΧΡ και ΧΛ).

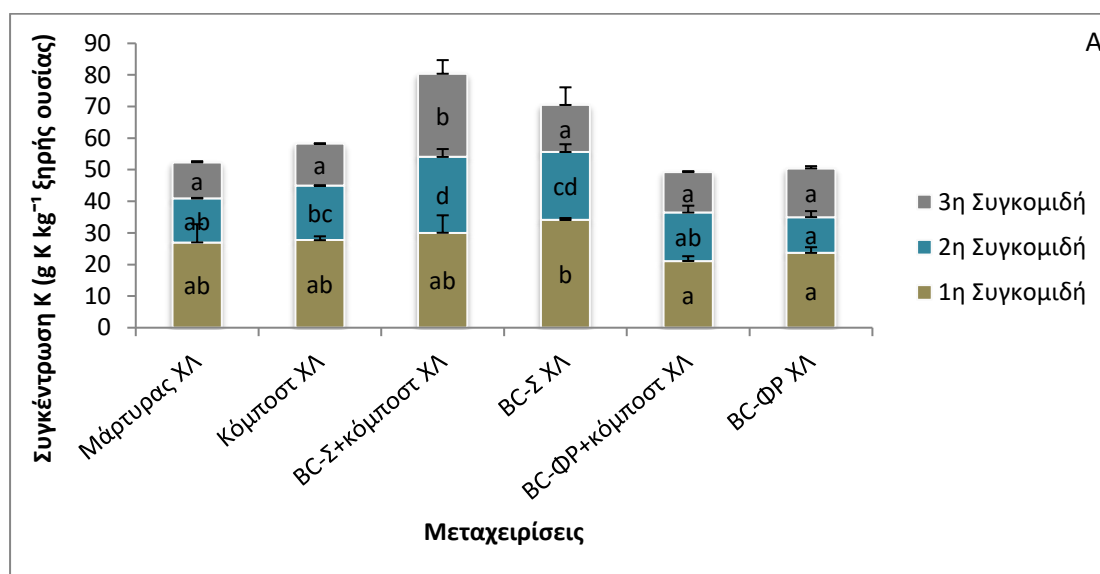
Πίνακας 3-4. Πρόσληψη P (mg P/ δοχείο) από τους υπέργειους φυτικούς ιστούς του *Lolium perenne* L. στο SL και L έδαφος (μέσος όρος±τυπική απόκλιση, n=3)

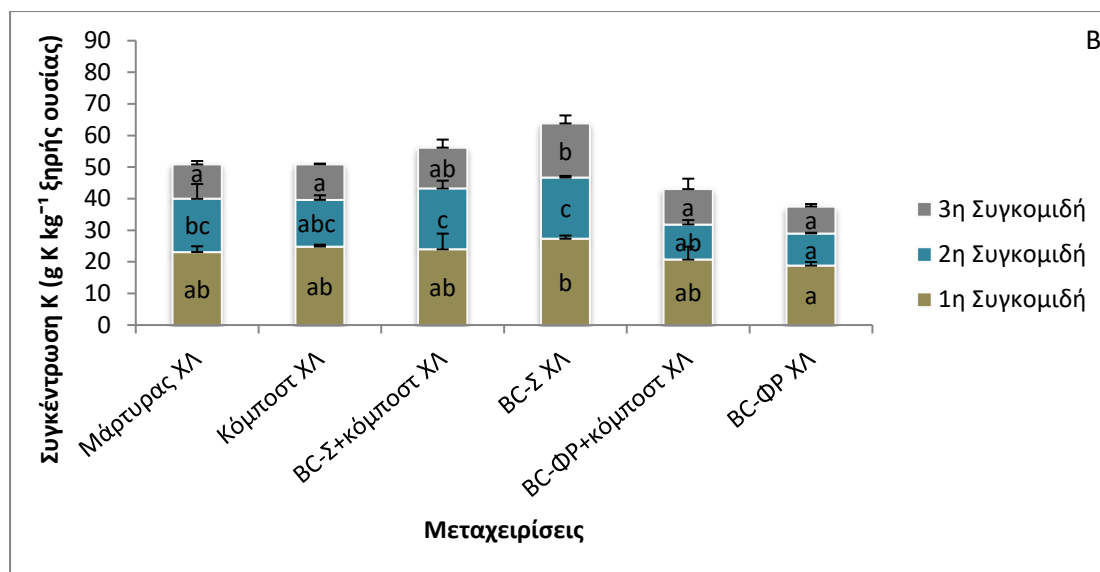
	SL			L		
Μεταχειρίσεις	P			P		
	mg / δοχείο					
	1η Συγκομιδή	2η Συγκομιδή	3η Συγκομιδή	1η Συγκομιδή	2η Συγκομιδή	3η Συγκομιδή
Μάρτυρας ΛΧΡ	6.69 ± 1.06 a	3.91 ± 0.42 a	3.91 ± 0.69 a	2.27 ± 0.078 a	1.37 ± 0.16 a	3.22 ± 0.81 a
Μάρτυρας ΧΛ	4.80 ± 0.63 AB	2.21 ± 0.81 A	2.80 ± 0.30 A	2.68 ± 1.03 A	0.92 ± 0.11 A	1.42 ± 0.48 A
Κόμποστ ΛΧΡ	6.35 ± 0.89 a	3.96± 0.57 a	6.42 ± 1.29 ab	2.47 ± 0.24 a	1.84 ± 0.08 ab	4.22 ± 1.54 ab
Κόμποστ ΧΛ	5.78 ± 0.60 AB	2.07 ± 0.10 A	2.83 ± 0.42 A	3.25 ± 0.38 A	1.76 ± 0.36 BC	1.89 ± 0.27 AB
BC-Σ+ κόμποστ ΛΧΡ	8.26 ± 0.84 a	4.57 ± 0.50 a	6.48 ± 0.74 ab	5.43 ± 0.76 b	3.85 ± 0.43 e	7.04 ± 0.66 b
BC-Σ+ κόμποστ ΧΛ	5.74± 0.66 AB	2.29 ± 0.73 A	3.44 ± 0.80 A	4.30 ± 0.71 A	2.49 ± 0.39 C	2.96 ± 0.28 C
BC-Σ ΛΧΡ	8.45 ± 0.40 a	4.39 ± 0.61 a	7.70 ± 0.99 b	5.37 ± 1.28 b	3.44 ± 0.49 de	6.10 ± 2.27 ab
BC-Σ ΛΧΡ	6.55 ± 0.53 B	3.31 ± 0.33 A	3.52 ± 0.48 A	3.27 ± 0.31 A	2.05 ± 0.36 BC	2.98 ± 0.49 C
BC-ΦΡ+ κόμποστ ΛΧΡ	8.38 ± 0.59 a	4.58 ± 1.04 a	5.67 ± 1.05 ab	3.96 ± 0.27 ab	2.78± 0.06 cd	5.74 ± 0.92 ab
BC-ΦΡ+ κόμποστ ΧΛ	4.32 ± 0.84 A	3.13± 0.50 A	4.42 ± 1.32 A	3.67 ± 0.47 A	1.89 ± 0.10 BC	2.62 ± 0.22 BC
BC-ΦΡ ΛΧΡ	7.47 ± 1.36 a	4.47 ± 0.36 a	7.06 ± 1.00 b	4.38 ± 0.50 b	2.19 ± 0.18 bc	5.10 ± 0.34 ab
BC-ΦΡ ΧΛ	6.56 ± 1.32 B	3.32 ± 0.72 A	3.12 ± 0.20 A	3.10 ± 0.44 A	1.45 ± 0.35 AB	1.64 ± 0.19 A

Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε $p<0.05$. Τα κεφαλαία και πεζά γράμματα υποδηλώνουν ότι το κριτήριο εφαρμόστηκε ξεχωριστά σε κάθε πειραματικό σετ (ΛΧΡ και ΧΛ).

Ουδεμία μεταχείριση έδειξε στατιστικώς σημαντική διαφορά στη συγκέντρωση Κ στους υπέργειους φυτικούς ιστούς, σε σύγκριση με τον μάρτυρα, στο SL έδαφος στην 1η συγκομιδή, ενώ στη 2η συγκομιδή στη μεταχείριση του βιοεξανθρακώματος στέμφυλων και του συνδυασμού βιοεξανθρακώματος στέμφυλων με κόμποστ, καθώς και στην 3η συγκομιδή του συνδυασμού βιοεξανθρακώματος στέμφυλων με κόμποστ, παρατηρήθηκε αύξηση (Σχήμα 3-4). Η συγκέντρωση Κ αυξήθηκε σημαντικά μόνο από τη μεταχείριση του βιοεξανθρακώματος στέμφυλων σε σύγκριση με τον μάρτυρα

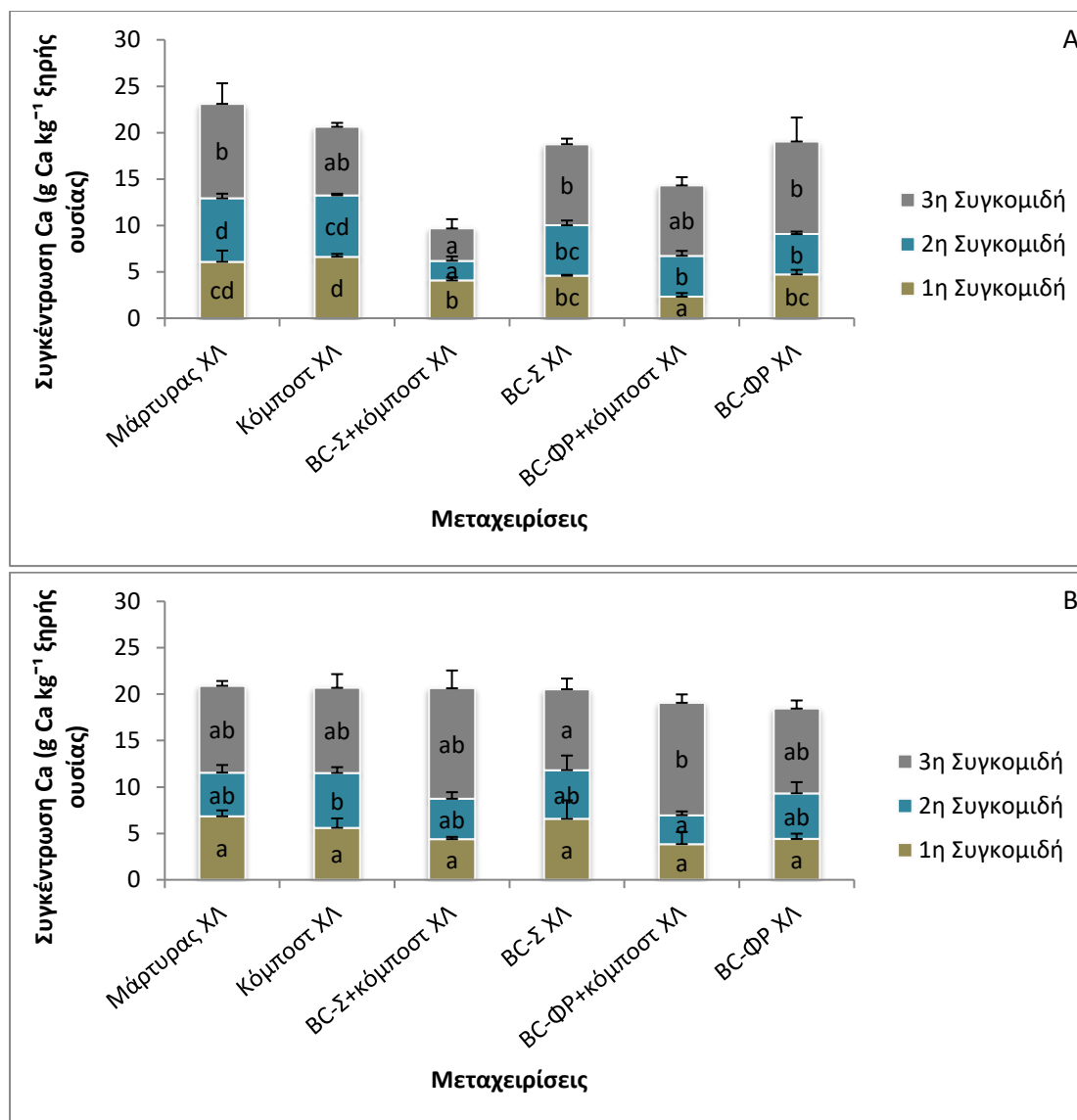
στην 3η συγκομιδή, ενώ στη 2η συγκομιδή μειώθηκε μόνο από τη μεταχείριση του βιοεξανθρακώματος φλοιών ρυζιού, με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις να αφήνουν ανεπηρέαστη τη συγκέντρωση K σε όλες τις συγκομιδές, στο L έδαφος (Σχήμα 3-4). Όσον αφορά στην πρόσληψη του K από τους υπέργειους φυτικούς ιστούς, στη 2η και 3η συγκομιδή αυξήθηκε σημαντικά από το συνδυασμό βιοεξανθρακώματος στέμφυλων με κόμποστ, ενώ στην 1η συγκομιδή από το βιοεξανθράκωμα στέμφυλων, στο SL έδαφος (Πίνακας 3-5). Η πρόσληψη K από τους υπέργειους φυτικούς ιστούς δεν επηρεάστηκε σημαντικά σε όλες τις μεταχειρίσεις στο L έδαφος (Πίνακας 3-6). Οι Subedi et al. (2016a) βρήκαν μεγαλύτερη πρόσληψη K από τους φυτικούς ιστούς του ryegrass, όταν εφαρμόστηκαν βιοεξανθράκωματα από κοπριές ζώων σε ένα ιλυοπηλώδες έδαφος (υψηλή συγκέντρωση Ca), σε σχέση με ένα αμμώδες έδαφος, ωστόσο αυτή η αύξηση οφειλόταν κυρίως στο αυξημένο ξηρό βάρος του φυτού στο ιλυοπηλώδες έδαφος και όχι στη συγκέντρωση του K στο έδαφος όπου, ήταν 1.6 φορές μεγαλύτερη στο αμμώδες έδαφος, γεγονός που επιβεβαιώνει την ανταγωνιστικότητα του Ca επί του K. Επίσης, οι Fox et al. (2014) βρήκαν αυξημένες συγκεντρώσεις K στους ιστούς του ryegrass έπειτα από την προσθήκη βιοεξανθρακώματος σε ένα πηλώδες έδαφος με pH=6. Η αύξηση του K στους φυτικούς ιστούς έπειτα από την προσθήκη των βιοεξανθρακωμάτων στο SL έδαφος σε σχέση με το L έδαφος (υψηλό ποσοστό Ca) επιβεβαιώνει τη θεωρία της ανταγωνιστικότητας του K με το Ca. Επιπρόσθετα, τα υψηλά ποσοστά K στο βιοεξανθράκωμα στέμφυλων και στο κόμποστ φαίνεται ότι δρουν συνεργιστικά και επιδρούν περισσότερο στο φυτό σε σχέση με το βιοεξανθράκωμα φλοιών ρυζιού. Οι Glaser et al. (2002) and Lehmann et al. (2003) έχουν δείξει σε μελέτες τους ότι υπάρχει άμεσος μηχανισμός απελευθέρωσης P και K από πλούσια σε τέφρα βιοεξανθρακώματα.





Σχήμα 3-4. Συγκέντρωση K (g K kg^{-1} ξηρής ουσίας) υπέργειων φυτικών ιστών του *Lolium perenne* L. στο SL (A) και L (B) έδαφος (μέσος όρος \pm τυπική απόκλιση, $n=3$). Στα ξηρά βάρη, για κάθε συγκομιδή, εφαρμόστηκε one-way ANOVA. Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε $p<0.05$.

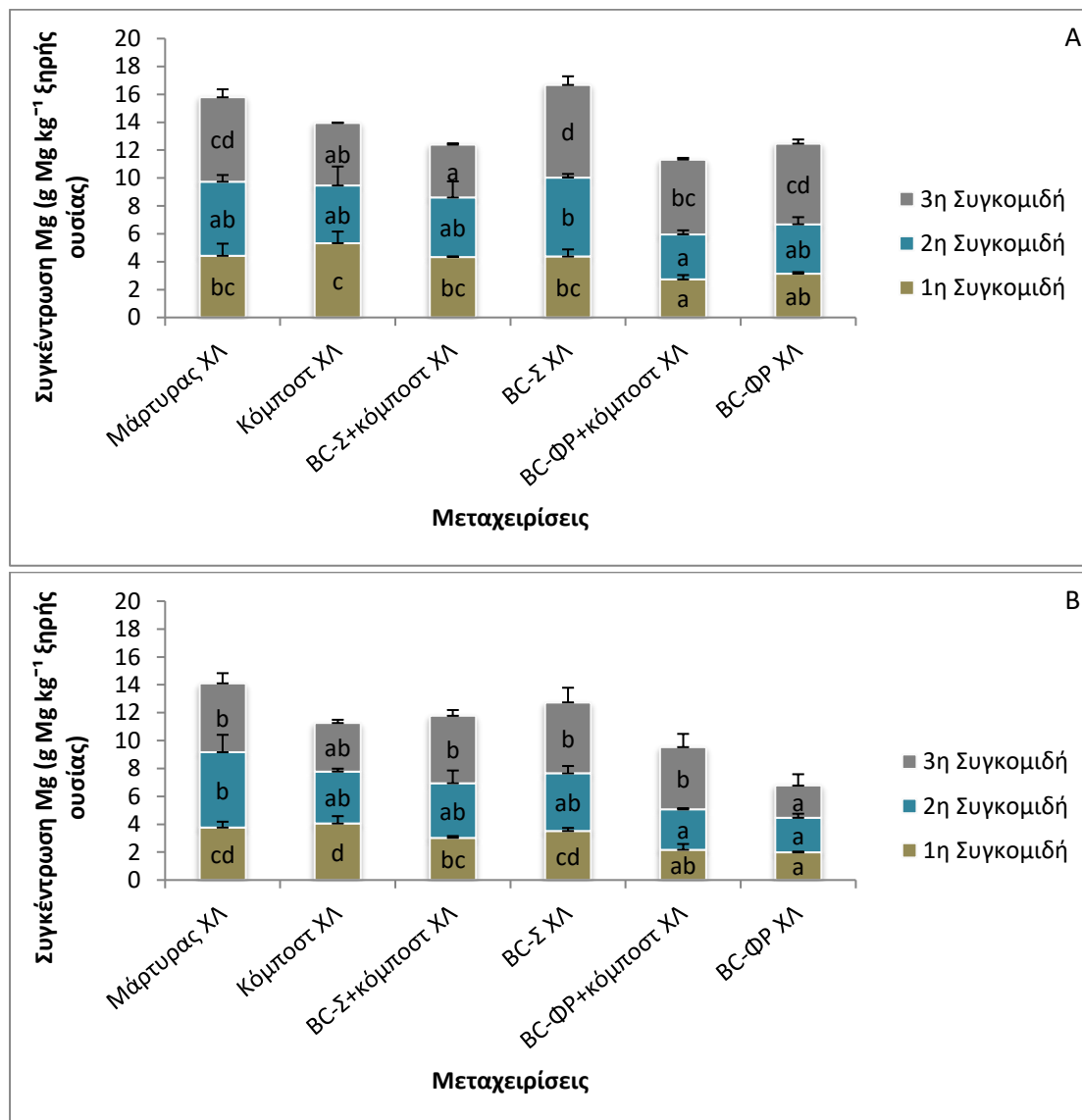
Η συγκέντρωση Ca στους υπέργειους φυτικούς ιστούς μειώθηκε σημαντικά στην 1η και 2η συγκομιδή και συγκεκριμένα στις μεταχειρίσεις του συνδυασμού βιοεξανθρακώματος στέμφυλων με κόμποστ και του συνδυασμού βιοεξανθρακώματος φλοιών ρυζιού με κόμποστ στην 1η συγκομιδή, στο SL έδαφος. Στη 2η συγκομιδή όλες οι μεταχειρίσεις εκτός από το κόμποστ παρουσίασαν μείωση, ενώ στην 3η συγκομιδή μόνο η μεταχείριση του συνδυασμού βιοεξανθρακώματος στέμφυλων με κόμποστ, στο SL έδαφος (Σχήμα 3-5). Στο L έδαφος δεν παρατηρήθηκε καμία σημαντική μεταβολή στη συγκέντρωση του Ca στις τρεις συγκομιδές σε όλες τις μεταχειρίσεις σε σύγκριση με τον μάρτυρα (Σχήμα 3-5). Όσον αφορά στην πρόσληψη του Ca από τους υπέργειους φυτικούς ιστούς, παρατηρήθηκε μείωση στις μεταχειρίσεις του συνδυασμού βιοεξανθρακώματος φλοιών ρυζιού με κόμποστ και του συνδυασμού βιοεξανθρακώματος στέμφυλων με κόμποστ, στην 1η και 2η συγκομιδή αντίστοιχα, στο SL έδαφος, ενώ οι ίδιες μεταχειρίσεις αύξησαν την πρόσληψη Ca από τους φυτικούς ιστούς στην 3η συγκομιδή στο L έδαφος (Πίνακας 3-5, 3-6). Οι Fox et al. (2014) βρήκαν μειώσεις στις συγκεντρώσεις Ca στους φυτικούς ιστούς έπειτα από την προσθήκη των βιοεξανθρακωμάτων σε ένα πηλώδες έδαφος με $\text{pH}=6$. Ωστόσο, οι Subedi et al. (2016a) παρατήρησαν αύξηση στη συγκέντρωση του Ca σε ένα ιλυοπηλώδες έδαφος και μείωση σε ένα αμμώδες έδαφος ($15\% \text{ CaCO}_3$), αποδίδοντας τη μείωση στην αύξηση του pH (>8.5) και στη δημιουργία αδιάλυτων αλάτων Ca-P ή την κατακρήμνιση του Ca με τη μορφή CaCO_3 . Πιθανόν οι μειώσεις στις συγκεντρώσεις του Ca έπειτα από την προσθήκη των βιοεξανθρακωμάτων στο SL έδαφος να οφείλονται στις ανταγωνιστικές σχέσεις του K με το Ca, αφού οι συγκεντρώσεις του K στο συγκεκριμένο έδαφος αυξήθηκαν.



Σχήμα 3-5. Συγκέντρωση Ca (g Ca kg⁻¹ ξηρής ουσίας) υπέργειων φυτικών ιστών του *Lolium perenne* L. στο SL (A) και L (B) έδαφος (μέσος όρος±τυπική απόκλιση, n=3). Στα ξηρά βάρη, για κάθε συγκομιδή, 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 Mg στους υπέργειους φυτικούς ιστούς, δε μεταβλήθηκε σημαντικά στις τρεις συγκομιδές σε όλες τις μεταχειρίσεις σε σύγκριση με το μάρτυρα, εκτός από κάποιες μειώσεις στη μεταχείριση του συνδυασμού βιοεξανθρακώματος φλοιών ρυζιού με κόμποστ στην 1η συγκομιδή, και του συνδυασμού βιοεξανθρακώματος στέμφυλων με κόμποστ και κόμποστ στην 3η συγκομιδή, στο SL έδαφος (Σχήμα 3-6). Η συγκέντρωση Mg, επίσης, δεν επηρεάστηκε σημαντικά στις τρεις συγκομιδές σε όλες τις μεταχειρίσεις σε σύγκριση με τον μάρτυρα, εκτός από κάποιες μειώσεις στις μεταχειρίσεις του βιοεξανθρακώματος φλοιών ρυζιού και του συνδυασμού βιοεξανθρακώματος φλοιών ρυζιού με κόμποστ στην 1η συγκομιδή και 2η συγκομιδή, και του βιοεξανθρακώματος φλοιών ρυζιού στην 3η συγκομιδή, στο L έδαφος (Σχήμα 3-6). Όσον αφορά στην πρόσληψη του Mg από τους υπέργειους

φυτικών ιστών δεν παρατηρήθηκε καμία σημαντική μεταβολή σε όλες τις μεταχειρίσεις και στα δύο εδάφη εκτός από τη μεταχείριση βιοεξανθρακώματος φλοιών ρυζιού στη 2η συγκομιδή στο L έδαφος (Πίνακας 3-5, 3-6). Οι Fox et al. (2014) παρατήρησαν μειώσεις στις συγκεντρώσεις Mg στους φυτικούς ιστούς του ryegrass με την εφαρμογή βιοεξανθρακώματος σε ένα πηλώδες έδαφος με pH=6. Ωστόσο, οι Subedi et al. (2016a) βρήκαν αυξημένες συγκεντρώσεις ανταλλάξιμου Mg με την εφαρμογή βιοεξανθρακωμάτων σε ένα ιλυοπηλώδες και ένα αμμώδες έδαφος. Πιθανόν, στο δικό μας πείραμα το Ca στα δύο εδάφη, αλλά ειδικότερα στο πηλώδες να έδρασε ανταγωνιστικά με το Mg και να υπήρξε μια δέσμευση Mg στο έδαφος στις μεταχειρίσεις φλοιών ρυζιού με ή χωρίς κόμποστ.



Σχήμα 3-6. Συγκέντρωση Mg (g Mg kg^{-1} ξηρής ουσίας) υπέργειων φυτικών ιστών του *Lolium perenne* L. στο SL (A) και L (B) έδαφος (μέσος όρος \pm τυπική απόκλιση, $n=3$). Στα ξηρά βάρη, για κάθε συγκομιδή, 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. Πρόσληψη N, K, Ca, Mg (mg / δοχείο) από τους υπέργειους φυτικούς ιστούς του *Lolium perenne* L. στο SL έδαφος (μέσος όρος±τυπική απόκλιση, n=3)

SL												
Μεταχειρίσεις	N			K			Ca			Mg		
	mg / δοχείο											
	1η Συγκομιδή	2η Συγκομιδή	3η Συγκομιδή	1η Συγκομιδή	2η Συγκομιδή	3η Συγκομιδή	1η Συγκομιδή	2η Συγκομιδή	3η Συγκομιδή	1η Συγκομιδή	2η Συγκομιδή	3η Συγκομιδή
Μάρτυρας ΧΛ	18.82±3.42a	6.08±1.56a	5.48±0.61a	29.17±4.45ab	7.86±2.07a	10.61±2.51a	6.71 ± 2.05bc	3.85±0.91b	9.51±3.03ab	4.77±0.52abc	3.06±1.06a	5.56±0.99a
Κόμποστ ΧΛ	15.92±0.38a	8.35±1.49a	6.83±1.25a	34.37±2.23bc	12.06±1.71abc	15.94±1.29a	8.20± 0.12c	4.64±0.74b	8.88±1.24ab	6.63±1.31c	2.85±0.87a	5.38±0.49a
BC-Σ+ κόμποστ ΧΛ	13.77±1.20a	10.10±2.21a	7.68±1.05a	33.46±3.22bc	17.77±5.79c	35.40±5.91b	4.61 ± 0.80ab	1.49±0.20a	4.69±1.37a	4.89±0.46bc	3.26±1.53a	5.16±1.04a
BC-Σ ΧΛ	16.32±0.96a	9.10±0.58a	6.46±1.01a	43.21±2.66c	17.07±1.21bc	18.90±9.12a	5.79± 0.24bc	4.37±0.90b	10.72±0.59ab	5.52±0.54bc	4.53±0.54a	8.23±1.70a
BC-ΦΡ+ κόμποστ ΧΛ	13.38±2.36a	9.92±1.18a	8.76±3.33a	23.12±3.48a	13.74±1.99abc	16.64±2.23a	2.59 ± 0.82a	3.99±0.80b	9.94±2.46ab	2.96±0.22a	2.89±0.31a	6.98±1.02a
BC-ΦΡ ΧΛ	15.33±3.17a	9.86±1.34a	6.13±0.24a	34.83±5.48bc	10.07±0.76ab	18.42±2.25a	6.88 ± 0.50bc	3.90±0.21b	12.23±4.85b	4.60±0.51ab	3.22±0.82a	6.96±1.32a

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

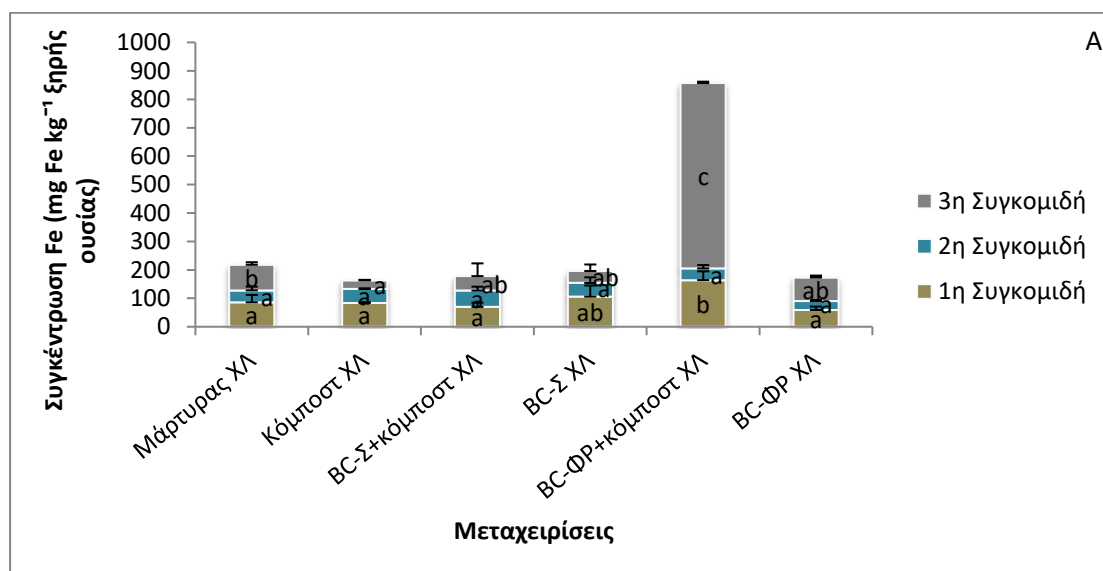
Πίνακας 3-6. Πρόσληψη N, K, Ca, Mg (mg / δοχείο) από τους υπέργειους φυτικούς ιστούς του *Lolium perenne* L. στο L έδαφος (μέσος όρος±τυπική απόκλιση, n=3)

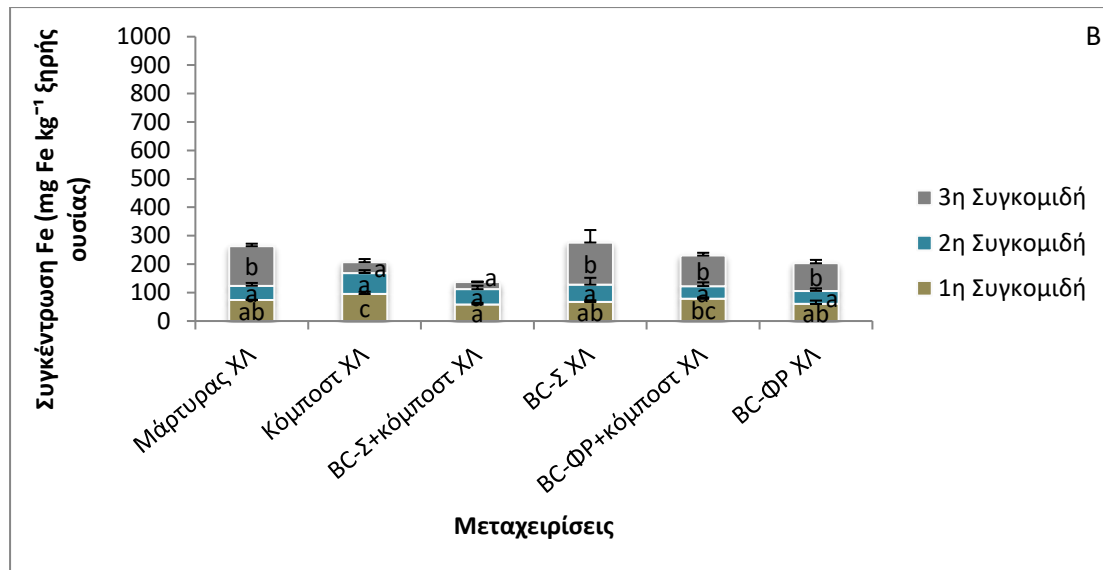
L												
Μεταχειρίσεις	N			K			Ca			Mg		
	mg / δοχείο											
	1η Συγκομιδή	2η Συγκομιδή	3η Συγκομιδή	1η Συγκομιδή	2η Συγκομιδή	3η Συγκομιδή	1η Συγκομιδή	2η Συγκομιδή	3η Συγκομιδή	1η Συγκομιδή	2η Συγκομιδή	3η Συγκομιδή
Μάρτυρας ΧΛ	13.13±1.36ab	8.71±2.03ab	6.39±1.73a	23.10±1.82a	12.08±2.37ab	10.12±1.76ab	6.84±0.64a	3.45±0.84ab	8.69±1.14a	3.76±0.42ab	3.95±1.10b	4.55±0.49ab
Κόμποστ ΧΛ	17.22±0.65b	8.46±1.39ab	7.06±1.42a	33.07±2.10a	13.50±4.99ab	11.63±1.76ab	7.42 ± 1.09a	5.24±1.10b	9.58±2.79ab	5.44±1.14b	3.35±1.02ab	3.58±0.33ab
BC-Σ+ κόμποστ ΧΛ	16.29±2.71ab	12.69±2.49b	7.89±1.73a	32.01±9.71a	17.40±5.14b	15.67±3.08ab	5.81± 0.97a	3.84±0.37ab	14.40±1.91bc	4.03±0.71ab	3.41±0.05ab	5.85±0.12b
BC-Σ ΧΛ	11.72±2.16a	7.96±1.53ab	6.93±1.32a	27.38±3.69a	14.16±1.89ab	20.29±6.43b	6.57±2.07a	3.77±0.95ab	10.04±1.79ab	3.50±0.15a	3.02±0.49ab	6.02±1.99b
BC-ΦΡ+ κόμποστ ΧΛ	16.45±2.79ab	9.10±1.08ab	7.93±1.09a	24.77±4.78a	9.13±0.90ab	16.56±5.65ab	4.61±1.58a	2.56±0.23a	17.68±0.71c	2.59±0.48a	2.41±0.43ab	6.62±2.01b
BC-ΦΡ ΧΛ	13.59±0.29ab	7.26±1.94a	6.38±1.54a	23.77±4.07a	7.16±2.11a	8.41±0,12a	5.49±0.22a	3.42±1.11ab	9.18±1.79a	2.49±0.23a	1.76±0.60a	2.26±0.57a

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

3.3.3 Συγκέντρωση μικροθρεπτικών Fe, Mn, Zn στους υπέργειους φυτικούς ιστούς και πρόσληψη μικροθρεπτικών από τους υπέργειους φυτικούς ιστούς

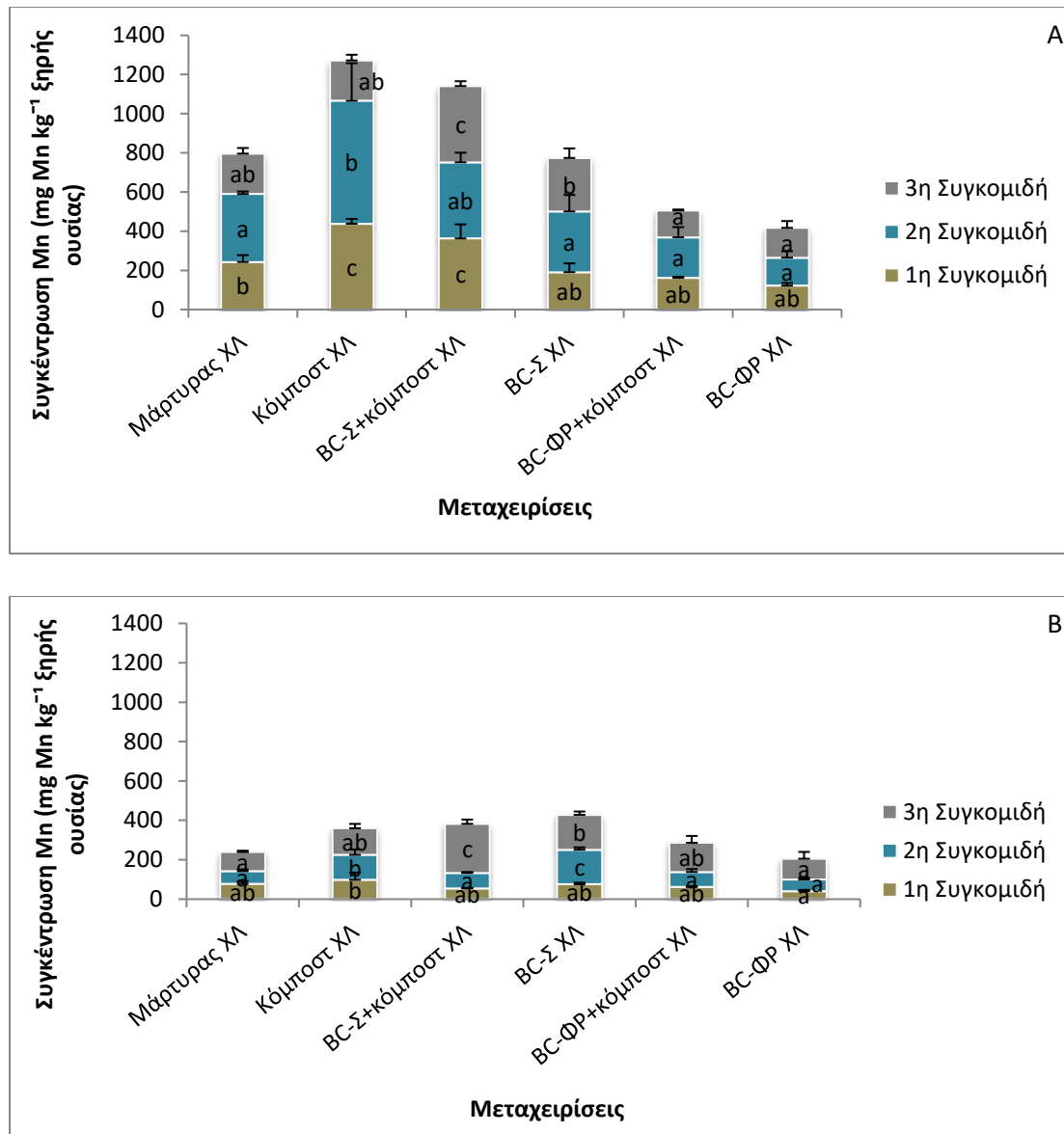
Η συγκέντρωση Fe στους υπέργειους φυτικούς ιστούς, επίσης, δεν παρουσίασε καμία σημαντική μεταβολή σε όλες τις μεταχειρίσεις σε σύγκριση με τον μάρτυρα και στις τρεις συγκομιδές, εκτός από αυξήσεις στη μεταχείριση του συνδυασμού βιοεξανθρακώματος φλοιών ρυζιού με κόμποστ στην 1η συγκομιδή και στην 3η συγκομιδή, και μείωση στη μεταχείριση κόμποστ στην 3η συγκομιδή, στο SL έδαφος (Σχήμα 3-7). Η συγκέντρωση Fe δεν μεταβλήθηκε σημαντικά σε όλες τις μεταχειρίσεις σε σύγκριση με τον μάρτυρα και στις τρεις συγκομιδές, εκτός από αύξηση στη μεταχείριση του κόμποστ στην 1η συγκομιδή και μείωση στη μεταχείριση του συνδυασμού βιοεξανθρακώματος στέμφυλων με κόμποστ και κόμποστ στην 3η συγκομιδή, στο L έδαφος (Σχήμα 3-7). Όσον αφορά στην πρόσληψη του Fe από τους υπέργειους φυτικούς ιστούς, δεν παρατηρήθηκε καμία σημαντική μεταβολή σε όλες τις μεταχειρίσεις και στα δύο εδάφη, εκτός από αύξηση στη μεταχείριση του συνδυασμού φλοιών ρυζιού με κόμποστ στην 3η συγκομιδή, στο SL έδαφος και στη μεταχείριση του κόμποστ στο L έδαφος (Πίνακας 3-7, 3-8). Οι Fox et al. (2014) παρατήρησαν μείωση στη συγκέντρωση Fe, Mn, Zn στους υπέργειους φυτικούς ιστούς με την προσθήκη βιοεξανθρακωμάτων σε ένα πηλώδες έδαφος με pH=6. Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα το βιοεξανθράκωμα φλοιών ρυζιού σε συνδυασμό με κόμποστ επηρέασε θετικά τη συγκέντρωση του Fe στους υπέργειους φυτικούς ιστούς στο SL έδαφος πιθανόν λόγω του pH του βιοεξανθρακώματος φλοιών ρυζιού (pH=7) και του κόμποστ (pH=7.5-8.5).





Σχήμα 3-7. Συγκέντρωση Fe (mg Fe kg^{-1} ξηράς ουσίας) υπέργειων φυτικών ιστών του *Lolium perenne* L. στο SL (A) και L (B) έδαφος (μέσος όρος \pm τυπική απόκλιση). Στα ξηρά βάρη, για κάθε συγκομιδή, εφαρμόστηκε one-way ANOVA. Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε $p < 0.05$.

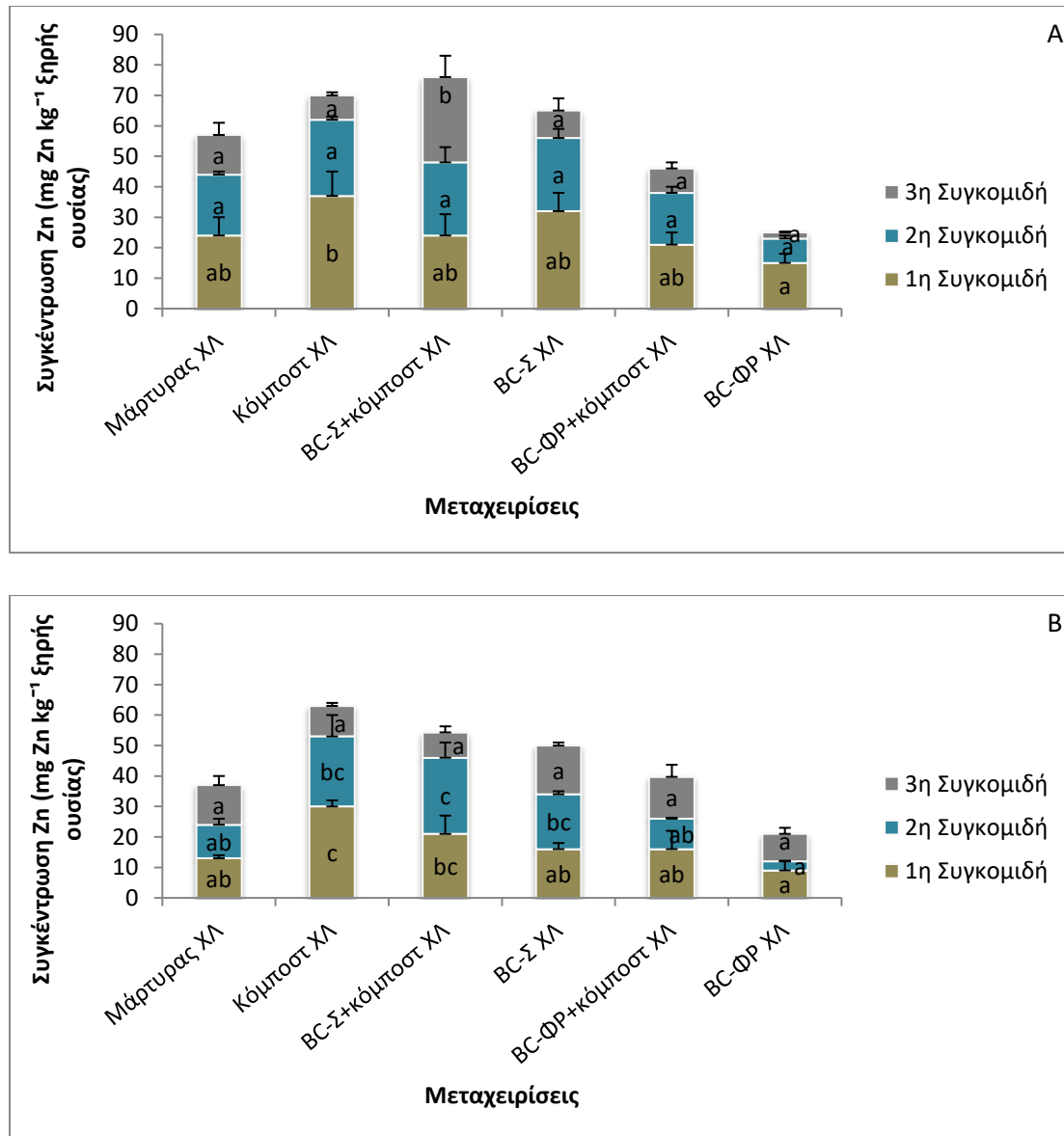
Η συγκέντρωση Mn στους υπέργειους φυτικούς ιστούς αυξήθηκε σημαντικά από τις μεταχειρίσεις του κόμποστ σε σύγκριση με τον μάρτυρα στην 1η και 2η συγκομιδή, του συνδυασμού του βιοεξανθρακώματος στέμφυλων με κόμποστ στην 1η και 3η συγκομιδή στο SL έδαφος (Σχήμα 3-8). Οι μεταχειρίσεις του βιοεξανθρακώματος στέμφυλων στη 2η και 3η συγκομιδή, του κόμποστ στη 2η συγκομιδή και του συνδυασμού του βιοεξανθρακώματος στέμφυλων με κόμποστ στην 3η συγκομιδή αύξησαν τη συγκέντρωση του Mn σε σύγκριση με τον μάρτυρα, στο L έδαφος (Σχήμα 3-8). Όσον αφορά στην πρόσληψη του Mn από τους υπέργειους φυτικούς ιστούς παρατηρήθηκε αύξηση στις μεταχειρίσεις κόμποστ στην 1η και 2η συγκομιδή και συνδυασμού βιοεξανθρακώματος στέμφυλων με κόμποστ στην 3η συγκομιδή, στο SL έδαφος (Πίνακας 3-7). Όσον αφορά στην πρόσληψη του Mn από τους υπέργειους φυτικούς ιστούς, παρατηρήθηκε αύξηση στις μεταχειρίσεις κόμποστ και βιοεξανθρακώματος στέμφυλων στη 2η συγκομιδή και συνδυασμού στέμφυλων με κόμποστ και βιοεξανθρακώματος φλοιών ρυζιού με κόμποστ στην 3η συγκομιδή, στο L έδαφος (Πίνακας 3-8). Οι Fox et al. (2014) παρατήρησαν μείωση στη συγκέντρωση Mn στους υπέργειους φυτικούς ιστούς με την προσθήκη βιοεξανθρακωμάτων σε ένα πηλώδες έδαφος με $\text{pH}=6$. Πιθανόν το κόμποστ και η συνδυαστική δράση του κόμποστ με τα βιοεξανθρακώματα που είχαν υψηλές συγκεντρώσεις Mn να ήταν η αιτία αύξησης των συγκεντρώσεων Mn στους υπέργειους φυτικούς ιστούς και στα δύο εδάφη.



Σχήμα 3-8. Συγκέντρωση Mn (mg Mn kg^{-1} ξηρής ουσίας) υπέργειων φυτικών ιστών του *Lolium perenne* L. στο SL (A) και L (B) έδαφος (μέσος όρος \pm τυπική απόκλιση). Στα ξηρά βάρη, για κάθε συγκομιδή, εφαρμόστηκε one-way ANOVA. Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε $p < 0.05$.

Καμία μεταχείριση κατά την 1η και 2η συγκομιδή δεν επέφερε κάποια σημαντική μεταβολή στη συγκέντρωση του Zn στους υπέργειους φυτικούς ιστούς, εκτός από τη μεταχείριση του συνδυασμού του βιοεξανθρακώματος στέμφυλων με κόμποστ στην 3η συγκομιδή, η οποία αύξησε τη συγκέντρωση Zn, στο SL έδαφος (Σχήμα 3-9). Η συγκέντρωση Zn, δεν παρουσίασε καμία σημαντική μεταβολή σε όλες τις μεταχειρίσεις σε σύγκριση με τον μάρτυρα και στις τρεις συγκομιδές, εκτός από αυξήσεις στη μεταχείριση του κόμποστ στην 1η συγκομιδή και του συνδυασμού του βιοεξανθρακώματος στέμφυλων με κόμποστ στη 2η συγκομιδή, στο L έδαφος (Σχήμα 3-9). Όσον αφορά στην πρόσληψη του Zn από τους υπέργειους φυτικούς ιστούς, δεν παρατηρήθηκε καμία σημαντική μεταβολή σε όλες τις μεταχειρίσεις και στα δύο εδάφη, εκτός από αύξηση στη μεταχείριση του κόμποστ στην 1η συγκομιδή στη

μεταχείριση του συνδυασμού βιοεξανθρακώματος στέμφυλων με κόμποστ στο L έδαφος (Πίνακας 3-7, 3-8). Πιθανόν το κόμποστ και η συνδυαστική δράση του κόμποστ με το βιοεξανθράκωμα στέμφυλων που είχαν υψηλές συγκεντρώσεις Zn να ήταν η αιτία αύξησης των συγκεντρώσεων Zn στους υπέργειους φυτικούς ιστούς και στα δύο εδάφη. Οι Fox et al. (2014) παρατήρησαν μείωση στη συγκέντρωση Zn στους υπέργειους φυτικούς ιστούς με την προσθήκη βιοεξανθρακωμάτων σε ένα πηλώδες έδαφος με pH=6.



Σχήμα 3-9. Συγκέντρωση Zn (mg Zn kg⁻¹ ξηρής ουσίας) υπέργειων φυτικών ιστών του *Lolium perenne* L. στο SL (A) και L (B) έδαφος (μέσος όρος±τυπική απόκλιση). Στα ξηρά βάρη, για κάθε συγκομιδή, 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 3-7. Πρόσληψη Fe, Mn, Zn (mg / δοχείο) από τους υπέργειους φυτικούς ιστούς του *Lolium perenne* L. στο SL έδαφος (μέσος όρος±τυπική απόκλιση, n=3)

SL									
Μεταχειρίσεις	Fe			Mn			Zn		
	mg / δοχείο								
	1η Συγκομιδή	2η Συγκομιδή	3η Συγκομιδή	1η Συγκομιδή	2η Συγκομιδή	3η Συγκομιδή	1η Συγκομιδή	2η Συγκομιδή	3η Συγκομιδή
Μάρτυρας ΧΛ	0.095±0.037ab	0.025±0.014a	0.087±0.019a	0.268±0.071ab	0.197±0.057a	0.192±0.052a	0.026±0.006ab	0.011±0.003a	0.012±0.002ab
Κόμποστ ΧΛ	0.105±0.006ab	0.035±0.017a	0.036±0.002a	0.542±0.022c	0.435±0.122b	0.249±0.055a	0.046±0.015b	0.017±0.002a	0.009±0.002a
BC-Σ+ κόμποστ ΧΛ	0.073±0.009a	0.043±0.018a	0.105±0.032a	0.414±0.117bc	0.282±0.079ab	0.528±0.096b	0.027±0.008ab	0.019±0.013a	0.040±0.026b
BC-Σ ΧΛ	0.133±0.043ab	0.039±0.021a	0.054±0.033a	0.243±0.064ab	0.252±0.098ab	0.341±0.101a	0.041±0.006ab	0.019±0.002a	0.012±0.007ab
BC-ΦΡ+ κόμποστ ΧΛ	0.164±0.031b	0.038±0.015a	0.848±0.114b	0.178±0.0246a	0.189±0.058a	0.179±0.024a	0.023±0.007ab	0.015±0.003a	0.010±0.002ab
BC-ΦΡ ΧΛ	0.086±0.013a	0.028±0.006a	0.099±0.008a	0.178±0.025a	0.130±0.043a	0.179±0.026a	0.022±0.005a	0.007±0.002a	0.002±0.000a

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

Πίνακας 3-8. Πρόσληψη Fe, Mn, Zn (mg / δοχείο) από τους υπέργειους φυτικούς ιστούς του *Lolium perenne* L. στο L έδαφος (μέσος όρος±τυπική απόκλιση, n=3).

