



**ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ & ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΔΑΦΟΛΟΓΙΑΣ & ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΧΗΜΕΙΑΣ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΦΥΣΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ, ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ, ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ & ΓΕΩΡΓΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ
ΥΔΑΤΙΚΟΙ, ΕΔΑΦΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ & ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία

Επίδραση δύο βιοεξανθρακωμάτων διαφορετικής προέλευσης
στη συμπεριφορά και τις απώλειες φωσφόρου σε ένα πηλοαμμώδες έδαφος

Αναστασία Α. Κωνσταντή

Επιβλέπων καθηγητής:

Διονύσιος Γασπαράτος, Καθηγητής ΓΠΑ

**ΑΘΗΝΑ
2023**

**ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ & ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΔΑΦΟΛΟΓΙΑΣ & ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΧΗΜΕΙΑΣ**

Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία

Επίδραση δύο βιοεξανθρακωμάτων διαφορετικής προέλευσης
στη συμπεριφορά και τις απώλειες φωσφόρου σε ένα πηλοαμμώδες έδαφος

Effect of two biochars from different feedstocks
in the behavior and losses of phosphorus in a loamy sand soil

Αναστασία Α. Κωνσταντή

Εξεταστική επιτροπή:

Διονύσιος Γασπαράτος, Καθηγητής ΓΠΑ (επιβλέπων)

Ιωάννης Μάσσας, Καθηγητής ΓΠΑ

Διονύσιος Καλύβας, Καθηγητής ΓΠΑ

Επίδραση δύο βιοεξανθρακωμάτων διαφορετικής προέλευσης στη συμπεριφορά και τις απώλειες φωσφόρου σε ένα πηλοαμμώδες έδαφος

*ΠΜΣ Φυσικοί Πόροι, Γεωπεριβάλλον, Γεωπληροφορική & Γεωργική Μηχανική
Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργικής Μηχανικής
Εργαστήριο Εδαφολογίας & Γεωργικής Χημείας*

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής ήταν η μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς του φωσφόρου στο έδαφος καθώς και των απωλειών του από αυτό κάτω από ένα σενάριο υπερλίπανσης και έντονης βροχόπτωσης σε ένα πηλοαμμώδες έδαφος μετά την προσθήκη δύο διαφορετικών βιοεξανθρακωμάτων. Το ένα από τα δύο βιοεξανθρακώματα που χρησιμοποιήθηκαν είχε προκύψει από κλαδοκάθαρο ελιάς ενώ το δεύτερο είχε προκύψει από ξυλώδη υπολείμματα από διαλογή αστικών αποβλήτων. Στην αρχή μελετήθηκε η επίδραση του τρόπου εφαρμογής του βιοεξανθρακώματος στο έδαφος στη συγκράτηση των θρεπτικών στοιχείων και τη συμπεριφορά του φωσφόρου στο έδαφος χωρίς λίπανση. Στη συνέχεια μελετήθηκε η συμπεριφορά των δύο βιοεξανθρακωμάτων στη συγκράτηση του φωσφόρου στο έδαφος μετά από ένα γεγονός υπερλίπανσης και έντονης βροχόπτωσης. Στην παρούσα μελέτη η εφαρμογή του βιοεξανθρακώματος ανεξαρτήτου της πηγής προέλευσης αυξάνει την τιμή του pH, την αγωγιμότητα καθώς και τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών στοιχείων. Ο τρόπος εφαρμογής του βιοεξανθρακώματος στο έδαφος παίζει σημαντικό ρόλο στη συμπεριφορά του καλίου και του φωσφόρου σε αυτό. Τα βιοεξανθρακώματα και κυρίως το βιοεξανθράκωμα που είχε προκύψει από ξυλώδη υπολείμματα από διαλογή αποβλήτων παρουσιάζει μεγάλη ικανότητα συγκράτησης του φωσφόρου στο έδαφος μειώνοντας έτσι την έκπλυση του από αυτό μετά από ένα γεγονός έντονης βροχόπτωσης σε έδαφος στο οποίο έχει γίνει υπερλίπανση φωσφόρου.

Επιστημονική περιοχή: Εδαφολογία

Λέξεις κλειδιά: Βιοεξανθράκωμα, φώσφορος, εδαφικές ιδιότητες, έκπλυση

Effect of two biochars from different feedstocks in the behavior and losses of phosphorus in a loamy sand soil

*MSc Natural Resources, Geoenvironment, Geoinformatics & Agricultural Engineering
Department of Natural Resources Management & Agricultural Engineering
Laboratory of Soil Science & Agricultural Chemistry*

Abstract

The aim of this study was to examine the dynamic behavior of phosphorus in soil and its losses under a scenario of over-fertilization and heavy rainfall in a loamy sand soil after the addition of two different biochar systems. One of the two biochars had been derived from olive prunings while the second one was commercial. At first, the effect of the way of application of the biochar in the soil on the retention of nutrients and the behavior of phosphorus in the soil without fertilization was studied. Then, the behavior of the two biochars on the retention of phosphorus in the soil after an over-fertilization event and heavy rainfall was studied. In the present study, the application of the biochar regardless of the feedstock increases the pH value, conductivity as well as nutrient availability. The way of application of biochar in soil plays an important role in the behavior of potassium and phosphorus in soil. Biochars, especially biochar derived from woody debris from waste sorting, has a high capacity to retain phosphorus in the soil, thus reducing its leaching from the soil after a heavy rainfall event in a soil that has been over-fertilized with phosphorus.

Scientific area: Soil science

Keywords: Biochar, phosphorus, soil properties, leaching

Δήλωση έργου – Πνευματική ιδιοκτησία

Ο κάτωθι υπογεγραμμένη φοιτήτρια Κωνσταντή Αναστασία δηλώνω ρητά ότι η παρούσα Πτυχιακή Εργασία με τίτλο «Επίδραση δύο βιοεξανθρακωμάτων διαφορετικής προέλευσης στη συμπεριφορά και τις απώλειες φωσφόρου σε ένα πηλοαμμώδες έδαφος», οι πηγές και τα ηλεκτρονικά αρχεία που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στο πλαίσιο της εργασίας και αναφέρονται ρητώς μέσα στο κείμενο που συνοδεύουν, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή ΓΠΑ κ. Διονύσιου Γασπαράτου, αποτελεί αποκλειστικά δικό μου, μη υποβοηθούμενο πόνημα, δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής.

Τα σημεία όπου έχουν χρησιμοποιηθεί ιδέες, κείμενο, αρχεία ή/και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή, ενώ η σχετική αναφορά συμπεριλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή.

Συμπληρωματικά και με τη συναίνεσή μου, η παρούσα εργασία ελέγχθηκε από την Εξεταστική Επιτροπή -από λογισμικό ανίχνευσης λογοκλοπής που διαθέτει το ΓΠΑ- για να διασταυρωθεί η πρωτοτυπία της.

Δηλώνω επίσης, ότι η παρούσα εργασία, δεν έχει υποβληθεί ποτέ πριν για οποιονδήποτε λόγο ή για εξέταση σε οποιοδήποτε άλλο πανεπιστήμιο ή εκπαιδευτικό ίδρυμα της χώρας ή του εξωτερικού. Η εργασία αποτελεί προϊόν συνεργασίας μου με τον επιβλέποντα καθηγητή μου.

Τα πνευματικά δικαιώματα της πτυχιακής εργασίας ανήκουν στην φοιτήτρια. Επιτρέπεται η δημοσίευση των αποτελεσμάτων της εργασίας σε επιστημονικά περιοδικά και συνέδρια από την φοιτήτρια ή/και τον επιβλέποντα καθηγητή, υπό τον όρο της αναφοράς των ονομάτων και των δύο (φοιτητή και επιβλέποντος καθηγητή) και της προηγούμενης ενημέρωσης του μη συμμετέχοντος στη δημοσίευση. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και μόνο.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα, όπως αυτά εκφράζονται με την ακόλουθη άδεια των Creative Commons.



Στην οικογένειά μου...

Ευχαριστίες

Η παρακάτω μεταπτυχιακή μελέτη κατέστη δυνατόν να ολοκληρωθεί με την πολύτιμη βοήθεια του κ. Διονύσιου Γασπαράτου, Καθηγητή του Γ.Π.Α. Θα ήθελα να τον ευχαριστήσω καθώς ήταν πρόθυμος να μου λύσει κάθε απορία που μου δημιουργήθηκε τόσο κατά τη συγγραφή της μεταπτυχιακής μου διατριβής, όσο και στο κομμάτι των εργαστηριακών αναλύσεων.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Καθηγητές του Γ.Π.Α. κ. Ιωάννη Μάσσα και κ. Διονύσιο Καλύβα που προσφέρθηκαν να αξιολογήσουν την παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου κ. Δημήτριο Καλδέρη για την παρασκευή του βιοεξανθρακώματος B1 (πρώτη ύλη: κλαδοκάθαρο ελιάς) και τη διάθεση του βιοεξανθρακώματος B2 (εμπορικό με πρώτη ύλη: ξυλώδη υπολείμματα από διαλογή αστικών αποβλήτων).

Για το κομμάτι των εργαστηριακών αναλύσεων θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον κ. Στυλιανό Δάλα, ΕΤΕΠ του εργαστηρίου Εδαφολογίας και Γεωργικής Χημείας για την πολύτιμη βοήθειά του στην ομαλή διεξαγωγή των εργαστηριακών αναλύσεων καθώς και την επίλυση αποριών.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη στήριξη, την κατανόηση και τη συμπαράσταση τους όλα αυτά τα χρόνια.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	i
Abstract.....	ii
Δήλωση έργου – Πνευματική ιδιοκτησία.....	iii
Ευχαριστίες.....	v
1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Ορισμός, χρήση και παραγωγή βιοεξανθρακώματος.....	1
1.2 Έδαφος και βιοεξανθράκωμα.....	1
1.2.1 Φυσικές - Χημικές ιδιότητες.....	1
1.2.2 Βιολογικές ιδιότητες.....	2
1.2.3 Θρεπτικά στοιχεία.....	2
1.3 Βιοεξανθράκωμα και φώσφορος.....	3
1.4 Απώλειες φωσφόρου από το έδαφος.....	5
2. Σκοπός.....	6
3. Υλικά και Μέθοδοι.....	7
3.1 Επεξεργασία εδάφους και βιοεξανθρακωμάτων.....	7
3.2 Πειραματική διαδικασία.....	7
3.2.1 pH.....	8
3.2.1 EC.....	8
3.2.1 Υδατοδιαλυτά κατιόντα.....	8
3.2.1 Φώσφορος.....	9
3.3 Στατιστική επεξεργασία αποτελεσμάτων.....	9
4. Αποτελέσματα – Συζήτηση.....	10
4.1 Πρώτη πειραματική διαδικασία.....	10
<i>Βιοεξανθράκωμα τοποθετημένο σε επιφανειακή στρώση στην εδαφική στήλη.....</i>	<i>10</i>
4.1.1 pH.....	10
4.1.2 EC.....	12
4.1.3 Υδατοδιαλυτά κατιόντα.....	13
4.1.4 Φώσφορος.....	17
<i>Βιοεξανθράκωμα ενσωματωμένο στις εδαφικές στήλες.....</i>	<i>19</i>
4.1.8 pH.....	19
4.1.9 EC.....	20
4.1.10 Υδατοδιαλυτά κατιόντα.....	20
4.1.11 Φώσφορος.....	23
4.3 Δεύτερη πειραματική διαδικασία.....	24

4.3.1 pH	24
4.3.2 EC	25
4.3.3 Υδατοδιαλυτά κατιόντα.....	26
4.3.4 Φώσφορος.....	29
4.4 Τρίτη πειραματική διαδικασία	30
4.4.1 pH	30
4.4.2 EC	31
4.4.3 Υδατοδιαλυτά κατιόντα.....	32
4.4.4 Φώσφορος.....	35
5. Συμπεράσματα	36
6. Βιβλιογραφία	37

1. Εισαγωγή

1.1 Ορισμός, χρήση και παραγωγή βιοεξανθρακώματος

Το βιοεξανθράκωμα είναι ένα σταθερό, στερεό υλικό πλούσιο σε άνθρακα, το οποίο έχει προκύψει μέσω πυρόλυσης σε περιβάλλον όπου η διαθεσιμότητα του οξυγόνου είναι περιορισμένη (Lehmann and Joseph, 2015). Η πυρόλυση είναι η θερμική αποσύνθεση των οργανικών ενώσεων σε υψηλές θερμοκρασίες από 400-1000 °C απουσία αέρα ή οξυγόνου (Καραγιαννάκη, 2020). Διακρίνεται στη βραδεία, την ταχεία και την ενδιάμεση πυρόλυση. Η βραδεία πυρόλυση χαρακτηρίζεται από μεγάλους χρόνους παραμονής και η θερμοκρασία κυμαίνεται από 300-600 °C. Στην ταχεία πυρόλυση η θερμοκρασία κυμαίνεται από 850 έως 1250 °C και μέσω αυτής παράγονται ταυτόχρονα βιο-έλαια, βιοεξανθράκωμα και αέρια. Η ενδιάμεση πυρόλυση είναι ένας συνδυασμός βραδείας και ταχείας πυρόλυσης και η θερμοκρασία κυμαίνεται από 500-650 °C. Όταν ο στόχος είναι η παραγωγή βιοεξανθρακώματος τότε χρησιμοποιείται κυρίως η βραδεία πυρόλυση (Καραγιαννάκη, 2020). Η πυρόλυση αυτή είναι μια παραδοσιακή μέθοδος η οποία παράγει περισσότερο βιοεξανθράκωμα από κάθε άλλη μέθοδο πυρόλυσης (Brewer and Brown, 2012). Η βιομάζα που χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη για την παραγωγή βιοεξανθρακώματος μπορεί να είναι ζωικά, φυτικά, βιομηχανικά, ή δημοτικά απόβλητα (Καραγιαννάκη, 2020). Επομένως μπορεί να δημιουργηθεί από οποιοδήποτε οργανικό υλικό, ωστόσο δημιουργείται κυρίως από φυτικά υπολείμματα δασών και καλλιέργειών (Lehmann et al., 2011). Οι πρώτες ύλες, η θερμοκρασία στην οποία δημιουργείται, η διαθεσιμότητα οξυγόνου και ο ρυθμός θέρμανσης επηρεάζουν άμεσα τη χημεία του βιοεξανθρακώματος (Gundale and DeLuca, 2006 & Atkinson et al, 2010). Τα βιοεξανθρακώματα που έχουν προκύψει από αργή πυρόλυση σε υψηλές θερμοκρασίες έχουν μεγαλύτερο εμβαδόν επιφάνειας και τιμή pH αλλά έχουν μικρότερες συγκεντρώσεις θρεπτικών στοιχείων τα οποία είναι διαθέσιμα για τα φυτά σε σύγκριση με εκείνα που παράγονται σε χαμηλότερη θερμοκρασία (Al-Wabel et al., 2013). Τα βιοεξανθρακώματα που παράγονται από κοπριά έχουν υψηλές τιμές pH, πέντε έως έξι φορές μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε θρεπτικά στοιχεία από εκείνα που έχουν ως πρώτη ύλη τα υπολείμματα και δέκα φορές μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε θρεπτικά στοιχεία από βιοεξανθρακώματα που έχουν ως πρώτη ύλη το ξύλο και έτσι οι πιθανότητες να έχουμε έλλειψη θρεπτικών στο έδαφος είναι μικρή (Gul et al., 2015).

1.2 Έδαφος και βιοεξανθράκωμα

1.2.1 Φυσικές - Χημικές ιδιότητες

Το βιοεξανθράκωμα χρησιμοποιείται στο έδαφος με στόχο τη βελτίωση των φυσικοχημικών του ιδιοτήτων αλλά και της διαθεσιμότητας των θρεπτικών στοιχείων (Lehmann and Joseph, 2015). Η ανθεκτικότητά του στο περιβάλλον το καθιστά αποτελεσματική αποθήκη άνθρακα (Lehmann et al., 2011). Διαθέτει μια ποικιλία φυσικών και χημικών ιδιοτήτων οι οποίες ελέγχουν τη βιοδιαθεσιμότητα των θρεπτικών στοιχείων (DeLuca et al., 2015). Έχει μεγάλη ειδική

επιφάνεια (Beesley et al., 2011), μεγάλο πορώδες (Keech et al., 2005) καθώς και μεταβλητό φορτίο. Συχνά η επιφάνεια του είναι πλούσια σε αλκαλικά μέταλλα (Atkinson et al., 2010). Το βιοεξανθράκωμα μπορεί να μεταβάλει το εδαφικό περιβάλλον και τις υδρολογικές του ιδιότητες, κάτι που συνδέεται με μεταβολές στη μικροβιακή κοινότητα του εδάφους και τη διαδικασία ανακύκλωσης των θρεπτικών στοιχείων (Thies et al., 2015). Τέλος μπορεί να συμβάλει στη ρύθμιση του κλίματος καθώς παίζει κρίσιμο ρόλο στην αποθήκευση του άνθρακα στα εδάφη (Woolf et al., 2010). Το βιοεξανθράκωμα επηρεάζει επίσης τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους όπως τη φαινόμενη πυκνότητα του εδάφους, τη συγκράτηση του νερού, τη δομή του εδάφους, τη σταθερότητα των συσσωματωμάτων και το συνολικό πορώδες (Sun and Lu, 2014).

Οι ιδιότητες του βιοεξανθρακώματος ποικίλουν ανάλογα με τις ιδιότητες της βιομάζας η οποία πυρολύεται, τις συνθήκες κάτω από τις οποίες πυρολύεται και το χρόνο παραμονής του βιοεξανθρακώματος στο έδαφος (Laird et al., 2010). Καθώς το βιοεξανθράκωμα παραμένει για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σε ένα έδαφος η επιφάνεια του οξειδώνεται δημιουργώντας έτσι ενεργές θέσεις προσρόφησης των διάφορων στοιχείων (Laird et al., 2010). Επίσης μπορεί να μεταβάλει την κατανομή των πόρων στο έδαφος μακροχρόνια εξαιτίας της πορώδους δομής του (Andrenelli et al., 2016). Συνεπώς η προσθήκη βιοεξανθρακώματος μπορεί να βελτιώσει την ικανότητα συγκράτησης νερού του επιφανειακού εδάφους γεγονός το οποίο έχει αποδειχθεί από τη βιβλιογραφία για τα αμμώδη εδάφη (Abel et al., 2013). Σύμφωνα με μελέτες η εφαρμογή βιοεξανθρακώματος βελτιώνει την ανάπτυξη των ριζών γεγονός που μπορεί να οφείλεται στην προσθήκη θρεπτικών στοιχείων μέσω αυτού (Gul and Whalen, 2016).

1.2.2 Βιολογικές ιδιότητες

Η δομή του βιοεξανθρακώματος περιλαμβάνει ένα εύρος μεγέθους πόρων που συνήθως κληρονομείται από τη βιομάζα παραγωγής του (Joseph et al., 2010). Οι μικροπόροι προσδιορίζονται ως οι πόροι που έχουν μέγεθος μικρότερο από 30 μm (Brady and Weil, 2002) και λειτουργούν ως τριχοειδή που μπορούν να συγκρατήσουν υγρασία ακόμη και όταν αυτή μειωθεί αρκετά (Kamman et al., 2011). Ωστόσο το βιοεξανθράκωμα περιέχει και μακροπόρους (>75 μm) οι οποίοι λειτουργούν ως κανάλια ανταλλαγής αερίων (Keech et al., 2005) επηρεάζοντας το δυναμικό οξειδοαναγωγής και επομένως το εδαφικό περιβάλλον που αναπτύσσονται οι μικροοργανισμοί (Lehmann et al., 2011).

Το βιοεξανθράκωμα μπορεί να προκαλέσει σημαντικές μεταβολές στο μέγεθος, τη δομή και τη δραστηριότητα της μικροβιακής κοινότητας του εδάφους (Lehman et al., 2011). Το βιοεξανθράκωμα έχει παρατηρηθεί ότι επηρεάζει τον μυκορριζικό αποικισμό των φυτών ο οποίος μπορεί να μεταβάλλει την πρόσληψη του φωσφόρου (Warnock et al, 2007 & Lehmann et al, 2011). Το βιοεξανθράκωμα αυξάνει τη μικροβιακή δραστηριότητα στο έδαφος (Steiner et al., 2008b) και ιδιαίτερα των μυκορριζικών μυκήτων (Ishii and Kadoya, 1994) οι οποίοι είναι πολύ σημαντικοί για την ανακύκλωση των θρεπτικών στοιχείων (Lambers et al., 2008). Επιπλέον, οι πόροι στη δομή του βιοεξανθρακώματος μπορεί να αποτελέσουν σημαντικό ενδιάστημα για πολλούς μικροοργανισμούς (βακτήρια, μύκητες, πρωτόζωα) (Quilliam et al., 2013).

1.2.3 Θρεπτικά στοιχεία

Η έκπλυση και απώλεια των θρεπτικών στοιχείων αποτελεί σημαντικό πρόβλημα στα γεωργικά οικοσυστήματα (Gao and Deluca, 2016). Η έκπλυση των θρεπτικών παρατηρείται όταν αυτά μετακινούνται μέσω της διήθησης κατακόρυφα πέρα από το περιβάλλον της ριζόσφαιρας

καθιστώντας τα μη αξιοποιήσιμα από τα φυτά (Major et al., 2009). Το βιοεξανθράκωμα έχει αναφερθεί ότι μειώνει την έκπλυση των θρεπτικών στοιχείων στα αγροτικά οικοσυστήματα (Gao and Deluca, 2016). Τα φορτία της επιφάνειας του βιοεξανθρακώματος μπορεί να οδηγήσουν σε συγκράτηση των θρεπτικών στοιχείων (Ca, Mg, K, Na) μέσω της ανταλλαγής κατιόντων με όξινες ομάδες που δημιουργούνται κατά την οξείδωση στην επιφάνεια του (Gao and Deluca, 2016). Έχει αποδειχθεί ότι η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων του βιοεξανθρακώματος είναι πολύ σημαντική και αυξάνεται με το χρόνο παραμονής του στο έδαφος (Clough et al., 2013) (Mukherjee et al., 2014). Το βιοεξανθράκωμα επηρεάζει τη χημική σύσταση του εδαφικού διαλύματος καθώς όπως αναφέρθηκε και τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους (Gao and Deluca, 2016). Το βιοεξανθράκωμα έχει υψηλή τιμή pH και σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιείται για τη βελτίωση του pH όξινων εδαφών, συνεπώς η προσθήκη του στο έδαφος μπορεί να επηρεάσει τη διαλυτότητα των θρεπτικών στοιχείων (Rogovska et al., 2016). Κατά τη διαδικασία της πυρόλυσης η θερμότητα προκαλεί πτητικοποίηση ορισμένων θρεπτικών στοιχείων ειδικά στην επιφάνεια του υλικού, ενώ τα υπόλοιπα στοιχεία συγκεντρώνονται στο υπολειπόμενο βιοεξανθράκωμα (Gundale and DeLuca, 2006 & Nelson et al., 2011). Τα θρεπτικά στοιχεία που απελευθερώνονται από το βιοεξανθράκωμα συμβάλλουν στην ανάπτυξη των μικροοργανισμών οδηγώντας την ίδια στιγμή σε μεταβολές στον κύκλο των θρεπτικών στο έδαφος (Nelissen et al., 2012). Εκτεταμένες έρευνες έχουν αποδείξει ότι η προσθήκη του βιοεξανθρακώματος φαίνεται να παίζει ένα σημαντικό ρόλο στην μείωση της έκπλυσης των θρεπτικών κυρίως στα χονδρόκοκκα εδάφη (Lehmann et al., 2003 & Steiner et al., 2007 & Steiner et al., 2008a & Novak et al., 2009). Η εφαρμογή του βιοεξανθρακώματος στα γεωργικά εδάφη αυξάνει την βιοδιαθεσιμότητα και την πρόσληψη πολλών θρεπτικών στοιχείων από τα φυτά (Glaser et al, 2002 & Lehmann et al, 2003 & Steiner et al, 2007 & Jeffery et al, 2011 & Nelson et al, 2011). Για το βιοεξανθράκωμα που δημιουργείται έχοντας σαν πρώτη ύλη το ξύλο ο άνθρακας πτητικοποιείται στους 100 °C, το άζωτο πάνω από τους 200 °C, το θείο πάνω από τους 375 °C και το κάλιο και ο φώσφορος πτητικοποιούνται στους 700-800 °C ενώ η πτητικοποίηση του ασβεστίου, μαγνησίου και μαγγανίου πραγματοποιείται μόνο σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από τους 1000 °C (Neary et al, 1999 & Knoepp et al, 2005). Αυτές οι διαφορές που υπάρχουν στην πτητικοποίηση των στοιχείων στις διάφορες θερμοκρασίες προκαλούν τις μεταβολές στη στοιχειομετρία του βιοεξανθρακώματος με τις συνολικές συγκεντρώσεις του αζώτου και του θείου να είναι οι μικρότερες καθώς πτητικοποιούνται σε σχετικά μικρές θερμοκρασίες (Knudsen et al, 2004 & Trompowsky et al, 2005).