L									
Μεταχειρίσεις	Fe			Mn			Zn		
	mg / δοχείο								
	1η Συγκομιδή	2η Συγκομιδή	3η Συγκομιδή	1η Συγκομιδή	2η Συγκομιδή	3η Συγκομιδή	1η Συγκομιδή	2η Συγκομιδή	3η Συγκομιδή
Μάρτυρας ΧΛ	0.074±0.001a	0.036±0.007a	0.130±0.020ab	0.078±0.013ab	0.048±0.014a	0.090±0.014a	0.013±0.001a	0.008±0.003ab	0.013±0.003a
Κόμποστ ΧΛ	0.126±0.007b	0.067±0.202a	0.038±0.009a	0.133±0.057b	0.117±0.048b	0.140±0.036ab	0.040±0.004b	0.019±0.002bc	0.011±0.003a
BC-Σ+ κόμποστ ΧΛ	0.077±0.019a	0.047±0.012a	0.031±0.005a	0.073±0.014ab	0.070±0.013ab	0.304±0.051c	0.029±0.011ab	0.022±0.010c	0.011±0.005a
BC-Σ ΧΛ	0.067±0.013a	0.045±0.020a	0.180±0.081b	0.076±0.009ab	0.128±0.015b	0.207±0.055abc	0.016±0.000a	0.013±0.002abc	0.019±0.004a
BC-ΦΡ+ κόμποστ ΧΛ	0.093±0.013a	0.036±0.005a	0.158±0.029b	0.075±0.011ab	0.064±0.023ab	0.217±0.058bc	0.020±0.00751a	0.008±0.004ab	0.020±0.005a
BC-ΦΡ ΧΛ	0.075±0.006a	0.033±0.013a	0.097±0.141ab	0.052±0.013a	0.042±0.018a	0.107±0.042ab	0.0123±0.006a	0.003±0.002a	0.009±0.006a

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

3.4 Συμπεράσματα

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η προσθήκη βιοεξανθρακώματος με ή χωρίς κόμποστ και ιδιαίτερα του βιοεξανθρακώματος φλοιών ρυζιού, σε συνδυασμό με ανόργανη λίπανση χωρίς P, είχε σημαντική θετική επίδραση στο ξηρό βάρος των υπέργειων φυτικών ιστών του *Lolium perenne* L. στο αμμοπηλώδες έδαφος στον τρίτο μήνα καλλιέργειας, ενώ στο πηλώδες έδαφος δεν παρατηρήθηκε καμία σημαντική αύξηση. Καμία σημαντική επίδραση στο ξηρό βάρος του υπέργειου μέρους του φυτού δεν παρατηρήθηκε και στα δύο εδάφη, όταν προστέθηκαν τα εδαφοβελτιωτικά χωρίς λίπανση, γεγονός που υποδεικνύει το βιοεξανθράκωμα σε συνδυασμό με ανόργανη λίπανση προκαλεί θετική επίδραση στην ανάπτυξη των φυτών σε εδάφη συγκεκριμένης κοκκομετρικής σύστασης. Η προσθήκη βιοεξανθρακώματος στέμφυλων με ή χωρίς κόμποστ αύξησε σημαντικά τη συγκέντρωση P και K των υπέργειων φυτικών ιστών, αλλά σε διαφορετικό έδαφος για το κάθε θρεπτικό στοιχείο. Η αύξηση της συγκέντρωσης του P στο πηλώδες έδαφος κυρίως από την προσθήκη βιοεξανθρακώματος στέμφυλων και του συνδυασμού βιοεξανθρακώματος στέμφυλων με κόμποστ πιθανόν να οφείλεται στην άμεση απελευθέρωση διαλυτών αλάτων P από το βιοεξανθράκωμα, στη συγκράτηση Fe, Ca, and Al στο έδαφος μέσω της προσθήκης βιοεξανθρακώματος, ή στην ενεργοποίηση μικροοργανισμών διαλυτοποίησης και ανοργανοποίησης του P. Παράλληλα, η προσθήκη βιοεξανθρακώματος στέμφυλων πιθανόν να αύξησε τη συγκέντρωση P στους υπέργειους φυτικούς ιστούς λόγω της υψηλότερης συγκέντρωσης P που διαθέτει το βιοεξανθράκωμα στέμφυλων σε σχέση με το βιοεξανθράκωμα φλοιών ρυζιού. Η αύξηση του K στους υπέργειους φυτικούς ιστούς έπεται από την προσθήκη των βιοεξανθρακωμάτων κυρίως στο αμμοπηλώδες έδαφος, σε σχέση με το πηλώδες έδαφος (υψηλό ποσοστό Ca), επιβεβαιώνει τη θεωρία της ανταγωνιστικότητας του K με το Ca. Επιπρόσθετα, τα υψηλά ποσοστά K στο βιοεξανθράκωμα στέμφυλων και στο κόμποστ φαίνεται ότι δρουν συνεργιστικά και επιδρούν περισσότερο στο φυτό σε σχέση με το βιοεξανθράκωμα φλοιών ρυζιού.

Η προσθήκη βιοεξανθρακώματος φλοιών ρυζιού με κόμποστ αύξησε τη συγκέντρωση Fe στους υπέργειους φυτικούς ιστούς, στο αμμοπηλώδες έδαφος πιθανόν λόγω του pH του βιοεξανθρακώματος φλοιών ρυζιού (pH=7) και του κόμποστ (pH=7.5-8.5). Η συγκέντρωση Mn και Zn στους υπέργειους φυτικούς ιστούς επηρεάστηκε σημαντικά από την προσθήκη κόμποστ και συνδυασμού βιοεξανθρακώματος στέμφυλων με κόμποστ και στα δύο εδάφη. Πιθανόν το κόμποστ και η συνδυαστική δράση του κόμποστ με τα βιοεξανθρακώματα που είχαν υψηλές συγκεντρώσεις Mn και Zn να ήταν η αιτία αύξησης των συγκεντρώσεων Mn και Zn στους υπέργειους φυτικούς ιστούς και στα δύο εδάφη.

Εν κατακλείδι, η προσθήκη βιοεξανθρακώματος με ή χωρίς κόμποστ έχει θετικά αποτελέσματα στο ξηρό βάρος του υπέργειου μέρους του φυτού, όταν προστεθεί λίπανση, ενώ χωρίς λίπανση δεν παρατηρήσαμε σημαντική επίδραση. Ωστόσο, οι συγκεντρώσεις των μακροθρεπτικών και μικροθρεπτικών στοιχείων αυξήθηκαν ή μειώθηκαν στους υπέργειους φυτικούς ιστούς, αλλά με διαφορετική

ένταση αφού καθοριστικό ρόλο έπαιξαν το είδος του βιοεξανθρακώματος, αλλά και το έδαφος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.

Η επίδραση βιοεξανθρακωμάτων από στέμφυλα και φλοιούς ρυζιού στο *Zea Mays* L.

4.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές μελέτες που έδειξαν ότι το βιοεξανθράκωμα, όταν εφαρμόζεται στο έδαφος, αυξάνει την παραγωγικότητα των καλλιεργειών είτε παρέχοντας σημαντικές ποσότητες μακροθρεπτικών και μικροθρεπτικών στοιχείων (Laird et al., 2010a), είτε βελτιώνοντας τις φυσικές (Atkinson et al., 2010; Mukherjee and Lal, 2013; Mukherjee et al., 2014), είτε τις χημικές (De la Rosa et al., 2014; Subedi et al., 2016b) ιδιότητες του εδάφους, είτε ενισχύοντας την δραστηριότητα των μικροοργανισμών (Camps-Arbestain et al., 2014; Fox et al., 2014; Gul et al., 2015; Lehmann et al., 2011, 2015; Liu et al., 2013; Nielsen et al., 2014; Schmalenberger and Fox, 2016) με αποτέλεσμα να ενισχύεται η διαθεσιμότητα των θρεπτικών στοιχείων στο ριζικό σύστημα και κατ'επέκταση σε όλο το φυτό.

Οι παράγοντες που είναι υπεύθυνοι για την επίδραση του βιοεξανθρακώματος στην απόδοση των καλλιεργειών είναι το είδος βιοεξανθρακώματος, ο τύπος εδάφους, το είδος καλλιέργειας, το είδος λίπανσης, η δόση εφαρμογής, ο χρόνος ενσωμάτωσης, ο τύπος πειράματος και οι περιβαλλοντικές συνθήκες (Biederman and Harpole, 2013; Jeffery et al., 2011; Liu et al., 2013). Το βιοεξανθράκωμα έχει εφαρμοστεί σε διάφορα εδάφη με αποτέλεσμα να έχει είτε θετική (Agegnehu et al., 2016; Kammann et al., 2011; Rondon et al., 2007; Schmidt et al., 2015) είτε αρνητική (Bass et al., 2016; Deenik et al., 2010; Marks et al., 2014) ή καμία (Nelissen et al., 2015; Schmidt et al., 2014) επίδραση στην απόδοση των καλλιεργειών. Παρόλο που οι περισσότερες μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί σε τροπικές περιοχές, πρόσφατες μελέτες έχουν αναφέρει τη θετική επίδραση της εφαρμογής βιοεξανθρακώματος σε διάφορες καλλιέργειες εύκρατων (Inal et al., 2015; Kloss et al., 2014; Smider and Singh, 2014; Vaccari et al., 2015) καθώς και μεσογειακών περιοχών (Baronti et al., 2010; Beesley et al., 2013; De la Rosa et al., 2014; Genesio et al., 2015; Subedi et al., 2016a, 2016b, 2017; Vaccari et al., 2011). Επιπρόσθετα, η θετική επίδραση των βιοεξανθρακωμάτων στην απόδοση των καλλιεργειών ενισχύεται όταν συνδυαστεί με ανόργανη αζωτούχα λίπανση (Blackwell et al., 2015; Glaser et al., 2015; Inal et al., 2015) ή οργανική (κόμποστ) λίπανση (Agegnehu et al., 2017; Schulz and Glaser, 2012).

Η καλλιέργεια καλαμποκιού είναι μια καλλιέργεια ιδιαίτερης σημασίας λόγω της μεγάλης σπουδαιότητάς του ως τρόφιμο, αλλά και των υψηλών της απαιτήσεων σε λίπανση και ειδικότερα N λίπανσης. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται περιπτώσεις όπου η εφαρμογή βιοεξανθρακώματος, σε συνδυασμό με ανόργανη λίπανση, έχει επιφέρει θετική (Baronti et al., 2010; Butnan et al., 2015; Rogovska et al., 2014) ή αρνητική (Deenik et al., 2010) ή καμία επίδραση στην απόδοση της καλλιέργειας καλαμποκιού (Cornelissen et al., 2013; Jones et al., 2012).

Με βάση την προηγούμενη μελέτη μας (Κεφ. 3), όπου τα βιοεξανθρακώματα χωρίς/με οργανική λίπανση (κόμποστ) σε συνδυασμό με ανόργανη λίπανση έδειξαν καλύτερα αποτελέσματα στην καλλιέργεια του φυτού *Lolium perenne* L., υποθέσαμε ότι η ανόργανη αζωτούχα λίπανση σε συνδυασμό με βιοεξανθράκωμα και κόμποστ θα είχε ευεργετική επίδραση στην καλλιέργεια φυτών καλαμποκιού *Zea Mays* L., η οποία έχει υψηλές απαιτήσεις σε N. Δύο εδάφη διαφορετικής κοκκομετρικής σύστασης από την ευρύτερη περιοχή του νομού Χανίων χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη. Ο ευρύτερος στόχος της μελέτης ήταν να αξιοποιήσουμε τα θετικά αποτελέσματα της προηγούμενης μελέτης σε μια άλλη καλλιέργεια, όπως αυτής του καλαμποκιού για να διαπιστώσουμε αν θα υπάρξουν τα ίδια ή παρόμοια αποτελέσματα. Οι ειδικοί στόχοι της μελέτης ήταν να διερευνηθούν αν τα βιοεξανθρακώματα, που έχουν προέλθει από στέμφυλα και φλοιούς ρυζιού, σε συνδυασμό με ή χωρίς οργανική (κόμποστ) λίπανση, λαμβάνοντας ανόργανη αζωτούχα λίπανση επηρεάζουν 1) το ξηρό βάρος και τα μορφολογικά χαρακτηριστικά του φυτού, 2) τις συγκέντρωσεις μακροθρεπτικών και μικροθρεπτικών στοιχείων στους υπέργειους και υπόγειους φυτικούς ιστούς, 3) τις ιδιότητες του εδάφους, συμπεριλαμβανομένων των θρεπτικών συστατικών και του pH, σε ένα πείραμα 30 ημερών μετά την εμφάνιση των σποροφύτων.

4.2 Υλικά και Μέθοδοι

4.2.1 Υλικά

Πάρθηκαν 2 δείγματα εδάφους (0-20 cm) από καλλιεργούμενες περιοχές του νομού Χανίων στην περιοχή του Καστελίου. Τα εδαφικά δείγματα, ένα ελαφριάς σύστασης και ένα μέσης σύστασης, διέφεραν ως προς τις φυσικοχημικές τους ιδιότητες και κυρίως ως προς το pH (ελαφρώς όξινο και αλκαλικό) και την κοκκομετρική σύστασή τους (αμμοπηλώδες-SL και πηλώδες-L). Το πηλώδες εδαφικό δείγμα πάρθηκε από την περιοχή κοντά στο χωριό Καλλεργιανά (35°29'21"N, 23°40'24"E), ενώ το αμμοπηλώδες εδαφικό δείγμα κοντά στο χωριό Βλάτος (35°23'20"N, 23°40'08"E). Τα δείγματα εδάφους αεροξηράνθηκαν, πέρασαν από κόσκινο 10 mm και έπειτα από κόσκινο 2 mm. Από τη λεπτή γη συλλέχθηκε μια μικρή ποσότητα (~500gr) για τις αναλύσεις χαρακτηρισμού των εδαφικών δειγμάτων, ενώ το υπόλοιπο δείγμα χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα με τα φυτά του *Zea Mays* L.

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με βιοεξανθρακώματα προερχόμενα από διάφορα είδη οργανικών παραπροϊόντων (στέμφυλα, φλοιοί ρυζιού) που προκύπτουν από τον αγροβιομηχανικό τομέα. Τα στέμφυλα (Σ) συλλέχθηκαν από ένα τοπικό οινοποιείο στα Χανιά και οι φλοιοί ρυζιού (ΦΡ) από ένα ορυζόμυλο της βόρειας Ελλάδας. Τα οργανικά υπολείμματα και παραπροϊόντα ξηράνθηκαν στους 68°C για 48 h, μετέπειτα αλέστηκαν σε μαχαιρόμυλο προκειμένου το μέγεθος των σωματιδίων τους να μην ξεπερνάει τα 0.5 mm, και τέλος αποθηκεύτηκαν σε αεροστεγή δοχεία μέχρι την περαιτέρω χρήση τους. Τα δείγματα των βιοεξανθρακωμάτων παράχθηκαν χρησιμοποιώντας ένα φούρνο πυρόλυσης. Συνθήκες απουσίας οξυγόνου διατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια της διαδικασίας πυρόλυσης με παροχή 99% καθαρού

αζώτου στο σύστημα και παροχή ροής 200 L h^{-1} . Η θερμοκρασία πυρόλυσης ήταν 300°C . Ο ρυθμός θέρμανσης ήταν $12^{\circ}\text{C min}^{-1}$ μέχρι τους 150°C , όπου στη συγκεκριμένη θερμοκρασία ο ρυθμός θέρμανσης μειωνόταν στους $6^{\circ}\text{C min}^{-1}$ μέχρι την επιθυμητή θερμοκρασία πυρόλυσης. Ο χρόνος παραμονής (residence time) ήταν 60 min. Μετά το τέλος της πυρόλυσης, τα βιοεξανθρακώματα απομακρύνθηκαν από τον φούρνο, μεταφέρθηκαν σε ξηραντήρα, ζυγίστηκαν και αποθηκεύτηκαν σε αεροστεγή πλαστικά δοχεία. Προς συντομία, τα βιοεξανθρακώματα θα αναφέρονται ως BC-Σ (Biochar-Στέμφυλα) και BC-ΦΡ (Biochar-Φλοιοί Ρυζιού).

Το κομπόστ δόθηκε από τη Διαδημοτική Επιχείρηση Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων (ΔΕΔΙΣΑ) των Χανίων.

4.2.2 Εγκατάσταση πειράματος

Η εγκατάσταση του πειράματος έγινε το καλοκαίρι του 2015, σε θερμοκήπιο του Πολυτεχνείου Κρήτης στα Χανιά. Το έδαφος αναμείχθηκε με κάθενα από τα υλικά (BC-Σ; BC-ΦΡ; κόμποστ). Οι μεταχειρίσεις ήταν οι εξής: 1) Μάρτυρας (έδαφος χωρίς μεταχείριση), 2) Κόμποστ, 3) Βιοεξανθράκωμα στέμφυλων (BC-Σ), 4) Βιοεξανθράκωμα φλοιών ρυζιού (BC-ΦΡ), 5) Συνδυασμός βιοεξανθρακώματος στέμφυλων με κόμποστ (BC-Σ+κόμποστ), 6) Συνδυασμός βιοεξανθρακώματος φλοιών ρυζιού με κόμποστ (BC-ΦΡ+κόμποστ). Η δόση εφαρμογής του βιοεξανθρακώματος και του κόμποστ ήταν 2% κατά βάρος (κ.β.) Στα δύο εδάφη και σε κάθε μεταχείριση εφαρμόστηκε μόνο αζωτούχα λίπανση (συνολικά 200 mg N kg^{-1} εδάφους). Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 12 μεταχειρίσεις. Η κάθε μεταχείριση είχε 3 επαναλήψεις. Συνολικά εγκαταστάθηκαν 36 διάτρητα πλαστικά δοχεία χωρητικότητας 0.75 kg . Στον Πίνακα 4-1 συνοψίζονται οι μεταχειρίσεις που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα. Ποσότητα, 0.75 kg για κάθε μεταχείριση τοποθετήθηκε σε πλαστική σακούλα. Τα μείγματα υγράνθηκαν ώστε να μπορούν εύκολα να αναμειχθούν και να ομογενοποιηθούν. Τα μείγματα εξισορροπήθηκαν για 15 ημέρες και αεροξηράνθηκαν. Έπειτα τα μείγματα τοποθετήθηκαν σε πλαστικά διάτρητα δοχεία ($12.5 \times 10.5 \text{ cm}$) και σπάρθηκαν με 3 σπόρους *Zea mays* L. σε κάθε δοχείο (23/6/2015). Μετά την έκπτυξη των σποροφύτων απομακρύνθηκαν τα δύο σπορόφυτα και έμεινε μόνο το ένα (27/6/2015). Το πειραματικό σχέδιο ήταν το πλήρως τυχαίοποιημένο σχέδιο (CRD), η άρδευση γινόταν με νερό από το Δήμο Χανίων. Οι γλάστρες ποτίζονταν ώστε η εδαφική υγρασία να διατηρείται στο 70% της υδατοϊκανότητας. Κατά τη διάρκεια του πειράματος, η μέση μέγιστη θερμοκρασία αέρα ήταν στους 32.4°C και η μέση ελάχιστη στους 21.6°C . Δέκα ημέρες και είκοσι ημέρες μετά από την έκπτυξη των σποροφύτων, τα δοχεία των μεταχειρίσεων δέχθηκαν 100 mg N kg^{-1} εδάφους κάθε φορά, υπό τη μορφή νιτρικής αμμωνίας (NH_4NO_3). Η αζωτούχα λίπανση εφαρμόστηκε ως υδατικό διάλυμα. Το πείραμα διήρκεσε 1 μήνα μετά την έκπτυξη των σποροφύτων και πραγματοποιήθηκε 1 συγκομιδή στο τέλος του πειράματος.

Στις μεταχειρίσεις μελετήθηκαν:

- i) Το ξηρό βάρος των υπέργειων και υπόγειων φυτικών ιστών

- ii) Μορφολογικά χαρακτηριστικά (ύψος υπέργειου μέρους 10, 20 και 30 ημέρες μετά την έκπτυξη των σποροφύτων, διάμετρος βλαστού)
- iii) Η συγκέντρωση των μακροθρεπτικών N, P, K, Ca, Mg και μικροθρεπτικών Fe, Mn, Zn στο υπέργειο/υπόγειο μέρος του φυτού
- iv) pH, EC, TOC%, TN%, συγκέντρωση NO₃-N, NH₄-N, Olsen-P, ανταλλάξιμων μακροθρεπτικών K, Ca, Mg και διαθέσιμων μικροθρεπτικών Fe, Mn, Zn στο έδαφος.

Πίνακας 4-1. Σχέδιο πειραματικού με φυτά του *Zea Mays* L. σε δοχεία. Οι μεταχειρίσεις για κάθε έδαφος (SL και L)

SL	L
Μεταχειρίσεις	Μεταχειρίσεις
Με αζωτούχα λίπανση	Με αζωτούχα λίπανση
0 % BC + 0% κόμποστ (Μάρτυρας)	0 % BC + 0% κόμποστ (Μάρτυρας)
0% BC + 2% κ.β κόμποστ (Κόμποστ)	0% BC + 2% κ.β κόμποστ (Κόμποστ)
2% κ.β. BC-Σ + 0% κ.β. κόμποστ (BC-Σ)	2% κ.β. BC-Σ + 0% κ.β. κόμποστ (BC-Σ)
2% κ.β. BC-ΦΡ + 0% κ.β. κόμποστ (BC-ΦΡ)	2% κ.β. BC-ΦΡ + 0% κ.β. κόμποστ (BC-ΦΡ)
2% κ.β. BC-Σ + 2% κ.β. κόμποστ (BC-Σ+κόμποστ)	2% κ.β. BC-Σ + 2% κ.β. κόμποστ (BC-Σ+κόμποστ)
2% κ.β. BC-ΦΡ + 2% κ.β. κόμποστ (BC-ΦΡ+κόμποστ)	2% κ.β. BC-ΦΡ + 2% κ.β. κόμποστ (BC-ΦΡ+κόμποστ)

4.2.3 Αναλυτικές Μέθοδοι

Χαρακτηρισμός εδαφών

Η μηχανική σύσταση του εδάφους προσδιορίστηκε με τη μέθοδο Βουγιούκου. 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. Το ποσοστό της οργανικής ουσίας (OM%) υπολογίστηκε με τη μέθοδο Walkley-Black. Τα ποσοστά άνθρακα (C%), και αζώτου (N %) προσδιορίστηκαν με τη χρήση στοιχειακού αναλυτή. Το ποσοστό ανθρακικού ασβεστίου (CaCO₃%) προσδιορίστηκε με τη μέθοδο Bernard. Ο αφομοιώσιμος P προσδιορίστηκε κατά Olsen (Black et al., 1965). Τα ανταλλάξιμα κατίοντα (K, Ca και Mg) προσδιορίστηκαν μετά από εκχύλιση οξικού αμμωνίου (2.5g εδάφους σε αναλογία 1:20) χρησιμοποιώντας ICP-MS. Τα μικροθρεπτικά Fe, Mn και Zn καθορίστηκαν μετά από

εκχύλιση με DTPA (10g εδάφους σε αναλογία 1:2.5) χρησιμοποιώντας ICP-MS. Το νιτρικό άζωτο του εδάφους ($\text{NO}_3\text{-N}$) καθορίστηκε φασματοφωτομετρικά στα 400 nm μετά από εκχύλιση 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 KCl (20g εδάφους σε αναλογία 1:2.5) με τη μέθοδο του Nessler. Τα χαρακτηριστικά και των δύο εδαφικών δειγμάτων εμφανίζονται στον Πίνακα 4-2. Στο τέλος του πειράματος αναλύθηκαν εδαφικά δείγματα από όλες τις μεταχειρίσεις ως προς τις ίδιες παραμέτρους με τις ίδιες μεθόδους.

Πίνακας 4-2. Φυσικοχημικές ιδιότητες των 2 δειγμάτων εδάφους που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα με φυτά του *Zea Mays* L. σε δοχεία.

Ιδιότητες	Έδαφος	
	SL	L
pH (1:2)	6.7	8
Άμμος-Sand (%)	75.7	29.7
Ιλύς-Silt (%)	12	44
Άργιλος-Clay (%)	12.2	24.2
Οργανική Ουσία-OM (%)	2.88	3.49
CaCO_3 (%)	1	47.57
Ηλεκτρική Αγωγιμότητα-EC (dS m^{-1})	0.78	0.58
TOC (%)	1.5	2
TN (%)	0.3	0.39
$\text{NO}_3\text{-N}$ (g kg^{-1})	0.04	0.02
$\text{NH}_4\text{-N}$ (g kg^{-1})	0.01	0.03
Αφομοιώσιμος P-Olsen P (g kg^{-1})	0.04	0.03
Ανταλλάξιμο K-Exchangeable K (g kg^{-1})	0.12	0.38
Ανταλλάξιμο Ca-Exchangeable Ca (g kg^{-1})	0.92	10.90
Ανταλλάξιμο Mg-Exchangeable Mg (g kg^{-1})	0.11	0.16
DTPA Fe (mg kg^{-1})	33.7	2.81
DTPA Mn (mg kg^{-1})	9.4	7.75
DTPA Zn (mg kg^{-1})	0.83	0.45

TOC: Total Organic Carbon (Ολικός Οργανικός Άνθρακας), TN: Total Nitrogen (Ολικό Άζωτο),

Χαρακτηρισμός οργανικών παραπροϊόντων, βιοεξανθρακωμάτων και κόμποστ

Τα οργανικά παραπροϊόντα και τα αντίστοιχα βιοεξανθρακώματα, υπολογίστηκαν ως προς το ποσοστό τέφρας (ash%), τα ποσοστά ολικού οργανικού άνθρακα (TOC%), και αζώτου (N%), το pH, την ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) και τις συγκεντρώσεις P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, Ni, Pb, Cr, As, Se, Mo 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 ολικού οργανικού άνθρακα (TOC%), και αζώτου (N%) 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). Ο προσδιορισμός των ολικών συγκεντρώσεων των στοιχείων P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, Ni, Pb, Cr, As, Se, Mo και Cd στα δείγματα έγινε έπειτα από χώνευση με μικροκύματα με πυκνό HNO₃. Οι ολικές συγκεντρώσεις των στοιχείων K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, Ni, Pb, Cr, As, Se, Mo και Cd προσδιορίστηκαν με τη χρήση ICP-MS ενώ ο P, προσδιορίστηκε με τη μέθοδο Ascorbic Acid Molybdenum Blue Method (Murphy and Riley, 1962) σε φασματοφωτόμετρο υπεριώδους ορατού σε μήκος κύματος 880 nm. Το νιτρικό άζωτο των βιοεξανθρακωμάτων (NO₃-N) καθορίστηκε φασματοφωτομετρικά στα 400 nm μετά από εκχύλιση KCl (20g βιοεξανθρακώματος σε αναλογία 1:7.5) και χρήση του αντιδραστηρίου Nitraver (Hach-Lange, Germany), ενώ το NH₄-N καθορίστηκε φασματοφωτομετρικά μετά από εκχύλιση KCl (20g βιοεξανθρακώματος σε αναλογία 1:7.5) με τη μέθοδο του Nessler.

Το ποσοστό ολικού οργανικού C (TOC%) και αζώτου (TN%), καθώς και οι ολικές συγκεντρώσεις των μακροθρεπτικών (P, K, Ca, Mg) και μικροθρεπτικών (Fe, Mn, Zn) στοιχείων στο κόμποστ προσδιορίστηκαν με τις ίδιες μεθόδους, όπως και στα βιοεξανθρακώματα. Η συγκέντρωση του νιτρικού αζώτου (NO₃-N) και αμμωνιακού αζώτου (NH₄-N) προσδιορίστηκαν με την ίδια μέθοδο και τις ίδιες αναλογίες εκχυλισμάτων, όπως και στα εδάφη. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα και το pH του κόμποστ προσδιορίστηκαν σε αιώρημα 1:5 κόμποστ/απιονισμένο νερό (w/v).

Πίνακας 4-3. Χαρακτηριστικά του κόμποστ που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα με φυτά του *Zea Mays* L. σε δοχεία.

Χαρακτηριστικά	Κόμποστ
C ^a (%)	20.5
TOC (%)	18.15
TN ^a (%)	1.91
NO ₃ -N (mg kg ⁻¹)	610
NH ₄ -N (mg kg ⁻¹)	80
Ash ^b (%)	nd
pH	8.16
EC (dS m ⁻¹)	8.51
P (g kg ⁻¹)	4.4
Mg (g kg ⁻¹)	9.14
K (g kg ⁻¹)	17.84
Ca (g kg ⁻¹)	125.91
Mn (mg kg ⁻¹)	200
Fe (mg kg ⁻¹)	12330
Zn (mg kg ⁻¹)	360

^a Όπως παραλήφθηκε (As received basis), ^b Επί ξηρού (Dry basis) TOC: Total Organic Carbon (Ολικός Οργανικός Άνθρακας), TN: Total Nitrogen (Ολικό Άζωτο), EC: electrical conductivity (ηλεκτρική αγωγιμότητα), nd (δεν προσδιορίστηκε)

Φυτικοί ιστοί

Συνολικά, επιτεύχθηκε 1 συγκομιδή των υπέργειων και υπόγειων φυτικών ιστών (6/7/2015). Το υπέργειο φυτικό μέρος (φύλλα και βλαστοί) διαχωρίστηκε από το ριζικό σύστημα, 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. Οι ολικές συγκεντρώσεις P, Ca, K, Mg, Mn, Fe και Zn στα υπέργεια και υπόγεια μέρη του φυτού καθορίστηκαν έπειτα από ξηρή καύση (Kalra, 1998). Οι ολικές συγκεντρώσεις των στοιχείων Ca, K, Mg, Mn, Fe και Zn προσδιορίστηκαν με τη χρήση ICP-MS ενώ ο P μετρήθηκε με τη μέθοδο vanadate-molybdate-yellow colorimetric στα 470 nm (Chapman and Pratt, 1961). Η συγκέντρωση N προσδιορίστηκε φασματοφωτομετρικά στα 662 nm (Evenhuis, 1978) έπειτα από χώνευση των φυτικών ιστών με H_2SO_4 - H_2O_2 .

4.2.4 Στατιστική Ανάλυση

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 N, P, K, Ca, Mg και μικροθρεπτικών Fe, Mn, Zn των υπέργειων και υπόγειων φυτικών ιστών καθώς και των ξηρών βαρών των υπέργειων και υπόγειων φυτικών ιστών καθορίστηκαν σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε επίπεδο σημαντικότητας ($p < 5\%$) ξεχωριστά για κάθε έδαφος (SL και L). Η παραπάνω στατιστική ανάλυση εφαρμόστηκε επίσης για όλες τις παραμέτρους που αναλύθηκαν στα εδάφη με τη λήξη του πειράματος.

4.3 Αποτελέσματα και Συζήτηση

4.3.1 Χαρακτηρισμός οργανικών παραπροϊόντων και βιοεξανθρακωμάτων

Τα χαρακτηριστικά των οργανικών παραπροϊόντων και των αντίστοιχων βιοεξανθρακωμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-4. Το βιοεξανθράκωμα στέμφυλων είχε αλκαλικό pH 10.22, οι φλοιοί ρυζιού ουδέτερο 7.36. Οι Windeatt et al. (2014) βρήκαν pH βιοεξανθρακωμάτων μεταξύ 6.1 και 11.6 ανάλογα με το είδος βιομάζας με το βιοεξανθράκωμα φλοιών ρυζιού να έχει pH 9.9 σε θερμοκρασία πυρόλυσης 600°C. Έχει αναφερθεί ότι το pH των βιοεξανθρακωμάτων κυμαίνεται μεταξύ 4 και 12, με τυπικές τιμές πάνω από 7, λόγω τόσο των ιδιοτήτων βιομάζας όσο και των συνθηκών πυρόλυσης (Manya, 2012). Σε όλα τα βιοεξανθρακώματα το pH ήταν μεγαλύτερο σε σχέση με την αρχική βιομάζα. Η αύξηση του pH στα βιοεξανθρακώματα σε σχέση με την αρχική βιομάζα μπορεί να αποδοθεί στα ανθρακικά άλατα που δημιουργούνται κατά τη διαδικασία της πυρόλυσης σε συνδυασμό με τα αλκαλικά συστατικά όπως Na, K, Mg και Ca προερχόμενα από τη βιομάζα (Singh et al., 2015). Οι λειτουργικές ομάδες που αποκολλώνται κατά τη

διάρκεια της πυρόλυσης είναι κυρίως όξινες, όπως καρβοξυλικές, υδροξυλικές κ.α. Όσο πιο πολλές λειτουργικές ομάδες αποκολλώνται, τόσο πιο βασικό γίνεται το βιοεξανθράκωμα (Weber and Quicker, 2018).

Το βιοεξανθράκωμα φλοιών ρυζιού και στέμφυλων είχαν EC 0.48 και 1.38 dS m⁻¹, αντίστοιχα. Η Aller (2016) βρήκε στη μελέτη της εξετάζοντας 83 τιμές EC από με μέση τιμή 1.59 dS m⁻¹. Τα βιοεξανθρακώματα έχουν μεγαλύτερες τιμές EC σε σχέση με την αρχική βιομάζα και αυξάνονται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία πυρόλυσης (Singh et al., 2010), εξαιτίας της συσσώρευσης των αλκαλικών αλάτων (Van Zwieten et al., 2010). Οι ποικίλες τιμές EC προκύπτουν λόγω των ανόργανων συστατικών της αρχικής βιομάζας (Aller, 2016), και ιδιαίτερα των K και Na (Cantrell et al., 2012).

Τα βιοεξανθρακώματα στέμφυλων και φλοιών ρυζιού στην παρούσα μελέτη παρουσίασαν ποσοστό C 45.11% και 21.68%, αντίστοιχα. Σε άλλες μελέτες, το βιοεξανθράκωμα από στέμφυλα έδειξε ποσοστό C 62.90% (Pala et al., 2014) και από υπολείμματα οινοποιείου 68.7% σε θερμοκρασία πυρόλυσης 450°C (Zabaniotou et al., 2018). Έχει αναφερθεί σε άλλες μελέτες ότι το ποσοστό C των βιοεξανθρακωμάτων επηρεάζεται από το είδος της βιομάζας και τη θερμοκρασία πυρόλυσης (Singh et al., 2015). Το βιοεξανθράκωμα στέμφυλων είχε μια μικρή μείωση στο ποσοστό C, ενώ το βιοεξανθράκωμα φλοιών ρυζιού μεγαλύτερη σε σύγκριση με την αρχική βιομάζα. Ωστόσο το TOC μειώθηκε σε όλα τα βιοεξανθρακώματα σε σχέση με την αρχική βιομάζα, αλλά και το C.

Το ποσοστό N ήταν 1.5% και 0.66% στα βιοεξανθρακώματα στέμφυλων και φλοιών ρυζιού, αντίστοιχα. Οι Pala et al. (2014) βρήκαν ποσοστό N στο βιοεξανθράκωμα στέμφυλων 2.65% και οι Zabaniotou et al. (2018) στο βιοεξανθράκωμα από υπολείμματα οινοποιείου 2.2%. Οι Windeatt et al. (2014) κατέγραψαν μεγαλύτερο ποσοστό N 1.1% στο βιοεξανθράκωμα φλοιών ρυζιού. Το ποσοστό N αυξήθηκε ελάχιστα στο βιοεξανθράκωμα φλοιών ρυζιού, ενώ μειώθηκε στα στέμφυλα, σε σχέση με την αρχική βιομάζα. Από την άλλη, οι συγκεντρώσεις του NO₃-N και NH₄-N μειώθηκαν σε όλα τα βιοεξανθρακώματα σε σχέση με την αρχική βιομάζα. Η θερμοκρασία πυρόλυσης έχει επίδραση στην τελική συγκέντρωση N των βιοεξανθρακωμάτων, αφού το N του βιοεξανθρακώματος μειώθηκε, όταν αυξήθηκε η θερμοκρασία με τις μεγαλύτερες απώλειες να εμφανίζονται σε αυτά από την κοπριά / αποβλήτα και τις μικρότερες σε αυτά από υλικά πλούσια σε λιγνίνη (Aller, 2016).

Το άζωτο απομακρύνεται μέσω απώλειας αμμωνιακών (NH₄-N) και νιτρικών (NO₃-N) κλασμάτων, καθώς και μέσω οργανικών ουσιών που μπορούν εύκολα να αποδομηθούν και περιέχουν N ομάδες όπως το ουρικό οξύ (Cao και Harris, 2010; Gaskin et al., 2008). Ωστόσο, υπάρχουν μελέτες που δείχνουν ότι η περιεκτικότητα σε N αυξάνεται, όταν αυξάνεται η θερμοκρασία. Οι Keiluweit et al. (2010) βρήκαν αύξηση της περιεκτικότητας N των βιοεξανθρακωμάτων που προερχόνταν από βιομάζα πλούσια σε λιγνίνη με την αύξηση της θερμοκρασίας. Ομοίως, οι Novak et al. (2009b) ανέφεραν ότι το βιοεξανθράκωμα που παρήχθη από κελύφη ξηρών καρπών και βιομάζας πλούσια σε κυτταρίνη σε θερμοκρασία 350 και 700°C είχε υψηλότερο ποσοστό αζώτου σε σχέση με τη βιομάζα. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι η βιομάζα από φυτικά υλικά έχει σύνθετες αζωτούχες δομές που μπορεί

να χρειάζονται υψηλότερες θερμοκρασίες για να αποδομηθούν, προκαλώντας μεταβολές στη χημική δομή και συνεπώς στις μορφές N του βιοεξανθρακώματος (Gaskin et al., 2008). Επίσης, άλλες μελέτες έχουν δείξει ότι η συσχέτιση του ποσοστού N με τη θερμοκρασία έχει δύο στάδια: πρώτα, το N να αυξάνεται με τη θερμοκρασία μέχρι την επίτευξη μιας μέγιστης τιμής μετά από την οποία οι τιμές N μειώνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Ο Keiluweit et al. (2010) έδειξαν ότι η περιεκτικότητα σε N βιοεξανθρακώματος από υπολείμματα καλλιέργειας κολοκυθιάς ήταν 6.4% στους 100°C, 12.4% στους 400°C, όπου μετά την επίτευξη του μέγιστου, η περιεκτικότητα σε N μειώθηκε στο 7%. Με τον ίδιο τρόπο, οι Cantrell et al. (2012) ανέφεραν ότι το βιοεξανθράκωμα κοπριάς που παρήχθη στους 350°C είχε αύξημένο N σε σχέση με την αρχική βιομάζα, αλλά όταν η θερμοκρασία αυξήθηκε στους 700°C, η τιμή του N μειώθηκε.

Το βιοεξανθράκωμα φλοιών ρυζιού είχε το μεγαλύτερο ποσοστό τέφρας 53.5% και ακολούθησε το βιοεξανθράκωμα στέμφυλων με 31.11%. Τη μεγαλύτερη αύξηση στο ποσοστό τέφρας σε σχέση με την αρχική βιομάζα παρουσίασε το βιοεξανθράκωμα στέμφυλων, περίπου 10-φορές, αμέσως μετά το βιοεξανθράκωμα φλοιών ρυζιού, περίπου 5-φορές. Οι Windeatt et al. (2014) βρήκαν ποσοστό τέφρας 47% σε βιοεξανθράκωμα φλοιών ρυζιού, αλλά σε θερμοκρασία πυρόλυσης 600°C. Η αύξηση της περιεκτικότητας σε τέφρα με την αύξηση της θερμοκρασίας πυρόλυσης αποκαλύπτει ότι ένα σημαντικό μέρος των ανόργανων αλάτων που υπάρχουν στη βιομάζα συμπυκνώνονται εξαιτίας της απώλειας πτητικών ουσιών, όπως οξυγόνο, υδρογόνο και άνθρακα, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας πυρόλυσης (Aller, 2016). Η αρνητική συσχέτιση του ποσοστού άνθρακα με την τέφρα για βιοεξανθρακώματα με ποσοστό τέφρας >20% (Enders et al., 2012; Windeatt et al., 2014) διακρίνεται και στο δικό μας πείραμα για όλα τα βιοεξανθρακώματα, αλλά κυρίως για το βιοεξανθράκωμα φλοιών ρυζιού, αφού παρουσίασε το μεγαλύτερο ποσοστό τέφρας και το μικρότερο ποσοστό άνθρακα.

Η σύσταση της τέφρας εξαρτάται από τη βιομάζα που χρησιμοποιείται (Aller, 2016; Weber and Quicker, 2018). Η περιεκτικότητα του βιοεξανθρακώματος στέμφυλων και φλοιών ρυζιού αποτελείται κυρίως από K, Mg, P, Ca, Fe και λιγότερο από Mn, Cu, Zn. Ωστόσο, το βιοεξανθράκωμα φλοιών ρυζιού παρουσίασε αρκετά μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε Mn σε σχέση με το βιοεξανθράκωμα στέμφυλων αλλά και των υπολοίπων μικροθρεπτικών Fe, Zn και Cu. Τα μακροθρεπτικά και τα μικροθρεπτικά υπάρχουν ως οξείδια, πυριτικά, ανθρακικά, θειικά, χλωριούχα και φωσφορικά άλατα στο βιοεξανθράκωμα (Aller, 2016). Η απελευθέρωση αυτών κατά την πυρόλυση εξαρτάται από την αποδόμηση της κυτταρίνης, ημικυταρρίνης και λιγνίνης σε συνδυασμό με τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των πτητικών και του βιοεξανθρακώματος. Ο ολικός P στη μελέτη της Aller (2016) κυμαινόταν από 0.001-73 g kg⁻¹ με μέση τιμή 8.3 g kg⁻¹ με μεγαλύτερες τιμές στην κοπριά. Στη δική μας μελέτη ο P μετρήθηκε 1.76-3.55 g kg⁻¹ με μεγαλύτερη τιμή στο βιοεξανθράκωμα στέμφυλων. Οι Zabaniotou et al. (2018) βρήκαν P 5.57 g kg⁻¹ στο βιοεξανθράκωμα από υπολείμματα οινοποιείας στους 450°C. Οι Windeatt et al. (2014) βρήκαν στο βιοεξανθράκωμα από φλοιούς ρυζιού P περίπου 0.2 g kg⁻¹. Η περιεκτικότητα σε P όλων των βιοεξανθρακωμάτων ήταν μεγαλύτερη σε σχέση με την αρχική βιομάζα,

αφού με την πυρόλυση ο οργανικός P απελευθερώνεται με τη μορφή διαλυτών αλάτων P από τη βιομάζα (DeLuca et al., 2012).

Στη μελέτη της Aller (2016) η περιεκτικότητα των βιοεξανθρακωμάτων σε K ήταν από 0.080-91.50 g kg⁻¹, σε Ca από 0.150-311.2 g kg⁻¹ και σε Mg από 0.25-97.9 g kg⁻¹. Στη δική μας μελέτη η περιεκτικότητα των βιοεξανθρακωμάτων σε K κυμαινόταν από 14.65-71.22 g kg⁻¹, σε Ca από 0.16-1.15 g kg⁻¹ και σε Mg από 0.67-4.79 g kg⁻¹, με τις μεγαλύτερες τιμές K, Ca και Mg να εμφανίζονται στο βιοεξανθράκωμα στέμφυλων. Τα στοιχεία Fe, Mn, Zn, Cu, Ni, Pb, Cr, As και Mo αυξήθηκαν στα βιοεξανθρακώματα σε σχέση με την αρχική βιομάζα, ενώ το Se μειώθηκε. Στη μελέτη της Aller (2016) αναφέρεται ότι η αύξηση ή η μείωση αυτών των στοιχείων εξαρτάται από το σημείο ζέσεως του καθενός. Τα στοιχεία Pb, Zn, Ni Cu, Mo και Sr έχουν υψηλό σημείο ζέσεως, όποτε κατά την πυρόλυση αυξάνεται η περιεκτικότητά τους στο βιοεξανθράκωμα, ενώ τα στοιχεία As, Cd, Hg, και Se έχουν χαμηλό σημείο ζέσεως με αποτέλεσμα να μειώνεται η περιεκτικότητά τους στο βιοεξανθράκωμα.

Πίνακας 4-4. Χαρακτηριστικά των οργανικών παραπροϊόντων και των βιοεξανθρακωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα με φυτά του *Zea Mays* L. σε δοχεία.

Χαρακτηριστικά	Σ	ΦΡ	BC-Σ	BC-ΦΡ
C ^a (%)	[‡] 43.89-49.60	34.63-37	43.15-46.60	20.56-24
	[§] 46.13±2.65	35.96±1.18	45.11±1.56	21.68±1.57
TOC (%)	40.01-44.5	27.88-32.29	30.42-42.83	15.51-19.69
	42.24±2.02	30.02±1.84	37.12±5.36	17.7±1.76
TN ^a (%)	1.06-2	0.35-0.63	1.45-1.6	0.54-0.8
	1.63±0.41	0.53±0.13	1.5±0.07	0.66±0.11
Ash ^b (%)	1.82-5.67	4.73-16.38	25.67-36.45	45.07-63.54
	3.57±1.72	10.76±5.15	31.11±5.15	53.5±7.99
pH	4.17-5	6.1-7.11	9.77-10.8	7.21-7.5
	4.69±0.36	6.7±0.48	10.22±0.43	7.36±0.14
EC (dS m ⁻¹)	0.2-0.27	0.12-0.34	1.06-1.59	0.27-0.61
	0.24±0.03	0.26±0.1	1.38±0.23	0.48±0.15
NO ₃ -N (mg kg ⁻¹)	2929-4376	220-568	289-310	43-60
	3739.5±648.12	354.75±151.06	299.50±9.33	51.25±7.37
NH ₄ -N (mg kg ⁻¹)	1756-2674	251-455	158-180	122-140
	2235.75±386.41	337.75±98.42	168.75±10.05	131.25±9.57

^a Όπως παραλήφθηκε (As received basis), ^b Επί ξηρού (Dry basis) TOC: Total Organic Carbon (Ολικός Οργανικός Άνθρακας), TN: Total Nitrogen (Ολικό Άζωτο), EC: electrical conductivity (ηλεκτρική αγωγιμότητα) ^a Όπως παραλήφθηκε (As received basis), ^b Επί ξηρού (Dry basis), Κάτω από το όριο ανίχνευσης (<DL), [‡]Εύρος τιμών, [§]Μέσος όρος ± τυπική απόκλιση (n=4)

Πίνακας 4-4. (συνεχίζεται)

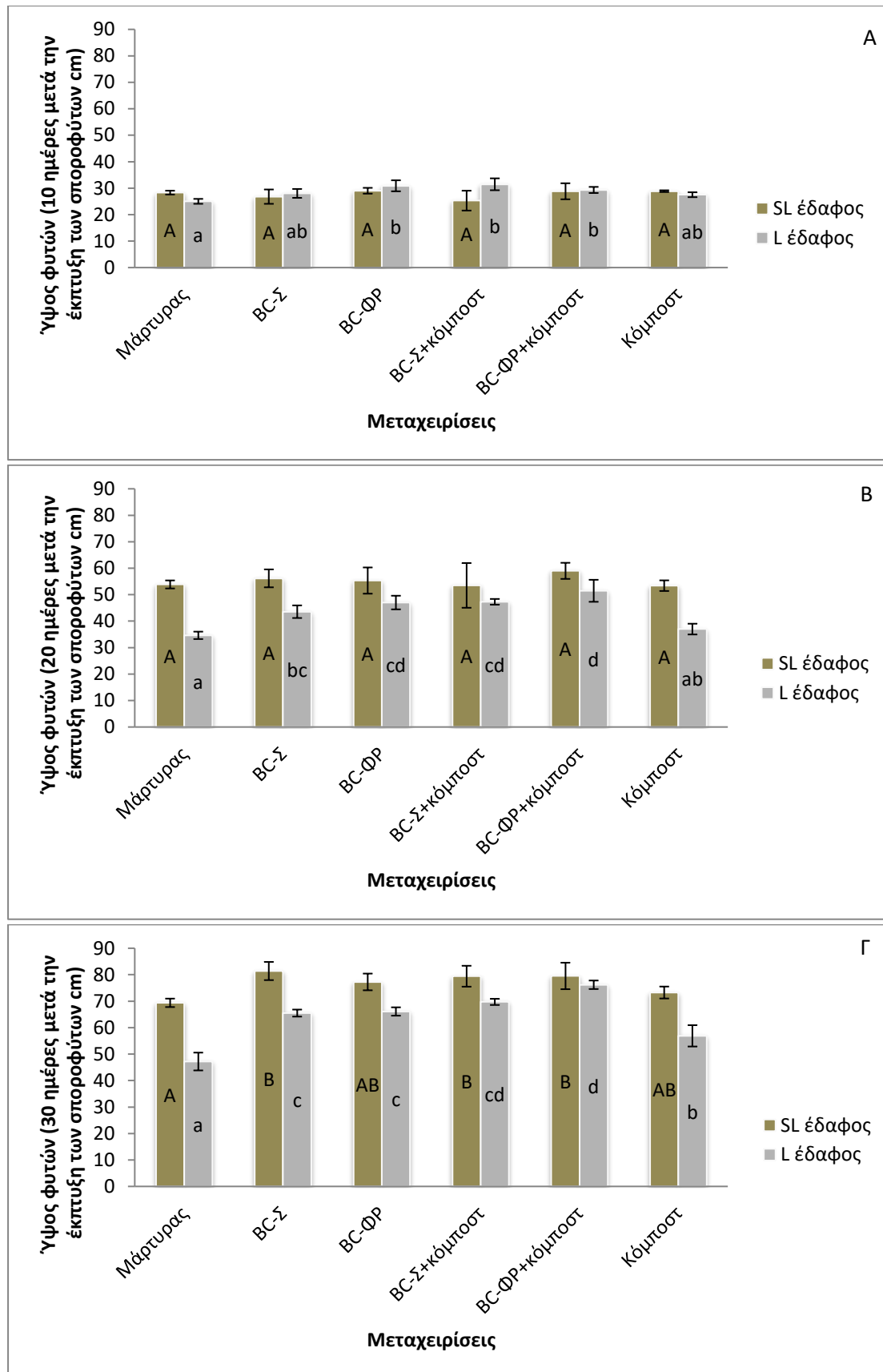
Χαρακτηριστικά	Σ	ΦΡ	BC-Σ	BC-ΦΡ
P (g kg ⁻¹)	0.89-0.99	0.02-0.21	3.44-3.63	1.73-1.8
	0.94±0.05	0.14±0.08	3.55±0.09	1.76±0.03
Mg (g kg ⁻¹)	0.75-0.82	0.16-0.21	4.56-4.91	0.53-0.84
	0.78±0.03	0.19±0.02	4.79±0.16	0.67±0.13
K (g kg ⁻¹)	28.36-30.03	4.21-5.09	60.78-76.77	13.04-15.90
	29.28±0.72	4.61±0.37	71.22±7.12	14.65±1.21
Ca (g kg ⁻¹)	0.26-0.39	0.03-0.06	1.10-1.21	0.13-0.19
	0.35±0.06	0.05±0.01	1.15±0.05	0.16±0.02
Mn (mg kg ⁻¹)	8.00-10.00	90.00-100.00	117.00-122.00	332.00-345.00
	9.25±0.96	93.75±4.35	119.50±2.08	338.75±5.38
Fe (mg kg ⁻¹)	58.00-61.00	8.00-12.00	1699-1796	78.00-83.00
	59.50±1.29	9.75±1.71	1748.25±39.62	80.50±2.08
Zn (mg kg ⁻¹)	9.60-14.94	10.00-15.89	212.84-251.38	32.76-37.48
	12.26±2.85	13.54±2.73	236.58±16.61	35.36±1.96
Cu (mg kg ⁻¹)	30.35-41.40	2.61-3.13	774.89-920	9.51-11.00
	37.56±4.95	2.85±0.25	969.12±43.94	10.41±0.64
Cr (mg kg ⁻¹)	<DL	<DL	11.85-14.55	2.37-5.46
	<DL	<DL	13.45±1.16	3.55±1.45
Ni (mg kg ⁻¹)	<DL	<DL	13.92-16.31	2.53-3.23
	<DL	<DL	15.16±1.23	2.86±0.33
As (mg kg ⁻¹)	<DL	<DL	1.92-4.37	1.49-4.55
	<DL	<DL	3.11±1.01	3.04±1.26
Pb (mg kg ⁻¹)	<DL	<DL	6.66-9.44	1.3-2.11
	<DL	<DL	7.96±1.25	1.81±0.38
Cd (mg kg ⁻¹)	<DL	<DL	<DL	<DL
	<DL	<DL	<DL	<DL
Se (mg kg ⁻¹)	24.32-35.93	14.89-19	16.88-17.32	15.31-18.53
	30.04±4.75	16.98±1.69	17.09±0.21	16.88±1.41
Mo (mg kg ⁻¹)	0.3-0.62	0.27-0.49	1.98-2.82	0.60-1.41
	0.52±0.15	0.41±0.11	2.54±0.39	0.87±0.37

^a Όπως παραλήφθηκε (As received basis), ^b Επί ξηρού (Dry basis) TOC: Total Organic Carbon (Ολικός Οργανικός Άνθρακας), TN: Total Nitrogen (Ολικό Άζωτο), EC: electrical conductivity (ηλεκτρική αγωγιμότητα) ^a Όπως παραλήφθηκε (As received basis), ^b Επί ξηρού (Dry basis), Κάτω από το όριο ανίχνευσης (<DL), [‡]Εύρος τιμών, [§]Μέσος όρος ± τυπική απόκλιση (n=4)

4.3.2 Ανάπτυξη και απόδοση των φυτών

Υψος φυτών

Στατιστικώς σημαντική αύξηση παρατηρήθηκε στο ύψος του καλαμποκιού 10, 20 και 30 ημέρες μετά την έκπτυξη των σποροφύτων στο L έδαφος, όταν εφαρμόσθηκε βιοεξανθράκωμα και βιοεξανθράκωμα σε συνδυασμό με κόμποστ, σε σύγκριση με τον μάρτυρα, ενώ στο SL έδαφος 30 ημέρες μετά την έκπτυξη των σποροφύτων (Σχήμα 4-1).

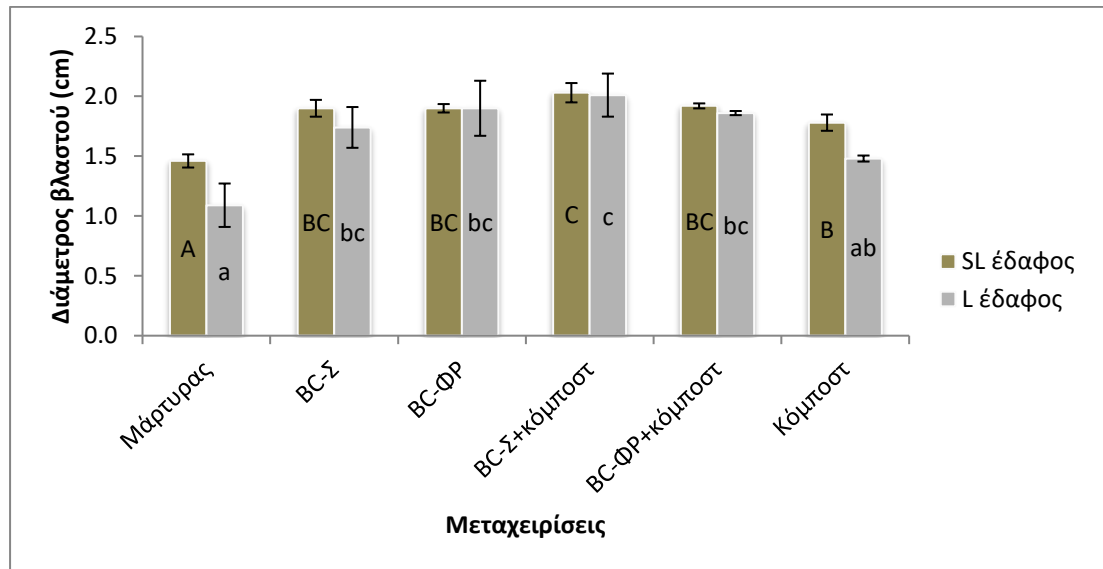


Σχήμα 4-1. Υψος (cm) του *Zea Mays* L. στο SL και L έδαφος, 10 ημέρες (A), 20 ημέρες (B) και 30 ημέρες (Γ) μετά την έκπτυξη των σποροφύτων (μέσος όρος±τυπική απόκλιση, n=3). Για κάθε έδαφος, εφαρμόστηκε one-way ANOVA. Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν

σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε $p < 0.05$. Τα κεφαλαία και πεζά γράμματα υποδηλώνουν ότι το κριτήριο εφαρμόστηκε ξεχωριστά σε κάθε έδαφος (SL και L).

Διάμετρος βλαστού

Η εφαρμογή όλων των εδαφοβελτιωτικών αύξησε τη διάμετρο του βλαστού του καλαμποκιού σε σύγκριση με τον μάρτυρα στο SL έδαφος, ενώ στο L έδαφος μόνο η εφαρμογή του κόμποστ δεν αύξησε τη διάμετρο του βλαστού (Σχήμα 4-2).



Σχήμα 4-2. Διάμετρος βλαστού (cm) του *Zea Mays* L. στο SL και L έδαφος (μέσος όρος±τυπική απόκλιση, n=3). Στη διάμετρο βλαστού, εφαρμόστηκε one-way ANOVA. Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε $p < 0.05$. Τα κεφαλαία και πεζά γράμματα υποδηλώνουν ότι το κριτήριο εφαρμόστηκε ξεχωριστά σε κάθε έδαφος (SL και L).

Ξηρό βάρος υπέργειων και υπόγειων φυτικών ιστών

Η εφαρμογή των εδαφοβελτιωτικών αύξησε σημαντικά το ξηρό βάρος του υπέργειου μέρους του φυτού κατά 75% με την προσθήκη κόμποστ, κατά 98-155% με την προσθήκη των βιοεξανθρακωμάτων και κατά 116-127% με την προσθήκη βιοεξανθρακωμάτων σε συνδυασμό με κόμποστ, σε σύγκριση με τον μάρτυρα, στο SL έδαφος, ενώ στο L έδαφος κατά 240-340% με την προσθήκη βιοεξανθρακωμάτων και 327-436% με την προσθήκη βιοεξανθρακωμάτων σε συνδυασμό με κόμποστ (Σχήμα 4-3). Η σειρά αύξησης των μεταχειρίσεων όσον αφορά στα ξηρά βάρη των υπέργειων φυτικών ιστών είναι: BC-Σ > BC-ΦΡ+κόμποστ > BC-Σ+κόμποστ > BC-ΦΡ > Κόμποστ > Μάρτυρας, στο SL έδαφος, ενώ BC-ΦΡ+κόμποστ > BC-ΦΡ > BC-Σ+κόμποστ > BC-Σ > Κόμποστ > Μάρτυρας, στο L έδαφος (Σχήμα 4-3). Η προσθήκη βιοεξανθρακώματος στέμφυλων και κόμποστ έδωσε το μεγαλύτερο ξηρό βάρος της υπέργειας και υπόγειας φυτικής βιομάζας, αντίστοιχα, στο SL έδαφος, ενώ στο L

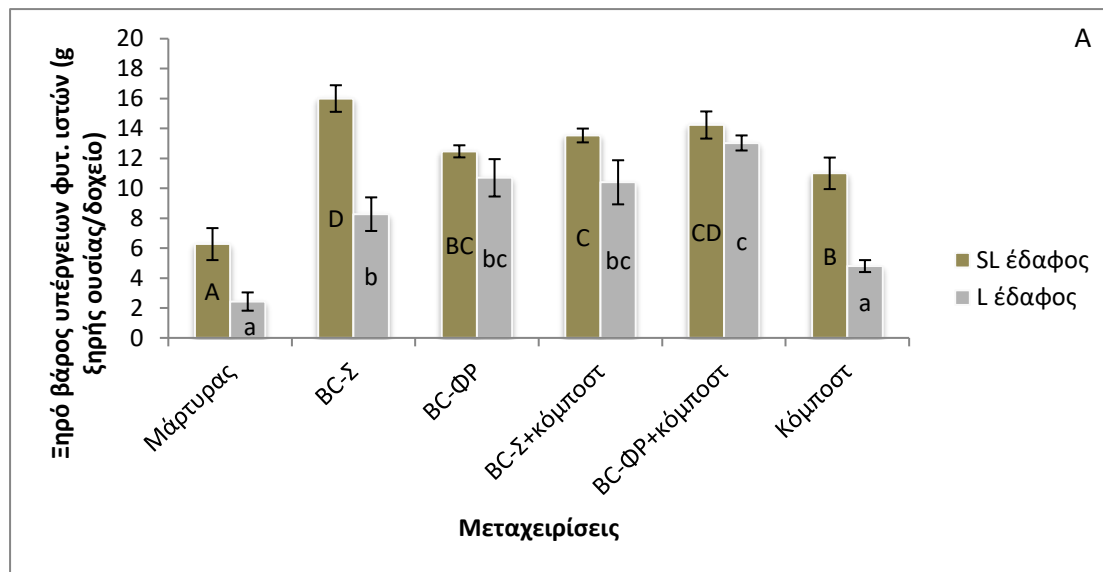
έδαφος, η προσθήκη βιοεξανθρακώματος φλοιών ρυζιού σε συνδυασμό με κόμποστ τόσο στους υπέργειους, όσο και στους υπόγειους φυτικούς ιστούς (Σχήμα 4-3).

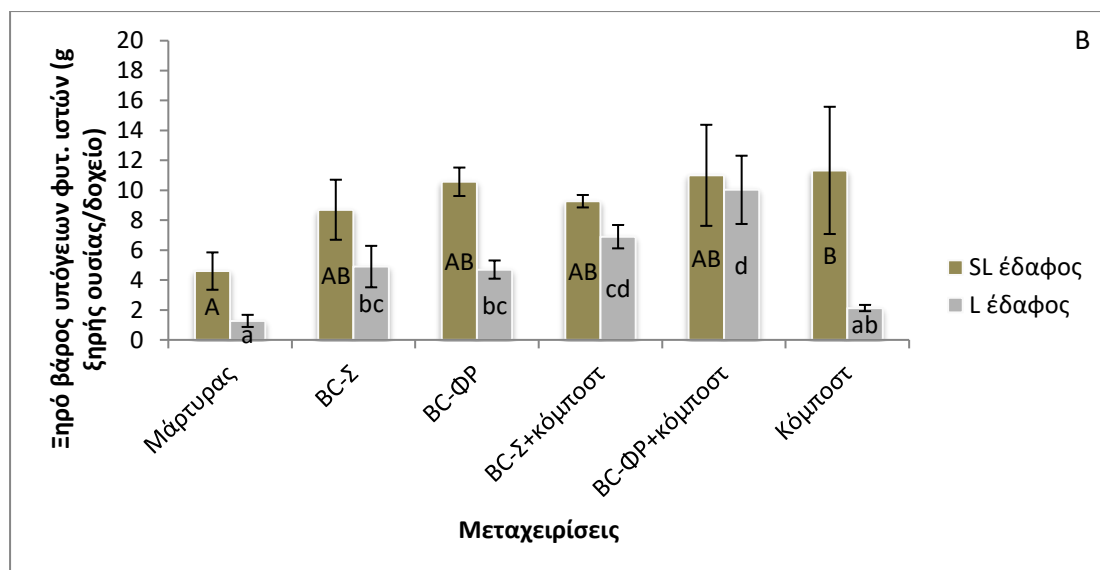
Οι θετικές επιδράσεις της εφαρμογής βιοεξανθρακωμάτων σε συνδυασμό με ανόργανη N λίπανση έχουν επισημανθεί σε προηγούμενες έρευνες σε καλλιέργειες όπως το σόργο (Blackwell et al., 2015) ή το κριθάρι (Agegnehu et al., 2016a, 2016b). Όσον αφορά στο καλαμπόκι, οι Butnan et al. (2015) παρατήρησαν αύξηση 115-600% στο ξηρό βάρος του καλαμποκιού, σε σύγκριση με τον μάρτυρα, έπειτα από εφαρμογή βιοεξανθρακώματος από ξύλο ευκαλύπτου στους 350°C σε δύο εδάφη, ένα πηλοαμμώδες (pH=5.5) και ιλυοαργιλοπηλώδες (pH=6) σε δόση 1%, 2% και 4%. Επίσης, οι Rogovska et al. (2014) βρήκαν ότι σε χαμηλές δόσεις 19, 38, and 58 Mg biochar ha⁻¹, υπήρξε αύξηση στο ξηρό βάρος του φυτού και των σπόρων του καλαμποκιού 11-55% σε ένα πηλώδες έδαφος, ενώ σε υψηλότερες δόσεις 77 and 96 Mg ha⁻¹, δεν παρατήρησαν περαιτέρω αύξηση με την προσθήκη βιοεξανθρακώματος από σκληρό ξύλο παραχθέν στους 500-575°C. Επιπρόσθετα, οι Baronti et al. (2010) παρατήρησαν αύξηση 26-44% και 6-24% στο ξηρό βάρος του φυτού και των σπόρων, αντίστοιχα, έπειτα από την προσθήκη βιοεξανθρακώματος από σκληρό ξύλο στους 500°C σε δόση 10 t ha⁻¹, σε ένα αμμοιλοπηλώδες έδαφος (pH=7.1). Οι Inal et al. (2015) βρήκαν ότι με την προσθήκη βιοεξανθρακώματος, παραχθέν στους 300°C από κοπριά πουλερικών, σε δόσεις 0, 2.5, 5, 10 και 20 g kg⁻¹, σε ένα αργιλοπηλώδες έδαφος με pH=7.8 επέρχεται αύξηση 62-113% στο ξηρό βάρος του καλαμποκιού. Ωστόσο, οι Jones et al. (2012) δεν παρατήρησαν καμία επίδραση στην απόδοση του καλαμποκιού, έπειτα από την προσθήκη βιοεξανθρακώματος από ξύλο (παραχθέν στους 450°C) σε δόση 25 και 50 t ha⁻¹ σε ένα αμμοαργιλοπηλώδες έδαφος (pH=6.7). Οι Lentz and Ippolito (2012) δεν βρήκαν αύξηση στο ξηρό βάρος του καλαμποκιού, έπειτα από την εφαρμογή βιοεξανθρακώματος από σκληρό ξύλο σε ένα ασβεστούχο έδαφος. Από τα αποτελέσματά μας, αλλά και αυτά άλλων μελετών (Agegnehu et al., 2017; Glaser et al., 2015; Schulz and Glaser, 2012), αναφέρθηκε ότι ο συνδυασμός του βιοεξανθρακώματος σε χαμηλές δόσεις με οργανική λίπανση (κόμποστ) ή χωρίς, μπορεί να βελτιώσει την αποτελεσματικότητα της ανόργανης λίπανσης και κατ'επέκταση την απόδοση της καλλιέργειας. Η μεγαλύτερη επίδραση στο ξηρό βάρος των φυτών καλαμποκιού σε σχέση με τις άλλες μελέτες πιθανόν να οφείλεται στη μεγαλύτερη γονιμότητα των εδαφών που επιλέξαμε, αφού έχει αναφερθεί σε άλλες μελέτες ότι το βιοεξανθράκωμα προκαλεί βελτίωση στην ανοργανοποίηση του N, διότι το βιοεξανθράκωμα δρα ως μια νέα πηγή C που ενεργοποιεί τη δραστηριότητα των μικροοργανισμών (Naisse et al., 2015; Zimmerman et al., 2011).

Η θετικότερη επίδραση του βιοεξανθρακώματος φλοιών ρυζιού σε συνδυασμό με κόμποστ στο L έδαφος από ότι στο SL έδαφος μπορεί να οφείλεται στις αλλαγές των φυσικοχημικών ιδιοτήτων και κυρίως των φυσικών, όπως αύξηση του πορώδους, αύξηση της ιδατοικανότητας και μείωση της φαινομενικής πυκνότητας (Lu et al., 2014; Nelissen et al., 2015). Έχει αναφερθεί επίσης ότι η εφαρμογή βιοεξανθρακώματος ρυζιού μπορεί να αυξήσει τις παραμέτρους που επηρεάζουν τη δομή του πορώδους του εδάφους κατά 20% (Lu et al., 2014). Συνολικά, οι βελτιωμένες φυσικές ιδιότητες του εδάφους, όπως η φαινομενική πυκνότητα, η ικανότητα συγκράτησης νερού και η ικανότητα συσσωμάτωσης, μπορεί να αυξήσουν

τη συγκράτηση τόσο του νερού όσο και των θρεπτικών συστατικών, τα οποία ωφελούν άμεσα τη γονιμότητα του εδάφους.

Επίσης, η ανάπτυξη των φυτών συνδέεται άμεσα με την ανάπτυξη του ριζικού συστήματος και τις συνθήκες που επικρατούν στη ριζόσφαιρα, επομένως οποιαδήποτε μεταβολή στη μορφολογία της ρίζας είναι ο σημαντικότερος μηχανισμός για την προσαρμογή των φυτών στις μεταβολές του εδάφους όπως οι μεταβολές του pH και οι διακυμάνσεις των θρεπτικών συστατικών (Hinsinger et al., 2003; Wang et al., 2001). Οι Zheng et al. (2013) παρατήρησαν μεγαλύτερες ρίζες καλαμποκιού σε μήκος, όγκο, επιφάνεια και ριζικά τριχίδια σε εδάφη που εφαρμόστηκαν βιοεξανθρακώματα σε σύγκριση με αυτά που δεν εφαρμόστηκαν. Ωστόσο, το γεγονός ότι δεν είχαμε επίδραση στο ξηρό βάρος των ριζών όταν εφαρμόστηκε κόμποστ ενώ στο συνδυασμό βιοεξανθρακώματος με κόμποστ είχαμε, μπορεί να οφείλεται στην προσωρινή ακινητοποίηση των θρεπτικών στοιχείων. Οι Fischer and Glaser (2012) έδειξαν ότι τα μακροθρεπτικά και τα μικροθρεπτικά συστατικά του κόμποστ δεν ήταν άμεσα διαθέσιμα στο φυτό αμέσως μετά την εφαρμογή του, λόγω διαφορετικών μορφών δέσμευσης στο εδαφικό "υπόβαθρο", με αποτέλεσμα την προσωρινή ακινητοποίηση αυτών.



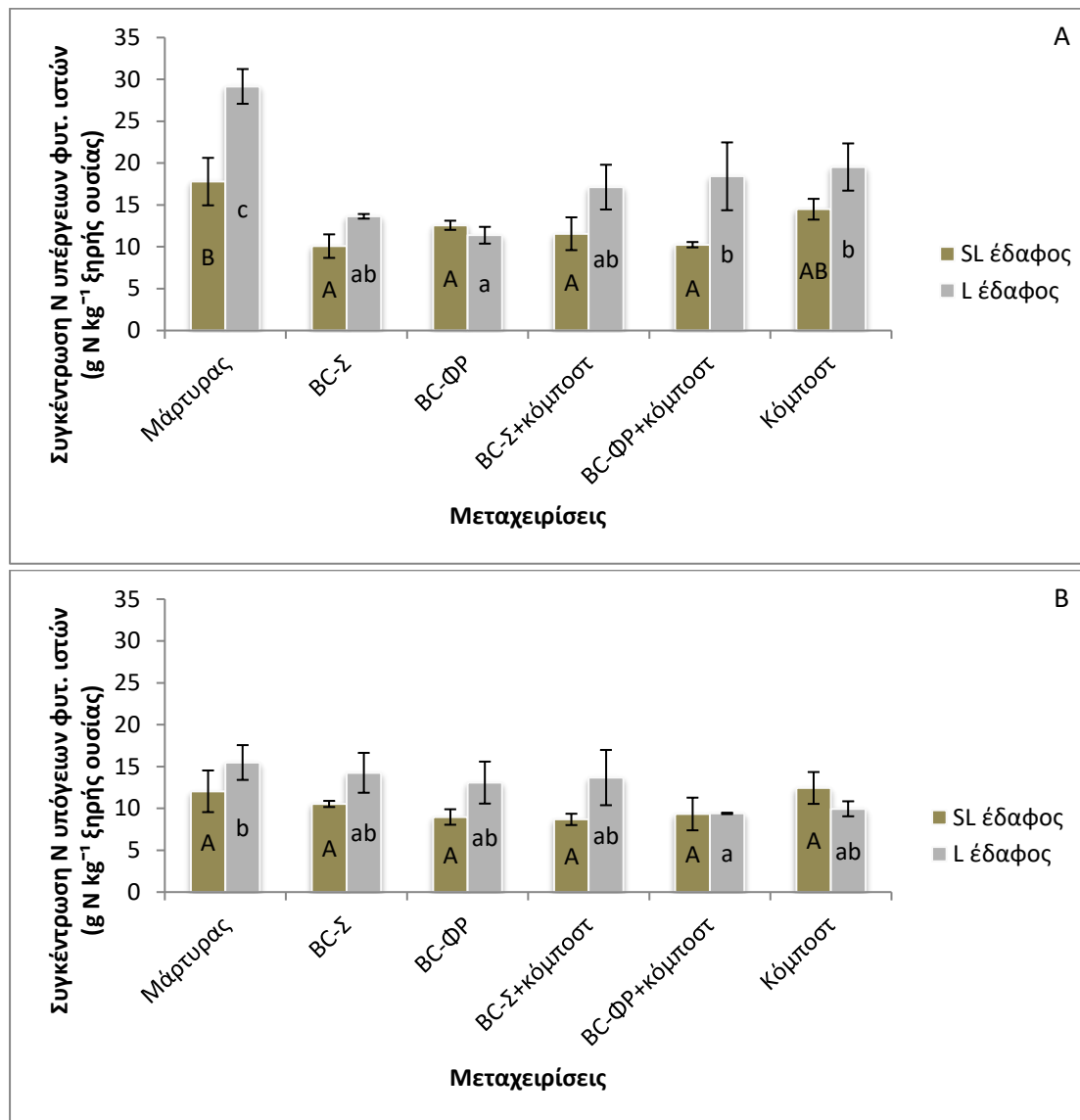


Σχήμα 4-3. Ξηρό βάρος (g ξηρής ουσίας/δοχείο) υπέργειων (A) και υπόγειων (B) φυτικών ιστών του *Zea Mays* L. στο SL και L έδαφος (μέσος όρος \pm τυπική απόκλιση, $n=3$). Για κάθε έδαφος, εφαρμόστηκε one-way ANOVA. Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε $p<0.05$. Τα κεφαλαία και πεζά γράμματα υποδηλώνουν ότι το κριτήριο εφαρμόστηκε ξεχωριστά σε κάθε έδαφος (SL και L).

4.3.2 Συγκέντρωση μακροθρεπτικών N, P, K, Ca, Mg στους υπέργειους και υπόγειους φυτικούς ιστούς

Η συγκέντρωση του N, είτε μειώθηκε είτε δεν επηρεάστηκε σημαντικά στην υπέργεια και υπόγεια βιομάζα του φυτού, και στα δύο εδάφη, ωστόσο, η πρόσληψη του N από τους υπέργειους φυτικούς ιστούς αυξήθηκε στις μεταχειρίσεις βιοεξανθρακώματος στέμφυλων και κόμποστ, στο SL έδαφος, ενώ στο L έδαφος, αυξήθηκε στις μεταχειρίσεις συνδυασμού βιοεξανθρακώματος στέμφυλων με κόμποστ και συνδυασμού βιοεξανθρακώματος φλοιών ρυζιού με κόμποστ (Σχήμα 4-4). Φαίνεται ότι τα αποθέματα N μειώθηκαν λόγω της γρήγορης και μεγάλης ανάπτυξης του φυτού, γεγονός που οδηγεί σε χαμηλότερη συγκέντρωση N στους φυτικούς ιστούς. Οι Kammann et al. (2011) κατέγραψαν, επίσης, μειωμένες συγκεντρώσεις N στους φυτικούς ιστούς του *Chenopodium quinoa* Willd σε ένα πείραμα με βιοεξανθράκωμα από φλοιούς φυσιτικών, αλλά η απόδοση της φυτικής βιομάζας αυξήθηκε έως και 60% γεγονός που αποδεικνύει αυξημένη αποδοτικότητα χρήσης N. Οι Agegnehu et al. (2016a) ανέφεραν σε μελέτη τους αυξημένη αποδοτικότητα χρήσης N όταν εφαρμόστηκε συνδυασμός ανόργανης λίπανσης N με βιοεξανθράκωμα από όταν εφαρμόστηκε ξεχωριστά ανόργανη λίπανση N ή βιοεξανθράκωμα σε καλλιέργεια κριθαριού σε ένα Nitisol έδαφος. Αυτές οι δύο προαναφερθείσες μελέτες ενισχύουν τη θεωρία ότι ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των διαφόρων συνιστωσών της αποδοτικότητας χρήσης N είναι ο συνδυασμός πρόσληψης N από τα φυτά και αποτελεσματικότητας στη φυσιολογία του φυτού (Agegnehu et al., 2016a; Xu et al., 2012). Επιπλέον, οι Zheng et al. (2013) ανέφεραν χαμηλότερες συγκεντρώσεις N σε φυτά καλαμποκιού σε ένα πείραμα τριών μηνών, αλλά και μεγαλύτερη βιομάζα με την

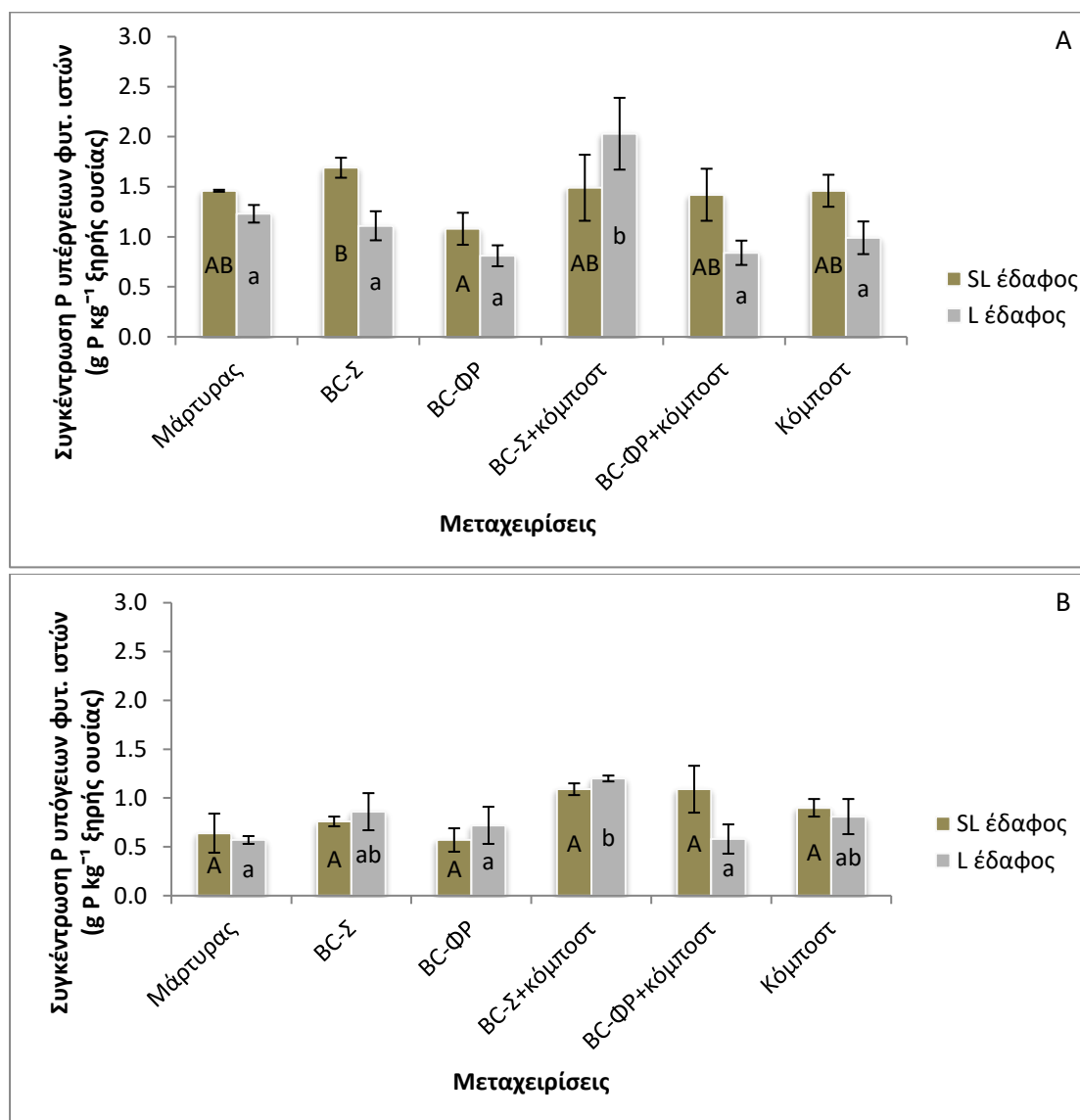
εφαρμογή βιοεξανθρακώματος. Από την άλλη μεριά, οι Rajkonich et al. (2012) παρατήρησαν χαμηλές συγκεντρώσεις N στους φυτικούς ιστούς και χαμηλή πρόσληψη N από τους φυτικούς ιστούς του καλαμποκιού που αναπτύχθηκε για 46 ημέρες σε ένα Alfisol, όπου είχε εφαρμοστεί βιοεξανθράκωμα.



Σχήμα 4-4. Συγκέντρωση N (g N kg^{-1} ξηρής ουσίας) υπέργειων (A) και υπόγειων (B) φυτικών ιστών του *Zea Mays* L. στο SL και L έδαφος (μέσος όρος \pm τυπική απόκλιση, $n=3$). Για κάθε έδαφος, εφαρμόστηκε one-way ANOVA. Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε $p<0.05$. Τα κεφαλαία και πεζά γράμματα υποδηλώνουν ότι το κριτήριο εφαρμόστηκε ξεχωριστά σε κάθε έδαφος (SL και L).

Η συγκέντρωση του P αυξήθηκε στους υπέργειους και υπόγειους φυτικούς ιστούς μόνο με την προσθήκη συνδυασμού βιοεξανθρακώματος στέμφυλων με κόμποστ στο L έδαφος (Σχήμα 4-5). Οι Inal et al. (2015) βρήκαν αυξημένες συγκεντρώσεις P στους φυτικούς ιστούς του καλαμποκιού έπειτα από εφαρμογή βιοεξανθρακώματος από κοπριά πουλερικών σε ένα ασβεστούχο έδαφος. Από την άλλη, οι Lentz and Ippolito

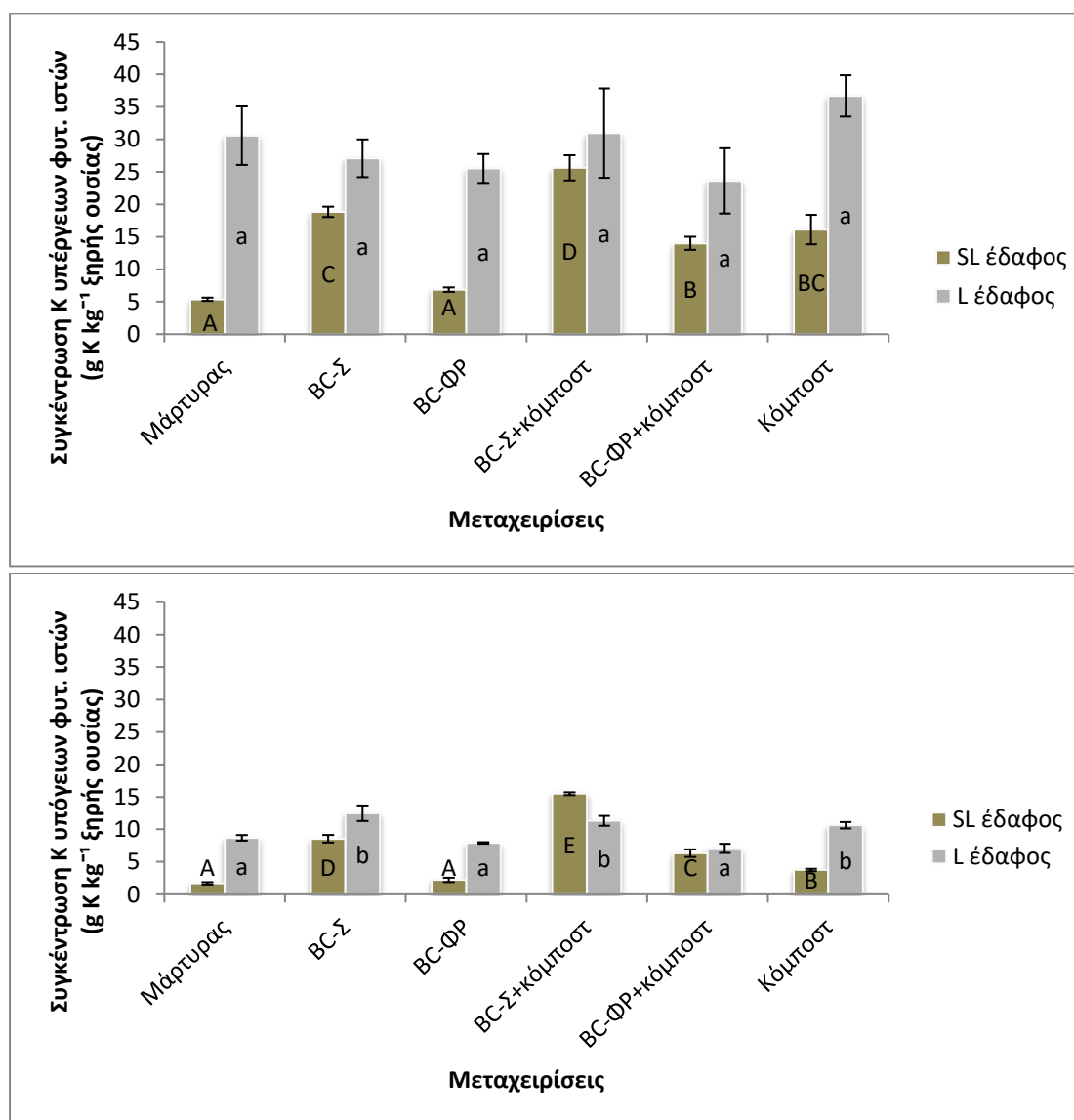
(2012) δεν βρήκαν σημαντική διαφορά στη συγκέντρωση P στους φυτικούς ιστούς του καλαμποκιού έπειτα από εφαρμογή δύο ειδών βιοεξανθρακωμάτων σε ένα ασβεστούχο έδαφος, λόγω της ρυθμιστικής του ικανότητας.



Σχήμα 4-5. Συγκέντρωση P (g P kg⁻¹ ξηρής ουσίας) υπέργειων (A) και υπόγειων (B) φυτικών ιστών του *Zea Mays* L. στο SL και L έδαφος (μέσος όρος±τυπική απόκλιση, n=3). Για κάθε έδαφος, εφαρμόστηκε one-way ANOVA. Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε $p<0.05$. Τα κεφαλαία και πεζά γράμματα υποδηλώνουν ότι το κριτήριο εφαρμόστηκε ξεχωριστά σε κάθε έδαφος (SL και L).

Η συγκέντρωση K, στους υπέργειους και υπόγειους φυτικούς ιστούς αυξήθηκε σχεδόν σε όλες τις μεταχειρίσεις στο SL έδαφος, εκτός από το βιοεξανθράκωμα φλοιών ρυζιού, ενώ στο L έδαφος, μόνο το βιοεξανθράκωμα στέμφυλων, ο συνδυασμός βιοεξανθρακώματος στέμφυλων με κόμποστ και το κόμποστ αύξησαν τη συγκέντρωση K μόνο στους υπόγειους φυτικούς ιστούς (Σχήμα 4-6). Οι Rogovska et al. (2014) παρατήρησαν αυξημένη πρόσληψη K από το καλαμπόκι με την εφαρμογή βιοεξανθρακώματος από σκληρό ξύλο σε δόση 96 Mg ha⁻¹ σε ένα πηλώδες έδαφος

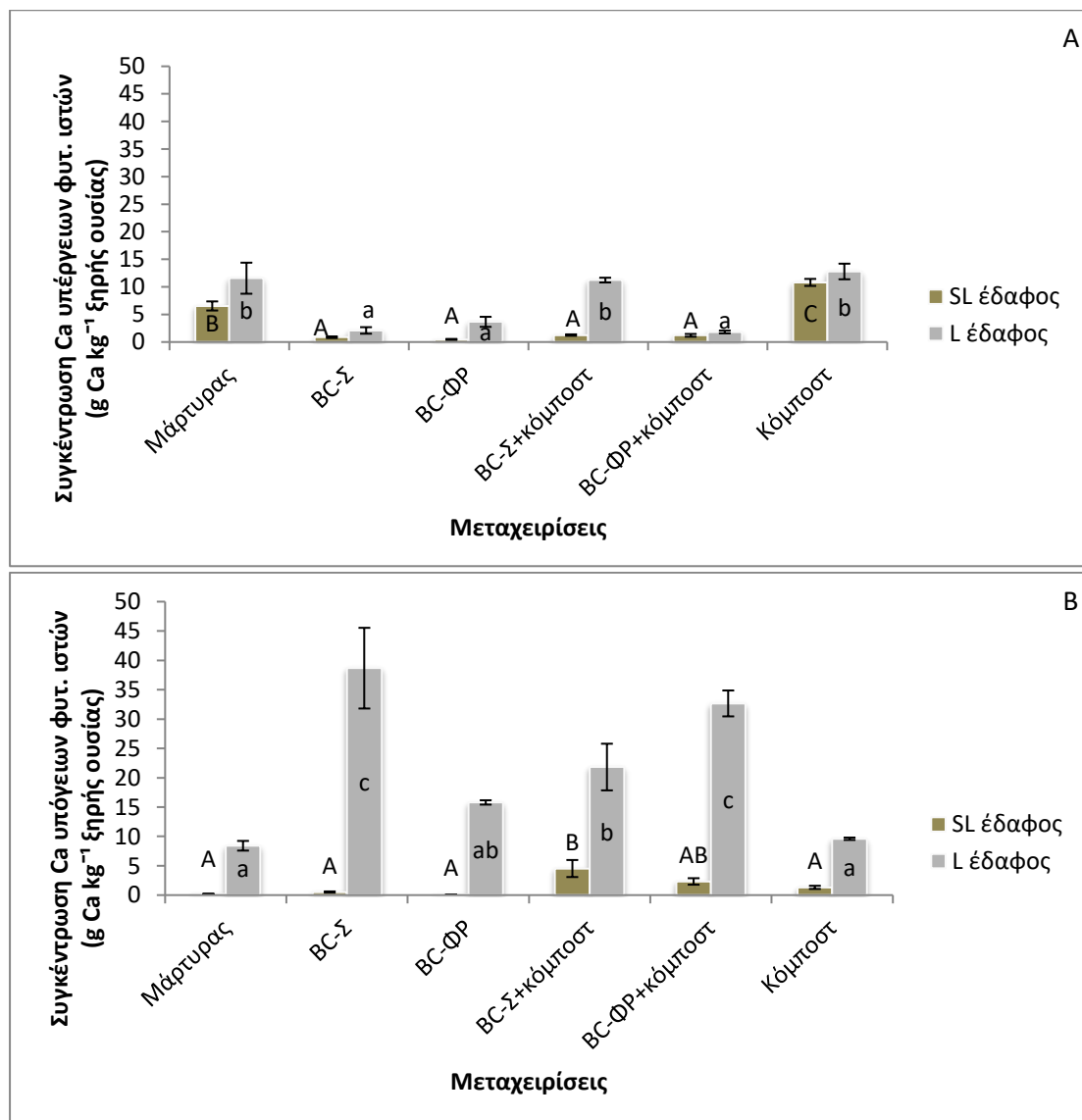
αποδίδοντας αυτή την αύξηση σε αυξημένη υγρασία στο έδαφος έπειτα από την εφαρμογή του βιοεξανθρακώματος. Επίσης, οι Butnan et al. (2015) βρήκαν αυξημένη συγκέντρωση K σε φυτικούς ιστούς καλαμποκιού σε ένα πηλοαμμώδες έδαφος, αφού είχε προστεθεί βιοεξανθράκωμα από ξύλο ευκάλυπτου σε δόση 4%, αποδίδοντας αυτή την αύξηση στις σχέσεις ανταγωνισμού του K με το Ca και το Mg. Επιπρόσθετα, οι Inal et al. (2015) βρήκαν αυξημένες συγκεντρώσεις K στους φυτικούς ιστούς του καλαμποκιού έπειτα από εφαρμογή βιοεξανθρακώματος από κοπριά πουλερικών σε ένα ασβεστούχο έδαφος. Φαίνεται ότι στο παρόν πείραμα, οι τρεις παράγοντες, η αυξημένη υγρασία, η ανταγωνιστικότητα του K με το Ca και το Mg, και η υψηλή συγκέντρωση του K στο βιοεξανθράκωμα, ειδικότερα του βιοεξανθρακώματος στέμφυλων με συγκέντρωση K 71 g kg^{-1} , έπαιξαν σπουδαίο ρόλο στην αύξηση της συγκέντρωσης K στους φυτικούς ιστούς.



Σχήμα 4-6. Συγκέντρωση K (g K kg^{-1} ξηρής ουσίας) υπέργειων (A) και υπόγειων (B) φυτικών ιστών του *Zea Mays* L. στο SL και L έδαφος (μέσος όρος \pm τυπική απόκλιση, $n=3$). Για κάθε έδαφος, εφαρμόστηκε one-way ANOVA. Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν

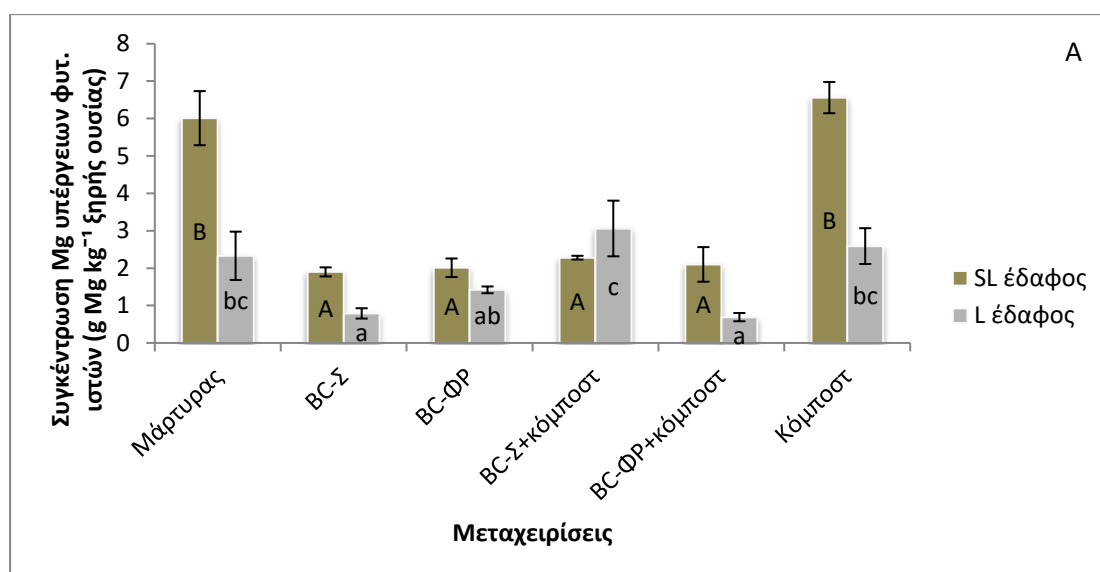
σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε $p < 0.05$. Τα κεφαλαία και πεζά γράμματα υποδηλώνουν ότι το κριτήριο εφαρμόστηκε ξεχωριστά σε κάθε έδαφος (SL και L).

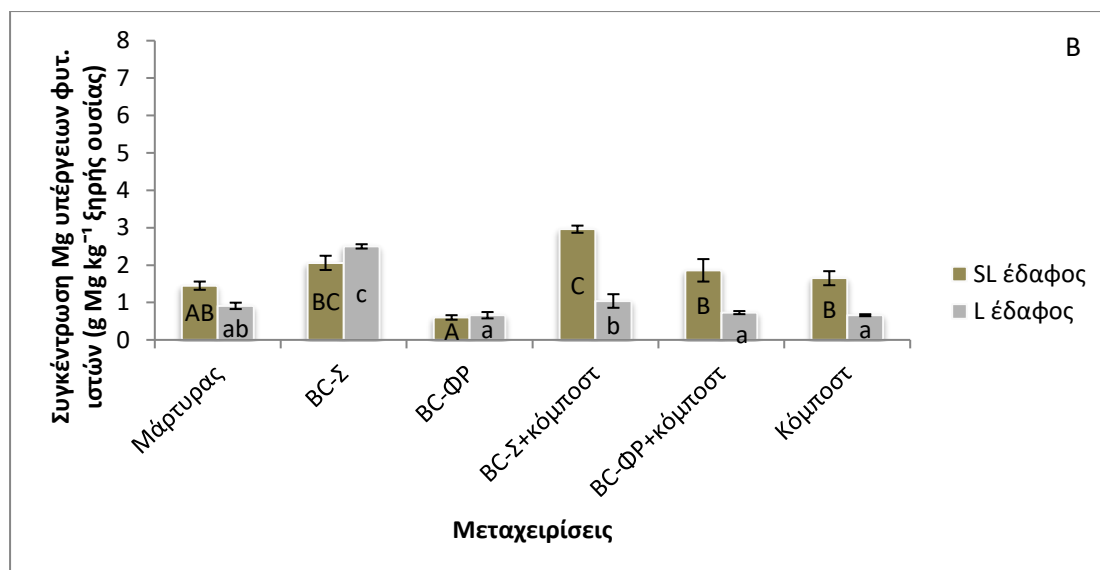
Η συγκέντρωση Ca, στους υπέργειους φυτικούς ιστούς μειώθηκε, εκτός από το κόμποστ στο SL έδαφος, ενώ στο L έδαφος μειώθηκε ή δεν επηρεάστηκε. Η συγκέντρωση Ca στους υπόγειους φυτικούς ιστούς δεν επηρεάστηκε και στα δύο εδάφη, εκτός από τις μεταχειρίσεις βιοεξανθρακώματος στέμφυλων, συνδυασμού στέμφυλων με κόμποστ και συνδυασμού φλοιών ρυζιού με κόμποστ, στο L έδαφος και η μεταχείριση συνδυασμού στέμφυλων με κόμποστ, στο SL έδαφος, οι οποίες αύξησαν τη συγκέντρωση Ca (Σχήμα 4-7). Οι Rogonska et al. (2014) παρατήρησαν μείωση στη συγκέντρωση του Ca στους φυτικούς ιστούς του καλαμποκιού με την εφαρμογή βιοεξανθρακώματος από σκληρό ξύλο σε ένα πηλώδες έδαφος. Επίσης, οι Inal et al. (2015) βρήκαν μειωμένες συγκεντρώσεις Ca στους φυτικούς ιστούς του καλαμποκιού, έπειτα από εφαρμογή βιοεξανθρακώματος από κοπριά πουλερικών σε ένα ασβεστούχο έδαφος.



Σχήμα 4-7. Συγκέντρωση Ca (g Ca kg^{-1} ξηρής ουσίας) υπέργειων (A) και υπόγειων (B) φυτικών ιστών του *Zea Mays* L. στο SL και L έδαφος (μέσος όρος \pm τυπική απόκλιση, $n=3$). Για κάθε έδαφος, εφαρμόστηκε one-way ANOVA. Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε $p<0.05$. Τα κεφαλαία και πεζά γράμματα υποδηλώνουν ότι το κριτήριο εφαρμόστηκε ξεχωριστά σε κάθε έδαφος (SL και L).

Η συγκέντρωση Mg, είτε μειώθηκε είτε δεν επηρεάστηκε σημαντικά στους υπέργειους και υπόγειους φυτικούς ιστούς και στα δύο εδάφη, εκτός από την αύξηση της συγκέντρωσης Mg στη μεταχείριση του βιοεξανθρακώματος στέμφυλων στους υπόγειους φυτικούς ιστούς στο L έδαφος και στη μεταχείριση συνδυασμού του βιοεξανθρακώματος στέμφυλων με κόμποστ στο SL έδαφος (Σχήμα 4-8). Οι Rogovska et al. (2014) δεν παρατήρησαν επίδραση στη συγκέντρωση του Mg στους φυτικούς ιστούς του καλαμποκιού με την εφαρμογή βιοεξανθρακώματος από σκληρό ξύλο σε ένα πηλώδες έδαφος. Αντίθετα, οι Inal et al. (2015) βρήκαν μειωμένες συγκεντρώσεις Mg στους φυτικούς ιστούς του καλαμποκιού έπειτα από εφαρμογή βιοεξανθρακώματος από κοπριά πουλερικών σε ένα ασβεστούχο έδαφος. Οι Butnan et al. (2015) βρήκαν μειωμένες συγκεντρώσεις Mg στους φυτικούς ιστούς του καλαμποκιού έπειτα από εφαρμογή βιοεξανθρακώματος από ξύλο ευκαλύπτου σε ένα πηλοαμμώδες έδαφος, αποδίδοντας αυτή τη μείωση στις ανταγωνιστικές σχέσεις του K με το Ca και το Mg.