1.3 Βιοεξανθράκωμα και φώσφορος

Ο φώσφορος είναι ένα μακροθρεπτικό η έλλειψη του οποίου μαζί με το άζωτο αποτελούν περιοριστικό παράγοντα για την παραγωγή στα αγροτικά οικοσυστήματα (Gao and Deluca, 2016). Ο φώσφορος υπάρχει στο έδαφος τόσο σε οργανικές όσο και σε ανόργανες μορφές (Gao and Deluca, 2016). Για την πρόσληψή του από τα φυτά είναι απαραίτητη η ανόργανοποίηση του οργανικού φωσφόρου σε μορφές οι οποίες μπορούν να προσληφθούν από τα φυτά (Ryan et al., 2001). Εξαιτίας του αρνητικού του φορτίου ο ανόργανος φώσφορος προσροφάται ισχυρά στην κolloειδή φάση του εδάφους με αποτέλεσμα να μειώνεται η διαθεσιμότητα του (DeLuca et al., 2015). Είναι γνωστό ότι η διαθεσιμότητα του φωσφόρου στο έδαφος εξαρτάται από το εδαφικό

pH (Adnan et al., 2003). Σε χαμηλές τιμές pH ο φώσφορος δεσμεύεται από τα οξείδια του σιδήρου και του αργιλίου ενώ σε υψηλές τιμές pH κατακρημνίζεται κυρίως ως Ca-P. Για το λόγο αυτό η διαθεσιμότητα του φωσφόρου περιορίζεται σε ένα μικρό εύρος τιμών pH μεταξύ 6 και 7 (Chintala et al., 2014). Στα πλαίσια της αειφορικής εντατικοποίησης της γεωργίας ο κύριος στόχος της βιώσιμης διαχείρισης των θρεπτικών στοιχείων στο έδαφος είναι η ανάπτυξη μεθόδων με τις οποίες επιτυγχάνεται ισορροπία μεταξύ του βαθμού ανοργανοποίησης και της πρόσληψης των θρεπτικών με στόχο την ελαχιστοποίηση των απωλειών (Gao et al., 2018). Η εφαρμογή βιοεξανθρακώματος στο έδαφος επηρεάζει άμεσα και έμμεσα τη δυναμική του εδαφικού φωσφόρου μέσω μιας σειράς μηχανισμών οι οποίοι περιλαμβάνουν: μεταβολές του εδαφικού pH, (Xu et al., 2014), δημιουργία οργανοανόργανων συμπλόκων ή μεταβολή του ισοζυγίου προσρόφησης/εκρόφησης του φωσφόρου (Gao et al., 2016) και μεταβολή της διαλυτότητας του φωσφόρου επηρεάζοντας την παραγωγή ενζύμων από τους μικροοργανισμούς (Gao et al., 2017). Η ποσότητα του φωσφόρου στο βιοεξανθράκωμα ποικίλει ανάλογα με την πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται για την παρασκευή του βιοεξανθρακώματος (Barrelet et al, 2006 & Liu et al, 2011 & Wang et al, 2012). Όταν χρησιμοποιηθούν υπολείμματα ξύλου ως βιομάζα για την παραγωγή βιοεξανθρακώματος η ποσότητα του φωσφόρου κυμαίνεται από 0,01 έως 0,1%, στην περίπτωση των υπολειμμάτων καλλιεργειών από 0,1 έως 0,4% και στην περίπτωση των κοπριών και των βιοστερεών από 0,5 έως 5% (Barrelet et al, 2006 & Liu et al, 2011 & Wang et al, 2012). Σε κάθε περίπτωση η διαθεσιμότητα του φωσφόρου που περιέχεται στο βιοεξανθράκωμα εξαρτάται από τη φύση της βιομάζας που χρησιμοποιείται για την παρασκευή του (DeLuca et al., 2015). Η καύση των οργανικών υλικών κατά τη διάρκεια της πυρόλυσης μπορεί να αυξήσει τη διαθεσιμότητα του φωσφόρου έχοντας σαν αποτέλεσμα την υπολειμματική αύξηση διαλυτών φωσφορικών αλάτων στο παραγόμενο βιοεξανθράκωμα (DeLuca et al., 2015). Έχει παρατηρηθεί ότι τα βιοεξανθρακώματα που προκύπτουν από τα βιοστερεά (πχ. λυματολάσπες) έχουν μεγάλη περιεκτικότητα φωσφορικών μικρής διαλυτότητας εξαιτίας της δέσμευσής τους από υψηλές ποσότητες σιδήρου και αργιλίου (DeLuca et al., 2015). Σύμφωνα με τον Liu et al., 2011 το βιοεξανθράκωμα περιέχει τρεις πηγές φωσφόρου, μια μεγάλης διαλυτότητας, μια που είναι ισχυρά ενωμένη με το σίδηρο και το αργίλιο και μια οργανική μορφή ως υπόλειμμα της αρχικής βιομάζας. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι το βιοεξανθράκωμα που προέρχεται από ξυλώδη βιομάζα περιέχει φώσφορο σε διαλυτή μορφή η οποία απελευθερώνεται άμεσα στο εδαφικό διάλυμα (DeLuca et al., 2015). Παρόλο αυτά, το βιοεξανθράκωμα που δημιουργείται με πρώτη ύλη κοπριά ή υπολείμματα καλλιεργειών κάτω από μικρές σχετικά θερμοκρασίες πυρόλυσης απελευθερώνει μεγαλύτερες ποσότητες διαθέσιμου φωσφόρου σε σύγκριση με βιοεξανθράκωμα που έχει προέλθει από υπολείμματα ξύλου ή κάτω από υψηλότερες θερμοκρασίες πυρόλυσης (Gao et. al., 2018).

Σύμφωνα με τα παραπάνω το βιοεξανθράκωμα μπορεί να παίξει ένα πολύ σημαντικό ρόλο στην ανακύκλωση του φωσφόρου και συνεπώς να αυξήσει την αξιοποίηση των φωσφορικών λιπασμάτων (Gao et. al., 2018). Μελέτες δείχνουν ότι η προσθήκη βιοεξανθρακώματος στα γεωργικά εδάφη αυξάνει το διαθέσιμο φώσφορο σε διάφορους τύπους εδαφών (Gao et. al., 2018). Πιο συγκεκριμένα η αύξηση αυτή προκύπτει από προσθήκη διαφόρων τύπων βιοεξανθρακωμάτων και διαφορετικών χρόνων παραμονής στο έδαφος (Gao et. al., 2018). Οι Gao και άλλοι ερευνητές (2018), βρήκαν μια αρνητική συσχέτιση μεταξύ του διαθέσιμου φωσφόρου και του λόγου C:N του βιοεξανθρακώματος καθώς και ότι η διαθεσιμότητα του φωσφόρου ήταν μέγιστη σε ελαφρώς όξινα προς ουδέτερα εδάφη και χαμηλή σε πολύ όξινα ή

αλκαλικά εδάφη. Το βιοεξανθράκωμα μπορεί να αποτελέσει πιθανό φωσφορικό λίπασμα (Schneider and Haderlein, 2016). Σύμφωνα με μελέτες που πραγματοποιήθηκαν εξετάστηκαν διάφοροι τύποι βιοεξανθρακωμάτων και σημειώθηκε ότι το βιοεξανθράκωμα μπορεί να λειτουργήσει ως ένα λίπασμα βραδείας αποδέσμευσης στα εδάφη (Schneider and Haderlein, 2016). Σε εδάφη με χαμηλή ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων το βιοεξανθράκωμα μπορεί να επηρεάσει τη διαθεσιμότητα και τον κύκλο του φωσφόρου (DeLuca et al., 2015). Αρκετές μελέτες έχουν δείξει ότι το βιοεξανθράκωμα μπορεί να μεταβάλει την τιμή του pH αυξάνοντας το pH στα όξινα εδάφη (Mbagwu, 1989 & Matsubara et al, 2002 & Lehmann et al, 2003). Η αύξηση στην τιμή του pH που παρατηρείται κατά την προσθήκη βιοεξανθρακώματος σε όξινα εδάφη είναι εξαιτίας της αυξημένης συγκέντρωσης των βασικών κατιόντων (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+}) στο βιοεξανθράκωμα (Steiner et al., 2007). Αντίθετα η προσθήκη βιοεξανθρακώματος σε ουδέτερα ή αλκαλικά εδάφη μπορεί να έχει περιορισμένη επίδραση στη διαθεσιμότητα του φωσφόρου καθώς η προσθήκη βασικών κατιόντων θα οδηγήσει σε μείωση της διαθεσιμότητας του φωσφόρου εξαιτίας της αύξησης του ασβεστίου (DeLuca et al., 2015).

Συνοψίζοντας τα σημαντικά χαρακτηριστικά των βιοεξανθρακωμάτων που επηρεάζουν το βιογεωχημικό κύκλο του φωσφόρου είναι η μεγάλη ειδική επιφάνεια, το pH και η περιεκτικότητα σε θρεπτικά στοιχεία (Gul and Whalen 2016). Αυτά τα χαρακτηριστικά ποικίλουν ανάλογα με την πηγή προέλευσης του βιοεξανθρακώματος και τη θερμοκρασία παραγωγής του (Gul and Whalen 2016). Τα βιοεξανθρακώματα που προέρχονται από κοπριά και φυτικά υπολείμματα έχουν υψηλότερη περιεκτικότητα σε θρεπτικά στοιχεία, έχουν υψηλότερο pH και μεγαλύτερο εμβαδόν επιφάνειας σε σύγκριση με τα βιοεξανθρακώματα που έχουν προέλθει από ξύλο (Gul et al., 2015).

1.4 Απώλειες φωσφόρου από το έδαφος

Κατά τη διάρκεια ενός γεγονότος βροχόπτωσης δύο διεργασίες που λαμβάνουν χώρα είναι η επιφανειακή απορροή και η έκπλυση (Keke and Bo, 2020). Αυτές οι διεργασίες είναι οι δύο βασικές υδρολογικές διαδρομές μέσω των οποίων ο φώσφορος μεταφέρεται από τα αγροτικά οικοσυστήματα στα υδατικά οικοσυστήματα (Keke and Bo, 2020). Συχνά θεωρείται ότι η απώλεια του φωσφόρου μέσω επιφανειακής απορροής και διάβρωσης του εδάφους είναι πιο συχνή και η απομάκρυνση του φωσφόρου μέσω της έκπλυσης δεν παίζει τόσο σημαντικό ρόλο (Sharpley & Menzel, 1987 & Sims et al., 1998 & Ruark et al., 2014). Ωστόσο μελέτες έχουν δείξει πως η συχνή συσσώρευση φωσφόρου στο έδαφος πάνω από μια κρίσιμη τιμή μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της έκπλυσης του φωσφόρου από το έδαφος (Bai et al., 2013 & Jalali and Jalali, 2017). Ο τύπος του εδάφους όπως και η κοκκομετρική του σύσταση επηρεάζουν σημαντικά την έκπλυση του φωσφόρου (Hesketh & Brookes, 2000; Maguire & Sims, 2002). Για το λόγο αυτό η έκπλυση του φωσφόρου μπορεί να αυξηθεί σημαντικά κάτω από τον συνδυασμό ορισμένων γεωργικών πρακτικών και εδαφικών ιδιοτήτων (Jalali and Jalali, 2017). Εδάφη στα οποία δεν έχει προστεθεί κάποιο εδαφοβελτιωτικό παρουσιάζουν μεγαλύτερη έκπλυση φωσφόρου σε σχέση με εδάφη στα οποία έχει προστεθεί κάποιο εδαφοβελτιωτικό όπως για παράδειγμα βιοεξανθράκωμα (Ukwattage et al., 2020). Σύμφωνα με τον Ukwattage και άλλους ερευνητές, (2020) η προσθήκη βιοεξανθρακώματος σε αμμώδη εδάφη υποτροπικών περιοχών

της τάξης των Ultisols αυξάνουν σημαντικά την ικανότητα συγκράτησης του φωσφόρου στο έδαφος μειώνοντας την έκπλυση του από αυτό.

2. Σκοπός

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής είναι η μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς του φωσφόρου καθώς και των απωλειών του κάτω από ένα σενάριο έντονης βροχόπτωσης σε ένα πηλοαμμώδες έδαφος μετά την προσθήκη δυο διαφορετικών βιοεξανθρακωμάτων.

3. Υλικά και Μέθοδοι

3.1 Επεξεργασία εδάφους και βιοεξανθρακωμάτων

Το εδαφικό δείγμα αφού συλλέχθηκε, αεροξηράνθηκε και κοσκινίστηκε με κόσκινο διαμέτρου 2 mm. Τα βιοεξανθρακώματα κοσκινίστηκαν με κόσκινο διαμέτρου 2 mm.

Το πρώτο βιοεξανθράκωμα (B1) έχει προκύψει από κλαδοκάθαρο ελιάς μέσω πυρόλυσης στους 600 °C για μία ώρα. Περιέχει 767 g/kg οργανικό άνθρακα, 8.1 g/kg ολικό άζωτο, 4.4 g φώσφορο και 104 mg/kg χαλκό. Η τιμή pH του είναι 8.28 ενώ η ειδική του επιφάνεια 375 m²/g (Zafeiriou et. al., 2023)

Το δεύτερο βιοεξανθράκωμα (B2) είναι εμπορικό. Η ιστοσελίδα της εταιρείας που το παρασκευάζει είναι η ακόλουθη <https://bellabiochar.com/>. Η πρώτη ύλη που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή του είναι ξυλώδη υπολείμματα από διαλογή αστικών αποβλήτων. Ωστόσο δεν υπάρχουν περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τον τρόπο που παρασκευάστηκε και την χημική του σύσταση.

3.2 Πειραματική διαδικασία

Για όλες τις πειραματικές διαδικασίες χρησιμοποιήθηκαν πλαστικές στήλες ύψους 16 cm και διαμέτρου 4.7 cm (εικόνα 1).



Εικόνα 1: Στήλες που χρησιμοποιήθηκαν για την πειραματική διαδικασία

Στον πάτο κάθε στήλης υπήρχε οπή μέσω της οποίας συγκεντρώθηκε το εδαφικό εκχύλισμα. Για την αποφυγή απώλειας εδάφους και την εξασφάλιση συγκέντρωσης μόνο εδαφικού διαλύματος, στον πάτο της κάθε στήλης τοποθετήθηκε δίχτυ με πολύ λεπτό πλέγμα και από πάνω ηθμός (διηθητικό χαρτί).

Κατά τη διάρκεια της πρώτης πειραματικής διαδικασίας δημιουργήθηκαν συνολικά εικοσιτέσσερις στήλες. Στις πρώτες δώδεκα στήλες οι δύο διαφορετικοί τύποι βιοεξανθρακωμάτων τοποθετήθηκαν σε επιφανειακή στρώση πάνω από το εδαφικό δείγμα, ενώ στις υπόλοιπες τα βιοεξανθρακώματα ενσωματώθηκαν με το εδαφικό δείγμα πριν τοποθετηθούν μέσα στις στήλες. Στην κάθε στήλη τοποθετήθηκαν 250 gr εδαφικού δείγματος. Το βιοεξανθράκωμα B1 τοποθετήθηκε σε συγκέντρωση 2%, το B2 σε συγκέντρωση 2% και στο συνδυασμό των δύο βιοεξανθρακωμάτων τοποθετήθηκε 2% B1 και 2% B2. Οι ίδιες ακριβώς ποσότητες τοποθετήθηκαν στην περίπτωση που τα βιοεξανθρακώματα ενσωματώθηκαν στο εδαφικό δείγμα.

Στη συνέχεια στην κάθε στήλη διοχετεύθηκαν 105 ml απιονισμένου νερού σε διάρκεια μίας ώρας. Η διοχέτευση του νερού πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια μιας προχοΐδας. Η συγκεκριμένη ποσότητα νερού σε συγκεκριμένο χρόνο προσομοιάζει ένα γεγονός έντονης βροχόπτωσης, γεγονός τα οποία λαμβάνουν συχνά χώρα στον Ελλαδικό χώρο τα τελευταία χρόνια. Πιο συγκεκριμένα η ποσότητα του νερού που διοχετεύθηκε στις εδαφικές στήλες προσομοιάζει ένα γεγονός βροχόπτωσης 60 mm/h (60 tn/στρεμμα) (Εθνος, 2019).

Κάτω από κάθε στήλη τοποθετήθηκε φιάλη ζέσεως στην οποία συγκεντρωνόταν το εδαφικό εκχύλισμα της κάθε στήλης. Σε καθένα από αυτά μετρήθηκε ο όγκος του εδαφικού εκχυλίσματος που συγκεντρώθηκε, η τιμή του pH, η αγωγιμότητα, τα υδατοδιαλυτά στοιχεία νάτριο, κάλιο, ασβέστιο και μαγνήσιο καθώς και η συγκέντρωση του φωσφόρου.

3.2.1 pH

Ο προσδιορισμός της τιμής του pH πραγματοποιήθηκε ηλεκτρομετρικά με τη βοήθεια πεχαμέτρου (J.P. SELECTA PH-2005 PH METER).

3.2.1 EC

Ο προσδιορισμός της αγωγιμότητας πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια αγωγιμόμετρου (J. P. SELECTA CD-2005 CONDUCTIVITY METER).

3.2.1 Υδατοδιαλυτά κατιόντα

Για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης των υδατοδιαλυτών κατιόντων το εκχύλισμα που συγκεντρώθηκε αρχικά διηθήθηκε με τη βοήθεια ηθμού. Ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης των στοιχείων νάτριο και κάλιο έγινε με τη βοήθεια φλογοφωτομέτρου (MICROPROCESSOR FLAMEPHOTOMETER), ενώ των στοιχείων ασβέστιο και μαγνήσιο με τη βοήθεια του φασματοφωτομέτρου ατομικής απορρόφησης (VARIAN AA240FS).

3.2.1 Φώσφορος

Τέλος ο προσδιορισμός του φωσφόρου πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο ανάπτυξης χρώματος κατά Murphry-Riley. Πιο συγκεκριμένα σε ογκομετρική φιάλη των 50 ml τοποθετήθηκε κατάλληλη ποσότητα εδαφικού εκχυλίσματος, 10 ml απιονισμένου νερού και 10 ml ασκορβικού οξέος. Έπειτα πραγματοποιήθηκε συμπλήρωση του όγκου μέχρι την χαραγή της φιάλης και τα δείγματα αφέθηκαν σε ηρεμία για 30 min για την ανάπτυξη του μπλε χρώματος. Μετά την ανάπτυξη του χρώματος η συγκέντρωση του φωσφόρου προσδιορίστηκε με τη βοήθεια σπεκτροφωτομέτρου στα 880 nm.

Κατά τη διάρκεια της δεύτερης πειραματικής διαδικασίας χρησιμοποιήθηκαν στήλες όπου το βιοεξανθράκωμα τοποθετήθηκε σε επιφανειακή στρώση μέσα σε αυτές. Με τη βοήθεια προχοΐδας διοχετεύθηκαν 105 ml διαλύματος φωσφόρου συγκέντρωσης 100 ppm. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν όλες οι μετρήσεις που προαναφέρθηκαν.

Κατά τη διάρκεια της τρίτης πειραματικής διαδικασίας διοχετεύθηκε με τη βοήθεια προχοΐδας απιονισμένο νερό στις στήλες που είχε διοχετευθεί διάλυμα φωσφόρου συγκέντρωσης 100 ppm. Και σε αυτές τις στήλες πραγματοποιήθηκαν οι παραπάνω μετρήσεις.

Στην εικόνα 1 παρουσιάζεται η εικόνα της εδαφικής στήλης στην οποία το βιοεξανθράκωμα έχει τοποθετηθεί σε επιφανειακή στρώση, μετά το πέρας των πειραματικών διαδικασιών.



Εικόνα 2: Εδαφική στήλη στο τέλος της πειραματικής διαδικασίας

3.3 Στατιστική επεξεργασία αποτελεσμάτων

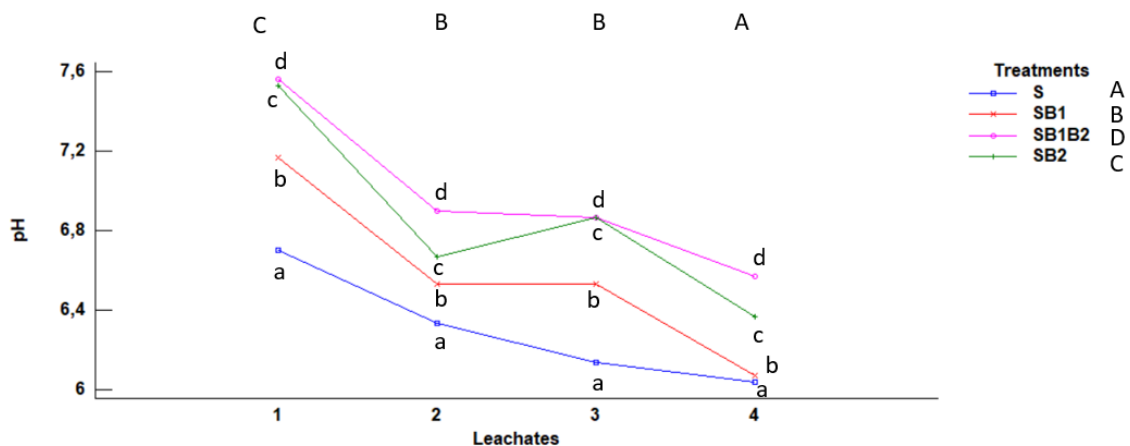
Η στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων του πειράματος έγινε με ανάλυση διακύμανσης Anova με τη βοήθεια του προγράμματος Stat-graphics. Οι σημαντικές διαφορές προσδιορίστηκαν σύμφωνα με τη δοκιμή LSD σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=0.05$.