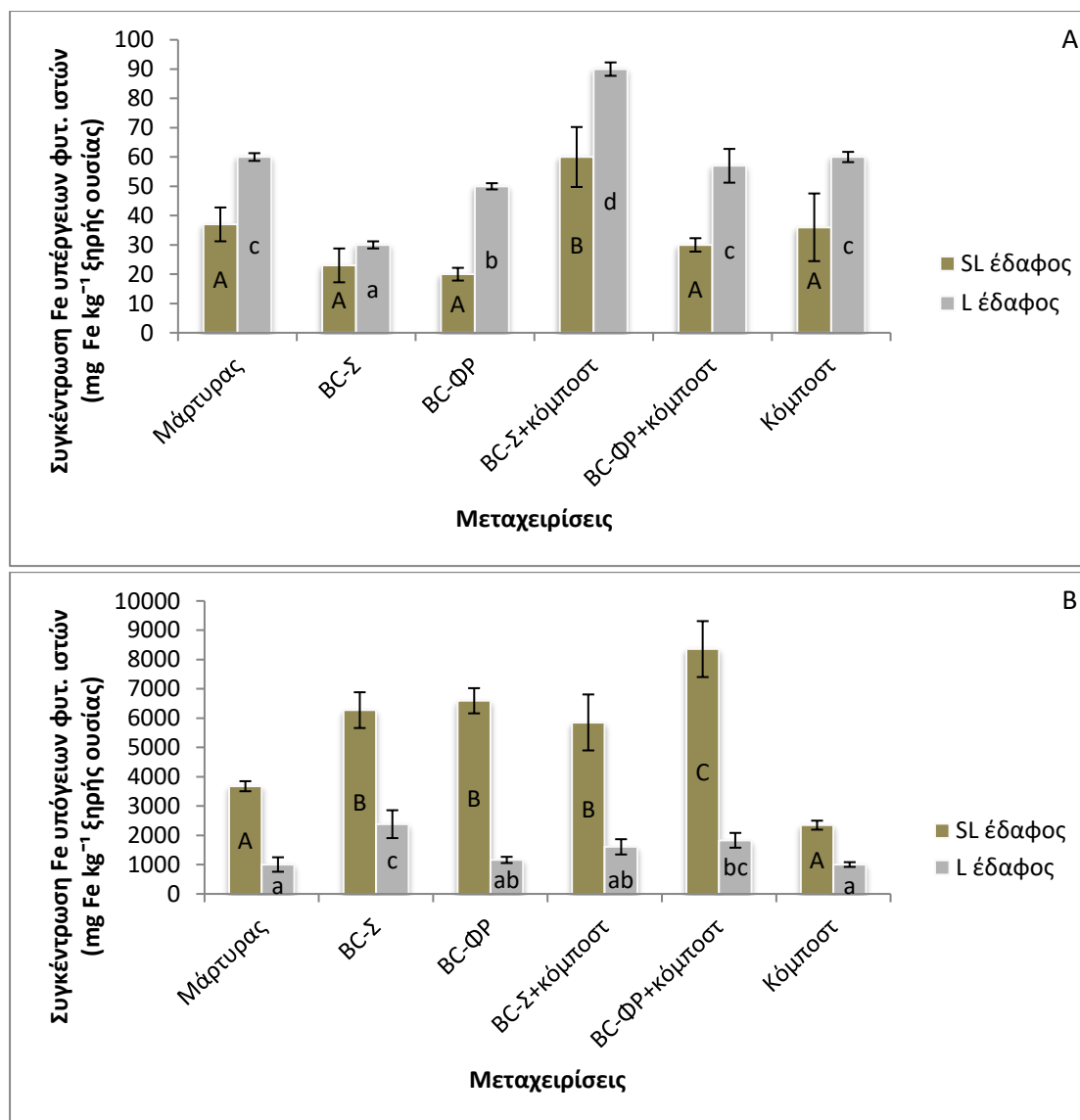




Σχήμα 4-8. Συγκέντρωση Mg (g Mg kg^{-1} ξηρής ουσίας) υπέργειων (A) και υπόγειων (B) φυτικών ιστών του Zea Mays L. στο SL και L έδαφος (μέσος όρος \pm τυπική απόκλιση, $n=3$). Για κάθε έδαφος, εφαρμόστηκε one-way ANOVA. Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε $p<0.05$. Τα κεφαλαία και πεζά γράμματα υποδηλώνουν ότι το κριτήριο εφαρμόστηκε ξεχωριστά σε κάθε έδαφος (SL και L).

4.3.3 Συγκέντρωση μικροθρεπτικών Fe, Mn, Zn στους υπέργειους και υπόγειους φυτικούς ιστούς

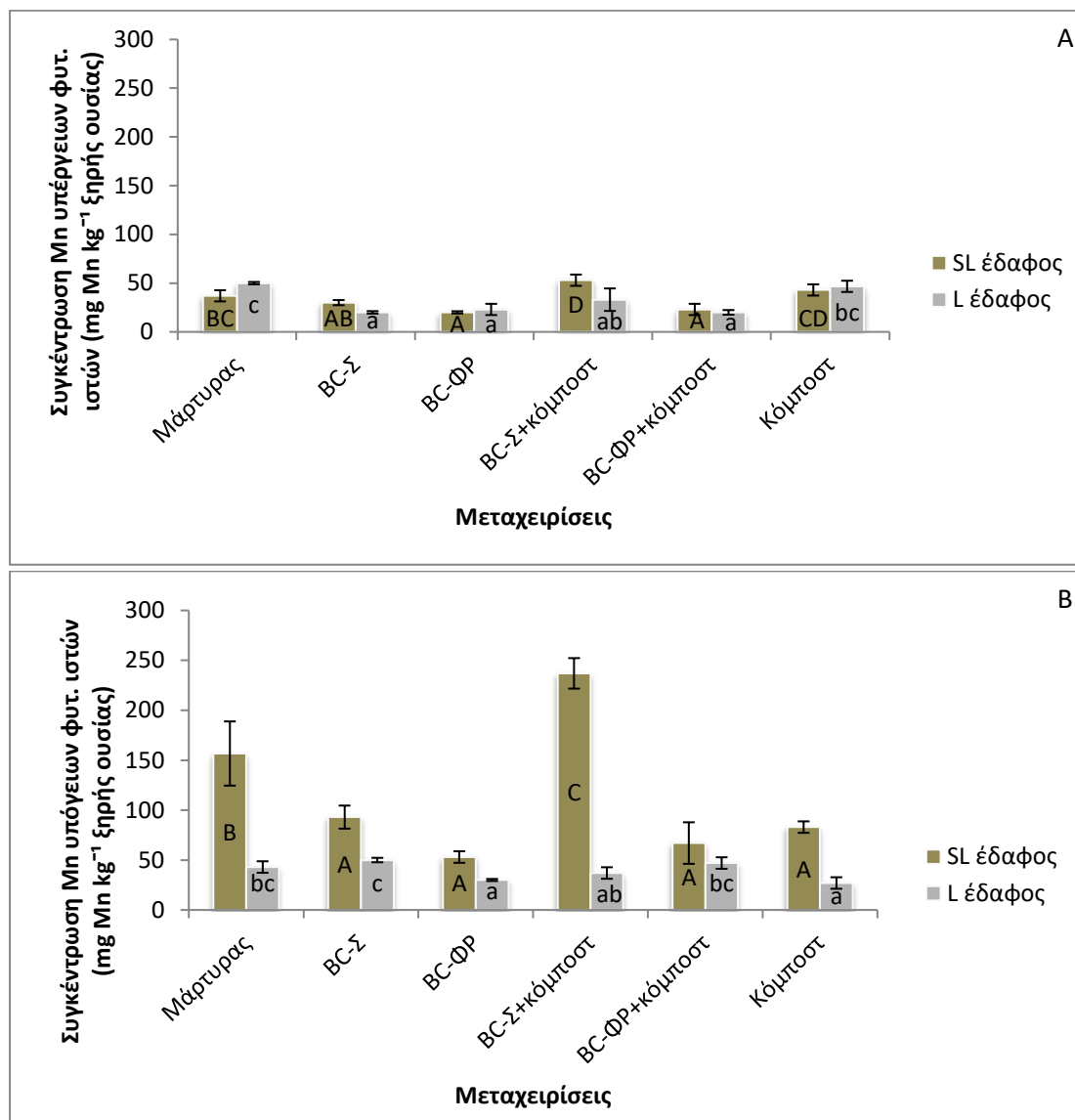
Η συγκέντρωση Fe, στους υπέργειους φυτικούς ιστούς, είτε μειώθηκε είτε δεν επηρεάστηκε από τις μεταχειρίσεις και στα δύο εδάφη (Σχήμα 4-9). Μόνο η μεταχείριση του συνδυασμού βιοεξανθρακώματος στέμφυλων με κόμποστ αύξησε τη συγκέντρωση Fe στους υπέργειους φυτικούς ιστούς και στα δύο εδάφη. Η συγκέντρωση Fe αυξήθηκε στους υπόγειους φυτικούς ιστούς με την προσθήκη όλων των εδαφοβελτιωτικών εκτός από το κόμποστ, στο SL έδαφος, ενώ στο L έδαφος αυξήθηκε μόνο με την προσθήκη βιοεξανθρακώματος στέμφυλων και συνδυασμού βιοεξανθρακώματος φλοιών ρυζιού με κόμποστ (Σχήμα 4-9). Οι Rogovska et al. (2014) παρατήρησαν μείωση στη συγκέντρωση του Fe στους φυτικούς ιστούς του καλαμποκιού με την εφαρμογή βιοεξανθρακώματος από σκληρό ξύλο σε ένα πηλώδες έδαφος. Οι συγγραφείς ανέφεραν ότι ένας πιθανός λόγος για αυτή τη μείωση είναι η αύξηση του pH του εδάφους, η οποία μειώνει τη διαθεσιμότητα και τη διαλυτότητα του Fe στο έδαφος. Οι Inal et al. (2015) βρήκαν θετική επίδραση στις συγκεντρώσεις Fe στους φυτικούς ιστούς του καλαμποκιού έπειτα από εφαρμογή βιοεξανθρακώματος από κοπριά πουλερικών σε ένα ασβεστούχο έδαφος.



Σχήμα 4-9. Συγκέντρωση Fe (mg Fe kg⁻¹ ξηρής ουσίας) υπέργειων (Α) και υπόγειων (Β) φυτικών ιστών του *Zea Mays* L. στο SL και L έδαφος (μέσος όρος±τυπική απόκλιση, n=3). Για κάθε έδαφος, εφαρμόστηκε one-way ANOVA. Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε $p<0.05$. Τα κεφαλαία και πεζά γράμματα υποδηλώνουν ότι το κριτήριο εφαρμόστηκε ξεχωριστά σε κάθε έδαφος (SL και L).

Η συγκέντρωση Mn, στους υπέργειους και υπόγειους φυτικούς ιστούς, είτε μειώθηκε είτε δεν επηρεάστηκε από τις μεταχειρίσεις και στα δύο εδάφη (Σχήμα 4-10). Η μεταχείριση του βιοεξανθρακώματος στέμφυλων σε συνδυασμό με κώμποστ αύξησε τη συγκέντρωση Mn στους υπέργειους και υπόγειους φυτικούς ιστούς στο SL έδαφος (Σχήμα 4-10). Οι Rogonska et al. (2014) παρατήρησαν μείωση στη συγκέντρωση του Mn στους φυτικούς ιστούς του καλαμποκιού με την εφαρμογή βιοεξανθρακώματος από σκληρό ξύλο σε ένα πηλώδες έδαφος. Οι συγγραφείς ανέφεραν ότι ένας πιθανός λόγος για αυτή τη μείωση είναι η αύξηση του pH του εδάφους η οποία μειώνει τη διαθεσιμότητα και τη διαλυτότητα του Mn στο έδαφος. Αντίθετα, οι Inal et al. (2015) βρήκαν αύξηση στις συγκεντρώσεις Mn στους φυτικούς ιστούς του καλαμποκιού

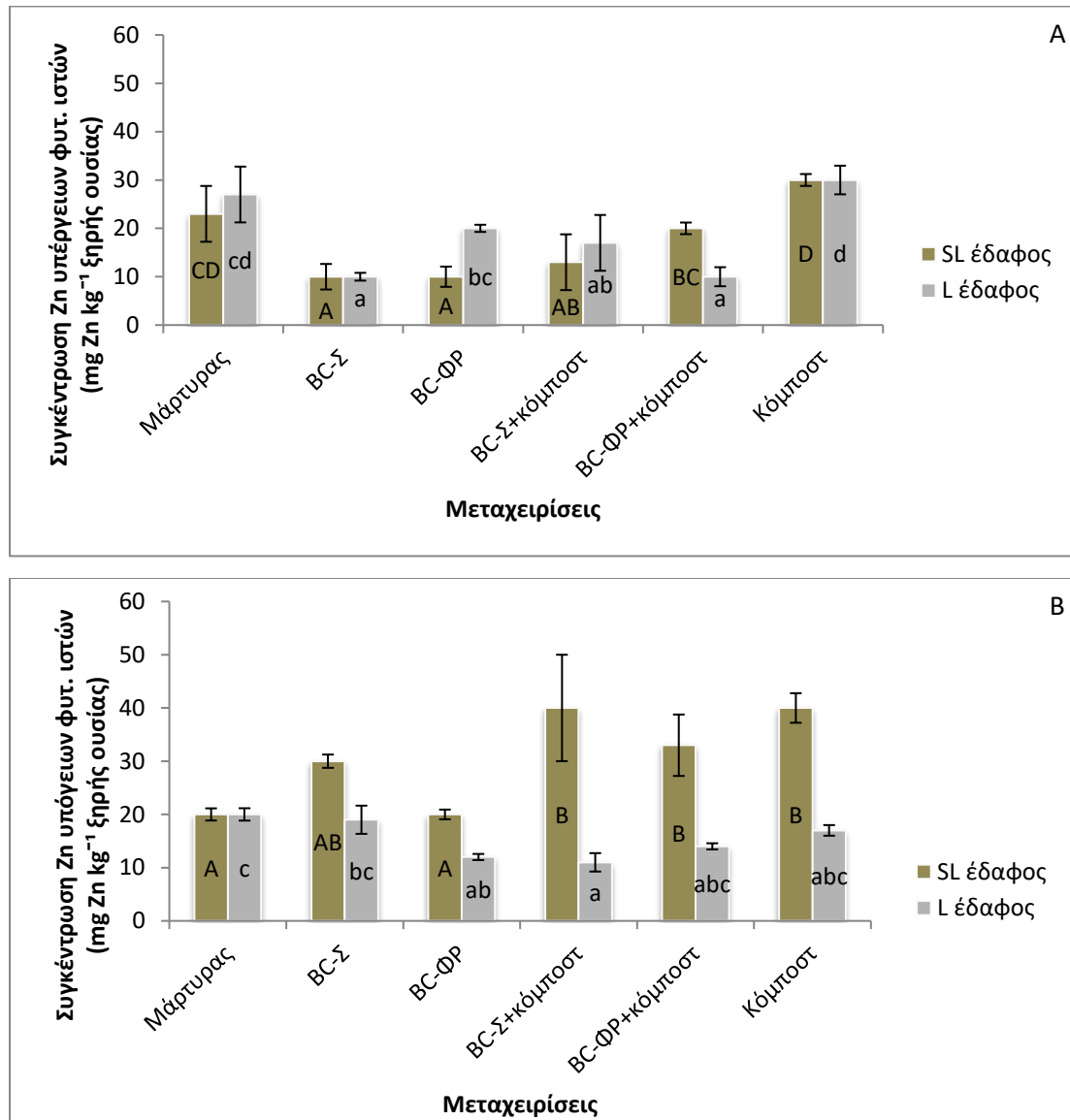
έπειτα από εφαρμογή βιοεξανθρακώματος από κοπριά πουλερικών σε ένα ασβεστούχο έδαφος. Οι Butnan et al. (2015) βρήκαν μειωμένες συγκεντρώσεις Mn στους φυτικούς ιστούς του καλαμποκιού έπειτα από εφαρμογή βιοεξανθρακώματος από ξύλο ευκαλύπτου σε ένα πηλοαμμώδες έδαφος.



Σχήμα 4-10. Συγκέντρωση Mn (mg Mn kg^{-1} ξηρής ουσίας) υπέργειων (A) και υπόγειων (B) φυτικών ιστών του *Zea Mays* L. στο SL και L έδαφος (μέσος όρος \pm τυπική απόκλιση, $n=3$). Για κάθε έδαφος, εφαρμόστηκε one-way ANOVA. Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε $p < 0.05$. Τα κεφαλαία και πεζά γράμματα υποδηλώνουν ότι το κριτήριο εφαρμόστηκε ξεχωριστά σε κάθε έδαφος (SL και L).

Η συγκέντρωση Zn, είτε μειώθηκε είτε δεν επηρεάστηκε στους υπέργειους φυτικούς ιστούς, ενώ στους υπόγειους φυτικούς ιστούς επηρεάστηκε θετικά μόνο από την προσθήκη βιοεξανθρακώματος στέμφυλων με κόμποστ, συνδυασμού βιοεξανθρακώματος φλοιών ρυζιού με κόμποστ και κόμποστ στο SL έδαφος (Σχήμα 4-11). Η συγκέντρωση Zn, είτε μειώθηκε είτε δεν επηρεάστηκε στους υπέργειους και

υπόγειους φυτικούς ιστούς, στο L έδαφος (Σχήμα 4-11). Οι Rogovska et al. (2014) δεν παρατήρησαν επίδραση στη συγκέντρωση του Zn στους φυτικούς ιστούς του καλαμποκιού με την εφαρμογή βιοεξανθρακώματος από σκληρό ξύλο σε ένα πηλώδες έδαφος. Αντίθετα, οι Inal et al. (2015) βρήκαν αύξηση στις συγκεντρώσεις Zn στους φυτικούς ιστούς του καλαμποκιού έπειτα από εφαρμογή βιοεξανθρακώματος από κοπριά πουλερικών σε ένα ασβεστούχο έδαφος.



Σχήμα 4-11. Συγκέντρωση Zn (mg Zn kg⁻¹ ξηρής ουσίας) υπέργειων (A) και υπόγειων (B) φυτικών ιστών του *Zea Mays* L. στο SL και L έδαφος (μέσος όρος±τυπική απόκλιση, n=3). Για κάθε έδαφος, εφαρμόστηκε one-way ANOVA. Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε $p < 0.05$. Τα κεφαλαία και πεζά γράμματα υποδηλώνουν ότι το κριτήριο εφαρμόστηκε ξεχωριστά σε κάθε έδαφος (SL και L).

4.3.4 Χημικές ιδιότητες των εδαφών

Η επίδραση βιοεξανθρακώματος με/χωρίς κόμποστ στις ιδιότητες του εδάφους παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-5. Ο ολικός οργανικός C (TOC) αυξήθηκε και στα δύο έδαφη, σε όλες τις μεταχειρίσεις, σε σύγκριση με τον μάρτυρα, εκτός από τη μεταχείριση βιοεξανθρακώματος φλοιών ρυζιού, στην οποία μειώθηκε ο TOC, στο SL έδαφος.

Η δράση του βιοεξανθρακώματος στην αναπνοή του εδάφους και σε ορισμένες περιπτώσεις στην επιταχυνόμενη ανοργανοποίηση του λιγότερου σταθερού οργανικού άνθρακα του εδάφους με την προσθήκη νέας πηγής άνθρακα φαίνεται να είναι χρονικά εξαρτώμενη ιδιαίτερα σε εδάφη με χαμηλό οργανικό C (Lentz and Ippolito, 2012). Όταν προστίθενται βιοεξανθρακώματα με υψηλή περιεκτικότητα σε πτητικές ουσίες, αυτή η γρήγορη ανάπτυξη είναι μεγαλύτερη σε ένταση αλλά και σε χρόνο σε σχέση με βιοεξανθρακώματα χαμηλής περιεκτικότητας σε πτητικές ουσίες (Deenik et al., 2010). Οι Smith et al. (2010) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα συμπυκνώματα που προέρχονται από την πυρόλυση και ενώνονται με το βιοεξανθράκωμα κατά τη διάρκεια της ψύξης είναι η πηγή ασταθούς C που προκαλεί αυτή την άμεση αύξηση αναπνοής του εδάφους. Μακροπρόθεσμα, τα βιοεξανθρακώματα που παράγονται από σκληρά ξύλα σε υψηλές θερμοκρασίες και προστίθενται σε εδάφη με χαμηλό οργανικό C διαπιστώθηκε ότι έχουν ελάχιστη αποτελεσματικότητα στην επιταχυνόμενη ανοργανοποίηση του οργανικού άνθρακα του εδάφους μετά το πρώτο έτος εφαρμογής τους στο έδαφος. Εντούτοις, κατά το δεύτερο έτος υπήρξε μία αρνητική επίπτωση στην επιταχυνόμενη ανοργανοποίηση του οργανικού άνθρακα, δηλαδή ο C του εδάφους σταθεροποιήθηκε και ο ρυθμός ανοργανοποίησής του μειώθηκε (Naisse et al., 2015; Zimmerman et al., 2011).

Το ολικό άζωτο (TN) μειώθηκε σε όλες τις μεταχειρίσεις, σε σχέση με τον μάρτυρα, εκτός από τη μεταχείριση του κόμποστ, στην οποία αυξήθηκε το TN στο SL έδαφος, ενώ στο L έδαφος αυξήθηκε το TN σε όλες τις μεταχειρίσεις, εκτός από τη μεταχείριση βιοεξανθρακώματος φλοιών ρυζιού, στην οποία μειώθηκε. Η συγκέντρωση $\text{NO}_3\text{-N}$ αυξήθηκε στο SL έδαφος σε όλες τις μεταχειρίσεις, εκτός από τη μεταχείριση βιοεξανθρακώματος φλοιών ρυζιού, στην οποία δεν επηρεάστηκε, ενώ στο L έδαφος μειώθηκε σε όλες τις μεταχειρίσεις. Η συγκέντρωση $\text{NH}_4\text{-N}$ δεν επηρεάστηκε σε όλες τις μεταχειρίσεις στο SL έδαφος, εκτός από τη μεταχείριση συνδυασμού βιοεξανθρακώματος φλοιών ρυζιού με κόμποστ, στην οποία αυξήθηκε, ενώ στο L έδαφος η συγκέντρωση $\text{NH}_4\text{-N}$ αυξήθηκε σε όλες τις μεταχειρίσεις εκτός από τη μεταχείριση συνδυασμού βιοεξανθρακώματος φλοιών ρυζιού με κόμποστ και κόμποστ, στις οποίες δεν επηρεάστηκε. Στην μελέτη των Prommer et al. (2014), τα αμμωνιακά ήταν χαμηλότερα σε σύγκριση με τα νιτρικά, ο οργανικός C του εδάφους αυξήθηκε με την εφαρμογή του βιοεξανθρακώματος, η φαινομενική πυκνότητα του εδάφους μειώθηκε, αυξήθηκε το πορώδες του εδάφους και η περιεκτικότητα σε νερό στο έδαφος με την εφαρμογή του βιοεξανθρακώματος, παρόμοια αποτελέσματα με εκείνα και των δύο εδαφών στο δικό μας πείραμα, εκτός από τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους, οι οποίες δεν προσδιορίστηκαν στη μελέτη μας. Οι Alburquerque et al. (2013) διαπίστωσαν επίσης ότι η προσθήκη λίπανσης NH_4NO_3 σε υψηλή δόση με

βιοεξανθρακώματα σε δόση $\leq 1\%$, αύξησαν το ποσοστό $\text{NO}_3\text{-N}$ στο έδαφος σε σχέση με χαμηλότερη δόση λίπανσης, υποδηλώνοντας ότι η λίπανση σε υψηλή δόση μπορεί να είναι απαραίτητη για να διεγείρει σημαντικά τη νιτροποίηση, όταν συνδυάζεται με βιοεξανθράκωμα. Επιπλέον, οι Yu et al. (2016) παρατήρησαν υψηλότερη συγκεντρώση $\text{NO}_3\text{-N}$ στη μεταχείριση συνδυασμού βιοεξανθρακώματος με λίπανση (εφαρμόστηκε NH_4NO_3) σε σύγκριση με τις μεταχειρίσεις όπου εφαρμόστηκε μόνο λίπανση σε καλλιέργεια σόγιας. Άλλες μελέτες ανέφεραν μια συσχέτιση μεταξύ της ανύψωσης της τιμής του pH προερχόμενη από την προσθήκη βιοεξανθρακώματος με τη νιτροποίηση (Cayuela et al., 2013). Η προσθήκη βιοεξανθρακώματος στο έδαφος μπορεί να βελτιώσει την υγρασία του εδάφους, τη θερμοκρασία και τον αερισμό, και έτσι να δημιουργηθούν συνθήκες ευνοϊκές για νιτροποίηση. Η ανόργανη λίπανση με βάση το $\text{NH}_4\text{-N}$ ή η οργανική λίπανση δημιουργεί ευνοϊκές συνθήκες νιτροποίησης (Prommer et al., 2014), λόγω της αύξησης της διαθεσιμότητας υποστρώματος ($\text{NH}_4\text{-N}$) και της αυξημένης οργανικής ουσίας από την οργανική λίπανση (Song et al., 2014). Οι Nguyen et al. (2017) διαπίστωσαν στην ανάλυση 56 μελετών που δημοσιεύθηκαν μεταξύ του 2010 και του 2015 ότι η προσθήκη βιοεξανθρακώματος μείωσε τη συγκεντρώση του $\text{NH}_4\text{-N}$ στα εδάφη περισσότερο στα χονδρόκοκκα από ό,τι στα μέσης σύστασης εδάφη, αποδίδοντάς το στην αύξηση της αμμωνιοποίησης (Clough et al., 2013). Σύμφωνα με τις προαναφερθείσες μελέτες, αλλά και τα αποτελέσματά μας, φαίνεται ότι η προσθήκη των βιοεξανθρακωμάτων σε συνδυασμό με κόμποστ παρουσία ανόργανης λίπανσης αύξησε τη νιτροποίηση στο SL έδαφος.

Οι Ippolito et al. (2016) διαπίστωσαν ότι η προσθήκη βιοεξανθρακώματος σε δόση 10% κ.β. με κοπριά σε δόση 2% κ.β. σε ένα ασβεστούχο έδαφος μείωσε τη συγκεντρώση $\text{NO}_3\text{-N}$ στο έδαφος σε σύγκριση με τις άλλες δόσεις εφαρμογής βιοεξανθρακώματος (0%, 1% και 2% κ.β.). Παρόλο που με την πάροδο του χρόνου το $\text{NO}_3\text{-N}$ στο έδαφος αυξήθηκε πιθανότατα εξαιτίας της ανοργανοποίησης του N από την κοπριά, το $\text{NO}_3\text{-N}$ στο έδαφος στη δόση εφαρμογής βιοεξανθρακώματος 10% παρέμεινε χαμηλότερο σε σύγκριση με τις άλλες δόσεις εφαρμογής. Οι Lentz και Ippolito (2012) πρόσθεσαν κοπριά και βιοεξανθράκωμα από σκληρό ξύλο στα 42 και 22.4 Mg ha⁻¹, αντίστοιχα, στο ίδιο ασβεστούχο έδαφος σε μια μελέτη πεδίου αντίστοιχα και παρατήρησαν μείωση του $\text{NO}_3\text{-N}$ στο έδαφος εντός του πρώτου έτους μετά από τη συνδυαστική εφαρμογή τους. Επίσης, οι Nguyen et al. (2017) στην ανάλυση 56 μελετών διαπίστωσαν ότι ο συνδυασμός βιοεξανθρακώματος με ουρία αύξησε τη συγκεντρώση του $\text{NO}_3\text{-N}$ στα εδάφη, ενώ μειώθηκε όταν συνδυάστηκε με NH_4NO_3 λίπανση και οργανική λίπανση. Όσον αφορά στο $\text{NH}_4\text{-N}$, στην προηγούμενη μελέτη διαπίστωσαν ότι η προσθήκη ουρίας, λίπανση με $\text{NH}_4\text{-}$, λίπανσης NH_4NO_3 με βιοεξανθρακώματα μείωσαν το $\text{NH}_4\text{-N}$ στα εδάφη, αλλά ο συνδυασμός βιοεξανθρακώματος με οργανική λίπανση δεν είχε καμία επίδραση στη συγκεντρώση του $\text{NH}_4\text{-N}$ στα εδάφη. Επιπλέον η προσθήκη βιοεξανθρακώματος μείωσε τις συγκεντρώσεις του $\text{NH}_4\text{-N}$ στα εδάφη περισσότερο στα ελαφριάς σύστασης από ό,τι στα μέσης σύστασης εδάφη. Οι προαναφερθείσες μελέτες έρχονται σε συμφωνία με τη δική μας όσον αφορά στο αλκαλικό L έδαφος, το $\text{NO}_3\text{-N}$ μειώθηκε πιθανόν λόγω του ό,τι δεν υπήρξε liming effect από το βιοεξανθράκωμα άρα και αύξηση των νιτροποιητών (Nguyen et al., 2017), αφού ήδη υπάρχουν στα αλκαλικά εδάφη, ενώ το

NH₄-N αυξήθηκε πιθανόν λόγω της κοκκομετρικής σύστασης του εδάφους. Το pH αυξήθηκε με την προσθήκη όλων των βιοεξανθρακωμάτων με ή χωρίς κόμποστ, σε σύγκριση με το μάρτυρα στο SL έδαφος, ενώ στο L δεν είχαμε καμία επίδραση, εκτός από το βιοεξανθράκωμα στέμφυλων, το οποίο αύξησε το pH. Τα περισσότερα βιοεξανθρακώματα είναι αλκαλικά και έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση του pH του εδάφους (Glaser et al., 2002). Ωστόσο, στο δικό μας πείραμα αυτή η αύξηση στο pH των εδαφών επήλθε μόνο στο SL έδαφος, ενώ στο L δεν παρατηρήθηκε αύξηση εκτός από το βιοεξανθράκωμα των στέμφυλων. Οι Ahmed and Schoenau (2015) δεν βρήκαν αύξηση του pH από την εφαρμογή βιοεξανθρακώματος σε δύο πηλώδη έδαφη με pH 8 και 6.5, ενώ οι Marks et al. (2014) βρήκαν μείωση του pH σε ένα ασβεστούχο έδαφος. Οι Lentz and Ippolito (2012) πρόσθεσαν βιοεξανθράκωμα από σκληρό ξύλο με αλκαλικό pH σε ένα ασβεστούχο έδαφος και βρήκαν ότι το pH του εδάφους δεν επηρεάστηκε. Οι Ahmed and Schoenau (2015) απέδωσαν τη μη αύξηση του pH από την εφαρμογή βιοεξανθρακώματος στα πηλώδη έδαφη στο γεγονός ότι τα έδαφη είχαν υψηλή ρυθμιστική ικανότητα λόγω του υψηλού ποσοστού της αργίλου και της οργανικής ουσίας. Αυτή η εξήγηση μπορεί να είναι πιθανή και για το δικό μας πείραμα στο L έδαφος.

Το ανταλλάξιμο K και Mg βελτιώθηκαν σημαντικά σε όλες τις μεταχειρίσεις εκτός από το βιοεξανθράκωμα φλοιών ρυζιού και το κόμποστ σε σύγκριση με τον μάρτυρα, στο SL έδαφος. Ο διαθέσιμος P ενισχύθηκε σημαντικά σε όλες τις μεταχειρίσεις, ενώ το ανταλλάξιμο Ca αυξήθηκε σημαντικά σε όλες τις μεταχειρίσεις εκτός από το βιοεξανθράκωμα φλοιών ρυζιού στο SL έδαφος. Ο διαθέσιμος στα φυτά Fe μειώθηκε σημαντικά με την προσθήκη όλων των εδαφοβελτιωτικών, ενώ το Mn μειώθηκε ή δεν επηρεάστηκε με την εφαρμογή όλων των εδαφοβελτιωτικών εκτός από το βιοεξανθράκωμα φλοιών ρυζιού, το οποίο παρουσίασε σημαντική αύξηση. Ο διαθέσιμος στα φυτά Zn βελτιώθηκε στατιστικά σε όλες τις μεταχειρίσεις εκτός από το βιοεξανθράκωμα στέμφυλων. Οι Gaskin et al. (2010) παρατήρησαν ότι οι συγκεντρώσεις των ανταλλάξιμων K, Ca και Mg αυξήθηκαν και ιδιαίτερα του K, η οποία αύξηση παρουσιάστηκε και στους φυτικούς ιστούς του καλαμποκιού, ενώ η συγκέντρωση P δεν επηρεάστηκε με την εφαρμογή βιοεξανθρακώματος από κελύφη φυστικιού σε ένα πηλοαμμώδες έδαφος με pH 5.59. Αντίθετα, οι Rogovska et al. (2014) δεν παρατήρησαν σημαντικές διαφορές έπειτα από την προσθήκη βιοεξανθρακώματος από σκληρό ξύλο σε ένα πηλώδες έδαφος, αλλά συγκεντρώσεις P και K κάτω από το όριο επάρκειας. Οι Rogovska et al. (2016) βρήκαν επίσης ότι με την προσθήκη βιοεξανθρακώματος σκληρού ξύλου σε τρία διαφορετικής κοκκομετρικής σύστασης έδαφη (πηλώδες, αργιλοπηλώδες και ιλυοαργιλοπηλώδες) σε καλλιέργεια καλαμποκιού, δεν είχε σημαντικές διαφορές στα θρεπτικά στοιχεία του εδάφους, εκτός από το Zn, ο οποίος αυξήθηκε.

Όσον αφορά στο L έδαφος, ο διαθέσιμος P του εδάφους επηρεάστηκε θετικά από όλα τα εδαφοβελτιωτικά. Το ανταλλάξιμο K αυξήθηκε σημαντικά με την εφαρμογή βιοεξανθρακώματος στέμφυλων, συνδυασμού βιοεξανθρακώματος στέμφυλων με κόμποστ και κόμποστ, το ανταλλάξιμο Mg ενισχύθηκε σημαντικά με την προσθήκη βιοεξανθρακώματος στέμφυλων και συνδυασμού βιοεξανθρακώματος στέμφυλων με κόμποστ, ενώ μειώθηκε με τη μεταχείριση βιοεξανθρακώματος φλοιών

ρυζιού. Το ανταλλάξιμο Ca έδειξε μια σημαντική μείωση με την εφαρμογή του βιοεξανθρακώματος φλοιών ρυζιού και βιοεξανθρακώματος στέμφυλων, ενώ με την εφαρμογή του συνδυασμού βιοεξανθρακώματος φλοιών ρυζιού με κόμποστ παρατηρήθηκε αύξηση του ανταλλάξιμου Ca. Ο διαθέσιμος στα φυτά Fe μειώθηκε σημαντικά με την προσθήκη βιοεξανθρακώματος φλοιών ρυζιού και συνδυασμού βιοεξανθρακώματος φλοιών ρυζιού με κόμποστ, ενώ το κομποστ είχε θετική επίδραση. Το διαθέσιμο στα φυτά Mn αυξήθηκε μόνο με το βιοεξανθράκωμα φλοιών ρυζιού και το συνδυασμό βιοεξανθρακώματος φλοιών ρυζιού με κόμποστ. Επίσης, ο διαθέσιμος Zn του εδάφους επηρεάστηκε θετικά από όλα τα εδαφοβελτιωτικά. Οι Inal et al. (2015) παρατήρησαν αύξηση στις συγκεντρώσεις P, K, Ca, Mg, Zn, και Mn στο έδαφος, αλλά μείωση στη συγκέντρωση του Fe, έπειτα από την προσθήκη βιοεξανθρακώματος από κοπριά πουλερικών σε δόση 20 g kg^{-1} σε ένα ασβεστούχο έδαφος, όπου καλλιεργήθηκε καλαμπόκι. Οι Lentz and Ippolito (2012) δεν βρήκαν αύξηση στις συγκεντρώσεις του P και των ανταλλάξιμων κατιόντων εκτός από το Mn, το οποίο αυξήθηκε 1.5 φορές σε σύγκριση με το μάρτυρα, έπειτα από την εφαρμογή βιοεξανθρακώματος από σκληρό ξύλο σε ένα ασβεστούχο έδαφος, σε καλλιέργεια καλαμποκιού. Οι Ippolito et al. (2016) διαπίστωσαν ότι η προσθήκη βιοεξανθρακώματος σε δόση 10% κ.β. με κοπριά σε δόση 2% κ.β. αύξησε τη συγκέντρωση Fe και Mn σε ένα ασβεστούχο έδαφος, σε σύγκριση με τις άλλες δόσεις εφαρμογής βιοεξανθρακώματος (0%, 1% και 2% κ.β.). Επίσης, στην ίδια μελέτη οι δόσεις εφαρμογής 2% και 10% βιοεξανθρακώματος με κοπριά σε δόση 2% αύξησε τη συγκέντρωση του Zn.

Πίνακας 4-5. Επίδραση βιοεξανθρακώματος με/ή κόμποστ στις ιδιότητες του εδάφους pH, EC, TOC, TN, NH₄-N, NO₃-N, Olsen-P, ανταλλάξιμο K, Ca, Mg και DTPA -Fe, Mn, Zn στα δύο εδάφη (SL και L) όπου καλλιεργήθηκε το *Zea Mays* L. έπειτα από 30 ημέρες μετά την έκπτυξη των σποροφύτων (μέσος όρος±τυπική απόκλιση, n=3).

SL													
Μεταχειρίσεις	pH	EC	TOC	TN	NH ₄ -N	NO ₃ -N	P-Olsen	Exch. K	Exch. Ca	Exch. Mg	DTPA Fe	DTPA Mn	DTPA Zn
		dS m ⁻¹	g kg ⁻¹								mg kg ⁻¹		
Μάρτυρας	6.6±0.00 a	0.81±0.03a	5.54±0.01 b	0.64±0.03 c	0.004±0.01 a	0.04±0.00 a	0.017±0.00 a	0.06±0.01 a	0.47±0.01 a	0.05±0.00 a	13.18±0.46 e	8.35±0.23 c	0.56±0.00 b
BC-Σ	7.8±0.06 d	0.95±0.07ab	10.18±0.00 f	0.53±0.03 a	0.003±0.01 a	0.08±0.00 b	0.06± 0.00e	0.23±0.03 c	0.93±0.05 b	0.16±0.01 c	3.62± 0.33a	2.11±0.28 a	0.44±0.02 a
BC-ΦΡ	6.8±0.10 b	0.83±0.07a	4.12±0.01 a	0.51±0.01a	0.005±0.01 a	0.05±0.00 a	0.026±0.00 b	0.05±0.01 a	0.53±0.02 a	0.07±0.00 ab	11.18±0.59 d	15.8±0.18 d	0.89±0.03 c
BC-Σ+ κόμποστ	7.6±0.10 d	1.12±0.05b	8.94±0.02e	0.58±0.00 b	0.005±0.00 a	0.13±0.01 c	0.079±0.00 f	0.23±0.04 c	1.38±0.05 d	0.2±0.03 d	7.63±1.02 c	3.04±0.04 b	1.19±0.08 d
BC-ΦΡ+ κόμποστ	7.3±0.06 c	0.87±0.07a	7.28±0.01 d	0.53±0.01a	0.007±0.01 b	0.13±0.00 c	0.049±0.00 d	0.15±0.02 b	1.03±0.04 bc	0.09± 0.01b	5.66±0.38 b	7.73±0.58 c	1.43±0.06 e
Κόμποστ	7.4±0.00 c	0.95±0.09ab	6.56±0.01 c	0.93±0.02d	0.004±0.01 a	0.07±0.00 b	0.033±0.00 c	0.09±0.01 ab	1.09±0.07 c	0.08±0.00 ab	8.81±0.51 c	3.49± 0.07 b	1.57±0.02 f
L													
Μεταχειρίσεις	pH	EC	TOC	TN	NH ₄ -N	NO ₃ -N	P-Olsen	Exch. K	Exch. Ca	Exch. Mg	DTPA Fe	DTPA Mn	DTPA Zn
		dS m ⁻¹	g kg ⁻¹								mg kg ⁻¹		
Μάρτυρας	7.7±0.00 a	1.34±0.06bc	19.91±0.02a	1.3±0.02 a	0.005±0.01 a	0.2±0.01 d	0.016±0.00 a	0.26±0.02 b	4.68±0.02 c	0.15±0.01 b	1.51±0.08 c	8.01±0.67a	0.35±0.01 a
BC-Σ	7.9±0.00 b	1.51±0.16cd	29.77±0.01e	2.25± 0.02d	0.010±0.01 c	0.11±0.01 a	0.035±0.00 e	0.58±0.03 e	4.22±0.08 a	0.19±0.01 c	1.58±0.14 c	7.45±0.79a	0.47±0.02 b
BC-ΦΡ	7.7± 0.06a	0.92±0.07a	22.84±0.02b	1.27±0.02 a	0.007±0.00 b	0.12±0.01ab	0.018±0.00 b	0.20±0.01 a	4.41±0.03 ab	0.11±0.00 a	0.43±0.04 a	14.28±0.19b	0.7± 0.01c
BC-Σ+ κόμποστ	7.8±0.00ab	1.66±0.07d	42.41±0.04 f	2.57±0.01 e	0.007±0.00 b	0.13±0.00 b	0.049±0.00 f	0.32±0.03 c	4.61±0.14 bc	0.23± 0.00d	1.56± 0.04c	7.04±1.14a	1.18± 0.05e
BC-ΦΡ+ κόμποστ	7.7± 0.06a	1.15±0.18ab	25.44±0.01d	1.46±0.02 b	0.005±0.01 a	0.12±0.00ab	0.030±0.00 d	0.22±0.01 ab	5.73±0.12 d	0.16±0.01 b	0.84± 0.09b	13.13±0.43b	1.43±0.03 f
Κόμποστ	7.7±0.06a	1.38±0.13bcd	23.66±0.01c	2.16±0.02 c	0.006±0.01ab	0.18±0.01 c	0.026±0.00 c	0.37± 0.01d	4.55±0.08 bc	0.15±0.01 b	2.03±0.01 d	7.36±0.36a	1.11±0.01 d

Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε *p*<0.05. Το κριτήριο εφαρμόστηκε ξεχωριστά σε κάθε έδαφος (SL και L).

4.4 Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης με δύο διαφορετικά βιοεξανθρακώματα που προστέθηκαν σε δύο εδάφη σε δόση 2% κ.β. σε συνδυασμό με ή χωρίς κόμποστ, και με εφαρμογή ανόργανης Ν λίπανσης έδειξαν ότι το ξηρό βάρος του *Zea Mays* L. αυξήθηκε σημαντικά και στα δύο εδάφη. Η εφαρμογή του βιοεξανθρακώματος στέμφυλων αύξησε σημαντικά το ξηρό βάρος των υπέργειων φυτικών ιστών στο αμμοπηλώδες έδαφος, ενώ στο πηλώδες η σημαντική αύξηση προκλήθηκε από το βιοεξανθράκωμα φλοιών ρυζιού με κόμποστ. Η επίδραση των βιοεξανθρακωμάτων με ή χωρίς κόμποστ στο ξηρό βάρος των υπέργειων και υπόγειων φυτικών ιστών ήταν μεγαλύτερη στα φυτά καλαμποκιού που αναπτύχθηκαν στο πηλώδες έδαφος σε σχέση με αυτά που αναπτύχθηκαν στο αμμοπηλώδες έδαφος. Η προσθήκη βιοεξανθρακώματος στέμφυλων με κόμποστ αύξησε σημαντικά τη συγκέντρωση P και K των υπέργειων και υπόγειων φυτικών ιστών αλλά σε διαφορετικό έδαφος για το κάθε μακροθρεπτικό στοιχείο. Η συγκέντρωση του P αυξήθηκε στους υπέργειους και υπόγειους φυτικούς ιστούς μόνο με την προσθήκη συνδυασμού βιοεξανθρακώματος στέμφυλων με κόμποστ στο πηλώδες έδαφος. Η συγκέντρωση K, στους υπέργειους και υπόγειους φυτικούς ιστούς αυξήθηκε σχεδόν σε όλες τις μεταχειρίσεις στο αμμοπηλώδες έδαφος, εκτός από το βιοεξανθράκωμα φλοιών ρυζιού, ενώ στο πηλώδες έδαφος, μόνο το βιοεξανθράκωμα στέμφυλων, ο συνδυασμός βιοεξανθρακώματος στέμφυλων με κόμποστ και το κόμποστ αύξησαν τη συγκέντρωση K μόνο στους υπόγειους φυτικούς ιστούς. Φαίνεται ότι, οι τρεις παράγοντες, η αυξημένη υγρασία, η ανταγωνιστικότητα του K με το Ca και το Mg, και η υψηλή συγκέντρωση του K στο βιοεξανθράκωμα, ειδικότερα του βιοεξανθρακώματος στέμφυλων, έπαιξαν σπουδαίο ρόλο στην αύξηση της συγκέντρωσης K στους φυτικούς ιστούς.

Η συγκέντρωση του Ca και του Zn στους υπόγειους φυτικούς ιστούς επηρεάστηκε θετικά από τις μεταχειρίσεις που περιείχαν κόμποστ, αλλά σε διαφορετικό έδαφος για το κάθε θρεπτικό στοιχείο. Η συγκέντρωση του Mg στους υπόγειους φυτικούς ιστούς επηρεάστηκε θετικά από τις μεταχειρίσεις που περιείχαν βιοεξανθράκωμα από στέμφυλα και στα δύο εδάφη. Η συγκέντρωση Fe, αυξήθηκε στους υπέργειους φυτικούς ιστούς από την προσθήκη του συνδυασμού βιοεξανθρακώματος στέμφυλων με κόμποστ και στα δύο εδάφη. Η συγκέντρωση Mn στους υπέργειους και υπόγειους φυτικούς ιστούς επηρεάστηκε σημαντικά από τη μεταχείριση συνδυασμού βιοεξανθρακώματος στέμφυλων με κόμποστ μόνο στο αμμοπηλώδες έδαφος. Ο ολικός οργανικός C αυξήθηκε σχεδόν σε όλες τις μεταχειρίσεις και στα δύο εδάφη υποδηλώνοντας έντονη μικροβιακή δραστηριότητα, ενώ το ολικό N κυρίως στο πηλώδες έδαφος.

Ως εκ τούτου, η προσθήκη βιοεξανθρακώματος με ή χωρίς κόμποστ έχει θετικά αποτελέσματα στην απόδοση των φυτών καλαμποκιού σε συνδυασμό με ανόργανη Ν λίπανση. Ωστόσο, οι συγκεντρώσεις των μακροθρεπτικών και μικροθρεπτικών στοιχείων αυξήθηκαν ή μειώθηκαν στους φυτικούς ιστούς και η συνεισφορά του βιοεξανθρακώματος με ή χωρίς κόμποστ επηρεάστηκαν σημαντικά από το έδαφος, αλλά και από τη συνεργιστική δράση του βιοεξανθρακώματος με το

κόμποστ. Επίσης, η αύξηση των συγκεντρώσεων των μακροθρεπτικών και μικροθρεπτικών στοιχείων μόνο στους υπόγειους φυτικούς ιστούς υποδεικνύουν τη μειωμένη κινητικότητα των συγκεκριμένων στοιχείων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.

Η επίδραση βιοεξανθρακωμάτων από παραπροϊόντα ζυθοποιίας στο *Zea Mays* L.

5.1 Εισαγωγή

Το βιοεξανθράκωμα όταν εφαρμόζεται στο έδαφος αυξάνει την παραγωγικότητα των καλλιεργειών. Η εφαρμογή βιοεξανθρακώματος χωρίς ανόργανη ή οργανική λίπανση είχε θετικά αποτελέσματα στην απόδοση διαφόρων καλλιεργειών (Baronti et al., 2010; De la Rosa et al., 2014; Fox et al., 2014; Subedi et al., 2016 a, 2016b). Ωστόσο, σε άλλες μελέτες ο συνδυασμός βιοεξανθρακώματος με ανόργανη λίπανση, έχει επιφέρει περισσότερα θετικά αποτελέσματα (Alburquerque et al., 2013; Oram et al., 2014). Οι παράγοντες που είναι υπεύθυνοι για την επίδραση του βιοεξανθρακώματος στην απόδοση των καλλιεργειών είναι το είδος βιοεξανθρακώματος, ο τύπος εδάφους, το είδος καλλιέργειας, το είδος λίπανσης, η δόση εφαρμογής, χρόνος ενσωμάτωσης, τύπος πειράματος και οι περιβαλλοντικές συνθήκες (Biederman and Harpole, 2013; Jeffery et al., 2011; Liu et al., 2013).

Το ποσοστό του άνθρακα του βιοεξανθρακώματος έχει πολύ μεγάλη σημασία, αφού ο κύριος ρόλος του βιοεξανθρακώματος είναι η ικανότητά του να δεσμεύει το C στα εδάφη (Bruun et al., 2016; Shao et al., 2011; Smith, 2016). Ωστόσο, οι διάφοροι τύποι άνθρακα των βιοεξανθρακωμάτων μπορεί να είναι σταθεροί ή ασταθείς. Η αναλογία και των δύο τύπων άνθρακα στο βιοεξανθράκωμα εξαρτάται από τη βιομάζα και τη θερμοκρασίας πυρόλυσης (Aller, 2016). Το συνολικό ποσοστό άνθρακα στα δείγματα βιοεξανθρακωμάτων που εξετάστηκαν από την Aller (2016) κυμαίνονταν από 0.1% έως 97.4%. Το άζωτο (N) μπορεί να θεωρηθεί το δεύτερο σημαντικότερο στοιχείο μετά τον άνθρακα, αφού είναι βασικό θρεπτικό στοιχείο για τις καλλιέργειες (Atkinson et al., 2010; Clough et al., 2013; Hussain et al., 2017; Lehmann, 2003; Major et al., 2010a; Prommer et al., 2014). Η Aller (2016) στη μελέτη της βρήκε ποσοστά αζώτου στα βιοεξανθρακώματα που κυμαίνονταν από 0%-7.52%. Ο λόγος C/N είναι ένας σημαντικός λόγος, ο οποίος χρησιμοποιείται ευρέως στη γονιμότητα του εδάφους για την αξιολόγηση της διαθεσιμότητας N σε εδάφη. Μια αναλογία άνω του 10 υποδεικνύει μια ακινητοποίηση του N στα εδάφη.

Με βάση την προηγούμενη μελέτη μας (Κεφ. 4), όπου τα βιοεξανθρακώματα σε συνδυασμό με ανόργανη λίπανση έδειξαν αυξημένα ξηρά βάρη στην καλλιέργεια του φυτού *Zea Mays* L., υποθέσαμε ότι η δημιουργία ενός βιοεξανθρακώματος πλούσιο σε άζωτο θα μπορούσε να αντικαταστήσει εν μέρει την ανόργανη αζωτούχα λίπανση στην καλλιέργεια φυτών καλαμποκιού *Zea Mays* L., η οποία έχει υψηλές απαιτήσεις σε N. Ένα έδαφος από την ευρύτερη περιοχή του νομού Χανίων χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη. Ο ευρύτερος στόχος της μελέτης ήταν να αξιοποιήσουμε τα θετικά αποτελέσματα της προηγούμενης μελέτης στην ίδια καλλιέργεια αυτή του καλαμποκιού και στο έδαφος που δέχτηκε τη μεγαλύτερη επίδραση από το βιοεξανθράκωμα, για να διαπιστώσουμε αν το βιοεξανθράκωμα που έχει μεγάλο ποσοστό αζώτου με ή χωρίς επιπρόσθετη ανόργανη αζωτούχα λίπανση

μπορεί να επιφέρει τα ίδια ή παρόμοια αποτελέσματα. Οι ειδικοί στόχοι της μελέτης ήταν να διερευνηθούν αν τα βιοεξανθρακώματα, που έχουν προέλθει από εξαντλημένους σπόρους κριθαριού και πλεονάζουσα μαγιά, λαμβάνοντας αζωτούχα λίπανση ή χωρίς αζωτούχα λίπανση επηρεάζουν 1) το ξηρό βάρος και τα μορφολογικά χαρακτηριστικά του φυτού, 2) τις συγκέντρωσεις μακροθρεπτικών και μικροθρεπτικών στοιχείων στους υπέργειους και υπόγειους φυτικούς ιστούς, 3) τις ιδιότητες του εδάφους, συμπεριλαμβανομένων των θρεπτικών συστατικών και του pH, σε ένα πείραμα 30 ημερών μετά την εμφάνιση των σποροφύτων.

5.2 Υλικά και Μέθοδοι

5.2.1 Υλικά

Πάρθηκε ένα δείγμα εδάφους (0-20 cm) από καλλιεργούμενη περιοχή του νομού Χανίων. Το μέσης σύστασης εδαφικό δείγμα ήταν αλκαλικό πηλώδες (L) και πάρθηκε από την περιοχή κοντά στο χωριό Καλλεργιανά (35°29'21"N, 23°40'24"E). Το δείγμα εδάφους αεροξηράνθηκε, πέρασε από κόσκινο 10 mm και έπειτα από κόσκινο 2 mm. Από τη λεπτή γη συλλέχθηκε μια μικρή ποσότητα (~500gr) για τις αναλύσεις χαρακτηρισμού του εδάφους, ενώ το υπόλοιπο δείγμα χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα με τα φυτά του *Zea Mays* L.

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με βιοεξανθρακώματα προερχόμενα από διάφορα είδη οργανικών παραπροϊόντων (πλεονάζουσα μαγιά, εξαντλημένοι σπόροι κριθαριού) που προκύπτουν από τον αγροβιομηχανικό τομέα. Η πλεονάζουσα μαγιά (M) και οι εξαντλημένοι σπόροι κριθαριού (ΣΚ) συλλέχθηκαν από μια τοπική ζυθοποιία στα Χανιά. Τα οργανικά παραπροϊόντα ξηράνθηκαν στους 68°C για 48 h, μετέπειτα αλέστηκαν σε μαχαιρόμυλο προκειμένου το μέγεθος των σωματιδίων τους να μην ξεπερνάει τα 0.5 mm, και τέλος αποθηκεύτηκαν σε αεροστεγή δοχεία μέχρι την περαιτέρω χρήση τους. Τα δείγματα των βιοεξανθρακωμάτων παράχθηκαν χρησιμοποιώντας ένα φούρνο πυρόλυσης. Συνθήκες απουσίας οξυγόνου διατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια της διαδικασίας πυρόλυσης με παροχή 99% καθαρού αζώτου στο σύστημα και παροχή ροής 200 L h⁻¹. Η θερμοκρασία πυρόλυσης ήταν 300°C, ο ρυθμός θέρμανσης για να φτάσει αυτή τη θερμοκρασία ήταν 6°C min⁻¹ και ο χρόνος παραμονής (residence time) ήταν 60 min. Μετά το τέλος της πυρόλυσης, τα βιοεξανθρακώματα απομακρύνθηκαν από τον φούρνο, μεταφέρθηκαν σε ξηραντήρα, ζυγίστηκαν και αποθηκεύτηκαν σε αεροστεγή πλαστικά δοχεία. Προς συντομία, τα βιοεξανθρακώματα θα αναφέρονται ως BC-M (Biochar-Πλεονάζουσα Μαγιά) και BC-ΣΚ (Biochar-Εξαντλημένοι Σπόροι Κριθαριού).

5.2.2 Εγκατάσταση πειράματος

Η εγκατάσταση του πειράματος έγινε το καλοκαίρι του 2017, σε θερμοκήπιο του Πολυτεχνείου Κρήτης στα Χανιά. Το έδαφος αναμείχθηκε με κάθενα από τα υλικά

(BC-M; BC-ΣΚ). Οι μεταχειρίσεις ήταν οι εξής: 1) Μάρτυρας (έδαφος χωρίς μεταχείριση), 2) Βιοεξανθράκωμα εξαντλημένων σπόρων κριθαριού σε δόση 2% κ.β. (BC-ΣΚ-2%), 3) Βιοεξανθράκωμα πλεονάζουσας μαγιάς σε δόση 2% κ.β. (BC-M-2%), 4) Βιοεξανθράκωμα εξαντλημένων σπόρων κριθαριού σε δόση 5% κ.β. (BC-ΣΚ-5%), 5) Βιοεξανθράκωμα πλεονάζουσας μαγιάς σε δόση 5% κ.β. (BC-M-5%), 6) Συνδυασμός βιοεξανθρακωμάτων εξαντλημένων σπόρων κριθαριού και πλεονάζουσας μαγιάς σε συνολική δόση 2% κ.β (BC-ΣΚ+M-1%+1%), 7) Συνδυασμός βιοεξανθρακωμάτων εξαντλημένων σπόρων κριθαριού και πλεονάζουσας μαγιάς σε συνολική δόση 5% κ.β (BC-ΣΚ+M-2.5%+2.5%). Η δόση εφαρμογής του βιοεξανθρακώματος ήταν 2% κ.β. και 5% κ.β. Σε κάθε μεταχείριση εφαρμόστηκε είτε (100 mg kg⁻¹ εδάφους) αζωτούχα λίπανση (Λ) είτε καθόλου λίπανση (ΧΛ). Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 14 μεταχειρίσεις. Η κάθε μεταχείριση είχε 3 επαναλήψεις. Συνολικά εγκαταστάθηκαν 42 διάτρητα πλαστικά δοχεία χωρητικότητας 0.75 kg. Στον Πίνακα 5-1 συνοψίζονται οι μεταχειρίσεις που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα. Ποσότητα, 0.75 kg για κάθε μεταχείριση τοποθετήθηκε σε πλαστική σακούλα. Τα μείγματα υγράνθηκαν ώστε να μπορούν εύκολα να αναμειχθούν και να ομογενοποιηθούν. Τα μείγματα εξισορροπήθηκαν για 15 ημέρες και αεροξηράνθηκαν. Έπειτα τα μείγματα τοποθετήθηκαν σε πλαστικά διάτρητα δοχεία (12.5x10.5 cm) και σπάρθηκαν με 3 σπόρους *Zea mays* L. σε κάθε δοχείο (29/7/2017). Μετά την έκπτυξη των σποροφύτων απομακρύνθηκαν τα δύο σπορόφυτα και έμεινε μόνο το ένα (3/8/2017). Το πειραματικό σχέδιο ήταν το πλήρως τυχαιοποιημένο σχέδιο (CRD), η άρδευση γινόταν με νερό από το Δήμο Χανίων. Οι γλάστρες ποτίζονταν ώστε η εδαφική υγρασία να διατηρείται στο 70% της υδατοϊκανότητας. Κατά τη διάρκεια του πειράματος, η μέση μέγιστη θερμοκρασία αέρα ήταν στους 31.4°C και η μέση ελάχιστη στους 22.8°C. Δέκα ημέρες και είκοσι ημέρες μετά από την έκπτυξη των σποροφύτων, τα δοχεία των μεταχειρίσεων δέχθηκαν 50 mg N kg⁻¹ εδάφους κάθε φορά, υπό τη μορφή νιτρικής αμμωνίας (NH₄NO₃). Η αζωτούχα λίπανση εφαρμόστηκε ως υδατικό διάλυμα. Το πείραμα διήρκεσε 1 μήνα μετά την έκπτυξη των σποροφύτων και πραγματοποιήθηκε 1 συγκομιδή στο τέλος του πειράματος.

Στις μεταχειρίσεις μελετήθηκαν:

- i) Το ξηρό βάρος των υπέργειων και υπόγειων φυτικών ιστών
- ii) Μορφολογικά χαρακτηριστικά (ύψος υπέργειου μέρους 10, 20 και 30 ημέρες μετά την έκπτυξη των σποροφύτων, διάμετρος βλαστού)
- iii) Η συγκέντρωση των μακροθρεπτικών N, P, K, Ca, Mg και μικροθρεπτικών Fe, Mn, Zn στο υπέργειο/υπόγειο μέρος του φυτού
- iv) pH, EC%, TOC%, TN%, συγκέντρωση NO₃-N, NH₄-N, Olsen-P, ανταλλάξιμων μακροθρεπτικών K, Ca, Mg και διαθέσιμων μικροθρεπτικών Fe, Mn, Zn στο έδαφος.

Πίνακας 5-1. Σχέδιο πειραματικού με φυτά του *Zea Mays* L. σε δοχεία. Οι μεταχειρίσεις για το έδαφος (L)

L	
Μεταχειρίσεις	Μεταχειρίσεις
Με αζωτούχα λίπανση (Λ)	Χωρίς αζωτούχα λίπανση (ΧΛ)
0 % BC (Μάρτυρας Λ)	0 % BC (Μάρτυρας ΧΛ)
2% κ.β. BC-ΣΚ (BC-ΣΚ-2% Λ)	2% κ.β. BC-ΣΚ (BC-ΣΚ-2% ΧΛ)
2% κ.β. BC-M (BC-M-2% Λ)	2% κ.β. BC-M (BC-M-2% ΧΛ)
5% κ.β. BC-ΣΚ (BC-ΣΚ-5% Λ)	5% κ.β. BC-ΣΚ (BC-ΣΚ-5% ΧΛ)
5% κ.β. BC-M (BC-M-5% Λ)	5% κ.β. BC-M (BC-M-5% ΧΛ)
1% κ.β. BC-ΣΚ + 1% κ.β. BC-M (BC-ΣΚ+M-1%+1% Λ)	1% κ.β. BC-ΣΚ + 1% κ.β. BC-M (BC-ΣΚ+M-1%+1% ΧΛ)
2.5% κ.β. BC-ΣΚ + 2.5% κ.β. BC-M (BC-ΣΚ+M-2.5%+2.5% Λ)	2.5% κ.β. BC-ΣΚ + 2.5% κ.β. BC-M (BC-ΣΚ+M-2.5%+2.5% ΧΛ)

5.2.3 Αναλυτικές Μέθοδοι

Χαρακτηρισμός εδαφών

Η μηχανική σύσταση του εδάφους προσδιορίστηκε με τη μέθοδο Βουγιούκου. 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. Το ποσοστό της οργανικής ουσίας (OM%) υπολογίστηκε με τη μέθοδο Walkley-Black. Τα ποσοστά οργανικού άνθρακα (TOC%), και αζώτου (TN%) προσδιορίστηκαν με τη χρήση στοιχειακού αναλυτή. Το ποσοστό ανθρακικού ασβεστίου (CaCO₃%) 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. Τα μικροθρεπτικά Fe, Mn και Zn καθορίστηκαν μετά από εκχύλιση με DTPA (10g εδάφους σε αναλογία 1:2.5) χρησιμοποιώντας ICP-MS. Το νιτρικό άζωτο του εδάφους (NO₃-N) καθορίστηκε φασματοφωτομετρικά στα 400 nm μετά από εκχύλιση KCl (20g εδάφους σε αναλογία 1:2.5) και χρήση του αντιδραστηρίου Nitraver (Hach-Lange, Germany), ενώ το NH₄-N καθορίστηκε φασματοφωτομετρικά μετά από εκχύλιση KCl (20g εδάφους σε αναλογία 1:2.5) με τη μέθοδο του Nessler. Τα χαρακτηριστικά και των δύο εδαφών εμφανίζονται στον Πίνακα 5-2. Στο τέλος του πειράματος αναλύθηκαν τα εδαφικά δείγματα από όλες τις μεταχειρίσεις ως προς τις ίδιες παραμέτρους με τις ίδιες μεθόδους.

Χαρακτηρισμός οργανικών παραπροϊόντων και βιοεξανθρακωμάτων

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) και τις ολικές συγκεντρώσεις P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, Ni, Pb, Cr, As, Se, Mo 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). Ο προσδιορισμός των ολικών συγκεντρώσεων των στοιχείων P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, Ni, Pb, Cr, As, Se, Mo και Cd στα δείγματα έγινε έπειτα από χώνευση με μικροκύματα με πυκνό HNO₃. Οι ολικές συγκεντρώσεις των στοιχείων K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, Ni, Pb, Cr, As, Se, Mo και Cd προσδιορίστηκαν με τη χρήση ICP-MS ενώ ο P, προσδιορίστηκε με τη μέθοδο Ascorbic Acid Molybdenum Blue Method (Murphy and Riley, 1962) σε φασματοφωτόμετρο υπεριώδους ορατού σε μήκος κύματος 880 nm. Το νιτρικό άζωτο των βιοεξανθρακωμάτων (NO₃-N) καθορίστηκε φασματοφωτομετρικά στα 400 nm μετά από εκχύλιση KCl (20g βιοεξανθρακώματος σε αναλογία 1:7.5) και χρήση του αντιδραστηρίου Nitrover (Hach-Lange, Germany), ενώ το NH₄-N καθορίστηκε φασματοφωτομετρικά μετά από εκχύλιση KCl (20g βιοεξανθρακώματος σε αναλογία 1:7.5) με τη μέθοδο του Nessler.

Φυτικοί ιστοί

Συνολικά, επιτεύχθηκε 1 συγκομιδή των υπέργειων και υπόγειων φυτικών ιστών (3/9/2017). Το υπέργειο φυτικό μέρος (φύλλα και βλαστοί) 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. Οι ολικές συγκεντρώσεις P, Ca, K, Mg, Mn, Fe και Zn στα υπέργεια και υπόγεια μέρη του φυτού καθορίστηκαν έπειτα από ξηρή καύση (Kalra, 1998). Οι ολικές συγκεντρώσεις των στοιχείων Ca, K, Mg, Mn, Fe και Zn 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 H₂SO₄-H₂O₂.

Πίνακας 5-2. Φυτικοχημικές ιδιότητες του δείγματος εδάφους (L) που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα με φυτά του *Zea Mays* L. σε δοχεία.

Ιδιότητες	Έδαφος
	L
pH (1:2)	8.1
Άμμος-Sand (%)	30.7
Ιλύς-Silt (%)	45.8
Αργίλος-Clay (%)	22.2
Οργανική Ουσία-OM (%)	4.4
CaCO ₃ (%)	48.48
Ηλεκτρική Αγωγιμότητα-EC (dS m ⁻¹)	0.38
TOC (%)	2.57
TN (%)	0.23
NO ₃ -N (g kg ⁻¹)	0.05
NH ₄ -N (g kg ⁻¹)	0.01
Αφομοιώσιμος P-Olsen P (g kg ⁻¹)	0.04
Ανταλλάξιμο K-Exchangeable K (g kg ⁻¹)	0.08
Ανταλλάξιμο Ca-Exchangeable Ca (g kg ⁻¹)	5.80
Ανταλλάξιμο Mg-Exchangeable Mg (g kg ⁻¹)	0.19
DTPA Fe (mg kg ⁻¹)	2.95
DTPA Mn (mg kg ⁻¹)	4.9
DTPA Zn (mg kg ⁻¹)	0.34

TOC: Total Organic Carbon (Ολικός Οργανικός Άνθρακας), TN: Total Nitrogen (Ολικό Άζωτο)

5.2.4 Στατιστική Ανάλυση

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 N, P, K, Ca, Mg και μικροθρεπτικών Fe, Mn, Zn των υπέργειων και των υπόγειων φυτικών ιστών καθώς και των ξηρών βάρων των υπέργειων και υπόγειων φυτικών ιστών καθορίστηκαν σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε επίπεδο σημαντικότητας ($p < 5\%$) ξεχωριστά για κάθε πειραματικό σετ (Λ και ΧΛ). Η παραπάνω στατιστική ανάλυση εφαρμόστηκε επίσης για όλες τις παραμέτρους που αναλύθηκαν στα εδάφη με τη λήξη του πειράματος.

5.3 Αποτελέσματα και Συζήτηση

5.3.1 Χαρακτηρισμός οργανικών παραπροϊόντων και βιοεξανθρακωμάτων

Τα χαρακτηριστικά των οργανικών παραπροϊόντων και των αντίστοιχων βιοεξανθρακωμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-3. Το βιοεξανθρακώματα της πλεονάζουσας μαγιάς και του κριθαρόσπορου είχαν όξινο pH, 6.24 και 5.14, αντίστοιχα. Οι Zhang and Wang (2016) βρήκαν pH 6 στο βιοεξανθράκωμα από εξαντλημένους σπόρους κριθαριού. Έχει αναφερθεί ότι το pH των βιοεξανθρακωμάτων κυμαίνεται μεταξύ 4 και 12, με τυπικές τιμές πάνω από 7 λόγω τόσο των ιδιοτήτων βιομάζας όσο και των συνθηκών πυρόλυσης (Manya, 2012). Σε όλα τα βιοεξανθρακώματα το pH ήταν μεγαλύτερο σε σχέση με την αρχική βιομάζα, ωστόσο στο βιοεξανθράκωμα κριθαρόσπορου η αύξηση του pH ήταν πολύ μικρότερη σε σχέση με το βιοεξανθράκωμα μαγιάς. Οι λειτουργικές όξινες ομάδες που αποκολλώνται κατά τη διάρκεια της πυρόλυσης (Weber and Quicker, 2018) σε συνδυασμό με τα ανθρακικά άλατα που δημιουργούνται αλλά και τα αλκαλικά συστατικά όπως Na, K, Mg και Ca προερχόμενα από τη βιομάζα (Singh et al., 2015) είναι οι κύριοι λόγοι αύξησης του pH κατά την πυρόλυση.

Το βιοεξανθράκωμα μαγιάς και κριθαρόσπορου είχαν EC 2.15 και 0.78 dS m⁻¹, αντίστοιχα. Η Aller (2016) βρήκε στη μελέτη της εξετάζοντας 83 τιμές EC με μέση τιμή 1.59 dS m⁻¹. Τα βιοεξανθρακώματα έχουν μεγαλύτερες τιμές EC σε σχέση με την αρχική βιομάζα και αυξάνονται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία πυρόλυσης (Singh et al., 2010), εξαιτίας της συσσώρευσης των αλκαλικών αλάτων (Kloss et al., 2011; Singh et al. 2015). Οι ποικίλες τιμές EC προκύπτουν λόγω των ανόργανων συστατικών της αρχικής βιομάζας (Aller, 2016), και ιδιαίτερα του K και Na (Cantrell et al., 2012).

Τα βιοεξανθρακώματα μαγιάς, και κριθαρόσπορου, παρουσίασαν ποσοστό C 54.54% και 50.62%, αντίστοιχα. Οι Balogun et al. (2017) βρήκαν ποσοστό C 65.5% σε βιοεξανθράκωμα από εξαντλημένους σπόρους κριθαριού. Το συνολικό ποσοστό άνθρακα στα δείγματα βιοεξανθρακωμάτων που εξετάστηκαν κυμαίνονταν από 0.1% έως 97.4% (Aller, 2016). Έχει αναφερθεί σε άλλες μελέτες ότι το ποσοστό C των βιοεξανθρακωμάτων επηρεάζεται από το είδος της βιομάζας και τη θερμοκρασία πυρόλυσης (Singh et al., 2015). Τα βιοεξανθρακώματα μαγιάς και κριθαρόσπορου είχαν αύξηση C σε σύγκριση με την αρχική βιομάζα. Ωστόσο το TOC μειώθηκε σε όλα τα βιοεξανθρακώματα σε σχέση με την αρχική βιομάζα αλλά και το C. Βιομάζα που έχει υψηλή περιεκτικότητα σε ανόργανα, συμπεριλαμβανομένων των αποβλήτων και της κοπριάς, μπορεί να παρουσιάσει ένα μεγάλο ποσοστό ανόργανου άνθρακα. Για παράδειγμα, οι Enders et al. (2012) διαπίστωσε ότι περισσότερο από το 60% άνθρακα στο βιοεξανθράκωμα από κοπριά πουλερικών που παρήχθη στους 450°C ήταν ανόργανη.

Το ποσοστό N ήταν 10.56% και 7.83% στα βιοεξανθρακώματα μαγιάς και κριθαρόσπορου, αντίστοιχα. Το ποσοστό N που βρήκαν οι Balogun et al. (2017) σε βιοεξανθράκωμα από εξαντλημένους σπόρους κριθαριού ήταν 5.62. Η Aller (2016) στη μελέτη τους βρήκαν ποσοστά αζώτου στα βιοεξανθρακώματα που κυμαίνονταν από 0%-7.52%. Το ποσοστό N αυξήθηκε στα βιοεξανθρακώματα μαγιάς και κριθαρόσπορου σε σχέση με την αρχική βιομάζα. Από την άλλη, το NO₃-N και NH₄-N μειώθηκε σε όλα τα βιοεξανθρακώματα σε σχέση με την αρχική βιομάζα. Το άζωτο απομακρύνεται μέσω απώλειας αμμωνιακών (NH₄-N) και νιτρικών (NO₃-N)

κλασμάτων, καθώς και μέσω οργανικών ουσιών που μπορούν εύκολα να αποικοδομηθούν και περιέχουν N ομάδες όπως το ουρικό οξύ (Cao και Harris, 2010; Gaskin et al., 2008). Ωστόσο, υπάρχουν μελέτες που δείχνουν ότι η περιεκτικότητα σε N αυξάνεται όταν αυξάνεται η θερμοκρασία. Οι Keiluweit et al. (2010) βρήκαν αύξηση της περιεκτικότητας N των βιοεξανθρακωμάτων που προερχόνταν από βιομάζα πλούσια σε λιγνίνη με την αύξηση της θερμοκρασίας. Ομοίως, οι Novak et al. (2009b) ανέφεραν ότι το βιοεξανθράκωμα που παρήχθη από κελύφη ξηρών καρπών και βιομάζας πλούσια σε κυτταρίνη σε θερμοκρασία 350 και 700°C είχε υψηλότερο ποσοστό αζώτου σε σχέση με τη βιομάζα. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι η βιομάζα από φυτικά υλικά έχει σύνθετες αζωτούχες δομές που μπορεί να χρειάζονται υψηλότερες θερμοκρασίες για να αποδομηθούν, προκαλώντας μεταβολές στη χημική δομή και συνεπώς στις μορφές N του βιοεξανθρακώματος (Gaskin et al., 2008). Επίσης, άλλες μελέτες έχουν δείξει ότι η συσχέτιση του ποσοστού N με τη θερμοκρασία να έχει δύο στάδια: πρώτα, το N να αυξάνεται με τη θερμοκρασία μέχρι την επίτευξη μιας μέγιστης τιμής μετά από την οποία οι τιμές N μειώνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Ο Keiluweit et al. (2010) έδειξαν ότι η περιεκτικότητα σε N βιοεξανθρακώματος από υπολείμματα καλλιέργειας κολοκυθιάς ήταν 6.4% στο 100°C, 12.4% στους 400°C, όπου μετά την επίτευξη του μέγιστου, η περιεκτικότητα σε N μειώθηκε στο 7.0%. Με τον ίδιο τρόπο, οι Cantrell et al. (2012) ανέφεραν ότι το βιοεξανθράκωμα κοπριάς που παρήχθη στους 350°C είχε αυξημένο N σε σχέση με την αρχική βιομάζα, αλλά όταν η θερμοκρασία αυξήθηκε στους 700°C η τιμή του N μειώθηκε.

Το βιοεξανθράκωμα μαγιάς και κριθαρόσπορου είχαν ποσοστά τέφρας 18.64% και 17.66%, αντίστοιχα. Οι Balogun et al. (2017) παρατήρησαν ποσοστό τέφρας 13.17 σε βιοεξανθράκωμα από εξαντλημένους σπόρους κριθαριού. Η αύξηση στο ποσοστό τέφρας σε σχέση με την αρχική βιομάζα ήταν για το βιοεξανθράκωμα μαγιάς και κριθαρόσπορου, 3 και 2 φορές, αντίστοιχα. Η αύξηση της περιεκτικότητας σε τέφρα με την αύξηση της θερμοκρασίας πυρόλυσης αποκαλύπτει ότι ένα σημαντικό μέρος των ανόργανων αλάτων που υπάρχουν στη βιομάζα συμπυκνώνονται εξαιτίας την απώλεια πτητικών ουσιών όπως οξυγόνο, υδρογόνο και άνθρακα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας πυρόλυσης (Aller, 2016). Η αρνητική συσχέτιση ποσοστό άνθρακα με τέφρα για βιοεξανθρακώματα με ποσοστό τέφρας >20% (Enders et al., 2012; Windeatt et al., 2014) διακρίνεται και στο δικό μας πείραμα.

Η περιεκτικότητα του βιοεξανθρακώματος μαγιάς αποτελείται κυρίως από P, K, Mg και Ca, ενώ το βιοεξανθράκωμα κριθαρόσπορου από P, Ca και Mg και λιγότερο από K. Η σύσταση της τέφρας εξαρτάται από την βιομάζα που χρησιμοποιείται (Aller 2016, Weber and Quicker, 2018). Ο ολικός P στη μελέτη της Aller (2016) κυμαινόταν από 0.001-73 g kg⁻¹ με μέση τιμή 8.3 g kg⁻¹ με μεγαλύτερες τιμές στην κοπριά. Στη δική μας μελέτη ο P 22.29-30.29 g kg⁻¹ με μεγαλύτερη τιμή στο βιοεξανθράκωμα μαγιάς. Η περιεκτικότητα σε P όλων των βιοεξανθρακωμάτων ήταν μεγαλύτερη σε σχέση με την αρχική βιομάζα, αφού με την πυρόλυση ο οργανικός P απελευθερώνεται με τη μορφή διαλυτών αλάτων P από τη βιομάζα (DeLuca et al., 2012). Στη μελέτη της Aller (2016) η περιεκτικότητα των

βιοεξανθρακωμάτων σε K ήταν από 0.080-91.50 g kg⁻¹, σε Ca από 0.150-311.2 g kg⁻¹ και σε Mg από 0.25-97.9 g kg⁻¹. Στη δική μας μελέτη η περιεκτικότητα των βιοεξανθρακωμάτων σε K κυμαινόταν από 0.64-21.18 g kg⁻¹, σε Ca από 3.57-6.55 g kg⁻¹ και σε Mg από 3.83-5.44 g kg⁻¹, με τις μεγαλύτερες τιμές K να εμφανίζονται στο βιοεξανθράκωμα μαγιάς, Ca και Mg στο βιοεξανθράκωμα κριθαρόσπορου. Τα στοιχεία Fe, Mn, Zn, Cu, Ni, Pb, Cr, Mo αυξήθηκαν στα βιοεξανθρακώματα σε σχέση με τη αρχική βιομάζα, ενώ το Se μειώθηκε. Στη μελέτη της Aller (2016) αναφέρεται ότι η αύξηση ή η μείωση αυτών των στοιχείων εξαρτάται από το σημείο ζέσεως του καθενός. Τα στοιχεία όπως Pb, Zn, Ni Cu, Mo και Sr έχουν υψηλό σημείο ζέσεως όποτε κατά την πυρόλυση αυξάνεται η περιεκτικότητά τους στο βιοεξανθράκωμα, ενώ As, Cd, Hg, και Se έχουν χαμηλό σημείο ζέσεως με αποτέλεσμα να μειώνεται η περιεκτικότητά τους στο βιοεξανθράκωμα.

Πίνακας 5-3. Χαρακτηριστικά των οργανικών παραπροϊόντων και των βιοεξανθρακωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα με φυτά του *Zea Mays* L. σε δοχεία.

Χαρακτηριστικά	M	ΣΚ	BC-M	BC-ΣΚ
C ^a (%)	[‡] 44.14-48.53	43.82-46.53	51.85-60.85	46.29-55.85
	[§] 46.4±2.04	44.95±1.25	54.54±4.24	50.62±4.07
TOC (%)	42.98-48.14	38.27-45.87	41.01-43.18	34.63-37.3
	44.74±2.39	40.68±3.53	42.15±0.93	36.10±1.15
TN ^a (%)	7.93-9.8	3.52-5.82	9.69-11.46	7.08-8.29
	8.4±0.95	4.77±1.09	10.56±0.72	7.83±0.54
Ash ^b (%)	5.51-7.86	7.99-11.25	14.61-22.51	13.62-21.73
	6.64±1.05	9.45±1.6	18.64±3.55	17.66±3.7
pH	5.25-5.86	4.69-4.82	6.00-6.43	5.06-5.24
	5.5±0.28	4.75±0.06	6.26±0.19	5.14±0.07
EC (dS m ⁻¹)	3.17-3.75	0.37-0.85	1.58-3.3	0.76-0.81
	3.49±0.28	0.61±0.22	2.15±0.79	0.78±0.02
NO ₃ -N (mg kg ⁻¹)	1928-2332	3318-3566	187.2-205	286.3-337.80
	2148.25±173.69	3395±114.9	196.44±9.24	308.53±23.22
NH ₄ -N (mg kg ⁻¹)	2505-3129	2048-4276	221.00-564.83	323.4-633.59
	2818.75±280.07	3405.75±964.88	390.21±163.04	501±133.04
P (g kg ⁻¹)	12.5-19.83	4.99-6.23	29.17-31.5	19.83-24.83
	16.31±3.33	5.59±0.57	30.29±0.98	22.29±2.14

^a Όπως παραλήφθηκε (As received basis), ^b Επί ξηρού (Dry basis) TOC: Total Organic Carbon (Ολικός Οργανικός Άνθρακας), TN: Total Nitrogen (Ολικό Άζωτο), EC: electrical conductivity (ηλεκτρική αγωγιμότητα) ^a Όπως παραλήφθηκε (As received basis), ^b Επί ξηρού (Dry basis), , Κάτω από το όριο ανίχνευσης (<DL), [‡]Εύρος τιμών, [§]Μέσος όρος ± τυπική απόκλιση (n=4)

Πίνακας 5-3. (συνεχίζεται)

Χαρακτηριστικά	M	ΣΚ	BC-M	BC-ΣΚ
Mg (g kg ⁻¹)	1.03-1.88 1.57±0.37	2.00-2.69 2.33±0.29	3.56-4.23 3.83±0.32	4.66-5.93 5.44±0.54
K (g kg ⁻¹)	9.95-10.08 10.02±0.05	0.22-0.5 0.30±0.13	18.99-25.71 21.18±3.10	0.57-0.73 0.64±0.07
Ca (g kg ⁻¹)	1.34-1.49 1.41±0.06	2.49-3.07 2.74±0.24	2.89-4.53 3.57±0.8	5.56-7.49 6.55±0.79
Mn (mg kg ⁻¹)	7.96-15.73 10.66±3.63	47.70-59.26 51.34±5.33	20.18-31.7 23.59±5.44	101.6-172.17 129.03±30.22
Fe (mg kg ⁻¹)	90.07-102.54 98.68±5.80	83.79-114.88 95.47±13.82	166.13-250.26 210.4±35.59	195.24-253.09 219.93±24.74
Zn (mg kg ⁻¹)	83.77-112.33 96.37±11.84	125.44-176.49 143.57±22.53	123.28-249.08 199.25±54.21	325.1-597.8 420.79±121.69
Cu (mg kg ⁻¹)	20-38.36 31.3±7.92	16.25-20 17.8±1.74	18.32-21.49 19.72±1.44	15.22-20.23 17.52±2.57
Cr (mg kg ⁻¹)	<DL <DL	<DL <DL	<DL <DL	<DL <DL
Ni (mg kg ⁻¹)	1.73-1.92 1.85±0.08	<DL <DL	4.02-4.65 4.3±0.32	<DL <DL
As (mg kg ⁻¹)	<DL <DL	<DL <DL	<DL <DL	<DL <DL
Pb (mg kg ⁻¹)	<DL <DL	<DL <DL	<DL <DL	<DL <DL
Cd (mg kg ⁻¹)	<DL <DL	<DL <DL	<DL <DL	<DL <DL
Se (mg kg ⁻¹)	181.54-433.77 293.99±111.53	95.82-148.77 120.68±21.77	28.35-29.78 28.18±1.46	36.07-60.45 49.67±11.42
Mo (mg kg ⁻¹)	0.87-1.09 0.98±0.10	1.93-2.98 2.44±0.45	1.82-3.53 2.89±0.79	2.17-2.66 2.41±0.25

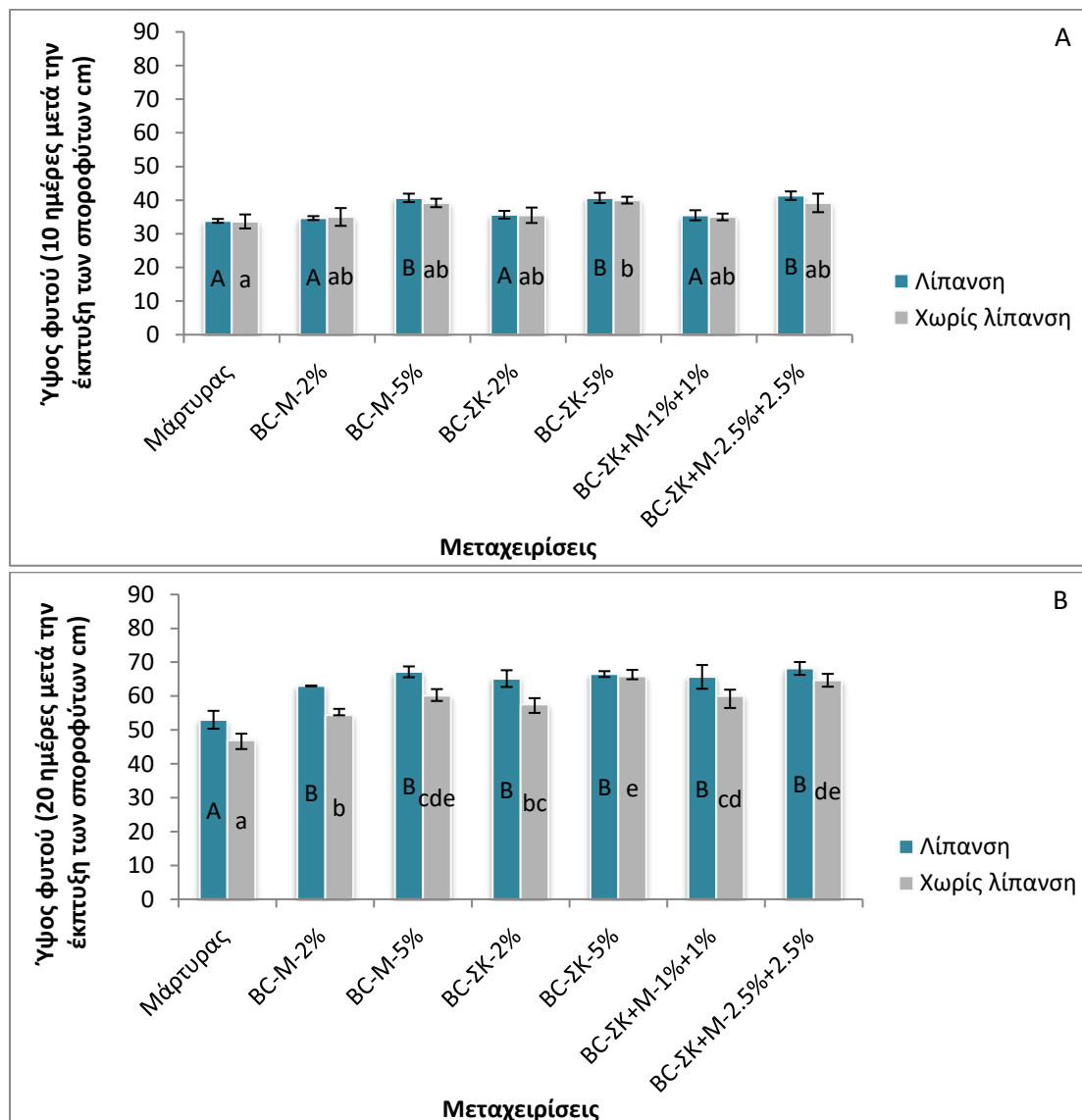
^a Όπως παραλήφθηκε (As received basis), ^b Επί ξηρού (Dry basis) TOC: Total Organic Carbon (Ολικός Οργανικός Άνθρακας), TN: Total Nitrogen (Ολικό Άζωτο), EC: electrical conductivity (ηλεκτρική αγωγιμότητα) ^a Όπως παραλήφθηκε (As received basis), ^b Επί ξηρού (Dry basis), , Κάτω από το όριο ανίχνευσης (<DL), [‡]Εύρος τιμών, [§]Μέσος όρος ± τυπική απόκλιση (n=4)

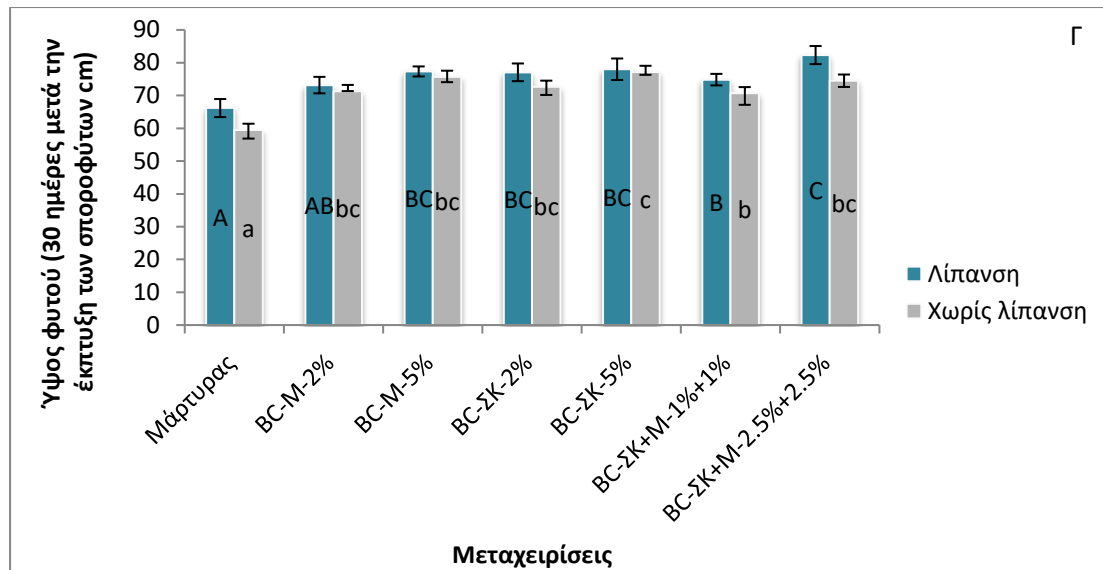
5.3.2 Ανάπτυξη και απόδοση των φυτών

Υψος φυτών

Θετική επίδραση παρατηρήθηκε στο ύψος του καλαμποκιού 10 ημέρες μετά την έκπτυξη των σποροφύτων, όταν εφαρμόστηκε βιοεξανθράκωμα μαγιάς 5%, βιοεξανθράκωμα κριθαρόσπορου 5% και συνδυασμού βιοεξανθρακώματος μαγιάς και κριθαρόσπορου 5%, σε σύγκριση με τον μάρτυρα, παρουσία ανόργανης λίπανσης, ενώ απουσία ανόργανης λίπανσης μόνο το βιοεξανθράκωμα κριθαρόσπορου 5% είχε σημαντική θετική επίδραση (Σχήμα 5-1). Σημαντική

αύξηση παρατηρήθηκε στο ύψος του καλαμποκιού 20 ημέρες μετά την έκπτυξη των σποροφύτων, σε όλες τις μεταχειρίσεις με ή χωρίς ανόργανη λίπανση, ενώ 30 ημέρες μετά την έκπτυξη των σποροφύτων θετική επίδραση έδειξαν όλες οι μεταχειρίσεις απουσία ανόργανης λίπανσης (Σχήμα 5-1). Επίσης, σημαντική αύξηση παρατηρήθηκε στο ύψος των φυτών 30 ημέρες μετά την έκπτυξη των σποροφύτων παρουσία ανόργανης λίπανσης εκτός από το βιοεξανθράκωμα μαγιάς 2%. Τα μεγαλύτερα ύψη στα φυτά καλαμποκιού και στα τρία χρονικά διαστήματα καταγράφηκαν από το συνδυασμό βιοεξανθρακώματος μαγιάς και κριθαρόσπορου 5% παρουσία ανόργανης λίπανσης, ενώ απουσία ανόργανης λίπανσης από το βιοεξανθράκωμα κριθαρόσπορου 5% (Σχήμα 5-1).

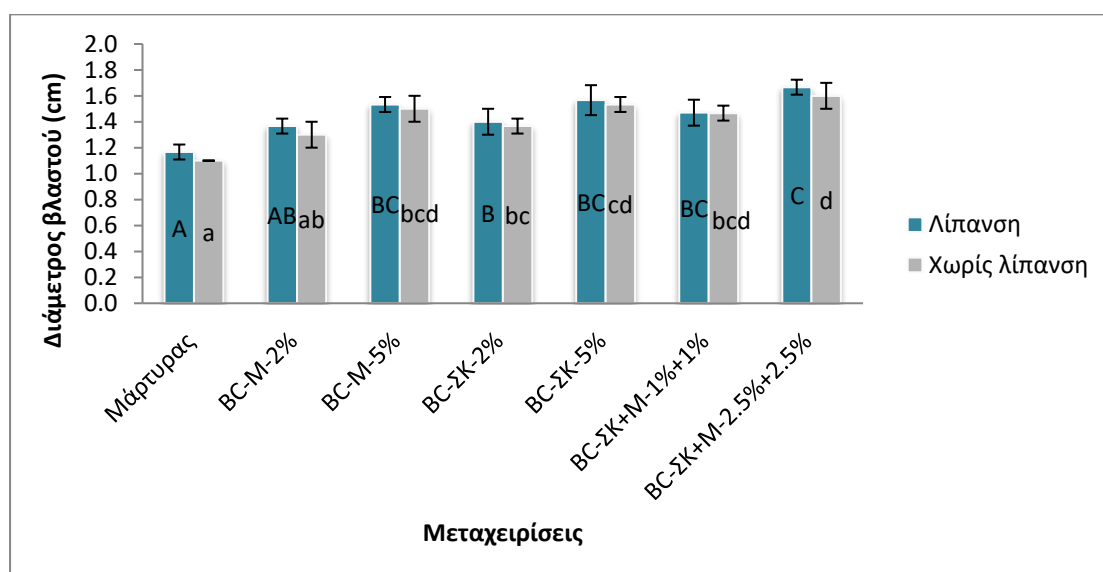




Σχήμα 5-1. Ύψος (cm) του *Zea Mays* L. 10 ημέρες (Α), 20 ημέρες (Β) και 30 ημέρες (Γ) μετά την έκπτυξη των σποροφύτων στο L έδαφος (μέσος όρος±τυπική απόκλιση, n=3). Εφαρμόστηκε one-way ANOVA για κάθε πειραματικό σετ (Λίπανση και Χωρίς λίπανση). Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε $p<0.05$. Τα κεφαλαία και πεζά γράμματα υποδηλώνουν ότι το κριτήριο εφαρμόστηκε ξεχωριστά σε κάθε πειραματικό σετ (Λίπανση και Χωρίς λίπανση).

Διάμετρος βλαστού

Η εφαρμογή όλων των εδαφοβελτιωτικών αύξησε τη διάμετρο του βλαστού του καλαμποκιού σε σύγκριση με τον μάρτυρα, εκτός από το βιοεξανθράκωμα μαγιάς 2%, ενώ η μεγαλύτερη διάμετρος βλαστού του καλαμποκιού καταγράφηκε στη μεταχείριση συνδυασμού βιοεξανθρακώματος μαγιάς και κριθαρόσπορου 5%, είτε παρουσία είτε απουσία ανόργανης λίπανσης (Σχήμα 5-2).



Σχήμα 5-2. Διάμετρος βλαστού (cm) του *Zea Mays* L. στο L έδαφος (μέσος όρος±τυπική απόκλιση, n=3). Στη διάμετρο βλαστού, εφαρμόστηκε one-way ANOVA. Εφαρμόστηκε one-way ANOVA για κάθε πειραματικό σετ (Λίπανση και Χωρίς λίπανση). Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα

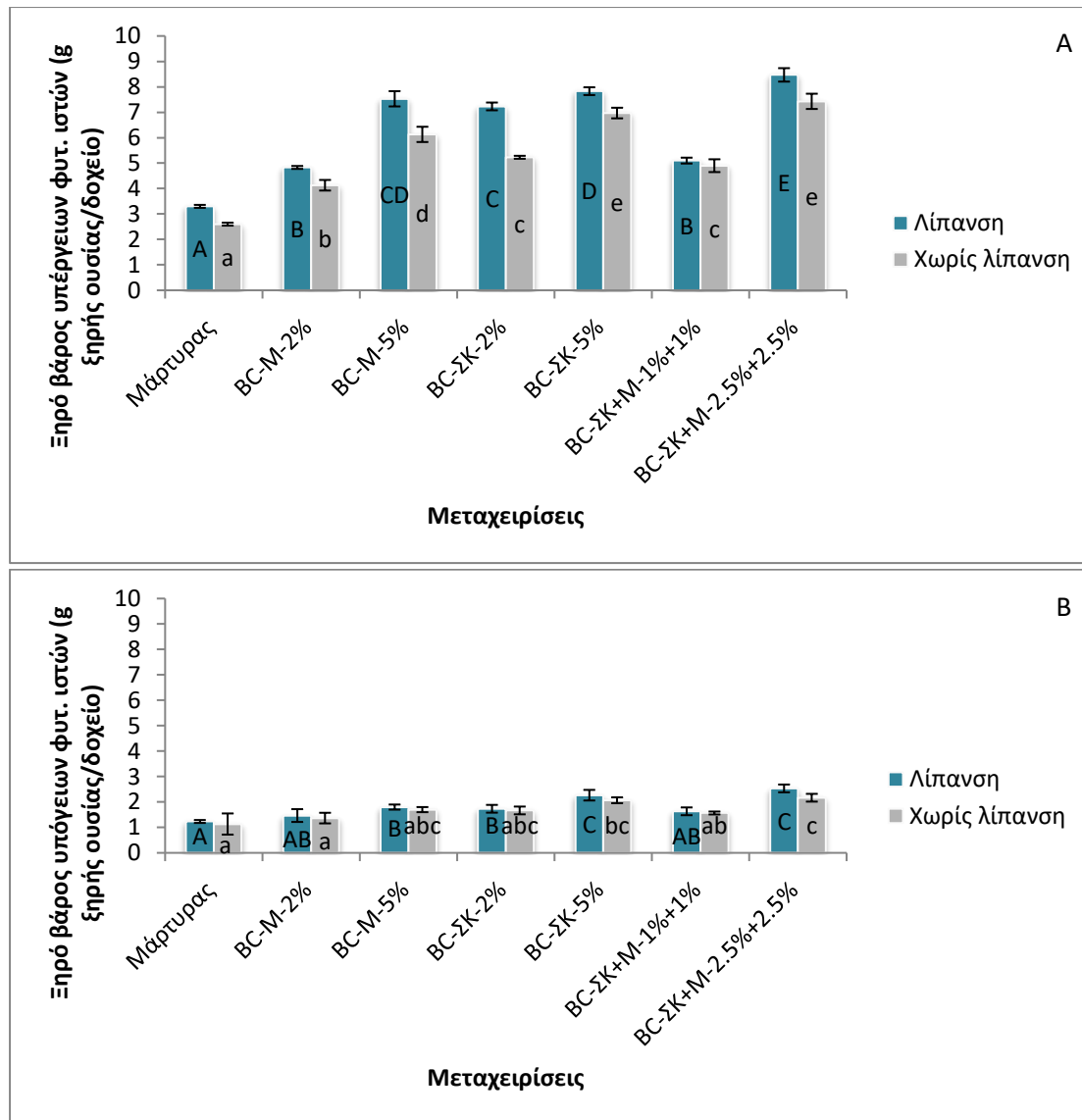
υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε $p < 0.05$. Τα κεφαλαία και πεζά γράμματα υποδηλώνουν ότι το κριτήριο εφαρμόστηκε ξεχωριστά σε κάθε πειραματικό σετ (Λίπανση και Χωρίς λίπανση).