4. Αποτελέσματα – Συζήτηση

4.1 Πρώτη πειραματική διαδικασία

Βιοεξανθράκωμα τοποθετημένο σε επιφανειακή στρώση στην εδαφική στήλη

4.1.1 pH

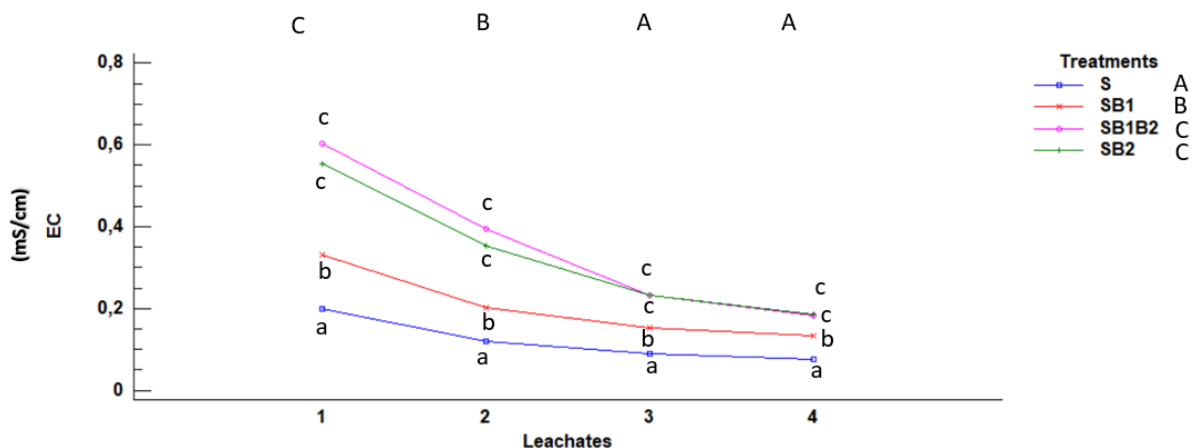


Διάγραμμα 1. 1: Επίδραση των διαφορετικών επεμβάσεων στην τιμή pH των εκχυλισμάτων. Μέσοι όροι για τον ίδιο αριθμό εκχύλισης συνοδευόμενοι από διαφορετικά μικρά γράμματα διαφέρουν στατιστικά σημαντικά σύμφωνα με τη δοκιμασία πολλαπλών συγκρίσεων του LSD σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=0.05$. Τα κεφαλαία γράμματα στο άνω μέρος του διαγράμματος καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ του αριθμού εκχύλισης, ανεξαρτήτως της επέμβασης που εφαρμόστηκε. Τα κεφαλαία γράμματα στο υπόμνημα (στη δεξιά πλευρά του διαγράμματος) καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων, ανεξαρτήτως του αριθμού των εκχυλίσεων.

Σύμφωνα με το διάγραμμα 1.1 υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των μεταχειρίσεων στην τιμή του pH. Μεταξύ των εκχυλίσεων παρατηρείται στατιστικά σημαντική διαφορά εκτός από την περίπτωση της δεύτερης και της τρίτης εκχύλισης όπου δεν έχουμε στατιστικά σημαντική διαφορά. Η μεγαλύτερη τιμή pH σημειώνεται όταν έχουν προστεθεί στο έδαφος και τα δύο είδη βιοεξανθρακωμάτων (SB1SB2). Οι μεταχειρίσεις S και SB1 παρουσιάζουν στατιστικά σημαντική διαφορά στις αρχικές εκχυλίσεις. Ωστόσο παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των εκχυλίσεων (τέταρτη εκχύλιση) το pH του εκχυλίσματος της επέμβασης SB1 μειώνεται και τείνει προς την τιμή του μάρτυρα (pH=6) εξακολουθώντας να εμφανίζει στατιστικά σημαντική διαφορά. Τα αποτελέσματα του διαγράμματος 1.1 επιβεβαιώνουν ότι η επίδραση του βιοεξανθρακώματος στο pH εξαρτάται από τον τύπο καθώς και τη διαδικασία παρασκευής του. Γενικά οι τιμές pH των βιοεξανθρακωμάτων είναι αλκαλικές και κυμαίνονται από 7,1 έως 10,5 (Lehmann et al., 2011). Σύμφωνα με τον Yuan και άλλους ερευνητές (2011), βιοεξανθρακώματα που έχουν προκύψει από υπολείμματα αραβόσιτου,

φιστικιού και σόγιας είχαν αλκαλικά pH με τιμές 9.4, 8.6 και 7.7 αντίστοιχα, ενώ εκείνα που είχαν ως πρώτη ύλη ελαιοκράμβη είχαν τιμή pH κοντά στο 6.5. Σύμφωνα με τον Tag και άλλους ερευνητές (2016), το βιοεξανθράκωμα που έχει προκύψει έχοντας ως πρώτη ύλη ξυλώδη υπολείμματα έχει χαμηλότερη τιμή pH κατά δύο μονάδες σε σχέση με άλλα βιοεξανθρακώματα που έχουν προκύψει από διαφορετική βιομάζα κάτω από τις ίδιες συνθήκες πυρόλυσης. Η τιμή pH του εκχυλίσματος στην περίπτωση που έχει προστεθεί το βιοεξανθράκωμα B1 είναι μικρότερη από την τιμή του εκχυλίσματος στην περίπτωση που έχει προστεθεί το βιοεξανθράκωμα B2. Το βιοεξανθράκωμα B1 έχει προκύψει από κλαδοκάθαρο ελιάς, μέσω πυρόλυσης στους 600 °C και η τιμή pH του είναι ίση με 8.28 (Zafeiriou et. al., 2023). Το βιοεξανθράκωμα B2 έχει προκύψει από ξυλώδη υπολείμματα από διαλογή αστικών αποβλήτων. Συνεπώς μπορούμε να υποθέσουμε ότι λόγω των συνθηκών πυρόλυσής του ή και των πρώτων υλών που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή του έχει τη δυνατότητα να αυξάνει περισσότερο την τιμή του pH σε σχέση με το βιοεξανθράκωμα B1. Σύμφωνα με τους Sigua και άλλους ερευνητές το 2016, σε πείραμα που πραγματοποιήθηκε σε γλάστρες σε αμμοπηλώδες έδαφος, σημειώθηκε αύξηση στην τιμή του pH κατά 70% σε σχέση με το μάρτυρα όταν σε αυτό προστέθηκε βιοεξανθράκωμα το οποίο είχε πρώτη ύλη φυτικής και ζωικής προέλευσης (υπολείμματα πεύκου και κοπριά πουλερικών σε αναλογία 50:50 w/w). Η αύξηση αυτή ήταν η μεγαλύτερη που σημειώθηκε για όλες τις μεταχειρίσεις. Η διαφορά μεταξύ των μεταχειρίσεων ήταν στις διαφορετικές συγκεντρώσεις των δύο πρώτων υλών που είχε το βιοεξανθράκωμα. Η αύξηση της τιμής του pH στο έδαφος κατά την προσθήκη βιοεξανθρακώματος έχει παρατηρηθεί και από άλλους ερευνητές όπου κατά την προσθήκη βιοεξανθρακώματος, που είχε ως πρώτη ύλη υπολείμματα ρυζιού και κελύφη από σπόρους βαμβακιού, σε πείραμα που πραγματοποιήθηκε στον αγρό σε ασβεστούχα εδάφη της τάξης των Fluvisols η τιμή του pH αυξήθηκε (Liang et al., 2014). Ενώ έχει σημειωθεί σε πολλές μελέτες ότι η προσθήκη βιοεξανθρακώματος στο έδαφος γενικά αυξάνει την τιμή του pH υπάρχουν μελέτες στις οποίες έχει σημειωθεί μείωση αυτού. Στις περιπτώσεις αυτές το βιοεξανθράκωμα που χρησιμοποιείται έχει τροποποιηθεί κατάλληλα για την κάθε περίπτωση. Σε πείραμα που πραγματοποιήθηκε σε γλάστρες σε ασβεστούχα εδάφη, παρατηρήθηκε μείωση της τιμής του pH μετά την προσθήκη βιοεξανθρακώματος το οποίο είχε τροποποιηθεί με τη βοήθεια αέριου αζώτου στους 800 °C (Ippolito et al., 2016).

4.1.2 EC

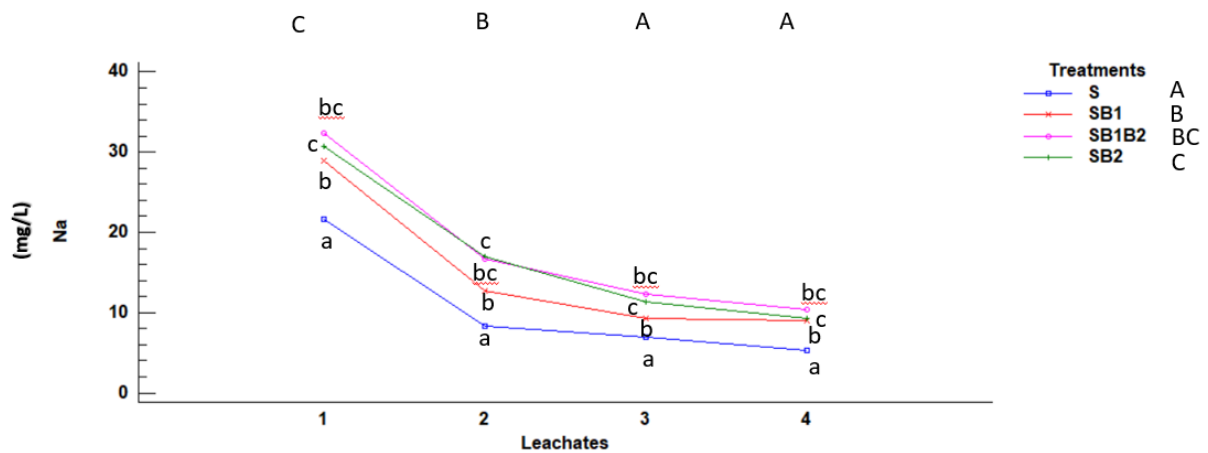


Διάγραμμα 1. 2: Επίδραση των διαφορετικών επεμβάσεων στην αγωγιμότητα των εκχυλισμάτων. . Μέσοι όροι για τον ίδιο αριθμό εκχύλισης συνοδευόμενοι από διαφορετικά μικρά γράμματα διαφέρουν στατιστικά σημαντικά σύμφωνα με τη δοκιμασία πολλαπλών συγκρίσεων του LSD σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=0.05$. Τα κεφαλαία γράμματα στο άνω μέρος του διαγράμματος καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ του αριθμού εκχύλισης, ανεξαρτήτως της επέμβασης που εφαρμόστηκε. Τα κεφαλαία γράμματα στο υπόμνημα (στη δεξιά πλευρά του διαγράμματος) καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων, ανεξαρτήτως του αριθμού των εκχυλίσεων.

Σύμφωνα με το διάγραμμα 1.2 η αγωγιμότητα παρουσιάζει στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ της πρώτης, της δεύτερης και της τρίτης εκχύλισης, ενώ η τέταρτη και η τρίτη εκχύλιση δεν παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ τους. Επίσης παρατηρείται στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ της μεταχείρισης S με τις μεταχειρίσεις SB1, SB1B2 και SB2, ενώ οι μεταχειρίσεις SB1B2 και SB2 δεν παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικές διαφορές. Η μεγαλύτερη τιμή της αγωγιμότητας παρατηρείται στη μεταχείριση SB1B2 κατά την πρώτη εκχύλιση. Ωστόσο παρατηρείται ότι με την πάροδο των εκχυλίσεων (τέταρτη εκχύλιση) οι τιμές της αγωγιμότητας του εκχυλίσματος για τις διάφορες μεταχειρίσεις τείνουν να ισορροπήσουν σε μια τιμή συνεχίζοντας να έχουν ωστόσο στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ τους. Θα μπορούσε να υποθεθεί ότι με αύξηση του αριθμού των εκχυλίσεων οι τιμές της αγωγιμότητας του εκχυλίσματος για τις διάφορες μεταχειρίσεις θα εξισορροπούσαν σε μια τιμή χωρίς να παρουσιάζουν στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ τους. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία η αγωγιμότητα του εδάφους επηρεάζεται σημαντικά από την εφαρμογή βιοεξανθρακώματος στο έδαφος. Σε κάθε περίπτωση η τιμή της εξαρτάται από τη θερμοκρασία της πυρόλυσης καθώς και από την πρώτη ύλη από την οποία προέκυψε το βιοεξανθράκωμα. Σύμφωνα με τους Sigua και άλλους ερευνητές το 2016, σε πείραμα που πραγματοποιήθηκε σε γλάστρες σε αμμοπηλώδες έδαφος, σημειώθηκε σημαντική αύξηση της αγωγιμότητας του εδάφους όταν σε αυτό είχε προστεθεί βιοεξανθράκωμα το οποίο είχε πρώτη ύλη φυτικής και ζωικής προέλευσης (υπολείμματα πεύκου και κοπριά πουλερικών σε αναλογία 50:50 w/w). Βιοεξανθρακώματα που έχουν προκύψει από πυρόλυση υπολειμμάτων αραβόσιτου σε θερμοκρασία 732 °C, πυρόλυση υπολειμμάτων από το φυτό switchgrass σε θερμοκρασία 824, 796 και 775 ° C, αύξησαν την τιμή της αγωγιμότητας του εδάφους κατά 54, 125, 135 και 186 $\mu\text{S}/\text{cm}$ αντίστοιχα σε σχέση με την τιμή του μάρτυρα (Brewer et al., 2011). Συνεπώς τόσο η πρώτη ύλη όσο και η θερμοκρασία στην

οποία πραγματοποιείται η πυρόλυση του βιοεξανθρακώματος παίζει σημαντικό ρόλο στην τιμή της αγωγιμότητας του εδάφους, η οποία επηρεάζει άμεσα την αγωγιμότητα του εκχυλίσματος που προκύπτει από αυτό.

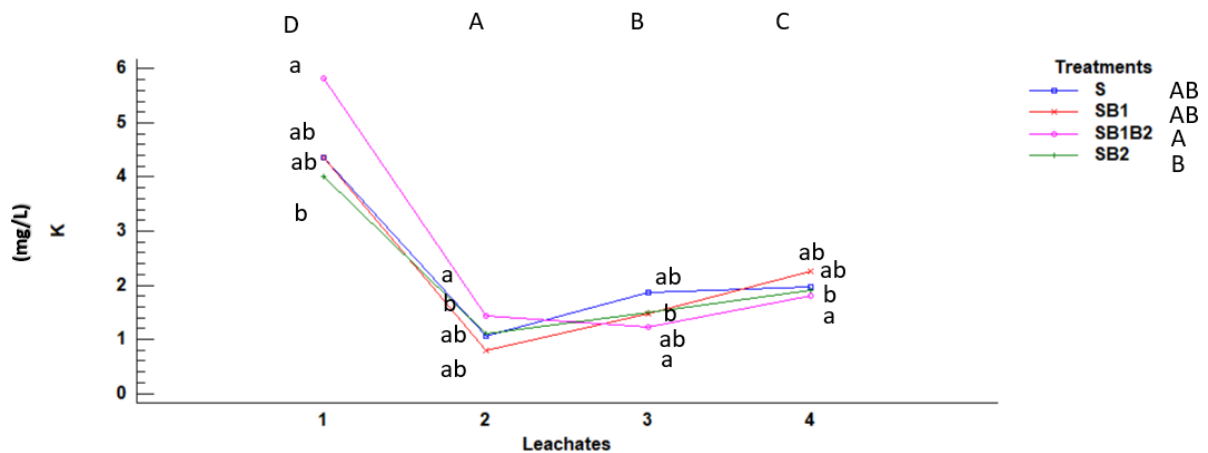
4.1.3 Υδατοδιαλυτά κατιόντα



Διάγραμμα 1. 3: Επίδραση των διαφορετικών επεμβάσεων στη συγκέντρωση του νατρίου στα εκχυλίσματα. Μέσοι όροι για τον ίδιο αριθμό εκχύλισης συνοδευόμενοι από διαφορετικά μικρά γράμματα διαφέρουν στατιστικά σημαντικά σύμφωνα με τη δοκιμασία πολλαπλών συγκρίσεων του LSD σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=0.05$. Τα κεφαλαία γράμματα στο άνω μέρος του διαγράμματος καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ του αριθμού εκχύλισης, ανεξαρτήτου της επέμβασης που εφαρμόστηκε. Τα κεφαλαία γράμματα στο υπόμνημα (στη δεξιά πλευρά του διαγράμματος) καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων, ανεξαρτήτως του αριθμού των εκχυλίσεων.

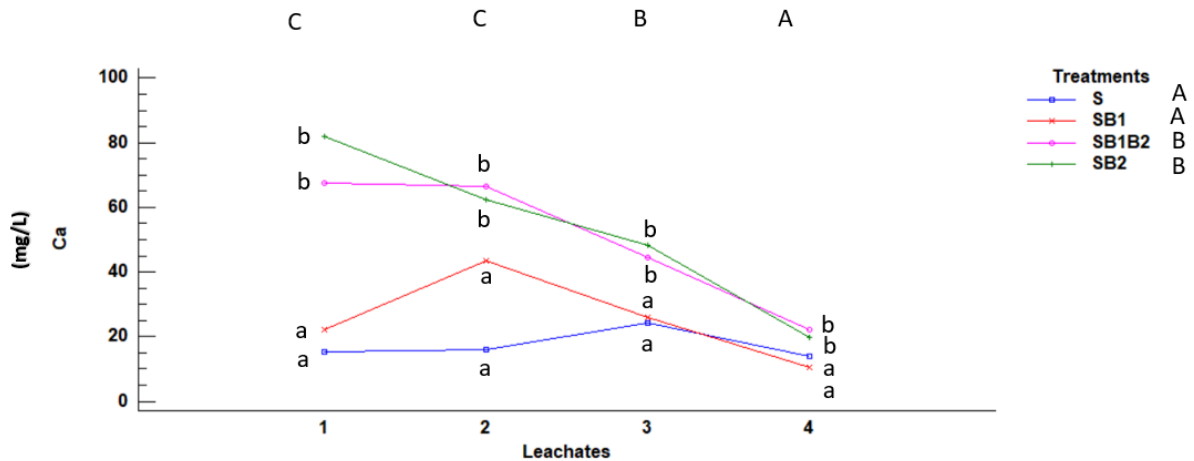
Σύμφωνα με το διάγραμμα 1.3 η συγκέντρωση του νατρίου παρουσιάζει στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ της πρώτης και δεύτερης εκχύλισης. Ενώ η τρίτη και η τέταρτη εκχύλιση δεν παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ τους παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικές διαφορές με τις υπόλοιπες εκχυλίσεις. Οι μεταχειρίσεις στις οποίες έχει προστεθεί βιοεξανθράκωμα παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικές διαφορές με το μάρτυρα αλλά δεν παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ τους. Η μεγαλύτερη συγκέντρωση νατρίου στο εκχύλισμα παρατηρείται κατά τη πρώτη εκχύλιση. Υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των μεταχειρίσεων SB1 και SB2 με τη συγκέντρωση του νατρίου στο εκχύλισμα να είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση της δεύτερης. Αυτό σημαίνει ότι το βιοεξανθράκωμα B2 είναι πιο πλούσιο σε νάτριο από το βιοεξανθράκωμα B1, επιβεβαιώνοντας την διαφορετική προέλευση του B2 από τη ξυλώδη βιομάζα του B1. Σύμφωνα με τους Brewer et al 2011, η εφαρμογή βιοεξανθρακώματος το οποίο προήλθε από ξυλώδη υπολείμματα οδήγησε σε συγκέντρωση νατρίου στο μίγμα εδάφους βιοεξανθρακώματος από 0.3-0.4 meq/100 g εδάφους. Σε μίγματα εδάφους και βιοεξανθρακωμάτων που έχουν προκύψει από πυρόλυση υπολειμμάτων αραβόσιτου σε θερμοκρασίες από 500 έως 723 °C η συγκέντρωση του νατρίου κυμάνθηκε από 0.3-0.7 meq/100 g εδάφους, σε εκείνα που έχουν προκύψει από το

φυτό *Panicum virgatum* (switchgrass) σε θερμοκρασίες από 450 έως 824 °C κυμάνθηκαν από 0.3-2.3 meq/100 g εδάφους.



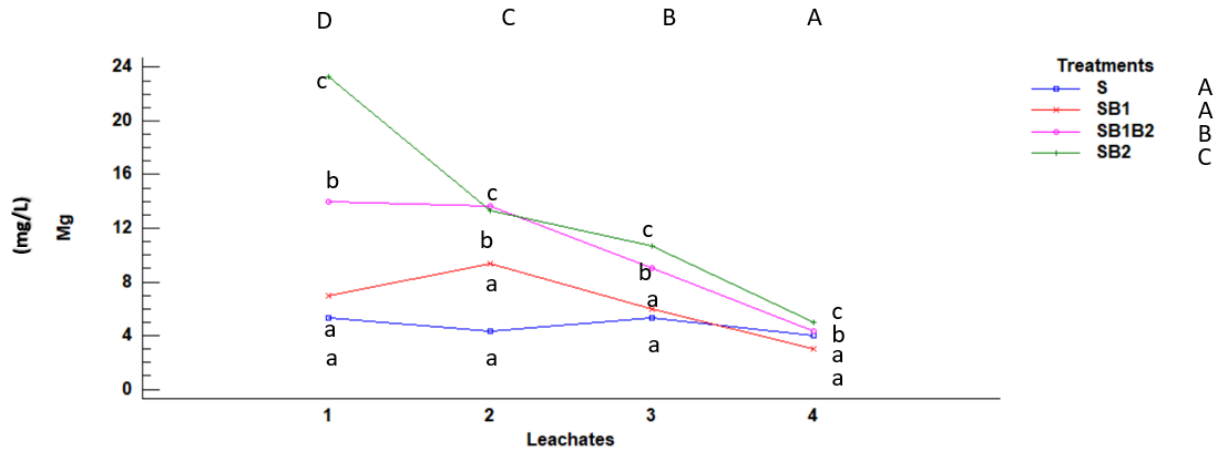
Διάγραμμα 1. 4: Επίδραση των διαφορετικών επεμβάσεων στη συγκέντρωση του καλίου στα εκχυλίσματα. Μέσοι όροι για τον ίδιο αριθμό εκχύλισης συνοδευόμενοι από διαφορετικά μικρά γράμματα διαφέρουν στατιστικά σημαντικά σύμφωνα με τη δοκιμασία πολλαπλών συγκρίσεων του LSD σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=0.05$. Τα κεφαλαία γράμματα στο άνω μέρος του διαγράμματος καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ του αριθμού εκχύλισης, ανεξαρτήτως της επέμβασης που εφαρμόστηκε. Τα κεφαλαία γράμματα στο υπόμνημα (στη δεξιά πλευρά του διαγράμματος) καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων, ανεξαρτήτως του αριθμού των εκχυλίσεων.