Ξηρό βάρος υπέργειων και υπόγειων φυτικών ιστών

Η εφαρμογή των βιοεξανθρακωμάτων από οργανικά παραπροϊόντα ζυθοποιίας αύξησε σημαντικά το ξηρό βάρος του υπέργειου μέρους του φυτού κατά 59-186% σε σύγκριση με τον μάρτυρα, χωρίς την προσθήκη αζωτούχας λίπανσης και κατά 46-157% με την προσθήκη αζωτούχας λίπανσης (Σχήμα 5-3). Το ξηρό βάρος των υπόγειων φυτικών ιστών αυξήθηκε σημαντικά κατά 83-92% και 46-106%, σε σύγκριση με τον μάρτυρα, χωρίς την προσθήκη και με την προσθήκη αζωτούχας λίπανσης, αντίστοιχα. Τα μεγαλύτερα ξηρά βάρη των υπέργειων φυτικών ιστών, καθώς και των υπόγειων παρατηρήθηκαν στη μεγαλύτερη δόση εφαρμογής 5% κ.β. και στο συνδυασμό των δύο ειδών βιοεξανθρακωμάτων σε δόση 2.5% κ.β.+2.5% κ.β., είτε είχαν δεχθεί αζωτούχα λίπανση είτε όχι (Σχήμα 5-3). Η σειρά αύξησης των μεταχειρίσεων όσον αφορά στα ξηρά βάρη, τόσο των υπέργειων όσο και των υπόγειων φυτικών ιστών είναι: Μάρτυρας < BC-M-2% < BC ΣΚ+M-1%+1% < BC-ΣΚ-2% < BC-M-5% < BC-ΣΚ-5% < BC-ΣΚ+M-2.5%+2.5%. Ωστόσο, το ξηρό βάρος του υπέργειου μέρους αυξήθηκε σημαντικά από όλες τις εφαρμογές, ενώ στο υπόγειο μέρος αυξήθηκε σημαντικά από τα βιοεξανθρακώματα στη μεγαλύτερη δόση εφαρμογής 5% κ.β., στο συνδυασμό των δύο ειδών βιοεξανθρακωμάτων σε δόση 2.5% κ.β.+2.5% κ.β. και του βιοεξανθρακώματος σπόρων κριθαριού σε δόση 2%, σε σύγκριση με τον μάρτυρα, με την προσθήκη αζωτούχας λίπανσης (Σχήμα 5-3). Παράλληλα, το ξηρό βάρος του υπέργειου μέρους αυξήθηκε σημαντικά από όλες τις εφαρμογές, ενώ στο υπόγειο μέρος επηρεάστηκε σημαντικά από το βιοεξανθράκωμα σπόρων κριθαριού στη δόση εφαρμογής 5% κ.β. και στο συνδυασμό των δύο ειδών βιοεξανθρακωμάτων σε δόση 2.5% κ.β.+2.5% κ.β. σε σύγκριση με τον μάρτυρα, χωρίς την προσθήκη αζωτούχας λίπανσης (Σχήμα 5-3). Οι Fox et al. (2014) παρατήρησαν άυξηση 93 και 145% στο ξηρό βάρος του ryegrass έπειτα από την προσθήκη βιοεξανθρακώματος σε δόση 10 και 20 g kg⁻¹, αντίστοιχα, σε ένα πηλώδες έδαφος με pH=6. Επίσης, οι Baronti et al. (2010) βρήκαν μια άυξηση 29 και 120%, στο ξηρό βάρος του ryegrass, στην εφαρμογή βιοεξανθρακώματος σε δόση 0.8% και 1.7%, αντίστοιχα, σε ένα αμμοπηλώδες έδαφος με pH=6.7. Οι Subedi et al. (2016 a) παρατήρησαν άυξηση στο ξηρό βάρος του ryegrass 50.1% και 44%, σε ένα ιλυοπηλώδες έδαφος με pH=6.1 και σε ένα αμμώδες με pH=8.3, αντίστοιχα, με την προσθήκη βιοεξανθρακώματος στους 400°C από απόβλητα πουλερικών. Οι De la Rosa et al. (2014) παρατήρησαν άυξηση 67-333% σε ένα αμμοπηλώδες ασβεστούχο έδαφος με pH=8.6, μετά από προσθήκη βιοεξανθρακωμάτων σε δόση 10, 20 και 40 t ha⁻¹, με αποδοτικότερη αυτή των 10 t ha⁻¹. Στις προαναφερθείσες μελέτες δεν υπήρξε προσθήκη λίπανσης κατά τη διάρκεια του πειράματος. Από την άλλη μεριά, η προσθήκη βιοεξανθρακώματος σε συνδυασμό με λίπανση έχει επιφέρει θετικά αποτελέσματα σε διάφορες καλλιέργειες και συγκεκριμένα στο καλαμπόκι. Οι Butnan

et al. (2015) παρατήρησαν αύξηση 115-600% στο ξηρό βάρος του καλαμποκιού, σε σύγκριση με τον μάρτυρα, έπειτα από εφαρμογή βιοεξανθρακώματος από ξύλο ευκαλύπτου στους 350°C σε δύο εδάφη, ένα πηλοαμμώδες (pH=5.5) και ιλυοαργιλοπηλώδες (pH=6) σε δόση 1%, 2% και 4%. Επιπρόσθετα, οι Baronti et al. (2010) παρατήρησαν αύξηση 26-44% και 6-24% στο ξηρό βάρος του φυτού και των σπόρων, αντίστοιχα, έπειτα από την προσθήκη βιοεξανθρακώματος από σκληρό ξύλο στους 500°C σε δόση 10 t ha⁻¹, σε ένα αμμοιλοπηλώδες έδαφος (pH=7.1). Οι Alburquerque et al. (2013) βρήκαν ότι η προσθήκη βιοεξανθρακώματος σε συνδυασμό με τη μεγαλύτερη δόση ανόργανης λίπανσης είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση στην απόδοση των σπόρων σιταριού κατά 20-30% σε σχέση με τη μεταχείριση που δέχτηκε μόνο ανόργανη λίπανση σε ένα ελαφρώς όξινο πηλοαμμώδες έδαφος. Οι Inal et al. (2015) βρήκαν ότι με την προσθήκη βιοεξανθρακώματος στους 300°C από κοπριά πουλερικών σε δόσεις 0, 2.5, 5, 10 και 20 g kg⁻¹, σε ένα αργιλοπηλώδες έδαφος με pH=7.8 επέρχεται αύξηση 62-114% στο ξηρό βάρος του καλαμποκιού. Ωστόσο, οι Lentz and Ippolito (2012) δεν βρήκαν αύξηση στο ξηρό βάρος του καλαμποκιού, έπειτα από την εφαρμογή βιοεξανθρακώματος από σκληρό ξύλο σε ένα ασβεστούχο έδαφος.

Η επίδραση της N λίπανσης κυμάνθηκε από 4-38% και 4-17%, στους υπέργειους και υπόγειους φυτικούς ιστούς του καλαμποκιού, αντίστοιχα. Η μικρότερη επίδραση της αζωτούχας λίπανσης στο ξηρό βάρος των φυτών καλαμποκιού σε σχέση με την προηγούμενη μελέτη (Κεφ. 4), πιθανόν να οφείλεται στο συνδυασμό λίπανσης και χαμηλού C/N των βιοεξανθρακωμάτων. Φαίνεται ότι τα βιοεξανθρακώματα και ιδιαίτερα αυτά που προέρχονταν από βιοεξανθρακώματα σπόρων κριθαριού επηρέασαν θετικά το ξηρό βάρος του καλαμποκιού, τόσο στο υπέργειο όσο και στο υπόγειο μέρος του φυτού. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στις βελτιωμένες φυσικές ιδιότητες του εδάφους, όπως αύξηση του πορώδους, αύξηση της ιδατοϊκανότητας και μείωση της φαινομενικής πυκνότητας (Lu et al., 2014; Nelissen et al., 2015). Όσον αφορά στις ρίζες, είχαν μικρότερα ξηρά βάρη, μεγαλύτερο λόγο υπέργειο:υπόγειο φυτικού ιστού και μικρότερη διάμετρο βλαστού, σε σύγκριση με το προηγούμενο πείραμα (Κεφ. 4), γεγονός που υποδυκνύει ότι το N έπαιξε σπουδαιότερο ρόλο από ότι ο P και το K, τα οποία είναι δομικά στοιχεία των ριζών και των βλαστών.

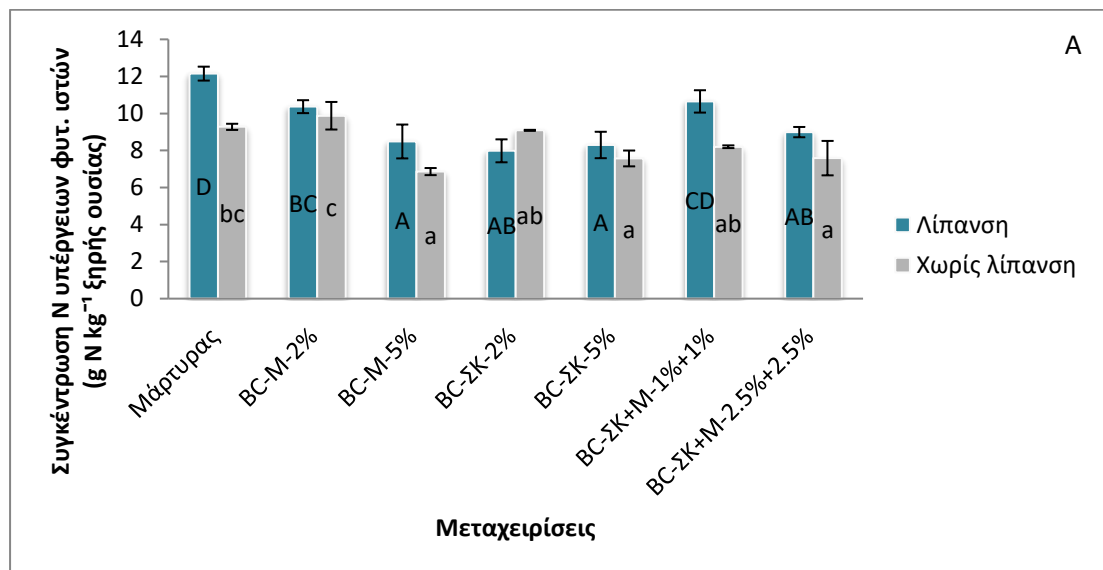


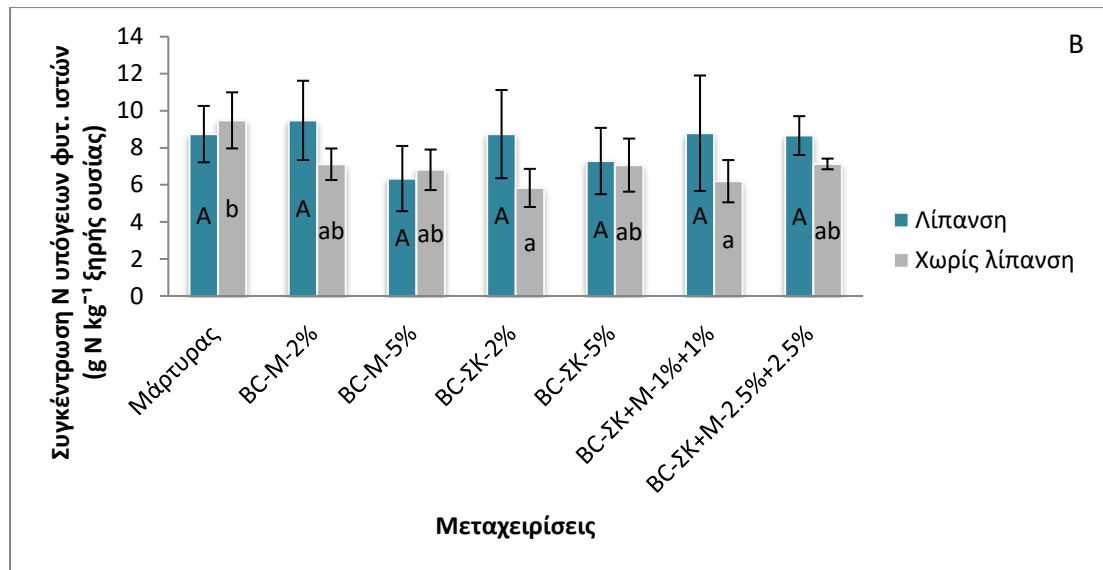
Σχήμα 5-3. Ξηρό βάρος (g ξηρής ουσίας/δοχείο) υπέργειων (Α) και υπόγειων (Β) φυτικών ιστών του *Zea Mays* L. στο L έδαφος (μέσος όρος±τυπική απόκλιση, n=3). Εφαρμόστηκε one-way ANOVA για κάθε πειραματικό σετ (Λίπανση και Χωρίς λίπανση). Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε $p<0.05$. Τα κεφαλαία και πεζά γράμματα υποδηλώνουν ότι το κριτήριο εφαρμόστηκε ξεχωριστά σε κάθε πειραματικό σετ (Λίπανση και Χωρίς λίπανση).

5.3.2 Συγκέντρωση μακροθρεπτικών N, P, K, Ca, Mg στους υπέργειους και υπόγειους φυτικούς ιστούς

Η συγκέντρωση του N, είτε μειώθηκε είτε δεν επηρεάστηκε σημαντικά, στην υπέργεια και υπόγεια βιομάζα του φυτού, με ή χωρίς ανόργανη λίπανση (Σχήμα 5-4). Ωστόσο, η πρόσληψη του N από τους υπέργειους φυτικούς ιστούς αυξήθηκε σημαντικά σε όλες τις μεταχειρίσεις με ή χωρίς ανόργανη λίπανση, εκτός από το συνδυασμό βιοεξανθρακώματος σπόρων κριθαριού και μαγιάς σε συνολική δόση 2% με ανόργανη λίπανση (Σχήμα 5-4). Η πρόσληψη N από τους υπόγειους φυτικούς ιστούς δεν επηρεάστηκε σημαντικά με ή χωρίς λίπανση, εκτός από το συνδυασμό των

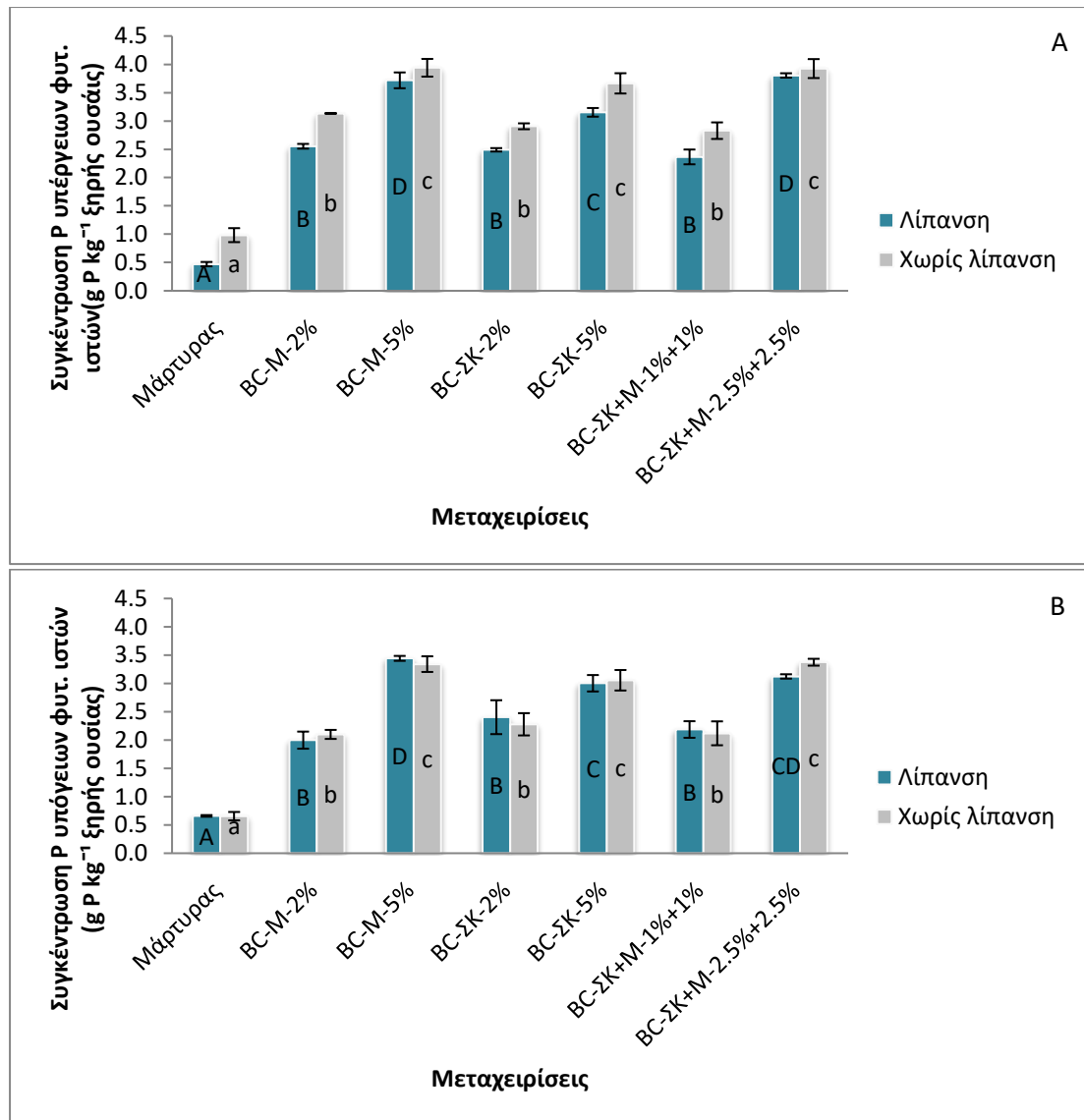
δύο ειδών βιοεξανθρακωμάτων σε δόση 2.5% κ.β.+2.5% κ.β. με λίπανση. Φαίνεται ότι η δεξαμενή-N μειώθηκε λόγω της γρήγορης και μεγάλης ανάπτυξης του φυτού, γεγονός που οδηγεί σε χαμηλότερη συγκέντρωση N στους φυτικούς ιστούς. Οι Kammann et al. (2011) κατέγραψαν, επίσης, μειωμένες συγκεντρώσεις N στους φυτικούς ιστούς του *Chenopodium quinoa* Willd σε ένα πείραμα με βιοεξανθράκωμα από φλοιούς φυσιτικών, αλλά η απόδοση της φυτικής βιομάζας αυξήθηκε έως και 60% γεγονός που αποδεικνύει αυξημένη αποδοτικότητα χρήσης του N. Επιπλέον, οι Zheng et al. (2013) ανέφεραν χαμηλότερες συγκεντρώσεις N σε φυτά καλαμποκιού σε ένα πείραμα τριών μηνών, αλλά και μεγαλύτερη βιομάζα με την εφαρμογή βιοεξανθρακώματος. Οι Lentz and Ippolito (2012) δεν παρατήρησαν επίδραση στις συγκεντρώσεις N σε φυτά καλαμποκιού, αλλά ούτε στο ξηρό βάρος τον πρώτο χρόνο καλλιέργειας, ενώ το δεύτερο χρόνο βρήκαν μειωμένες συγκεντρώσεις N στους φυτικούς ιστούς και μειωμένο ξηρό βάρος με την προσθήκη βιοεξανθρακώματος. Από την άλλη οι Inal et al. (2015) βρήκαν αυξημένες συγκεντρώσεις N στους φυτικούς ιστούς του καλαμποκιού και αυξημένο ξηρό βάρος. Μελέτες έχουν δείξει ότι η αποτελεσματικότητα χρήσης του N επηρεάζεται από τον συνδυασμό πρόσληψης N από τα φυτά και την αποτελεσματικότητα στη φυσιολογία του φυτού (Agegnehu et al., 2016a ; Xu et al., 2012).





Σχήμα 5-4. Συγκέντρωση N (g N kg^{-1} ξηρής ουσίας) υπέργειων (A) και υπόγειων (B) φυτικών ιστών του *Zea Mays* L. στο L έδαφος (μέσος όρος \pm τυπική απόκλιση, $n=3$). Εφαρμόστηκε one-way ANOVA για κάθε πειραματικό σετ (Λίπανση και Χωρίς λίπανση). Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε $p < 0.05$. Τα κεφαλαία και πεζά γράμματα υποδηλώνουν ότι το κριτήριο εφαρμόστηκε ξεχωριστά σε κάθε πειραματικό σετ (Λίπανση και Χωρίς λίπανση).

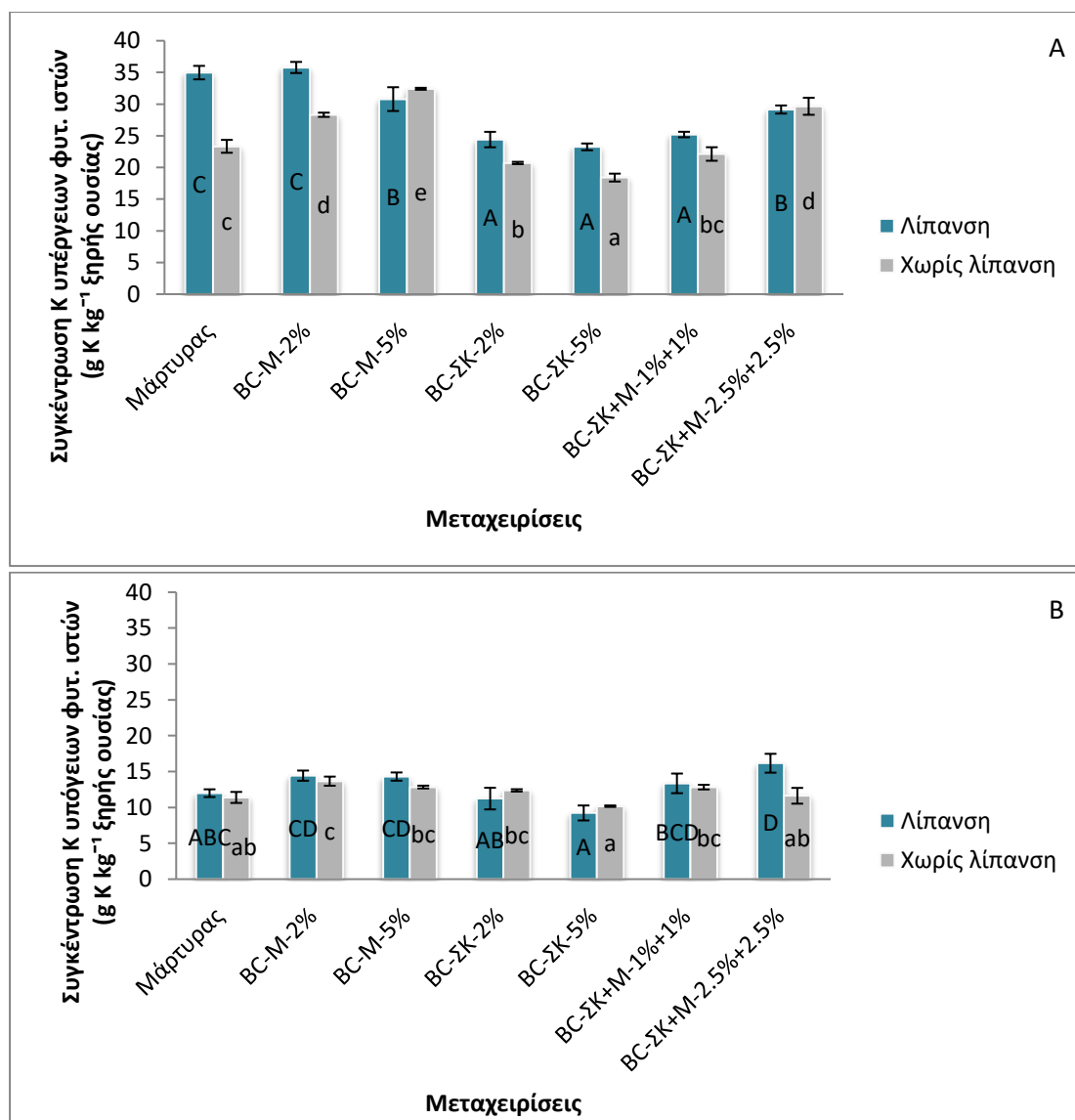
Η συγκέντρωση του P, αυξήθηκε, στους υπέργειους και υπόγειους φυτικούς ιστούς, με την προσθήκη όλων των βιοεξανθρακωμάτων και ειδικότερα του βιοεξανθρακώματος μαγιάς σε δόση 5% κ.β. και του συνδυασμού βιοεξανθρακώματος κριθαρόσπορου και μαγιάς σε συνολική δόση 5% κ.β. με ή χωρίς ανόργανη λίπανση (Σχήμα 5-5). Αυτό πιθανόν να συμβαίνει λόγω της μεγαλύτερης συγκέντρωσης P στο βιοεξανθράκωμα μαγιάς σε σύγκριση με το βιοεξανθράκωμα κριθαρόσπορου. Οι Lentz and Ippolito (2012) δεν παρατήρησαν σημαντική διαφορά στη συγκέντρωση P στους φυτικούς ιστούς του καλαμποκιού έπειτα από την προσθήκη δύο ειδών βιοεξανθρακωμάτων σε ένα ασβεστούχο έδαφος, λόγω της ρυθμιστικής του ικανότητας. Ωστόσο, Οι Inal et al. (2015) παρατήρησαν αυξημένες συγκεντρώσεις P στους φυτικούς ιστούς του καλαμποκιού έπειτα από εφαρμογή βιοεξανθρακώματος από κοπριά πουλερικών σε ένα ασβεστούχο έδαφος.



Σχήμα 5-5. Συγκέντρωση P (g P kg⁻¹ ξηρής ουσίας) υπέργειων (Α) και υπόγειων (Β) φυτικών ιστών του *Zea Mays* L. στο L έδαφος (μέσος όρος±τυπική απόκλιση, n=3). Εφαρμόστηκε one-way ANOVA για κάθε πειραματικό σετ (Λίπανση και Χωρίς λίπανση). Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε $p<0.05$. Τα κεφαλαία και πεζά γράμματα υποδηλώνουν ότι το κριτήριο εφαρμόστηκε ξεχωριστά σε κάθε πειραματικό σετ (Λίπανση και Χωρίς λίπανση).

Η συγκέντρωση K, είτε μειώθηκε είτε δεν επηρεάστηκε στους υπέργειους και υπόγειους φυτικούς ιστούς, εκτός από το συνδυασμό βιοεξανθρακώματος κριθαρόσπορου και μαγιάς σε συνολική δόση 5% κ.β στους υπόγειους φυτικούς ιστούς όπου αυξήθηκε με ανόργανη λίπανση (Σχήμα 5-6). Η συγκέντρωση στους υπέργειους φυτικούς ιστούς αυξήθηκε από τα βιοεξανθρακώματα μαγιάς και στις δύο δόσεις καθώς και από το συνδυασμό βιοεξανθρακώματος κριθαρόσπορου και μαγιάς σε συνολική δόση 5% κ.β, ενώ στους υπόγειους φυτικούς ιστούς αυξήθηκε μόνο από το βιοεξανθρακώμα μαγιάς σε δόση 2% χωρίς ανόργανη λίπανση (Σχήμα 5-6). Οι Inal et al. (2015) βρήκαν αυξημένες συγκεντρώσεις K στους φυτικούς ιστούς του καλαμποκιού έπειτα από εφαρμογή βιοεξανθρακώματος από κοπριά πουλερικών σε

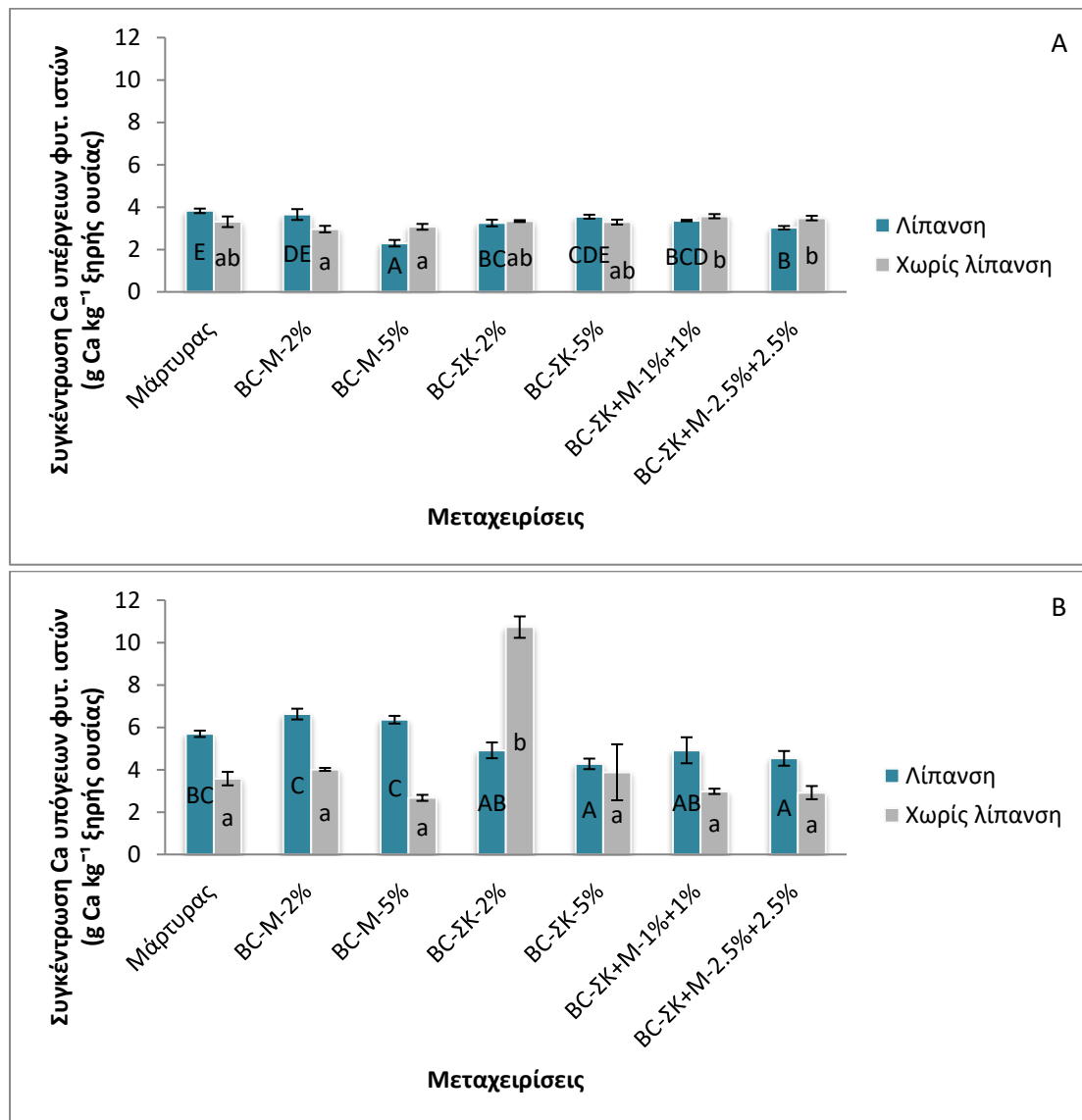
ένα ασβεστούχο έδαφος. Οι Rogovska et al. (2014) παρατήρησαν αυξημένη πρόσληψη K από το καλαμπόκι με την εφαρμογή βιοεξανθρακώματος από σκληρό ξύλο σε δόση 96 Mg ha^{-1} σε ένα πηλώδες έδαφος αποδίδοντας αυτή την αύξηση σε αυξημένη υγρασία στο έδαφος έπειτα από την εφαρμογή του βιοεξανθρακώματος. Επίσης, οι Butnan et al. (2015) βρήκαν αυξημένη συγκέντρωση K σε φυτικούς ιστούς καλαμποκιού σε ένα πηλοαμμώδες έδαφος, αφού είχε προστεθεί βιοεξανθράκωμα από ξύλο ευκάλυπτου, σε δόση 4%, αποδίδοντας αυτή την αύξηση στις ανταγωνιστικές σχέσεις του K με το Ca και το Mg. Φαίνεται ότι στο δικό μας πείραμα, οι τρεις παράγοντες, η αυξημένη υγρασία, η ανταγωνιστικότητα του K με το Ca και το Mg, η υψηλή συγκέντρωση του K στο βιοεξανθράκωμα, ειδικότερα του βιοεξανθρακώματος μαγιάς, έπαιξαν σπουδαίο ρόλο στην αύξηση της συγκέντρωσης K στους φυτικούς ιστούς. Αντίθετα, η μείωση ή μη επιρροή στη συγκέντρωση K στους φυτικούς ιστούς στις μεταχειρίσεις που δέχτηκαν λίπανση πιθανόν να οφείλεται στις ανταγωνιστικές σχέσεις του K με το N (Oram et al., 2013).



Σχήμα 5-6. Συγκέντρωση K (g K kg^{-1} ξηρής ουσίας) υπέργειων (Α) και υπόγειων (Β) φυτικών ιστών του *Zea Mays* L. στο L έδαφος (μέσος όρος \pm τυπική απόκλιση, $n=3$). Εφαρμόστηκε one-way ANOVA

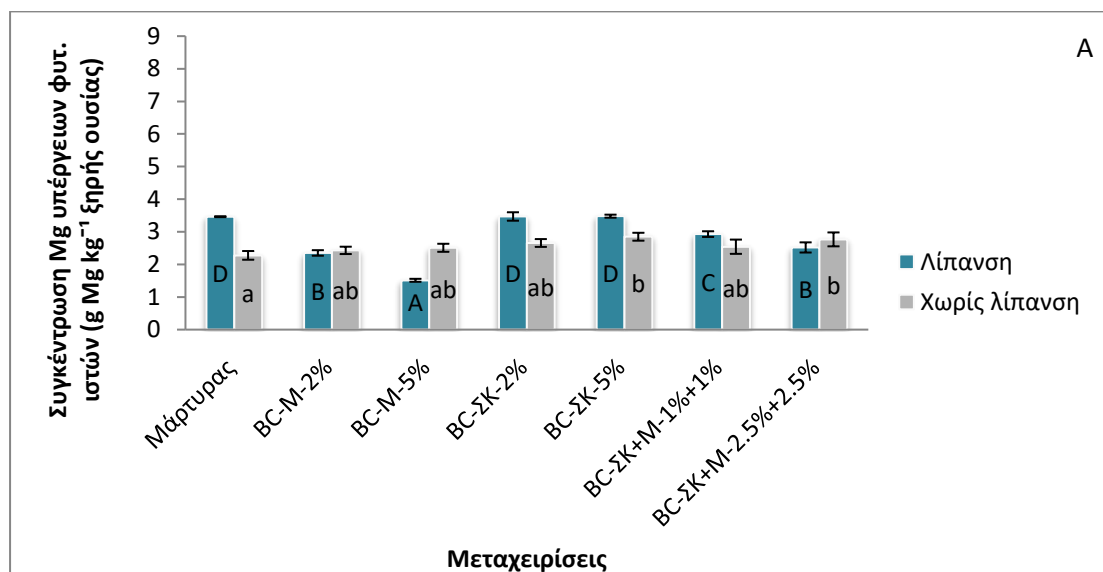
για κάθε πειραματικό σετ (Λίπανση και Χωρίς λίπανση). Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε $p < 0.05$. Τα κεφαλαία και πεζά γράμματα υποδηλώνουν ότι το κριτήριο εφαρμόστηκε ξεχωριστά σε κάθε πειραματικό σετ (Λίπανση και Χωρίς λίπανση).

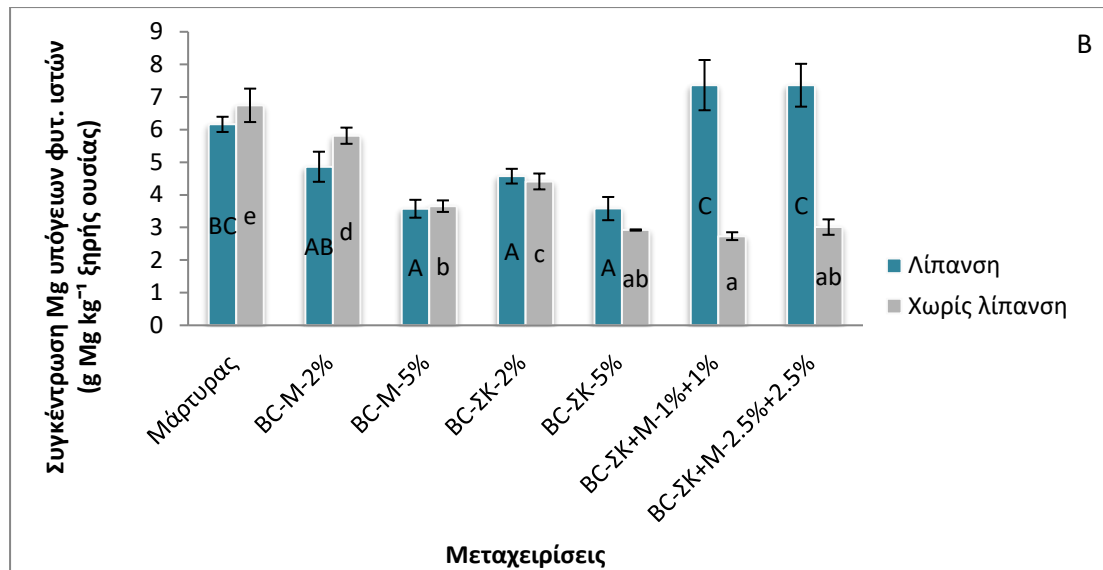
Η συγκέντρωση Ca, στους υπέργειους και υπόγειους φυτικούς ιστούς, είτε μειώθηκε είτε δεν επηρεάστηκε με ανόργανη λίπανση, ενώ χωρίς ανόργανη λίπανση δεν επηρεάστηκε στους υπέργειους και υπόγειους εκτός από το βιοεξανθράκωμα κριθαρόσπορου σε δόση 2% το οποίο αύξησε τη συγκέντρωση Ca στους υπόγειους φυτικούς ιστούς (Σχήμα 5-7). Οι Inal et al. (2015) βρήκαν μειωμένες συγκεντρώσεις Ca στους φυτικούς ιστούς του καλαμποκιού έπειτα από εφαρμογή βιοεξανθρακώματος από κοπριά πουλερικών σε ένα ασβεστούχο έδαφος. Επίσης, οι Rogonska et al. (2014) παρατήρησαν μείωση στη συγκέντρωση του Ca στους φυτικούς ιστούς του καλαμποκιού με την εφαρμογή βιοεξανθρακώματος από σκληρό ξύλο σε ένα πηλώδες έδαφος.



Σχήμα 5-7. Συγκέντρωση Ca (g Ca kg^{-1} ξηρής ουσίας) υπέργειων (A) και υπόγειων (B) φυτικών ιστών του Zea Mays L. στο L έδαφος (μέσος όρος \pm τυπική απόκλιση, $n=3$). Εφαρμόστηκε one-way ANOVA για κάθε πειραματικό σετ (Λίπανση και Χωρίς λίπανση). Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε $p<0.05$. Τα κεφαλαία και πεζά γράμματα υποδηλώνουν ότι το κριτήριο εφαρμόστηκε ξεχωριστά σε κάθε πειραματικό σετ (Λίπανση και Χωρίς λίπανση).

Η συγκέντρωση Mg, είτε μειώθηκε είτε δεν επηρεάστηκε σημαντικά, στους υπέργειους και υπόγειους φυτικούς ιστούς με ή χωρίς ανόργανη λίπανση, εκτός από τον κριθαρόσπορο σε δόση 5% και το συνδυασμό βιοεξανθρακώματος κριθαρόσπορου και μαγιάς σε δόση 5% στους υπέργειους όπου αυξήθηκε χωρίς ανόργανη λίπανση (Σχήμα 5-8). Οι Inal et al. (2015) βρήκαν μειωμένες συγκεντρώσεις Mg στους φυτικούς ιστούς του καλαμποκιού έπειτα από εφαρμογή βιοεξανθρακώματος από κοπριά πουλερικών σε ένα ασβεστούχο έδαφος. Οι Butnan et al. (2015) βρήκαν μειωμένες συγκεντρώσεις Mg στους φυτικούς ιστούς του καλαμποκιού έπειτα από εφαρμογή βιοεξανθρακώματος από ξύλο ευκαλύπτου σε ένα πηλοαμμώδες έδαφος, αποδίδοντας αυτή τη μείωση στις ανταγωνιστικές σχέσεις του K με το Ca και το Mg.

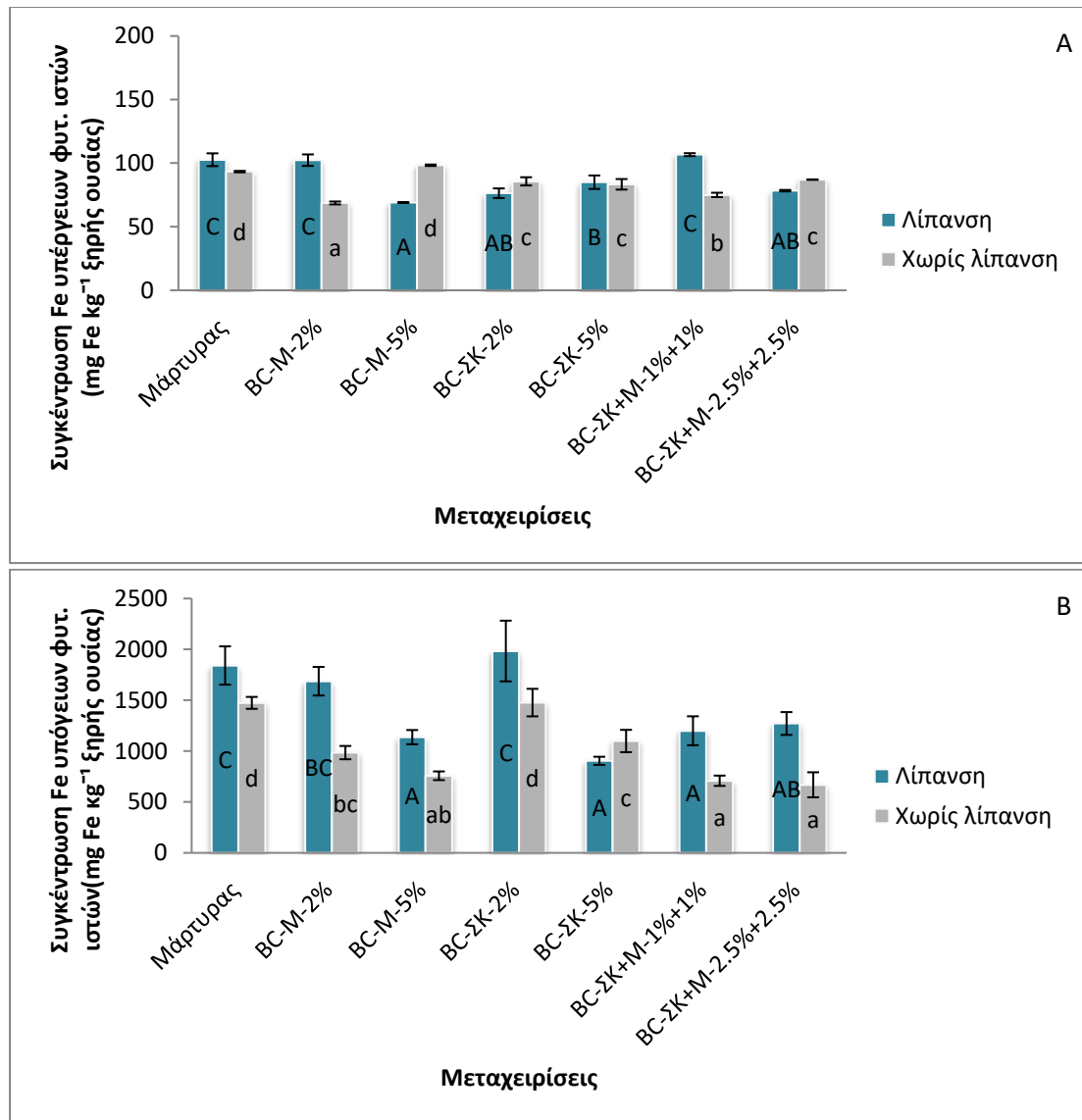




Σχήμα 5-8. Συγκέντρωση Mg (g Mg kg^{-1} ξηρής ουσίας) υπέργειων (A) και υπόγειων (B) φυτικών ιστών του *Zea Mays* L. στο L έδαφος (μέσος όρος \pm τυπική απόκλιση, $n=3$). Εφαρμόστηκε one-way ANOVA για κάθε πειραματικό σετ (Λίπανση και Χωρίς λίπανση). Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε $p<0.05$. Τα κεφαλαία και πεζά γράμματα υποδηλώνουν ότι το κριτήριο εφαρμόστηκε ξεχωριστά σε κάθε πειραματικό σετ (Λίπανση και Χωρίς λίπανση).

5.3.3 Συγκέντρωση μικροθρεπτικών Fe, Mn, Zn στους υπέργειους και υπόγειους φυτικούς ιστούς

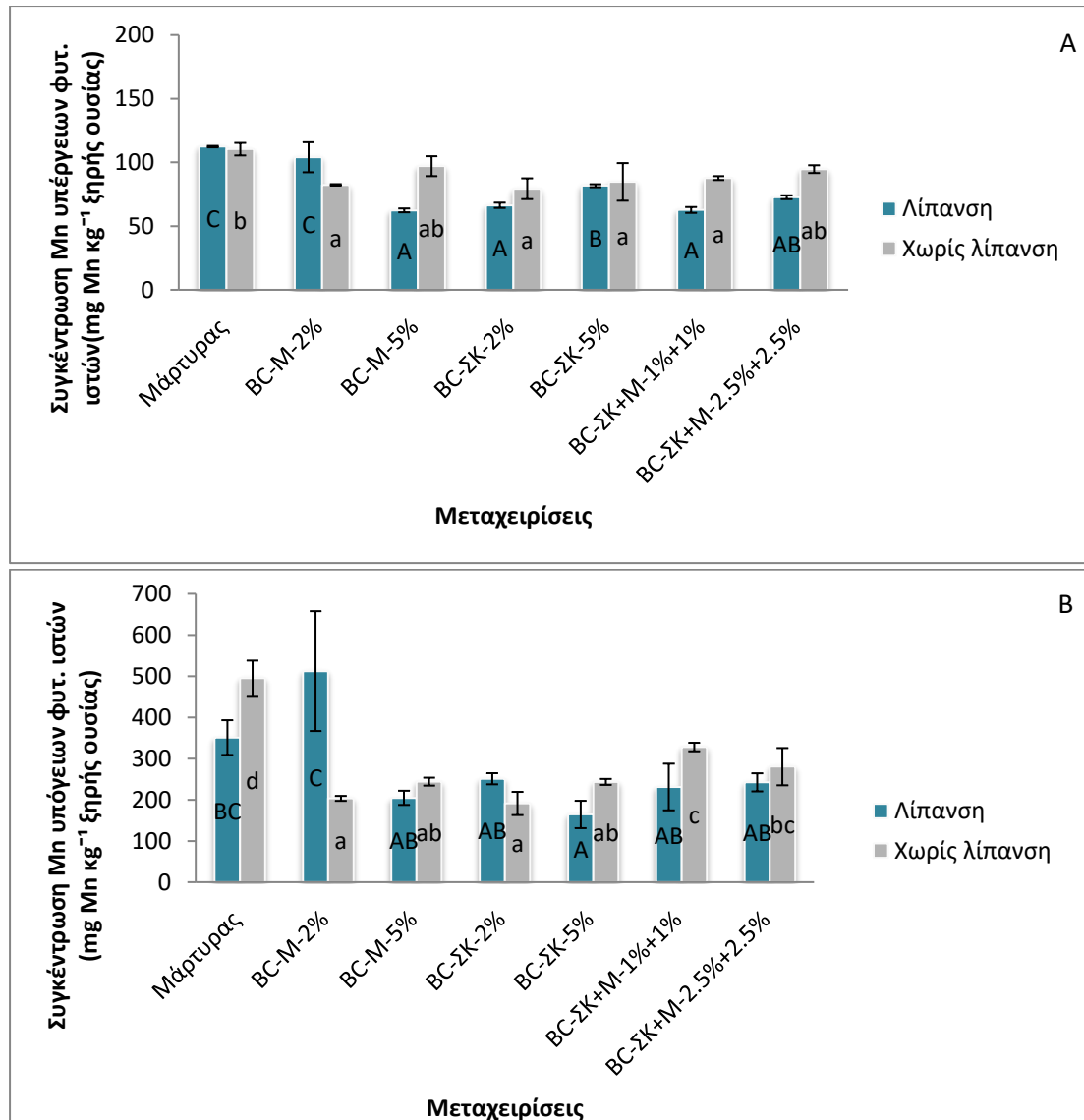
Η συγκέντρωση Fe, στους υπέργειους και υπόγειους φυτικούς ιστούς, είτε μειώθηκε είτε έμεινε ανεπηρέαστη από τις μεταχειρίσεις με ή χωρίς ανόργανη λίπανση (Σχήμα 5-9). Οι Inal et al. (2015) βρήκαν επίδραση στις συγκεντρώσεις Fe στους φυτικούς ιστούς του καλαμποκιού έπειτα από εφαρμογή βιοεξανθρακώματος από κοπριά πουλερικών σε ένα ασβεστούχο έδαφος. Οι Rogovska et al. (2014) παρατήρησαν μείωση στη συγκέντρωση του Fe στους φυτικούς ιστούς του καλαμποκιού με την εφαρμογή βιοεξανθρακώματος από σκληρό ξύλο σε ένα πηλώδες έδαφος. Οι συγγραφείς ανέφεραν ότι ένας πιθανός λόγος για αυτή τη μείωση είναι η αύξηση του pH του εδάφους η οποία μειώνει τη διαθεσιμότητα και τη διαλυτότητα του Fe στο έδαφος.



Σχήμα 5-9. Συγκέντρωση Fe (mg Fe kg⁻¹ ξηρής ουσίας) υπέργειων (Α) και υπόγειων (Β) φυτικών ιστών του *Zea Mays* L. στο L έδαφος (μέσος όρος±τυπική απόκλιση, n=3). Εφαρμόστηκε one-way ANOVA για κάθε πειραματικό σετ (Λίπανση και Χωρίς λίπανση). Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε $p<0.05$. Τα κεφαλαία και πεζά γράμματα υποδηλώνουν ότι το κριτήριο εφαρμόστηκε ξεχωριστά σε κάθε πειραματικό σετ (Λίπανση και Χωρίς λίπανση).

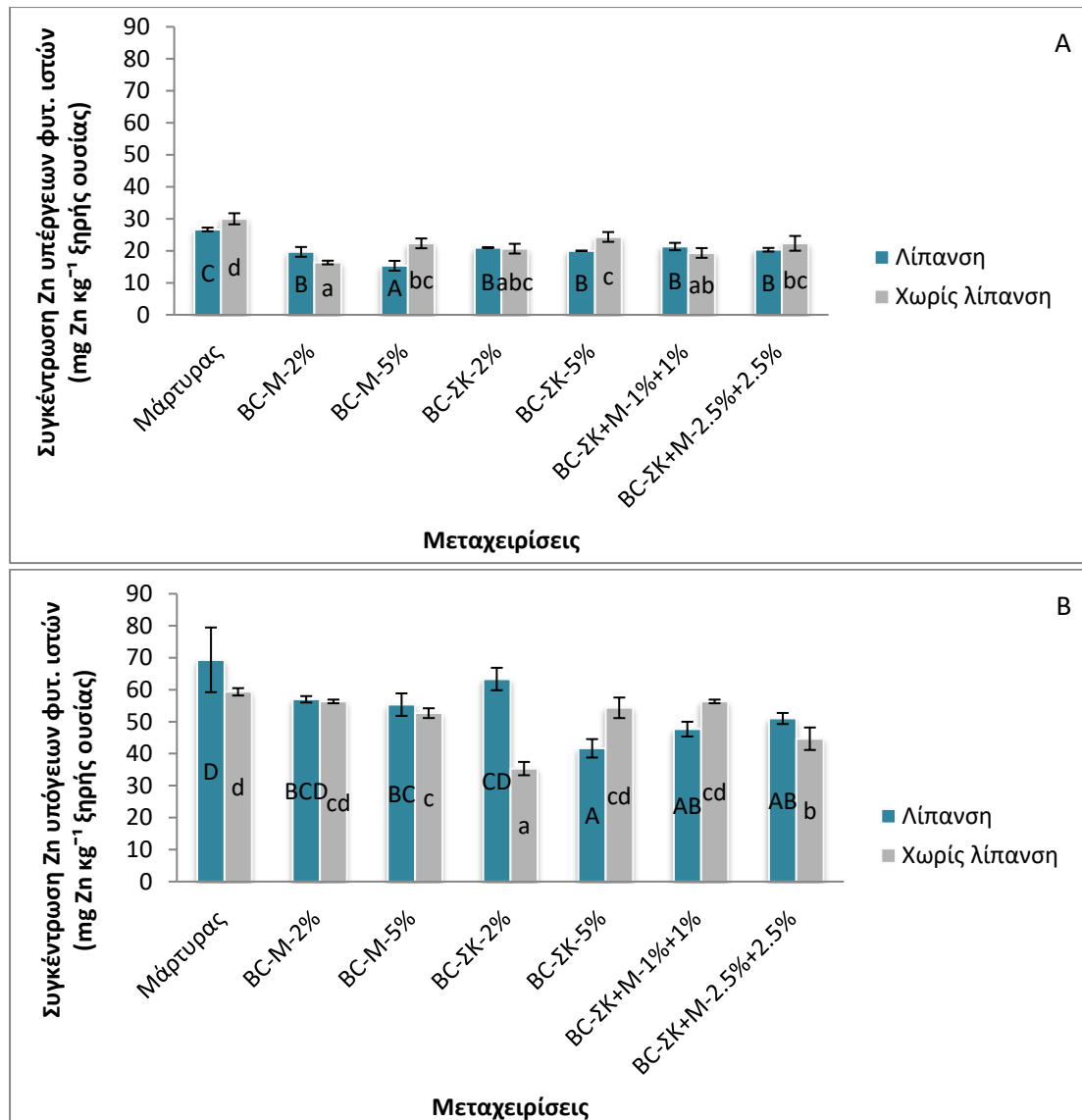
Η συγκέντρωση Mn, στους υπέργειους και υπόγειους φυτικούς ιστούς, είτε μειώθηκε είτε έμεινε ανεπηρέαστη από τις μεταχειρίσεις με ή χωρίς ανόργανη λίπανση (Σχήμα 5-10). Οι Butnan et al. 2015 βρήκαν μειωμένες συγκεντρώσεις Mn στους φυτικούς ιστούς του καλαμποκιού έπειτα από εφαρμογή βιοεξανθρακώματος από ξύλο ευκαλύπτου σε ένα πηλοαμμώδες έδαφος. Επίσης, οι Rogonska et al. (2014) παρατήρησαν μείωση στη συγκέντρωση του Mn στους φυτικούς ιστούς του καλαμποκιού με την εφαρμογή βιοεξανθρακώματος από σκληρό ξύλο σε ένα πηλώδες έδαφος. Οι συγγραφείς ανέφεραν ότι ένας πιθανός λόγος για αυτή τη μείωση είναι η αύξηση του pH του εδάφους, η οποία μειώνει τη διαθεσιμότητα και τη διαλυτότητα του Mn στο έδαφος. Αντίθετα, οι Inal et al. (2015) βρήκαν αύξηση στις

συγκεντρώσεις Mn στους φυτικούς ιστούς του καλαμποκιού έπειτα από εφαρμογή βιοεξανθρακώματος από κοπριά πουλερικών σε ένα ασβεστούχο έδαφος.



Σχήμα 5-10. Συγκέντρωση Mn (mg Mn kg^{-1} ξηρής ουσίας) υπέργειων (A) και υπόγειων (B) φυτικών ιστών του *Zea Mays* L. στο L έδαφος (μέσος όρος \pm τυπική απόκλιση, $n=3$). Εφαρμόστηκε one-way ANOVA για κάθε πειραματικό σετ (Λίπανση και Χωρίς λίπανση). Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε $p<0.05$. Τα κεφαλαία και πεζά γράμματα υποδηλώνουν ότι το κριτήριο εφαρμόστηκε ξεχωριστά σε κάθε πειραματικό σετ (Λίπανση και Χωρίς λίπανση).

Η συγκέντρωση Zn, είτε μειώθηκε είτε δεν επηρεάστηκε στους υπέργειους και υπόγειους φυτικούς ιστούς, με ή χωρίς ανόργανη λίπανση (Σχήμα 5-11). Οι Inal et al. (2015) βρήκαν αύξηση στις συγκεντρώσεις Zn στους φυτικούς ιστούς του καλαμποκιού έπειτα από εφαρμογή βιοεξανθρακώματος από κοπριά πουλερικών σε ένα ασβεστούχο έδαφος. Αντίθετα, οι Rogovska et al. (2014) δεν παρατήρησαν επίδραση στη συγκέντρωση του Zn στους φυτικούς ιστούς του καλαμποκιού με την εφαρμογή βιοεξανθρακώματος από σκληρό ξύλο σε ένα πηλώδες έδαφος.



Σχήμα 5-11. Συγκέντρωση Zn (mg Zn kg^{-1} ξηρής ουσίας) υπέργειων (A) και υπόγειων (B) φυτικών ιστών του *Zea Mays* L. στο L έδαφος (μέσος όρος \pm τυπική απόκλιση, $n=3$). Εφαρμόστηκε one-way ANOVA για κάθε πειραματικό σετ (Λίπανση και Χωρίς λίπανση). Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε $p<0.05$. Τα κεφαλαία και πεζά γράμματα υποδηλώνουν ότι το κριτήριο εφαρμόστηκε ξεχωριστά σε κάθε πειραματικό σετ (Λίπανση και Χωρίς λίπανση).

5.3.4 Χημικές ιδιότητες των εδαφών

Η επίδραση βιοεξανθρακώματος στις ιδιότητες του εδάφους παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-4. Ο ολικός οργανικός C (TOC) αυξήθηκε, σε όλες τις μεταχειρίσεις, σε σύγκριση με τον μάρτυρα, με ή χωρίς ανόργανη αζωτούχα λίπανση. Η επιταχυνόμενη αλλαγή στην ανοργανοποίηση της οργανικής ουσίας λόγω της προσθήκης νέου υποστρώματος μπορεί να επηρεαστεί από την προσθήκη βιοεξανθρακώματος (Zimmerman et al., 2011). Οι διάφορες θερμοκρασίες πυρόλυσης και τα διάφορα είδη βιομάζας είναι δύο παράγοντες, οι οποίοι μπορούν

να τροποποιήσουν την επιταχυνόμενη αλλαγή στην ανοργανοποίηση του οργανικού άνθρακα όταν προστίθεται το βιοεξανθράκωμα στο έδαφος. Αυτοί οι δύο παράγοντες επηρεάζουν την περιεκτικότητα του βιοεξανθρακώματος σε ασταθείς οργανικές ενώσεις. Τα βιοεξανθρακώματα που παράγονται σε χαμηλές θερμοκρασίες (<400°C) δημιουργούν υψηλότερο ρυθμό ανοργανοποίησης σε σχέση με αυτά που παράγονται σε υψηλές θερμοκρασίες (>525°C) εξαιτίας της υψηλότερης περιεκτικότητας σε οργανικό άνθρακα που αποσυντίθεται πιο γρήγορα (Ameloot et al., 2013; Luo et al., 2011; Singh et al., 2012; Zimmerman et al., 2011). Τα βιοεξανθρακώματα που προέρχονται από κοπριά είναι πιθανόν να ενεργοποιήσουν περισσότερο την ανοργανοποίηση του N σε σύγκριση με βιοεξανθρακώματα από υπολείμματα καλλιεργειών λόγω του μικρότερου λόγου C:N (Nguyen et al., 2017; Singh et al., 2012). Γενικά μια βιομάζα με υψηλό ποσοστό N ενεργοποιεί την ανοργανοποίηση του N στο έδαφος (Thies et al., 2015). Το ολικό N (TN) αυξήθηκε σε όλες τις μεταχειρίσεις, σε σύγκριση με τον μάρτυρα, με ή χωρίς ανόργανη αζωτούχα λίπανση. Η συγκέντρωση NO₃-N μειώθηκε ή παρέμεινε ίδια, σε σύγκριση με τον μάρτυρα, εκτός από το βιοεξανθράκωμα κριθαρόσπορου 2% το οποίο αυξήθηκε, με ανόργανη αζωτούχα λίπανση, ενώ αυξήθηκε σε όλες τις μεταχειρίσεις χωρίς ανόργανη λίπανση εκτός του βιοεξανθρακώματος μαγιάς 2% και κριθαρόσπορου 5%. Η συγκέντρωση NH₄-N δεν επηρεάστηκε ή μειώθηκε σε όλες τις μεταχειρίσεις σε σχέση με τον μάρτυρα, με ανόργανη λίπανση, εκτός από το βιοεξανθράκωμα κριθαρόσπορου 5% και το συνδυασμό κριθαρόσπορου και μαγιάς σε δόση 5%, όπου αυξήθηκε. Αντίθετα, η συγκέντρωση NH₄-N αυξήθηκε σε όλες τις μεταχειρίσεις σε συνολική δόση 5% και μαγιάς 2%, σε σύγκριση με τον μάρτυρα, χωρίς ανόργανη λίπανση, ενώ παρέμεινε ανεπηρέαστη στις υπόλοιπες.

Οι Prommer et al. (2014) παρατήρησαν ότι τα αμμωνιακά ήταν χαμηλότερα σε σύγκριση με τα νιτρικά, ο οργανικός C του εδάφους αυξήθηκε με την εφαρμογή του βιοεξανθρακώματος, παρόμοια αποτελέσματα με των μεταχειρίσεων με ή χωρίς ανόργανη λίπανση στο δικό μας πείραμα. Ωστόσο, στην ίδια μελέτη, οι συγκεντρώσεις νιτρικών στο ασβεστούχο έδαφος που εφαρμόστηκε βιοεξανθράκωμα σε συνδυασμό με NPK λίπανση ήταν σημαντικά χαμηλότερες σε σύγκριση με αυτά που δεν εφαρμόστηκε βιοεξανθράκωμα, όπως και στις δικές μας μεταχειρίσεις που δέχτηκαν ανόργανη λίπανση. Όσον αφορά στο NH₄-N, οι Nguyen et al. (2017) διαπίστωσαν ότι η προσθήκη ουρίας, λίπανση με NH₄⁻, λίπανσης NH₄NO₃ με βιοεξανθρακώματα μείωσαν το NH₄-N στα εδάφη, όπως στις μεταχειρίσεις που δέχτηκαν ανόργανη λίπανση. Από την άλλη, όταν το βιοεξανθράκωμα συνδυάστηκε με NH₄-N λίπανση τα αμμωνιακά και τα νιτρικά μειώθηκαν σε σχέση με την εφαρμογή μόνο του βιοεξανθρακώματος (Nguyen et al., 2017). Πιθανόν, λοιπόν, οι αυξημένες συγκεντρώσεις νιτρικών και αμμωνιακών στις μεταχειρίσεις που δε δέχτηκαν ανόργανη λίπανση να οφείλονται στην υψηλή συγκέντρωση σε αμμωνιακά και νιτρικά του βιοεξανθρακώματος.

Το pH μειώθηκε ή δεν επηρεάστηκε σε όλες τις μεταχειρίσεις, σε σύγκριση με τον μάρτυρα, με ή χωρίς ανόργανη λίπανση. Οι Ahmed and Schoenau (2015) δεν βρήκαν αύξηση του pH από την εφαρμογή βιοεξανθρακώματος σε δύο πηλώδη έδαφη με pH 8 και 6.5, ενώ οι Marks et al. (2014) βρήκαν μείωση του pH σε ένα

ασβεστούχο έδαφος. Οι Lentz and Ippolito (2012) πρόσθεσαν βιοεξανθράκωμα από σκληρό ξύλο με αλκαλικό pH σε ένα ασβεστούχο έδαφος και βρήκαν ότι το pH του εδάφους δεν επηρεάστηκε. Οι Ahmed and Schoenau (2015) απέδωσαν τη μη αύξηση του pH από την εφαρμογή βιοεξανθρακώματος στα πηλώδη έδαφη στο γεγονός ότι τα έδαφη είχαν υψηλή ρυθμιστική ικανότητα λόγω του υψηλού ποσοστού της αργίλου και της οργανικής ουσίας. Αυτή η εξήγηση μπορεί να είναι πιθανή και για το δικό μας πείραμα σε συνδυασμό με το χαμηλό pH των βιοεξανθρακωμάτων σε σχέση με το pH του εδάφους. Το ανταλλάξιμο K μειώθηκε ή δεν επηρεάστηκε σημαντικά σε όλες τις μεταχειρίσεις, σε σχέση με τον μάρτυρα, με ή χωρίς ανόργανη λίπανση, εκτός από το βιοεξανθράκωμα μαγιάς 2 και 5% με ανόργανη λίπανση, όπου αυξήθηκε. Ο διαθέσιμος P ενισχύθηκε σημαντικά σε όλες τις μεταχειρίσεις, σε σύγκριση με τον μάρτυρα, με ή χωρίς ανόργανη λίπανση. Οι πιθανοί μηχανισμοί ενίσχυσης της διαθεσιμότητας του P στα έδαφη από την εφαρμογή του βιοεξανθρακώματος είναι η άμεση απελευθέρωση P (Glaser et al., 2002; Lehmann et al., 2003) από το βιοεξανθράκωμα, η συγκράτηση Fe, Ca, and Al στο έδαφος μέσω του βιοεξανθρακώματος (Xu et al., 2013), οι διακυμάνσεις του pH στο έδαφος έπειτα από την εφαρμογή του βιοεξανθρακώματος (Xu et al., 2013; Xu et al., 2014). Επίσης, το βιοεξανθράκωμα μπορεί να ενισχύσει την κινητικότητα του P μέσω της ενεργοποίησης μικροοργανισμών διαλυτοποίησης και ανοργανοποίησης του P, όπου σημαντικός παράγοντας είναι το είδος του εδάφους (Deb et al., 2016). Το ανταλλάξιμο Ca μειώθηκε σημαντικά σε όλες τις μεταχειρίσεις με ή χωρίς λίπανση. Το ανταλλάξιμο Mg μειώθηκε σε όλες τις μεταχειρίσεις με ανόργανη λίπανση, ενώ δεν επηρεάστηκε σημαντικά σε όλες τις μεταχειρίσεις χωρίς ανόργανη λίπανση, εκτός από το βιοεξανθράκωμα κριθαρόσπορου 5%. Ο διαθέσιμος στα φυτά Fe δεν επηρεάστηκε ή μειώθηκε σημαντικά με την προσθήκη όλων των βιοεξανθρακωμάτων με ανόργανη λίπανση, εκτός το βιοεξανθράκωμα μαγιάς 2%, στο οποίο αυξήθηκε. Ο διαθέσιμος στα φυτά Fe δεν επηρεάστηκε σημαντικά ή μειώθηκε με την προσθήκη όλων των βιοεξανθρακωμάτων χωρίς ανόργανη λίπανση. Ο διαθέσιμος στα φυτά Mn δεν επηρεάστηκε ή μειώθηκε σημαντικά με την εφαρμογή όλων των βιοεξανθρακωμάτων, εκτός από το βιοεξανθράκωμα κριθαρόσπορου 2%, το οποίο αυξήθηκε με ανόργανη λίπανση, ενώ χωρίς ανόργανη λίπανση μειώθηκε με την εφαρμογή όλων των βιοεξανθρακωμάτων. Ο διαθέσιμος στα φυτά Zn μειώθηκε ή δεν επηρεάστηκε με την προσθήκη όλων των βιοεξανθρακωμάτων με ή χωρίς ανόργανη λίπανση. Inal et al. (2015) παρατήρησαν αύξηση στις συγκεντρώσεις P, K, Ca, Mg, Zn, και Mn στο έδαφος, αλλά μείωση στη συγκέντρωση του Fe, έπειτα από την προσθήκη βιοεξανθρακώματος από κοπριά πουλερικών σε δόση 20 g kg⁻¹ σε ένα ασβεστούχο έδαφος, όπου καλλιεργήθηκε καλαμπόκι. Οι Lentz and Ippolito (2012) δε βρήκαν αύξηση στις συγκεντρώσεις του P και των ανταλλάξιμων κατιόντων εκτός από το Mn, το οποίο αυξήθηκε 1.5 φορές σε σύγκριση με το μάρτυρα, έπειτα από την εφαρμογή βιοεξανθρακώματος από σκληρό ξύλο σε ένα ασβεστούχο έδαφος, σε καλλιέργεια καλαμποκιού.

Πίνακας 5-4. Επίδραση βιοεξανθρακώματος στις ιδιότητες του εδάφους pH, EC, TOC, TN, NH₄-N, NO₃-N, Olsen-P, ανταλλάξιμο K, Ca, Mg και DTPA -Fe, Mn, Zn στο L έδαφος όπου καλλιεργήθηκε το *Zea Mays* L. έπειτα από 30 ημέρες μετά την έκπτυξη των σποροφύτων (μέσος όρος±τυπική απόκλιση, n=3).

Μεταχειρίσεις	pH	EC	TOC	TN	NH ₄ -N	NO ₃ -N	P-Olsen	Exch. K	Exch. Ca	Exch. Mg	DTPA Fe	DTPA Mn	DTPA Zn
		dS m ⁻¹	g kg ⁻¹								mg kg ⁻¹		
Μάρτυρας Λ	7.93±0.01 d	0.56±0.00 ab	24.00±1.41 a	2.16±0.13 a	0.010±0.001 ab	0.018±0.001 b	0.02±0.00 a	0.10±0.00 c	1.55±0.02 e	0.07±0.00 d	2.89±0.14 d	5.03±0.29 d	0.47±0.01c
BC-M-2% Λ	7.92±0.03 cd	0.54±0.03 a	30.28±1.50 b	3.13±0.20 b	0.007±0.001 a	0.016±0.001 ab	0.07±0.00 b	0.18±0.01 d	1.34±0.05 d	0.06±0.00 c	3.49±0.07 e	3.69±0.17 b	0.41±0.01 b
BC-M-5% Λ	7.86±0.02 bc	0.62±0.02 b	43.27±3.02 d	4.76±0.38 d	0.010±0.000 b	0.014±0.001 a	0.14±0.02 c	0.25±0.01 e	1.00±0.00 c	0.05±0.00 b	1.91±0.26 bc	4.24±0.17 bc	0.36±0.01 a
BC-ΣΚ-2% Λ	7.89±0.02 bcd	0.53±0.02 a	36.59±1.17 c	3.03±0.22 b	0.009±0.001 ab	0.026±0.001 c	0.06±0.01 b	0.05±0.00 ab	1.00±0.05 c	0.05±0.00 bc	2.93±0.25 d	5.99±0.21 e	0.47±0.01c
BC-ΣΚ-5% Λ	7.84±0.04 ab	0.57±0.03 ab	55.88±0.87 e	4.03±0.31 c	0.012±0.002 c	0.016±0.001 ab	0.13±0.00 c	0.04±0.00 a	0.88±0.02 b	0.05±0.00 bc	1.32±0.06 a	4.50±0.05 cd	0.49±0.01 c
BC-ΣΚ+M-1%+1% Λ	7.87±0.04 bcd	0.54±0.02 a	33.25±1.00 bc	3.15±0.13 b	0.009±0.000 ab	0.015±0.001 ab	0.07±0.01 b	0.06±0.00 b	0.79±0.02 ab	0.04±0.00 a	2.22±0.25 c	2.49±0.18 a	0.41±0.02 b
BC-ΣΚ+M-2.5%+2.5% Λ	7.78±0.03 a	0.58±0.03 ab	43.34±0.44 d	4.39±0.22 cd	0.014±0.000 c	0.015±0.002 ab	0.14±0.01 c	0.09±0.00 c	0.73±0.02 a	0.04±0.00 a	1.52±0.22 ab	4.68±0.47 cd	0.33±0.01a
Μεταχειρίσεις	pH	EC	TOC	TN	NH ₄ -N	NO ₃ -N	P-Olsen	Exch. K	Exch. Ca	Exch. Mg	DTPA Fe	DTPA Mn	DTPA Zn
		dS m ⁻¹	g kg ⁻¹								mg kg ⁻¹		
Μάρτυρας ΧΛ	8.12±0.06 d	0.62±0.04 a	24.20±0.34 a	2.36±0.08 a	0.005±0.000 a	0.016±0.000 a	0.02±0.00 a	0.05±0.00 e	0.73±0.02 e	0.03±0.00 a	2.58±0.02 e	4.43±0.65c	0.35±0.05 c
BC-M-2% ΧΛ	8.07±0.11 cd	0.69±0.03 a	30.79±2.12 b	3.36±0.16 b	0.008±0.000 bcd	0.018±0.001 ab	0.07±0.00 b	0.04±0.00 d	0.66±0.01 d	0.03±000 a	1.76±0.04 d	4.35±0.55c	0.29±0.01b
BC-M-5% ΧΛ	8.03±0.03 bcd	0.79±0.02 b	49.15±0.90 de	4.26±0.04 c	0.009±0.001 cde	0.020±0.000 b	0.14±0.02 c	0.03±0.00 d	0.60±0.00 bc	0.03±0.00 a	1.64±0.22 cd	3.04±0.12b	0.26±0.01 ab
BC-ΣΚ-2% ΧΛ	7.95±0.03 abc	0.61±0.04 a	38.38±2.59 c	3.13±0.07 b	0.007±0.001 abc	0.021±0.001 b	0.06±0.01 b	0.03±0.00 c	0.63±0.01 cd	0.03±000 a	1.45±0.05c	3.22±0.68 b	0.36±0.01c
BC-ΣΚ-5% ΧΛ	7.84±0.05 a	0.67±0.03 a	52.79±1.77 e	4.14±0.10 c	0.010±0.001 e	0.018±0.001 ab	0.12±0.01 c	0.02±0.00 b	0.60±0.00 bc	0.04±0.00 b	1.11±0.01b	3.74±0.03 b	0.36±0.02 c
BC-ΣΚ+M-1%+1% ΧΛ	7.94±0.04 abc	0.67±0.01 a	35.27±2.43 bc	3.35±0.22 b	0.006±0.001 ab	0.021±0.002 b	0.07±0.01 b	0.02±0.00 b	0.58±0.01 ab	0.03±0.00 a	1.01±0.04b	2.09±0.05a	0.27±0.01ab
BC-ΣΚ+M-2.5%+2.5% ΧΛ	7.89±0.04 ab	0.68±0.01 a	45.53±1.78 d	4.26±0.19 c	0.009±0.000 de	0.020±0.000 b	0.14±0.01 c	0.01±0.00 a	0.56±0.00 a	0.03±0.00 a	0.68±0.02a	1.59±0.31 a	0.25±0.01a

Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε $p<0.05$. Το κριτήριο εφαρμόστηκε ξεχωριστά σε κάθε πειραματικό σετ (Λ και ΧΛ).

5.4 Συμπεράσματα

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα μας η προσθήκη βιοεξανθρακώματων, είτε μεμονωμένα είτε συνδυαστικά σε δόση 5% κ.β επηρέασαν θετικά το ξηρό βάρος του *Zea Mays* L. τόσο στο υπέργειο όσο και στο υπόγειο μέρος του φυτού. Η αζωτούχα λίπανση δεν παρουσίασε σημαντική επίδραση στο ξηρό βάρος των φυτικών ιστών. Η προσθήκη όλων των βιοεξανθρακώματων επηρέασαν θετικά τις συγκεντρώσεις P στους υπέργειους και υπόγειους φυτικούς ιστούς, αλλά μεγαλύτερη επίδραση είχαν τα βιοεξανθρακώματα σε δόση 5%, με ή χωρίς λίπανση. Ωστόσο, το βιοεξανθράκωμα μαγιάς στη μεγαλύτερη δόση εφαρμογής 5% επέφερε τη μεγαλύτερη αύξηση στη συγκέντρωση του P στους υπέργειους φυτικούς ιστούς χωρίς λίπανση.

Η συγκέντρωση K στους υπέργειους φυτικούς ιστούς επηρεάστηκε θετικά κυρίως από τα βιοεξανθρακώματα μαγιάς. Αυτό πιθανόν να συμβαίνει λόγω της μεγαλύτερης συγκέντρωσης P και K στο βιοεξανθράκωμα μαγιάς σε σύγκριση με το βιοεξανθράκωμα κριθαρόσπορου. Επίσης, η αυξημένη υγρασία, η ανταγωνιστικότητα του K με το Ca και το Mg, έπαιξαν σπουδαίο ρόλο στην αύξηση της συγκέντρωσης K στους φυτικούς ιστούς. Αντίθετα, η μείωση ή μη επιρροή στη συγκέντρωση K στους φυτικούς ιστούς στις μεταχειρίσεις που δέχτηκαν λίπανση πιθανόν να οφείλεται στις ανταγωνιστικές σχέσεις του K με το N.

Οι συγκεντρώσεις Ca και Mg αυξήθηκαν από το βιοεξανθράκωμα κριθαρόσπορου, αλλά σε διαφορετικές δόσεις και σε διαφορετικό μέρος του φυτού για το κάθε μακροθρεπτικό στοιχείο. Επίσης, η αύξηση στις συγκεντρώσεις του Ca και του Mg στους φυτικούς ιστούς από την προσθήκη βιοεξανθρακώματος κριθαρόσπορου μόνο στις μεταχειρίσεις που δε δέχτηκαν λίπανση, πιθανόν να οφείλεται στη δέσμευση των συγκεκριμένων θρεπτικών στοιχείων στο έδαφος. Ο ολικός οργανικός C και το ολικό N του εδάφους αυξήθηκαν με ή χωρίς λίπανση υποδηλώνοντας αυξημένη δραστηριότητα μικροοργανισμών, αλλά και συσσώρευση N με την προσθήκη των βιοεξανθρακωμάτων.

Εν κατακλείδι, η προσθήκη βιοεξανθρακώματος από οργανικά παραπροϊόντα ζυθοποιίας έχει θετικά αποτελέσματα στην απόδοση του φυτού, είτε προστεθεί λίπανση είτε όχι. Ωστόσο, οι συγκεντρώσεις των μακροθρεπτικών και μικροθρεπτικών στοιχείων αυξήθηκαν ή μειώθηκαν στους φυτικούς ιστούς ανάλογα με το είδος του βιοεξανθρακώματος, τη δόση προσθήκης και την προσθήκη αζωτούχας λίπανσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.

Συμπεράσματα και Προοπτικές

6.1 Γενικά συμπεράσματα

Από τη μελέτη προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- 1) Η αύξηση του ξηρού βάρους του υπέργειου τμήματος του φυτού *Lolium perenne* L. επηρεάστηκε από το συνδυασμό βιοεξανθρακωμάτων με ή χωρίς κόμποστ και ανόργανης λίπανσης καθώς και από το έδαφος.
- 2) Η αύξηση του ξηρού βάρους του υπέργειου και υπόγειου μέρους του φυτού *Zea Mays* L. επηρεάστηκε από το είδος του βιοεξανθρακώματος (φλοιοί ρυζιού, στέμφυλα) με ή χωρίς κόμποστ και από το έδαφος.
- 3) Η επίδραση των εδαφοβελτιωτικών (φλοιοί ρυζιού, στέμφυλα, κόμποστ) στο ξηρό βάρος του φυτού *Zea Mays* L. παρατηρήθηκε και στα δύο εδάφη, αλλά ήταν μεγαλύτερη στο πηλώδες σε σχέση με το αμμοπηλώδες έδαφος.
- 4) Το ξηρό βάρος του υπέργειου και υπόγειου μέρους του φυτού *Zea Mays* L. επηρεάστηκε θετικά από την προσθήκη όλων των βιοεξανθρακωμάτων από παραπροϊόντα ζυθοποιίας και κυρίως στη μεγαλύτερη δόση 5% είτε από κάθε είδος βιοεξανθρακώματος είτε από το συνδυασμό των δύο.
- 5) Η ανόργανη αζωτούχα λίπανση δεν παρουσίασε μεγάλη επίδραση στο ξηρό βάρος του φυτού *Zea Mays* L. στο πείραμα με τα παραπροϊόντα ζυθοποιίας.
- 6) Το βιοεξανθράκωμα στέμφυλων με ή χωρίς κόμποστ αύξησαν τις συγκεντρώσεις P και K των υπέργειων φυτικών ιστών *Lolium perenne* L. και *Zea Mays* L. αλλά σε διαφορετικό έδαφος για το κάθε θρεπτικό στοιχείο.
- 7) Η προσθήκη όλων των βιοεξανθρακωμάτων από τα παραπροϊόντα ζυθοποιίας επηρέασε θετικά τη συγκέντρωση του P στους υπέργειους και υπόγειους φυτικούς ιστούς, αλλά μεγαλύτερη επίδραση είχαν τα βιοεξανθρακώματα σε δόση 5%, με ή χωρίς ανόργανη αζωτούχα λίπανση.
- 8) Το βιοεξανθράκωμα μαγιάς στη μεγαλύτερη δόση εφαρμογής 5% επέφερε τη μεγαλύτερη αύξηση στη συγκέντρωση του P στους υπέργειους φυτικούς ιστούς χωρίς ανόργανη αζωτούχα λίπανση.
- 9) Η προσθήκη των βιοεξανθρακωμάτων μαγιάς κυρίως αύξησαν σημαντικά τη συγκεντρώση K των υπέργειων φυτικών ιστών χωρίς την προσθήκη ανόργανης αζωτούχας λίπανσης.
- 10) Ο ολικός οργανικός C αυξήθηκε και στα δύο εδάφη και στα δύο πειράματα με το φυτό *Zea Mays* L.
- 11) Το ολικό N αυξήθηκε μόνο στο πηλώδες έδαφος και στα δύο πειράματα με το φυτό *Zea Mays* L.

6.2 Προοπτικές μελλοντικής έρευνας

Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης έρευνας και τις τάσεις της διεθνούς έρευνας όσον αφορά στις αγρονομικές εφαρμογές του βιοεξανθρακώματος θα μπορούσαν να προταθούν τα εξής:

α) Παραγωγή και χαρακτηρισμός βιοεξανθρακωμάτων από άλλα οργανικά αγροτικά υπολείμματα ή παραπροϊόντα, για τα οποία δεν υπάρχει εναλλακτικός τρόπος διαχείρισής τους.

β) Συν-κομποστοποίηση βιοεξανθρακώματος με άλλα οργανικά υλικά. Το κόμποστ και το βιοεξανθράκωμα είναι εδαφοβελτιωτικά πλούσια σε οργανικό άνθρακα και θρεπτικά στοιχεία που θα μπορούσαν να συνδυαστούν με απώτερο στόχο τη δημιουργία ενός ενισχυμένου εδαφοβελτιωτικού.

γ) Παραγωγή βιοεξανθρακωμάτων χρησιμοποιώντας ως πρώτη ύλη ένα μείγμα οργανικών αγροτικών υπολειμμάτων ή παραπροϊόντων και εφαρμογή τους σε εδάφη διαφορετικής κοκκομετρικής σύστασης, αλλά και γονιμότητας. Δεδομένου ότι τα χαρακτηριστικά του βιοεξανθρακώματος σχετίζονται άμεσα με τα χαρακτηριστικά του αρχικού υλικού, η δημιουργία βιοεξανθρακωμάτων που να καλύπτουν τις ανάγκες συγκεκριμένων εδαφών και καλλιεργειών θα μπορούσαν να αποτελέσουν σημαντικά εδαφοβελτιωτικά.

δ) Εφαρμογή βιοεξανθρακώματος σε συνδυασμό με ανόργανη ή οργανική λίπανση σε πειράματα αγρού. Οι διαφορετικές περιβαλλοντικές και εδαφολογικές συνθήκες που επικρατούν στον αγρό επηρεάζουν τις αποδόσεις των φυτών και πιθανόν η επίδραση από την προσθήκη βιοεξανθρακώματος να μεταβληθεί σύμφωνα με αυτές τις συνθήκες.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Agegnehu, G., Bird, M., Nelson, P., Bass, A. (2015). The ameliorating effects of biochar and compost on soil quality and plant growth on a Ferralsol. *Soil Research* 53(1), 1-12.
- Agegnehu, G., Nelson, P.N., Bird, M.I. (2016a). The effects of biochar, compost and their mixture and nitrogen fertilizer on yield and nitrogen use efficiency of barley grown on a Nitisol in the highlands of Ethiopia. *Science of the Total Environment* 569-570, 869-879.
- Agegnehu, G., Nelson, P.N., Bird, M.I. (2016b). Crop yield, plant nutrient uptake and soil physicochemical properties under organic soil amendments and nitrogen fertilization on Nitisols. *Soil & Tillage Research* 160, 1-13.
- Agegnehu, G., Srivastava, A.K., Bird, M.I. (2017). The role of biochar and biochar-compost in improving soil quality and crop performance: A review. *Applied Soil Ecology* 119, 156-170.
- Ahmed, H.P. and Schoenau, J.J. (2015). Effects of biochar on yield, nutrient recovery, and soil properties in a canola (*Brassica napus* L.)-wheat (*Triticum aestivum* L.) rotation grown under controlled environmental conditions. *Bioenergy Research* 8(3), 1183-1196.
- Albuquerque, J.A., Calero, J.M., Barrón, V., Torrent, J., del Campillo, M.C., Gallardo, A., Villar, R. (2014). Effects of biochars produced from different feedstocks on soil properties and sunflower growth. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 177(1), 16-25.
- Albuquerque, J.A., Salazar, P., Barron, V., Torrent, J., Del Campillo, M.D.C., Gallardo, A., Villar, R. (2013). Enhanced wheat yield by biochar addition under different mineral fertilization levels. *Agronomy for Sustainable Development* 33(3), 475-484.
- Aller, M.F. (2016). Biochar properties: Transport, fate, and impact. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 46(14-15), 1183-1296.
- 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(4), 379-390.
- Angst, T.E. and Sohi, S.P. (2013). Establishing release dynamics for plant nutrients from biochar. *GCB Bioenergy* 5(2), 221-226.
- ASTM D1762-84. (2007). Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal, ASTM, USA.
- Atkinson, C.J., Fitzgerald, J.D., Hipps, N.A. (2010). Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: A review. *Plant and Soil* 337(1), 1-18.
- Balogun, A.O., Sotoudehniakarani, F., McDonald, A.G. (2017). Thermo-kinetic, spectroscopic study of brewer's spent grains and characterisation of their pyrolysis products. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 127, 8-16.

- Baronti, S., Alberti, G., Vedove, G.D., Gennaro, F.D., Fellet, G., Genesio, L., Miglietta, F., Peressotti, A., Vaccari, F.P. (2010). The biochar option to improve plant yields: first results from some field and pot experiments in Italy. *Italian Journal of Agronomy* 5(1), 3-11.
- Bass, A.M., Bird, M.I., Kay, G., Muirhead, B. (2016). Soil properties, greenhouse gas emissions and crop yield under compost, biochar and co-composted biochar in two tropical agronomic systems. *Science of the Total Environment* 550, 459-470.
- Beesley, L., Marmiroli, M., Pagano, L., Pighi, V., Fellet, G., Fresno, T., Vamerali, T., Bandiera, M., Marmiroli, N. (2013). Biochar addition to an arsenic contaminated soil increases arsenic concentrations in the pore water but reduces uptake to tomato plants (*Solanum lycopersicum* L.). *Science of the Total Environment* 454-455, 598-603.
- Bian, R., Ma, B., Zhu, X., Wang, W., Li, L., Joseph, S., Liu, X., Pan, G. (2016). Pyrolysis of crop residues in a mobile bench-scale pyrolyser: Product characterization and environmental performance. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 119, 52-59 .
- Biederman, L.A. and Harpole, W.S. (2013). Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. *GCB Bioenergy*. 5(2), 202-214.
- Black, C.A., Evans, D.D., White, J.L., Ensminger, L.E., Clark, F.E. (1965). *Methods of soil analysis: part 2 - chemical and microbiological properties*, second ed. American Society of Agronomy, Madison (WI).
- Blackwell, P., Joseph, S., Munroe, P., Anawar, H.M., Storer, P., Gilkes, R.J., Solaiman, Z. M. (2015). Influences of biochar and biochar-mineral complex on mycorrhizal colonisation and nutrition of wheat and sorghum. *Pedosphere* 25(5), 686-695.
- Brassard, P., Godbout, S., Raghavan, V. (2016). Soil biochar amendment as a climate change mitigation tool: Key parameters and mechanisms involved. *Journal of Environmental Management* 181, 484-497.
- Brewer, C.E., Schmidt-Rohr, K., Satrio, J.A., Brown, R.C. (2009). Characterization of biochar from fast pyrolysis and gasification systems. *Environmental Progress & Sustainable Energy* 28(3), 386-396.
- 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(3), 321-333.
- Bruun, E. W., Cross, A., Hammond, J., Nelissen, V., Rasse, D. P., Hauggaard-Nielsen, H. (2016). Biochar carbon stability and effect on greenhouse gas emissions. In: Schackley, S., Ruysschaert, G., Zwart, K., & Glaser, B. (Eds.). *Biochar in European Soils and Agriculture: Science and Practice*. Routledge, London, pp. 165-183.

- Bruun, E.W., Hauggaard-Nielsen, H., Ibrahim, N., Egsgaard, H., Ambus, P., Jensen, P.A., Dam-Johansen, K. (2011). Influence of fast pyrolysis temperature on biochar labile fraction and short-term carbon loss in a loamy soil. *Biomass & Bioenergy* 35(3), 1182-1189.
- Bustamante, M.A., Moral, R., Paredes, C., Pérez-Espinosa, A., Moreno-Caselles, J., Pérez-Murcia, M.D. (2008). Agrochemical characterisation of the solid by-products and residues from the winery and distillery industry. *Waste Management* 28(2), 372-380.
- Bustamante, M.A., Pérez-Murcia, M.D., Paredes, C., Moral, R., Pérez Espinosa, A., Moreno-Caselles, J. (2007). Short-term carbon and nitrogen mineralisation in soil amended with winery and distillery organic wastes. *Bioresource Technology* 98(17), 3269-3277.
- Butnan, S., Deenik, J.L., Toomsan, B., Antal, M.J., Vityakon, P. (2015). Biochar characteristics and application rates affecting corn growth and properties of soils contrasting in texture and mineralogy. *Geoderma* 237, 105-116.
- Camps-Arbestain, M., Saggar, S., Leifeld, J. (2014). Environmental benefits and risks of biochar application to soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 191, 1-4.
- 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. and Harris, W. (2010). Properties of dairy-manure-derived biochar pertinent to its potential use in remediation. *Bioresource Technology* 101(14), 5222-5228.
- Cao, X., Zhong, L., Peng, X., Sun, S., Li, S., Liu, S., Sun, R. (2014). Comparative study of the pyrolysis of lignocellulose and its major components: characterization and overall distribution of their biochars and volatiles. *Bioresource Technology* 155, 21-27.
- Cayuela, M.L., van Zwieten, L., Singh, B.P., Jeffery, S., Roig, A., Sánchez-Monedero, M.A. (2013). Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: A review and meta-analysis. *Agriculture Ecosystems & Environment* 191, 5-16.
- Chan, K., 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(8), 629-634.
- Chan, K.Y., van Zwieten, L., Meszaros, I., Downie, A., Joseph, S. (2008). Using poultry litter biochars as soil amendments. *Australian Journal of Soil Research* 46(5), 437-444.
- Chapman, H.D. and Pratt, P.F. (1961). *Methods of analysis for soils, plants and water*, University of California, Division of Agricultural Sciences, Riverside, (CA.).
- Cheng, C.-H., Lehmann, J., Thies, J.E., Burton, S.D., Engelhard, M.H. (2006). Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes. *Organic Geochemistry* 37(11), 1477-1488.
- Christoph, G.T., Wenceslau, L., Johannes, N., Thomas, M., de Vasconcelos, J.L., Winfried, E.H.B., Zech, W. (2007). Long-term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on

crop production and fertility on a highly weathered central Amazonian upland soil. *Plant and Soil* 291(1-2), 275-290.

Clough, T.J, Condrón, L.M, Kammann, C., Müller C. (2013). A review of biochar and soil nitrogen dynamics. *Agronomy* 3(2), 275-293.

Cornelissen, G., Martinsen, V., Shitumbanuma, V., Alling, V., Breedveld, G.D., Rutherford, D.W., Sparrevik, M., Hale, S.E., Obia, A., Mulder, J. (2013). Biochar effect on maize yield and soil Characteristics in five conservation farming sites in Zambia. *Agronomy* 3(2), 256-274.

Dangzhen, L., Minghou, X., Xiaowei, L., Zhonghua, Z., Zhiyuan, L., and Hong, Y. (2010). Effect of cellulose, lignin, alkali and alkaline earth metallic species on biomass pyrolysis and gasification. *Fuel Processing Technology* 91(8), 903-909.

De la Rosa, J.M., Paneque, M., Miller, A.Z., Knicker, H. (2014). Relating physical and chemical properties of four different biochars and their application rate to biomass production of *Lolium perenne* on a Calcic Cambisol during a pot experiment of 79 days. *Science of The Total Environment* 499, 175-184.

Deb, D., Kloft, M., Lässig, J., Walsh, S. (2016). Variable effects of biochar and P solubilizing microbes on crop productivity in different soil conditions. *Agroecology and Sustainable Food Systems* 40(2), 145-168.

Deenik, J.L., McClellan, T., Uehara, G., Antal, Jr., M.J., Sonia, C. (2010). Charcoal volatile matter content influences plant growth and soil nitrogen transformation. *Soil Science Society of America Journal* 74(4), 1259-1270.

DeLuca, T.H., MacKenzie, M.D., Gundale, M.J. (2012). Biochar effects on soil nutrient transformations. In: Lehmann, J., Joseph, S. (Eds.). *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earthscan, London, pp. 251-270.

Doan, T.T., Henry-des-Tureaux, T., Rumpel, C., Janeau, J-L, Jouquet, P. (2015). Impact of compost, vermicompost and biochar on soil fertility, maize yield and soil erosion in Northern Vietnam: A three year mesocosm experiment. *Science of the Total Environment* 514, 147-154.

dos Santos Mathias, T.R., de Mello, P.P.M., Servulo, E.F.C. (2014). Solid Wastes in brewing process: A review. *Journal of brewing and distilling* 5(1), 1-9.

Downie, A., Crosky, A., Munroe, P. (2009). Physical properties of biochar. In: Lehmann, J., Joseph, S. (Eds.). *Biochar for environmental management: Science and Technology*. Earthscan, London, pp. 13-32.

Driver, J., Lijmbach, D., Steen, I. (1999). Why recover phosphorus for recycling, and how? *Environmental Technology* 20(7), 651-662.

Enders, A., Hanley, K., Whitman, T., Joseph, S., and Lehmann, J. (2012). Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance. *Bioresource Technology* 114, 644-653.

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

FAOSTAT (<http://www.fao.org/faostat/en>) (accessed on 2017)

Fischer, D. and Glaser, B. (2012). Synergisms between compost and biochar for sustainable soil amelioration. In: Sunil K, Bharti A (Eds). Management of organic waste. InTech, Rijeka, Croatia (HR), pp. 167-198.

Fox, A., Kwapinski, W., Griffiths, B.S., Schmalenberger, A. (2014). The role of sulphur- and phosphorus mobilizing bacteria in biochar-induced growth promotion of *Lolium perenne*. FEMS Microbiology Ecology 90(1), 78-91.

Gaskin, J., Steiner, C., Harris, K., Das, K., and Bibens, B. (2008). Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use. Transactions of the ASABE 51(6), 2061-2069.

Gaskin, J.W., Speir, R.A., Harris, K., Das, K.C., Lee, R.D., Morris, L.A., Fisher, D.S. (2010). Effect of peanut hull and pine chip biochar on soil nutrients, corn nutrient status, and yield. Agronomy Journal 102(2), 623-633.

Genesio, L., Miglietta, F., Baronti, S., Vaccari, F.P. (2015). Biochar increases vineyard productivity without affecting grape quality: Results from a four years field experiment in Tuscany. Agriculture Ecosystems & Environment 201, 20-25.

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

Glaser, B., Wiedner, K., Seelig, S., Schmidt, H.-P., Gerber, H. (2015). Biochar organic fertilizers from natural resources as substitute for mineral fertilizers. Agronomy for Sustainable Development 35(2), 667-678.

Gregory, S.J., Anderson, C.W.N., Camps-Arbestain, M., McManus, M.T. (2014). Response of plant and soil microbes to biochar amendment of an arsenic-contaminated soil. Agriculture, Ecosystems & Environment 191, 133-141.

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.

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

- Hale, S.E., Alling, V., Martinsen, V., Mulder, J., Breedveld, G.D., Cornellisen, G. (2013). The sorption and desorption of phosphate-P, ammonium-N and nitrate-N in cacao shell and corn cob biochars. *Chemosphere* 91(11), 1612-1619.
- Hinsinger, P., Plassard, C., Tang, C., Jaillard, B. (2003). Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and their responses to environmental constraints: A review. *Plant and Soil*. 248(1-2), 43-59.
- Hussain, M., Farooq, M., Nawaz, A., Al-Sadi, A.M., Solaiman, Z.M., Alghamdi, S.S., Ammara, U., Ok, Y.S., Siddique, K.H.M. (2017). Biochar for crop production: Potential benefits and risks. *Journal of Soils and Sediments* 17(3), 685-716.
- Inal, A., Gunes, A., Sahin, O., Taskin, M.B., Kaya, E.C. (2015). Impacts of biochar and processed poultry manure, applied to a calcareous soil, on the growth of bean and maize. *Soil Use and Management* 31(1), 106-113.
- Ippolito, J.A., Stromberger, M.E., Lentz, R.D., Dungan, R.S. (2016). Hardwood biochar and manure co-application to a calcareous soil. *Chemosphere*. 142, 84-91.
- 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(1), 175-187.
- Jones, D.L., Rousk, J., Edwards-Jones, G., DeLuca, T.H., Murphy, D.V. (2012). Biochar-mediated changes in soil quality and plant growth in a three year field trial. *Soil Biology and Biochemistry* 45, 113-124.
- Kalra, Y.P. (1998). *Handbook of reference methods for plant analysis*, Boca Raton (FL), CRC Press.
- Kammann, C.I., Linsel, S., Gößling, J.W., Koyro, H.-W. (2011). Influence of biochar on drought tolerance of *Chenopodium quinoa* Willd and on soil-plant relations. *Plant and Soil*. 345(1), 195-210.
- Kammann, C., Ratering, S., Eckerhard, C., Muller, C. (2012). Biochar and hydrochar effects on greenhouse gas fluxes from soils. *Journal of Environmental Quality* 41(4), 1052-1066.
- Kammann, C.I., Schmidt, H.-P., Messerschmidt, N., Linsel, S., Steffens, D., Müller, C., Koyro, H.-W., Conte, P., Stephen, J. (2015). Plant growth improvement mediated by nitrate capture in co-composted biochar. *Scientific Reports* 5, 11080. doi:10.1038/srep11080.
- Kan, T., Strezov, V., Evans, T.J. (2016). Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 126-1140.
- 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.

- Kinney, T.J., Masiello, C.A., Dugan, B., Hockaday, W.C., Dean, M.R., Zygourakis, K., Barnes, R.T. (2012). Hydrologic properties of biochars produced at different temperatures. *Biomass & Bioenergy* 41, 34-43.
- Kloss, S., Zeheter, F., Dellantonio, A., Hamid, R., Otter, F., Liedtke, V., Schwanninger, M., Gerzabek, M.H., Soja, G. (2011). Characterization of slow pyrolysis biochars: Effects of feedstocks and pyrolysis temperature on biochar properties. *Journal of Environmental Quality*, 41(4), 990-1000.
- Kloss, S., Zeheter, F., Wimmer, B., Buecker, J., Rempt, F., Soja, G. (2014). Biochar application to temperate soils: Effects on soil fertility and crop growth under greenhouse conditions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 177(1), 3-15.
- Laghari, M., Mirjat, M.S., Hu, Z., Fazal, S., Xiao, B., Hu, M., Chen, Z., Guo, D. (2015). Effects of biochar application rate on sandy desert soil properties and sorghum growth. *Catena* 135, 313-320.
- Laird, D.A. (2008). The charcoal vision: a win-win-win scenario for simultaneously producing bioenergy, permanently sequestering carbon, while improving soil and water quality. *Agronomy Journal* 100(1), 178-181.
- Laird, D., Fleming, P., Wang, B., Horton, R., Karlen, D. (2010a). Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. *Geoderma* 158(3-4), 436-442.
- Laird, D.A., Fleming, P., Davis, D.D., Horton, R., Wang, B., Karlen, D.L. (2010b). Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. *Geoderma* 158(3-4), 443-449.
- 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 cornstovers for soil amendment. *Environmental Science & Technology* 44(20), 7970-7974.
- Lehmann, J., Pereira da Silva, J., Steiner, C., Nehls, T., Zech, W., Glaser, B. (2003). Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the central Amazon Basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant and Soil* 249(2), 343-357.
- Lehmann, J., Gaunt, J., Rondon, M. (2006). Biochar sequestration in terrestrial ecosystems: a review. *Mitigation and Adaptation Strategies of Global Change* 11(2), 403-427.
- Lehmann, J., Kuzyakov, Y., Pan, G., Ok, Y.S. (2015). Biochars and the plant-soil interface. *Plant and Soil* 395(1-2), 1-5.
- Lehmann, J., Rillig, M.C., Thies, J., Masiello, C.A., Hockaday, W.C., Crowley, D. (2011). Biochar effects on soil biota—A review. *Soil Biology and Biochemistry* 43(9), 1812-1836.

- Lehmann, J. and Rondon, M. (2006). Biochar soil management on highly wethered soils in the humid tropics. In: Uphoff, N. (Eds.), *Biological Approaches to Sustainable Soil Systems*. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Lentz, R.D. and Ippolito, J.A. (2012). Biochar and manure affect calcareous soil and corn silage nutrient concentrations and uptake. *Journal of Environmental Quality* 41(4),1033-1043.
- Liang, B., Lehmann, J., Solomon, D., Kinyangi, J., Grossman, J., O'Neill, B., Skjemstad, J.O., Thies, J., Luizao, F.J., Petersen, J., Neves, E.G. (2006). Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Science Society of America Journal* 70, 1719-1730.
- Lim, T.J., Spokas, K.A., Feyereisen, G., Novak, J.M. (2016). Predicting the impact of biochar additions on soil hydraulic properties. *Chemosphere*142, 136-144.
- Lin, X.W., Zie, Z.B., Zheng, J.Y., Liu, Q., Bei, Q.C., Zhu, J.G. (2015). Effects of biochar application on greenhouse gas emissions, carbon sequestration and crop growth in coastal saline soil. *European Journal of Soil Science* 66(2), 329-338.
- Lin, Y., Munroe, P., Joseph, S., Henderson, R., Ziolkowski, A. (2012). Water extractable organic carbon in untreated and chemical treated biochars. *Chemosphere* 87(2), 151-157.
- 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(1-2), 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. doi:10.1016/j.catena.2013.10.014
- Luo, Y., Durenkamp, M., Nobili, M.D., Lin, Q., Brookes, P.C. (2011). Short term soil priming effects and the mineralisation of biochar following its incorporation to soils of different pH. *Soil Biology and Biochemistry* 43(11), 2304-2314.
- Macias, F. and Camps-Arbestain, M. (2010). Soil carbon sequestration in a changing global environment. *Mitigation and Adaptation Strategies of Global Change* 15(6), 511-529.
- Maiti, S., Gallastegui, G., Suresh, G., Brar, S.K., LeBihan, Y., Drogui, P., Buelna, G., Ramirez, A.A., Verma, M., Soccol, C.R. (2017). Two-phase partitioning detoxification to improve bioButnanol production from brewery industry wastes. *Chemical Engineering Journal* 330, 1100-1108.
- Major, J., Lehmann, J., Rondon, M., Goodale, C. (2010a). Fate of soil-applied black carbon: Downward migration, leaching and soil respiration. *Global Change Biology* 16(4), 1366-1379.
- Major, J., Rondon, M., Molina, D., Riha, S.J., Lehmann, J. (2010b). Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant and Soil* 333(1), 117-128.