Σύμφωνα με το διάγραμμα 1.4 η συγκέντρωση του καλίου παρουσιάζει στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των εκχυλίσεων. Οι μεταχειρίσεις που παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ τους είναι οι μεταχειρίσεις SB1B2 και SB2. Αρκετές έρευνες έχουν δείξει ότι η συγκέντρωση του καλίου στο έδαφος και συνεπώς στο εδαφικό εκχύλισμα επηρεάζεται από τον τύπο του βιοεξανθράκωματος που προστίθεται. Σε πείραμα που πραγματοποιήθηκε σε γλάστρες, σε πηλοαμμώδες έδαφος με βιοεξανθράκωμα που είχε ως πρώτη ύλη υπολείμματα φλοιού από ευκάλυπτο η συγκέντρωση του διαθέσιμου καλίου στο έδαφος αυξήθηκε κατά 633% σε σχέση με το μάρτυρα (Tanure et al, 2019). Σε πείραμα που πραγματοποιήθηκε σε γλάστρες σε ασβεστούχο αμμώδες έδαφος με βιοεξανθράκωμα που είχε προκύψει από υπολείμματα καλλιέργειας αραβόσιτου σημειώθηκε σημαντική αύξηση του καλίου στο έδαφος (Abu Zied Amin, 2016). Επιπλέον σε πείραμα που πραγματοποιήθηκε σε εδαφικές στήλες σε έδαφος της τάξης των Ultisols με κοκκομετρική σύσταση silty loam/silty clay loam με βιοεξανθράκωμα σε ποσότητα 1% w/w και είχε ως πρώτη ύλη λυματολάσπη παρατηρήθηκε σημαντική μείωση της έκπλυσης του καλίου (Yuan et al., 2016). Το αποτέλεσμα αυτό επιβεβαιώνεται από το παραπάνω διάγραμμα καθώς παρατηρούμε ότι η συγκέντρωση του καλίου στο εκχύλισμα κατά την δεύτερη εκχύλιση μειώθηκε σημαντικά σε σχέση με την πρώτη.



Διάγραμμα 1. 5: Επίδραση των διαφορετικών επεμβάσεων στη συγκέντρωση του ασβεστίου στα εκχυλίσματα. . Μέσοι όροι για τον ίδιο αριθμό εκχύλισης συνοδευόμενοι από διαφορετικά μικρά γράμματα διαφέρουν στατιστικά σημαντικά σύμφωνα με τη δοκιμασία πολλαπλών συγκρίσεων του LSD σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=0.05$. Τα κεφαλαία γράμματα στο άνω μέρος του διαγράμματος καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ του αριθμού εκχύλισης, ανεξαρτήτως της επέμβασης που εφαρμόστηκε. Τα κεφαλαία γράμματα στο υπόμνημα (στη δεξιά πλευρά του διαγράμματος) καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων, ανεξαρτήτως του αριθμού των εκχυλίσεων.

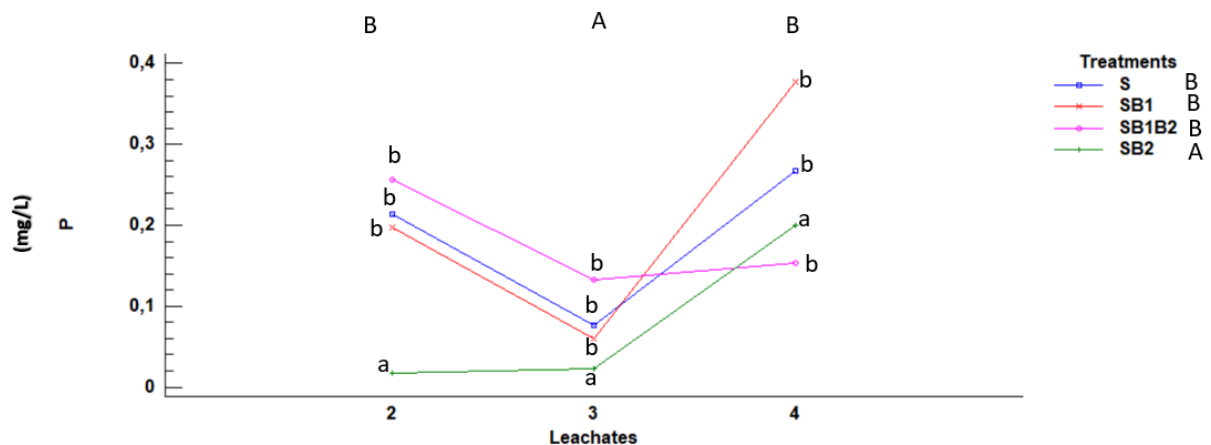
Σύμφωνα με το διάγραμμα 1.5 η συγκέντρωση του ασβεστίου στην πρώτη και δεύτερη εκχύλιση παρουσιάζει στατιστικά σημαντικές διαφορές με την τρίτη και την τέταρτη εκχύλιση. Οι μεταχειρίσεις S και SB1 παρουσιάζουν στατιστικά σημαντική διαφορά με τις μεταχειρίσεις SB1B2 και SB2. Με την πάροδο των εκχυλίσεων (τέταρτη εκχύλιση) παρατηρούμε ότι όλες οι μεταχειρίσεις τείνουν να εξισορροπήσουν σε μια τιμή έχοντας ωστόσο στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των μεταχειρίσεων (S-SB1 και SB1B2-SB2). Θα μπορούσαμε να υποθέσουμε ότι εάν συνεχίζονταν οι εκχυλίσεις θα εξισορροπούσαν σε μια τιμή χωρίς να υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ τους. Όπως προαναφέρθηκε ανάλογα με την πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται ως βιομάζα για την παραγωγή βιοεξανθρακώματος και τη θερμοκρασία πυρόλυσης η συγκέντρωση ανόργανων στοιχείων στο βιοεξανθράκωμα όπως για παράδειγμα ασβεστίου μεταβάλλεται. Σύμφωνα με τους Brewer και άλλους ερευνητές (2011) η υψηλότερη συγκέντρωση ασβεστίου (89 mg/100 g εδάφους) σημειώθηκε στην περίπτωση μίγματος εδάφους-βιοεξανθρακώματος που είχε προκύψει από πυρόλυση φυτικών υπολειμμάτων του φυτού *Panicum virgatum*, στους 796 °C, ενώ η συγκέντρωση του ασβεστίου σε μίγματα εδάφους-βιοεξανθρακώματος που είχαν προκύψει από πυρόλυση υπολειμμάτων ξύλου κυμάνθηκε από 15 έως 42 mg/100 g εδάφους, για τις διάφορες θερμοκρασίες πυρόλυσης.



Διάγραμμα 1. 6: Επίδραση των διαφορετικών επεμβάσεων στη συγκέντρωση του μαγνησίου στα εκχυλίσματα. . Μέσοι όροι για τον ίδιο αριθμό εκχύλισης συνοδευόμενοι από διαφορετικά μικρά γράμματα διαφέρουν στατιστικά σημαντικά σύμφωνα με τη δοκιμασία πολλαπλών συγκρίσεων του LSD σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=0.05$. Τα κεφαλαία γράμματα στο άνω μέρος του διαγράμματος καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ του αριθμού εκχύλισης, ανεξαρτήτου της επέμβασης που εφαρμόστηκε. Τα κεφαλαία γράμματα στο υπόμνημα (στη δεξιά πλευρά του διαγράμματος) καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων, ανεξαρτήτως του αριθμού των εκχυλίσεων.

Σύμφωνα με το διάγραμμα 1.6 υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των εκχυλίσεων. Οι μεταχειρίσεις SB1B2 και SB2 παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων S και SB1. Πιο συγκεκριμένα η συγκέντρωση του μαγνησίου μειώνεται από την πρώτη μέχρι την τέταρτη εκχύλιση. Από το διάγραμμα παρατηρείται η ίδια τάση εξορρόπησης της συγκέντρωσης του εκχυλίσματος όπως αναφέρθηκε και στην περίπτωση των άλλων κατιόντων (Na, K, Ca). Η μεγαλύτερη συγκέντρωση του μαγνησίου παρατηρείται κατά την εφαρμογή του βιοεξανθρακώματος B2 ενώ η προσθήκη του βιοεξανθρακώματος B1 δεν αυξάνει τη συγκέντρωση του μαγνησίου στο εκχύλισμα. Όπως προαναφέρθηκε η πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται ως βιομάζα για την παραγωγή βιοεξανθρακώματος και η θερμοκρασία πυρόλυσης μεταβάλλουν τη συγκέντρωση ανόργανων στοιχείων στο βιοεξανθράκωμα όπως για παράδειγμα του μαγνησίου. Σύμφωνα με τους Brewer και άλλους ερευνητές (2011), η συγκέντρωση του μαγνησίου σε μίγματα εδάφους-βιοεξανθρακώματος το οποίο είχε προκύψει από φυτικά υπολείμματα αραβόσιτου κυμάνθηκε από 5 έως 25 meq/100 g εδάφους, ενώ σε βιοεξανθράκωμα που είχε ως πρώτη ύλη ξυλώδη υπολείμματα κυμάνθηκε από 2 έως 4 meq/100 g εδάφους για τις διάφορες θερμοκρασίες πυρόλυσης. Συνεπώς μπορεί να υποθεθεί ότι το βιοεξανθράκωμα B2 δεν περιέχει μόνο ξυλώδη υπολείμματα αλλά προέρχεται από συνδυασμό διαφορετικών βιομαζών καθώς αυξάνει σημαντικά τη συγκέντρωση του μαγνησίου στο εκχύλισμα σε σχέση με το μάρτυρα.

4.1.4 Φώσφορος



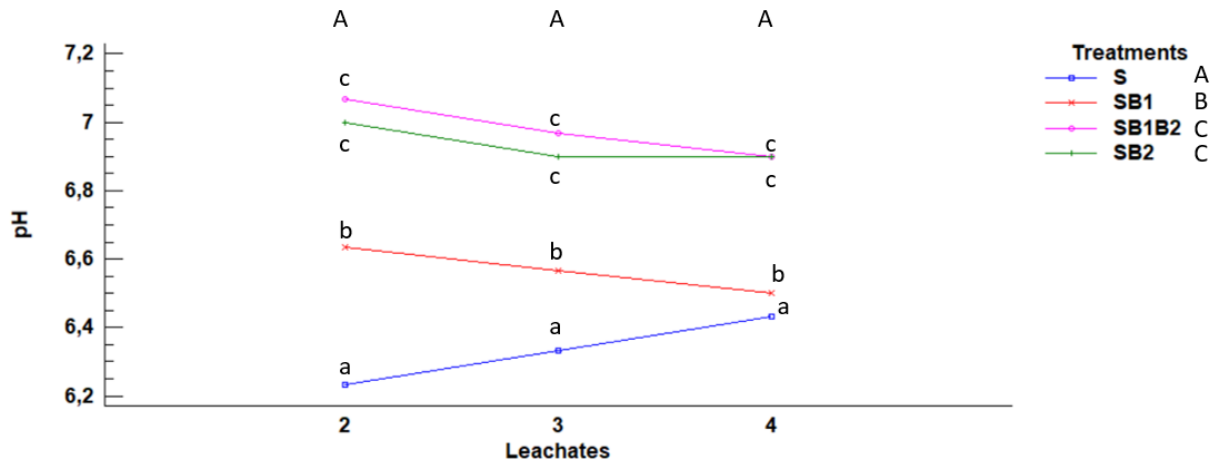
Διάγραμμα 1. 7: Επίδραση των διαφορετικών επεμβάσεων στη συγκέντρωση του φωσφόρου στα εκχυλίσματα. Μέσοι όροι για τον ίδιο αριθμό εκχύλισης συνοδευόμενοι από διαφορετικά μικρά γράμματα διαφέρουν στατιστικά σημαντικά σύμφωνα με τη δοκιμασία πολλαπλών συγκρίσεων του LSD σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=0.05$. Τα κεφαλαία γράμματα στο άνω μέρος του διαγράμματος καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ του αριθμού εκχύλισης, ανεξαρτήτως της επέμβασης που εφαρμόστηκε. Τα κεφαλαία γράμματα στο υπόμνημα (στη δεξιά πλευρά του διαγράμματος) καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων, ανεξαρτήτως του αριθμού των εκχυλίσεων.

Σύμφωνα με το διάγραμμα 1.7 υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ της δεύτερης και τέταρτης εκχύλισης με την τρίτη εκχύλιση. Η μεταχείριση SB2 παρουσιάζει στατιστικά σημαντικές διαφορές με όλες τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις. Η μικρότερη συγκέντρωση του φωσφόρου παρατηρείται στη δεύτερη εκχύλιση για όλες τις μεταχειρίσεις. Η μεταχείριση SB2 παρουσιάζει σημαντική στατιστική διαφορά από τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις. Η συγκέντρωση του φωσφόρου σε αυτή τη μεταχείριση έχει τη μικρότερη τιμή, γεγονός που δείχνει ότι το βιοεξανθράκωμα B2 έχει περισσότερες θέσεις συγκράτησης σε σχέση με το βιοεξανθράκωμα B1. Σε πείραμα που πραγματοποιήθηκε σε αμμώδες έδαφος, η εφαρμογή βιοεξανθρακώματος που είχε ως πρώτη ύλη ξυλώδη υπολείμματα αύξησε την προσροφητική ικανότητα του εδάφους, η οποία είναι μικρή εξαιτίας της κοκκομετρική σύστασης, σε φώσφορο σε σχέση με το μάρτυρα (Gao and Deluca, 2018). Σύμφωνα με τον Yao και άλλους ερευνητές (2012), η προσθήκη βιοεξανθρακώματος (2% w/w/) που είχε προκύψει από κελύφη φιστικιών αύξησε την έκπλυση του φωσφόρου κατά 39,1% σε αμμώδες έδαφος, ενώ η προσθήκη βιοεξανθρακώματος (2% w/w/) που έχει προκύψει από το φυτό *Schinus terebinthifolia* σε αμμώδες έδαφος οδήγησε σε μείωση της έκπλυσης του φωσφόρου από το έδαφος κατά 20.6%. Ωστόσο σύμφωνα με τον Amarakoon και άλλους ερευνητές (2019) σε πηλοαμμώδες έδαφος στο οποίο προστέθηκε βιοεξανθράκωμα από ξυλώδη υπολείμματα η προσρόφηση του φωσφόρου στο έδαφος μειώθηκε. Πολλές μελέτες δείχνουν ότι η περιεκτικότητα του βιοεξανθρακώματος σε φώσφορο εξαρτάται από την πρώτη ύλη που χρησιμοποιήθηκε κατά την πυρόλυσή του (Li et al., 2019). Πιο συγκεκριμένα η περιεκτικότητα αυτή ακολουθεί την παρακάτω φθίνουσα σειρά: κόκκαλα ζώων, λυματολάσπες, κοπριά, πούδη φυτά και ξυλώδη υπολείμματα (Li et al., 2019). Επίσης η θερμοκρασία κάτω από την οποία πραγματοποιείται η πυρόλυση παίζει σημαντικό ρόλο στην περιεκτικότητα του βιοεξανθρακώματος σε φώσφορο (Keiluweit et al., 2010). Όσο αυξάνεται η

θερμοκρασία της πυρόλυσης τόσο αυξάνεται και η ποσότητα του φωσφόρου που περιέχεται στο βιοεξανθράκωμα (Chang et al., 2013). Το βιοεξανθράκωμα που έχει προκύψει σε υψηλές θερμοκρασίες πυρόλυσης (>500 °C) διαθέτει μεγάλη ειδική επιφάνεια (>400 m²/g) και έχει υψηλή περιεκτικότητα σε αρωματικές ενώσεις (Keiluweit et al., 2010) με αποτέλεσμα να εμφανίζει ανθεκτικότητα στην αποσύνθεση (Joseph et al., 2010). Στην περίπτωση αυτή ο φώσφορος συγκρατείται ισχυρά στο βιοεξανθράκωμα και για το λόγο αυτό όταν εφαρμοστεί στο έδαφος μπορεί να λειτουργήσει ως λίπασμα βραδείας αποδέσμευσης. Οι Zhao και συνεργάτες 2022 παρατήρησαν ότι η τροποποίηση βιοεξανθρακώματος με λανθάνιο οδηγεί σε υψηλότερη συγκράτηση φωσφόρου μετά την προσθήκη στο έδαφος σε σχέση με το μάρτυρα. Αρκετές έρευνες έχουν δείξει ότι η εφαρμογή του βιοεξανθρακώματος στο έδαφος μπορεί να μειώσει τις απώλειες του φωσφόρου μέσω έκπλυσης ή μέσω απορροής. Σύμφωνα με τους Kuorramaki και άλλους ερευνητές (2016) σε εργαστηριακό πείραμα στο οποίο χρησιμοποιήθηκε βιοεξανθράκωμα από ξύλο σημύδας σημειώθηκε μείωση των απωλειών φωσφόρου κατά 25%. Σε πείραμα που πραγματοποιήθηκε σε γλάστρες σε αμμώδη εδάφη με βιοεξανθράκωμα που είχε ως πρώτη ύλη υπολείμματα καλλιέργειας καλαμποκιού και είχε τροποποιηθεί με ένυδρο θειικό σίδηρο σημειώθηκε σημαντική μείωση των απωλειών του φωσφόρου κατά 99.5% σε σχέση με το μάρτυρα (Liu et al., 2015). Σε πείραμα που πραγματοποιήθηκε σε θερμοκήπιο η προσθήκη βιοεξανθρακώματος που προήλθε από υπολείμματα ιτιάς σε εδάφη της τάξης των Oxisols οδήγησε σε μείωση των απωλειών του φωσφόρου κατά 32.43% σε σχέση με το μάρτυρα (Agegnehu et al., 2015). Σύμφωνα με τον Laird και άλλους ερευνητές (2010), σε πείραμα με εδαφικές στήλες σε εδάφη της τάξης των Mollisols σημειώθηκε σημαντική μείωση των απωλειών του φωσφόρου (69%) στα οποία χρησιμοποιήθηκε βιοεξανθράκωμα (20 g/kg) από ξυλώδη υπολείμματα (βελανιδιά και καρυά). Ωστόσο υπάρχουν μελέτες οι οποίες δείχνουν ότι η προσθήκη βιοεξανθρακώματος στο έδαφος δεν επηρεάζει ή ακόμα μπορεί να αυξήσει τις απώλειες του φωσφόρου. Οι Iqbal και συνεργάτες 2015 σε πείραμα με εδαφικές στήλες με αμμώδη εδάφη όπου χρησιμοποιήθηκε βιοεξανθράκωμα από υπολείμματα πεύκου δεν παρατήρησαν καμία διαφορά στις απώλειες του φωσφόρου σε σχέση με το μάρτυρα. Αντίθετα σε πείραμα με εδαφικές στήλες σε αμμώδη εδάφη με τη χρήση βιοεξανθρακώματος από υπολείμματα λεύκας σημειώθηκε αύξηση των απωλειών του φωσφόρου κατά 99% σε σχέση με το μάρτυρα (Bradley et al., 2015). Η αύξηση αυτή των απωλειών μπορεί να οφείλεται είτε στον κορεσμό των θέσεων προσρόφησης του φωσφόρου στο βιοεξανθράκωμα είτε στην απελευθέρωση μεγάλων ποσοτήτων διαλυτού φωσφόρου που υπάρχουν στο βιοεξανθράκωμα (Troy et al., 2014). Συνεπώς η πρώτη ύλη από την οποία προέρχεται το βιοεξανθράκωμα παίζει σημαντικό ρόλο στη συμπεριφορά του στο έδαφος και συνεπώς στο εδαφικό διάλυμα.

Βιοεξανθράκωμα ενσωματωμένο στις εδαφικές στήλες

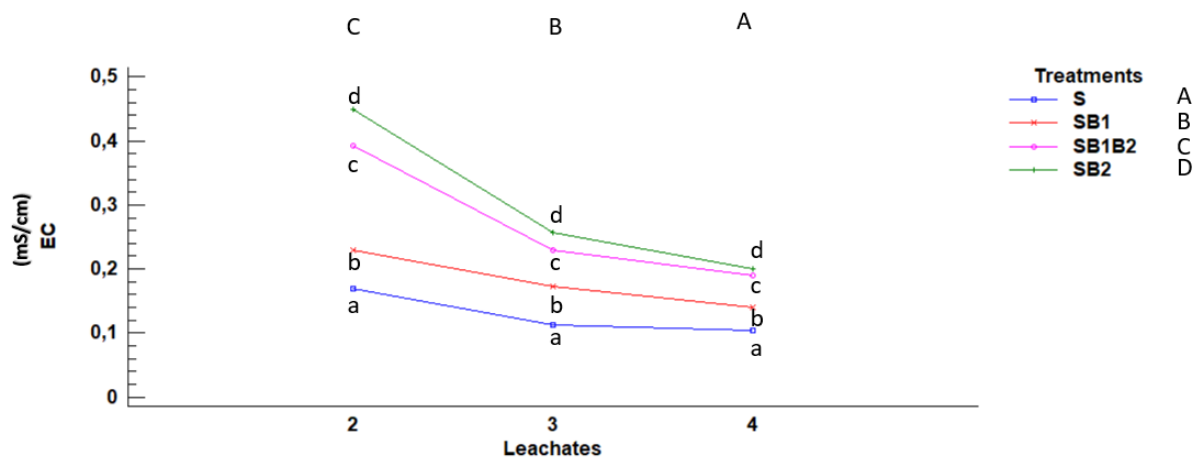
4.1.8 pH



Διάγραμμα 2. 1: Επίδραση των διαφορετικών επεμβάσεων στην τιμή pH των εκχυλισμάτων. Μέσοι όροι για τον ίδιο αριθμό εκχύλισης συνοδευόμενοι από διαφορετικά μικρά γράμματα διαφέρουν στατιστικά σημαντικά σύμφωνα με τη δοκιμασία πολλαπλών συγκρίσεων του LSD σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=0.05$. Τα κεφαλαία γράμματα στο άνω μέρος του διαγράμματος καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ του αριθμού εκχύλισης, ανεξαρτήτως της επέμβασης που εφαρμόστηκε. Τα κεφαλαία γράμματα στο υπόμνημα (στη δεξιά πλευρά του διαγράμματος) καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων, ανεξαρτήτως του αριθμού των εκχυλίσεων.

Η τάση που παρατηρείται στο διάγραμμα 2.1 είναι παρόμοια με εκείνη του διαγράμματος 1.1. Η μόνη διαφορά που σημειώνεται είναι ότι ενώ στην περίπτωση που το βιοεξανθράκωμα έχει τοποθετηθεί σε επιφανειακή στρώση υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των εκχυλίσεων, στην περίπτωση που το βιοεξανθράκωμα έχει ενσωματωθεί στο έδαφος δεν έχουμε στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των εκχυλίσεων.

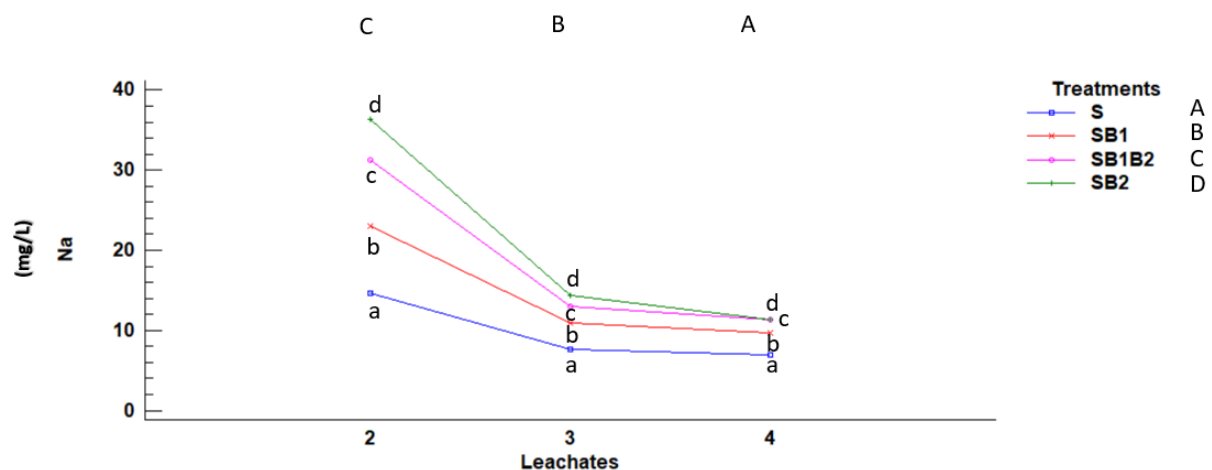
4.1.9 EC



Διάγραμμα 2. 2: Επίδραση των διαφορετικών επεμβάσεων στην αγωγιμότητα των εκχυλισμάτων. . Μέσοι όροι για τον ίδιο αριθμό εκχύλισης συνοδευόμενοι από διαφορετικά μικρά γράμματα διαφέρουν στατιστικά σημαντικά σύμφωνα με τη δοκιμασία πολλαπλών συγκρίσεων του LSD σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=0.05$. Τα κεφαλαία γράμματα στο άνω μέρος του διαγράμματος καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ του αριθμού εκχύλισης, ανεξαρτήτου της επέμβασης που εφαρμόστηκε. Τα κεφαλαία γράμματα στο υπόμνημα (στη δεξιά πλευρά του διαγράμματος) καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων, ανεξαρτήτως του αριθμού των εκχυλίσεων.

Σύμφωνα με το διάγραμμα 2.2 η τιμή της αγωγιμότητας παρουσιάζει στατιστικά σημαντικές διαφορές τόσο μεταξύ των εκχυλίσεων όσο και των μεταχειρίσεων. Σε όλες τις περιπτώσεις η τιμή της μειώνεται με την πάροδο των εκχυλίσεων. Η μεγαλύτερη τιμή της σημειώνεται κατά τη δεύτερη εκχύλιση στην περίπτωση που έχουμε προσθέσει το βιοεξανθράκωμα B2. Η τάση που παρατηρείται στο διάγραμμα 2.2 είναι ίδια με αυτή του διαγράμματος 1.2.

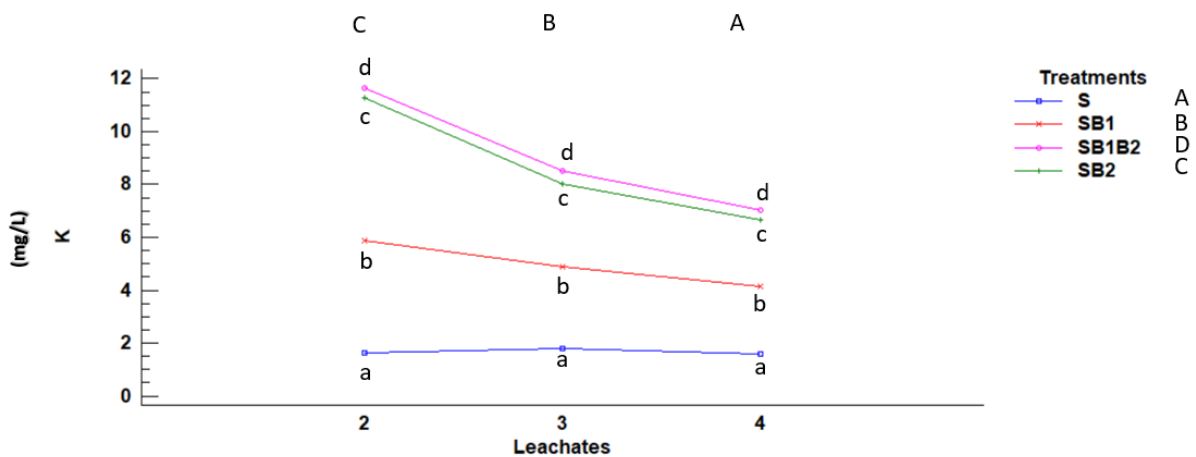
4.1.10 Υδατοδιαλυτά κατιόντα



Διάγραμμα 2. 3: Επίδραση των διαφορετικών επεμβάσεων στη συγκέντρωση του νατρίου στα εκχυλίσματα.. Μέσοι όροι για τον ίδιο αριθμό εκχύλισης συνοδευόμενοι από διαφορετικά μικρά γράμματα διαφέρουν στατιστικά σημαντικά σύμφωνα με τη δοκιμασία πολλαπλών συγκρίσεων του LSD σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=0.05$. Τα κεφαλαία γράμματα στο άνω μέρος του διαγράμματος καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ του αριθμού εκχύλισης, ανεξαρτήτου της επέμβασης που

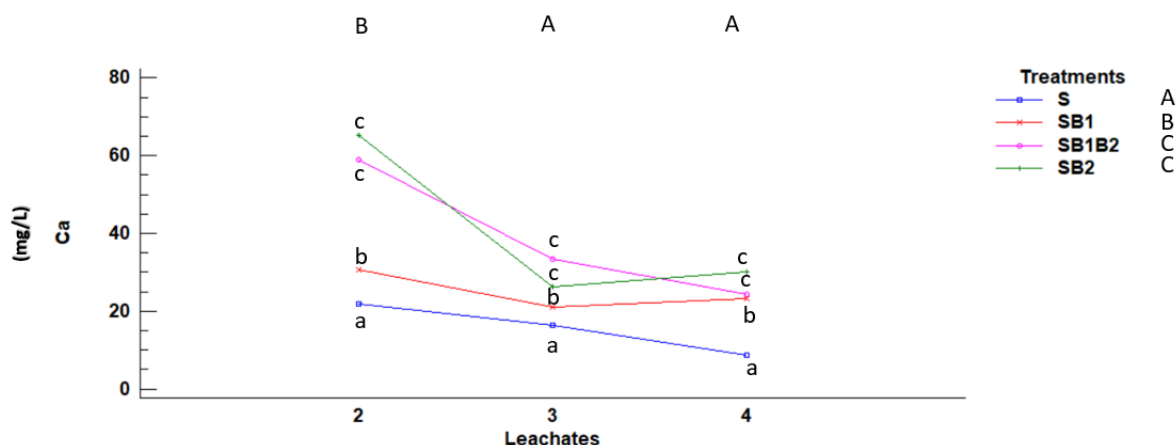
εφαρμόστηκε. Τα κεφαλαία γράμματα στο υπόμνημα (στη δεξιά πλευρά του διαγράμματος) καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων, ανεξαρτήτως του αριθμού των εκχυλίσεων.

Σύμφωνα με το διάγραμμα 2.3 η συγκέντρωση του νατρίου παρουσιάζει στατιστικά σημαντικές διαφορές τόσο μεταξύ των εκχυλίσεων όσο και μεταξύ των μεταχειρίσεων. Η μεγαλύτερη συγκέντρωση σημειώνεται στη μεταχείριση SB2 κατά τη δεύτερη εκχύλιση. Το διάγραμμα 2.3 παρουσιάζει την ίδια τάση με το διάγραμμα 1.3.



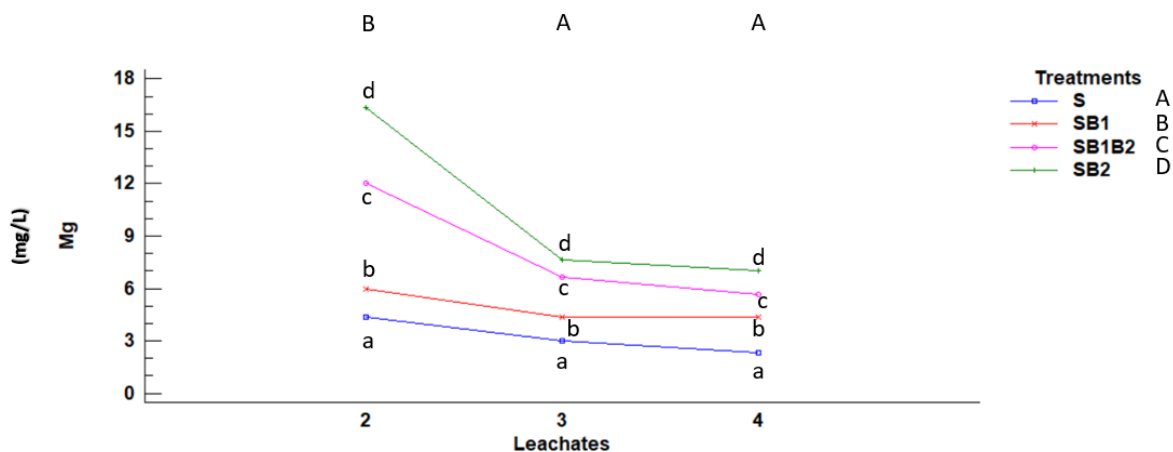
Διάγραμμα 2. 4: Επίδραση των διαφορετικών επεμβάσεων στη συγκέντρωση του καλίου στα εκχυλίσματα. Μέσοι όροι για τον ίδιο αριθμό εκχύλισης συνοδευόμενοι από διαφορετικά μικρά γράμματα διαφέρουν στατιστικά σημαντικά σύμφωνα με τη δοκιμασία πολλαπλών συγκρίσεων του LSD σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=0.05$. Τα κεφαλαία γράμματα στο άνω μέρος του διαγράμματος καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ του αριθμού εκχύλισης, ανεξαρτήτως της επέμβασης που εφαρμόστηκε. Τα κεφαλαία γράμματα στο υπόμνημα (στη δεξιά πλευρά του διαγράμματος) καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων, ανεξαρτήτως του αριθμού των εκχυλίσεων.

Σύμφωνα με το διάγραμμα 2.4 η συγκέντρωση του καλίου παρουσιάζει στατιστικά σημαντικές διαφορές τόσο μεταξύ των εκχυλίσεων όσο και των μεταχειρίσεων. Η μεγαλύτερη συγκέντρωση καλίου σημειώνεται στη μεταχείριση SB1B2 κατά τη δεύτερη εκχύλιση, ενώ η μικρότερη συγκέντρωση σημειώνεται στην περίπτωση που δεν έχει προστεθεί βιοεξανθράκωμα. Είναι γνωστό ότι η πρώτη ύλη από την οποία προέρχεται το βιοεξανθράκωμα καθώς και οι συνθήκες πυρόλυσης επηρεάζουν τις φυσικοχημικές παραμέτρους του βιοεξανθρακώματος καθώς και τη συγκέντρωση των στοιχείων που το αποτελούν (Tomczyk et al., 2020; Weber and Quicker, 2018). Σύμφωνα με τους Biliias και άλλους ερευνητές (2023) βιοεξανθρακώματα τα οποία έχουν ως πρώτη ύλη γεωργικά υπολείμματα ή βιομηχανικά υπολείμματα (υπολείμματα από βιομηχανικές καλλιέργειες) έχουν μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε κάλιο σε σύγκριση με αυτά που έχουν ως πρώτη ύλη ξυλώδη γεωργικά υπολείμματα, κοπριά πουλερικών, κελύφη και υπολείμματα ρυζιού. Το βιοεξανθράκωμα B1 έχει προκύψει από κλαδοκάθαρο ελιάς, δηλαδή από ξυλώδη γεωργικά υπολείμματα. Συνεπώς αυτό εξηγεί γιατί η συγκέντρωση του καλίου που μετρήθηκε στο εκχύλισμα που συγκεντρώθηκε είναι μικρή.



Διάγραμμα 2. 5: Επίδραση των διαφορετικών επεμβάσεων στη συγκέντρωση του ασβεστίου στα εκχυλίσματα. . Μέσοι όροι για τον ίδιο αριθμό εκχύλισης συνοδευόμενοι από διαφορετικά μικρά γράμματα διαφέρουν στατιστικά σημαντικά σύμφωνα με τη δοκιμασία πολλαπλών συγκρίσεων του LSD σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=0.05$. Τα κεφαλαία γράμματα στο άνω μέρος του διαγράμματος καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ του αριθμού εκχύλισης, ανεξαρτήτου της επέμβασης που εφαρμόστηκε. Τα κεφαλαία γράμματα στο υπόμνημα (στη δεξιά πλευρά του διαγράμματος) καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων, ανεξαρτήτως του αριθμού των εκχυλίσεων.

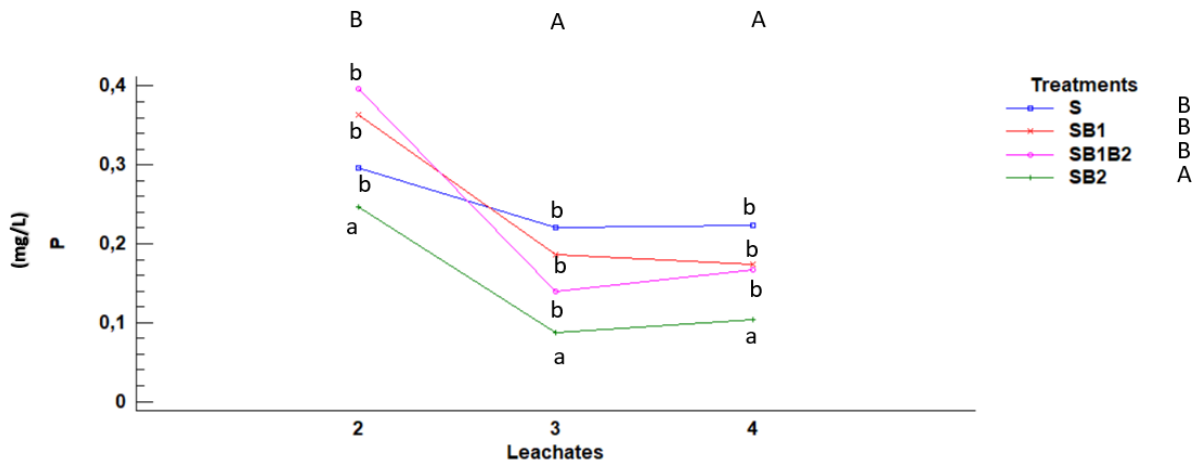
Σύμφωνα με το διάγραμμα 2.5 παρουσιάζεται στατιστικά σημαντική διαφορά ανάμεσα στην δεύτερη εκχύλιση με την τρίτη και τέταρτη εκχύλιση. Επίσης οι μεταχειρίσεις SB1B2 και SB2 παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ της μεταχείρισης SB1 και της μεταχείρισης SB2. Το διάγραμμα 2.5 ακολουθεί παρόμοια τάση με το διάγραμμα 1.5.



Διάγραμμα 2. 6: Επίδραση των διαφορετικών επεμβάσεων στη συγκέντρωση του μαγνησίου στα εκχυλίσματα.. Μέσοι όροι για τον ίδιο αριθμό εκχύλισης συνοδευόμενοι από διαφορετικά μικρά γράμματα διαφέρουν στατιστικά σημαντικά σύμφωνα με τη δοκιμασία πολλαπλών συγκρίσεων του LSD σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=0.05$. Τα κεφαλαία γράμματα στο άνω μέρος του διαγράμματος καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ του αριθμού εκχύλισης, ανεξαρτήτου της επέμβασης που εφαρμόστηκε. Τα κεφαλαία γράμματα στο υπόμνημα (στη δεξιά πλευρά του διαγράμματος) καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων, ανεξαρτήτως του αριθμού των εκχυλίσεων.

Σύμφωνα με το διάγραμμα 2.6 η συγκέντρωση του μαγνησίου παρουσιάζει στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων. Επίσης παρουσιάζεται στατιστικά σημαντική διαφορά ανάμεσα στην δεύτερη εκχύλιση με την τρίτη και τέταρτη εκχύλιση. Η μεγαλύτερη συγκέντρωση μαγνησίου σημειώνεται στη μεταχείριση SB2 κατά τη δεύτερη εκχύλιση. Το διάγραμμα 2.6 παρουσιάζει την ίδια τάση με το διάγραμμα 1.6.

4.1.11 Φώσφορος

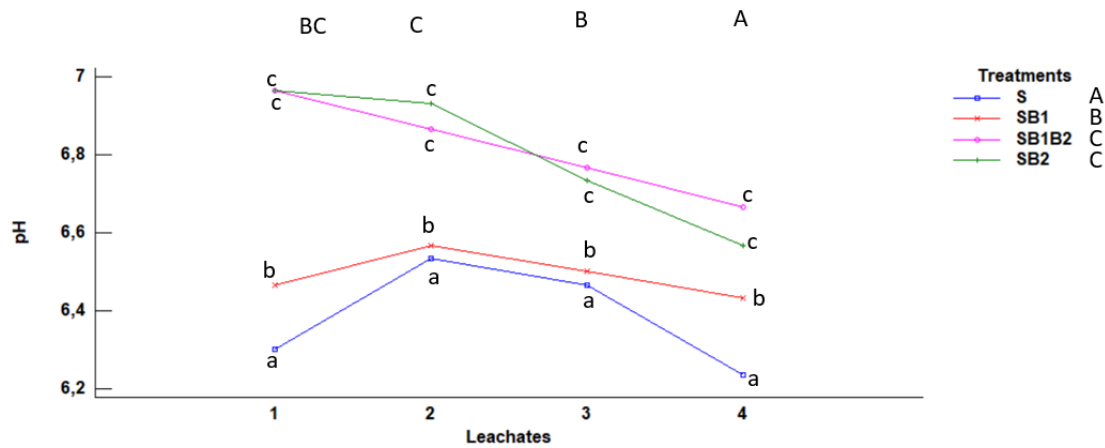


Διάγραμμα 2. 7: Επίδραση των διαφορετικών επεμβάσεων στη συγκέντρωση του φωσφόρου στα εκχυλίσματα. . Μέσοι όροι για τον ίδιο αριθμό εκχύλισης συνοδευόμενοι από διαφορετικά μικρά γράμματα διαφέρουν στατιστικά σημαντικά σύμφωνα με τη δοκιμασία πολλαπλών συγκρίσεων του LSD σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=0.05$. Τα κεφαλαία γράμματα στο άνω μέρος του διαγράμματος καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ του αριθμού εκχύλισης, ανεξαρτήτου της επέμβασης που εφαρμόστηκε. Τα κεφαλαία γράμματα στο υπόμνημα (στη δεξιά πλευρά του διαγράμματος) καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων, ανεξαρτήτως του αριθμού των εκχυλίσεων.

Σύμφωνα με το διάγραμμα 2.7 υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά ανάμεσα στη δεύτερη εκχύλιση με την τρίτη και τέταρτη εκχύλιση. Επίσης η μεταχείριση SB2 παρουσιάζει στατιστικά σημαντικές διαφορές με τις υπόλοιπες εκχυλίσεις, στην οποία σημειώνεται και η μικρότερη συγκέντρωση φωσφόρου. Τα διαγράμματα 1.7 και 2.7 παρουσιάζουν την ίδια τάση, ωστόσο η συγκέντρωση του φωσφόρου στο εκχύλισμα στην περίπτωση που το βιοεξανθράκωμα έχει τοποθετηθεί σε επιφανειακή στρώση στο έδαφος είναι μικρότερη. Ωστόσο σύμφωνα με τον Schnell και άλλους ερευνητές (2012), σε πηλοαμμώδη εδάφη όπου το βιοεξανθράκωμα εφαρμόστηκε στην επιφάνεια το 14-20% του φωσφόρου του βιοεξανθρακώματος εκπλύθηκε μετά από δύο γεγονότα βροχόπτωσης ενώ στην περίπτωση όπου το βιοεξανθράκωμα ενσωματώθηκε στο έδαφος η απώλεια ήταν μικρότερη από 3%.

4.3 Δεύτερη πειραματική διαδικασία

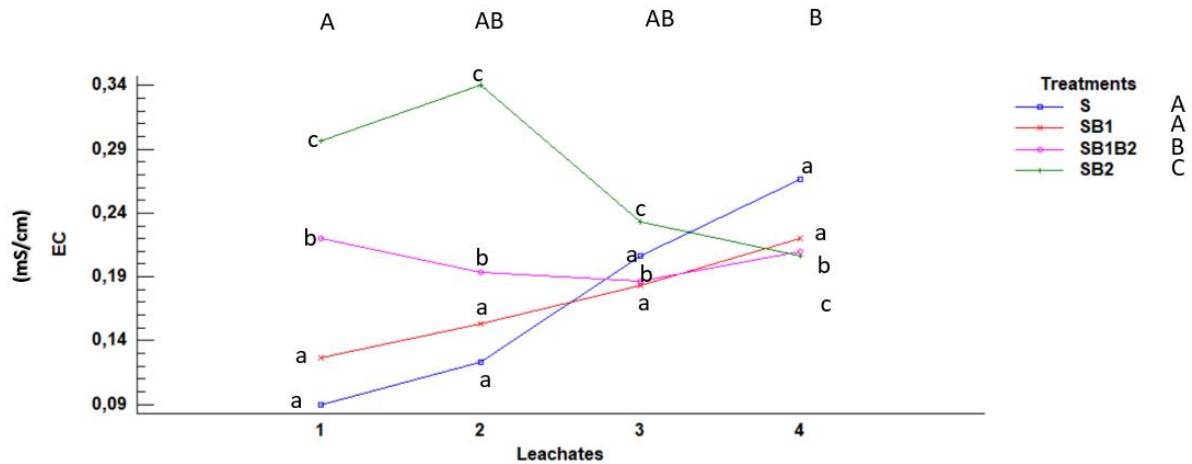
4.3.1 pH



Διάγραμμα 3. 1: Επίδραση των διαφορετικών επεμβάσεων στην τιμή pH των εκχυλισμάτων. Μέσοι όροι για τον ίδιο αριθμό εκχύλισης συνοδευόμενοι από διαφορετικά μικρά γράμματα διαφέρουν στατιστικά σημαντικά σύμφωνα με τη δοκιμασία πολλαπλών συγκρίσεων του LSD σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=0.05$. Τα κεφαλαία γράμματα στο άνω μέρος του διαγράμματος καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ του αριθμού εκχύλισης, ανεξαρτήτως της επέμβασης που εφαρμόστηκε. Τα κεφαλαία γράμματα στο υπόμνημα (στη δεξιά πλευρά του διαγράμματος) καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων, ανεξαρτήτως του αριθμού των εκχυλίσεων.