- Major, J., Rondon, M., Molina, D., Riha, S.J., Lehmann, J. (2012). Nutrient leaching in a colombian savanna oxisol amended with biochar. *Journal of Environmental Quality* 41(4), 1076-1086.
- Mandal, S., Thangarajan, R., Bolan, N.S., Sarkar, B., Khan, N., Ok, Y.S., Naidu, R. (2016). Biochar-induced concomitant decrease in ammonia volatilization and increase in nitrogen use efficiency by wheat. *Chemosphere* 142, 120-127.
- Manya, J.J. (2012). Pyrolysis for biochar purposes: A review to establish current knowledge gaps and research needs. *Environmental Science & Technology* 46(15), 7939-7954.
- 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(1-2), 87-105.
- Martínez, M., Miralles, N., Hidalgo, S., Fiol, N., Villaescusa, I., Poch, J. (2006). Removal of lead(II) and cadmium(II) from aqueous solutions using grape stalk wastes. *Journal of Hazardous Materials B* 133, 203-211.
- Meyer, S., Genesio, L., Vogel, I., Schmidt, H.-P., Soja, G., Someus, E., Shackley, S., Verheijen, F.G.A., Glaser, B. (2017). Biochar standardization and legislation harmonization. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 25(2), 175-191.
- 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(1), 26-36.
- Mukherjee, A., Zimmerman, A.R., Harris, W. (2011). Surface chemistry variations among a series of laboratory-produced biochars. *Geoderma* 163(3-4), 247-255.
- Mukherjee, A. and Zimmerman, A.R. (2013). Organic carbon and nutrient release from a range of laboratory-produced biochars and biochar-soil mixtures. *Geoderma* 193-194, 122-130.
- Mukherjee, A. and Lal, R. (2013). Biochar Impacts on Soil Physical Properties and Greenhouse Gas Emissions. *Agronomy* 3, 313-339.
- Murphy, J. and Riley, J.P. (1962). A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta* 27, 31-36.
- Naisse, C., Girardin, C., Davasse, B., Chabbi, A., Rumpel, C. (2015). Effect of biochar addition on C mineralisation and soil organic matter priming in two subsoil horizons. *Journal of Soils and Sediments*. 15(4), 825-832.
- Naziri, E., Nenadis, N., Mantzouridou, F.T., Tsimidou, M.Z. (2014). Valorization of the major agrifood industrial by-products and waste from Central Macedonia (Greece) for the recovery of compounds for food applications. *Food Research International* 65, 350-358.

- 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.
- Nelissen, V., Ruyschaert, G., Möller-Stover, D., Bodé, S., Cook, J., Ronsse, F., Shackley, S., Boeckx, P., Hauggaard-Nielsen, H. (2014). Short-term effect of feedstock and pyrolysis temperature on biochar characteristics, soil and crop response in temperate soils. *Agronomy* 4(1), 52-73.
- Nerantzis, E.T. and Tataridis, P. (2006). Integrated enology—Utilization of winery by-products into high added value products. *e-Journal of Science & Technology*, 1, 79-89.
- Nguyen, T.T.N., Xu, C-Y., Tahmasbian, I., Che, R., Xu, Z., Zhou, X., Wallace, H.M., Bai, S.H. (2017). Effects of biochar on soil available inorganic nitrogen: A review and meta-analysis. *Geoderma*. 288, 79-96.
- Nielsen, S., Minchin, T., Kimber, S., Van Zwieten, L., Gilbert, J., Munroe, P., Joseph, S., Thomas, T. (2014). Comparative analysis of the microbial communities in agricultural soil amended with enhanced biochars or traditional fertilizers. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 191, 73-82.
- Nigam, P.S. (2017). An overview: Recycling of solid barley waste generated as a by-product in distillery and brewery. *Waste management* 62, 255-261.
- Novak, J.M., Lima, I., Xing, B., Gaskin, J.W., Steiner, C., Das, K., Ahmedna, M., Rehrah, D., Watts, D. W., Busscher, W.J. (2009). Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand. *Annals of Environmental Science* 3, 195-206.
- Oguntunde, P.G., Abiodun, B.J., Ajayi, A.E., van de Giesen, N. (2008). Effects of charcoal production on soil physical properties in Ghana. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 171(4), 591-596.
- Olajire, A.A. (2012). The brewing industry and environmental challenges. *Journal of Cleaner Production*. doi:10.1016/j.jclepro.2012.03.003.
- Oram, N.J., van de Voorde, T.F.J., Ouwehand, G.-J., Bezemer, T.M., Mommer, L., Jeffery, S., Groenigen, J.W.V. (2014). Soil amendment with biochar increases the competitive ability of legumes via increased potassium availability. *Agriculture Ecosystems & Environment* 191, 92-98.
- Pala, M., Kantarli, I.C., Buyukisik, H.B., Yanik, J. (2014). Hydrothermal carbonization and torrefaction of grape pomace: A comparative evaluation. *Bioresource Technology* 161, 255-262.

- Paradelo, R., Moldes, A.B., Dominguez, J.M., Barral, M.T. (2009). Reduction of water repellence of hydrophobic plant substrates using biosurfactant produced from hydrolyzed grape marc. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 57(11), 4895-4899.
- Peng, X., Ye, L.L., Wang, C.H., Zhou, H., Sun, B. (2011). Temperature- and duration dependent rice straw-derived biochar: Characteristics and its effects on soil properties of an ultisol in southern China. *Soil & Tillage Research* 112(2), 159-166.
- Prommer, J., Wanek, W., Hofhansl, F., Trojan, D., Offre, P., Urich, T., Schleper, C., Sassmann, S., Kitzler, B., Soja, G., Hood-Nowotny, R.C. (2014). Biochar decelerates soil organic nitrogen cycling but stimulates soil nitrification in a temperate arable field trial. *PLoS ONE* 9, e86388.
- Putun, A.E., Ozbay, N., Onal, E.P., Putun, E. (2005). Fixed-bed pyrolysis of cotton stalk for liquid and solid products. *Fuel Processing Technology* 86(11), 1207-1219.
- Rajkovich, S., Enders, A., Hanley, K., Hyland, C., Zimmerman, A.R., Lehmann, J. (2012). Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. *Biology and Fertility of Soils*. 48(3), 271-284.
- Rogovska, N., Laird, D.A., Karlen, D.L. (2016). Corn and soil response to biochar application and stover harvest. *Field Crops Research* 187, 96–106.
- Rogovska, N., Laird, D.A., Rathke, S.J., Karlen, D.L. (2014). Biochar impact on Midwestern Mollisols and maize nutrient availability. *Geoderma* 230-231, 34-347.
- Rondon, M., 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(6), 699-708.
- Rouilly, A. and Rigal, L. (2002). Agro-materials: a bibliographic review. *Journal of Macromolecular Science Part C* 42(4), 441-479.
- Santos, F., Machado, G., Faria, D., Lima, J., Marçal, N., Dutra, E., Souza, G. (2017). Productive potential and quality of rice husk and straw for biorefineries. *Biomass Conversion and Biorefinery* 7(1), 117-126.
- Schimmelpfennig, S., Müller, C., Grünhage, L., Koch, C., Kammann, C. (2014). Biochar, hydrochar and uncarbonized feedstock application to permanent grassland-Effects on greenhouse gas emissions and plant growth. *Agriculture Ecosystems & Environment* 191, 39-52.
- Schmalenberger, A. and Fox, A. (2016). Bacterial mobilization of nutrients from biochar amended soils. *Advances in Applied Microbiology* 94, 109-159.
- Schmidt, H.P., Kammann, C., Niggli, C., Evangelou, M.W.H., Mackie, K.A., Abiven, S. (2014). Biochar and biochar-compost as soil amendments to a vineyard soil: Influences on

plant growth, nutrient uptake, plant health and grape quality. *Agriculture Ecosystems & Environment* 191, 117-123.

Schmidt, H.P., Pandit, B.H., Martinsen, V., Cornelissen, G., Conte, P., Kammann, C. (2015). Fourfold increase in pumpkin yield in response to low-dosage root zone application of urine enhanced biochar to a fertile tropical soil. *Agriculture* 5 (3), 723-741.

Schmidt, M.W.I. and Noack, A.G. (2000). Black carbon in soils and sediments: Analysis, distribution, implications, and current challenges. *Global Biogeochemical Cycles* 14(3), 777-793.

Schulz, H. and Glaser B. (2012). Effects of biochar compared to organic and inorganic fertilizers on soil quality and plant growth in a greenhouse experiment. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 175(3), 410-422.

Shao, G., Dai, L., Dukes, J.S., Jackson, R.B., Tang, L., Zhao, J. (2011). Increasing forest carbon sequestration through cooperation and shared strategies between China and the United States. *Environmental Science & Technology* 45(6), 2033-2034.

Shu, L., Schneider, P., Jegatheesan, V., Johnson, J. (2006). An economic evaluation of phosphorus recovery as struvite from digester supernatant. *Bioresource Technology* 97(17), 2211-2216.

Silber, A., Levkovitch, I., Graber, E.R. (2010). pH-Dependent mineral release and surface properties of cornstraw biochar: Agronomic implications. *Environmental Science & Technology* 44(24), 9318-9323.

Singh, B., Singh, B.P., Cowie, A. (2010). Characterization and evaluation of biochars for their application as a soil amendment. *Australian Journal of Soil Research* 48(6-7), 516-525.

Singh, B.P., Cowie, A.L., Smernik, R.J. (2012). Biochar carbon stability in a clayey soil as a function of feedstock and pyrolysis temperature. *Environmental Science & Technology* 46(21), 11770-11778.

Singh, R., Babu, J.N., Kumar, R., Srivastava, P., Singh, P., Raghubanshi, A.S. (2015). Multifaceted application of crop residue biochar as a tool for sustainable agriculture: an ecological perspective. *Ecological Engineering* 77, 324-347.

Smider, B. and Singh, B. (2014). Agronomic performance of a high ash biochar in two contrasting soils. *Agriculture Ecosystems & Environment* 191, 99-107.

Smith, J.L., Collins, H.P., Bailey, V.L. (2010). The effect of young biochar on soil respiration. *Soil Biology and Biochemistry* 42 (12), 2345-2347.

Smith, P. (2016). Soil carbon sequestration and biochar as negative emission technologies. *Global Change Biology* 22(3), 1315-1324.

- 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(2), 321-332.
- Spokas, K.A. (2010). Review of the stability of biochar in soils: Predictability of O:C molar ratios. *Carbon Management* 1(2), 289-303.
- Stefanello, F.S., dos Santos, C.O., Bochi, V.C., Fruet, A.P.B., Soquetta, M.B., Dörr, A.C., Nörnberg, J.L. (2018). Analysis of polyphenols in brewer's spent grain and its comparison with corn silage and cereal brans commonly used for animal nutrition. *Food Chemistry* 239, 385-401.
- Steiner, C., Glaser, B., Teixeira, W.G., Lehmann, J., Blum, W.E.H., Zech, W. (2008). Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 171(6), 893-899.
- Steiner, C., Teixeira, W.G., Lehmann, J., Nehls, T., Macedo, J.L.V., Blum, W.E.H., Zech, W. (2007). Long-term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. *Plant and Soil* 291(1-2), 275-290.
- Subedi, R., Bertora, C., Zavattaro, L., Grignani, C. (2017). Crop response to soils amended with biochar: expected benefits and unintended risks. *Italian Journal of Agronomy* 12(2), 161-173.
- Subedi, R., Kammann, C., Pelissetti, S., Taupe, N., Bertora, C., Monaco, S., Grignani, C. (2015). Does soil amended with biochar and hydrochar reduce ammonia emissions following the application of pig slurry? *European Journal of Soil Science* 66(6), 1044-1053.
- Subedi, R., Taupe, N., Ikoyi, I., Bertora, C., Zavattaro, L., Schmalenberger, A., Leahy, J.J., Grignani, C. (2016a). Chemically and biologically-mediated fertilizing value of manure-derived biochar. *Science of The Total Environment* 550, 924-933.
- Subedi, R., Taupe, N., Pelissetti, S., Petruzzelli, L., Bertora, C., Leahy, J.J., Grignani, C. (2016b). Greenhouse gas emissions and soil properties following amendment with manure-derived biochars: influence of pyrolysis temperature and feedstock type. *Journal of Environmental Management* 166, 73-83.
- 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.
- Taghizadeh-Toosi, A., Clough, T., Sherlock, R., Condon, L. (2012). Biochar adsorbed ammonia is bioavailable. *Plant and Soil* 350(1-2), 57-69.

- Tammeorg, P., Simojoki, A., Mäkelä, P., Stoddard, F.L., Alakukku, L., Helenius, J. (2014). Biochar application to a fertile sandy clay loam in boreal conditions: effects on soil properties and yield formation of wheat, turnip rape and faba bean. *Plant and Soil* 374(1-2), 89-107.
- Tan, Z., Lin, C.S.K., Ji, X., Rainey, T.J. (2017). Returning biochar to fields: A review. *Applied Soil Ecology* 116, 1-11.
- Teixeira, A., Baenas, N., Dominguez-Perles, R., Barros, A., Rosa, E., Moreno, D.A., Garcia-Viguera, C. (2014). Natural bioactive compounds from winery by-products as health promoters: A review. *International Journal of Molecular Sciences* 15(9), 15638-15678.
- Thies, J.E., Rillig, M.C., Graber, E.R. (2015). Biochar effects on the abundance, activity and diversity of the soil biota. In: J. Lehmann, S. Joseph (Eds.) *Biochar for environmental management: science, technology and implementation*, 2nd ed. Routledge, Abingdon, UK, pp. 327-390.
- Toscano, G., Riva, G., Duca, D., Foppa Pedretti, E., Corinaldesi, F., Rossini, G. (2013). Analysis of the characteristics of the residues of the wine production chain finalized to their industrial and energy recovery. *Biomass & Bioenergy* 55, 260-267.
- 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.
- Uzoma, K.C., Inoue, M., Andry, H., Fujimaki, H., Zahoor, A., Nishihara, E. (2011). Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition. *Soil Use and Mangement* 27(2), 205-212.
- Vaccari, F.P., Baronti, S., Lugato, E., Genesio, L., Castaldi, S., Fornasier, F., Miglietta, F. (2011). Biochar as a strategy to sequester carbon and increase yield in durum wheat. *European Journal of Agronomy* 34(4), 231-238.
- 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.
- Van Zwieten, L., Kimber, S., Morris, S., Chan, K.Y., Downie, A., Rust, J., Joseph, S., Cowie, A. (2010). Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant and Soil* 327(1-2), 235-246.
- Vanek, S.J. and Lehmann, J. (2015). Phosphorus availability to beans via interactions between mycorrhizas and biochar. *Plant and Soil* 395(1-2), 105-123.
- Vlyssides, A., Mai, S., Barampouti, E.M. (2015). Energy Generation Potential in Greece From Agricultural Residues and Livestock Manure by Anaerobic Digestion Technology. *Waste and Biomass Valorization* 6(5), 747-757.

- Wang, Z., Göttlein, A., Bartonek, G. (2001). Effects of growing roots of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) on rhizosphere soil solution chemistry. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 164(1), 35-41.
- Wang, T., Camps-Arbestain, M., Hedley, M., Bishop, P. (2012). Predicting phosphorus bioavailability from high-ash biochars. *Plant and Soil* 357, 173-187.
- Watzinger, A., Feichtmair, S., Kitzler, B., Zeheter, F., Kloss, S., Wimmer, B., Zechmeister-Boltenstern, S., Soja, G. (2014). Soil microbial communities responded to biochar application in temperate soils and slowly metabolized ¹³C-labelled biochar as revealed by ¹³C PLFA analyses: results from a short-term incubation and pot experiment. *European Journal of Soil Science* 65(1), 40-51.
- Weber, K. and Quicker, P. (2018). Properties of biochar. *Fuel* 217, 240-261.
- Weikard, H.-P. and Seyhan, D. (2009). Distribution of phosphorus resources between rich and poor countries: The effect of recycling. *Ecological Economics* 68(6), 1749-1755.
- Windeatt, J.H., Ross, A.B., Williams, P.T., Forster, P.M., Nahil, M.A., Singh S. (2014). Characteristics of biochars from crop residues: Potential for carbon sequestration and soil amendment. *Journal of Environmental Management* 146, 189-197.
- Wu, W., Yang, M., Feng, Q., Mc Grouther, K., Wang, H., Lu, H., Chen, Y. (2012). Chemical characterization of rice straw-derived biochar for soil amendment. *Biomass & Bioenergy* 47, 268-276.
- Xu, G., Lv, Y., Sun, J., Shao, H., Wei, L. (2012). Recent advances in biochar applications in agricultural soils: Benefits and environmental implications. *CLEAN*. 40(10), 1093-1098.
- Xu, G., Sun, J., Shao, H., Chang, S.X. (2014). Biochar had effects on phosphorus sorption and desorption in three soils with differing acidity. *Ecological Engineering* 62, 54-60.
- Xu, G., Wei, L.L., Sun, J.N., Shao, H.B., Chang, S.X. (2013). What is more important for enhancing nutrient bioavailability with biochar application into a sandy soil: Direct or indirect mechanism? *Ecological Engineering* 52, 119-124.
- Xu, G., Zhang, Y., Sun, J., Shao, H. (2016). Negative interactive effects between biochar and phosphorus fertilization on phosphorus availability and plant yield in saline sodic soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 568, 910-915.
- Yang, H., Yan, R., Chen, H., Zheng, C., Lee, D.H., Liang, D.T. (2006). In-depth investigation of biomass pyrolysis based on three major components: hemicellulose, cellulose and lignin. *Energy & Fuels* 20(1), 388-393.
- Ye ZhiJing, Harrison, R., Cheng, V.J., Bekhit, A.E.A. (2016). Wine making by-products. In: Bordiga, M. (Eds.). *Valorization of wine making by-products*. CRC Press, pp. 73-116.

- Yu, J. and Ahmedna, M. (2013). Functional components of grape pomace: their composition, biological properties and potential applications. *International Journal of Food Science & Technology* 48(2), 221-237.
- Yu, L., Lu, X., He, Y., Brookes, P.C., Liao, H., Xu, J. (2016). Combined biochar and nitrogen fertilizer reduces soil acidity and promotes nutrient use efficiency by soybean crop. *Journal of Soils and Sediments* 17(3), 599-610.
- Zabaniotou, A., Kamaterou, P., Pavlou, A., Panayiotou, C. (2018). Sustainable bioeconomy transitions: Targeting value capture by integrating pyrolysis in a winery waste biorefinery. *Journal of Cleaner Production* 172, 3387-3397.
- Zhang, J. and Wang, Q. (2016). Sustainable mechanisms of biochar derived from brewers' spent grain and sewage sludge for ammonia-nitrogen capture. *Journal of Cleaner Production*. 112 , 3927-3934.
- Zhao, R., Coles, N., Kong, Z., Wu, J. (2015). Effects of aged and fresh biochar on soil acidity under different incubation conditions. *Soil & Tillage Research* 146, 133-138.
- 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.
- Zimmerman, A.R., Gao, B., Ahn, M.-Y. (2011). Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils. *Soil Biology and Biochemistry* 43(6), 1169-1179.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας Π3-1. Συγκέντρωση N, P, K (g kg^{-1} ξηρής ουσίας) υπέργειων φυτικών ιστών του *Lolium perenne* L. στο SL έδαφος στις μεταχειρίσεις χωρίς λίπανση (ΧΛ) (μέσος όρος \pm τυπική απόκλιση, $n=3$).

SL									
Μεταχειρίσεις	N			P			K		
	g kg ⁻¹								
	1η συγκομιδή	2η συγκομιδή	3η συγκομιδή	1η συγκομιδή	2η συγκομιδή	3η συγκομιδή	1η συγκομιδή	2η συγκομιδή	3η συγκομιδή
Μάρτυρας ΧΛ	17.10 ± 0.51c	10.82 ± 1.19a	6.08 ± 1.25a	4.38 ± 0.27ab	3.81 ± 0.46bc	3.10 ± 0.61a	26.99 ± 5.76ab	13.89 ± 0.18ab	11.43 ± 0.37a
Κόμποστ ΧΛ	12.86 ± 0.83b	11.90 ± 0.78a	5.66 ± 0.61a	4.65 ± 0.33a	2.93 ± 0.14a	2.35 ± 0.25a	27.71 ± 1.21ab	17.23 ± 0.09bc	13.28 ± 0.08a
BC-Σ+ κόμποστ ΧΛ	12.23 ± 0.18ab	14.03 ± 1.83a	5.72 ± 0.93a	5.09 ± 0.11a	3.10 ± 0.12ab	2.57 ± 0.75a	30.03 ± 5.53ab	24.02 ± 2.48d	26.31 ± 4.32b
BC-Σ ΧΛ	12.89 ± 0.83b	11.45 ± 1.03a	5.24 ± 0.65a	5.17 ± 0.34a	4.14 ± 0.12c	2.85 ± 0.16a	34.09 ± 0.61b	21.50 ± 2.46cd	14.88 ± 5.59a
BC-ΦΡ+ κόμποστ ΧΛ	12.17 ± 0.22ab	11.12 ± 2.01a	6.62 ± 1.83a	3.98 ± 0.82a	3.46 ± 0.18abc	3.36 ± 0.67a	21.11 ± 1.51a	15.32 ± 2.17ab	12.80 ± 0.30a
BC-ΦΡ ΧΛ	10.40 ± 1.29a	10.94 ± 0.56a	5.15 ± 0.52a	4.44 ± 0.51a	3.65 ± 0.38abc	2.62 ± 0.28a	23.67 ± 1.80a	11.32 ± 1.90a	15.39 ± 0.74a

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

Πίνακας Π3-2. Συγκέντρωση N, P, K (g kg^{-1} ξηρής ουσίας) υπέργειων φυτικών ιστών του *Lolium perenne* L. στο L έδαφος στις μεταχειρίσεις χωρίς λίπανση (ΧΛ) (μέσος όρος \pm τυπική απόκλιση, $n=3$).

L									
Μεταχειρίσεις	N			P			K		
	g kg ⁻¹								
	1η συγκομιδή	2η συγκομιδή	3η συγκομιδή	1η συγκομιδή	2η συγκομιδή	3η συγκομιδή	1η συγκομιδή	2η συγκομιδή	3η συγκομιδή
Μάρτυρας ΧΛ	13.13 ± 1.36a	11.78 ± 1.14ab	6.77 ± 0.74a	2.68 ± 1.03a	1.26 ± 0.14a	1.49 ± 0.32a	23.10 ± 1.82ab	16.85 ± 4.65bc	10.86 ± 1.09a
Κόμποστ ΧΛ	12.95 ± 0.68a	9.65 ± 1.58a	6.80 ± 0.56a	2.45 ± 0.38a	1.99 ± 0.22ab	1.83 ± 0.20ab	24.83 ± 0.60ab	14.78 ± 1.44abc	11.25 ± 0.23a
BC-Σ+ κόμποστ ΧΛ	12.35 ± 2.02a	14.14 ± 0.37b	6.47 ± 1.24a	3.23 ± 0.09a	2.79 ± 0.30c	2.43 ± 0.18bc	23.95 ± 4.98ab	19.25 ± 2.49c	12.93 ± 2.56ab
BC-Σ ΧΛ	11.72 ± 1.89a	10.81 ± 0.58a	6.02 ± 1.01a	3.26 ± 0.18a	2.81 ± 0.39c	2.59 ± 0.35c	27.31 ± 1.00b	19.30 ± 0.53c	17.12 ± 2.55b
BC-ΦΡ+ κόμποστ ΧΛ	13.64 ± 1.18a	11.00 ± 0.72a	5.39 ± 0.18a	3.06 ± 0.44a	2.30 ± 0.36bc	1.79 ± 0.25ab	20.71 ± 4.12ab	11.10 ± 1.41ab	11.19 ± 3.31a
BC-ΦΡ ΧΛ	10.88 ± 1.17a	10.40 ± 0.24a	6.47 ± 2.06a	2.46 ± 0.15a	2.09 ± 0.12bc	1.64 ± 0.07a	18.79 ± 1.16a	10.20 ± 0.22a	8.49 ± 0.79a

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

Πίνακας Π3-3. Συγκέντρωση Ca, Mg (g kg^{-1} ξηρής ουσίας) υπέργειων φυτικών ιστών του *Lolium perenne* L. στο SL έδαφος στις μεταχειρίσεις χωρίς λίπανση (ΧΛ) (μέσος όρος \pm τυπική απόκλιση, $n=3$).

SL						
Μεταχειρίσεις	Ca			Mg		
	g kg ⁻¹					
	1η συγκομιδή	2η συγκομιδή	3η συγκομιδή	1η συγκομιδή	2η συγκομιδή	3η συγκομιδή
Μάρτυρας ΧΛ	6.07 ± 1.20cd	6.83 ± 0.50d	10.17 ± 2.22b	4.42±0.87bc	5.31±0.48ab	6.05±0.57cd
Κόμποστ ΧΛ	6.62 ± 0.30d	6.62 ± 0.17cd	7.38 ± 0.42ab	5.32±0.83c	4.13±1.36ab	4.47±0.04ab
BC-Σ+ κόμποστ ΧΛ	4.06 ± 0.34b	2.12 ± 0.46a	3.48 ± 1.00a	4.33±0.04bc	4.26±1.15ab	3.78±0.10a
BC-Σ ΧΛ	4.57 ± 0.09bc	5.43 ± 0.51bc	8.73 ± 0.60b	4.36±0.51bc	5.67±0.25b	6.63±0.62d
BC-ΦΡ+ κόμποστ ΧΛ	2.31 ± 0.39a	4.40 ± 0.53b	7.57 ± 0.89ab	2.72±0.31a	3.23±0.29a	5.36±0.12bc
BC-ΦΡ ΧΛ	4.72 ± 0.49bc	4.34 ± 0.26b	9.97 ± 2.58b	3.13±0.11ab	3.54±0.51ab	5.77±0.30cd

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 Ca, Mg (g kg^{-1} ξηρής ουσίας) υπέργειων φυτικών ιστών του *Lolium perenne* L. στο L έδαφος στις μεταχειρίσεις χωρίς λίπανση (ΧΛ) (μέσος όρος \pm τυπική απόκλιση, $n=3$).

L						
Μεταχειρίσεις	Ca			Mg		
	g kg ⁻¹					
	1η συγκομιδή	2η συγκομιδή	3η συγκομιδή	1η συγκομιδή	2η συγκομιδή	3η συγκομιδή
Μάρτυρας ΧΛ	6.84 ± 0.63a	4.70 ± 0.82ab	9.35 ± 0.52ab	3.76±0.41cd	5.40±1.24b	4.94±0.73b
Κόμποστ ΧΛ	5.60 ± 1.01a	5.91 ± 0.62b	9.17 ± 1.47ab	4.05±0.52d	3.72±0.20ab	3.48±0.23ab
BC-Σ+ κόμποστ ΧΛ	4.37 ± 0.24a	4.36 ± 0.70ab	11.90 ± 1.91ab	3.02±0.13bc	3.91±0.91ab	4.83±0.41b
BC-Σ ΧΛ	6.57 ± 1.99a	5.25 ± 1.56ab	8.70 ± 1.15a	3.51±0.22cd	4.13±0.52ab	5.08±1.05b
BC-ΦΡ+ κόμποστ ΧΛ	3.85 ± 1.31a	3.10±0.41a	12.11 ± 0.90b	2.16±0.41ab	2.89±0.09a	4.46±0.95b
BC-ΦΡ ΧΛ	4.39 ± 0.57a	4.92 ± 1.19ab	9.12 ± 0.88ab	1.98±0.05a	2.48±0.29a	2.31±0.81a

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 Fe, Mn, Zn (mg kg^{-1} ξηρής ουσίας) υπέργειων φυτικών ιστών του *Lolium perenne* L. στο SL έδαφος στις μεταχειρίσεις χωρίς λίπανση (ΧΛ) (μέσος όρος \pm τυπική απόκλιση, $n=3$).

SL									
Μεταχειρίσεις	Fe			Mn			Zn		
	mg kg ⁻¹								
	1η συγκομιδή	2η συγκομιδή	3η συγκομιδή	1η συγκομιδή	2η συγκομιδή	3η συγκομιδή	1η συγκομιδή	2η συγκομιδή	3η συγκομιδή
Μάρτυρας ΧΛ	86±26a	42±13a	90±9b	243±35b	347±13a	206±29ab	24±6ab	20±1a	13±4a
Κόμποστ ΧΛ	84±2a	49±20a	30±2a	438±25c	628±192b	206±29ab	37±8b	25±1a	8±1a
BC-Σ+ κόμποστ ΧΛ	70±15a	57±14a	51±45ab	363±72c	389±49ab	389±25c	24±7ab	24±15a	28±7b
BC-Σ ΧΛ	106±39ab	48±20a	42±23ab	191±45ab	310±84a	273±49b	32±6ab	24±3a	9±4a
BC-ΦΡ+ κόμποστ ΧΛ	164±31b	41±12a	652±5c	162±5ab	207±52a	137±5a	21±4ab	17±2a	8±2a
BC-ΦΡ ΧΛ	59±12a	31±4a	83±7ab	122±14a	143±33a	152±35a	15±3a	8±1a	2±0a

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

Πίνακας Π3-6. Συγκέντρωση Fe, Mn, Zn (mg kg^{-1} ξηρής ουσίας) υπέργειων φυτικών ιστών του *Lolium perenne* L. στο L έδαφος στις μεταχειρίσεις χωρίς λίπανση (ΧΛ) (μέσος όρος \pm τυπική απόκλιση, $n=3$).

L									
Μεταχειρίσεις	Fe			Mn			Zn		
	mg kg ⁻¹								
	1η συγκομιδή	2η συγκομιδή	3η συγκομιδή	1η συγκομιδή	2η συγκομιδή	3η συγκομιδή	1η συγκομιδή	2η συγκομιδή	3η συγκομιδή
Μάρτυρας ΧΛ	74±1ab	50±10a	139±9b	78±13ab	64±9a	97±7a	13±1ab	11.3±2ab	13±3a
Κόμποστ ΧΛ	95±8c	74±1a	38±11a	98±37b	127±27b	135±22ab	30±2c	23±7bc	10±1a
BC-Σ+ κόμποστ ΧΛ	58±6a	54±12a	25±2a	55±2ab	78±5a	249±22c	21±6bc	25±5c	8.3±2a
BC-Σ ΧΛ	67±6ab	61±24a	148±44b	76±8ab	175±12c	177±17b	16±2ab	18±1bc	16±1a
BC-ΦΡ+ κόμποστ ΧΛ	78±5bc	45±13a	107±10b	62±4ab	76±15a	148±35ab	16±6ab	10±0ab	13.7±4a
BC-ΦΡ ΧΛ	60±12ab	46±9a	97±12b	41±6a	59±9a	105±35a	9±3a	3±0a	9±2a

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

Πίνακας Π4-1. Συγκέντρωση N, P, K, Ca, Mg (g kg^{-1} ξηρής ουσίας) και Fe, Mn, Zn (mg kg^{-1} ξηρής ουσίας) υπέργειων και υπόγειων φυτικών ιστών του *Zea Mays* L. στο SL έδαφος (μέσος όρος \pm τυπική απόκλιση, $n=3$).

Υπέργειοι φυτ. ιστοί								
Μεταχειρίσεις	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn
	g kg^{-1}					mg kg^{-1}		
Μάρτυρας	17.79 \pm 2.84 B	1.46 \pm 0.01AB	5.38 \pm 0.25 A	6.54 \pm 0.82 B	6.01 \pm 0.72 B	37.00 \pm 5.67A	37.00 \pm 4.87BC	23 \pm 4.38CD
BC-Σ	10.08 \pm 1.40 A	1.69 \pm 0.10 B	18.84 \pm 0.80 C	0.87 \pm 0.15 A	1.9 \pm 0.12 A	23.00 \pm 4.37A	30.00 \pm 2.64 AB	10.00 \pm 2.64A
BC-ΦΡ	12.57 \pm 0.55A	1.08 \pm 0.16A	6.86 \pm 0.34A	0.46 \pm 0.10 A	2.01 \pm 0.25 A	20.00 \pm 2.17A	20.00 \pm 1.14 A	10.00 \pm 2.09A
BC-Σ+κόμποστ	11.56 \pm 1.96A	1.49 \pm 0.33 AB	25.62 \pm 1.94 D	1.26 \pm 0.13A	2.28 \pm 0.05A	60.00 \pm 10.23 B	53.00 \pm 5.17 D	13.00 \pm 3.31AB
BC-ΦΡ+κόμποστ	10.25 \pm 0.32A	1.42 \pm 0.26 AB	14.00 \pm 1.01 B	1.21 \pm 0.25 A	2.1 \pm 0.46 A	30.00 \pm 2.29 A	23.00 \pm 3.79 A	20.00 \pm 1.20BD
Κόμποστ	14.49 \pm 1.24AB	1.46 \pm 0.16 AB	16.11 \pm 2.27BC	10.81 \pm 0.64 C	6.56 \pm 0.42 B	36.00 \pm 11.55 A	43.00 \pm 4.39 CD	30.00 \pm 1.23D
Υπόγειοι φυτ. ιστοί								
Μεταχειρίσεις	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn
	g kg^{-1}					mg kg^{-1}		
Μάρτυρας	12.04 \pm 2.49 a	0.64 \pm 0.20 a	1.68 \pm 0.18 a	0.19 \pm 0.02 a	1.45 \pm 0.11 ab	3676.00 \pm 171.56 a	156.7 \pm 32.15 b	20.00 \pm 1.14a
BC-Σ	10.53 \pm 0.37 a	0.76 \pm 0.05 a	8.55 \pm 0.58d	0.52 \pm 0.11 a	2.06 \pm 0.19 bc	6273.00 \pm 610.77b	93.00 \pm 11.55 a	30.00 \pm 1.25 ab
BC-ΦΡ	8.97 \pm 0.93a	0.57 \pm 0.12 a	2.21 \pm 0.34a	0.09 \pm 0.02 a	0.6 \pm 0.06 a	6593.00 \pm 430.62 b	53.00 \pm 5.24a	20.00 \pm 0.91a
BC-Σ+κόμποστ	8.68 \pm 0.68 a	1.09 \pm 0.06 a	15.49 \pm 0.22e	4.53 \pm 2.45 b	2.96 \pm 0.10 c	5853.00 \pm 955.06b	237.00 \pm 15.28 c	40.00 \pm 10.00 b
BC-ΦΡ+κόμποστ	9.33 \pm 1.95a	1.09 \pm 0.34 a	6.33 \pm 0.58c	2.33 \pm 0.55 ab	1.86 \pm 0.80 b	8357.00 \pm 954.48 c	67.00 \pm 20.82 a	33.00 \pm 5.77b
Κόμποστ	12.44 \pm 1.90 a	0.9 \pm 0.09 a	3.74 \pm 0.18 b	1.32 \pm 0.27 a	1.65 \pm 0.19 b	2347.00 \pm 153.08a	83.00 \pm 4.51a	40.00 \pm 2.78 b

Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε $p<0.05$. Το κριτήριο εφαρμόστηκε ξεχωριστά σε κάθε είδος φυτικού ιστού (Υπέργειοι και Υπόγειοι).

Πίνακας Π4-2. Συγκέντρωση N, P, K, Ca, Mg (g kg^{-1} ξηρής ουσίας) και Fe, Mn, Zn (mg kg^{-1} ξηρής ουσίας) υπέργειων και υπόγειων φυτικών ιστών του *Zea Mays* L. στο L έδαφος (μέσος όρος \pm τυπική απόκλιση, $n=3$).

Υπέργειοι φυτ. ιστοί								
Μεταχειρίσεις	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn
	g kg^{-1}					mg kg^{-1}		
Μάρτυρας	29.16 \pm 2.08C	1.23 \pm 0.09 A	30.57 \pm 4.51 A	11.57 \pm 2.82B	2.33 \pm 0.65BC	60.00 \pm 1.32 C	50.00 \pm 1.19 C	27.00 \pm 5.24 CD
BC-Σ	13.64 \pm 0.28 AB	1.11 \pm 0.15 A	27.09 \pm 2.91 A	2.1 \pm 0.59A	0.79 \pm 0.14A	30.00 \pm 1.21A	20.00 \pm 1.26 A	10.00 \pm 0.81A
BC-ΦΡ	11.38 \pm 0.81A	0.81 \pm 0.10 A	25.52 \pm 2.23A	3.66 \pm 0.91 A	1.42 \pm 0.09AB	50.00 \pm 1.06 B	23.00 \pm 4.86 A	20.00 \pm 0.74 BC
BC-Σ+κόμποστ	17.13 \pm 2.67 AB	2.03 \pm 0.56 B	30.97 \pm 6.89A	11.23 \pm 0.43 B	3.06 \pm 0.88C	90.00 \pm 2.28 D	33.00 \pm 11.55AB	17.00 \pm 54.69 AB
BC-ΦΡ+ κόμποστ	18.42 \pm 4.05 B	0.84 \pm 0.12 A	23.61 \pm 8.03 A	1.82 \pm 0.25 A	0.69 \pm 0.11 A	57.00 \pm 5.17 C	20.00 \pm 2.37 A	10.00 \pm 1.97 A
Κόμποστ	19.53 \pm 2.82 B	0.99 \pm 0.16 A	36.7 \pm 3.18 A	12.79 \pm 1.42B	2.59 \pm 0.48 BC	60.00 \pm 1.75 C	46.7 \pm 5.21 BC	30.00 \pm 2.96 D
Υπόγειοι φυτ. ιστοί								
Μεταχειρίσεις	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn
	g kg^{-1}					mg kg^{-1}		
Μάρτυρας	15.48 \pm 2.08 b	0.57 \pm 0.04a	8.69 \pm 0.43a	8.41 \pm 0.83 a	0.91 \pm 0.09ab	1003 \pm 246.85 a	43 \pm 5.77bc	20 \pm 1.16 c
BC-Σ	14.25 \pm 2.38ab	0.86 \pm 0.19 ab	12.48 \pm 1.19 b	38.67 \pm 6.88c	2.5 \pm 0.06c	2380 \pm 475.71 c	50 \pm 2.21c	19 \pm 2.65 bc
BC-ΦΡ	13.08 \pm 2.51 ab	0.72 \pm 0.19 a	7.9 \pm 0.12 a	15.79 \pm 0.37ab	0.66 \pm 0.09a	1160 \pm 105.83 ab	30 \pm 1.06a	12 \pm 0.58ab
BC-Σ+κόμποστ	13.68 \pm 3.30ab	1.2 \pm 0.03 b	11.31 \pm 0.76 b	21.82 \pm 3.98 b	1.04 \pm 0.18b	1606.7 \pm 260.83ab	37 \pm 5.77ab	11.00 \pm 1.73a
BC-ΦΡ+ κόμποστ	9.40 \pm 0.08 a	0.58 \pm 0.15 a	7.07 \pm 0.70a	32.66 \pm 2.21c	0.73 \pm 0.04 a	1830 \pm 252.39bc	47 \pm 5.77bc	14.00 \pm 0.58abc
Κόμποστ	9.95 \pm 0.90 ab	0.81 \pm 0.18ab	10.63 \pm 0.50 b	9.6 \pm 0.20 a	0.66 \pm 0.03 a	1003 \pm 80.83a	27 \pm 5.77a	17.00 \pm 1.00abc

Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε $p<0.05$. Το κριτήριο εφαρμόστηκε ξεχωριστά σε κάθε είδος φυτικού ιστού (Υπέργειοι και Υπόγειοι).

Πίνακας Π5-1. Συγκέντρωση N, P, K, Ca, Mg (g kg^{-1} ξηρής ουσίας) και Fe, Mn, Zn (mg kg^{-1} ξηρής ουσίας) υπέργειων και υπόγειων φυτικών ιστών του *Zea Mays* L. στο L έδαφος στις μεταχειρίσεις με λίπανση (Λ) (μέσος όρος \pm τυπική απόκλιση, $n=3$).

Υπέργειοι φυτ. ιστοί								
Μεταχειρίσεις	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn
	g kg^{-1}					mg kg^{-1}		
Μάρυρας Λ	12.15 \pm 0.38 D	0.47 \pm 0.04 A	34.97 \pm 1.06 C	3.83 \pm 0.11 E	3.46 \pm 0.01 D	102.54 \pm 5.11C	112.14 \pm 0.58C	26.76 \pm 0.7C
BC-M-2% Λ	10.37 \pm 0.35 BC	2.55 \pm 0.04 B	35.78 \pm 0.88 C	3.65 \pm 0.26 DE	2.35 \pm 0.09 B	102.01 \pm 4.46C	104.14 \pm 11.72C	19.76 \pm 1.17B
BC-M-5% Λ	8.49 \pm 0.91 A	3.72 \pm 0.14 D	30.79 \pm 1.88 B	2.3 \pm 0.15 A	1.51 \pm 0.05 A	68.69 \pm 0.20A	62.45 \pm 1.83A	15.02 \pm 1.51A
BC-ΣK-2% Λ	7.98 \pm 0.62 AB	2.49 \pm 0.03 B	24.4 \pm 1.22 A	3.25 \pm 0.16 BC	3.47 \pm 0.13 D	76.53 \pm 3.70AB	66.48 \pm 1.73A	20.92 \pm 0.29B
BC-ΣK-5% Λ	8.3 \pm 0.71 A	3.15 \pm 0.08 C	23.25 \pm 0.54 A	3.55 \pm 0.09 CDE	3.48 \pm 0.05 D	85.02 \pm 5.31B	81.79 \pm 1.24B	20.22 \pm 0.05B
BC-ΣK+M-1%+1% Λ	10.65 \pm 0.6 CD	2.36 \pm 0.13 B	25.2 \pm 0.44 A	3.37 \pm 0.04 BCD	2.93 \pm 0.09 C	106.58 \pm 1.07C	62.81 \pm 2.04A	21.23 \pm 1.04B
BC-ΣK+M-2.5%+2.5% Λ	8.99 \pm 0.28 AB	3.8 \pm 0.04 D	29.15 \pm 0.64 B	3.03 \pm 0.08 B	2.52 \pm 0.16 B	78.14 \pm 0.56AB	72.76 \pm 1.4AB	20.58 \pm 0.86B
Υπόγειοι φυτ. ιστοί								
Μεταχειρίσεις	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn
	g kg^{-1}					mg kg^{-1}		
Μάρυρας Λ	8.74 \pm 1.52 a	0.66 \pm 0.01 a	11.99 \pm 0.54 abc	5.69 \pm 0.15 bc	6.16 \pm 0.23 bc	1841.86 \pm 188.23c	350.94 \pm 42.28bc	69.33 \pm 9.96d
BC-M-2% Λ	9.48 \pm 2.14 a	2.00 \pm 0.15 b	14.43 \pm 0.71 cd	6.63 \pm 0.25 c	4.86 \pm 0.46 ab	1687.20 \pm 140.56bc	512.14 \pm 145.23c	57.07 \pm 0.76bcd
BC-M-5% Λ	6.34 \pm 1.76 a	3.44 \pm 0.04 d	14.30 \pm 0.57 cd	6.36 \pm 0.18 c	3.57 \pm 0.27 a	1137.24 \pm 69.78a	204.60 \pm 17.07ab	55.15 \pm 3.71bc
BC-ΣK-2% Λ	8.74 \pm 2.38 a	2.40 \pm 0.30 b	11.24 \pm 1.51 ab	4.91 \pm 0.37 ab	4.57 \pm 0.23 a	1983.84 \pm 298.65c	251.41 \pm 13.54ab	63.23 \pm 3.27cd
BC-ΣK-5% Λ	7.29 \pm 1.79 a	3.00 \pm 0.15 c	9.23 \pm 1.05 a	4.28 \pm 0.25 a	3.58 \pm 0.36 a	905.04 \pm 39.38a	164.37 \pm 33.52a	41.53 \pm 2.69a
BC-ΣK+M-1%+1% Λ	8.79 \pm 3.12 a	2.19 \pm 0.15 b	13.35 \pm 1.37 bcd	4.92 \pm 0.61 ab	7.37 \pm 0.77 c	1200.04 \pm 142.01a	231.09 \pm 57.02ab	47.79 \pm 2.13ab
BC-ΣK+M-2.5%+2.5% Λ	8.66 \pm 1.05 a	3.12 \pm 0.04 cd	16.16 \pm 1.32 d	4.54 \pm 0.35 a	7.36 \pm 0.66 c	1271.81 \pm 112.15ab	242.26 \pm 22.41ab	50.75 \pm 1.92ab

Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε $p<0.05$. Το κριτήριο εφαρμόστηκε ξεχωριστά σε κάθε είδος φυτικού ιστού (Υπέργειοι και Υπόγειοι).

Πίνακας Π5-2. Συγκέντρωση N, P, K, Ca, Mg (g kg^{-1} ξηρής ουσίας) και Fe, Mn, Zn (mg kg^{-1} ξηρής ουσίας) υπέργειων και υπόγειων φυτικών ιστών του *Zea Mays* L. στο L έδαφος στις μεταχειρίσεις χωρίς λίπανση (ΧΛ) (μέσος όρος \pm τυπική απόκλιση, $n=3$).

Υπέργειοι φυτ. ιστοί								
Μεταχειρίσεις	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn
	g kg^{-1}					mg kg^{-1}		
Μάρυρας ΧΛ	9.28 \pm 0.17 BC	0.98 \pm 0.12 A	23.33 \pm 1.02 C	3.31 \pm 0.25 AB	2.28 \pm 0.13 A	93.29 \pm 0.94D	110.38 \pm 4.67B	29.77 \pm 1.46D
BC-M-2% ΧΛ	9.88 \pm 0.74 C	3.13 \pm 0.01 B	28.31 \pm 0.33 D	2.96 \pm 0.15 A	2.43 \pm 0.11 AB	68.51 \pm 0.90A	82.26 \pm 0.54A	16.51 \pm 0.83A
BC-M-5% ΧΛ	6.86 \pm 0.19 A	3.94 \pm 0.16 C	32.42 \pm 0.16 E	3.07 \pm 0.14 A	2.51 \pm 0.12 AB	98.33 \pm 0.94D	97.29 \pm 7.73AB	22.31 \pm 1.30BC
BC-ΣΚ-2% ΧΛ	9.09 \pm 0.03 AB	2.91 \pm 0.05 B	20.71 \pm 0.18 B	3.34 \pm 0.04 AB	2.66 \pm 0.12 AB	85.78 \pm 3.35C	79.25 \pm 8.41A	20.64 \pm 1.79ABC
BC-ΣΚ-5% ΧΛ	7.57 \pm 0.43 A	3.66 \pm 0.18 C	18.4 \pm 0.62 A	3.29 \pm 0.12 AB	2.85 \pm 0.12 B	83.63 \pm 4.00C	84.81 \pm 14.60A	24.74 \pm 1.61C
BC-ΣΚ+M-1%+1% ΧΛ	8.2 \pm 0.07 AB	2.83 \pm 0.15 B	22.12 \pm 1.07 BC	3.57 \pm 0.1 B	2.54 \pm 0.22 AB	74.94 \pm 1.97B	87.76 \pm 1.49A	19.46 \pm 1.32AB
BC-ΣΚ+M-2.5%+2.5% ΧΛ	7.59 \pm 0.93 A	3.93 \pm 0.17 C	29.65 \pm 1.34 D	3.48 \pm 0.11 B	2.77 \pm 0.21 B	86.97 \pm 0.20C	94.47 \pm 3.21AB	22.33 \pm 2.08BC
Υπόγειοι φυτ. ιστοί								
Μεταχειρίσεις	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn
	g kg^{-1}					mg kg^{-1}		
Μάρυρας ΧΛ	9.48 \pm 1.51 b	0.65 \pm 0.07 a	11.39 \pm 0.77 ab	3.58 \pm 0.32 a	6.75 \pm 0.51 e	1474.35 \pm 58.95d	495.24 \pm 42.91d	59.36 \pm 1.38d
BC-M-2% ΧΛ	7.11 \pm 0.85 ab	2.10 \pm 0.08 b	13.66 \pm 0.63 c	4.01 \pm 0.07 a	5.81 \pm 0.25 d	985.66 \pm 65.37bc	202.93 \pm 6.00a	56.29 \pm 0.98cd
BC-M-5% ΧΛ	6.81 \pm 1.09 ab	3.34 \pm 0.14 c	12.84 \pm 0.19 bc	2.67 \pm 0.14 a	3.65 \pm 0.18 b	757.78 \pm 42.33ab	244.21 \pm 9.88ab	52.63 \pm 1.31c
BC-ΣΚ-2% ΧΛ	5.83 \pm 1.03 a	2.28 \pm 0.20 b	12.38 \pm 0.16 bc	10.37 \pm 0.51 b	4.41 \pm 0.24 c	1476.79 \pm 135.46d	190.93 \pm 28.48a	35.41 \pm 2.36a
BC-ΣΚ-5% ΧΛ	7.07 \pm 1.43 ab	3.06 \pm 0.18 c	10.18 \pm 0.10 a	3.88 \pm 1.32 a	2.92 \pm 0.02 ab	1099.33 \pm 109.92c	243.51 \pm 7.05ab	54.27 \pm 3.05cd
BC-ΣΚ+M-1%+1% ΧΛ	6.20 \pm 1.14 a	2.12 \pm 0.21 b	12.83 \pm 0.32 bc	2.98 \pm 0.13 a	2.73 \pm 0.12 a	708.75 \pm 50.71a	327.88 \pm 10.53c	56.35 \pm 0.40cd
BC-ΣΚ+M-2.5%+2.5% ΧΛ	7.13 \pm 0.29 ab	3.37 \pm 0.06 c	11.63 \pm 1.10 ab	2.92 \pm 0.31 a	3.01 \pm 0.24 ab	668.50 \pm 123.01a	280.47 \pm 44.95bc	44.51 \pm 3.61b

Οι μέσοι όροι που δεν έχουν το ίδιο γράμμα υποδηλώνουν σημαντική διαφορά σύμφωνα με το τεστ Tukey HSD σε $p<0.05$. Το κριτήριο εφαρμόστηκε ξεχωριστά σε κάθε είδος φυτικού ιστού (Υπέργειοι και Υπόγειοι).