Σύμφωνα με το διάγραμμα 3.1 η διακύμανση της τιμής pH παρουσιάζει στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων SB1B2 και SB2 με την μεταχείριση S και με την μεταχείριση SB1. Η δεύτερη και τρίτη εκχύλιση δεν παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικές διαφορές με την πρώτη εκχύλιση ωστόσο υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των τριών τελευταίων εκχυλίσεων.

4.3.2 EC

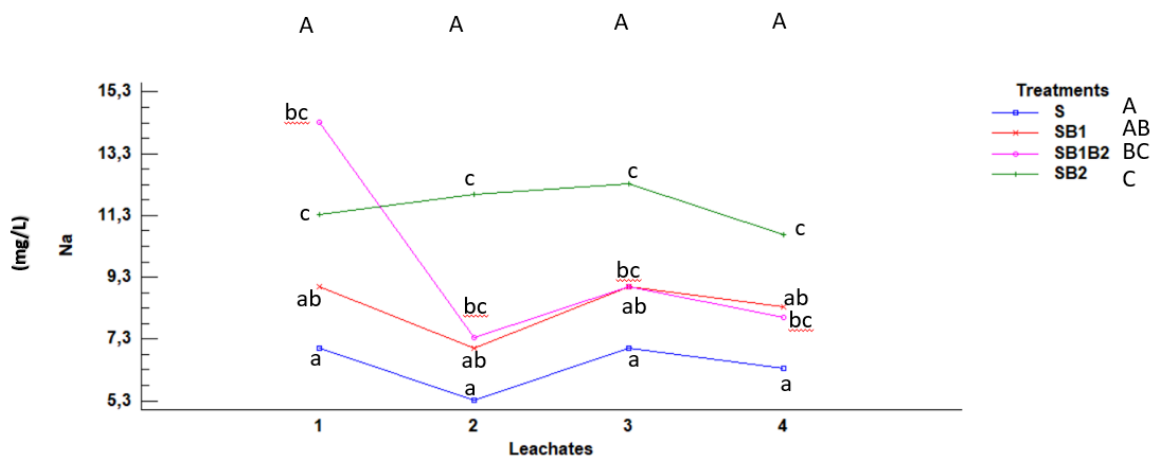


Διάγραμμα 3. 2: Επίδραση των διαφορετικών επεμβάσεων στην αγωγιμότητα των εκχυλισμάτων. . Μέσοι όροι για τον ίδιο αριθμό εκχύλισης συνοδευόμενοι από διαφορετικά μικρά γράμματα διαφέρουν στατιστικά σημαντικά σύμφωνα με τη δοκιμασία πολλαπλών συγκρίσεων του LSD σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=0.05$. Τα κεφαλαία γράμματα στο άνω μέρος του διαγράμματος καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ του αριθμού εκχύλισης, ανεξαρτήτου της επέμβασης που εφαρμόστηκε. Τα κεφαλαία γράμματα στο υπόμνημα (στη δεξιά πλευρά του διαγράμματος) καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων, ανεξαρτήτως του αριθμού των εκχυλίσεων.

Σύμφωνα με το διάγραμμα 3.2 η αγωγιμότητα παρουσιάζει στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ της πρώτης και τέταρτης εκχύλισης. Επίσης οι μεταχειρίσεις SB1B2 και SB2 παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικές διαφορές τόσο μεταξύ τους όσο και με τις μεταχειρίσεις S και SB1 οι οποίες δεν παρουσιάζουν στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ τους. Για τις μεταχειρίσεις S και SB1 η αγωγιμότητα των εκχυλισμάτων αυξάνεται με την πάροδο των εκχυλίσεων (πρώτη έως τέταρτη). Στην περίπτωση της μεταχείρισης SB1SB2 η αγωγιμότητα παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια των εκχυλίσεων ενώ στη μεταχείριση SB2 η αγωγιμότητα είναι σημαντικά μεγαλύτερη από τις προηγούμενες μεταχειρίσεις και μειώνεται με την πάροδο των εκχυλίσεων. Ο δείκτης αλάτωσης ενός λιπάσματος είναι το πόσο αυξάνει το λίπασμα αυτό την ωσμωτική πίεση του εδαφικού διαλύματος σε σχέση με ένα λίπασμα αναφοράς το NaNO_3 ($=100$) (Ασημακόπουλος, 2014). Όσο αυξάνεται η προσθήκη λιπασμάτων στο έδαφος τόσο αυξάνεται και η αγωγιμότητά του (Ασημακόπουλος, 2014). Στην τέταρτη εκχύλιση έχουν προστεθεί συνολικά 420 ml διαλύματος φωσφόρου συγκέντρωσης 100 ppm και έτσι η τιμή της αγωγιμότητας στην περίπτωση της μεταχείρισης S έχει αυξηθεί από 0.09 σε 0.28 mS/cm. Την ίδια τάση ακολουθεί και η μεταχείριση SB1. Το βιοεξανθράκωμα όπως προαναφέρθηκε είναι ένα πορώδες υλικό το οποίο έχει την ικανότητα να συγκρατεί θρεπτικά στοιχεία στο έδαφος (Gao and Deluca, 2016). Συνεπώς μπορεί να υποτεθεί ότι το βιοεξανθράκωμα B2 πιθανόν παρουσιάζει μεγαλύτερη ειδική επιφάνεια και μεγαλύτερο φορτίο σε σχέση με το βιοεξανθράκωμα B1. Επίσης με βάση αυτά που προαναφέρθηκαν και το διάγραμμα 3.2 μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η προσθήκη βιοεξανθρακώματος σε έδαφος στο οποίο έχει προστεθεί λίπασμα μπορεί να μειώσει την αύξηση της αγωγιμότητας του εδάφους που

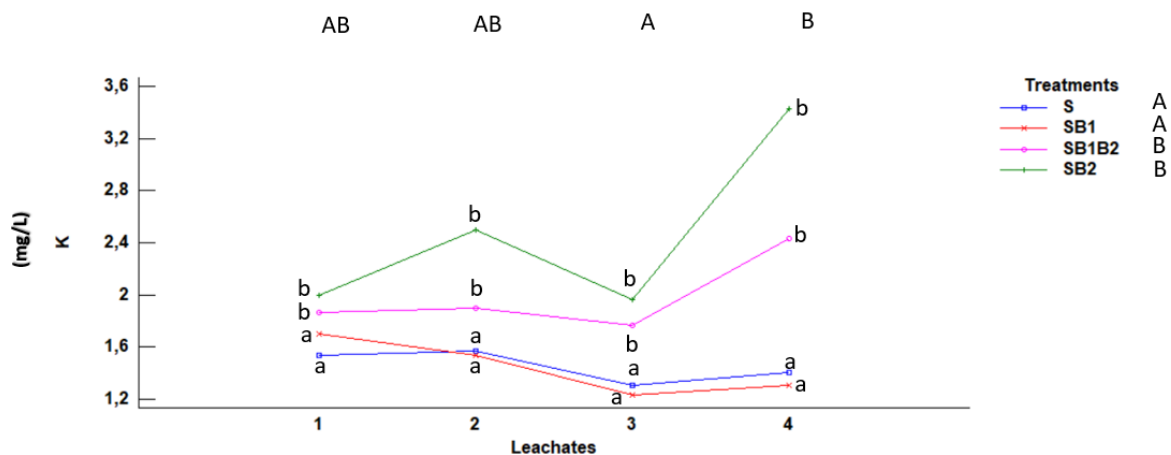
προκαλείται από τη λίπανση. Σύμφωνα με του Akhtar και άλλους ερευνητές (2015) η προσθήκη βιοεξανθρακώματος σε πηλοαμμώδες έδαφος περιόρισε την αρνητική επίδραση της αλατότητας σε καλλιέργεια πατάτας. Η γραμμή αυτή έχει τη συγκεκριμένη μορφή διότι το έδαφος είναι αμμώδες και δεν υπάρχουν θέσεις συγκράτησης των αλάτων, συνεπώς η ποσότητα των υδατοδιαλυτών αλάτων που προστίθεται συγκεντρώνεται στο εκχύλισμα. Η προσθήκη λιπάσματος οδηγεί σε αύξηση της συγκέντρωσης των αλάτων στο εδαφικό εκχύλισμα. Παρατηρείται αντιστροφή των αποτελεσμάτων και φαίνεται και η κατάταξη των βιοεξανθρακωμάτων σε θρεπτικά στοιχεία.

4.3.3 Υδατοδιαλυτά κατιόντα



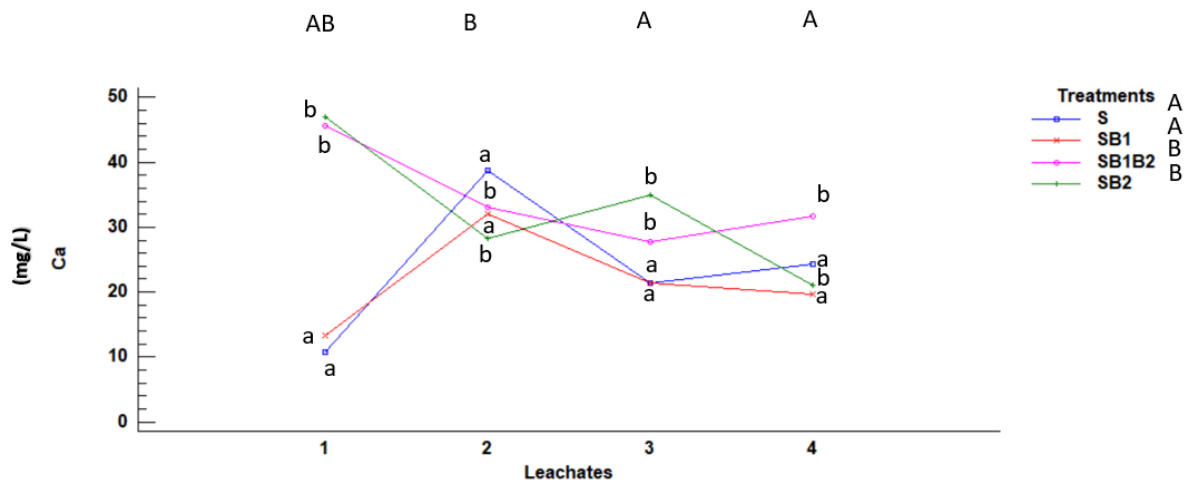
Διάγραμμα 3. 3: Επίδραση των διαφορετικών επεμβάσεων στη συγκέντρωση του νατρίου στα εκχυλίσματα. Μέσοι όροι για τον ίδιο αριθμό εκχύλισης συνοδευόμενοι από διαφορετικά μικρά γράμματα διαφέρουν στατιστικά σημαντικά σύμφωνα με τη δοκιμασία πολλαπλών συγκρίσεων του LSD σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=0.05$. Τα κεφαλαία γράμματα στο άνω μέρος του διαγράμματος καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ του αριθμού εκχύλισης, ανεξαρτήτου της επέμβασης που εφαρμόστηκε. Τα κεφαλαία γράμματα στο υπόμνημα (στη δεξιά πλευρά του διαγράμματος) καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων, ανεξαρτήτως του αριθμού των εκχυλίσεων.

Σύμφωνα με το διάγραμμα 3.3 η συγκέντρωση του νατρίου δεν παρουσιάζει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των εκχυλίσεων. Οι μεταχειρίσεις που παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικές διαφορές είναι η S με την SB2 και η SB1 με την SB2. Η συγκέντρωση του νατρίου παραμένει σταθερή για όλες τις μεταχειρίσεις κατά τη διάρκεια των εκχυλίσεων. Στη μεταχείριση SB2 η συγκέντρωση του νατρίου είναι υψηλότερη σε σχέση με αυτή της μεταχείρισης SB1 η οποία δεν έχει στατιστικά σημαντική διαφορά με το μάρτυρα. Η επιφάνεια του βιοεξανθρακώματος είναι αρνητικά φορτισμένη (Beesley et al., 2011) και το βιοεξανθράκωμα διαθέτει μεγάλη ικανότητα προσρόφησης (Akhtar et al., 2015). Συνεπώς έχει την ικανότητα να συγκρατεί στην επιφάνεια του θετικά φορτισμένα κατιόντα όπως το νάτριο.



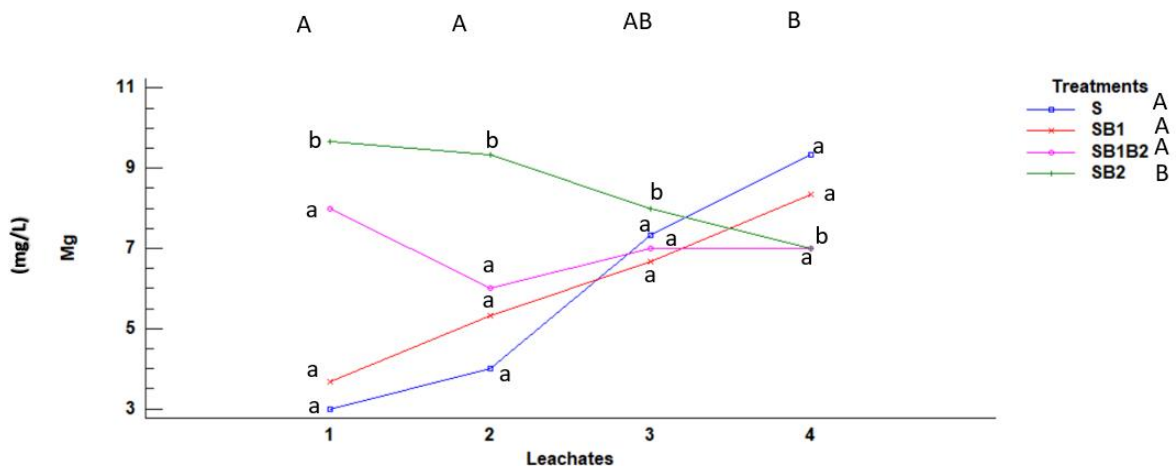
Διάγραμμα 3. 4: Επίδραση των διαφορετικών επεμβάσεων στη συγκέντρωση του καλίου στα εκχυλίσματα. . Μέσοι όροι για τον ίδιο αριθμό εκχύλισης συνοδευόμενοι από διαφορετικά μικρά γράμματα διαφέρουν στατιστικά σημαντικά σύμφωνα με τη δοκιμασία πολλαπλών συγκρίσεων του LSD σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=0.05$. Τα κεφαλαία γράμματα στο άνω μέρος του διαγράμματος καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ του αριθμού εκχύλισης, ανεξαρτήτου της επέμβασης που εφαρμόστηκε. Τα κεφαλαία γράμματα στο υπόμνημα (στη δεξιά πλευρά του διαγράμματος) καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων, ανεξαρτήτως του αριθμού των εκχυλίσεων.

Σύμφωνα με το διάγραμμα 3.4 η συγκέντρωση του καλίου παρουσιάζει στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ της τρίτης και τέταρτης εκχύλισης. Επίσης οι μεταχειρίσεις S και SB1 παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικές διαφορές με τις μεταχειρίσεις SB1B2 και SB2. Η συγκέντρωση του καλίου στα εκχυλίσματα στην περίπτωση των μεταχειρίσεων S και SB1 είναι μικρή και παραμένει σταθερή με το πέρασμα των εκχυλίσεων. Ωστόσο στις μεταχειρίσεις SB2 και SB1B2 η συγκέντρωση του καλίου στο εκχύλισμα αυξάνεται με την πάροδο των εκχυλίσεων. Θα μπορούσε να υποτεθεί ότι η διαφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι, όπως έχει προαναφερθεί, το βιοεξανθράκωμα είναι πλούσιο σε θρεπτικά στοιχεία. Έτσι όταν έχουν περάσει άλλα 420 ml διαλύματος απελευθερώνεται στο εκχύλισμα ένα μέρος της ποσότητας του καλίου που περιέχεται το βιοεξανθράκωμα.



Διάγραμμα 3. 5: Επίδραση των διαφορετικών επεμβάσεων στη συγκέντρωση του ασβεστίου στα εκχυλίσματα. Μέσοι όροι για τον ίδιο αριθμό εκχύλισης συνοδευόμενοι από διαφορετικά μικρά γράμματα διαφέρουν στατιστικά σημαντικά σύμφωνα με τη δοκιμασία πολλαπλών συγκρίσεων του LSD σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=0.05$. Τα κεφαλαία γράμματα στο άνω μέρος του διαγράμματος καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ του αριθμού εκχύλισης, ανεξαρτήτου της επέμβασης που εφαρμόστηκε. Τα κεφαλαία γράμματα στο υπόμνημα (στη δεξιά πλευρά του διαγράμματος) καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων, ανεξαρτήτως του αριθμού των εκχυλίσεων.

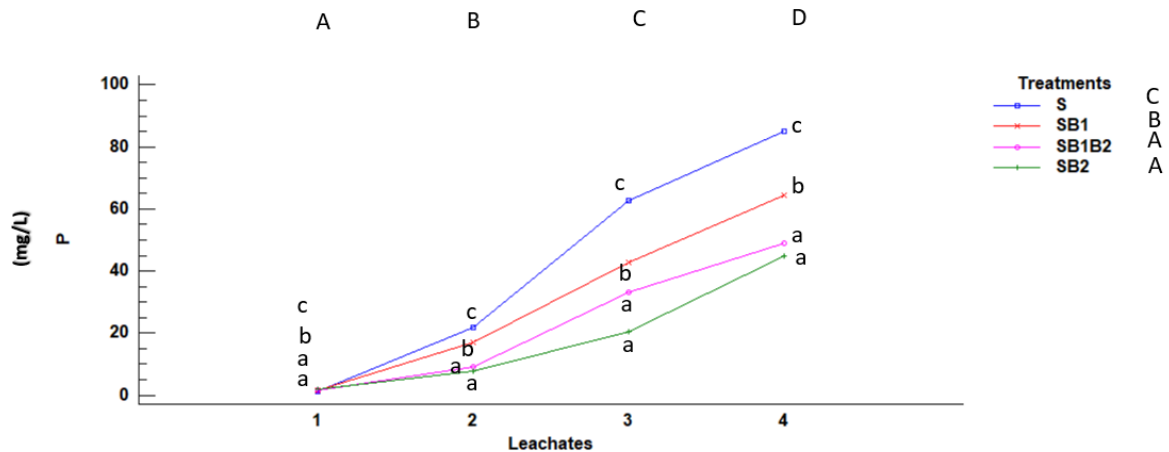
Σύμφωνα με το διάγραμμα 3.5 η συγκέντρωση του ασβεστίου δεν παρουσιάζει στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των εκχυλίσεων αλλά παρουσιάζει στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων. Η τάση του διαγράμματος 3.5 είναι παρόμοια με την τάση του διαγράμματος 1.5.



Διάγραμμα 3. 6: Επίδραση των διαφορετικών επεμβάσεων στη συγκέντρωση του μαγνησίου στα εκχυλίσματα. Μέσοι όροι για τον ίδιο αριθμό εκχύλισης συνοδευόμενοι από διαφορετικά μικρά γράμματα διαφέρουν στατιστικά σημαντικά σύμφωνα με τη δοκιμασία πολλαπλών συγκρίσεων του LSD σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=0.05$. Τα κεφαλαία γράμματα στο άνω μέρος του διαγράμματος καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ του αριθμού εκχύλισης, ανεξαρτήτου της επέμβασης που εφαρμόστηκε. Τα κεφαλαία γράμματα στο υπόμνημα (στη δεξιά πλευρά του διαγράμματος) καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων, ανεξαρτήτως του αριθμού των εκχυλίσεων.

Σύμφωνα με το διάγραμμα 3.6 η συγκέντρωση του μαγνησίου παρουσιάζει στατιστικά σημαντικές διαφορές τόσο μεταξύ των εκχυλίσεων όσο και μεταξύ των μεταχειρίσεων.

4.3.4 Φώσφορος

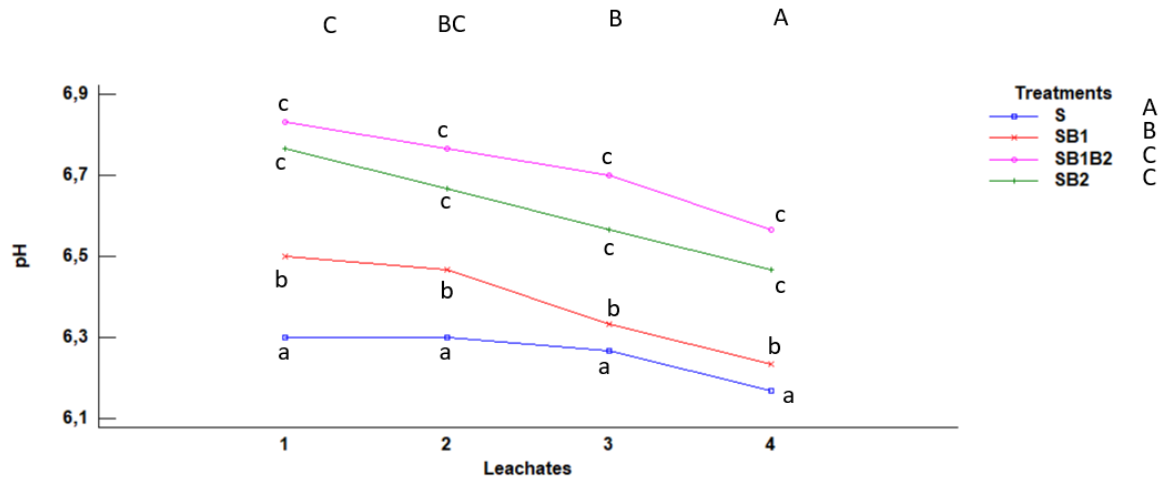


Διάγραμμα 3. 7: Επίδραση των διαφορετικών επεμβάσεων στη συγκέντρωση του φωσφόρου στα εκχυλίσματα. . Μέσοι όροι για τον ίδιο αριθμό εκχύλισης συνοδευόμενοι από διαφορετικά μικρά γράμματα διαφέρουν στατιστικά σημαντικά σύμφωνα με τη δοκιμασία πολλαπλών συγκρίσεων του LSD σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=0.05$. Τα κεφαλαία γράμματα στο άνω μέρος του διαγράμματος καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ του αριθμού εκχύλισης, ανεξαρτήτως της επέμβασης που εφαρμόστηκε. Τα κεφαλαία γράμματα στο υπόμνημα (στη δεξιά πλευρά του διαγράμματος) καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων, ανεξαρτήτως του αριθμού των εκχυλίσεων.

Σύμφωνα με το διάγραμμα 3.7 η συγκέντρωση του φωσφόρου στα εκχυλίσματα παρουσιάζει στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των εκχυλίσεων. Παρατηρείται στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των μεταχειρίσεων SB1B2 και SB2 με την μεταχείριση S αλλά και με τη μεταχείριση SB1. Παρατηρείται ότι σε όλες τις μεταχειρίσεις η συγκέντρωση του φωσφόρου στο εκχύλισμα αυξάνεται με την πάροδο των εκχυλίσεων. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς σε κάθε εκχύλιση προστίθενται 105 ml διαλύματος φωσφόρου συγκέντρωσης 100 ppm. Το βιοεξανθράκωμα που έχει προκύψει σε υψηλές θερμοκρασίες πυρόλυσης ($>500\text{ }^{\circ}\text{C}$) διαθέτει μεγάλη ειδική επιφάνεια ($>400\text{ m}^2/\text{g}$) και έχει υψηλή περιεκτικότητα σε αρωματικές ενώσεις (Keiluweit et al., 2010) με αποτέλεσμα να εμφανίζει ανθεκτικότητα στην αποσύνθεση (Joseph et al., 2010). Στην περίπτωση αυτή ο φώσφορος συγκρατείται ισχυρά από το βιοεξανθράκωμα. Οι Zhao και συνεργάτες 2022 παρατήρησαν ότι η τροποποίηση βιοεξανθρακώματος με λανθάνιο οδηγεί σε υψηλότερη συγκράτηση φωσφόρου μετά την προσθήκη στο έδαφος σε σχέση με το μάρτυρα. Αυτό επιβεβαιώνεται από το διάγραμμα 3.7 καθώς η συγκέντρωση του φωσφόρου στο εκχύλισμα είναι μικρότερη στην περίπτωση που έχει προστεθεί το βιοεξανθράκωμα B1 και ακόμα μικρότερη στην περίπτωση του βιοεξανθρακώματος B2.

4.4 Τρίτη πειραματική διαδικασία

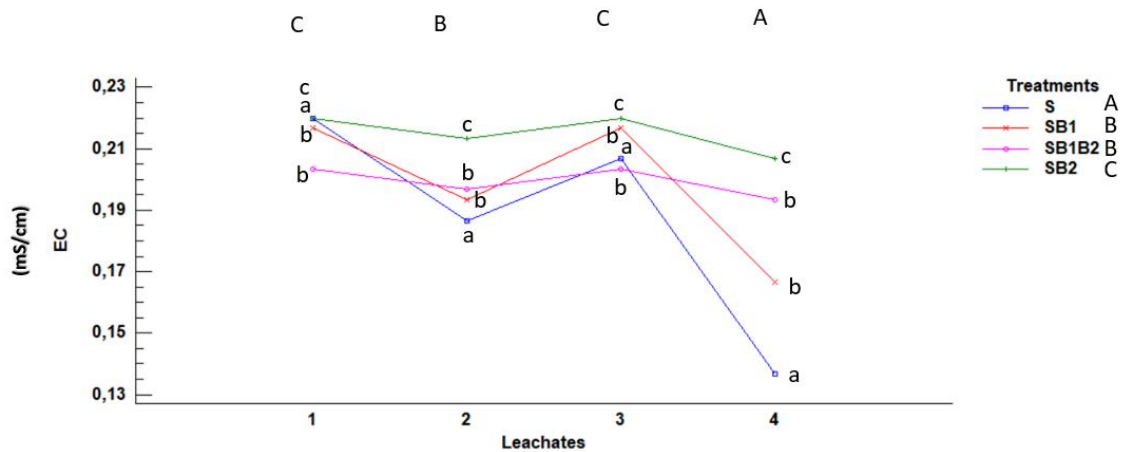
4.4.1 pH



Διάγραμμα 4. 1: Επίδραση των διαφορετικών επεμβάσεων στην τιμή pH των εκχυλισμάτων. Μέσοι όροι για τον ίδιο αριθμό εκχύλισης συνοδευόμενοι από διαφορετικά μικρά γράμματα διαφέρουν στατιστικά σημαντικά σύμφωνα με τη δοκιμασία πολλαπλών συγκρίσεων του LSD σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=0.05$. Τα κεφαλαία γράμματα στο άνω μέρος του διαγράμματος καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ του αριθμού εκχύλισης, ανεξαρτήτως της επέμβασης που εφαρμόστηκε. Τα κεφαλαία γράμματα στο υπόμνημα (στη δεξιά πλευρά του διαγράμματος) καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων, ανεξαρτήτως του αριθμού των εκχυλίσεων.

Το διάγραμμα 4.1 παρουσιάζει παρόμοια τάση με το διάγραμμα 1.1.

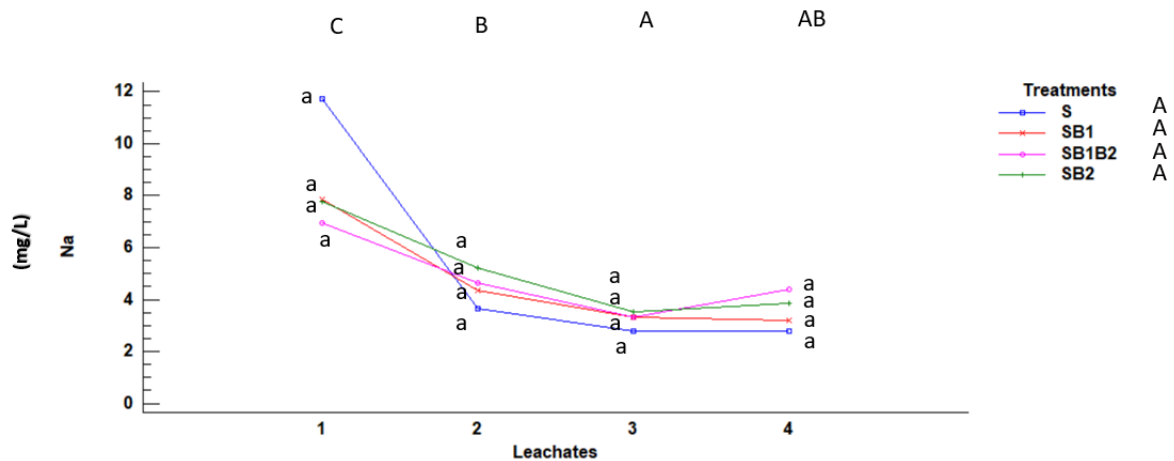
4.4.2 EC



Διάγραμμα 4. 2: Επίδραση των διαφορετικών επεμβάσεων στην αγωγιμότητα των εκχυλισμάτων. . Μέσοι όροι για τον ίδιο αριθμό εκχύλισης συνοδευόμενοι από διαφορετικά μικρά γράμματα διαφέρουν στατιστικά σημαντικά σύμφωνα με τη δοκιμασία πολλαπλών συγκρίσεων του LSD σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=0.05$. Τα κεφαλαία γράμματα στο άνω μέρος του διαγράμματος καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ του αριθμού εκχύλισης, ανεξαρτήτου της επέμβασης που εφαρμόστηκε. Τα κεφαλαία γράμματα στο υπόμνημα (στη δεξιά πλευρά του διαγράμματος) καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων, ανεξαρτήτως του αριθμού των εκχυλίσεων.

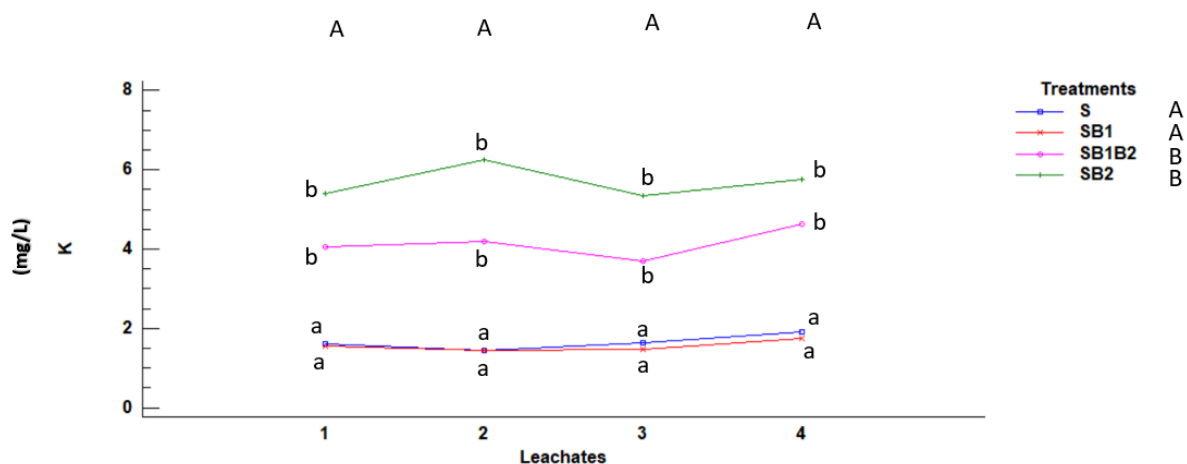
Σύμφωνα με το διάγραμμα 4.2 η τιμή της αγωγιμότητας παρουσιάζει στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των εκχυλίσεων εκτός από την περίπτωση της πρώτης και τρίτης εκχύλισης. Οι μεταχειρίσεις SB1 και SB1B2 παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικές διαφορές από την μεταχείριση S αλλά και από την μεταχείριση SB2. Ακόμα και μετά από τέσσερις εκχυλίσεις με νερό η αγωγιμότητα του εκχυλίσματος στην περίπτωση του βιοεξανθρακώματος B2 παραμένει σταθερή. Αυτό αποδεικνύει την ικανότητα του βιοεξανθρακώματος να συγκρατεί θρεπτικά στοιχεία και να εμποδίζει στην έκπλυση τους.

4.4.3 Υδατοδιαλυτά κατιόντα



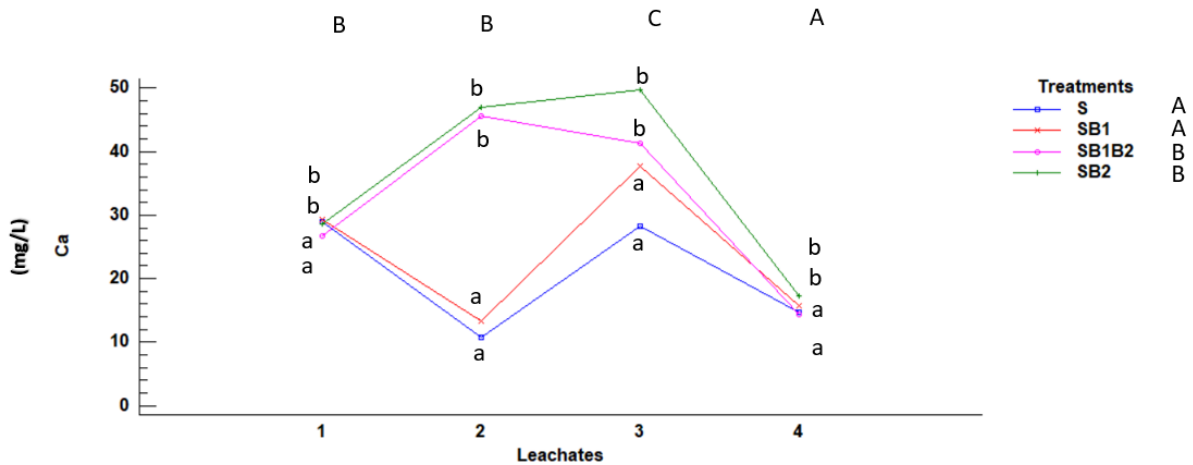
Διάγραμμα 4. 3: Επίδραση των διαφορετικών επεμβάσεων στη συγκέντρωση του νατρίου στα εκχυλίσματα. . Μέσοι όροι για τον ίδιο αριθμό εκχύλισης συνοδευόμενοι από διαφορετικά μικρά γράμματα διαφέρουν στατιστικά σημαντικά σύμφωνα με τη δοκιμασία πολλαπλών συγκρίσεων του LSD σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=0.05$. Τα κεφαλαία γράμματα στο άνω μέρος του διαγράμματος καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ του αριθμού εκχύλισης, ανεξαρτήτου της επέμβασης που εφαρμόστηκε. Τα κεφαλαία γράμματα στο υπόμνημα (στη δεξιά πλευρά του διαγράμματος) καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων, ανεξαρτήτως του αριθμού των εκχυλίσεων.

Σύμφωνα με το διάγραμμα 4.3 δεν υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των μεταχειρίσεων. Ωστόσο υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των τριών πρώτων εκχυλίσεων και μεταξύ της πρώτης και της τέταρτης εκχύλισης. Το διάγραμμα 4.3 ακολουθεί την ίδια τάση με το διάγραμμα 1.3.



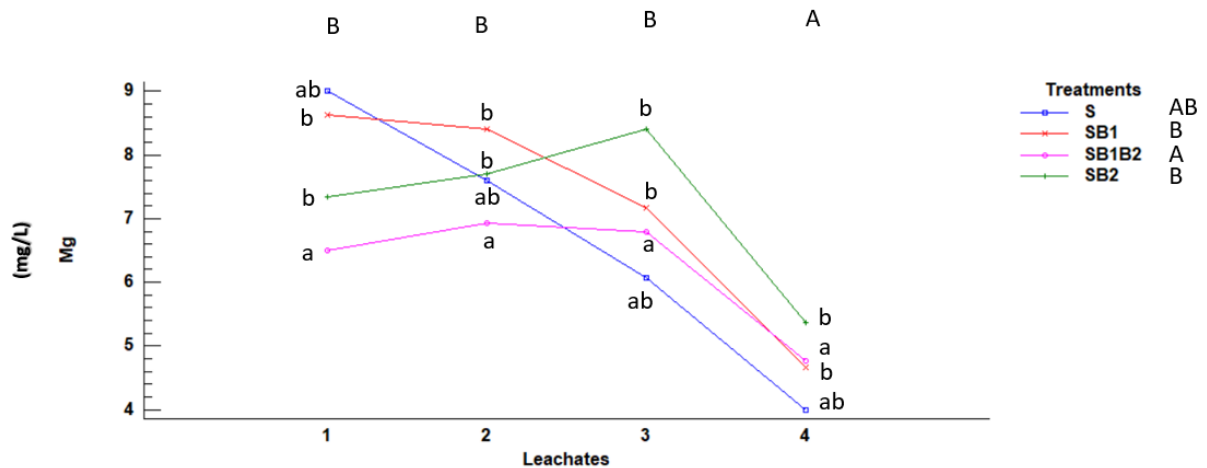
Διάγραμμα 4. 4: Επίδραση των διαφορετικών επεμβάσεων στη συγκέντρωση του καλίου στα εκχυλίσματα. . Μέσοι όροι για τον ίδιο αριθμό εκχύλισης συνοδευόμενοι από διαφορετικά μικρά γράμματα διαφέρουν στατιστικά σημαντικά σύμφωνα με τη δοκιμασία πολλαπλών συγκρίσεων του LSD σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=0.05$. Τα κεφαλαία γράμματα στο άνω μέρος του διαγράμματος καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ του αριθμού εκχύλισης, ανεξαρτήτου της επέμβασης που εφαρμόστηκε. Τα κεφαλαία γράμματα στο υπόμνημα (στη δεξιά πλευρά του διαγράμματος) καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων, ανεξαρτήτως του αριθμού των εκχυλίσεων.

Σύμφωνα με το διάγραμμα 4.4 η συγκέντρωση του καλίου δεν παρουσιάζει στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των εκχυλίσεων. Ωστόσο οι μεταχειρίσεις S και SB1 παρουσιάζουν στατιστικά σημαντική διαφορά με τις μεταχειρίσεις SB1B2 και SB2. Το διάγραμμα 4.4 παρουσιάζει την ίδια τάση με το διάγραμμα 2.4. Το έδαφος είναι χονδρόκοκκο και έχει μακροπορώδες. Συνεπώς μπορεί να επιτρέπει ορισμένη ποσότητα του βιοεξανθράκωματος να περνάει στο έδαφος και έτσι το βιοεξανθράκωμα να συμπεριφέρεται ως μερικώς ενσωματωμένο.



Διάγραμμα 4. 5: Επίδραση των διαφορετικών επεμβάσεων στη συγκέντρωση του ασβεστίου στα εκχυλίσματα. Μέσοι όροι για τον ίδιο αριθμό εκχύλισης συνοδευόμενοι από διαφορετικά μικρά γράμματα διαφέρουν στατιστικά σημαντικά σύμφωνα με τη δοκιμασία πολλαπλών συγκρίσεων του LSD σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=0.05$. Τα κεφαλαία γράμματα στο άνω μέρος του διαγράμματος καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ του αριθμού εκχύλισης, ανεξαρτήτου της επέμβασης που εφαρμόστηκε. Τα κεφαλαία γράμματα στο υπόμνημα (στη δεξιά πλευρά του διαγράμματος) καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων, ανεξαρτήτως του αριθμού των εκχυλίσεων.

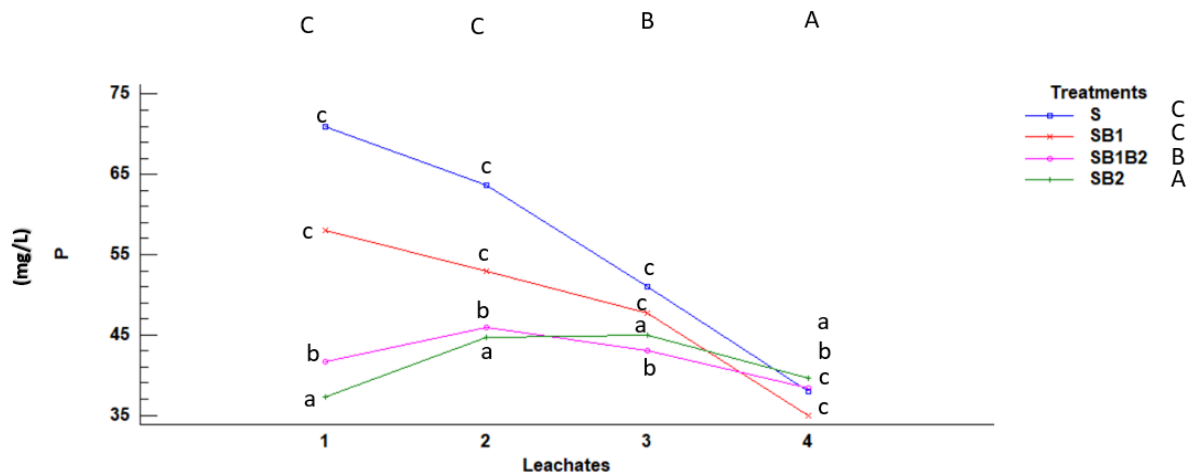
Σύμφωνα με το διάγραμμα 4.5 η συγκέντρωση του ασβεστίου παρουσιάζει στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των εκχυλίσεων εκτός από την περίπτωση των δύο πρώτων εκχυλίσεων. Οι μεταχειρίσεις S και SB1 παρουσιάζουν στατιστικά σημαντική διαφορά με τις μεταχειρίσεις SB1B2 και SB2. Η μεγαλύτερη συγκέντρωση ασβεστίου σημειώνεται στις μεταχειρίσεις SB1B2 και SB2. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι το βιοεξανθράκωμα B2 είναι πλούσιο σε ασβέστιο. Η τάση του διαγράμματος 4.5 είναι παρόμοια με αυτή του διαγράμματος 1.5.



Διάγραμμα 4. 6: Επίδραση των διαφορετικών επεμβάσεων στη συγκέντρωση του μαγνησίου στα εκχυλίσματα. . Μέσοι όροι για τον ίδιο αριθμό εκχύλισης συνοδευόμενοι από διαφορετικά μικρά γράμματα διαφέρουν στατιστικά σημαντικά σύμφωνα με τη δοκιμασία πολλαπλών συγκρίσεων του LSD σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=0.05$. Τα κεφαλαία γράμματα στο άνω μέρος του διαγράμματος καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ του αριθμού εκχύλισης, ανεξαρτήτου της επέμβασης που εφαρμόστηκε. Τα κεφαλαία γράμματα στο υπόμνημα (στη δεξιά πλευρά του διαγράμματος) καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων, ανεξαρτήτως του αριθμού των εκχυλίσεων.

Σύμφωνα με το διάγραμμα 4.6 η συγκέντρωση του μαγνησίου παρουσιάζει στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων SB2 και SB1 με τη μεταχείριση SB1B2. Ωστόσο παρουσιάζει στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των εκχυλίσεων και συγκεκριμένα των τριών πρώτων εκχυλίσεων και της τέταρτης στην οποία η συγκέντρωση του μαγνησίου είναι η μικρότερη.

4.4.4 Φώσφορος



Διάγραμμα 4. 7: Επίδραση των διαφορετικών επεμβάσεων στη συγκέντρωση του φωσφόρου στα εκχυλίσματα. . Μέσοι όροι για τον ίδιο αριθμό εκχύλισης συνοδευόμενοι από διαφορετικά μικρά γράμματα διαφέρουν στατιστικά σημαντικά σύμφωνα με τη δοκιμασία πολλαπλών συγκρίσεων του LSD σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=0.05$. Τα κεφαλαία γράμματα στο άνω μέρος του διαγράμματος καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ του αριθμού εκχύλισης, ανεξαρτήτου της επέμβασης που εφαρμόστηκε. Τα κεφαλαία γράμματα στο υπόμνημα (στη δεξιά πλευρά του διαγράμματος) καταδεικνύουν τυχόν διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων, ανεξαρτήτως του αριθμού των εκχυλίσεων.

Σύμφωνα με το διάγραμμα 4.7 η συγκέντρωση του φωσφόρου στα εκχυλίσματα παρουσιάζει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των εκχυλίσεων εκτός από την περίπτωση των δύο πρώτων εκχυλίσεων. Μεταξύ των μεταχειρίσεων στατιστικά σημαντική διαφορά παρουσιάζουν οι μεταχειρίσεις SB1B2 και SB2 με τις μεταχειρίσεις S και SB1. Παρατηρείται ότι η συγκέντρωση του φωσφόρου στο εκχύλισμα στην περίπτωση που δεν έχει προστεθεί βιοεξανθράκωμα (S), είναι μεγάλη και μειώνεται απότομα με την πάροδο των εκχυλίσεων. Αντίθετα στην περίπτωση της μεταχείρισης SB2 η συγκέντρωση του φωσφόρου στο εκχύλισμα είναι μικρότερη και παραμένει σταθερή στη διάρκεια των εκχυλίσεων. Όπως προαναφέρθηκε το βιοεξανθράκωμα είναι ένα πορώδες υλικό του οποίου η δομή βελτιώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας πυρόλυσης (Yuan et al., 2011). Συνεπώς όπως προαναφέρθηκε έχει την ικανότητα να συγκρατήσει τον φώσφορο στη δομή του και συνεπώς στο έδαφος μειώνοντας έτσι την έκπλυση του. Σύμφωνα με τους Yuan και άλλους ερευνητές (2016) η προσθήκη βιοεξανθρακώματος σε έδαφος με κοκκομετρική σύσταση silty clay/ silty clay loam μείωσε την έκπλυση του φωσφόρου συμβάλλοντας στη συγκράτηση του φωσφόρου στο έδαφος.

5. Συμπεράσματα

Η τιμή pH του εδαφικού εκχυλίσματος αυξήθηκε με την προσθήκη βιοεξανθρακώματος ανεξαρτήτου προέλευσης και τρόπου εφαρμογής.

Η τιμή της αγωγιμότητας του εδαφικού εκχυλίσματος αυξήθηκε με την προσθήκη και των δύο βιοεξανθρακωμάτων. Επίσης κατά την προσθήκη διαλύματος φωσφόρου, συνεπώς υδατοδιαλυτών αλάτων, το βιοεξανθράκωμα B2 παρουσίασε υψηλότερη ικανότητα συγκράτησης των θρεπτικών στοιχείων λόγω των επιφανειακών του φορτίων με αποτέλεσμα τη μείωση της αγωγιμότητας του εκχυλίσματος.

Σε κάθε περίπτωση η πρώτη ύλη που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή των βιοεξανθρακωμάτων επηρεάζει καθοριστικά την περιεκτικότητα του σε θρεπτικά στοιχεία και συνεπώς τη συγκέντρωσή τους στο εδαφικό διάλυμα. Το βιοεξανθράκωμα B2 που προήλθε από ξυλώδη υπολείμματα από διαλογή αστικών αποβλήτων είναι πιο πλούσιο σε θρεπτικά στοιχεία σε σχέση με το B1 που έχει προκύψει από κλαδοκάθαρο ελιάς γεγονός που αντικατοπτρίζεται από τη συγκέντρωση των υδατοδιαλυτών μορφών των θρεπτικών στα εδαφικά εκχυλίσματα.

Στην περίπτωση των υδατοδιαλυτών κατιόντων ασβέστιο, μαγνήσιο και κάλιο η προσθήκη του βιοεξανθρακώματος B1 δεν εμφάνισε καμιά στατιστικά σημαντική διαφορά σε σχέση με το μάρτυρα, δηλαδή το πηλοαμμώδες έδαφος χωρίς την προσθήκη βιοεξανθρακώματος.

Ο τρόπος εφαρμογής του βιοεξανθρακώματος στο έδαφος επηρεάζει τη συμπεριφορά του καλίου στο έδαφος οδηγώντας σε στατιστικά σημαντικές διαφορές στη συγκέντρωση του καλίου στα εδαφικά εκχυλίσματα.

Κατά τη διάρκεια ενός έντονου γεγονότος βροχόπτωσης (60 mm/h) στο πηλοαμμώδες έδαφος μετά την προσθήκη φωσφορικού λιπάσματος το βιοεξανθράκωμα B2 εμφανίζει υψηλή ικανότητα συγκράτησης του φωσφόρου στο έδαφος μειώνοντας έτσι την έκπλυση του και τη συγκέντρωσή του στο εδαφικό διάλυμα.

6. Βιβλιογραφία

- Ασημακόπουλος, Ι. (2014). “ΛΙΠΑΣΜΑΤΑ ΛΙΠΑΝΣΕΙΣ” ‘ Β Έκδοση. Εκδόσεις Έμβρυο Έθνος, 2019. Διαθέσιμο από: <https://www.ethnos.gr/greece/article/45600/kairosattikhmesasemiaora60xiliostabroxhskai680keraynoi> [10 Φεβρουαρίου 2023]
- Καραγιαννάκη, Π. (2020), *Βιοεξανθράκωμα και η χρήση του σε προηγμένες τεχνολογικές εφαρμογές*, Πτυχιακή εργασία, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης
- Abel, S., Peters, A., Trinks, S., Schonsky, H., Facklam, M. (2013). “Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil”. *Geoderma*, 202-203:183-191
- Abu Zied Amin, A.E.-E., (2016). “Impact of corn cob biochar on potassium status and wheat growth in a calcareous sandy soil”. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 47:2026-2033
- Adnan, A., Mavinic, D.S., Koch, F.A. (2003). “Pilot-scale study of phosphorus recovery through struvite crystallization examining the process feasibility”. *J Environ Eng Sci*, 2:315–324
- Agegnehu, G., Bird, M.I., Nelson, P.N., Bass, A.M. (2015). “The ameliorating effects of biochar and compost on soil quality and plant growth on a ferralsol”. *Soil Res.*, 53:1-12
- Akhtar, S. S., Andersen, M. N., & Liu, F. (2015). “Biochar mitigates salinity stress in potato”. *Journal of agronomy and crop science*, 201:368-378
- Al-Wabel, M.I., Al-Omran, A., El-Naggar, A.H., Nadeem, M., Usman, A.R.A., (2013). “Pyrolysis temperature induced changes in characteristics and chemical composition of biochar produced from conocarpus wastes”. *Bioresour. Technol*, 131:374-379
- Amarakoon, I., Zvomuya, F., Motaung, M.L., (2019). “Temperature-dependency of phosphorus sorption by goethites and tropical soils amended with woodchip biochar”. *Agrosyst. Geosci. Environ.*, 2:1-6
- Andrenelli, M.C., Maienza, A., Genesio, L., Miglietta, F., Pellegrini, S. (2016). “Field application of pelletized biochar: Short term effect on the hydrological properties of a silty clay loam soil”. *Agric Water Manag*, 163:190-196
- Atkinson, C. J., Fitzgerald, J. D. and Hipps, N. A. (2010). “Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review”. *Plant and Soil*, 337:1-18
- Bai, Z., Li, H., Yang, X., Zhou, B., Shi, X., Wang, B., Li, D., Shen, J., Chen, Q., Qin, W., Oenema, O., & Zhang, F. (2013). “The critical soil P levels for crop yield, soil fertility and environmental safety in different soil types”. *Plant and Soil*, 372:27-37
- Barrelet, T., Ulrich, A., Rennenberg, H. and Krahenbuhl, U. (2006). “Seasonal profiles of sulphur, phosphorus, and potassium in Norway spruce wood”. *Plant Biology*, 8:462-469
- Beesley, L., Moreno-Jimenez, E., Gomez-Eyles, J. L., Harris, E., Robinson, B. and Sizmur, T. (2011). “A review of biochar’s potential role in the remediation, revegetation and restoration of contaminated soils”. *Environmental Pollution*, 159:3269-3282
- Bilias, F., Kalderis, D., Richardson, C., Barbayiannis, N., Gasparatos, D. (2023). “Biochar application as a soil potassium management strategy: A review”. *Science of the Total Environment*, 858:159-782

- Bradley, A., Larson, R.A., Runge, T. (2015). "Effect of wood biochar in manure-applied sand columns on leachate quality". *J. Environ. Qual.*, 44:1720-1728
- Brady, N. C. and Weil, R. R. (2002). "The nature and properties of soils". *Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall*
- Brewer, C.E., Brown, R.C., (2012). "Biochar. In: Sayigh". *Comprehensive Renewable Energy. Elsevier, Oxford*, pp. 357-384
- Brewer, C.E., Unger, R., Schmidt-Rohr, K. (2011). "Criteria to Select Biochars for Field Studies based on Biochar Chemical Properties". *Bioenergy Research*, 4:312-323
- Chang, K., Wang, X., Li, M., Xing, Z., Peng, Y., Wang, Y. (2013). "Chemical and physical properties of biochar produced from spent mushroom substrate. In: International Conference on Frontiers of Environment", *Energy and Bioscience*
- Chintala, R., Schumacher, T.E., McDonald, L.M. (2014). "Phosphorus sorption and availability from biochars and soil/biochar mixtures". *Clean-Soil Air Water*, 42:626-634
- Clough, T.J., Condon, L.M., Kammann, C., Müller, C. (2013). "A review of biochar and soil nitrogen dynamics". *Agronomy*, 3: 275-293
- DeLuca, T. H., Gundale, M. J., MacKenzie, M. D., Jones, D. L., (2015). "Biochar effects on soil nutrient transformations". *Biochar For Environmental Management*
- Gao, S., DeLuca, T. H., Cleveland, C. C. (2018). "Biochar additions alter phosphorus and nitrogen availability in agricultural ecosystems: A meta-analysis". *Science of the Total Environment*, 654:463-472
- Gao, S., DeLuca, T.H. (2016). "Influence of Biochar on Soil Nutrient Transformations, Nutrient Leaching, and Crop Yield". *Adv Plants Agric Res*, 4(5)
- Gao, S., DeLuca, T.H. (2018). "Wood biochar impacts soil phosphorus dynamics and microbial communities in organically-managed croplands". *Soil Biol. Biochem*, 126:144-150
- Gao, S., Hoffman-Krull, K., Bidwell, A.L., DeLuca, T.H. (2016). "Locally produced wood biochar increases nutrient retention and availability in agricultural soils of the San Juan Islands", *USA. Agric. Ecosyst. Environ.*, 233:43-54
- Gao, S., Hoffman-Krull, K., DeLuca, T.H. (2017). "Soil biochemical properties and crop productivity following application of locally produced biochar at organic farms on Waldron Island", *WA. Biogeochemistry*, 136:31-46.
- Glaser, B., Lehmann, J. and Zech, W. (2002). "Amerliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – a review". *Biology and Fertility of Soils*, 35:219-230
- Gul, S., Whalen, J. K. (2016). "Biochemical cycling of nitrogen and phosphorus in biochar-amended soils". *Soil Biology & Biochemistry*, 103:1-15
- Gul, S., Whalen, J.K., Thomas, B.W., Sachdeva, V., Deng, H. (2015). "Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: mechanisms and future directions". *Agric. Ecosyst. Environ.*, 206:46-59
- Gundale, M. J. and DeLuca, T. H. (2006). "Temperature and source material influence ecological attributes of ponderosa pine and Douglas-fir charcoal". *Forest Ecology And Management*, 231:86-93

- Hesketh, N., & Brookes, P. C. (2000). "Development of an Indicator for Risk of Phosphorus Leaching". *Journal of Environmental Quality*, 29:105-110
- Ippolito, J.A., Ducey, T.F., Cantrell, K.B., Novak, J.M., Lentz, R.D. (2016). "Designer, acidic biochar influences calcareous soil characteristics". *Chemosphere*, 142:184-191
- Iqbal, H., Garcia-Perez, M., Flury, M. (2015). "Effect of biochar on leaching of organic carbon, nitrogen, and phosphorus from compost in bioretention systems". *Sci. Total Environ.*, 521:37-45
- Ishii, T., Kadoya, K., (1994). "Effects of charcoal as a soil conditioner on citrus growth and vesicular arbuscular mycorrhizal development". *Journal of Japan Society of Horticultural Science*, 63:529-535
- Jalali, M., & Jalali, M. (2017). "Assessment risk of phosphorus leaching from calcareous soils using soil test phosphorus". *Chemosphere*, 171:106-117
- Jeffery, S., Verheijen, F. G. A., Van Der Velde, M. and Bastos, A. C. (2011). "A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis". *Agriculture Ecosystems and Environment*, 144:175-187
- Joseph, S. D., Camps-Arbestain, M., Lin, Y., Munroe, P., Chia, C. H., Hook, J., Van Zwieten, L., Kimber, S., Cowie, A., Singh, B. P., Lehmann, J., Foidl, N., Smernik, R. J. and Amonette, J. E. (2010). "An investigation into the reactions of biochar in soil". *Australian Journal of Soil Research*, 48:501-515
- Joseph, S.D., Camps-Arbestain, M., Lin, Y., Munroe, P., Chia, C.H., Hook, J., van Zwieten, L., Kimber, S., Cowie, A., Singh, B.P., Lehmann, J., Foidl, N., Smernik, R.J., Amonette, J.E. (2010). "An investigation into the reactions of biochar in soil". *Aust. J. Soil. Res.*, 48:501-515
- Kammann, C. I., Linsel, S., Gossling, J. W. and Koyro, H. W. (2011). "Influence of biochar on drought tolerance of *Chenopodium quinoa* Willd and on soil-plant relations". *Plant and Soil*, 345:195-210
- Keech, O., Carcaillet, C. and Nilsson, M.-C. (2005). "Adsorption of allelopathic compounds by wood-derived charcoal: the role of wood porosity". *Plant and Soil*, 272:291-300
- Keiluweit, M., Nico, P.S., Johnson, M.G., Kleber, M. (2010). "Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (Biochar)". *Environ. Sci. Technol.*, 44:1247-1253
- Keke, H., Bo, Z. (2020), "Phosphorus loss through surface runoff and leaching in response to the long-term application of different organic amendments on sloping croplands". *Journal of soils and sediments*
- Knoepp, J. D., DeBano, L. F., & Neary, D. G. (2005). "Soil chemistry". *Wildland fire in ecosystem*, 42(4)
- Knudsen, J. N., Jensen, P. A., Lin, W. G., Frandsen, F. J. and Dam-Johansen, K. (2004) 'Sulphur transformations during thermal conversion of herbaceous biomass', *Energy and Fuels*, 18:810-819
- Kuoppamaki, K., Hagner, M., Lehvavirta, S., Setälä, H. (2016). "Biochar amendment in the green roof substrate affects runoff quality and quantity". *Ecol. Eng.*, 88:1-9
- Laird, D., Fleming, P., Wang, B., Horton, R., Karlen, D., (2010). "Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil". *Geoderma*, 158:436-442

- Laird, D., Fleming, P., Wang, B., Horton, R., Karlen, D. (2010). "Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil". *Geoderma*, 158:436-442
- Lambers, H., Raven, J.A., Shaver, G.R., Smith, S.E., (2008). "Plant nutrient-acquisition strategies change with soil age". *Trends in Ecology & Evolution*, 23:95-103
- Lehmann, J., da Silva Jr, J.P., 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*, 249:343-357
- Lehmann, J., Joseph, S. (2015). "Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation" . *Routledge*
- Lehmann, J., Rillig, M. C., Thies, J., Masiello, C. A., Hockaday, W. C. and Crowley, D. (2011). "Biochar effects of soil biota – A review". *Soil Biology and Biochemistry*, 43:1812-1836
- Li, F., Liang, X., Niyungeko, C., Sun, T., Liu, F., Arai, Y. (2019). "Effects of biochar amendments on soil phosphorus transformation in agricultural soils". *Advances in Agronomy*, 158:131-172
- Liang, F., Li, G.T., Lin, Q.M., Zhao, X.R. (2014). "Crop yield and soil properties in the first 3 years after biochar application to a calcareous soil". *Journal of Integrative Agriculture*, 13:525-532
- Liu, F., Zuo, J., Chi, T., Wang, P., Yang, B. (2015). "Removing phosphorus from aqueous solutions by using iron-modified corn straw biochar". *Front. Environ. Sci. Eng.*, 9:1066-1075
- Liu, W.-J., Zeng, F.-X., Jiang, H. and Zhang, Z.-S. (2011). "Preparation of high adsorption capacity bio-chars from waste biomass". *Bioresource Technology*, 102:8247-8252
- Maguire, R. O., & Sims, J. T. (2002). "Soil testing to predict phosphorus leaching". *Journal of Environmental Quality*, 31(5), 1601-1609
- Major, J., Steiner, C., Downie, A. (2009). "Biochar effects on nutrient leaching". In *Johannes Lehmann and Steven Joseph (Eds.) Biochar for environmental management: Science and technology (1st edition)*, Earthscan, 271-288
- Matsubara, Y.-I., Hasegawa, N. and Fukui, H. (2002). "Incidence of Fusarium root rot in asparagus seedlings infected with arbuscular mycorrhizal fungus as affected by several soil amendments". *Journal of the Japanese Society of Horticultural Science*, 71:370-374
- Mbagwu, J. S. C. (1989). "Effects of organic amendments on some physical properties of a tropical Ultisol". *Biological Wastes*, 28:1-13
- Mukherjee, A., Zimmerman, A.R., Hamdan, R., Cooper, W.T. (2014). "Physicochemical changes in pyrogenic organic matter (biochar) after 15 months of field aging". *Solid Earth*, 5:693-704
- Neary, D. G., Klopatek, C. C., DeBano, L. F. and Ffolliott, P. F. (1999) "Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis", *Forest Ecology and Management*, 122:51-71
- Nelissen, V., Rütting, T., Huygens, D., Staelens, J., Ruyschaert, G. (2012). "Maize biochars accelerate short-term soil nitrogen dynamics in a loamy sand soil". *Soil Biology and Biochemistry*, 55:20-27
- Nelson, N. O., Agudelo, S. C., Yuan, W. and Gan, J. (2011). "Nitrogen and phosphorus availability in biochar-amended soils". *Soil Science*, 176:218-226
- Novak, J.M., Busscher, W.J., Laird, D.L., Ahmedna, M., Watts, D.W., Niandou, M.A.S., (2009). "Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil". *Soil Science*, 174:105-112

- Quilliam, R.S., DeLuca, T.H., Jones, D.L. (2013). "Biochar application reduces nodulation but increases nitrogenase activity in clover". *Plant and Soil*, 366:83-92
- Rogovska, N., Laird, D.A., Karlen, D.L. (2016). "Corn and soil response to biochar application and stover harvest". *F Crop Res*, 187:96-106
- Ruark, M., Kelling, K. A., & Good, L. W. (2014). "Environmental Concerns of Phosphorus Management in Potato Production". *American Journal of Potato Research*, 91:132-144
- Ryan, P.R., Delhaize, E., Jones, D.L. (2001). "Function and mechanism of organic anion exudation from plant roots". *Annu Rev Plant Biol*, 52:527-560
- Schneider, F., Haderlein S.B. (2016). "Potential effects of biochar on the availability of phosphorus -mechanistic insights". *Geoderma*, 277:83-90
- Schnell, R.W., Vietor, D.M., Provin, T.L., Munster, C.L., Capareda, S. (2012). "Capacity of biochar application to maintain energy crop productivity: soil chemistry, sorghum growth, and runoff water quality effects". *J. Environ. Qual.*, 41:1044-1051
- Sharpley, A. N., & Menzel, R. G. (1987). "The impact of soil and fertilizer phosphorus on the Environment". *Advances in agronomy*, 41:297-324
- Sigua, G.C., Novak, J.M., Watts, D.W., (2016). "Ameliorating soil chemical properties of a hard setting subsoil layer in Coastal Plain USA with different designer biochars". *Chemosphere*, 142:168-175
- Sims, J. T., Simard, R. R., & Joern, B. C. (1998). "Phosphorus loss in agricultural drainage: Historical perspective and current research". *Journal of environmental quality*, 27:277-293
- Steiner, C., Glaser, B., Teixeira, W.G., Lehmann, J., Blum,W.E.H., Zech,W., (2008a). "Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal". *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 171:893-899
- Steiner, C., Teixeira, W. G., Lehmann, J., Nehls, T., De Macedo, J. L. V., Blum, W. E. H. and 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*, 291:275-290
- Steiner, de Arruda, M.R., Teixeira, W.G., Zech, W., (2008b). "Soil respiration curves as soil fertility indicators in perennial central Amazonian plantations treated with charcoal, and mineral or organic fertilizers". *Tropical Science*, 47:218-230
- Sun, F., Lu, S. (2014). "Biochars improve aggregate stability, water retention, and pore-space properties of clayey soil". *J Plant Nutr Soil Sci*, 177:26-33
- Tag, A. T., Duman, G., Ucar, S., & Yanik, J. (2016). "Effects of feedstock type and pyrolysis temperature on potential applications of biochar". *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 120:200-206
- Tanure, M.M.C., da Costa, L.M., Huiz, H.A., Fernandes, R.B.A., Cecon, P.R., Pereira Junior, J.D., da Luz, J.M.R., 2019. "Soil water retention, physiological characteristics, and growth of maize plants in response to biochar application to soil". *Soil Tillage Res.*, 192:164-173
- Thies, J.E., Rillig,M.C., Graber, E.R. (2015). "Biochar effects on the abundance, activity and diversity of the soil biota". In: *Lehmann, J., Joseph, S. (Eds.), Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation. Routledge, London*, 6183:327-389

- Tomczyk, A., Sokołowska, Z., Boguta, P. (2020). "Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects". *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, 19:191-215
- Trompowsky, P. M., Benites, V. D. M., Madari, B. E., Pimenta, A. S., Hockaday, W. C. and Hatcher, P. G. (2005). "Characterization of humic like substances obtained by chemical oxidation of eucalyptus charcoal". *Organic Geochemistry*, 36:1480-1489
- Troy, S.M., Lawlor, P.G., Flynn, C.J.O., Healy, M.G. (2014). "The impact of biochar addition on nutrient leaching and soil properties from tillage soil amended with pig manure". *Water Air Soil Pollut.*, 225:1-15
- Ukwattage, N. L., Yuncong, L., Yandong, G., Tiantian, L., Ranjith, P. G. (2020), "Effect of Biochar and Coal Fly Ash Soil Amendments on the Leaching Loss of Phosphorus in Subtropical Sandy Ultisols". *Water Air Soil Pollut*, 231:56
- Wang, T., Arbestain, M. C., Hedley, M. and Bishop, P. (2012). "Chemical and bioassay characterisation of nitrogen availability in biochar produced from dairy manure and biosolids". *Organic Geochemistry*, 51:45-54
- Warnock, D.D., Lehmann, J., Kuyper, T.W., Rillig, M.C. (2007). "Mycorrhizal responses to biochar in soil – concepts and mechanisms". *Plant Soil*, 300:9-20.
- Weber, K., Quicker, P. (2018). "Properties of biochar". *Fuel*, 217:240-261
- Woolf, D., Amonette, J.E., Street-Perrott, F.A., Lehmann, J., Joseph, S. (2010). "Sustainable biochar to mitigate global climate change". *Nat. Commun.*, 1:1-9
- Xu, G., Sun, J., Shao, H., Chang, S.X. (2014). "Biochar had effects on phosphorus sorption and desorption in three soils with differing acidity". *Ecol. Eng.*, 62:54-60
- Yao, Y., Gao, B., Zhang, M., Inyang, M., Zimmerman, A. R. (2012). "Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil". *Chemosphere*, 89:1467-1471
- Yuan, H., Lu, T., Wang, Y., Chen, Y., Lei, T. (2016). "Sewage sludge biochar: nutrient composition and its effect on the leaching of soil nutrients". *Geoderma*, 267:17-23
- Yuan, J. H., Xu, R. K., & Zhang, H. (2011). "The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures". *Bioresource technology*, 102:3488-3497
- Yuan, J.H., Xu, R.K., Qian, W., Wang, R.H., (2011). "Comparison of the ameliorating effects on an acidic ultisol between four crop straws and their biochars". *J. Soils Sediments*, 11:741–750
- Zafeiriou, I., Karadendrou, K., Ioannou, D., Karadendrou, M.A., Detsi, A., Kalderis, D., Massas, I., Gasparatos, D. (2023). "Effects of Biochars Derived from Sewage Sludge and Olive Tree Prunings on Cu Fractionation and Mobility in Vineyard Soils over Time". *Land*, 12:416
- Zhao, D., Qiu, S. K., Li, M. M., Luo, Y., Zhang, L. S., Feng, M. H., Yuan, M. Y., Zhang, K. Q., Wang, F. (2022). "Modified biochar improves the storage capacity and adsorption affinity of organic phosphorus in soil". *Environmental Research*, 205:112-455



ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ & ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΘΗΝΑ
2023

